



วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 1906-215X

ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2561



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

วารสาร มทร.อีสาน
RMUTI JOURNAL
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน เน้นบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิชาดังต่อไปนี้

1. สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
2. สาขาวิชาเกษตรศาสตร์
3. สาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เป็นสาขาที่ศึกษาแนวความคิด ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ตั้งแต่ระดับอนุภาค ระดับโมเลกุลไปจนถึงทั้งจักรวาล ปฏิบัติทางเคมี ระหว่างอะตอมและโมเลกุล อันเชื่อมโยงถึงองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต และวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต รวมถึงแนวความคิดพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีความสำคัญและมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน ตลอดจนศึกษาถึงประเด็นของการถกเถียงที่สำคัญ ๆ เกี่ยวกับพรมแดนแห่งความรู้ ระหว่างวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับสังคม และสิ่งแวดล้อม

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064

E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ วารสาร มทร.อีสาน และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

พิมพ์ที่

บริษัท สมบูรณ์การพิมพ์ จำกัด

โทรศัพท์ 044 - 954222 - 6

จำนวนพิมพ์ 350 เล่ม เดือนเมษายน 2561

วารสาร มทร.อีสาน RMUTI JOURNAL

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ้มไขแสง

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนิวรรณ ทาสุข

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์กิตติคุณ อารัง	เปรมปรีดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมณะเศวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยหาดใหญ่
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประหลมภ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธารีย์บุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา	กอเจริญ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร	ยัมนิรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิมกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	คุลย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	94/7 หมู่บ้านนาแลนด์ ซอย 5 ถนนสุวินทวงศ์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ กาญจนา	ตันสุวรรณรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์

รองผู้อำนวยการฝ่ายบริหารงานทั่วไป

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ กาญจนา	ตันสุวรรณรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติสุดา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรดา	ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ่นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัสวสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชนิดา	แยรัมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำทล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

กองบรรณาธิการบริหาร

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.สนั่น การค้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โมษิต ศรีภูธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิต สุทธิพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเนาวิ เสาวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นายปริญญ นาชัยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาวอรุณรักษ์	ศิราชมัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นางสาววีรนุช	กูปโคกกรวด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นางสาวสุภาภรณ์	พิมสุคะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นางสาวพัชรลักษณ์	พรหมถาวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
Mr.McWinner	Yawman	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Reviews) ประจำฉบับ

ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์ขเจียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลรวรานิชพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิศ ธงทอง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกิริติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ลดาวลัย พวงจิตร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ตริโลเกศ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชน ดั่งทวีวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พุกตะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อนิรุตต์ มัทธจักร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจริย จิรคกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจมาศ ไพบูลย์กิจกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Reviews) ประจำปี (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา	พยุหะ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา	ประสาธแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์	จงสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชสรา	เกรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	ภูบัพพาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุทธนา	เกาะกิง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ดร.เจียบวุฒิ	รัตนวิไลสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ทุติยาภรณ์	จิตตะปาโล	มหาวิทยาลัยพายัพ
ดร.ธีรพจน์	ศิริไพโรจน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.บุศรารวรรณ	ไชยะ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.พัศพันธ์	ชาญวสุนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.ภูริพงศ์	สุทธิโสภณพันธ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.วิบูลย์	ป๋องกันภัย	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.อุสาคี	ต่อเทียนชัย	สถาบันการbinพลเรือน 1032/355 ถนนพหลโยธิน แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

สารบัญ

บทความวิจัย

Hybrid Genetic Algorithm for the Location - Routing Problem with Emergency Referral	1
Jarupong Banthao and Phongchai Jittamai	
Hybrid Water Pumping System for Natural Water Resources	17
Taweesak Taweewithyakarn and Worajit Setthapun	
Performance Analysis of Linear Search MLD for High Rate Full Diversity STBC in PDM-CO-OFDM	33
Kidsanapong Puntsri	
การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะใช้งานด้วยการหาค่าเหมาะสมที่สุด แบบการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง	44
ณัฐดนัย เลิศชมพู, กิตติพงศ์ ตันเมือง, อนุสรณ์ ยอดใจเพชร, และวิวัฒน์ ทิพจร	
วิธีเชื่อมโยงการเดินทางและสร้าง Tour เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองความต้องการเดินทาง ปฏิภาณ แก้ววิเชียร และลัดดา ตันวานิชกุล	57
การประเมินสภาพเชื่อมด้วยเทคนิคการวัดความเร็วคลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ	69
ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง, ชนระบ วิชาลัย, อรวรรณ จันทสุทโธ, และณรงค์เดช ยังสุขเกษม	
การวิเคราะห์ลักษณะเสียงโครงได้แผ่นกระเบื้องด้วยการแปลงฟูรีเยอร์แบบเร็ว	82
เพชรรัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์, ชัยฤกษ์ จักรพัฒน์จิต, และจันทนา ปัญญาวราภรณ์	
ชนิดและปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้ในในพื้นที่เขื่อนน้ำอูนจังหวัดสกลนคร	94
สมศักดิ์ ระย่น, สุกัญญา คำพล้า, บุญทิวา ซาดีขานี, และอมรรัตน์ รังสิวิวัฒน์	
ผลของอุณหภูมิและเวลาในการหาค่าคุณภาพของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสปาทัก้า	106
พรวาทา จันทโร, เทพกัญญา ทาญศิริวัตร, และปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์	
การศึกษาศักยภาพการปลูก ผลผลิต และการใช้ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อเป็นวัตถุดิบพลังงานทดแทนในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร จังหวัดนครราชสีมา	118
กฤษกร เข้มพิลา, ณภัทร น้อยน้ำใส, และนิรันดร์ คงฤทธิ์	
การสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยเทคนิคการแทรกซอลพร้อมกับแฮชฟังก์ชัน โดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt	136
ปริญญ์ นาโท และศิริปฐษ์ บุญครอง	
การปรับปรุงลิโอนาร์ไดต์และดินแดงเป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ	146
อาทิตย์ อัสวสุชี, คันธพจน์ ศรีสถิตย์, และตะวัน สุขน้อย	

Table of Contents

Research Articles

Hybrid Genetic Algorithm for the Location - Routing Problem with Emergency Referral	1
Jarupong Banthao and Phongchai Jittamai	
Hybrid Water Pumping System for Natural Water Resources	17
Taweesak Taweewithyakarn and Worajit Setthapun	
Performance Analysis of Linear Search MLD for High Rate Full Diversity STBC in PDM-CO-OFDM	33
Kidsanapong Puntsri	
In-Service Induction Motor Efficiency Estimation using Adaptive Bacteria Foraging Optimization	44
Nutdarnai Lerdchompoo, Kittipong Tanmuang, Anusorn Yodjaiphet, and Wiwat Tippachon	
Method of Trip-Chaining and Tour Formation for Travel Demand Model Development	57
Patiphan Kaewwichian and Ladda Tanwanichkul	
Dam Assessment by Multi-channel Analysis of Surface Wave Technique, MASW	69
Narongchai Wiwattanachang, Chanarop Vichalai, Orawan Jantasuto, and Narongdet Youngsukasem	
An Analysis of Hollow-Sounding Tiles using Fast Fourier Transform	82
Petcharat Limsupreeyarat, Chairerg Jakpattanajit, and Jantana Panyavaraporn	
Species and Biomass Distribution of Aquatic Plant in Nam Oun Reservoir, Sakon Nakhon Province	94
Somsak Rayan, Sugunya Kumla, Boonthiwa Chartchumni, and Amornrat Rangsiwiwat	
Effect of Frying Temperature and Time on the Quality of Paprika Flavored Cassava Chips	106
Prawta Chantaro, Thepkunya Harnsilawat, and Parisut Chalermchaiwat	
A Study of the Potential of Planting, Yield and Utilization of Napier Pakchong 1 Grass as Feedstock for Renewable Energy in Lam Chiang Krai Watershed, Nakhon Ratchasima Province	118
Kritsakorn Khemphila, Napat Noinumsai, and Nirun Kongritti	
An Improved Password Security Based on Salted Password and Hash Emotion using Bcrypt Algorithm	136
Parinya Natho and Sirapat Boonkrong	
Modification of Leonardite and Red Clay as Adsorbents for H₂S Removal from Biogas	146
Artit Ausavasukhi, Khantapoat Srisathit, and Tawan Sooknoi	



Hybrid Genetic Algorithm for the Location - Routing Problem with Emergency Referral

Jarupong Banthao¹ and Phongchai Jittamai^{2*}

Received: May, 2017; Accepted: June, 2017

Abstract

In this research, the location routing problem with emergency referral (LRPER) was defined to solve for (i) the number of local blood banks (LBBs) and their locations; (ii) the assignment of each hospital to each LBB; (iii) the routing from LBBs to hospitals for blood delivery. The mathematical model for LRPER was proposed to solve for the number of LBBs and their locations in such a way that the total cost is minimized and the emergency blood referrals are satisfied. LRPER, which is a special case of Location - Routing Problem, is NP-hard problem. Hybrid Genetic Algorithm (HGA) was developed to solve LRPER. A data set of 93 LBBs in the lower north-eastern provinces of Thailand was used as a case study in this research. The results shown that HGA is an appropriate method to solve LRPER giving the number of locations and routes that yield the lowest cost.

Keywords: Blood Banking; Emergency Referral; Location Routing Problem; Hybrid Genetic Algorithm; Neighbourhood Search

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

² School of Industrial Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author E - mail Address: jittamai@sut.ac.th

Introduction

The health care system is one of the most important aspect of the developed countries. Health care logistics has been increasingly aware by professionals in the medical, business and engineering fields because it can be used to improve medical services as well as reduce operating costs. Moreover, the increasing demand for health care services coupled with their importance and higher costs make it necessary to better utilize the medical resources and facilities. The human blood is one of the most important components of a health care system. Human blood is a scarce resource. It is only produced by human beings and there are currently no other products or alternative chemical process that can be used to generate blood.

The rapid increasing demand for blood, criticality of the product, storage, handling, and distribution requirements and limitations, and the different geographical locations of hospitals and medical centers have made management of blood a complex and very important problem. Moreover, many countries face the problem of increasing gap between blood need for transfusion (demand) and donor recruitment (supply). Cost of blood transfusion has been increased due to strict measures in blood safety and logistics. Therefore, an efficient management of blood logistics can cause significant impact on medical operations improvement and maximize the utilization of blood supply.

One of the most important tasks of blood logistic managers is to design an efficient and effective distribution network in order to deliver blood and blood products to hospitals with the lowest cost and in the shortest possible time frame. Blood logistics is an approach to manage and use blood effectively and efficiently. Determining locations of blood banks and distribution of blood product is a strategic decision in the blood logistics. Salhi, S. and Rand, G. K. [1] described that locations of facilities and vehicle routing are critical in any application area. The overall system cost can increase if facility locations are not considered in routing decision. Moreover, in health care system if only a small number of facilities is utilized without the consideration of locations, it may result in increases in mortality and morbidity rates [2]. Blood bank locating and blood products distribution from these blood banks to hospitals are two key components in blood logistics. Therefore, it is necessary to incorporate and compute the locations of blood banks and the vehicle routing decisions simultaneously.

The Location-Routing Problem (LRP) is closely related to the Vehicle Routing Problem (VRP) and the Facility Location Problem (FLP), both of them are shown to be NP-hard [3] - [4]. The main difference of the VRP and the LRP is the decision variables, namely, the locations of depots are decision variables in LRP. Thus, the LRP can be considered as a combination of the FLP and the VRP. For both the LRP and the FLP the locations of the depots are decision

variables. LRP considers the creation of routes when the allocation decision is made, the FLP determines direct route between the customer locations and the depots. Perl, J. and Daskin, M. S. [5] shows how the facility location decision is comprised of three interdependent components; facility location, customer allocation, and routing.

The LRP integrates the decision process to determine the optimal number and locations of facilities to be open, an optimal assignment of customers to facilities, and an optimal set of vehicle routes from facilities to customers. The objective of the LRP is to minimize the total fixed and transportation costs. The LRP belongs to the class of NP-hard problems [6]. Therefore, even heuristic methods specialized in solving this problem require a considerable computation effort.

In this study we developed the location-routing problem with emergency referral (LRPER) model to solve the problem of blood logistics, with an objective to minimize the sum of the total fixed cost of local blood banks (LBBs), the total periodic delivery costs and the emergency delivery costs. The proposed model aims to determine (i) locations and number of LBBs, (ii) assignment of hospitals to LBBs, and (iii) vehicle routing for blood distribution.

This paper is organized as follows: section 2 reviews of literature. Section 3 introduces the problem definition and assumptions. Section 4 presents the LRPER model. Section 5 proposes the HGA for solving LRPER. Computational results are given in section 6 and conclusion is given in section 7.

Literature Reviews

In the past, LRP was applied widely in various applications by Nagy, G. and Salhi, S. [7]. There are also following research that embraced LRP applications in their studies such as, parcel delivery [8] - [9], waste collection [10], newspaper distribution [11], distribution center [12], medical evacuation [13]. In the literature, the research on blood logistics focuses on the complexity of effective and efficient of blood location-allocation. Or, I. and Pierskalla, W. P. [14] considered a regional blood management problem where hospitals were assigned as regional blood banks and developed a location-allocation model to minimize the sum of the transportation and the system costs. One recent research by Şahin, G. et al. [15] presented a blood bank location model and developed several location-allocation models to solve the problems of regionalization based on a hierarchical structure method. However, both studies were carried out to demonstrate blood logistics, considering only the location of blood banks without incorporating the vehicle routing decision simultaneously in their consideration.

Incorporating the routing cost approximations in location models is an approach to solve the location routing problem (LRP). Using an integrated routing and locations

mathematical to solve the problem. One of the first mathematical approaches to the location routing problem was introduced by Laporte, G. and Nobert, Y. [16]. This research involves an exact integer programming algorithm for solving a LRP without tour length restrictions and vehicle capacity constraints. The algorithm solve a relaxed model where the integrality and subtour elimination constraints were ignored. A study by Min, H. [17] provides an exact and a heuristic approaches. The exact algorithm is based on integer programming. The heuristic approach is based on the location-allocation-first and route-second approach. Customers are clustered in such a way that the demand for each cluster does not exceed the vehicle capacity. Subsequently, the customers in these clusters are sequenced using a traveling salesman problem (TSP) algorithm to form vehicle routes. Previous researches were carried out only to determine the feasibility of exact solution without incorporating comprehensive data on emergency cost. Perl, J. and Daskin, M. S. [5] proposed a tree-phase algorithm to solve a complex LRP which accounts for variable facility throughput costs and facility throughput capacities. This approach was tested on two problems. It yielded a total cost that is only 5 % higher than the LP lower bound for smaller one, and produced substantial savings for the larger problem. Wu, T. H. et al. [18] extended Perl, J. and Daskin, M. S. [5] model to solve the location allocation problem (LAP). In order to create initial vehicle routing problem (VRP) routes. The routes are treated as if they were one “node.” These “nodes” are used to solve a new LAP. This could potentially reduce the number of warehouses and fixed costs of warehouses. Several authors have proposed the use of metaheuristics to solve the multi-depot location routing problem (MDLRP). Su, C. T. [19] applied a genetic algorithm to the design of a physical distribution system where both the location of facilities and the routing of vehicles were considered. In addition to determining the number and locations of distribution centers, the author also developed a methodology to estimate the required number of vehicles and corresponding routing. Albaread-Sambola, M. et al. [20] developed a two phase tabu search heuristic for the MDLPR with one capacitated route from each depot. In the intensification phase, the routes are optimized while in the diversification phase the set of open depots is modified. Julia, R. et al. [21] presented the model of location-routing problem along with internal transportation processes inside hubs were taken into the consideration in this problem and the model mathematical formula with linear constraints were also considered.

After a thorough review, we have found that the methodology to solve the simultaneous location and routing problems has yet to be explored, especially in the topic of emergency referral. In this research, we proposed a mathematical model for LRPER. In addition, in order to get effective results we also proposed method to incorporate location and routing and solved them simultaneously.

Location Routing Problem with Emergency Referral Model (LRPER)

In this research, the mathematical model for LRPER has been proposed. The model is extended from the LRP by Or, I. and Pierskalla W. P. [14]. Two additional conditions have been incorporated into our model, which are the blood transportation with emergency referral (ER) and operating costs for the establishment of blood bank. The proposed model is call the “location routing problem with emergency referral.” The solutions for the LRPER model are the numbers of blood banks, the sizes of blood banks, the locations of blood banks, the assignment of each hospital to appropriate blood bank and the result of the routing of blood transportation from blood banks to hospitals.

Notation

The subscripts, sets, parameters, and decision variables used in the model are described as follows:

a) Subscripts:

- i = index of LBBs
- j = index of hospitals
- k = index of vehicles

b) Sets:

- I = set of all LBBs
- J = set of all hospitals
- K = set of all vehicles

c) Parameters:

- N = number of hospitals
- d_{ij} = distance between points i and j
- f_i = fixed cost for LBB i
- e_j = number of the emergency referrals for hospital j
- q_j = average number of blood units demanded by hospital j
- Q_k = capacity of vehicle k
- V_i = capacity of LBB i
- c = cost per kilometer of a delivery vehicle

d) Decision variables:

- x_{ijk} = 1, if point i precedes point j on vehicle k ; 0 otherwise.
- y_{ij} = 1, if hospital j is allocated to LBB i ; 0 otherwise.
- z_i = 1, if LBB i is established; 0 otherwise.
- R_i are continuous variables used in the subtour breaking constraints.

Mathematical model formulation

The mathematical model formulation of the LRPER is:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} f_i z_i + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c \cdot d_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c \cdot e_j \cdot d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Subject to;

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} x_{ijk} = 1, \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} q_j \sum_{i \in I} x_{ijk} \leq Q_k, \forall k \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \forall k \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} - \sum_{j \in J} x_{jik} = 0, \forall k, \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} q_j y_{ij} - V_i z_i \leq 0, \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} - z_i \geq 0, \forall i \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} - z_i \leq 0, \forall i, \forall k \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} - \sum_{i \in I} x_{jki} = 0, \forall j, \forall k \quad (9)$$

$$R_i - R_j + (R + N) \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq R + N - 1, \forall i, i \neq j \quad (10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, \forall j, \forall k \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, \forall j \quad (12)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \forall i \quad (13)$$

In this formulation, the objective function (1) minimizes the sum of fixed cost of LBBs, periodic delivery costs, and emergency referral delivery costs. Constraint (2) requires that each hospital has been assigned to a single LBB. Constraint (3) ensures that the vehicle capacity is not exceeded. Constraint (4) guarantees that each vehicle is routed from at most one LBB. The continuity of the routes and return to the original LBB is guaranteed through constraint (5). Constraint (6) ensures that the LBB capacity is not exceeded. Constraints (7)

and (8) assure that vehicles must initiate from an opened LBB. Constraint (9) assures that a vehicle leaves and arrives in the same LBB. Constraints (10) are the subtour elimination constraints which guarantee that each tour must contain a LBB from which it originates. Finally, constraints (11), (12), and (13) specify the binary variables used in the formulation.

Hybrid Genetic Algorithm (HGA)

Genetic Algorithm for Location Routing Problem

As mentioned earlier, the LRP can be viewed as an integration of two NP-hard optimization problems where each individual problem is, by its own, difficult to solve. In this research, we propose a genetic algorithm (GA) to solve LRPER. GA is in fact a population-based metaheuristic, which has been proved very powerful to solve many large scale problems [11]. GA can avoid getting trapped in a local optimum by the aid of the genetic operations called mutation. The basic idea of GA is to maintain a population of candidate solutions that evolves under selective pressure. In recent years, GA has been applied successfully to a wide variety of hard optimization problems. The success is mainly due to its simplicity, easy operation, and great flexibility. These are the major reasons why GA is selected as a computation tool in this research.

A. Chromosome representation

Surekha, P. and Sumathi, S. [22] indicated that the design of chromosomes is the first step, and it is one of the step of GA which is important because the design of chromosomes will have a direct effect on the speed in finding the optimal solution. In this research, the representation of a chromosome has to reflect the properties of the LRPER and describe the location of blood banks and the route of a vehicle. Figure 1 shows the representation of a chromosome (10 hospitals and 3 LBBs). Row A_1 represents the number of LBBs. And row B_1 represents the routing of the vehicle. For example, feasible hospitals to be served by LBB#1 are $a_6 = a_7 = a_8 = a_{10} = 1$, and routing for LBB#1 are 6 - 8 - 7 - 10 - 6.

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
A_1	3	2	2	3	3	1	1	1	3	1
B_1	4	6	8	2	3	1	5	7	9	10

Figure 1 The representation of a chromosome

B. Initial population method

The initial population method simultaneously both location set of LBBs and set of vehicle routes from LBB to hospitals by a random generation method. The random generation method gives solutions created from random numbers and a global search. Figure 2 shows three chromosomes an example of initial population generated.

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
A_1	3	2	2	3	3	1	1	1	3	1
B_1	4	6	8	2	3	1	5	7	9	10
A_2	1	3	1	3	3	1	2	1	1	2
B_2	9	10	3	7	6	8	2	4	5	1
A_3	2	1	1	3	2	3	1	3	3	1
B_3	5	8	2	1	10	4	3	6	9	7

Figure 2 An example initial population generated by random generation method

C. Fitness function

For the LRPER, the fitness function should minimize the total costs. The evaluation of fitness function F_{EVAL} is defined as the sum of three types of cost (based on objective function): i) fixed costs of LBBs (FC_{LBB}); ii) periodic delivery costs (PDC); and iii) emergency delivery costs (EDC). Therefore, $F_{\text{EVAL}} = FC_{\text{LBB}} + \text{PDC} + \text{EDC}$.

D. Selection

The roulette wheel selection operation is adopted to choose some chromosomes to undergo genetic operations. The approach is based on an observation that a roulette wheel which has a section allocated for each chromosome in the population, and the size of each section is proportional to the chromosome's fitness. The better fit the chromosome is the higher the probability of being selected will be.

E. Genetic Operation

The crossover operation swaps parts of two parents in the population in order to generate offsprings. The crossover is made in hope that an offspring will inherit good parts of old chromosomes. There are many ways to do crossover, and this approach is able to improve the problem by producing offsprings that yield better results. Our crossover operator is applied to both row A (location) and row B (routing). For row A, we randomly select a point to crossover. An offspring is then obtained by appending the beginning of the first parent to the end of the second parent. For row B, we follow the crossover procedure of [12]. First, we select one crossover point and the permutation is copied from the first parent to this point, then the second parent is scanned. If the hospital is not yet in the offspring, it will be added to the offspring. For clarity, let us consider an example as depicted by Figure 3.

F. Compare and replacement

Comparing the quality of two individual chromosomes is important in GA. The replacement of offsprings is the last phase in GA. It consists of maintaining the population size constant. Many existing methods are available in the literature to choose which individual to be removed from the population, such as random replacement or weak parent replacement. In the proposed algorithm, once a new offspring is created (using the GA operators), it is compared to the worst individual in the population. Then the best one is simply kept inside the population.

Hybrid Genetic Algorithm for Location Routing Problem with Emergency Referral

To solve a location-routing problem, there is a need to solve a facility location problem (FLP) and a vehicle routing problem (VRP). Both problems are classified as NP-hard problems [14]. Hence, the LRP is also NP-hard. The LRPER can be viewed as an extension of the capacitated LRP. Derbal, H. et al. [23] proposed a hybrid genetic algorithm (HGA) to solve capacitated LRP. Nevertheless, it is appropriate to develop HGA - based heuristic to solve LRPER.

The procedure of the HGA considers the initial population by using random generation and heuristic techniques. The flowchart of two algorithms, HGA1 and HGA2, for the LRPER is shown in Figure 4. The difference between HGA1 and HGA2 is that HGA1 also hybridizes the greedy random and nearest heuristic to generate initial population. HGA2 hybridizes an improved heuristic, called the neighborhood search. The procedures of HGA1 and HGA2 are described as follows: The HGA generates the initial chromosomes of the problem. Each chromosome contains two sets, A is the set of locations and B is the set of routing in the LRPER. In HGA1, the chromosomes are generated by greedy random and nearest heuristic. Each chromosome is then measured by an evaluation function. The roulette wheel selection operation is adopted to select some chromosomes for the genetic operations, including the order crossover, and the inversion mutation. For HGA2, after new chromosomes or offspring are produced, these chromosomes are improved by the neighborhood search (insertion method and two-opt method). The fitness of the offspring is measured and the offspring may become a member of the population if it possesses a relatively good quality. Then, the roulette wheel selection is performed again to repeat the whole iterations. The HGA will not stop unless the predetermined number of iterations is completed.

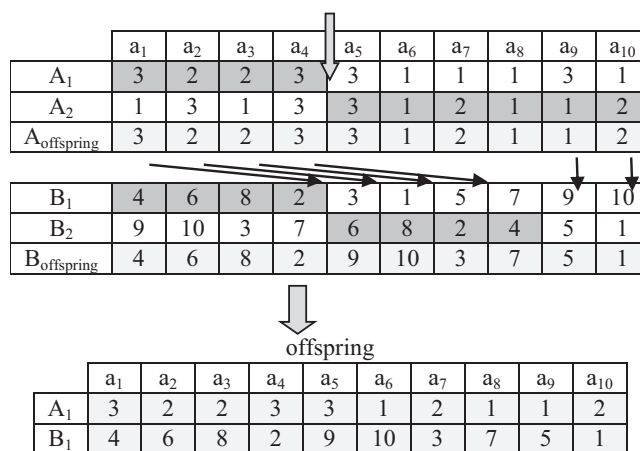


Figure 3 Crossover operations for the permutation row.

Fitness function

For the LRPER, the fitness function should minimize the total costs. The evaluation of fitness function F_{EVAL} is defined as the sum of three types of cost (based on objective function): i) fixed costs of LBBs (FC_{LBB}); ii) periodic delivery costs (PDC); and iii) emergency delivery costs (EDC).

$$F_{EVAL} = PDC \quad (14)$$

$$F_{EVAL} = FC_{LBB} + PDC + EDC \quad (15)$$

Problem instances are evaluated using (14) and the test problems as well as real problems are evaluated by (15). Then, the selected initial population are evaluated by roulette wheel method in order to obtain location chromosomes and routing chromosomes.

Computation Results of HGA in LRPER

This section explains the heuristic test in the real problem, which has already been mentioned in some parts of section 1. Real problem used as the case study is the case of Regional Blood Bank V (RBC V). There are 4 provinces that are under the responsibility and care of RBC V. The number of population of these four provinces is approximately 6,740,000 or 10.36 % of the whole population in Thailand. RBC V serves blood approximately 1,200 units per week.

Computational experiments were performed using various data sets from RBC-V of the Thai Red Cross Society, consisting of 93 hospitals. All hospitals are candidate LBBs. The proposed HGA described in the previous section was coded in MATLAB on a computer with Intel Core i5-3210 CPU 2.50 GHz and 4 GB memory.

The first step of this heuristic test method is to compare results similar to section HGA. It is to compare the results of real problem solving done by GGA, HGA1 and HGA2. Then, the computation results will be shown. Details of results include the following information.

Results Comparison

Test results received from solving the LRPER problem, which is the real problem, done by GGA, HGA1 and HGA2 methods are not different from the test results received from solving the problem instances and test problems. It can be said that HGA2 is the algorithm that yields the best result and can be used to solve LRPER with efficient results.

Results Description

From the results shown in table 1 indicating that HGA2 is the heuristic approach that yields the best solution, therefore further result description received from HGA2 will be

explained in this section. This includes the list of hospitals chosen to be setup as LBBs, the list of hospitals allocated for each LBB, and the routes for transportation. See more explanation below:

i) Hospitals chosen to be setup as LBBs. With the result of solving LRPER problem done by HGA2, it is found that there are 14 hospitals chosen to be setup as LBBs. 5 in Nakhon Ratchasima and 3 in Chaiyaphum, 3 in Buriram and 3 in Surin. Further details can be seen in table 2.

ii) Allocation of hospitals for each LBB. Results of hospital allocation for each LBB are arranged according to the province area as shown in table 3. For example in Nakhon Ratchasima, LBB 2 is responsible to transport blood for hospital 1, 3, 10, and 13.

iii) Blood transportation route arrangement of each route. Results of blood transportation route from LBBs to each of hospital, allocated for each LBB, is arranged according to the province area as shown in table 4. An example of the route arrangement result is as follows. In Nakhon Ratchasima, blood transportation route 1 start from LBB 7, then out to deliver blood to hospitals 8 - 17 - 4 - 6 respectively. After the completion, the blood delivery vehicle returns to LBB 7.

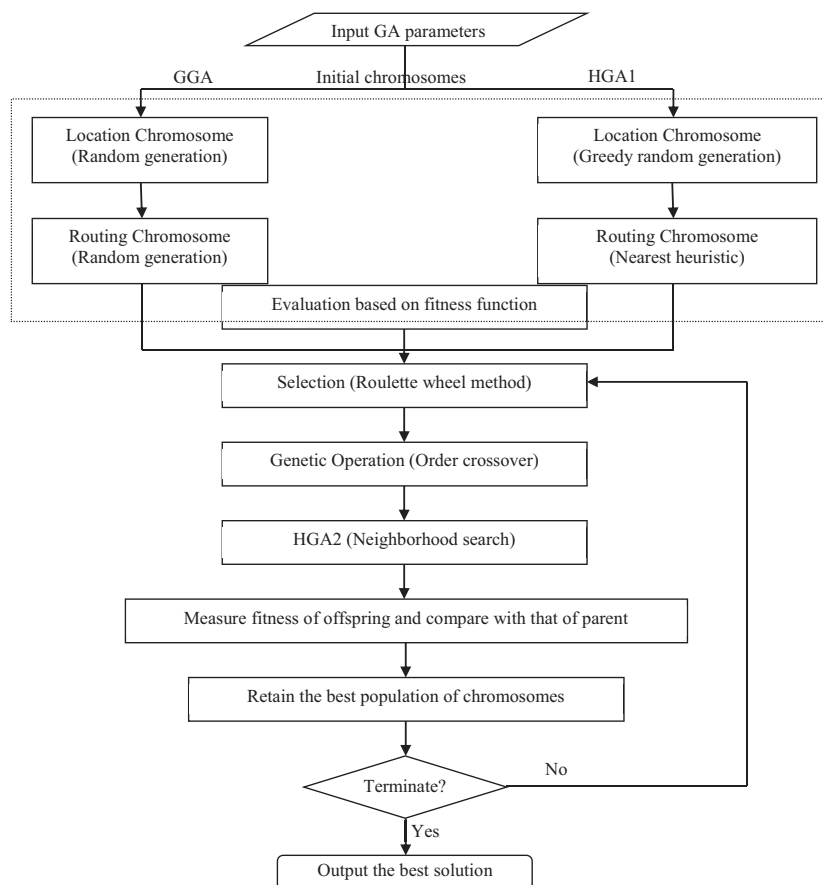


Figure 4 The flowchart of HGA1 and HGA2

Table 1 Computation results compared between GGA, HGA1 and HGA2 in real problem

Province	Min. Cost			%Gap1	%Gap2	%Gap3
	GGA	HGA1	HGA2			
Nakhon Ratchasima	23,049	20,695	17,532	10.21	23.94	15.28
Chaiyaphum	9,025	7,864	7,804	12.86	13.53	0.76
Buriram	13,207	10,564	10,350	20.01	21.63	2.03
Surin	8,529	8,213	7,932	3.71	7.00	3.42
Total Min. Cost	53,809	47,335	43,617			
Average				11.70	16.52	5.37

Table 2 Hospitals chosen to be setup as Location Blood Banks

Province	Hospital to be setup as LBB	Total LBBs
Nakhon Ratchasima	2, 14, 7, 21, 29	5
Chaiyaphum	11, 2, 5	3
Buriram	3, 20, 9	3
Surin	9, 12, 11	3

Table 3 Allocation of hospitals for each LBB

Province	LBB No.	Hospital No.
Nakhon Ratchasima	2	1, 3, 10, 13
	7	4, 6, 8, 17
	14	5, 11, 12, 16, 18, 19, 24, 25, 26, 27, 28
	21	9, 15, 20, 22
	29	23, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	11	12, 15, 14, 17, 16, 10, 9, 8, 7
Chaiyaphum	2	3, 4, 6
	5	13
	3	2, 5, 6, 7, 12
Buriram	20	14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24
	9	1, 4, 8, 10, 11, 13, 19
	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8
Surin	12	7, 13, 14, 15, 16
	11	10

Table 4 The route for transportation

Province	Route No.	Route Arrangement
Nakhon Ratchasima	1	7-8-17-4-6-7
	2	21-20-22-15-9-21
	3	29-31-30-23-33-32-34-36-35-29
	4	2-1-3-10-13-2
	5	14-18-16-19-12-11-24-25-26-27-28-5-14
Chaiyaphum	1	11-12-15-14-17-16-10-9-8-7-11
	2	2-3-4-6-1-2
	3	5-13-5
Buriram	1	3-2-5-12-6-7-3
	2	20-18-17-14-16-15-21-23-24-22-20
	3	9-8-10-11-4-1-13-19-9
Surin	1	9-8-5-4-3-2-6-1-9
	2	12-15-13-14-16-7-12
	3	11-10-11

Conclusions

Blood logistics is an approach to manage and use blood effectively and efficiently. Determining locations of blood banks and distribution of blood products are crucial for a strategic decision making in the blood logistics. Locations of facilities and vehicle routing planning are critical in any application area. The overall system cost will increase if facility locations are not considered in routing decision. Moreover, operating a small number of blood banks without considering the locations may lead to increasing of mortality and morbidity rates. Thus, blood bank locating and blood product distribution from these blood banks to hospitals are two key components in blood logistics. Therefore, it is necessary to incorporate and compute the locations of blood banks and the vehicle routing decisions simultaneously.

The LRP integrates the decision process to determine the optimal number and locations of facilities, an optimal assignment of customers to facilities, and an optimal set of vehicle routes from facilities to customers. In this research, we propose a mathematical model for location-routing problem with emergency referral (LRPER), which is an integer programming model. The objective is to minimize the total cost of fixed costs of LBBs, periodic delivery costs, and emergency referral delivery costs. We introduced a Hybrid Genetic Algorithm (HGA) to solve the LRPER. HGA can solve the location of blood banks and vehicle routing for blood

distribution decisions simultaneously. HGA is based on chromosomes representing both the number of LBBs and the routing of the vehicles. Our HGA include HGA1 and HGA2. GA1, was developed based on GGA procedure with added greedy and nearest heuristics into location chromosomes and routing chromosomes, respectively. HGA2 was developed based on HGA1 procedure and additional solution improvement procedure using neighborhood search method (insertion move and two-opt move). This research also compares the results of HGA1 and HGA2 to GGA using known problem instances and our test problems. Results indicate that the HGA2 yields a stability that shows better solutions on average.

We developed genetic algorithm-based heuristic procedure to solve LRPER. We tested the performance of this heuristic by comparing it to the general genetic algorithm for problem instances and test problems. We find genetic algorithm-based heuristic procedure to be very efficient. It can be easily extended to other classes of the location routing problem. However, direct comparisons with other meta-heuristics could not be made due to lack of available of data or code.

The primary objective of this research has been the development of a location-routing framework which can be used to improve distribution system design. The complexity of this problem has resulted in a lack of solution techniques to the problem. Almost all of the previous research in the area has concentrated on solving either the location problem or the vehicle scheduling problem. The need to provide solution procedures to the actual problem of simultaneous location-routing exists. It is hoped that this research covers some of that ground and provides some impetus to move further in that direction.

As a consequence of these studies, several points of interest have been brought out for further study. First is an investigation of the application of hybrid genetic algorithm to large-scale location routing problems. Second, we recommend incorporating modification HGA with other heuristic techniques to generate a population of initial chromosomes and comparing solution with other meta-heuristics for robust and efficient evaluation. Finally, further improvements in the LRPER model may be brought by considering uncertainty in future operating costs and vehicle travel times.

References

- [1] Salhi, S. and Rand, G. K. (1989). The Effect to Ignoring Routes when Locating Depots. **European Journal of Operational Research**. Vol. 39, No. 2, pp. 150-156. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90188-4
- [2] Daskin, M. S. and Dean, L. K. (2004). **Location of Healthcare Facilities**. In: **Sainfort F, Bradean M, Pierskalla W, Editors**. Handbook of OR/MS in Health Care: A Handbook of Methods and Applications. USA: Kluwer. pp. 43-76

- [3] Cornuejols, G., Fisher, M. L., and Wolsey, L. A. (1977). Location of Bank Accounts to Optimize Float: an Analytic Study of Exact and Approximate Algorithms. **Management Science**. Vol. 23, No. 8, pp. 789-810
- [4] Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan, A. H. G. (1981). Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. **Networks**. Vol. 11, Issue 2, pp. 221-227. DOI: 10.1002/net.3230110211
- [5] Perl, J. and Daskin, M. S. (1985). A Warehouse Location-Routing Problem. **Transportation Research B**. Vol. 19B, No. 5, pp. 381-396
- [6] Yu, V. F., Lin S. W., Lee W., and Ting C. J. (2010). A Simulated Annealing Heuristic for the Capacitated Location Routing Problem. **Computer and Industrial Engineering**. Vol. 58, No. 2, pp. 288-299
- [7] Nagy, G. and Salhi, S. (1999). Location-Routing: Issues, Models and Methods and Methods. **European Journal of Operational Research**. Vol. 177, No. 2, pp. 649-672
- [8] Bruns, A., Klose, A., and Stähly, P. (2000). Restructuring of Swiss Parcel Delivery Service. **R Spektrum**. Vol. 22, Issue 2, pp. 285-302
- [9] Wasner, M. and Zäpfel, G. (2004). An Integrated Multi-Depot Hub Location Vehicle Routing Model for Network Planning of Parcel Service. **International Journal of Production Economics**. Vol. 90, pp. 403-329
- [10] Kulcar, T. (1996). Optimizing Solid Waste Collection in Brussels. **European Journal of Operational Research**. Vol. 90, Issue 1, pp. 26-44
- [11] Madson, O. B. G. (1983). Methods for Solving Combined Two Level Location Routing Problems of Realistic Dimensions. **European Journal of Operational Research**. Vol. 12, Issue 3, pp. 295-301
- [12] Aksen, D. and Altinkemer, K. (2008). A Location-Routing Problem for the Conversion to the Click-and-Mortar Retailing. **European Journal of Operational Research**. Vol. 186, No. 2, pp. 554-575
- [13] Chan, Y., Carter, W. B., and Burnes, M. D. (2001). A Multiple-Depot, Multiple-Vehicle, Location-Routing Problem with Stochastically Processed Demands. **Computers and Operations Research**. Vol. 28, Issue 8, pp. 803-826
- [14] Or, I. and Pierskalla, W. P. (1979). A Transportation Location-Allocation Model for Regional Blood Banking. **AIIE Transactions**. Vol. 11, No. 2, pp. 86-95
- [15] Şahin, G., Süral, H., and Meral, S. (2007). Location Analysis for Regionalization of Turkish Red Crescent Blood Services. **Computer and Operations Research**. Vol. 34, Issue 3, pp. 692-704
- [16] Laporte, G. and Nobert, Y. (1981). An Exact Algorithm for Minimizing Routing and Operating Costs in Facility Location. **European Journal of Operation Research**. Vol. 6, pp. 224-225

- [17] Min, H. (1996). Consolidation Terminal Location-Allocation and Consolidated Routing Problem. **Journal of Business Logistics**. Vol. 17, No. 2, pp. 235-263
- [18] Wu, T. H., Low, C., and Bai, J. W. (2002). Heuristics Solutions to Multiple-Depot Location-Routing Problems. **Computers and Operations Research**. Vol. 29, Issue 10, pp. 1393-1415
- [19] Su, C. T. (1999). Dynamic Vehicle Control and Scheduling of a Multi - Depot Physical Distribution System. **Integrated Manufacturing Systems**. Vol. 10, Issue 1, pp. 56-65
- [20] Albaread-Sambola, M., Diaz, J. A., and Fernandez, E. (2005). A Compact Model and Tight Bounds for a Combined Location Routing Problem. **Computers and Operations Research**. Vol. 32, Issue 3, pp. 407-428
- [21] Julia, R., Ehrenberg, C., and Zimmermann, J. (2014). Many-to-Many Location-Routing with Inter-Hub Transport and Multi-Commodity Pickup-and-Delivery. **European Journal of Operational Research**. Vol. 236, Issue 3, pp. 863-878
- [22] Surekha, P. and Sumathi, S. (2011). Solution to Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using Genetic Algorithms. **World Applied Programming**. Vol. 1, No. 3, pp. 118-131
- [23] Derbal, H., Jarbou, B., Hanafi, S., and Chabchoub, H. (2012). Genetic Algorithm with Iterated Local Search for Solving a Location-Routing Problem. **Expert Systems with Applications**. Vol. 39, No. 3, pp. 2865-2871



Hybrid Water Pumping System for Natural Water Resources

Taweesak Taweewithyakarn¹ and Worajit Setthapun^{1*}

Received: May, 2017; Accepted: June, 2017

Abstract

The main goal of this paper was to develop the appropriate water pumping system for natural water sources in Northern Thailand. Optimal pumping volume flowrate and head was the target of the water pumping system development. Three types of pumping systems were evaluated with the prototype water sources, namely, Hydraulic Ram Pump (H.R.P.), Water Wheel Pump (W.W.P.) and Hybrid Water Pump (H.W.P.). For the overall performance, H.R.P. and W.W.P. provided delivery head of 3 - 13 m, evaluated with the prototype waterfall and stream. The inlet flowrate had little effect on H.R.P., because higher inlet flowrate resulted in higher water loss without discharge increased. However, when the inlet flowrate was less than 100 L/min, H.R.P. was not be able to pump water. When the supply head increased from 2 to 5 m, the discharge and delivery head also increased significantly. For the W.W.P., the supply head of the waterfall did not affect the performance of the pump. The appropriate operating velocity were at 0.5 - 1.5 m/s to yield discharge of 10 - 14 L/min which was higher than H.R.P. by 1 - 13 L/min. Greater velocity than 1.5 m/s could not provide higher discharge or delivery head. The performance of H.W.P. was the combination of the performance from H.R.P. and W.W.P. The waste water from the H.R.P. would be reused for the W.W.P. with the combined H.W.P. system. Therefore, the natural water could then be fully utilized. H.W.P. could be used in the remote area without electricity access. The natural water pumps could be

¹ Asian Development College for Community Economy and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author E - mail Address: worajit@cmru.ac.th

operated continuously and use clean energy from nature. This system could be used in other applications such as maintaining the watershed, creating moisture in the forest, preventing forest fire, and treating air and waste water.

Keywords: Hydraulic Ram Pump; Water Wheel Pump; Hybrid Water Pump; Mechanical Efficiency

Introduction

All natural sources of water on earth originated from rain [1]. Some portion of the precipitation remains above the ground and some seeps into the ground to replenish Earth's ground water. When the quantity of water is too much, it will saturate the ground and is able to move underground through rocks and soil. The water flows from higher ground to lower ground and it eventually creates streams and rivers before they flow into the ocean. Most of the natural water sources are used for agricultural activities such as farming and plantations. Most of the water comes from streams, canals, swamps, wetlands, dams, rivers, and underground water. The method used to move water into agricultural areas is electronic pumping system or other mechanic devices that use fossil fuel - the energy resource that causes pollutions. Therefore, there have been numerous experiments regarding the alternative energy sources from natural sources in recent years. As for water resources, there also have been the attempts to find and use water as an alternative energy source as well. The natural water sources which have been used in the experiments are the water sources that possess water velocity such as waterfalls and weirs. Such water sources can be used as an efficient energy generator more than other kinds of water sources [2]. Most of the waterfalls and weirs in Thailand have the height of 1 - 10 m. The technology that is used with water sources that flow from high point to lower point is Hydraulic Ram Pump (H.R.P.). It is a system that employs the Water Hammer Principle. There are some advantages of using this system. It does not need any fossil fuel or any kind of fuel to drive the system, and it possesses fewer numbers of mechanical gears and parts. That is why it is inexpensive. It can be easily installed and it is also very easy to maintain. Until recent years, there have been many researchers who have attempted to conduct experiments on the system for agricultural activities. Shuaibu and coworkers designed and created H.R.P. system which could pump water from the level of 2 m above the ground with the velocity of water flow of 3.7 L/min without using external energy [3]. The system could pump the water to a height level of 9 m [1]. Nirun and coworkers also designed and evaluated the H.R.P. system to achieve 10 m height with 15.75 L/min [4]. In addition, Akarat and coworkers determined and improved the performance of hydraulic ram pump to achieve pump height of 18 m and 21.4 L/min from the starting water of 5 m [5].

Using H.R.P. system with waterfall or weir that has low level of height provides low quantity of water. The quantity of water pumped into the system does not match the quantity of water that can be used. The water sources that flow from high ground to lower ground could create energy from their current, such as stream, canals, rivers, and irrigation canals for agricultural activities by the Royal Irrigation Department. The normal current speed of those water sources is approximately 0.5 - 2.0 m/s. Several research groups studied ways to harvest energy from the water flow. Akhyar Ibrahim and coworkers conducted a study in Indonesia regarding a water wheel that was made by hardwood with a diameter of 300 centimeters and 40 centimeters wide [6]. The wheel was installed in a river and it could bring water up to a height of 3 m from the water surface. The water was then sent into the system via bamboo pipe. As for streams, energy from the current and water velocity could be used to pump up the water. Peter Morgan designed the Spiral Tube Water Wheel Pump system with the diameter of 4 m which could pump water up to the level of 8 m [7]. The flow rate that could be used to pump the water was 3,697 L/hr. Duangtit and coworkers studied the performance of the vertical water wheel that achieved 1,500 L/hr with delivery head of 10 m [8]. Bunyat and coworkers also reported the efficiency of W.W.P. with inlet head of 3 m and achieved 15 m delivery head with the factor of water discharge of 33.47 - 77.24 % [9]. Morgan also created the spiral tube model with 20 m length and 25 mm diameter with total wheel diameter of 2 m. This model could provide 78 L/hr for every rotation of the W.W.P. [7].

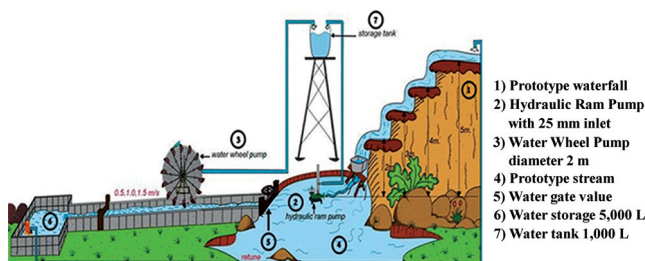
The system was developed from ancient rotor wheel technology. When the coiled tubes were applied to the rotor wheel, thus created the Water Wheel Pump system (W.W.P.) which could pump the water to higher level. When compared to the W.W.P. system with the H.R.P. system, it was found that the system could pump up more quantity of water with lower level of pumping ability.

The current situation and problems of the water pumping system which were previously described revealed both advantages and disadvantages of both W.W.P. and H.R.P. systems. The H.R.P. system had higher operational capability but could carry lower water quantity, which was the opposite to the W.W.P. system which could pump up more water with lower level of pumping ability. Both systems had common purpose which was to pump up water, moreover, both systems require the same energy from the water flow. The difference between both systems were body equipment, installation method, and operating system. After weighing the pros and cons between the two systems, it led to the main goal of this study. Integration of both the Hydraulic Ram Pump system and the Water Wheel Pump system to create a Hybrid Water Pump could reduce the disadvantages and enhance the advantages from both systems.

In this work, the performance of the systems were evaluated in terms of discharge, delivery head, and the Mechanical Efficiency from the natural water sources. The experiment could be applied to harvest the energy from the water that falls from high ground such as small weirs and small waterfalls and compared to the electric engine technology. The Water Hammer principle were applied to the H.R.P. system to pump up the water. The water that falls from high ground had energy which allowed the system to pump the water up to 1 - 2 times higher level than the level where the water fell from. The water sources that had water flow such as rivers, streams, and canals were experimented with W.W.P. system. This study examined the appropriate variables, conditions and technologies for pumping up the water in natural sources. The natural water sources and the pumping system used in the local area were designed and constructed prototype waterfalls with a height of 2 - 5 m with installed Hydraulic Ram Pump system to pump up the water to different levels. The researcher also made a prototype river with a size of 1 m wide, 10 meters long and with the adjustable water flow speed of 0.5 - 1.5 m/s. After that, the researcher installed a 2-m diameter W.W.P. system in the prototype river and conduct pumping experiment using various levels of water velocity. Height levels and water quantities including the system's performance were collected to determine the relation of various variables. The results of the experiment were used as the reference data for agricultural activities to save energy, reduce cost and pollution, and to use it as the guideline for communities in the countryside to be able to use pumping system that uses energy from natural sources or renewable energy for agricultural activities.

Research Methodology

The H.R.P. and W.W.P. were installed at the prototype water sources which are shown in Figure 1. The overall total experiments for the prototype water sources evaluation were 510 experiments. The description of the experimental designed is described in Table 1. The H.R.P. experiment was set up with the prototype waterfall. During the experiment, H.R.P. with 25.4 mm inlet was tested with the waterfall of 4 tiers at 2, 3, 4, and 5 m with the inlet water flowrate of 100, 150 and 200 L/min. The evaluations were conducted with 10 replications for each condition with the total of 120 experiments. Figure 2 shows the method for verifying the water inlet flowrate at each supply head. The water from the waterfall entered the H.R.P., afterwards, the discharge and delivery head was measured. For the water pump evaluation, the 1,000 L water storage tank was installed at 10 m height. The height and size of the storage tank was common for agricultural usage because it provided the water pressure of 1 bar which was sufficient for farming and other applications.



(a) Hybrid water pump schematic diagram



(b) Pictures of Prototype Water Sources

Figure 1 Hybrid water pump schematic diagram and pictures of prototype water sources**Figure 2** Data collection of water inlet flowrate at various supply head, discharge volume and 10 m delivery head

The excess water from H.R.P. flowed through the prototype stream to the W.W.P. At the prototype stream, the water velocities were varied from 0.5, 1.0 and 1.5 m/s and the testing were conducted with 10 replications for each condition with the total of 30 experiments. W.W.P. had the diameter of 2 m, width of 40 cm, and during testing, the paddle was 30 cm beneath the water surface.

Hybrid Water Pump system was installed with the prototype water sources of waterfall and stream. The experiment was designed to evaluate the performance of the combined pumps to enhance the discharge volume and increase the delivery head. For the testing, the water flowrates were varied at 100, 150 and 200 L/min and dispensed from the prototype waterfall tier of 2, 3, 4, and 5 m. In addition, the velocities of the prototype stream were varied as 0.5, 1.0 and 1.5 m/s.

Therefore, the total experiments were varied for 36 conditions with 10 replications totalling 360 experiments. The reported outputs were delivery head and discharge volume at each delivery head. Then the pump efficiencies were calculated based on the discharge volume and input flowrate.

Table 1 Experimental design with operating variables and performance output for prototype water source testing

Water sources Pump system	Inlet Variable	Performance Output	Remark
Prototype waterfall/ Hydraulic Ram Pump	Supply head $h = 2, 3, 4, 5$ m Inlet Flowrate $q = 100, 150, 200$ L/min	Discharge (Q) (L/min) Delivery head (H) (m) Mechanical efficiency (%) D'aubuisson's Efficiency (%) Rankine Efficiency (%)	Total 120 experiments
Prototype stream/ Water Wheel Pump	Velocity $v = 0.5, 1.0, 1.5$ m/s	Discharge (Q) (L/min) Delivery head (H) (m) Mechanical efficiency (%)	Total 30 experiments
Prototype waterfall and stream/ Hybrid Water Pump	Supply head $h = 2, 3, 4, 5$ m Inlet Flowrate = $q = 100, 150, 200$ L/min Velocity $v = 0.5, 1.0, 1.5$ m/s	Discharge (Q) (L/min) Delivery head (H) (m) Mechanical efficiency (%)	Total 360 experiments

Results

H.R.P. with prototype waterfall

The Hydraulic Ramp Pump experiment was set up with the prototype waterfall. The results for the discharge volume in Figure 3(a) revealed that with increasing supply head from 2 to 5 m, increasing amount of discharged was acquired from minimum of 1 L/min to maximum of 12 L/min. The range of accumulated discharge also varied based on supply head. With low impact energy at supply head of 2 m, the range of discharge was about 1 - 5 L/min. With higher impact energy at supply head of 5 m, wider range of discharge was observed at 1 - 12 L/min. However, increasing the inlet water flowrate from 100 to 200 L/min did not affect the amount of discharged. The maximum discharge accumulation was only about 10 % of the total flowrate (100 L/min). The amount of water was significantly lost and was not utilized because of the discharge flowrate with increased inlet flowrate.

This observation was one of the disadvantage of the H.R.P. application that could not fully utilize the pump with high flowrate of waterfall. Therefore, in this work, hybrid system was then designed in the next part to minimize the disadvantage and improve the quantity of usable discharge flowrate.

With regards to the usable delivery head of the H.R.P., Figure 3(b) revealed similar trend as the discharge flowrate. The delivery head increased from approximately minimum of 3 m to maximum of 14 m with increasing supply head from 2 to 5 m. The range of the delivery head also widened as supply head increased. However, inlet flowrate did not have any effect on the height of the delivery head. So, in order to achieve higher delivery head, other type of pump must be integrated to fully utilized the loss water to facilitate the delivery head.

Figure 4 describes the pump efficiencies of H.R.P. From the water inlet flowrate of 100 L/min, it could be seen that the maximum height of the pumped water was 5 m which provided mechanical efficiency of 13.16 %. When the water inlet flowrate reached 150 and 200 L/min, the mechanical performance decreased, because the water trays had the maximum capacity for only 100 L/min. Therefore, when the water quantity was more than 100 L/min, the water overflowed the tray and mechanical performance decreased. Similar result trends were observed with the evaluation of Rankine and D'aubuisson's Efficiency. When compared with the efficiencies at the condition of 5 m and 100 L/min, the values of the 3 efficiencies were 13.16, 14.79, and 24.13 % for Mechanical, Rankine and D'aubuisson's Efficiency, respectively. Mechanical efficiency was calculated from the overall efficiency of water inlet and outlet. D'aubuisson's efficiency calculated the kinetic energy, potential and impact energy. In addition, Rankine calculated only the impact energy, therefore the value was lower than D'aubuisson efficiency. In addition, this result was similar to the result of the experiment conducted in a laboratory. Overall, for the system to start working, it depended on the water flow rate. If the flow rate was less than 100 L/min, the pumping system was not be able to start working. With the case of high flow rate, the water loss increased.

W.W.P with prototype stream

The Water Wheel Pump experiments were evaluated with the prototype stream. The results are shown in Figure 5 for the effect of water velocity with discharge, delivery head and mechanical efficiency. For W.W.P. experiment, only Mechanical Efficiency was relevant and calculated. W.W.P. did not have impact energy and therefore Rankine and D'aubuisson's Efficiency was not be applied. Figure 5(a) shows that at water velocity of 0.5 m/s, the discharge was recorded at 3 - 6 L/min of water. When the water velocity was doubled to 1.0 m/s, the discharge increased significantly to approximately 6 - 15 L/min. However, with increasing velocity to 1.5 m/s, the discharge did not increase prominently. It was observed that with high velocity stream, the paddle moved quickly, thus provided less time to bail a larger quantity of water. Therefore, the optimal water velocity was at 1.0 m/s. Higher velocity could not provide

more discharge and resulted in higher quantity of water loss. Regarding the delivery head, water velocity of 0.5 m/s provided the delivery head of the pumped water at 3 - 8 m (Figure 5(b)). When the water velocity was increased to 1.0 and 1.5 m/s, the delivery head increased linearly. The range of the delivery head increased with higher velocity.

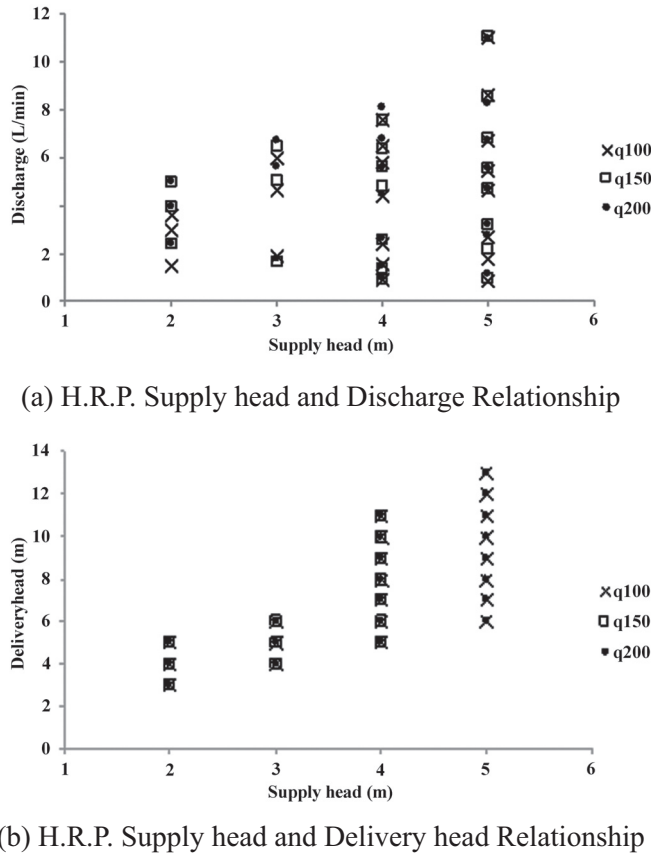


Figure 3 Relationship between supply head with discharge

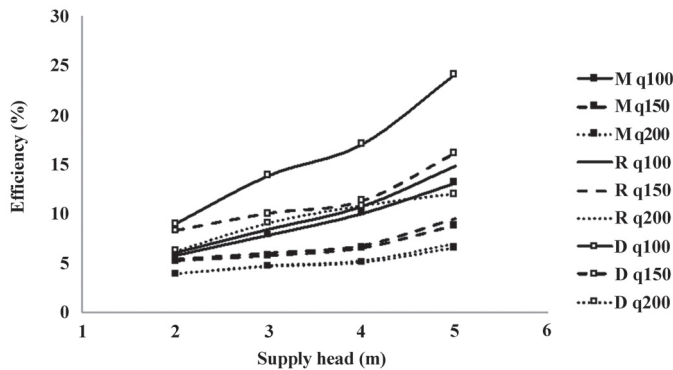
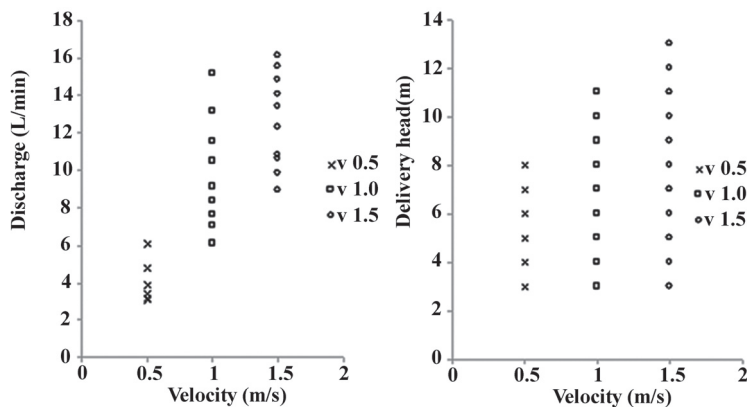
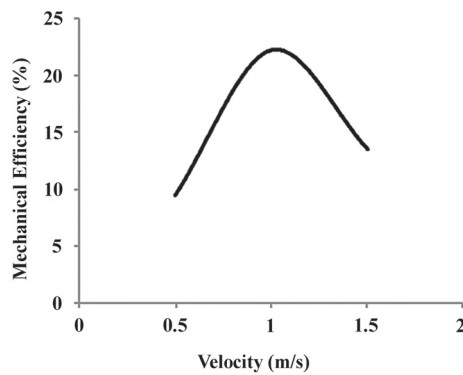


Figure 4 Relationship between supply head with Mechanical Efficiency (M), Rankine Efficiency (R) and D'aubuisson's Efficiency (D) for H.R.P.

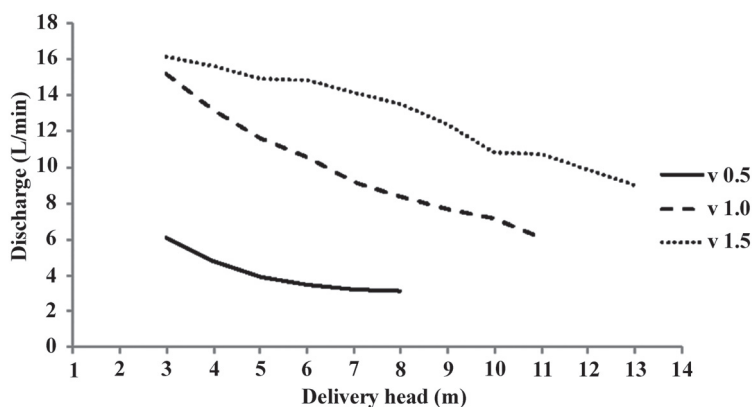


(a) W.W.P. Velocity and Discharge

(b) W.W.P. Velocity and Delivery head



(c) W.W.P. Velocity and Mechanical Efficiency

Figure 5 Relationship between velocity with discharge

Figure 6 Relationship between delivery head and discharge for W.W.P. with varying velocity

Mechanical efficiencies of the W.W.P. are shown in Figure 5(c) at the 8 - 23 % range. This was because the mechanism inside the spiral tube of the wheel employs the principle of air contraction and the movement of air mass and water mass [6]. The low speed of the wheel allowed

the funnels to bail the water, but if the speed was too high, it provided less time for the funnel to bail the water. The observation was similar to the experiment of Thaveephorn Prayatthep and Phuwanai Chaireun who designed and developed an undershot water wheel with a buoy [10].

From the varying inlet condition of W.W.P., the performance results revealed that delivery head was in the range of 3 - 13 m and the discharge was between 2 - 16 L/min. The W.W.P. had a mechanical efficiency in the range of 8 - 23 %. The relationship between of the results of the delivery head and discharge for the W.W.P. is displayed in Figure 6. The discharge values at condition velocity of 0.5 m/s were quite stable as the delivery head increased. However, with higher velocity, the water wheel had limited capability to uptake the same amount of discharge at low and high delivery head. Therefore, with higher delivery head, the discharge volume decreased. This was due to the pressure in the tube increased according to the velocity. When delivery head of the water increased, the level pressure decreased, hence the decrease of water discharge.

H.W.P. with prototype waterfall and stream

The Hybrid Water Pump (H.W.P.) system was installed with the prototype water sources of waterfall and stream. The goal of the hybrid system was to effectively utilize the natural water source with minimal water loss. The experiment was designed to evaluate the performance of the combined pumps to enhance the discharge volume and increase the delivery head. In the hybrid system, the H.R.P. with 25.4 mm inlet was installed at the prototype waterfall and then connected in series to the W.W.P installed at the prototype stream. The leftover water that was not uptake by the H.R.P. system was directed toward the stream to the W.W.P. Then, W.W.P. pumped the leftover water, therefore, fully utilizing the natural water sources. The performance results of H.W.P. are shown in Figure 7 - 9.

From the result of the hybrid water pump experiment, the condition with constant velocity of 0.5 m/s provide similar discharge amount range and delivery head range for the varying supply head irrespective of the inlet flowrate of 100, 150 or 200 L/min (Figure 7(a)). At 2 m supply head, the discharge range was at 2 - 12 L/min and at maximum of 5 m supply head, the discharge range was at 1 - 15 L/min. At the water quantity of 100 L/min and the water velocity of 0.5 m/s at the supply head of 2 and 3 m, the delivery head of the pumped water was at a height that came only from the W.W.P. Therefore, the result of the delivery head was the same at 8.3 m. At the supply head of 4 and 5 m, the result came only from the Hydraulic Ram Pump, which provided the delivery head at 11.3 and 13.3 m. However, when compared with the results from H.R.P. and W.W.P., the H.W.P. had greater discharge and delivery head combined. The delivery head of the water entering the system was higher and the overall discharged quantity of the pumped water was respectively increased due to the combined mechanism of the H.R.P. and the W.W.P.

The next sets of results were from the experiment with the water quantity of 150 L/min and the water velocity of 0.5 and 1.0 m/s. The result showed that when the supply entering the system was higher, the total quantity of discharged would slowly increase. The velocity of 1.0 m/s provided the total quantity of pumped water more than the velocity of 0.5 m/s. This was due to the speed of the W.W.P. at the velocity of 1.0 m/s higher than 0.5 m/s, hence the superior number of the total quantity. Furthermore, when both systems are combined, it provided the superior number of the total quantity than that of a single mechanism of the W.W.P.

The result from the experiment at the velocity of 1.0 and 1.5 m/s showed that the quantity of discharged pumped water at low level inlet was relatively the same and would slowly increase to follow the supply level of the inlet water and the delivery head high level of the pumped water (Figure 7(b)). This was because the high speed of the W.W.P. provided little time to bail water and exhaust the air inside the funnels, hence the comparable water loss.

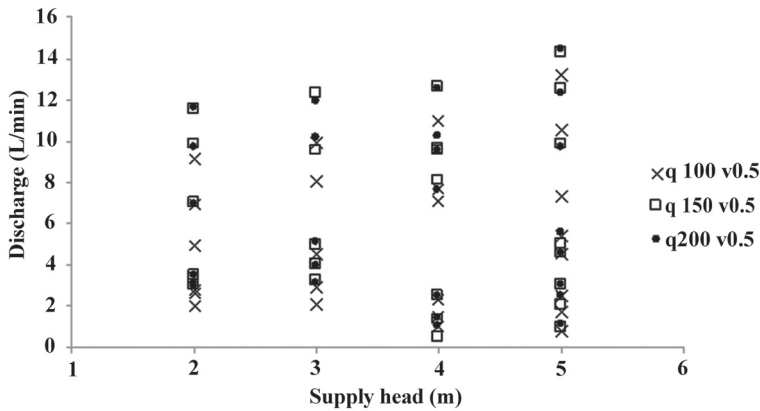
As for the experiment with water quantity from the prototype waterfall at 200 L/min and the water velocity of 1.5 m/s at the supply head of 2, 3, and 4 m, the result of the delivery head came only from the W.W.P., hence the height level of 13.4 m high. This was due to the fact that the H.R.P. could only pump up the water to the height level of 5.9, 7.7, and 11.8 m high with the same variables (Figure 8). However, when the supply head was changed to 5 m, the delivery head of the pumped water came only from the H.R.P. result instead, the result of the height level was 13.6 m. The result from the supply head of the water inlet of the H.R.P. at 5 m was relatively equal to the result of the previous experiments that had 200 L/min water quantity from the prototype waterfall and the velocity of 0.5, 1.0, and 1.5 m/s.

For the relationship between supply head and delivery head, the most influential parameter was the water velocity. The velocity of 1.5 m/s, provided the most stable maximum delivery head irrespective of the supply head. Thus, the mechanism of W.W.P. took over the hybrid system with higher velocity. At lower velocity, such as 0.5 m/s, the supply head of the water was greatly affected by the delivery head.

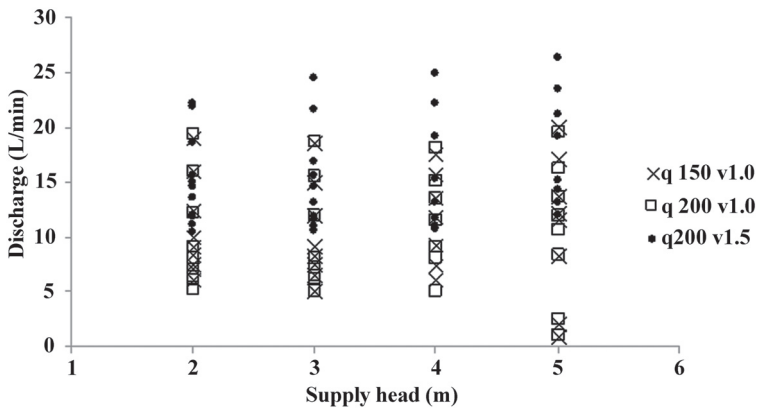
The mechanical efficiencies of H.W.P. for each water inlet condition are compared in Figure 9. The results clearly indicated that the optimal condition was the flowrate at 150 L/min and velocity at 1.0 m/s for all the supply head variation. This was because the flowrate of 150 L/min was the maximum flowrate for the H.R.P. inlet diameter of 25.4 mm. The higher flowrate at 200 L/min created excess water instead of higher usable discharge. In addition, the velocity at 1.0 m/s was optimal for the W.W.P. at diameter 2 m with 30 cm depth into the stream. With higher velocity, the paddle could not uptake more water and resulted in more unused water.

In summary, for the water inlet condition at low water velocity and low supply head, H.R.P. mechanism dominated the H.W.P. system with performance varying according to the supply

head level. So, the results in Figure 9 indicates that for supply head of 2 - 3 m, the efficiency was higher than at the supply head of 4 - 5 m. However, with high flowrate and fast water velocity, the W.W.P. mechanism would dominate the H.R.P. irrespectively of the waterfall supply head and more unused water would occur, thus lower mechanical efficiency. Therefore, the condition of the natural waterfall would be very important in the design and size of the hybrid pump.



(a) H.W.P. Supply head and Discharge for velocity 0.5 m/s



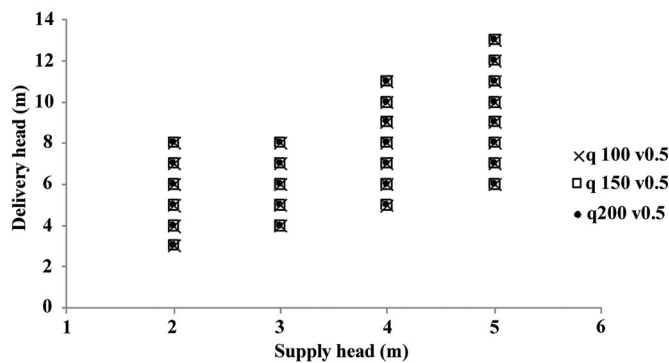
(b) H.W.P. Supply head and Discharge for velocity 1.0 and 1.5 m/s

Figure 7 Relationship between supply head with discharge for H.W.P. at varying inlet flowrate and velocity

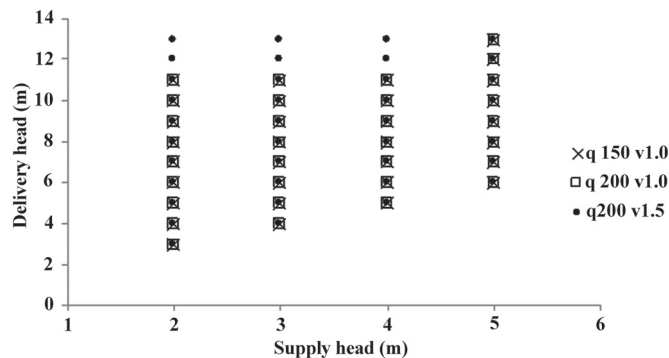
Operating Condition and Performance Summary

Overall, the natural water pump systems in this study were evaluated with a natural water source conditions of supply head at 2 - 5 m, inlet flowrate at 100 - 200 L/min, and water velocity at 0.5 - 1.5 m/s as indicated in Table 2. In these operating conditions, the 3 natural pump systems, H.R.P., W.W.P, and H.W.P., could similarly pump water up to the range of 3 - 13 m but with the maximum discharge of 13, 14, and 27 L/min, respectively.

The maximum mechanical efficiency for the 3 natural pump systems were 11, 15 and 26 %, respectively. It was revealed that the H.R.P. using the impact energy from the waterfall was the least efficient in pumping water and resulted in wide range of discharge at 1 - 13 L/min for the delivery head range of 3 - 13 m. Therefore, the H.R.P. could only be used in specific water conditions such as inlet flowrate greater than 100 L/min at supply head at least 2 m to achieve reasonable water storage. In contrast to H.R.P. dependent on inlet flowrate and supply head, the W.W.P. provided stable discharge in the narrow range of 10 - 14 L/min. At the low delivery head of 3 m, W.W.P. could provide discharge at 14 L/min which is more than H.R.P. discharge at 13 L/min. This was the characteristic advantage of W.W.P. Consequently, when H.R.P. and W.W.P. were combined into a hybrid system (H.W.P.), the resulting performance for the delivery head was still in the range of 3 - 13 m but with the combined discharge up to the range of 12 - 27 L/min. Therefore, the hybrid system could fully utilize the water source energy of impact and flow velocity in yielding maximum discharge and delivery head. The parameters of the water source would mainly dictate the amount of discharge and height of delivery head.



(a) H.W.P. Supply head and Delivery head for velocity 0.5 m/s



(b) H.W.P. Supply head and Delivery head for velocity 1.0 and 1.5 m/s

Figure 8 Relationship between supply head and delivery head for H.W.P. at varying inlet flowrate and velocity

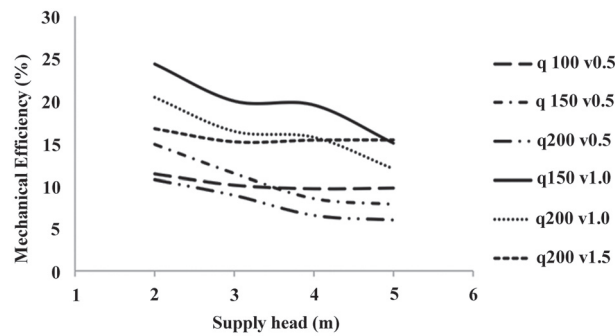


Figure 9 Relationship between supply head and average mechanical efficiency for H.W.P. at varying inlet flowrate and velocity

Table 2 Operating condition and performance for H.R.P., W.W.P., and H.W.P.

Pump System	Water SourceCondition Range			Water Acquired Range		Mechanical Efficiency (%)
	h(m)	q(L/min)	v(m/s)	H(m)	Q(L/min)	
H.R.P.	2 - 5	100 - 200		3 - 13	13 - 1	3 - 11
W.W.P.	-	100 - 200	0.5 - 1.5	3 - 13	14 - 10	9 - 15
H.W.P.	2 - 5	100 - 200	0.5 - 1.5	3 - 13	27 - 12	10 - 26

This work focused on 3 inlet parameters for water velocity, supply head and inlet flowrate. The noticeable result was at constant velocity, the amount of discharge range was similar even with varying supply head at 2 - 5 m. For example, at constant velocity of 0.5, 1.0, and 1.5 m/s, the amounts of discharge were in the range of 2 - 12, 5 - 20 and 10 - 25 L/min, respectively even with the different supply head. So, it could be concluded that the amount of discharge for the hybrid system was independent of the height of the waterfall supply head, and highly dependent on the water velocity of the stream. However, at the operating condition with higher velocity than 1.5 m/s, the water wheel was not able to uptake more water which resulted in no significant increase in the discharge. In addition, a clear correlation between the supply head and delivery head was also revealed. Higher supply head always yielded higher delivery head in any operating condition. Lastly, the inlet flowrate had an influence on the operability of the hybrid system. The H.W.P. could not operate with flowrate less than 100 L/min and with flowrate higher than 150 L/min the results of the water uptake were quite similar. So, the natural pumping system with Hydraulic Ram Pump inlet of 25.4 mm and Water Wheel Pump of 40 cm width could operate at the optimum water flowrate of 150 L/min and velocity of 1.5 m/s.

Conclusion

The main goal for this research was to determine the appropriate technology for pumping water from the natural water sources such as waterfall and stream in the northern part of Thailand. The natural water sources would be used for farming and agriculture and would directly benefit the farmers and local communities. In this work, the operating conditions of the prototype water sources were within the range of height, water quantity and velocity of the conventional waterfalls and streams in the northern part of Thailand. The water pumping systems evaluation for the prototype water sources were focused on 3 types of natural water pumping systems which were Hydraulic Ram Pump (H.R.P.), Water Wheel Pump (W.W.P.) and Hybrid Water Pump (H.W.P.) systems. The first system, H.R.P., operated by using the impact energy from the waterfall in various supply height however it was the least efficient in pumping water to achieve high discharge and delivery head. The second system, W.W.P. operated by using the water flow energy in the form of water velocity from rivers and streams. The flow energy induced the water wheel to rotate. The water wheel had the water coil to uptake the received water up to the water storage tank. The W.W.P. provided stable discharge in the narrow range. At the low delivery head of 3 m, W.W.P. could provide discharge of 14 L/min which is more than the H.R.P. discharge of 13 L/min. This was the characteristic advantage of W.W.P. In nature, waterfall is typically followed by river or stream. Therefore, combining H.R.P. and W.W.P. into the hybrid system, H.W.P., would utilized both water energies from impact and flow of the natural water sources. The resulting performance for the overall H.W.P. delivery head were 3 - 13 m but with the combined discharge up 12 - 27 L/min. The parameters of the water source were directly correlated to the amount of discharge and height of delivery head. The amount of discharge for the hybrid system was independent of the height of the waterfall supply head, and highly dependent on the water velocity of the stream. There was a clear correlation between the supply head and delivery head. Higher supply head always yielded higher delivery head in any operating condition. Lastly, the inlet flowrate had an influence on the operability of the hybrid system.

References

- [1] Vadhanaphong, B. (1999). **Power Development Water Pump Due to the Initiative of His Majesty the King**. Graphico Systems Company Limited
- [2] Department of Energy. (1993). **Energy Industry Department of Energy Development and Promotion**. Bangkok: Thammasat Printing House (in Thai)

- [3] Shuaibu Ndachhe Mohammed. (2007). **Design and Construction of Hydraulic Ram Pump**. Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology, Minna, Nigeria
- [4] Suwannasit, N. (2000). **Design and Development Hydraulic Ram Pump**. Department of Mechanical Engineering Rajamangala University of Technology Lanna (in Thai)
- [5] Junprasert, E., Neuron, N., and Ginrid, B. (2003). **Study Performance Hydraulic Ram pump**. Department of Mechanical Engineering Rajamangala University of Technology Lanna (in Thai)
- [6] Gusri Akhyar Ibrahim, C. H., Cheharon, C. H., and UsnaAzhari. (2011). **Traditional Water Wheel in Padang**. Malaysia: Department of Mechanical Engineering, University Kebangsaan
- [7] Morgan, P. (1984). **A Spiral Tube Water Wheel Pump**. Blair Research Bulletin of Zimbabwe's Ministry of Health.
- [8] Kummoon, D. and Kongngen, Y. (2009). **Study Performance Spiral Tubing Vertically Coil Pump**. ChiangMai: Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna (in Thai)
- [9] Niyomvas, B. and Potakarat, B. (2012). **The Study Performance Hydraulic Ram Pump**. Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Srivichai (in Thai)
- [10] Payathep, T. and Chairuen, P. (2008). **Design and Development of Turbines for Low-Rise Buoys**. ChiangMai Rajamangala University of Technology Lanna (in Thai)



Performance Analysis of Linear Search MLD for High Rate Full Diversity STBC in PDM-CO-OFDM

Kidsanapong Puntsri^{1*}

Received: May, 2017; Accepted: July, 2017

Abstract

This work presents a performance analysis of linear-search high rate full diversity (HRFD) for polarization division multiplexing coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (PDM-CO-OFDM) communication systems. The space-time block code (STBC) is used to gain up signal to noise ratio (SNR). To achieve a high rate and full diversity, a STBC code is provided -where it is orthogonal between the consequence times. The maximum likelihood detection (MLD) is used. In addition, the number of searching for decoding is dependent on only constellation sizes while the conventional scheme; ex. the Silver code, its searching grows up exponentially. The proposed method is called high rate full diversity STBC (HRFD-STBC). The system performance of the system is evaluated by numerical simulation method. The results show that the bit error rate (BER) performance of the proposed HRFD-STBC is slightly higher than the Silver Code. However, at the high polarization dependent loss (PDL) channel, the BER of the STBC code is only a little higher than the Silver Code.

Keywords: PDM; CO-OFDM; High Rate Full Diversity; Optical Coherent Communications

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

* Corresponding Author E - mail Address: kidsanapong.pu@rmuti.ac.th

Introduction

Optical orthogonal frequency division multiplexing (O-OFDM) has been investigated for a decade because there are a lot of advantages for optical communication in both direct detection [1] - [2] and coherent detection [3]. However, only coherent detection is considered in this work. It is called coherent optical OFDM (CO-OFDM). CO-OFDM well combat intersymbol interference (ISI), which is caused by polarization-mode dispersion (PMD) and chromatic dispersion (CD), by appending a cyclic prefix (CP) extension. The CP is taken from some last OFDM samples itself. In addition, OFDM has frequency independent loss. This means that each subcarrier is independently attenuated and perhaps only some of the subcarriers are destroyed; whereas, whole carrier will be completely lost in single carrier communication systems. Consequently, by those reasons, CO-OFDM can offer high spectrum efficiency and long communication distances.

Nowadays, polarization division multiplexing (PDM) together with CO-OFDM is very attractive to investigate for gaining up communications speed and capacity. By doing so, the speed and capacity can be double. However, the interference between the transmitted optical light modes will become problem and it reduces signal to noise ratio (SNR). To increase the SNR, in wireless systems, the space-time block code (STBC) [4] is one possible efficient way to employ.

In [5], the authors showed that the Silver code [6] has the best performance for optical communication when compared with the Golden code [7]. In addition, [8] has also found that the system performance of STBC is unchanged when increasing PDL. However, the Silver code superiors the STBC performance code. All the codes, which is previously mentioned, is used to improve the SNR and the maximum likelihood detection (MLD) [9] is generally used to decode the received signal. For the Silver and golden code, they are extremely complex to be decoded. Especially, an exhaustive search will grow up exponentially by the factor of 4. M is constellation size. This would be impossible to implement in the real practical system when M becomes large, such as 64- and 256-quadrature amplitude modulation (QAM). Recently, in [10], other researchers proposed an orthogonal STBC for mode-dependent loss (MDL) mitigation with minimum mean square error (MMSE) channel estimation algorithm. The results proved that by using STBC, the MDL is perfectly solved.

In this work, the low exhaustive search for MLD in PDM-CO-OFDM is proposed. The searching is reduced to be linear and it is dependent on only M . However, the coding rate is moderately reduced and, it can be implemented in hardware. In addition, high rate and full diversity can be achieved, whereas, the conventional STBC, the achieved coding rate is only a half. Additionally, this is the extended work from [12].

Low-Complexity High Rate Full Diversity

In this section, the encoder and decoder for obtaining the high rate and full diversity are discussed. The encoder and decode are detailed in this section.

A. Encoder

To achieve full diversity and high rate, the encoder matrix, which is denoted by C , is given by: [11] - [12]

$$C = \begin{bmatrix} ax_1 + bx_3 / \sqrt{2} & -cx_2^* + dx_3^* / \sqrt{2} \\ ax_2 + bx_3 / \sqrt{2} & ax_1^* + dx_3^* / \sqrt{2} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Where x_1 , x_2 and x_3 are the transmitted arbitrary M-ary QAM symbols. a , b , c and d are the designed parameters for achieving high rate and full diversity, which is generally complex-valued. Next, the encoded data, C is fed into next OFDM modulation, as it will be discussed in the next section. $(\cdot)^*$ stands for conjugate operator.

B. Decoder

At the receiver part, after demodulation by using FFT computation, the received signals in frequency-domain at the x-pol and y-pol for the time t_1 described by:

$$Y_{x-pol,t_1} = H_{1,1}(aX_1 + bX_3 / \sqrt{2}) + H_{1,2}(aX_2 + bX_3 / \sqrt{2}) + Z_1, \quad (2)$$

$$Y_{y-pol,t_1} = H_{2,1}(aX_1 + bX_3 / \sqrt{2}) + H_{2,2}(aX_2 + bX_3 / \sqrt{2}) + Z_2, \quad (3)$$

and at time t_2 can be given by:

$$Y_{x-pol,t_2} = H_{1,1}(-cX_2^* - dX_3^* / \sqrt{2}) + H_{1,2}(cX_1^* + dX_3^* / \sqrt{2}) + Z_3, \quad (4)$$

$$Y_{y-pol,t_2} = H_{2,1}(-cX_2^* - dX_3^* / \sqrt{2}) + H_{2,2}(cX_1^* + dX_3^* / \sqrt{2}) + Z_4, \quad (5)$$

next, to achieve full diversity, the following step of decoding for X_1 and X_2 are derived by:

$$\begin{aligned} Z_1 &= Y_{x-pol,t_1} - bX_3 / \sqrt{2}(H_{1,1} + H_{1,2}) \\ &= a(H_{1,1}X_1 + H_{1,2}X_2) + Z_1, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Z_2 &= Y_{x-pol,t_2} - dX_3^* / \sqrt{2} (H_{1,2} - H_{1,1}) \\ &= c(H_{1,2}X_1^* - H_{1,1}X_2^*) + Z_2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= Y_{y-pol,t_1} - bX_3 / \sqrt{2} (H_{2,1} + H_{2,2}) \\ &= a(H_{2,1}X_1 + H_{2,2}X_2) + Z_3, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Z_4 &= Y_{y-pol,t_2} - dX_3^* / \sqrt{2} (H_{2,2} - H_{2,1}) \\ &= c(H_{2,2}X_1^* - H_{1,1}X_2^*) + Z_4, \end{aligned} \quad (9)$$

then, multiply those signal by channel matrix, H , we get

$$W_{1,X_1} = H_{1,1}^* Z_1 = a(|H_{1,1}|^2 X_1 + H_{1,1}^* H_{1,2} X_2) + H_{1,1}^* Z_1, \quad (10)$$

$$W_{2,X_1} = H_{1,2} Z_2^* = c^* (|H_{1,2}|^2 X_1 + H_{1,1}^* H_{1,2} X_2) + H_{1,2} Z_2^*, \quad (11)$$

$$W_{3,X_1} = H_{2,1} Z_3 = a(|H_{2,1}|^2 X_1 + H_{2,1}^* H_{2,2} X_2) + H_{2,1}^* Z_3^*, \quad (12)$$

$$W_{4,X_1} = H_{2,2} Z_4^* = c^* (|H_{2,2}|^2 X_1 + H_{2,1}^* H_{2,2} X_2) + H_{2,2} Z_4^*. \quad (13)$$

Finally, the estimated signal of X_1 , which is denoted by $\tilde{X}_1$, becomes:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_1 &= (W_{1,X_1} + W_{3,X_1}) / a + (W_{2,X_1} + W_{4,X_1}) / c^* \\ &= (|H_{1,1}|^2 + |H_{1,2}|^2 + |H_{2,1}|^2 + |H_{2,2}|^2) X_1 + \eta_1, \end{aligned} \quad (14)$$

where $\eta_1 = (H_{1,1}^* Z_1 + H_{2,1}^* Z_3) / a + (H_{1,2} Z_2^* + H_{2,2} Z_4^*) / c^*$; and by computing $W_{1,X_2} = H_{1,2}^* Z_1$, $W_{2,X_2} = H_{1,1} Z_2^*$, $W_{3,X_2} = H_{2,2}^* Z_3$ and $W_{4,X_2} = H_{2,1} Z_4^*$, the estimated signal of X_2 , which is denoted by $\tilde{X}_2$, becomes:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_2 &= (W_{2,X_2} + W_{4,X_2}) / a - (W_{1,X_2} + W_{3,X_2}) / c^* \\ &= (|H_{1,1}|^2 + |H_{1,2}|^2 + |H_{2,1}|^2 + |H_{2,2}|^2) X_2 + \eta_2, \end{aligned} \quad (15)$$

where $\eta_2 = (H_{1,2}^* Z_1 + H_{2,2}^* Z_3) / a + (H_{1,1} Z_2^* + H_{2,1} Z_4^*) / c^*$.

As can be seen, we need to find only X_3 to obtain $\tilde{X}_1$ and $\tilde{X}_2$. In this work, an exhaustive search or maximum likelihood detection (MLD) is used which X_3 minimizes the Euclidean distance metric:

$$\tilde{X}_3 = \arg \min_i \{D_i(\tilde{X}_{1,i}, \tilde{X}_{2,i}, X_{3,i})\}, \quad (16)$$

where

$$\begin{aligned} D_i(\tilde{X}_{1,i}, \tilde{X}_{2,i}, X_{3,i}) = & \left\{ Y_{x-pol,t_1} - H_{1,1}(a\tilde{X}_{1,i} + bX_{3,i}/\sqrt{2}) + H_{1,2}(a\tilde{X}_{2,i} + bX_{3,i}/\sqrt{2}) \right\} + \\ & \left| Y_{x-pol,t_2} - H_{1,1}(-c\tilde{X}_{2,i}^* - dX_{3,i}^*/\sqrt{2}) + H_{1,2}(c\tilde{X}_{1,i}^* + dX_{3,i}^*/\sqrt{2}) \right| + \\ & \left| Y_{y-pol,t_1} - H_{2,1}(a\tilde{X}_{1,i} + bX_{3,i}/\sqrt{2}) + H_{2,2}(a\tilde{X}_{2,i} + bX_{3,i}/\sqrt{2}) \right| + \\ & \left| Y_{y-pol,t_2} - H_{2,1}(-c\tilde{X}_{2,i}^* - dX_{3,i}^*/\sqrt{2}) + H_{2,2}(c\tilde{X}_{1,i}^* + dX_{3,i}^*/\sqrt{2}) \right| \end{aligned} \quad (17)$$

where $i = 1 \dots M$ is QAM look-up table (LUT) indices and the size of the LUT is equal to M .

From now, we get all $\tilde{X}_1$, $\tilde{X}_2$ and $\tilde{X}_3$. It is showed that the complexity increasing is dependent on M-ary QAM size of X_3 and full diversity can be obtained. Obviously, the searching for X_3 is deepened only on M while the conventional ML method needs M^4 . Consequently, this is linear search for D . For example, if we use $M = 64$. The searching of the conventional one is $64^4 = 16,777,216$. This is impossible to implement in hardware.

System Consideration

In this section, the system used for low-complex high rate and full diversity PDM-CO-OFDM is detailed. It is shortly called HRFD-STBC. The system diagram is depicted in Figure 1.

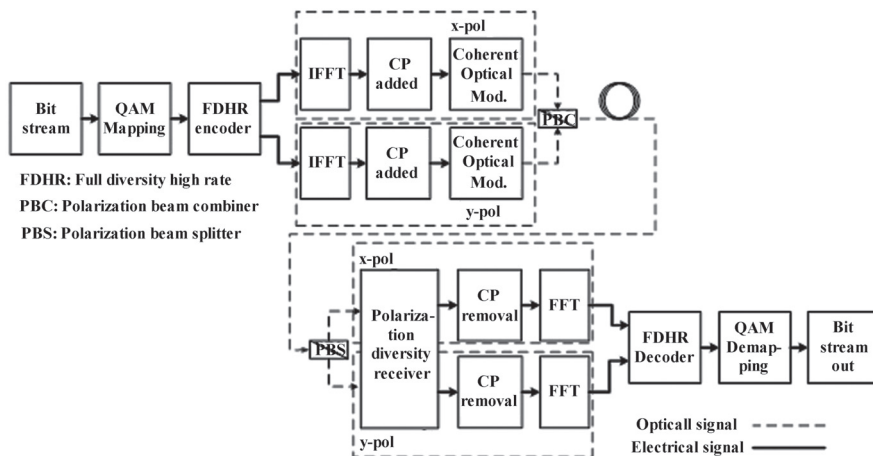


Figure 1 PDM-CO-OFDM diagram for low-complex high rate full diversity communication systems

At the transmitter part, the bit streaming is fed to M-ary QAM mapping unit to obtain a symbol where it is a set of the number of bits. For instance, 16-QAM symbol uses four bits in one set. Next, the QAM symbol is sent to the HRFD-STBC encoder to prepare the code word. The encoder constrains two outputs which are x-pol and the other is y-pol. After that, both x-pol and y-pol signals are fed into Invert Fast Furrier Transforms (IFFT) to convert that signal to time-domain signal. Then, to neglect the dispersive optical channels such as CD and PMD, a cyclic prefix (CP) is added to the head of each OFDM. Then, both electrical signal of x-pol and y-pol OFDM symbol in time-domain is fed into optical modulator where dual Mach-Zehnder modulator is used. Finally, an optical polarization beam combiner (PBC) is used to combine the optical light signal and transmit it out to optical fiber.

At the receiver part, the received optical signal is first spitted into two orthogonal parts, which are x-pol and y-pol, by using optical polarization beam splitter (PBS). The two parts are fed into polarization diversity optical demodulator separately. Next, each of that is converted to electrical signal and the CP is removed in the following. After that, the useful sample is converted to frequency-domain by using FFT. Then, the FFT computation output is fed into HRFD decoder which is used to decode the information data as explained in the last section. Finally, the decoded QAM demapping is used to map the decoded QAM symbol to be bits out stream in the last process.

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Quantity
Sampling rate	32 Gs/s
Effective bits efficiency	12
Mean DGD	$0.1ps/\sqrt{km}$
IFFT/FFT size	1024
Oversampling factor	1/2
CP length factor	128 (= 1024/8)
Fiber length	1,000 km

The optical channel consideration impairments in this work are the PMD and PDL. The two optical channels, H , impacts can be expressed by:

$$H(k) = H_{PMD}(k)H_{PDL}, \quad (18)$$

where k denotes the frequency index. H_{PMD} and H_{PDL} are PDM and PDL, respectively. Both are obtained by a concatenation of many elements. Each element of $H_{PMD}(k)$ is denoted by the following equation [8], [13]:

$$H_{PMD}(k) = R\zeta(k)R^{-1}, \quad (19)$$

where R is rotation matrix which can be expressed by:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (20)$$

In equation (5), θ is the reference angle between the polarizations and the principle state of polarization (PSP). PMD is denoted by $\zeta(k)$ and expressed as:

$$\zeta(k) = \begin{bmatrix} e^{(jk\tau/2)} & 0 \\ 0 & e^{(-jk\tau/2)} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

where τ is differential group delay (DGC).

PDL is assumed to be wavelength independent and given by the following equation.

$$H_{PDL} = R\psi R^{-1}, \quad (22)$$

where ψ represents PDL and given by :

$$\psi = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\gamma} & 0 \\ 0 & \sqrt{1+\gamma} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

γ is attenuation parameter and it generally relates to a standard deviation of a zero-mean Gaussian distribution which is defined in [8], $\Gamma_{dB} = 10\log_{10}((1-\gamma)/(1+\gamma))$.

From the expression above, the PMD generates frequency dependent loss (or attenuate) which destroys each subcarrier of each OFDM separately and/or some subcarriers are not effects as shown in [3]. The PDL attenuates the optical power in some modes. Therefore, the noise would be gained up at the receivers.

Simulation Results

The detail of system performance of HRFD-STBC for PDM CO-OFDM is studied in this section. The parameters used in this work are shown in Table 1. To achieve full diversity

and high rate for the transmitted power of any QAM size, the designed parameters of $a = c = 1/\sqrt{2}$, $d = e^{-i\pi/2}b$ and $b = \left[(1-\sqrt{7}) + i(1+\sqrt{7}) \right] / (4\sqrt{2})$ [10] are used. Two important issues are investigated. Firstly, the system performance comparison of the proposed method with the existing Silver Code (SC), Golden Code (GC) and conventional STBC (CSTBC) are considered.

Figure 2 shows the bit error rate (BER) performance comparisons between those schemes under PMD and PDL environments where the DGC is 3.16 ps ($= 0.1 \cdot \sqrt{1,000}$). Optical signal to noise ratio (OSNR) is varied from 0 to 25 dB. The PDL of 4 dB is assumed. The SC and GC are decoded by MLD while HR-STBC uses the decoding step from the previous section; and the conventional STBC uses the method in [4]. To get the same bit efficiency per time slot of coding, the SC and the GC employs 8-QAM, CSTBC uses 64-QAM and HR-STBC uses 16-QAM. As can be seen the SC outperforms GC and STBC. However, at the high OSNR (more than 15 dB in Figure 2), HR-STBC has the same BER as SC. More importantly, HR-STBC gives lower computation complexity. For SC and GC, the requirement of exhaustive search is 4096 ($= 84$) while the HR-STBC is only 16. In addition, STBC gives the worse BER performance.

Secondly, the system performance under PDL is investigated. Figure 3 plots the BER versus OSNR where the PDL is varied from 2 to 6 dB and the DGC is the same as Figure 2 16-QAM is used. The BER of the SC code slightly increased when the PDL increased. At 6 dB of PDL, the BER for the SC is only a bit higher than that PDL of 2 dB. However, HR-STBC gives the same BER for all PDL. This means that HR-STBC exhibit likes STBC; but, HR-STBC achieves higher rate and full diversity.

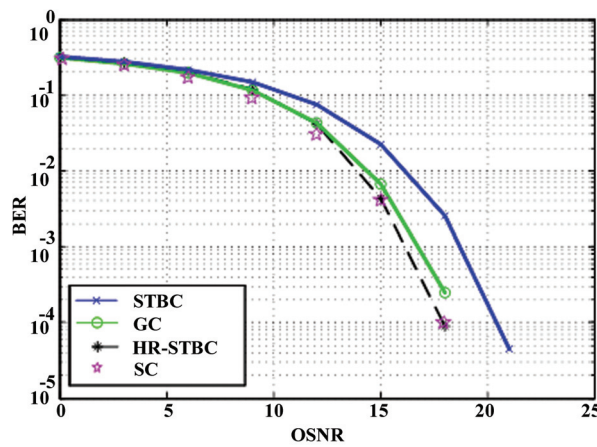


Figure 2 BER versus OSNR for the system performance comparison of the HR-STBC with SC, GD and STBC.

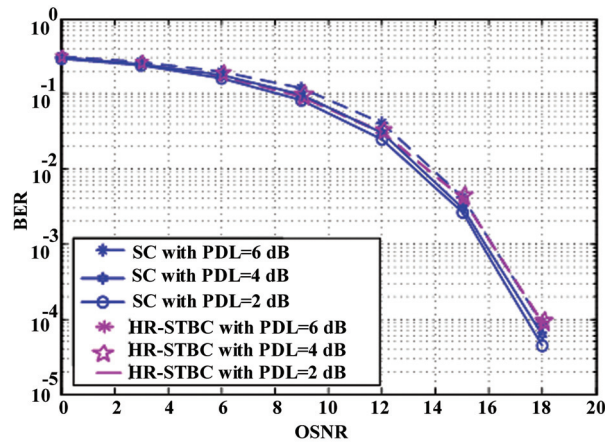


Figure 3 Performance comparison of PDL tolerance of the HR-STBC and SC.

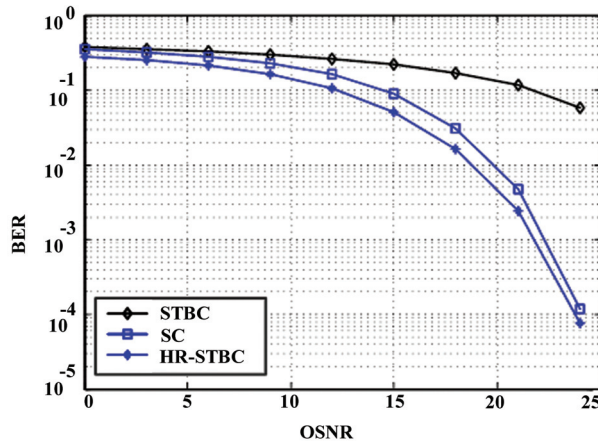


Figure 4 High spectrum efficiency of PDL 6 dB for the HR-STBC and SC.

Figure 4 plots a 20 bits spectrum efficiency of PDL = 6 dB for the HR-STBC and SC. In this case, STBC used 1024-QAM while HR-STBC uses 64-QAM for x_1 and x_2 and 16-QAM for x_3 and x_4 , respectively. As can be seen, the HR-STBC outperforms conventional STBC. Especially, it also gives better BER than SC. Therefore, from all the results, we can conclude on the proposed method superior for both BER performance and low complexity.

Conclusion

The low-complex and high rate full diversity had been proposed and analyzed. It is called high rate space-time block code (HR-STBC). We have compared the HR-STBC performance

with SC, GC and CSTBC code. The linear impacts of optical channel, which are PMD and PDL, are taking into account. The proposed HR-STBC has much lower complexity when it is compared with SC and GC; but, the system performance is only slightly lower than those codes. More importantly, the BER performance of the proposed method is only slightly higher than SC method. The complexity is reduced to only the constellation size. Therefore, this would be the key to implementation in hardware for high speed optical communication in the future.

References

- [1] Armstrong, J. (2009). OFDM for Optical Communications. **Journal of Lightwave Technology**. Vol. 27, Issue 3, pp. 189-204. DOI: 10.1109/JLT.2008.2010061
- [2] Qi, Y., Yan, T., Ma, Y., and Shieh, W. (2009). Experimental Demonstration and Numerical Simulation of 107-Gb/s High Spectral Efficiency Coherent Optical OFDM. **Journal of Lightwave Technology**. Vol. 27, Issue 3, pp.168-176
- [3] Brendon, J. C., Schmidt, Arthur James Lowery, and Jean Armstrong, (2009). Impact of PMD in Single-Receiver and Polarization-Diverse Direct-Detection Optical OFDM. **Journal of Lightwave Technology**. Vol. 27, No. 14, pp. 2792-2799
- [4] Tarokh, V., Jafarkhani, H., and Calderbank, A. R. (1999). Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs. **IEEE Transactions on Information Theory**. Vol. 45, No. 5, pp. 1456-1467
- [5] Jaouen, Y., Mumtaz, S., Awwad, E., and Othman, G. R. (2012). Space-Time Codes for Fiber Communications: Coding Gain and Experimental Validation. In **Proceeding 2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)**. pp. 1-5
- [6] Hollanti, C., Lahtonen, J., Ranto, K., Vehkalahti, R., and Viterbo, E. (2008). On the Algebraic Structure of the Silver Code: A 2×2 Perfect Space-Time Block Code. In **Proceeding IEEE Information Theory Workshop ITW '08**. pp. 91-94
- [7] Belfiore, J. -C., Rekaya, G., and Viterbo, E. (2004). The Golden Code: A 2×2 Full-Rate Space-Time Code with Non-Vanishing Determinants. In **Proceeding International Symposium on Information Theory**. pp. 310-310
- [8] Awwad, E., Jaouen, Y., and Rekaya-Ben Othman G. (2013). Polarization-Time Coding for PDL Mitigation in Long-Haul PolMux OFDM Systems. **Optics Express**. Vol. 21, Issue 19, pp. 22773-22790
- [9] Barry, John R., Lee, Edward A., and Messerschmitt, David G. (2003). **Digital Communication**. 3rd Edition. Springer.

- [10] Yong, Q. H., Wen, T. L., Xiao, C. X., and Ray, T. C. (2017). Orthogonal STBC for MDL Mitigation in Mode Division Multiplexing System with MMSE Channel Estimation. **Journal of Lightwave Technology**. Vol. 35, Issue 1, pp. 1858-1867
- [11] Sezginer, S., Sari, H., and Biglieri, E. (2009). On High-Rate Full-Diversity 2×2 Space-Time Codes with Low-Complexity Optimum Detection. **IEEE Transactions on Communications**. Vol. 57, No. 5, pp. 1532-1541
- [12] Puntsri, K. (2015). Low-Complexity MLD for Full Diversity High Rate STBC in PDM-CO-OFDM Communication Systems. In **Proceeding 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38)**. pp. 557-560
- [13] Ip, E. and Kahn, J. M. (2007). Digital Equalization of Chromatic Dispersion and Polarization Mode Dispersion. **Journal of Lightwave Technology**. Vol. 25, No. 8, pp. 2033-2043



การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะใช้งานด้วยการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง

In-Service Induction Motor Efficiency Estimation using Adaptive Bacteria Foraging Optimization

ณัฐดนัย เลิศขมภู¹ กิตติพงศ์ ตันเมือง¹ อนุสรณ์ ยอดใจเพชร¹ และวิวัฒน์ ทิพจร^{1*}

Received: December, 2016; Accepted: September, 2017

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งานเพื่อทดแทนการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ต้องหยุดหรือถอดมอเตอร์ออกจากระบบบริการ เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาประสิทธิภาพโดยใช้ข้อมูลจากการวัดแรงดัน กระแส และกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน มอเตอร์ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นทั้งแบบจำลองมอเตอร์ในคอมพิวเตอร์ และมอเตอร์จริง ผลการทดลองพบว่าการประเมินประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองมีการลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าการหาอาหารของแบคทีเรียแบบเดิม และได้ผลใกล้เคียงกับวิธีวัดแรงบิดที่เพลากว่าวิธีวงจรมุมและวิธีสลิปความผิดพลาดเฉลี่ยจากการทดสอบแบบจำลองมอเตอร์เท่ากับ 1.78 % และมอเตอร์จริงเท่ากับ 3.4 %

คำสำคัญ : เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด; การประเมินประสิทธิภาพ; มอเตอร์ขณะใช้งาน; ขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangrai

* Corresponding Author E - mail Address: wiwat@rmutl.ac.th

Abstract

This paper proposes efficiency estimation of in-service induction motor to replace the efficiency estimation that required to stop or remove them from service. Adaptive bacteria foraging optimization technique is applied to estimate the efficiency using data from measuring electrical voltage, current, and power that supply to the induction motor during operation. The selected motors for evaluation are the motor model in computer and the actual motor. The test results showed that the efficiency estimation of the adaptive bacteria foraging optimization technique convergence is better result than original bacteria foraging optimization and this result is close to the shaft torque method than the equivalent circuit method and the slip method. The average error from the test of the motor model is 1.78 % and the actual motor is 3.4 %.

Keywords: Optimization Technique; Efficiency Estimation; In-Service Motor; Bacteria Foraging Algorithm

บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเพราะมีความทนทาน สามารถใช้งานได้นาน ทำให้มอเตอร์เหล่านี้มีสัดส่วนในการใช้พลังงานไฟฟ้าสองในสามของระบบการผลิตไฟฟ้า [1] แต่เมื่อมอเตอร์ติดตั้งใช้งานเป็นเวลานานประสิทธิภาพอาจลดลงทำให้ใช้ไฟฟ้ามากเกินความจำเป็น ดังนั้นต้องมีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละตัวเพื่อเป็นข้อกำหนดวิธีการจัดการพลังงานให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

โดยทั่วไปแล้ววิธีการหาค่าประสิทธิภาพที่มีความแม่นยำ จำเป็นต้องกระทำในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบภาระทางกล (Load test) หรือการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล (No-load and blocked-rotor tests) จะเห็นได้ว่าวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับมอเตอร์ที่จำเป็นต้องอยู่ในระบบการให้บริการตลอดเวลา [2] ที่ผ่านมามีการสำรวจวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์มากกว่า 20 แบบ โดยแบ่งระดับการรบกวนมอเตอร์และความแม่นยำในการหาประสิทธิภาพมอเตอร์ พบว่าวิธีวัดแรงบิดที่เพลา (Shaft torque method) มีความแม่นยำสูงที่สุด แต่มีการรบกวนมอเตอร์สูง ส่วนวิธีที่เรียบง่าย เช่น การประเมินประสิทธิภาพจากป้ายข้อมูล (Nameplate method) วิธีสลลิป (Slip method) วิธีวัดกระแสไฟฟ้า (Current method) มีระดับการรบกวนมอเตอร์ต่ำ แต่ให้ความถูกต้องในระดับต่ำด้วย [3]

วิธีการหาประสิทธิภาพขณะทำงานโดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์ (Equivalent circuit method) เป็นวิธีหนึ่งที่นำมาใช้งานมาก [4] หลายปีที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากนำเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดทางวงจรสมมูลและประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน ซึ่งวิธีการที่สะดวกและประหยัดโดยใช้การพิจารณาข้อมูลทางไฟฟ้าจากการวัดร่วมกับเทคนิคปัญญาเชิงคำนวณ (Computational intelligence)

การใช้เทคนิคปัญญาเชิงคำนวณมีหลากหลายวิธี เริ่มแรกนิยมใช้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) เช่น การประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์พัฒนาบยาอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้การพิจารณาข้อมูลทางไฟฟ้าจากการวัดร่วมกับการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม [2] พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ระบุข้อบกพร่องบางอย่างของวิธีการเชิงพันธุกรรมคือ การกำหนดพารามิเตอร์ และการลู่เข้าก่อนกำหนดทำให้ลดประสิทธิภาพในการค้นหา [5]

ต่อมามีการนำเสนอการใช้วิธีปัญญาเชิงคำนวณหลายวิธี วิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย (Bacteria foraging algorithm) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการประมาณค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมีรายงานงานวิจัยที่พบว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการกลุ่มอนุภาค (Particle swarm) และวิธีระบบภูมิคุ้มกันประดิษฐ์ (Artificial immune system) [4] อย่างไรก็ตามวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย ยังมีข้อบกพร่องบางอย่างและได้มีการนำเสนอการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเรียกว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (Adaptive bacterial foraging) พบว่าสามารถลู่เข้าหาค่าตอบที่แม่นยำขึ้น [6]

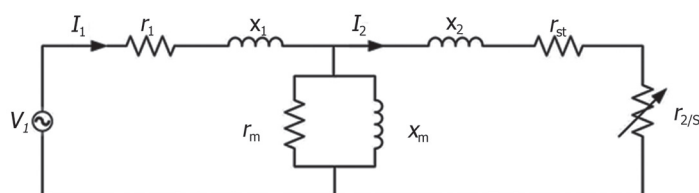
บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าขณะใช้งาน โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง ทดสอบกับแบบจำลองมอเตอร์ในคอมพิวเตอร์และมอเตอร์จริงในห้องทดลอง เปรียบเทียบกับวิธีการประเมินประสิทธิภาพจากวิธีสลิปวิธีวงจรสมมูลของมอเตอร์ และวิธีวัดแรงบิดที่เพลา

วิธีดำเนินการ

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน ใช้วิธีการวัดความเร็วรอบ แรงดัน กระแส และกำลังงานขาเข้าของมอเตอร์ โดยใช้ข้อมูลจากการวัดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมเพื่อนำมาคำนวณหาลำดับงานขาออก ดังนั้นทำให้ทราบประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยไม่ต้องถอดมอเตอร์ออกจากการใช้งาน ในข้อ 1 - 4 ได้อธิบายถึงรูปแบบวงจรสมมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีการหาอาหารของเชื้อแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง

1. วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ พารามิเตอร์ในสถานะคงตัวต่อเฟสที่มีความต้านทานของการสูญเสียเนื่องจากภาระการใช้รวมอยู่ด้วย [1] แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่

- r_1 คือ ความต้านทานขดลวดด้านสเตเตอร์
 x_m คือ ความต้านทานเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก
 r_2 คือ ความต้านทานขดลวดด้านโรเตอร์
 r_m คือ ความต้านทานในแกนเหล็ก
 x_1 คือ ความต้านทานเหนี่ยวนำด้านสเตเตอร์
 r_{st} คือ ความต้านทานจากภาระการใช้งาน
 x_2 คือ ความต้านทานเหนี่ยวนำด้านโรเตอร์
 V_1 คือ แรงดันต่อเฟสที่ป้อนเข้ามอเตอร์
 I_1 คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์
 I_2 คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์

จากรูปที่ 1 สามารถหาค่าแอดมิตแตนซ์ส่วนต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (1) - (3)

$$Y_1 = \frac{1}{r_1 + jx_1} \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{1}{r_2 / s + jx_2 + r_{st}} \quad (2)$$

$$Y_m = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{jx_m} \quad (3)$$

เมื่อ Y_1 และ Y_2 คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามลำดับ Y_m คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ความสูญเสียที่แกนเหล็ก และ S คือ สลิปของมอเตอร์ จากค่าแอดมิตแตนซ์ต่าง ๆ สามารถหาค่ากระแสสเตเตอร์ I_{e1} จากสมการที่ (4) ตัวอักษรท้อย e หมายถึง ค่าจากการประมาณหรือจากการคำนวณ กระแสโรเตอร์และกระแสความสูญเสียจากแกนเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) - (6)

$$I_{1e} = \frac{V_1 Y_1 (Y_2 + Y_m)}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \quad (4)$$

$$I_{2e} = \frac{V_1 Y_1 Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \quad (5)$$

$$I_{me} = \frac{V_1 Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_m} \quad (6)$$

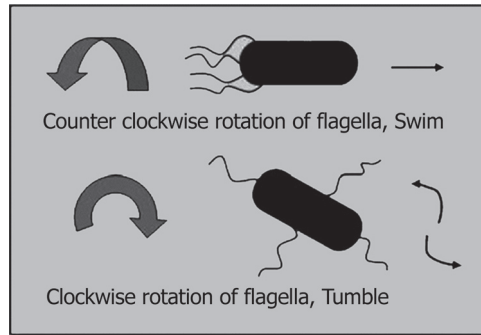
กำลังงานขาเข้า (P_{ine}) และกำลังงานขาออก (P_{out}) คำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_e) คือ สัดส่วนระหว่างกำลังงานขาเข้าและกำลังงานขาออกคำนวณจากสมการที่ (9)

$$P_{ine} = 3 \left[|I_{1e}|^2 r_1 + |I_{2e}|^2 \left[\frac{r_2}{s} + r_{st} \right] + |I_{me}|^2 r_m \right] \quad (7)$$

$$P_{oute} = 3 |I_{2e}|^2 r_2 \left[\frac{1-s}{s} - P_{fw} \right] \quad (8)$$

$$\eta_e(\%) = \frac{P_{oute}}{P_{ine}} \times 100 \quad (9)$$

2. ขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย (Bacteria foraging algorithm)



รูปที่ 2 การหาอาหารของแบคทีเรีย แบบการว่ายน้ำ (Swim) และการหมุน (Tumble) [1]

ขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียเป็นวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการหาอาหารของแบคทีเรีย อีโคไล (E. coli) แบคทีเรียชนิดนี้มีการเคลื่อนที่ด้วยการหมุนฟลาเจลลา (Flagella) ที่เป็นเส้นคล้ายหนวดอยู่รอบเซลล์ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเรียกว่า การว่ายน้ำ (Swim) และการเปลี่ยนทิศทางเรียกว่า การหมุน (Tumble) การว่ายน้ำและการหมุนนี้ทำให้แบคทีเรียสามารถหาอาหารแบบสุ่ม แบคทีเรียเซลล์ที่เข้าใกล้แหล่งอาหารจะแข็งแรงและสามารถแพร่พันธุ์หรือสืบพันธุ์เพื่อเพิ่มประชากรแบคทีเรีย ส่วนเซลล์ที่ไกลจากแหล่งอาหารเป็นเซลล์ที่อ่อนแอทำให้มีโอกาสตายในที่สุด ขั้นตอนการหาอาหารของแบคทีเรียมีขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน [6] คือ

2.1 การคีโมแทกซิส (Chemo taxis)

การเคลื่อนที่ไปในทิศทางแบบสุ่มเรียกว่า การหมุน (Tumble) และการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดิมเรียกว่า การว่ายน้ำ (Swim) ถ้ากำหนดให้ θ^i เป็นแบคทีเรียตัวที่ i ในรอบการคีโมที่ j แบคทีเรียจะเคลื่อนที่ไปด้วยสมการที่ (10)

$$\theta^i(j+1) = \theta^i(j) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (10)$$

เมื่อ $C(i)$ คือ ความยาวของการเคลื่อนที่ และ $\Delta(i)$ เป็นเวกเตอร์ทิศทางของการคีโม หากแบคทีเรียว่ายน้ำ $\Delta(i)$ จะเท่ากับเวกเตอร์ของการคีโมรอบก่อนหน้า แต่หากแบคทีเรียหมุน $\Delta(i)$ จะเท่ากับเวกเตอร์ที่สุ่มในขอบเขต $[-1, 1]$ ในแต่ละขั้นตอนการว่ายน้ำหรือการหมุนนั้นมีการคำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness value) เรียกว่า ความเหมาะสมช่วงก้าว (Fitness step)

2.2 การสืบพันธุ์ (Reproduction)

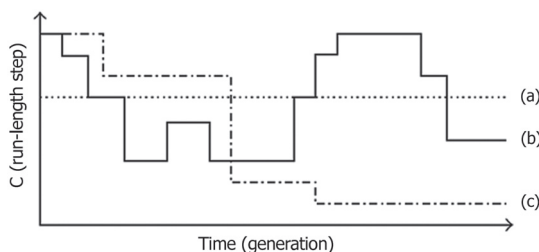
เมื่อผ่านขั้นตอนการคัดเลือกค่าความเหมาะสมช่วงก้าวของแบคทีเรียจะถูกนำมาบวกรวมกันเพื่อระบุค่าความแข็งแรงของแบคทีเรียแต่ละเซลล์ แล้วนำค่าความแข็งแรงมาเรียงลำดับ แบคทีเรียที่อ่อนแอครึ่งหนึ่งของแบคทีเรียทั้งหมดจะถูกกำจัด เหลือเฉพาะเซลล์ที่แข็งแรงซึ่งจะแบ่งตัวออกเป็นสองเซลล์เพื่อให้ได้ประชากรเท่าเดิม

2.3 การกำจัดและการแพร่กระจาย (Elimination and dispersal)

ขั้นตอนการคัดเลือกเป็นการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) และขั้นตอนการสืบพันธุ์ช่วยให้การลู่เข้าหาคำตอบได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียอาจติดอยู่ใกล้ ๆ กับจุดเริ่มต้น หรืออาจได้คำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local Optimum) ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมโดยรวม (Global Optimum) ดังนั้นเพื่อให้แบคทีเรียกระจายตัวมากขึ้นหลังจากขั้นตอนการสืบพันธุ์ จึงต้องมีการกำจัดแบคทีเรียจำนวนหนึ่งและแทนที่ด้วยแบคทีเรียที่อยู่ตำแหน่งอื่น

3. การหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (Adaptive bacterial foraging)

ถึงแม้ว่าขั้นตอนวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียถูกนำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลายแต่ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน วิธีการนี้ยังมีปัญหาในการลู่เข้าคำตอบไม่ดีนักเมื่อเทียบกับวิธีการที่มาจากแรงจูงใจจากธรรมชาติอื่น ๆ ดังนั้น Chen, H. et al. [6] ได้คิดค้นการปรับความยาวของการเคลื่อนที่หรือ $C(i)$ เรียกว่า การหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (Adaptive bacterial foraging optimization: ABFO)



รูปที่ 3 แนวคิดการปรับความยาวของการเคลื่อนที่ [6]

แนวคิดของ ABFO แสดงในรูปที่ 3 เห็นได้ว่า BFO แบบดั้งเดิมแสดงด้วยเส้น (a) พารามิเตอร์ $C(i)$ ถูกกำหนดโดยค่าเริ่มต้นและใช้ค่านี้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากกำหนดค่า $C(i)$ ยาวมีข้อดีคือสามารถหาอาหารได้เร็วแต่อาจข้ามจุดที่ต้องการ แต่หากกำหนดสั้นเกินไปก็ทำให้การลู่เข้าได้ช้า Chen, H. et al. [6] จึงได้เสนอการปรับพารามิเตอร์ 2 แบบ คือ การปรับตัวไดนามิก (Dynamic adaptation: ABFO₀) และการปรับตัวไดนามิกด้วยตัวเอง (Dynamic self-adaptation: ABFO₁)

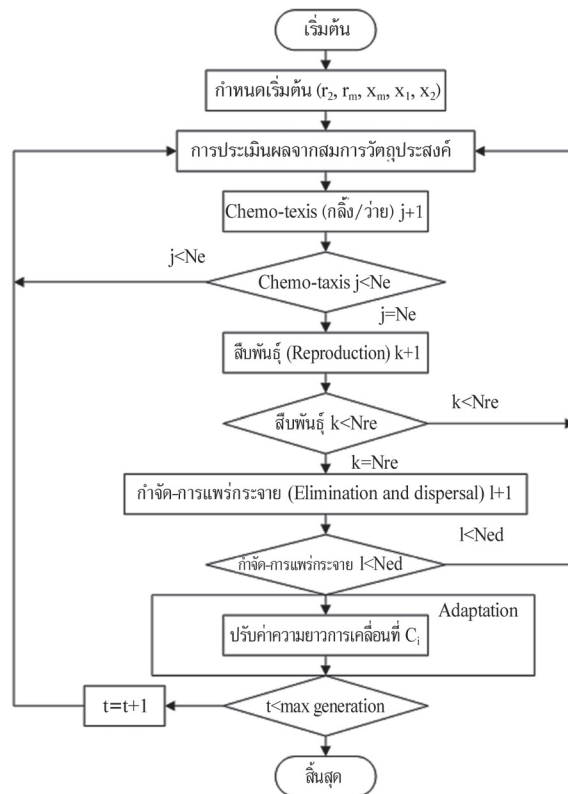
การปรับตัวแบบ ABFO₀ แสดงด้วยเส้น (c) แบคทีเรียจะปรับความยาวของการเคลื่อนที่ลดลงในแต่ละช่วงของการคำนวณเพื่อการค้นหาเฉพาะที่ดีขึ้น ดังนั้นวิธีนี้ทำให้หาคำตอบได้แม่นยำขึ้น ส่วนการปรับปรุงตัวเอง ABFO₁ แสดงด้วยเส้น (b) แบคทีเรียจะปรับความยาวของการเคลื่อนที่ลดลงคล้ายกับ ABFO₀ แต่จะปรับความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเหมาะสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการทดสอบของ Chen, H. et al. [6] พบว่า ABFO₀ มีประสิทธิภาพการทำงานดีกว่า ABFO₁ และ BFO แบบดั้งเดิม

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เลือกวิธีการ $ABFO_0$ ประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ โดยเรียกชื่อย่อเป็น ABFO

4. การประยุกต์ใช้วิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์

$$\text{Minimize } F = \left[\frac{I_{le}}{I_{lm}} - 1 \right]^2 + \left[\frac{P_{ine}}{P_{inm}} - 1 \right]^2 \quad (11)$$

วิธีการหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่น่าเสนอนี้ ใช้การวัดความต้านทานของสเตเตอร์ และวัดแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า ความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะใช้งาน เพื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (Error) ของข้อมูลที่ได้จากการวัดและการคำนวณด้วยวงจรสมมูลดังแสดงในข้อ 1 โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (11) กระบวนการทำงานของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กระบวนการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง

ขั้นตอนการคำนวณด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ด้วยวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเองมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นของการคำนวณ เช่น จำนวนแบคทีเรีย จำนวนรอบของการเคลื่อนที่ การสืบพันธุ์ การกำจัด และการแพร่กระจาย ค่าเริ่มต้นของความยาวในการเคลื่อนที่ ข้อมูลที่ได้จากการวัด เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า

- ขั้นตอนที่ 2 สุ่มแบคทีเรียเริ่มต้นตามจำนวนประชากร โดยแบคทีเรียแต่ละเซลล์ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลคือ r_2, x_1, x_2, r_m, x_m
- ขั้นตอนที่ 3 หาค่าเหมาะสมของแบคทีเรียในแต่ละตัวโดยคำนวณจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์สมการที่ (11)
- ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการคีโมแทกซิส (Chemo Taxis) เป็นการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของแบคทีเรียแต่ละตัวหรือปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลด้วยวิธีการกลิ้ง (Tumble) และการว่ายน้ำ (Swimming) ดังสมการที่ (10)
- ขั้นตอนที่ 5 ขั้นตอนการสืบพันธุ์ เรียงลำดับค่าความเหมาะสม เลือกเก็บแบคทีเรียที่แข็งแรงมากที่สุดครึ่งหนึ่งของประชากร และทำการสำเนาหรือสืบพันธุ์ให้ได้ประชากรเท่าเดิม
- ขั้นตอนที่ 6 ขั้นตอนการกำจัด-กระจายโดยสุ่มแบคทีเรียจำนวนหนึ่งเพื่อแทนที่ด้วยแบคทีเรียตัวใหม่
- ขั้นตอนที่ 7 ปรับความยาวการเคลื่อนที่ $C(i)$
- ขั้นตอนที่ 8 คำนวณประสิทธิภาพมอเตอร์จากแบคทีเรียที่มีค่าความเหมาะสมต่ำที่สุด

ผลการทดลอง

การทดสอบวิธีการหาประสิทธิภาพมอเตอร์โดยประยุกต์ใช้วิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง ทดสอบโดยการจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์โดยแบ่งเป็นช่วงต่าง ๆ เพื่อวัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ จากนั้นใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดคำนวณหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์โดยใช้สมการวัตถุประสงค์ เปรียบเทียบกับวิธีหาค่าประสิทธิภาพอีกสามวิธี คือ

1. วัดแรงบิดที่เพลา (Shaft Torque Method: STM) โดยใช้เครื่องวัดแรงบิดในห้องทดลอง
2. วิธีวงจรสมมูลของมอเตอร์ (Equivalent Circuit Method: ECM) ซึ่งทำได้จากการทดสอบภาวะไร้อะไหล่และลอคโรเตอร์

3. วิธีสลลิป (Slip Method: SM) โดยตัวอย่างผลการทดลองที่นำมาแสดงนี้มีสองกรณี คือมอเตอร์แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ขนาด 7.5 kW และมอเตอร์จริงขนาด 1.5 kW โดยรายละเอียดข้อมูลแผ่นป้ายที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในตารางที่ 1 ซึ่งกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

มอเตอร์	กำลังวัตต์ ขาออก	แรงดัน Δ/Y (V)	ความถี่ (Hz)	กระแส Δ/Y (A)	ความเร็วรอบ (rpm)	ตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า
กรณีที่ 1	7.5 kW	230/400	50	22.8/13.2	1,440	N/A
กรณีที่ 2	1.5 kW	220/380	50	6.4/3.7	1,400	0.8

ตารางที่ 2 ค่าขอบเขตของวงจรมุมที่ใช้คำนวณ

พารามิเตอร์	r_2	x_1, x_2	r_m	x_m
ขอบเขต	0.5 - 5	0.12 - 1.2	36 - 360	30 - 300

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของ BFO

พารามิเตอร์	BFO	ABFO
จำนวนแบคทีเรีย (s)	100	100
รอบของการคีโมแทกซิส (Nc)	20	20
จำนวนการว่ายน้ำ (Ns)	4	4
จำนวนรอบของการสืบพันธุ์ (Nre)	5	5
จำนวนรอบของการกำจัด (Ned)	10	10
ความน่าจะเป็นของการกำจัด (Ped)	0.25	0.25
ค่าเริ่มต้นความยาวการว่ายน้ำ $C(i)$	0.2	0.2
α	-	10
β	-	10
n	-	10
$\mathcal{E}_{initial}$		100

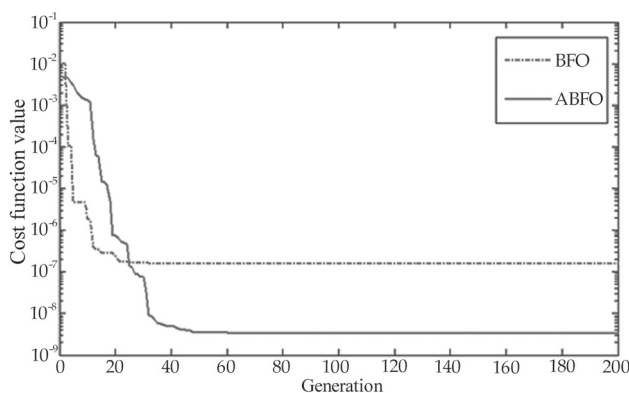
รายละเอียดพารามิเตอร์ของวิธีการหาอาหารของแบคทีเรีย BFO และแบคทีเรียแบบปรับตัว ABFO แสดงในตารางที่ 3 กำหนดค่าเริ่มต้นความยาวการเคลื่อนที่ $C(i)$ เท่ากับ 0.2 แบคทีเรียมีประชากร (s) จำนวน 100 เซลล์ ขั้นตอนคีโมแทกซิส (Nc) 20 รอบ ขั้นตอนของการสืบพันธุ์ (Nre) 5 รอบ ขั้นตอนการกำจัด (Ned) 10 รอบ ดังนั้นการคำนวณทั้งหมดแบคทีเรียจะผ่านการคีโมแทกซิส 1,000 ครั้ง คำนวณซ้ำ 25 รอบ แล้วนำผลประสิทธิภาพมาหาค่าเฉลี่ย ตารางที่ 4 และ 5 แสดงผล แรงดัน กระแส กำลังงานขาเข้า ความเร็วรอบ และตัวประกอบกำลังที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 4 ข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 7.5 kW

ภาระโหลด/ ข้อมูลทางไฟฟ้า	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังงานขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	ตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า
100 %	400	13.21	7,970	1,440	0.87
75 %	400	10.51	5,936	1,456	0.81
50 %	400	8.14	3,931	1,471	0.70
25 %	400	6.42	1,997	1,486	0.45

ตารางที่ 5 ข้อมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW

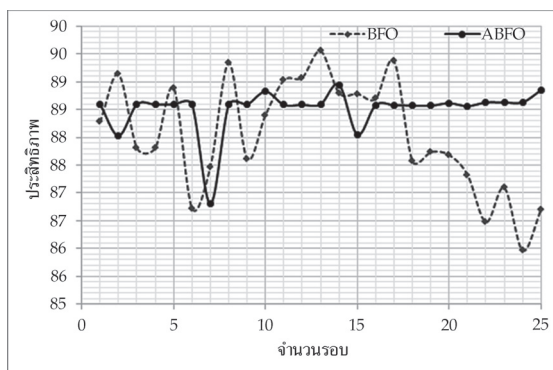
ภาระโหลด/ ข้อมูลทางไฟฟ้า	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังงานขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	ตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า
100 %	380	3.351	1,680	1,433	0.76
75 %	380	2.734	1,200	1,453	0.66
50 %	380	2.328	800	1,473	0.53
25 %	380	2.109	440	1,487	0.31



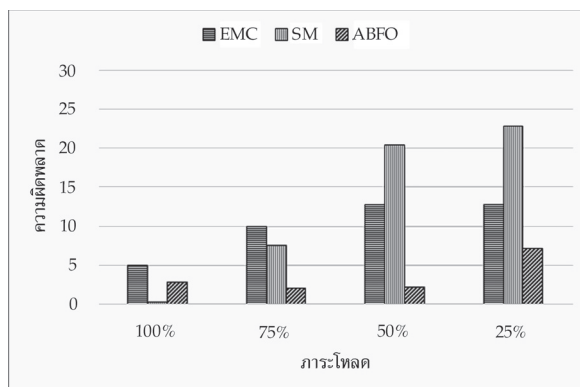
รูปที่ 5 การลู่เข้าหาคำตอบของวิธี BFO และ ABFO

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการลู่เข้าหาคำตอบที่คำนวณจากสมการวัตถุประสงค์ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ จากรูปวิธีการ BFO มีการลู่เข้าคำตอบเร็วกว่า แต่วิธี ABFO หาคำตอบของสมการวัตถุประสงค์ได้ต่ำกว่า

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นตัวอย่างการกระจายของคำตอบในการคำนวณประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยวิธี BFO และ ABFO จากรูปจะเห็นว่าวิธี BFO มีความแปรปรวนหรือกระจายตัวมากกว่าวิธี ABFO โดยวิธี BFO ได้ค่าเฉลี่ย 87.81 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.01 และวิธี ABFO ได้ค่าเฉลี่ย 88.59 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.04



รูปที่ 6 การกระจายของคำตอบในการคำนวณด้วยวิธี BFO และ ABFO



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกรณีมอเตอร์ 1.5 kW

ตารางที่ 6 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาด 7.5 kW

โหลดมอเตอร์	ประสิทธิภาพ (%)				ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์		
	STM	ECM	SM	ABFO	ECM	SM	ABFO
100 %	90.16	88.62	93.60	88.59	1.71	3.81	1.74
75 %	91.88	90.79	91.11	90.26	1.18	0.84	1.77
50 %	93.24	91.55	90.14	91.56	1.81	3.32	1.80
25 %	93.33	91.56	84.05	91.64	1.89	9.94	1.80

ตารางที่ 7 การประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขนาด 1.5 kW

โหลดมอเตอร์	ประสิทธิภาพ (%)				ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์		
	STM	ECM	SM	ABFO	ECM	SM	ABFO
100 %	88.87	84.56	88.81	91.33	4.84	0.07	2.7
75 %	94.59	85.28	87.59	92.69	9.84	7.40	2.00
50 %	95.82	83.68	76.29	93.84	12.66	20.38	2.06
25 %	87.76	76.62	67.81	94.01	12.69	22.73	7.1

ตารางที่ 6 และ 7 แสดงผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธี ABFO เปรียบเทียบกับวิธีวัดแรงบิดที่เพลา (STM) วิธีคำนวณจากวงจรสมมูล (ECM) และวิธีสลิป (SM) ของมอเตอร์ขนาด 7.5 kW และ 1.5 kW รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการจากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (ABFO) สามารถประเมินประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงกับการวัดแรงบิดที่เพลามากที่สุด และมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีการแบบอื่น โดยค่าความผิดพลาดของมอเตอร์ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีความผิดพลาดเฉลี่ย 1.78 % และมอเตอร์จริงมีความผิดพลาดเฉลี่ย 3.47 %

สรุป

บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะใช้งาน ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบการเสาะหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบปรับตัวเอง (ABFO) ลู่เข้าคำตอบได้ช้ากว่า แต่ถูกต้องกว่าเพราะวิธีการ ABFO มีการปรับค่าความยาวของการเคลื่อนที่หรือการว่ายน้ำของแบคทีเรียให้ลดลงจากค่าเริ่มต้น จึงทำให้เคลื่อนที่หรือเจอคำตอบได้ช้าลงแต่สามารถค้นหาคำตอบได้ละเอียดมากกว่าเดิม และเป็นผลให้คำตอบที่ได้แต่ละการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าวิธีการหาอาหารของแบคทีเรียแบบเดิม (BFO) เมื่อเปรียบเทียบการหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์จากวิธีที่นำเสนอเทียบกับวิธีสลิป และวิธีคำนวณด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบในสภาวะไร้โหลดและล็อกโรเตอร์ พบว่าที่โหลด 50, 75 และ 100 % วิธี ABFO สามารถหาได้ใกล้เคียงกับวิธีวัดแรงบิดโดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 % ส่วนที่โหลด 25 % มีความผิดพลาดสูงคือ 7.1 % แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีสลิปและวิธีคำนวณด้วยพารามิเตอร์ถือว่าผิดพลาดต่ำกว่า ดังนั้นวิธีการหาประสิทธิภาพด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถใช้งานได้สะดวก สามารถประเมินประสิทธิภาพได้โดยไม่หยุดการทำงานของมอเตอร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนวิจัยภายใต้โครงการส่งเสริมการผลิตผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีและเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

References

- [1] Sakthivel, V. P., Bhuvaneswari, R., and Subramanian, S. (2010). Non-Intrusive Efficiency Estimation Method for Energy Auditing and Management of In-Service Induction Motor using Bacterial Foraging Algorithm. **IET Electric Power Applications**. Vol. 4, No. 8, pp. 579-590
- [2] Wangsupapon, A., Phumiphak, P., and Chat-Uthai, C. (2007). Economical On-Site Efficiency Estimation Technique of Subway Tunnel Ventilation Fan Motor. **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol. 24, No. 1, pp. 7-12
- [3] Lu, B., Habetler, T. G., and Harley, R. G. (2006). A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**. Vol. 42, Issue 4, pp. 924-933

- [4] Santos, V. S., Felipe, P. V., and Sarduy, J. G. (2013). Bacterial Foraging Algorithm Application for Induction Motor Field Efficiency Estimation Under Unbalanced Voltages. **Measurement**. Vol. 46, Issue 7, pp. 2232-2237. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.03.019
- [5] Fogel, D. B. (2000). **Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence**. Second ed. Piscataway, N. J. : IEEE Press.
- [6] Chen, H., Zhu, Y., and Hu, K. (2011). Adaptive Bacterial Foraging Optimization. **Abstract and Applied Analysis**. Vol. 2011, Article ID 108269. p. 27. DOI: 10.1155/2011/108269



วิธีเชื่อมโยงการเดินทางและสร้าง Tour เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองความต้องการเดินทาง

Method of Trip-Chaining and Tour Formation for Travel Demand Model Development

ปฐิภาณ แก้ววิเชียร^{1*} และลัดดา ตันวานิชกุล¹

Received: March, 2017; Accepted: August, 2017

บทคัดย่อ

การเชื่อมโยงการเดินทางและการสร้าง Tours ปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในสายงานการสร้างแบบจำลองความต้องการเดินทาง เนื่องจากแนวคิดของ Tours จำลองรูปแบบการเดินทางของแต่ละบุคคลเชื่อมโยงกับจุดประสงค์การเดินทางที่สำคัญที่สุดของแต่ละบุคคลอย่างใกล้ชิด จากการที่มีจำนวนยานพาหนะส่วนบุคคลและผู้มีสถานะภาพการทำงานในครัวเรือนเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้พื้นที่ชานเมือง จึงมีแนวโน้มจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงการเดินทางจำนวนมาก กล่าวคือมีสัดส่วนการเดินทางที่ไม่สัมพันธ์กับที่พักอาศัย (Non-Home-Based, NHB) ในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง สำหรับแบบจำลอง Trip-Based ที่ใช้ในปัจจุบัน จำลองการเดินทางที่เป็น NHB อย่างไม่ดีพอ ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองที่พิจารณาปรากฏการณ์นี้อย่างเหมาะสมจะมีอิทธิพลที่สำคัญต่อสมรรถนะของแบบจำลอง ในทางตรงกันข้ามแบบจำลอง Tour-Based สามารถจับปฏิกิริยาระหว่างการเดินทางที่ทำในลูกโซ่การเดินทางเดียวกัน ด้วยการใช้ Tour เป็นหน่วยการตัดสินใจพื้นฐาน กล่าวคือ ลำดับของการเดินทางที่เริ่มต้นและสิ้นสุดที่บ้าน บทความนำเสนอวิธีเชื่อมโยงการเดินทางและสร้าง Tours จากข้อมูลบันทึกการเดินทางประจำวันภายในเขตเทศบาลเมืองขอนแก่น ปี 2558 ผลที่ได้ทำให้รู้ว่าการเดินทาง NHB นั้น กระจ่ายตัวอยู่ในทุกวัตถุประสงค์ของ Tour มากน้อยแตกต่างกัน โดยอยู่ใน Tour การทำงานมากที่สุด รองลงมาเป็น Tour ทางด้านการศึกษา สำหรับ Tour การทำงานนั้น

¹ Department of Civil Engineering, Khon Kaen University

* Corresponding Author E - mail Address: patiphan.ka@kkumail.com

การเดินทาง NHB กระจายตัวไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง เพราะว่ามีพฤติกรรมการเดินทางที่แตกต่างกัน โดยกระจายตัวอยู่ในระหว่างเดินทางออกจากที่ทำงานเพื่อกลับบ้านมากที่สุด รองลงมากระจายตัวอยู่ระหว่างอยู่ที่ทำงานและในขณะเดินทางไปทำงานน้อยที่สุด

คำสำคัญ : การเกิด Tour; ครึ่งหนึ่งของ Tour; จุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุด

Abstract

Today, trip-chaining and tour formation gained broad interest in the area of travel demand modeling arena since the idea of the tour carefully models travel patterns of each person and chain them to his/her most important purpose of travelling. Due to the increasing number of the vehicle ownership and family members who work to support their household as well as the changing in suburban land-use patterns, it is likely to see the escalation of trip-chaining, the non-home-based or NHB trip is relatively high. Furthermore, the recent Trip-based model is not good enough to model NHB trip. Therefore, model which will be developed by taking a careful consideration of this phenomenon will influence greatly on the effectiveness of the model. On the other hand, Tour-based model is able to capture interaction between trips made in the same trip chain using tour as the foundation of decision making, that is, the sequence of trip that originate and end at home. This paper presents how to create a chained trip and generate tours using surveys of daily trips within Khon Kaen municipality in 2015. The results show that NHB were found in every tour's purpose; however, the difference lie in the trip distribution, is work trip distribution ranks the highest, followed by school trip distribution. Trip distribution for NHB was found uneven in each direction of trip because of different travel behaviors. The highest trip distribution began at work ended at home trip follow by the one that began at work ended at work trip while the lowest distribution was that began at home ended at work trip.

Keywords: Tour Generation; Half-Tour; Primary Destination

บทนำ

ในการวางแผนโครงสร้างพื้นฐานระบบการขนส่ง ผู้วางแผนต้องมีความสามารถที่จะคาดการณ์การตอบสนองต่อความต้องการเดินทางที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณลักษณะของระบบขนส่ง และคุณลักษณะของบุคคลซึ่งใช้ระบบการขนส่ง แบบจำลองความต้องการเดินทาง (Travel Demand Model) จะถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์นี้

ภายในบริบทของการลอกเลียนแบบความต้องการเดินทาง แบบจำลองความต้องการเดินทาง Trip-Based ถูกนำมาใช้มากที่สุดในการวางแผนการขนส่ง เพื่อสนองความต้องการเดินทางที่เปลี่ยนแปลงไป

ในระยะยาว ด้วยการสร้างโครงสร้างพื้นฐาน อย่างเช่น ถนน ทางรถไฟ ให้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ที่ผ่านมามีหน้าที่หลักของแบบจำลองความต้องการเดินทาง คือ การพยากรณ์ในระดับรวม ในระยะยาว และ การทำนายความต้องการเดินทางเพื่อการประเมินค่าการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความจุหรือการสนองความต้องการเดินทางด้วยการสร้างโครงสร้างพื้นฐาน ไม่ได้เป็นการแก้ปัญหาที่ยั่งยืนในการจัดการกับระดับความต้องการเดินทางที่เพิ่มมากขึ้น [1] ก่อปรกับข้อจำกัดที่สำคัญของแบบจำลอง Trip-Based ซึ่งใช้ Trip ของแต่ละบุคคลเป็นหน่วยของการวิเคราะห์ [2] - [3] นั้นอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การเดินทางแต่ละการเดินทางที่สัมพันธ์กับที่พักอาศัยและไม่สัมพันธ์กับที่พักอาศัย เป็นการเดินทางที่เป็นอิสระกัน [4] - [5] ทำให้แบบจำลองเอาการเชื่อมโยงการเดินทางประจำวันของบุคคลออกไป [6]

ด้วยเหตุนี้ เมื่อมีการเชื่อมโยงการเดินทาง (Trip Chaining) จำนวนมาก การวางแผนการขนส่ง จึงได้พัฒนาไปสู่แผนการจัดการความต้องการเดินทางและมาตรการเชิงนโยบาย เพื่อการจัดการกับปัญหาการขนส่ง และส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืน อย่างเช่น มาตรการบรรเทาความแออัดช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และนโยบายส่งเสริมการใช้ระบบขนส่งสาธารณะ เป็นต้น

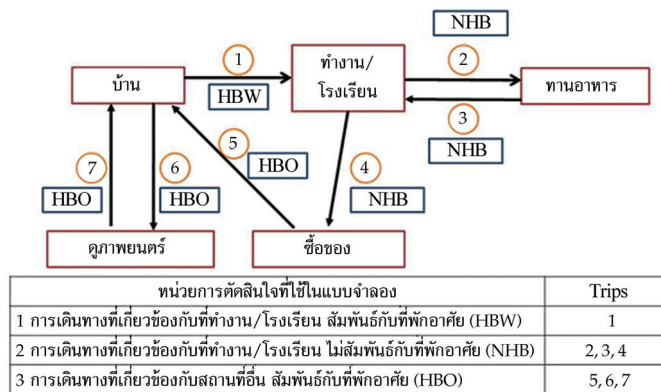
มาตรการเชิงนโยบาย พิจารณาจากความต้องการที่จะควบคุมการเดินทางในระดับรวม และต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงสร้างพื้นฐานให้ดียิ่งขึ้น ด้วยการใช่วิธีซึ่งวางหลักเกณฑ์เกี่ยวกับพฤติกรรมการเดินทางที่ระดับแยกย่อย (ระดับบุคคล) ทำให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมการเดินทาง ต่อนโยบายการจัดการความต้องการเดินทางในระยะสั้น [5] ดังนั้น แบบจำลอง Tour-Based หรือ Trip Chain [7] - [8] จึงถือกำเนิดขึ้น ด้วยการใช้ Tour แทนที่ Trip เป็นหน่วยของการวิเคราะห์ [9] - [10] เพื่อเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการเดินทางที่สำคัญ และจับปฏิภณระหว่างการเดินทางที่ทำในลูกโซ่การเดินทางเดียวกัน ทำในระหว่างวันเดียวกันหรือทำโดยคนในครอบครัวเดียวกัน

วิธีการศึกษา

1. นิยามของ Trip, Tour และ Half-Tour

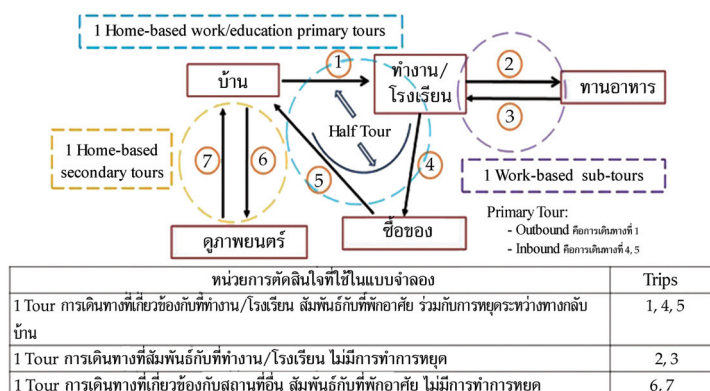
Trip เป็นหน่วยของการวิเคราะห์ของแบบจำลอง Trip-Based โดยการเดินทางหนึ่ง เป็นหน่วยของการเดินทางซึ่งเชื่อมโยง 2 ตำแหน่งที่ตั้ง ในขณะที่ Tour เป็นลำดับการเดินทางที่เริ่มต้นและสิ้นสุดที่บ้าน ส่วน Half-Tour เป็นการรวมกลุ่มของการเดินทางทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุดของ Tour (Outbound หรือ Direct Half-Tour) หรือจากจุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุดกลับมายังจุดเริ่มต้น (Inbound หรือ Return Half-Tour)

รูปที่ 1 เป็นตัวอย่างการเดินทางในหนึ่งวัน ในแบบจำลอง Trip-Based จะพิจารณาว่ามี 7 การเดินทาง โดยการเดินทางที่เป็น HB Trip ไม่ได้ถูกนำมาเชื่อมโยงกับ NHB Trip ทำให้เป็นจุดอ่อนที่สำคัญในแบบจำลองนี้ เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมของบุคคลที่ไม่ตรงกับความเป็นจริงและจะมีผลกระทบต่อแบบจำลองเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของ NHB Trip เพิ่มมากขึ้น [5], [10] - [11] จึงได้มีการนำแบบจำลอง Tour-Based มาจำลองพฤติกรรมการเดินทางของบุคคล ด้วยการเอาการเดินทางทั้ง 7 ที่เป็น HB Trip และ NHB Trip มาเชื่อมโยงกัน ทำให้เกิด Tour ขึ้น 3 Tour ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย Primary Tour, Secondary Tour และ Sub-Tour [4]



รูปที่ 1 ตัวอย่างของการเดินทาง (Trips)

โดยที่ Primary Tour เป็นการจำลองพฤติกรรมการเดินทางของบุคคล โดยมีลำดับการเดินทางเริ่มต้นและสิ้นสุดลงที่บ้าน ซึ่งภายใน Tour นี้ มีจุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุด (จากรูปที่ 2 คือสถานที่ทำงาน) และมีการทำการหยุดเพื่อซื้อของในระหว่างทางกลับบ้าน สำหรับ Secondary Tour เป็น Tour ใหม่ ที่มีลำดับการเดินทางซึ่งเริ่มต้นและสิ้นสุดลงที่บ้านเช่นเดียวกัน แต่มีจุดหมายปลายทางที่ไม่ใช่สถานที่ทำงาน และ Sub-Tour ซึ่งเป็น Tour ย่อยของ Primary Tour ที่เริ่มต้นและสิ้นสุดที่สถานที่ทำงานที่สำคัญที่สุดในวันเดียวกัน อย่างไรก็ตาม รูปแบบแนวคิดของ Tour ด้วยการนำการเดินทางที่มากกว่า 2 การเดินทางมาเชื่อมโยงกัน ยกอย่างยิ่งสำหรับการจำลองโดยตรง จึงได้มีการเสนอให้จำลองทีละครึ่งหนึ่งของ Tour (Journey หรือ Half-Tour) คือจำลองส่วนของ Outbound หรือ Direct Half-Tour (การเดินทางที่ 1 ใน Primary Tour) แล้วจึงจำลองส่วนของ Inbound หรือ Return Half-Tour (การเดินทางที่ 4 และ 5 ใน Primary Tour) [12]



รูปที่ 2 ตัวอย่างของ Tours และ Half-Tour (รูปแบบ Tour เต็มวัน)

2. โครงสร้างแบบจำลอง Trip-Based และ Tour-Based

แบบจำลองต่อเนื่อง 4 ขั้นตอนหรือที่เรียกว่า Four-Step Model นั้นเป็นแบบจำลองแบบรวมที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์การเดินทางภายในพื้นที่ เป็นแบบจำลองที่ใช้กันทั่วไปมานานหลายทศวรรษ [13] โครงสร้าง

ของ Four-Step Model ใช้ Trip ของแต่ละบุคคลเป็นหน่วยของการวิเคราะห์ ในงานวิจัยจึงเรียกแบบจำลองนี้ว่า Trip-Based โดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 การเกิดการเดินทาง ขั้นตอนที่ 2 การกระจายการเดินทาง ขั้นตอนที่ 3 การเลือกรูปแบบการเดินทาง และขั้นตอนที่ 4 การแจกแจงการเดินทาง อย่างไรก็ตาม เพื่อที่จะจัดการความต้องการเดินทางในระยะสั้น (Short Term) แบบจำลอง Tour-Based จึงถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบสำคัญ ในการอธิบายและจำลองรูปแบบการเดินทางด้วยการนำ Trips มาเชื่อมโยงกัน แล้วจึงเริ่มทำการพิจารณารายละเอียดพฤติกรรมการเดินทางที่สำคัญที่สุดที่ระดับ Tour (Tour-Level) ก่อน เนื่องจากกิจกรรมที่จุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุด จะควบคุมพฤติกรรมการเดินทางของบุคคลนั้น จากนั้นจึงพิจารณารายละเอียดย่อยที่ระดับ Trip (Trip-Level) เพื่อให้ครอบคลุมทุกคำถามและคำตอบการเดินทางหลัก [14] ตามแบบจำลอง Trip-Based

อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง Tour-Based จะมีรายละเอียดในขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 ที่ต่างจากแบบจำลอง Trip-Based ตรงที่แบบจำลอง Tour-Based จะมีรายละเอียดของการเชื่อมโยงกิจกรรมและการเดินทางของแต่ละบุคคล ที่สอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ในระดับ Tour ซึ่งประกอบด้วย การเลือกจุดหมายปลายทาง การเลือกรูปแบบการเดินทาง และการเลือกช่วงเวลา และในระดับ Trip ซึ่งประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งการทำการหยุดระหว่างทาง รูปแบบการเดินทาง และเวลาการออกเดินทาง [14] - [15] ในขณะที่ขั้นตอนที่ 4 จะยังคงเหมือนกันทั้งสองแบบจำลอง

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดการลอกเลียนแบบกิจกรรมและการเดินทางของแบบจำลอง Tour-Based ในระดับ Tour และระดับ Trip เทียบกับ 3 ขั้นตอนแรกในแบบจำลอง Trip-Based จากตารางสามารถสรุปข้อได้เปรียบของแบบจำลอง Tour-Based ในแต่ละขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอน Trip Production คือความสัมพันธ์ที่ไต่ระหว่าง Tour และ Trip ที่ถูกสร้างขึ้นในระหว่างวัน ขั้นตอน Trip Attraction คือความแตกต่างระหว่างกิจกรรมที่สำคัญที่สุดและกิจกรรมอันดับรอง (การทำการหยุดระหว่างทาง) ขั้นตอน Trip Distribution คือ การเชื่อมโยงจุดเริ่มต้นและจุดหมายปลายทางของ NHB Trip เข้ากับ HB Trip และในขั้นตอน Modal Split คือ ความสอดคล้องกันของการเลือกรูปแบบการเดินทางของ Trip ทั้งหมดใน Tour กล่าวโดยสรุป จุดอ่อนที่สำคัญของแบบจำลอง Trip-Based คือการจำลอง NHB Trip และ HB Trip ที่เป็นอิสระกัน การแก้ปัญหาดังกล่าว ทำได้ด้วยการใช้แบบจำลอง Tour-Based ซึ่งนำการเดินทางที่ต่างกันของแต่ละบุคคลมาเชื่อมโยงกัน ทำให้สามารถจำลองกิจกรรมและการเดินทางที่แท้จริงของแต่ละบุคคล ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงเป็นอย่างมาก

3. การคัดกรองข้อมูล

การคัดกรองข้อมูล มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบข้อมูลการเดินทางที่ได้รับจากแบบสอบถาม ข้อมูลการเดินทางของครัวเรือน ให้สามารถนำมาสร้าง Tours ได้ โดยทำการตรวจสอบว่า จุดต้นทางของการเดินทางครั้งแรกและจุดหมายปลายทางของการเดินทางครั้งสุดท้าย คือ ที่พักอาศัยหรือไม่ ตรวจสอบเวลาที่เริ่มเดินทาง เวลาที่ถึงปลายทางของแต่ละการเดินทาง ว่าได้รับการบันทึกและสามารถจัดเรียงได้ตามลำดับเวลาหรือไม่ และตรวจสอบลักษณะและสถานที่ตั้งต้นทางของแต่ละการเดินทางว่าเป็นจุดเดียวกันกับลักษณะและสถานที่ตั้งปลายทางของการเดินทางก่อนหน้า หรือไม่

การคัดกรองข้อมูลจะทำให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ได้ของแต่ละบุคคลตลอดวันนั้นจะถูกนำมาพิจารณา และสามารถถูกนำมาพล็อตในแผนผังเวลาและพื้นที่ (Time and Space) ได้

ตารางที่ 1 รายละเอียดการลอกเลียนแบบกิจกรรมและการเดินทางของแบบจำลอง Tour-Based ในระดับ Tour และระดับ Trip กับแบบจำลอง Trip-Based [15]

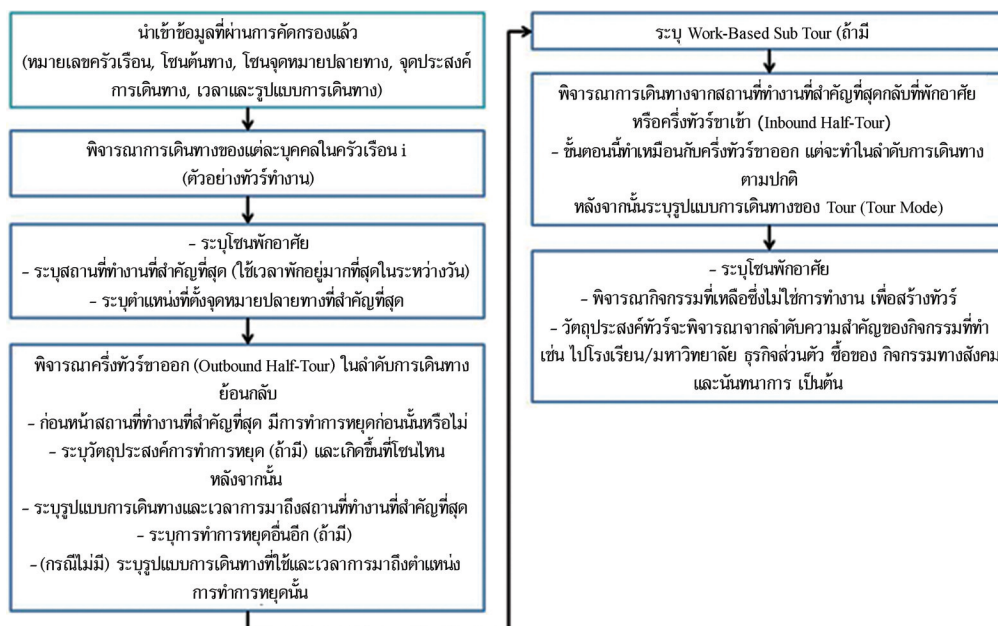
แบบจำลอง Trip-Based	แบบจำลอง Tour-Based	
	Tour-Level	Trip-Level
Trip Production	แบบแผนกิจกรรมการเดินทาง ประจำวันในเทอมของ Tour	ความถี่ของการหยุด โดยชนิดของกิจกรรม
Trip Attraction	ตัวแปรที่ใช้วัดการเลือกโซนจุดหมาย ปลายทางที่สำคัญที่สุด	ตัวแปรที่ใช้วัดโซนที่เป็น ตำแหน่งของการหยุด
Trip Distribution	การเลือกจุดหมายปลายทาง ที่สำคัญที่สุด	การเลือกตำแหน่งที่ตั้งการหยุด
Modal Split	การรวมเข้าด้วยกันของรูปแบบ การเดินทางทั้งหมดของ Tour	การเลือกรูปแบบการเดินทาง

4. การสร้าง Tour

จากการทบทวนงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการเดินทางของแต่ละบุคคลที่ถูกคัดกรองแล้ว สามารถนำมาสร้าง Tour เพื่อใช้เป็นหน่วยของการวิเคราะห์ในแบบจำลอง Tour-Based ได้ โดยการนำ NHB Trip และ HB Trip ซึ่งมีรูปแบบการเดินทาง จุดหมายปลายทาง และช่วงเวลาของวันที่แตกต่างกัน มาเชื่อมโยงกันไว้ใน Tour เดียวกัน ดังรูปที่ 3

เริ่มต้นโดยระบุสถานที่ทำงานที่สำคัญที่สุด ถ้ามีมากกว่าหนึ่งการเดินทางไปทำงาน สถานที่ทำงานที่ใช้เวลามากที่สุดในระหว่างวัน จะเป็นสถานที่ทำงานที่สำคัญที่สุด (ตำแหน่งที่ตั้งจุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุด) โดยที่ Tour หนึ่งนั้น จะมีจุดต้นทางที่บ้านและสิ้นสุดที่บ้าน ซึ่งอาจจะมีหรือไม่มีการทำงานหยุดระหว่างทางก็ได้ ซึ่งถ้ามีการทำการหยุดระหว่างทางขาออก (Outbound Half-Tour) (จะพิจารณาลำดับการเดินทางในลำดับย้อนกลับจากจุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุด) จะระบุตำแหน่งที่ตั้งการทำการหยุดนั้น และระบุรูปแบบการเดินทางที่ใช้เดินทางมายังสถานที่ทำงานที่สำคัญที่สุด จากนั้นจึงระบุเวลาการมาถึงสถานที่ทำงานที่สำคัญที่สุดนั้น ทำการพิจารณาต่ออีกว่าเกิดการทำการหยุดระหว่างทางขาออกในลำดับอื่นอีกหรือไม่ ซึ่งถ้าไม่มีให้ระบุรูปแบบการเดินทางที่ใช้เดินทางมายังตำแหน่งที่ตั้งการทำการหยุดระหว่างทางขาออกจุดแรกนี้ รวมถึงระบุเวลาที่มาถึงตำแหน่งที่ตั้งการทำการหยุด ในส่วนการเดินทางจากสถานที่ทำงานที่สำคัญที่สุดเพื่อกลับบ้าน ถ้าไม่มีการทำการหยุดระหว่างทางขาเข้า (Inbound Half-Tour) ให้ระบุเวลาออกเดินทางจากสถานที่ทำงานที่สำคัญที่สุดนั้น แต่ถ้ามีการทำการหยุดระหว่างทางขาเข้า ก็ให้พิจารณาเช่นเดียวกันกับการทำการหยุดระหว่างทางขาออก เพียงแต่ลำดับการพิจารณาให้พิจารณาในลำดับการเดินทางตามปกติ ในขณะที่รูปแบบการเดินทางของ Tour (Tour Mode) ทั้งขาออกและขาเข้า กำหนดให้เป็นรูปแบบการเดินทางที่ใช้เวลาที่ยาวนานที่สุด

สำหรับ Tour ที่สัมพันธ์กับที่พักอาศัยอื่นที่ไม่ใช่ Tour การทำงาน สามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกันกับ Tour การทำงาน โดยการกำหนดวัตถุประสงค์ของ Tour จะพิจารณาจากลำดับความสำคัญของกิจกรรมที่ทำ เช่น ไปโรงเรียนหรือมหาวิทยาลัย ไปรับส่งบุตรหลาน ธุริกิจส่วนตัว การค้า ธนาคาร ชื้อของ กิจกรรมทางสังคมและนันทนาการ เป็นต้น



รูปที่ 3 แนวทางการสร้าง Tour จากข้อมูลการเดินทางของแต่ละบุคคล

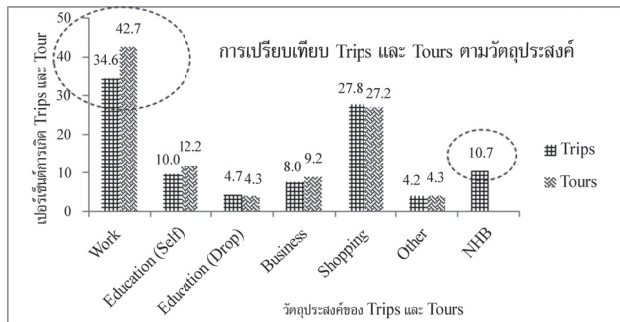
ข้อมูลการเดินทางของแต่ละบุคคล จะถูกสร้างให้เป็นรูปแบบ Tour โดยในแต่ละ Tour จะประกอบด้วย ข้อมูลระดับ Tour (Tour-Level) และข้อมูลระดับการเดินทาง (Trip-Level) ในส่วนของข้อมูลทางสังคม ประชากรของแต่ละบุคคลและครัวเรือน จะถูกนำมารวมกันตามลำดับไปยังไฟล์ข้อมูล Tour อย่างเหมาะสม

การที่ต้องนำข้อมูลทางสังคมประชากรของแต่ละบุคคลและครัวเรือน ไปรวมกับข้อมูลการเดินทาง ในระดับ Tour และ Trip ก็เพื่อที่จะศึกษาว่า Trip Chain เกิดขึ้นได้อย่างไรและทำไมจึงเกิดขึ้น ทำให้ต้องศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานที่ส่งผลต่อ Trip Chain ของบุคคลตามแต่ละวัตถุประสงค์การเดินทาง เช่น การกระจายของจำนวนข้อลูกโซ่ใน Trip Chain การรวมกันของวัตถุประสงค์การเดินทางที่ถูกเชื่อมโยง ลักษณะเฉพาะของครัวเรือนที่ส่งผลต่อชนิดของ Trip Chain ที่สร้างขึ้น รูปแบบการเดินทางที่ใช้ในแต่ละชนิดของ Trip Chain และลักษณะเฉพาะของ Trip Chain ในแต่ละช่วงเวลาของวัน เป็นต้น

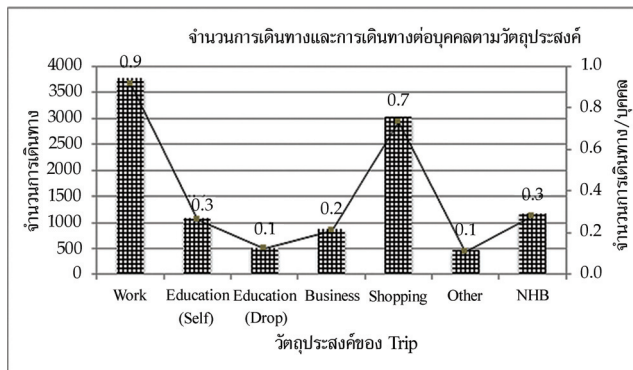
ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

งานวิจัยได้นำข้อมูลการเดินทางจากโครงการการศึกษาความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม เศรษฐกิจ การเงินและผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการทางพิเศษ เพื่อจัดทำแผนแม่บททางพิเศษ จังหวัดขอนแก่น ในปี 2558 จำนวน 2,015 ครัวเรือน (ผู้ให้ข้อมูลจำนวน 4,757 คน โดย 616 คน ไม่มีข้อมูลการเดินทาง) ตัวอย่างประชากรถูกเลือกโดยการสุ่ม และบันทึกข้อมูลการเดินทางประจำวัน ในแบบสอบถามข้อมูล การเดินทางของครัวเรือน ซึ่งทั้งหมดถูกกระทำผ่านการสัมภาษณ์แบบซึ่งหน้า (Face-to-Face Interviews) จากพื้นที่ย่อยทั้งหมด 73 พื้นที่ย่อย โดยในแต่ละพื้นที่ย่อยใช้ฐานข้อมูล GIS Database มาใช้เพื่อแบ่ง เขตพื้นที่ศึกษา โดยได้เพิ่มพื้นที่ย่อยชานเมืองและนอกเมืองอีก 10 พื้นที่ รวมเป็น 83 พื้นที่ มาสร้างเป็น Tour ตามวัตถุประสงค์ของจุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับ

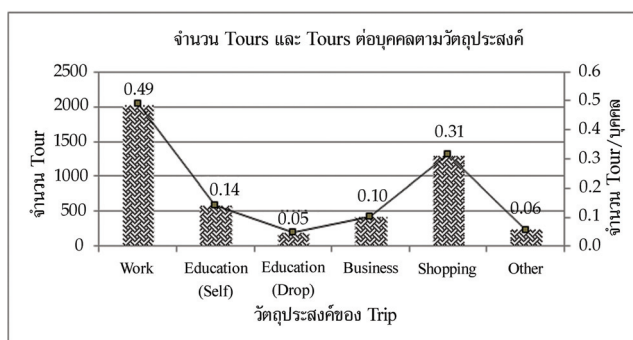
ข้อมูลการเดินทางที่แบ่งตามวัตถุประสงค์การเดินทาง (ซึ่งได้จากโครงการฯ) ดังในรูปที่ 4(ก) ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์ของ Trips ตามวัตถุประสงค์การเดินทางเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของ Tours ตามวัตถุประสงค์ของจุดหมายปลายทางที่สำคัญที่สุด



(ก) การเปรียบเทียบ Trips และ Tours ตามวัตถุประสงค์



(ข) จำนวนการเดินทางและการเดินทางต่อบุคคล ตามวัตถุประสงค์



(ค) จำนวน Tours และ Tours ต่อบุคคล ตามวัตถุประสงค์

รูปที่ 4 จำนวนและเปอร์เซ็นต์การเกิด Trips และ Tours ตามวัตถุประสงค์

ผลจากการนำแนวคิดเรื่องการนำการเดินทางมาเชื่อมโยงกันนี้ ทำให้เห็นถึงความแตกต่างกันของ HBW Trip (34.6 %) และ Home-Based Work Tour (42.7 %) ซึ่งมีมากที่สุดจากทุกวัตถุประสงค์ (8.1 %) ในขณะที่วัตถุประสงค์อื่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ความแตกต่างที่ควรจะเหมือนกันกับข้อมูลที่ได้

จากโครงการฯ นี้ บอกเป็นนัยว่าเกิด Trip Chain ขึ้น (มี NHB Trips กระจายตัวอยู่ 10.7 % ในทุกวัตถุประสงค์) หรือเกิดการทำการหยุดในระหว่างทางขึ้น (การทำการหยุดระหว่างบ้านกับที่ทำงาน หรือระหว่างที่ทำงานกับบ้าน) และจากผลที่ได้สามารถบอกได้ว่า การทำงานยังคงมีความสำคัญและเป็นแรงผลักดันในการเดินทาง ในขณะที่เมื่อทำการพิจารณา Home-Based Education Tour ซึ่งมี 16.5 % ร่วมกับ Home-Based Work Tour สามารถบอกได้ว่า 2 กิจกรรมหลักเหล่านี้แทบจะเป็นครึ่งหนึ่งของ Tour ทั้งหมด รูปที่ 4(ข) และ (ค) ยังบอกได้อีกว่าโดยเฉลี่ยแล้ว แต่ละคนในเขตเมืองขอนแก่นจะทำการเดินทาง 2.6 Trips ต่อวัน และ 1.15 Tours ต่อวัน เฉลี่ยแล้ว 2.3 Trips ต่อ Tour

แบบจำลองความต้องการเดินทางการขนส่ง จะให้ความถูกต้องและให้ความเข้าใจในพฤติกรรม การเดินทางได้มากขึ้น เมื่อนำการเดินทางของแต่ละบุคคลมาเชื่อมโยงกัน ซึ่งจะทำให้เห็นถึงการกระจายตัวของ NHB Trips ในแต่ละวัตถุประสงค์ของ Tour และจะมีประโยชน์ต่อการกำหนดนโยบายการจัดการ ความต้องการเดินทาง เช่น กลยุทธ์การใช้ที่ดิน กลยุทธ์การกำหนดราคา และการกำหนดเวลาการทำงาน เป็นต้น ตารางที่ 2 ได้แสดงจำนวนและเปอร์เซ็นต์ของ NHB Trips ในแต่ละวัตถุประสงค์ของ Tour จะเห็นได้ว่า NHB Trips ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 1,165 การเดินทาง ได้กระจายตัวอยู่ 0.5 ถึง 63 % ในแต่ละวัตถุประสงค์ของ Tour โดยที่ NHB Trips กระจายตัวอยู่ที่ Work Tour มากที่สุด คือ 62.6 % และมี Tour ไปเรียนหนังสือ (Education (Self)) และ Tour รับส่งลูกหลานไปโรงเรียน (Education (Drop)) ซึ่งเป็น กิจกรรมหนึ่ง ที่มีความสำคัญต่อการกำหนดนโยบายการจัดการความต้องการเดินทาง มี NHB Trips กระจายตัวอยู่ 11.4 และ 2.8 % ตามลำดับ การที่นำ NHB Trips มาเชื่อมโยงกับการเดินทางที่เป็น HB นี้ ถือเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญมากของแบบจำลอง Tour-Based อย่างไรก็ตาม มี NHB Trip อยู่ 0.2 % ที่ไม่สามารถจัดรูปแบบ Tour ได้ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของข้อมูล

ตารางที่ 2 เปอร์เซนต์ของ NHB ซึ่งกระจายตัวในแต่ละวัตถุประสงค์ Tours

วัตถุประสงค์ Trip	วัตถุประสงค์ Tours						
	Work	Education (Self)	Education (Drop)	Business	Shopping	Other	Non Tour
NHB Trips	729	133	33	145	117	6	2
(%)	(62.6)	(11.4)	(2.8)	(12.5)	(10.0)	(0.5)	(0.2)
							1,165
							(100)

เพื่อที่จะเข้าใจลักษณะของ NHB Trips ที่กระจายตัวอยู่ 10.7 % ในทุกวัตถุประสงค์ของ Tour ตามรูปที่ 4(ก) และรูปแบบของ Trip Chaining ให้มากขึ้นอีก จะแบ่งกลุ่มของ NHB Tour-Based Trip Chain ออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้ (1) Journey to work คือการเดินทางที่มี NHB เกิดขึ้นในขณะเดินทางไปทำงาน (2) Journey from work คือการเดินทางที่มี NHB เกิดขึ้น เมื่อเดินทางออกจากที่ทำงาน (3) At work คือการเดินทางที่มี NHB เกิดขึ้นในขณะที่อยู่ที่ทำงาน และ (4) Non-Work-Related คือการเดินทางที่มี NHB แต่ไม่สัมพันธ์กับการทำงาน แล้วนำมาแสดงในแผนภาพต้นไม้เชิงลำดับชั้น (Hierarchical Tree) ตามรูปที่ 5 ซึ่งแผนภาพได้แสดงลำดับชั้นของการแยกข้อมูลการเดินทาง ซึ่งได้จากการสำรวจ ตามกลุ่มของ NHB Tour-Based และจำนวนของตัวอย่างในแต่ละกลุ่มย่อย

จากนิยามที่ว่า Tour คือการเดินทางที่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็นจุดเดียวกัน ซึ่งในที่นี้คือบ้าน สามารถนำการเดินทางทั้งหมด (10,889 การเดินทาง) มาสร้าง Tours ได้ 4,847 Tour ประกอบด้วย Tours ซึ่งสัมพันธ์กับการทำงาน (Work-Related) 2,072 Tours และ 2,776 Tours ไม่สัมพันธ์กับการทำงาน (Non-Work-Related) เมื่อพิจารณาจำนวน Tours ซึ่งสัมพันธ์กับการทำงาน และไม่มี NHB Trips (Without NHB) ทั้ง Journey to work และ Journey from work มีจำนวนทั้งสิ้น 1,856 Tours หมายความว่า Tour เหล่านี้ มีสถานที่ทำงานเป็นสถานที่ทำการหยุดระหว่างทางและ จะทำการหยุดอีกครั้งที่บ้านเท่านั้น ในขณะที่อีก 216 Tours จากทั้ง 2 กลุ่มเช่นกัน มี NHB Trips (With NHB) รวมอยู่ด้วยจำนวน 730 การเดินทาง แบ่งเป็น 370 NHB Trips มาจาก Journey to work และ 360 NHB Trips มาจาก Journey from work ซึ่งหมายความว่า มีการทำการหยุดในระหว่างทางไปและจากที่ทำงาน นอกเหนือจากการทำการหยุดที่สถานที่ทำงานและที่บ้าน โดย Journey to work นั้นมี 217 NHB Trips อยู่ที่ At work ในขณะที่ Tours ซึ่งไม่สัมพันธ์กับการทำงาน มี NHB Trips กระจายอยู่ที่ Journey to non-work และ Journey from non-work จำนวน 141 และ 294 การเดินทาง ดังนั้น แผนภาพต้นไม้เชิงลำดับชั้นที่ได้ จึงสามารถแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของ NHB Trips (10.7 %) ตามรูปที่ 4(ก) ที่อยู่ในแต่ละกลุ่มของ NHB Tour-Based ได้เป็นอย่างดี

สำหรับ Tours ซึ่งสัมพันธ์กับการทำงาน การที่ Journey to work และ Journey from work มีจำนวน NHB Trips ไม่เท่ากัน เป็นเพราะว่ามีพฤติกรรมการเดินทางที่แตกต่างกัน กล่าวคือ มีชนิดของกิจกรรมที่แตกต่างกันเกิดขึ้นระหว่างทางไปและจากที่ทำงาน

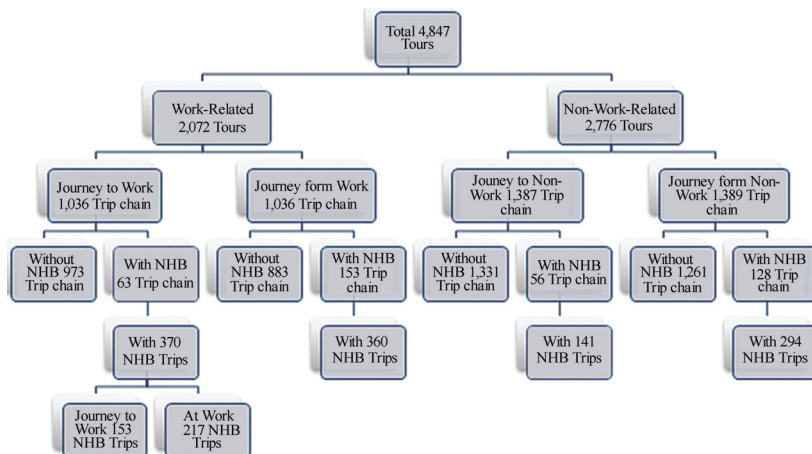
ผลที่ได้นั้น ดอกยี่ว่าแนวคิดที่นำการเดินทางของแต่ละบุคคลมาเชื่อมโยงกันเป็น Tour นั้น เป็นแนวคิดที่พิจารณาการเดินทางอย่างละเอียด ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองความต้องการเดินทางอย่างแท้จริง การพิจารณาอย่างละเอียดนี้ จะไม่อธิบายพฤติกรรมการเดินทางเพียงแค่ว่าการเดินทางนั้นจะไปไหน (Destination) ช่วงเวลาไหนที่เดินทาง (Time of Day) และเดินทางด้วยรูปแบบการเดินทางใด (Mode) เหมือนกับที่ใช้ในแบบจำลองความต้องการเดินทางแบบดั้งเดิม แต่จะมีมิติหรือขอบเขตที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการเดินทางที่มากกว่า อย่างเช่น จุดหมายปลายทางหลัก (Primary Destination) ช่วงเวลาของวันของ Tour (Entire-Tour Time of Day) การผสมกันของรูปแบบการเดินทางของ Tour (Entire-Tour Mode Combinations) ความถี่ของการหยุด (Stop Frequency) ช่วงเวลาการเดินทางของวัน (Trip Time of Day) และรูปแบบการเดินทาง (Trip Mode) ซึ่งจะทำให้แบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องมากกว่า

สรุป

บทความนำเสนอการนำข้อมูลการเดินทางมาพิจารณาสร้างเป็น Tour ด้วยการนำแต่ละการเดินทางมาเชื่อมโยงกัน (การนำ NHB Trips มาเชื่อมโยงกับการเดินทางที่เป็น HB) แทนการพิจารณาให้แต่ละการเดินทางเป็นอิสระกัน เพื่อให้เห็นถึงพฤติกรรมการเดินทางที่ชัดเจน ใกล้เคียงความจริง และมีประโยชน์ต่อการกำหนดนโยบายการจัดการความต้องการเดินทางด้านการขนส่ง อีกทั้งยังน่าสนใจและเข้าใจง่ายกว่า ผลที่ได้ทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแต่ละการเดินทางที่นำมาเชื่อมโยงกัน เมื่อมีข้อจำกัดด้านเวลาและระยะทาง เข้าใจแนวความคิดของบุคคล เข้าใจในกิจกรรมประจำวันที่สำคัญที่สุดของคนเหล่านั้น เช่น การทำงานของคนวัยทำงาน และการไปโรงเรียนของเด็กนักเรียนและนักศึกษา เป็นต้น

ในขณะที่วิธี Trip-Based ซึ่งสมมุติให้แต่ละการเดินทางเป็นอิสระกัน ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเดินทางเหล่านั้น

งานวิจัยที่ผ่านมาในเมืองใหญ่และเขตเทศบาลนครขอนแก่น ใช้ข้อมูลการสำรวจการเดินทางของครัวเรือน มาทำการพัฒนาแบบจำลอง Trip-Based เป็นหลัก อย่างไรก็ตาม สามารถใช้ข้อมูลเดียวกันนี้เพื่อนำมาสร้างเป็น Tours และใช้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาปรับปรุงระบบแบบจำลองความต้องการเดินทางได้ เนื่องจากแนวคิดของ Tour สามารถจำลองการเดินทางของแต่ละบุคคล ซึ่งเชื่อมโยงกับกิจกรรมของบุคคลเหล่านั้นได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 5 ลำดับชั้นการแยกข้อมูลการสำรวจการเดินทาง ตามกลุ่มของ NHB Tour-Based และจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มย่อย (จากการนำการเดินทางมาเชื่อมโยงกัน)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์สรศักดิ์ เชี่ยวศิริกุล อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ช่วยถอดข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลการสำรวจการเดินทางของครัวเรือน ในโครงการการศึกษาความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม เศรษฐกิจ การเงินและผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการทางพิเศษ เพื่อจัดทำแผนแม่บททางพิเศษในจังหวัดขอนแก่น ในปี 2558 ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้บทความสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ซึ่งทางผู้วิจัยจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

References

- [1] de Dios Ortíz, J. and Luis G. Willumsen. (2011). **Modelling Transport**. John Wiley & Sons.
- [2] Vovsha, P., Bradley, M., and Bowman, J. L. (2005). Activity-Based Travel Forecasting Models in the United States: Progress Since 1995 and Prospects for the Future. **The EIRASS Conference on Progress in Activity-Based Analysis**. May 28-31, 2004, Vaeshartelt Castle, Maastricht, The Netherlands.

- [3] Milthorpe, F. and Daly, A. (2010). Comparison of Trip and Tour Analysis of Sydney Household Travel Survey Data. In **Australasian Transport Research Forum 2010 Proceedings**. 29 September - 1 October 2010, Canberra, Australia
- [4] Bradley, M., Bowman, J., and Lawton, T. K. (1999). A Comparison of Sample Enumeration and Stochastic Microsimulation for Application of Tour-Based and Activity-Based Travel Demand Models. **The European Transport Conference**, Cambridge.
- [5] Hall, R. (2012). **Handbook of Transportation Science**. Springer Science & Business Media.
- [6] Siripirote, T., Sumalee, A., Watling, D. P., and Shao, H. (2014). Updating of Travel Behavior Model Parameters and Estimation of Vehicle Trip Chain Based on Plate Scanning. **Journal of Intelligent Transportation Systems**. Vol. 18, No. 4, pp. 393-409
- [7] Primerano, F., Taylor, M. A., Pitaksringkarn, L., and Tisato, P. (2008). Defining and Understanding Trip Chaining Behaviour. **Transportation**. Vol. 35, No. 1, pp. 55-72
- [8] Venu, M. Garikapati, Daehyun You, Ram, M. Pendyala, Kyunghwi Jeon, Vladimir Livshits, and Peter, S. (2015). Tour Characterization Framework Incorporating Activity Stop-Sequencing Model System. **Transportation Research Record**. Vol. 2, No. 2494, pp. 77-86
- [9] McNally, M. and Rindt, C. (2008). **The Activity-Based Approach**. In Handbook of Transport Modelling.
- [10] Cascetta, E. (2009). **Transportation Systems Analysis: Models and Applications**. Springer Science & Business Media.
- [11] Donnelly, R. (2010). **Advanced Practices in Travel Forecasting**. Transportation Research Board.
- [12] P. B. Consult and Gallup Corporation. (2005). **The Integrated Regional Model Project**. Vision Phase Final Report.
- [13] Ho, C. and Mulley, C. (2013). **Incorporating Intrahousehold Interactions into a Tour-Based Model of Public Transport Use in Car-Negotiating Households**. Transportation Research Record.
- [14] Castiglione, J., Bradley, M., and Gliebe, J. (2015). **Activity-Based Travel Demand Models**. A Primer.
- [15] Davidson, W., Donnelly, R., Vovsha, P., Freedman, J., Reugg, S., and Hicks, J. (2007). Synthesis of First Practices and Operational Research Approaches in Activity-Based Travel Demand Modeling. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**. Vol. 41, No. 5, pp. 464-488



การประเมินสภาพเชื่อมด้วยเทคนิคการวัดความเร็วคลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ Dam Assessment by Multi-channel Analysis of Surface Wave Technique, MASW

ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง^{1*} ชนระบ วิชาลัย² อรรรรณ จันทสุทโธ¹ และณรงค์เดช ยังสุขเกษม³

Received: May, 2017; Accepted: June, 2017

บทคัดย่อ

การใช้คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ (MASW) เพื่อตรวจสอบสภาพเชื่อมดินบดอัดนับเป็นวิธีสมัยใหม่ที่ถูกนำมาใช้เพื่อประหยัดเวลาและงบประมาณในงานสำรวจบำรุงรักษาเขื่อน กรณีศึกษาของบทความนี้ใช้เขื่อนกระเสียว อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นสถานที่ทำการศึกษา เริ่มต้นจากการสร้างจุดกำเนิดคลื่นเนื่องด้วยการทุบฆ้อนเพื่อส่งคลื่นสัญญาณสะท้อนผ่านชั้นดินแล้วจะถูกตรวจจับด้วยตัวรับสัญญาณ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่านไปตามสายเคเบิลเพื่อเข้าสู่อุปกรณ์บันทึกผล ประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม Seisimager/SW ที่สามารถแปลงข้อมูลดิบจากลักษณะเส้นคลื่นให้อยู่ในรูปภาพตัดของชั้นดินแบบ 2 มิติ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างธรณีวิทยาบริเวณที่ดำเนินการสำรวจ ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจ มีค่าอยู่ระหว่าง 100 - 850 เมตร/วินาที ความเร็วคลื่นเฉือนสามารถจำแนกความหนาแน่นรวมถึงประเภทชั้นดิน โดยแบ่งชั้นดินออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่ม B ถึงกลุ่ม E จุดที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำอาจแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่มีความชื้นสูงและความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นผู้เกี่ยวข้องในการบำรุงรักษาเขื่อนจึงควรเฝ้าระวังจุดดังกล่าวเป็นพิเศษเพราะอาจเกิดการรั่วซึมของน้ำได้ การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้ MASW เพื่อลดระยะเวลาการทำงาน ประหยัดงบประมาณในการสำรวจ และมีความแม่นยำในการประเมินสภาพเชื่อมดินบดอัดอยู่ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือได้

คำสำคัญ : คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ; เขื่อนดินบดอัด; จุดกำเนิดคลื่นเฉือน; ภาพตัดของชั้นดิน

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

² Geo-physics Geo-physics Co., Ltd.

³ Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: narongchaiwiwatt@gmail.com

Abstract

Multi-channel surfing for monitoring dams is a modernised technological approach that saves time and money in dam maintenance. A Case study of the Krasio-Dam project located in Aumpoe Dan-Chang Suphan-Buri province. The starting from the generate shear wave source by beat the hammer to get the signal, then reflected signal go through the ground surface, then the receiver can get the signal. The receiver transforms into the data and go to recording station by cable. The recording station process data with seismager S/W. This program transforms wave signal to 2 D-crosection photo of geological structure of the surveyed section. The results showed that the speed of shear wave penetration travels between 100 and 850 meters per second. It is able to classify the densities and types of soil layer into four classes (labelled B to E). A low shear wave indicates high humidity with low density. These are critical areas of weakness that need monitoring and fast maintenance of the dam. The study showed the reductions in exploration working time as well as budget reductions and improved accuracy of dam assessment.

Keywords: Multi-Channel Analysis of Surface Wave; Earth Fill Dam; Shear Wave Source; Pseudo-section

บทนำ

เขื่อนเป็นสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่สำหรับกั้นทางน้ำ เพื่อใช้ในการเก็บกักน้ำและป้องกันอุทกภัยรวมถึงรองรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ประโยชน์ที่สำคัญของเขื่อน คือการเก็บน้ำจากช่วงฤดูน้ำหลากและปล่อยน้ำใช้ในการเกษตรกรรม อุปโภคบริโภคในช่วงขาดแคลนน้ำ เขื่อนยังคงใช้สำหรับป้องกันน้ำท่วมฉับพลันในฤดูที่น้ำไหลหลากอีกทางหนึ่ง โดยเขื่อนจะทำหน้าที่ชะลอความเร็วของน้ำเพื่อควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ปัจจุบันเขื่อนมีหน้าที่หลักอีกด้านคือการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งในประเทศไทยมาจากการปั่นไฟจากเขื่อน นอกจากนี้เขื่อนบางแห่งใช้เป็นสถานที่ท่องเที่ยวและกิจกรรมนันทนาการต่าง ๆ เช่น การล่องเรือหรือการตกปลา อย่างไรก็ตามจากกฎหมายมนุษยธรรมระหว่างประเทศกำหนดให้เขื่อนเป็น “สิ่งก่อสร้างที่มีปัจจัยอันตราย” เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าเมื่อเขื่อนแตกจะส่งผลกระทบต่ออย่างใหญ่หลวงต่อการทำลายล้างชีวิตพลเรือนและสิ่งแวดล้อมได้อย่างฉับพลัน เหตุการณ์เขื่อนแตกนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับอุบัติเหตุอื่น ๆ แล้ว จัดได้ว่าเกิดขึ้นได้น้อยมาก แต่เมื่อเกิดแล้วจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างใหญ่หลวง ดังนั้นการศึกษาวิจัยเพื่อตรวจสอบและบำรุงรักษาเขื่อนเป็นเรื่องจำเป็นที่ไม่ควรมองข้าม

การตรวจสอบสภาพเขื่อนเก่าที่ได้ผลดีที่สุด คือการเจาะหลุมเก็บตัวอย่างดินบดอัดแกนเขื่อนและทำการทดสอบหาค่าสำคัญทางวิศวกรรมในหลุมเจาะ แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่รบกวนโครงสร้างเขื่อน ดังนั้นการเลือกใช้วิธีธรณีฟิสิกส์ที่ปราศจากการรบกวนโครงสร้างเขื่อนจึงเริ่มเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น [1] ทั้งนี้เพื่อให้ผลการศึกษาแม่นยำมากขึ้นอาจเลือกใช้วิธีการอื่นที่เหมาะสมกับสภาพทางธรณีนั้น ๆ

มาเป็นข้อมูลประกอบรวมกันได้ [2] ยกตัวอย่างเช่น วิธีการสำรวจด้วยคลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ (MASW) [3] วิธีการใช้เรดาร์หยั่งลึก (GPR) [4] วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า [5] - [6] รวมทั้งวิธีการสำรวจด้วยคลื่นหักเห [7] ซึ่งสามารถให้ข้อสรุปเชิงวิชาการถึงสภาพเชื่อมที่เป็นปัจจุบันและข้อเสนอแนะเบื้องต้นต่อผู้ใช้ข้อมูล ในด้านความปลอดภัยเชื่อมและความเป็นไปได้ในการดำเนินการใด ๆ ต่อเชื่อมในขั้นตอนต่อไป

MASW (Multi-channel analysis of surface wave) เป็นวิธีหนึ่งในการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน (Seismic methods) ข้อแตกต่างก็คือ MASW จะนำคลื่นผิวดิน (Surface wave) ชนิดคลื่นเรลีย์ (Rayleigh wave) มาใช้ในการวิเคราะห์แล้วทำการแปลงคลื่นผิวดินให้เป็นความเร็วคลื่นเฉือนอีกทีหนึ่ง คลื่นผิวดินนั้นมักจะถูกจัดให้เป็นคลื่นรบกวน (Noise) ในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนทั่ว ๆ ไป และจะต้องกำจัดออกในขั้นการประมวลผล แต่ในวิธี MASW นั้นคลื่นผิวดินจะถูกจัดให้เป็นสัญญาณที่ต้องการ ในปัจจุบันได้มีการนำเอาวิธี MASW มาใช้ประโยชน์ในงานสำรวจทางวิศวกรรมอีกหลาย ๆ ด้าน อย่างเช่น การสำรวจหารอยแตก หรือรอยเลื่อนของชั้นหิน การสำรวจหาตำแหน่งของหลุมยุบ เป็นต้น ข้อดีของวิธี MASW เหนือวิธีการสำรวจอื่น ๆ ก็คือ ราคาถูก และสามารถทำได้รวดเร็ว [8]

การศึกษานี้เลือกใช้เชื่อมกระเสียว ซึ่งเป็นเชื่อมดินบดอัดตั้งอยู่ที่ อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากพิจารณาแล้วเห็นว่า เชื่อมกระเสียวมีความเหมาะสมในทุกด้าน ประกอบกับการได้รับความสนับสนุนช่วยเหลือจาก ผู้บริหาร วิศวกร และเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายในการให้ข้อมูล เช่น แบบก่อสร้าง ประวัติการซ่อมบำรุง พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการดำเนินการศึกษาเป็นอย่างดี วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อนำเสนอเทคนิคและรูปแบบการตรวจสอบสภาพเชื่อมทางธรณีฟิสิกส์ ด้วย MASW ซึ่งสามารถตรวจสอบโครงสร้าง รวมถึงฐานรากเชื่อมในระดับดิน พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงสภาพโครงสร้างเชื่อมที่เป็นปัจจุบัน ตลอดจนชั้นวัสดุต่าง ๆ ที่ได้ทำการก่อสร้างขึ้น เช่น วัสดุตัวเชื่อม ชั้นวัสดุเดิม ที่ได้รับการซ่อมปรับปรุงรวมถึงชั้นหินฐาน เป็นต้น

ข้อมูลเบื้องต้น

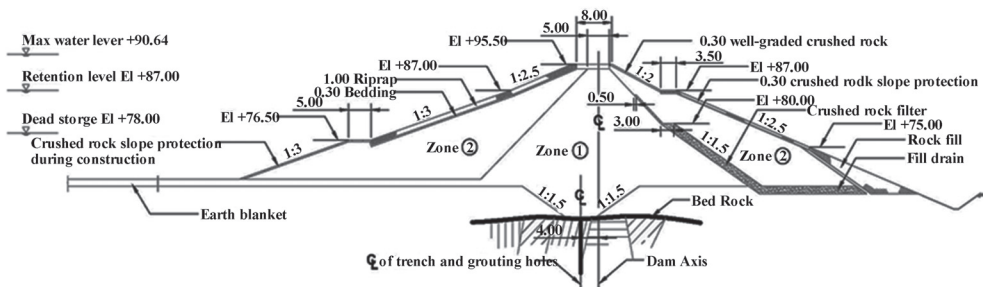
เชื่อมกระเสียวใช้ระยะเวลาในการก่อสร้าง 16 ปี เริ่มจากปีพุทธศักราช 2509 - 2524 เป็นเชื่อมดินที่ใช้ในการกักเก็บน้ำโดยสร้างกันลำห้วยกระเสียว ยาว 4,250 เมตร สูง 32.5 เมตร ความกว้างที่สันเชื่อม 8 เมตร พื้นที่ผิวหน้า 35 ตารางกิโลเมตร ปริมาณน้ำในการกักเก็บสูงสุด 240 ล้านลูกบาศก์เมตร ที่ระดับ +87.00 เมตร รทก. ปริมาตรสูงสุด 390 ล้านลูกบาศก์เมตร ที่ระดับ +90.64 เมตร รทก. พื้นที่รับประโยชน์ 350,000 ไร่ โดยมีลักษณะทางธรณีวิทยาและลักษณะทางด้านวิศวกรรมดังนี้

1. ลักษณะทางธรณีวิทยา

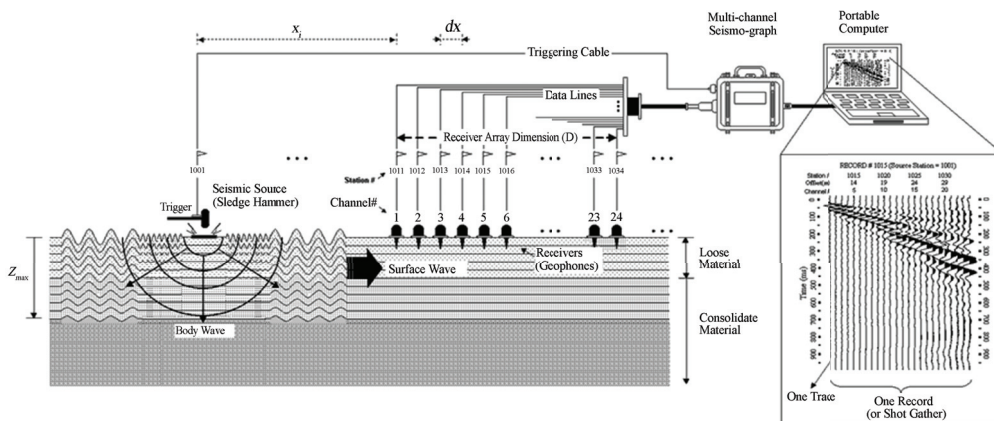
เชื่อมกระเสียวตั้งอยู่ในพื้นที่ลักษณะภูเขา (Mountainous terrain) มีแกนสันเขื่อนด้านทิศตะวันออกเป็นหินปูนยุคออร์โดวิเซียนทางด้านตะวันตกเป็นหินทราย - หินควอร์ตไซต์ยุคไซลูเรียน - ดีโวเนียน ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นหินต้นกำเนิดของตะกอนยุคปัจจุบันที่สะสมตัวในบริเวณที่ราบลุ่มบริเวณพื้นที่ของเชื่อมกระเสียว [9] ข้อมูลทางธรณีวิทยาที่ได้จากแบบรายละเอียดทางวิศวกรรมของเชื่อมกระเสียวพบว่าพื้นที่ก่อสร้างเชื่อมประกอบด้วย หินและดินหลายชนิด โดยส่วนใหญ่เป็นหินปูนและตะกอนทรายเป็นองค์ประกอบ

2. ลักษณะทางด้านวิศวกรรม

เขื่อนกระเสียวเป็นเขื่อนที่ถูกสร้างขึ้นจากการบดอัดดิน แกนกลางของสันเขื่อน (Dam axis) ดังรูปที่ 1 คือ บริเวณ Zone 1 รวมทั้งปีกทั้งสองข้าง (Embankment) แสดงในบริเวณ Zone 2 โครงสร้างเขื่อนทั้งหมดตั้งอยู่บนชั้นหินฐาน (Bed rock) ซึ่งถือว่าเป็นรูปแบบการสร้างเขื่อนที่เหมาะสมตามหลักวิศวกรรม [10], [11] ในระหว่างการก่อสร้างโครงสร้างฐานรากด้านใต้ของแกนกลางจะได้รับการปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินและหินด้วยการอัดน้ำปูน (Grouting) เพื่อลดช่องว่างที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรืออาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการก่อสร้าง



รูปที่ 1 รูปตัดแสดงโครงสร้างเขื่อนกระเสียว



รูปที่ 2 รูปแบบการเก็บข้อมูล MASW โดย Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. [3]

ทฤษฎี

การสำรวจด้วย MASW ได้มีการศึกษาและพัฒนาจากอดีตมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดในด้านคลื่นรบกวนจากภายนอกที่ไม่สามารถแบ่งแยกได้ วิธีการนี้ถูกนำเสนอโดย Park, C. B., Xia, J., and Miller, R. D. [12] และ Foti, S. [13]

MASW เป็นที่รู้จักครั้งแรกในทางวิศวกรรมธรณี เมื่อปี ค.ศ. 1999 โดย Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. [3] เป็นวิธีการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนโดยต้องมีตัวกำเนิดคลื่น เช่น ใช้ค้อนปอนด์ (Sledge hammer) เป็นตัวกำเนิดคลื่น และวางตัวรับสัญญาณหลาย ๆ ตัว โดยทั่วไปใช้ตัวรับสัญญาณ จำนวน 24 ตัว วางเป็นแนวเส้นตรงบนพื้นดินในระยะห่างที่เท่ากัน และตัวรับสัญญาณ

ทุกตัวจะถูกเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Seismograph) เมื่อมีสัญญาณที่ตรวจวัดได้ ตัวรับสัญญาณจะส่งคลื่นสัญญาณมายังเครื่องบันทึกข้อมูล และส่งไปเก็บในเครื่องคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 2) แสดงการเก็บข้อมูลในสนาม เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจด้วยเทคนิค MASW ประกอบไปด้วย 1. เครื่องรับสัญญาณ (Seismograph) 2. เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer) 3. ตัวรับสัญญาณ (Geophone) และ 4. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Source)

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการสร้างโค้งกระจายคลื่นด้วยวิธี F - K transform โดยใช้วิธี Two dimensional fast fourier transform (2DFFT) ซึ่งเป็นวิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของ Time - space domain เป็น Frequency - Wave number domain โดยใช้สมการที่ (1)

$$P(f, k) = \iint p(x, t) e^{-2\pi i(ft + kx)} dx dt \quad (1)$$

เมื่อ $p(x, t)$ คือ ฟังก์ชันของคลื่นที่ตรวจวัดที่อยู่ในรูปของ Time domain (x, t)

จากสมการที่ (1) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Frequency, f) กับเลขคลื่น (Wave number, k) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับเลขคลื่นได้จากสมการที่ (2)

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2)$$

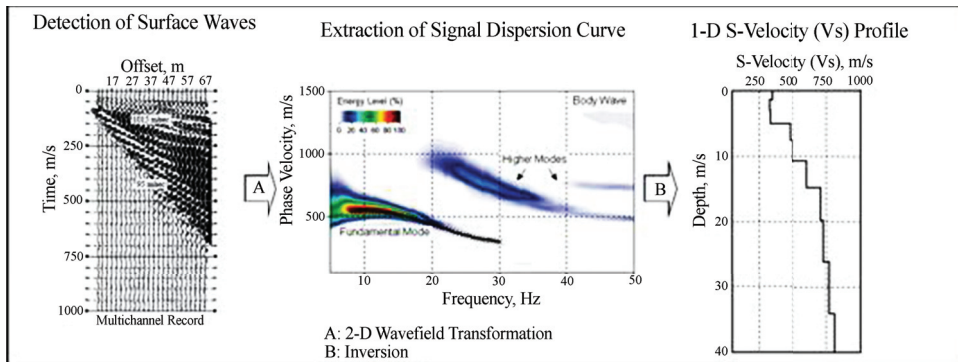
$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (3)$$

แทนค่าสมการที่ (3) ในสมการที่ (2) จะสามารถที่จะคำนวณความเร็วคลื่น (V) ได้จากความสัมพันธ์ของความถี่กับเลขคลื่นได้จากสมการที่ (4)

$$V = \frac{2\pi}{k} \quad (4)$$

วิธีดำเนินการวิจัย

การประเมินสภาพเขื่อนด้วยวิธี MASW ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนสำคัญ ตามแบบแผนของ Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. [3] ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยขั้นตอนแรก เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาผ่านกระบวนการเบื้องต้นในการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสมสำหรับข้อมูลแต่ละชุด ขั้นตอนต่อมาทำการเปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในกราฟระหว่างความถี่กับความยาวคลื่นพื้นผิวโดยกระบวนการ Fourier transform กราฟดังกล่าวเรียกว่า Dispersion curve ซึ่งสำหรับวิธี MASW นี้จะพิจารณาเฉพาะ Fundamental Mode ของคลื่นพื้นผิวเท่านั้น ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการหาความเร็วคลื่นเฉือนจาก Dispersion curve ในขั้นที่ 2 ด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion) ผลที่ได้คือกราฟที่แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนเทียบกับความลึก [8]



รูปที่ 3 ขั้นตอน Data Acquisition และ Data Processing ของวิธีการสำรวจ MASW โดย Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. [3]

1. การเก็บข้อมูลภาคสนาม (Data Acquisition)

การสำรวจภาคสนามได้ดำเนินการในระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - มีนาคม พ.ศ. 2558 โดยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ การรังวัดแนวสำรวจ (Line survey) ตลอดความยาวเส้นเขื่อนเป็นระยะทาง 4,250 เมตร ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นการรังวัดแนวสำรวจเพื่อกำหนดตำแหน่งของตัวรับสัญญาณคลื่น (Geophone) ดังรูปที่ 5 และจุดกำเนิดคลื่น (Shot point) การติดตั้งเครื่องมือ (Wiring) เป็นการติดตั้งตัวรับสัญญาณกับชุดสายสัญญาณบก (Land streamer) จากนั้นเชื่อมต่อสัญญาณกับอุปกรณ์บันทึกผล (Geode24) ดังรูปที่ 6

การเก็บข้อมูล MASW มีความใกล้เคียงกับการเก็บข้อมูลด้วยวิธีสำรวจคลื่นไหวสะเทือนทั่ว ๆ ไป แต่มีความแตกต่างกัน คือวิธีนี้จะใช้ตัวรับสัญญาณที่มีความถี่ต่ำอยู่ในช่วง 4 - 8 Hz ดังนั้น เมื่อทำการทุบก้อนน้ำหนัก 20 ปอนด์ ลงบนแผ่นเหล็กดังรูปที่ 7 คลื่นสัญญาณสะท้อนผ่านชั้นดินแล้วจะถูกตรวจจับด้วยตัวรับสัญญาณ จากนั้นจะถูกส่งไปตามสายเคเบิลเข้าสู่อุปกรณ์บันทึกผล เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนทั้งหมดแล้วจึงทำการย้ายไปยังจุดกำเนิดคลื่นที่อยู่ถัดไป การบันทึกสัญญาณคลื่นนี้จะพยายามหลีกเลี่ยงคลื่นเสียงรบกวนคลื่นสั่นสะเทือนชนิดอื่น เช่น สัญญาณคลื่นจากคนเดิน การเคลื่อนที่ของรถ ลมพัดแรง การก่อสร้างบริเวณใกล้เคียง เป็นต้น การศึกษาจึงเลือกช่วงเวลาทดสอบที่ปราศจากการรบกวนดังกล่าว ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการประมวลผล [14]



รูปที่ 4 แนวการสำรวจตลอดความยาวของสันเขื่อนเป็นระยะทาง 4,250 เมตร



รูปที่ 5 อุปกรณ์รับสัญญาณคลื่น (Geophone)



รูปที่ 6 การเชื่อมต่อสัญญาณบันทึกผลกับชุดสาย Land Streamer



รูปที่ 7 การกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนด้วยการทุบหมอน น้ำหนัก 20 ปอนด์

2. การวิเคราะห์ข้อมูล (Dispersion Analysis)

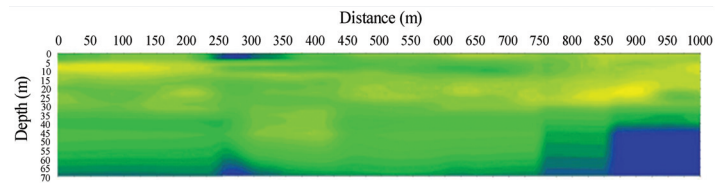
ขั้นตอนนี้เป็น การนำข้อมูลมาแปลงเป็นกราฟการกระจายตัวของความถี่และความเร็วของคลื่น การศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม Seisimager/SW [15] ในการประมวลผล ซึ่งเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนข้อมูลดิบที่มีลักษณะเป็นเส้นคลื่นให้อยู่ในรูปตัดของชั้นดิน สามารถนำไปแปลความหมายเพื่อหาโครงสร้างลักษณะทางธรณีวิทยา [16] โดยกระบวนการต่าง ๆ ของขั้นตอนในแต่ละขั้นตอนจะมีความสำคัญในการกรองคลื่นรบกวนและการปรับแก้ต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจนที่สุด

3. การคำนวณย้อนกลับ (Inversion)

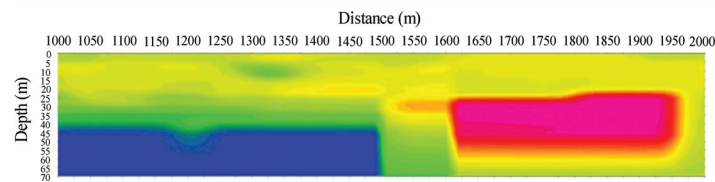
เพื่อให้ได้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกแตกต่างกัน การประมวลผลข้อมูลจะใช้คลื่น Rayleigh หรือที่รู้จักกันอีกอย่างว่า “Ground Roll” ทำได้โดยการรวมข้อมูลตำแหน่งของตัวรับสัญญาณ และจุดกำเนิดคลื่นเข้ากับผลข้อมูลเส้นคลื่น ประมวลผลข้อมูลด้วยการสร้างกราฟระหว่างความถี่ (Frequency) กับความเร็วเฟส (Phase velocity) เพื่อการลากเส้นแนวโน้มบนกราฟ จากนั้นประมวลผลข้อมูลย้อนกลับ โดยขั้นตอนนี้จะได้จุดข้อมูลความเร็วการสำรวจจำนวน 1 จุด หรือเรียกว่าข้อมูล 1 มิติ เพื่อรวบรวมผลข้อมูลทั้งหมดเข้าเป็นภาพตัดความเร็ว โดยเรียงลำดับข้อมูลแต่ละจุดตามพิทช์ของข้อมูลนั้น ๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลแบบ 2 มิติ ผลที่ได้คือกราฟที่แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนเทียบกับความลึก สำหรับการแปลผลข้อมูลการสำรวจ ผลการสำรวจมีลักษณะเป็นภาพตัดแสดงลักษณะทางโครงสร้างธรณีวิทยา อันเกิดจากค่าความเร็วที่ได้จากการประมวลผลย้อนกลับ โดยค่าความเร็วที่ได้สามารถเทียบเคียงได้กับค่าของความเร็ววัสดุตามตารางที่ 1 [17] โดยค่า P wave velocity คือ ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ และค่า S wave velocity คือ ความเร็วคลื่นทุติยภูมิ

ตารางที่ 1 ความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P wave velocity) และคลื่นทุติยภูมิ (S wave velocity) ของวัสดุทางธรณีวิทยาชนิดต่าง ๆ [17]

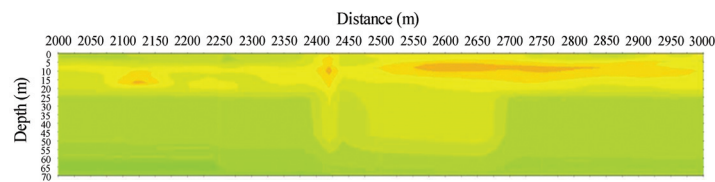
Type of formation	P wave velocity (m/s)	S wave velocity (m/s)	Density (g/cm ³)	Density ent crystal (g/cm ³)
Scree, vegetal soil	300-700	100-300	1.7-2.4	-
Dry sands	400-1200	100-500	1.5-1.7	2.65 quartz
Wet sands	1500-2000	400-600	1.9-2.1	2.65 quartz
Saturated shales and clays	1100-2500	200-800	2.0-2.4	-
Marls	2000-3000	750-1500	2.1-2.6	-
Saturated shale and sand	1500-2200	500-750	2.1-2.4	-
Porous and saturated sandstones	2000-3500	800-1800	2.1-2.4	2.65 quartz
Limestones	3500-6000	2000-3300	2.4-2.7	2.71 calcite
Chalk	2300-2600	1100-1300	1.8-3.1	2.71 calcite
Salt	4500-5500	2500-3100	2.1-2.3	2.1 halite
Anhydrite	4000-5500	2200-3100	2.9-3.0	-
Dolomite	3500-6500	1900-3600	2.5-2.9	(Ca, Mg) CO ₃ 2.8-2.9
Granite	4500-6000	2500-3300	2.5-2.7	-
Basalt	5000-6000	2800-3400	2.7-3.1	-
Coal	2200-2700	1000-1400	1.3-1.8	-
Water	1450-1500	-	1	-
Oil	1200-1250	-	0.6-0.9	-



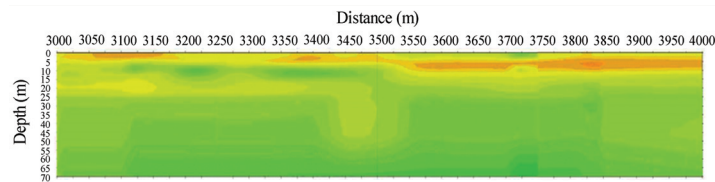
(ก) ผลการสำรวจด้วยคลื่นผิว MASW ที่ระยะ 0 + 000 เมตร ถึง 1 + 000 เมตร



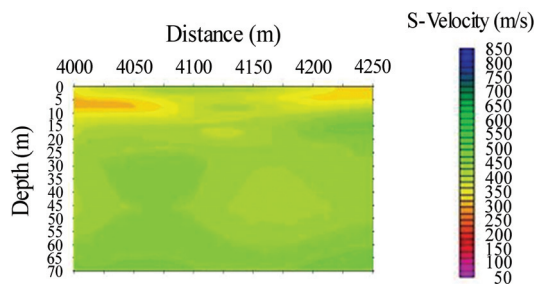
(ข) ผลการสำรวจด้วยคลื่นผิว MASW ที่ระยะ 1 + 000 เมตร ถึง 2 + 000 เมตร



(ค) ผลการสำรวจด้วยคลื่นผิว MASW ที่ระยะ 2 + 000 เมตร ถึง 3 + 000 เมตร



(ง) ผลการสำรวจด้วยคลื่นผิว MASW ที่ระยะ 3 + 000 เมตร ถึง 4 + 000 เมตร



(จ) ผลการสำรวจด้วยคลื่นผิว MASW ที่ระยะ 4 + 000 เมตร ถึง 4 + 250 เมตร

รูปที่ 8 ความเร็วคลื่นเฉือนแบบ 2 มิติ ตลอดแนวสันเขื่อนระยะทาง 4,250 เมตร

ผลการศึกษา

การประเมินสภาพเชื่อมด้วยเทคนิค MASW มีข้อดีคือ สามารถระบุความแน่นของดินถม โดยพิจารณาร่วมกับ ตารางที่ 1 รวมถึงสามารถจำแนกชนิดของดินตาม NEHRP Provisions [18] ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดง นัยของความแข็งแรงและเสถียรภาพของตัวเชื่อม

จากผลการศึกษาที่แสดงไว้ในรูปที่ 8 พบว่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ระหว่าง 100 - 850 เมตร/วินาที โดยสังเกตได้จากแถบสีที่แสดงความเร็วคลื่นทุติยภูมิ (S-velocity) ซึ่งจะปรากฏเป็นสีต่าง ๆ บนรูปภาพ เมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 2 [18] สามารถจำแนกประเภทชั้นดินได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่ม B คือ หิน (Rock) มีความเร็วคลื่นอยู่ระหว่าง 760 - 1,500 เมตร/วินาที

จากพื้นที่สีน้ำเงินเข้ม ในรูปที่ 8(ก) - (ข) (ความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ระหว่าง 800 - 850 เมตร/วินาที) แสดงให้เห็นชั้นหินฐานตั้งแต่ระยะ 0 + 000 เมตร จนถึง 1 + 500 เมตร ที่ความลึกมากกว่า 40 เมตร เป็นต้นไป

2. กลุ่ม C คือ ดินแน่นมาก/หินอ่อน (Very dense soil/soft rock) มีความเร็วคลื่นอยู่ระหว่าง 360 - 760 เมตร/วินาที

พิจารณาจากรูปที่ 8(ก) - (จ) พบว่าความเร็วคลื่นเฉือนของโครงสร้างเชื่อมส่วนใหญ่จะปรากฏเป็นพื้นที่สีเหลืองและสีเขียว มีความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ระหว่าง 360 - 600 เมตร/วินาที อยู่ในเกณฑ์ดินแน่นมาก (Very dense soil) ซึ่งตรงกับคุณลักษณะของเชื่อมกระเสียวที่ก่อสร้างจากดินบดอัดแน่น ดังรูปที่ 1

3. กลุ่ม D คือ ดินแน่น (Stiff soil) มีความเร็วคลื่นอยู่ระหว่าง 180 - 360 เมตร/วินาที

รูปที่ 8(ค) แสดงให้เห็นถึงความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ระหว่าง 200 - 300 เมตร/วินาที แสดงให้เห็นด้วยพื้นที่สีส้มอ่อนที่ระยะ 2 + 500 เมตร ถึง 2 + 950 เมตร ปรากฏที่ความลึกไม่เกิน 10 เมตร เช่นเดียวกับรูปที่ 8(ง) - (จ) ที่ระยะ 3 + 550 เมตร ถึง 4 + 050 เมตร

4. กลุ่ม E คือ ดินอ่อน (Soft soil) มีความเร็วคลื่นต่ำกว่า 180 เมตร/วินาที

รูปที่ 8(ข) แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดชั้นดินอ่อน มีความเร็วคลื่นเฉือน ประมาณ 100 - 180 เมตร/วินาที แสดงด้วยพื้นที่สีแดงระยะ 1 + 600 เมตร ถึง 1 + 970 เมตร ความลึกประมาณ 20 - 55 เมตร จากระดับผิวการสำรวจ ทั้งนี้การเกิดสภาวะดินอ่อนอาจเกิดจากปัญหาการรั่วซึมของน้ำ (Water leaks) ทำให้ดินตรงจุดนั้นมีความชื้นสูง

ตารางที่ 2 การจำแนกชนิดของหินและดินตาม NEHRP Provisions [18]

Soil Profile Type	Rock/Soil Description	Average S-wave Velocity (m/s) top 30 m
A	Hard rock	> 1,500
B	Rock	760 - 1,500
C	Very dense soil/soft rock	360 - 760
D	Stiff soil	180 - 360
E	Soft soil	< 180
F	Special soils requiring site-specific evaluation	

อภิปรายผลการศึกษา

ผลการศึกษาสามารถอธิบายถึงความเร็วคลื่นเฉือนด้วยสีที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 8 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 100 - 850 เมตร/วินาที ซึ่งอยู่ในกลุ่ม B ถึง E แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเขื่อนซึ่งยังคงสภาพดินบดอัดแน่นมาก (Very dense soil) คงมีบางจุดของโครงสร้างเขื่อนเท่านั้นที่อยู่ในกลุ่ม E คือ สภาพดินอ่อน (Soft soil) ทั้งนี้บริเวณดังกล่าวอาจเกิดการรั่วซึมของน้ำได้สันเขื่อนที่บริเวณ 1 + 600 เมตร ถึง 1 + 970 เมตร ทำให้ดินบริเวณนี้เกิดความชื้นสูงกว่าปกติ ซึ่งอาจส่งผลให้ความเร็วคลื่นเฉือนมีค่าลดลง

จากประวัติการซ่อมเขื่อนกระเสียวบริเวณ 1 + 600 เมตร พบว่าจุดที่อยู่ในกลุ่ม E เคยเกิดการรั่วซึมของน้ำและได้ดำเนินการซ่อมบำรุงด้วยวิธีการฉีดน้ำปูนเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในโครงสร้างมาแล้ว แต่ยังคงเกิดสภาวะความชื้นสะสมและดินอ่อนผิวดินได้ ดังนั้นการดูแลรักษาเขื่อนจะต้องกำหนดให้บริเวณดังกล่าว เป็นจุดเฝ้าระวังที่จะต้องตรวจสอบอยู่เสมอ เพื่อเป็นการเฝ้าระวังการขยายตัวของรอยรั่วที่อาจเกิดขึ้นซ้ำได้อีกในอนาคต และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลสำรวจอาจใช้วิธีการสำรวจอื่นร่วมกับ MASW ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความจำเป็นและเหตุผลประกอบอื่นในแผนการดูแลรักษาเขื่อน

สรุปผลการศึกษา

การประยุกต์ใช้เทคนิคคลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ MASW ในการประเมินสภาพเขื่อน สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการประเมินความแน่นของชั้นดินร่วมกับตารางที่ 1 และ 2 หรือจุดที่คาดว่าอาจเกิดการรั่วไหลของน้ำ ทั้งบริเวณสันเขื่อนตลอดจนฐานรากของเขื่อนได้ในเบื้องต้น

ข้อจำกัดของ MASW ผู้นำวิธีการนี้ไปใช้อาจต้องคำนึงถึงขอบเขตความลึกของจุดที่สำรวจว่าไม่มากนักเกินไป เนื่องจากพลังงานจากแหล่งกำเนิดที่ต่ำอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดต่อการแปลผลสำรวจได้อยู่เสมอ อย่างไรก็ตามการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์เป็นวิธีการศึกษาทางอ้อมที่ประหยัดงบประมาณและสะดวกรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้นควรใช้การตรวจสอบร่วมกับวิธีอื่นด้วย เช่น การสำรวจด้วยเทคนิคการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและความต่างศักย์ธรรมชาติเขื่อนกระเสียว [6] พบว่า ณ ตำแหน่ง 1 + 600 เมตร มีค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ธรรมชาติต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ โดยมีค่าต่ำกว่า 3 โอห์มเมตร และต่ำกว่า 250 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรั่วซึมของน้ำแบบผิวดิน เห็นได้ว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับ MASW ที่ใช้เขื่อนกระเสียวเป็นกรณีศึกษาเช่นเดียวกัน ดังนั้นวิธี MASW จึงเป็นเทคนิคที่ใช้ประเมินสภาพเขื่อนดินบดอัดได้อยู่ในเกณฑ์ที่มีความน่าเชื่อถือได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของแผนงานวิจัย เรื่อง “การบูรณาการวิธีตรวจสอบเสถียรภาพแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานน้ำ” ขอขอบคุณ ผู้บริหาร วิศวกร และเจ้าหน้าที่ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษากระเสียว กรมชลประทาน ที่สนับสนุนข้อมูลทางด้านวิศวกรรมและสถานที่ในการวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 เป็นอย่างสูง

References

- [1] Noppadon, P. (2016). **Inspection of Dam with Modern Technology**. Access (10 December 2016). Available (http://water.rid.go.th/damsafety/downloads_dam.php)
- [2] Young-Chul, O. H., Hae-Sang, Jeong, Young-Kyu, Lee, and Howoong, Shon. (2003). Safety Evaluation of Rock-Fill Dam by Seismic (MASW) and Resistivity Methods. **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2003**. pp. 1377-1386
- [3] Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999). Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). **Geophysics**. Vol. 64, No. 3, pp. 800-808
- [4] Mario, C. and Jutta, H. (2007). Combined Ground Penetrating Radar and MASW Surveys to Locate Dam Seeps. **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2008**. pp. 997-1006
- [5] Dwain, K. B., Jose, L. L., and Charles, M. D. (1989). **Comprehensive Geophysical Investigation of an Existing Dam Foundation Part 1**. Geophysics: The Leading Edge of Exploration. pp.10-18
- [6] Narongchai, W., Chanarop, V., and Orawan, J. (2017). Dam Stability Analysis by Electrical Resistivity Imaging and Natural Electric Potential Technique. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 10, No. 1, pp. 35-48 (in Thai)
- [7] Julian, I., Carole, D. J, John, W. L., Richard, D. M., and Drew, C. (2009). Near-surface Evaluation of Ball Mountain Dam, Vermont, Using Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) and Refraction Tomography Seismic Methods on Land-streamer Data SEG Houston 2009. **International Exposition and Annual Meeting**. pp. 1454-1458
- [8] Thanop, T., Nungnuch, L., Prapaporn, J., and Angkasiri, H. (2008). Determination of Shear-wave Velocity of Bangkok Subsoils by the MASW Method. **Research and Development Journal**. Vol. 19, No. 4, pp. 58-70 (in Thai)
- [9] Department of Mineral Resources. (2007). **Geological Information of Suphanburi Province**. Access (25 December 2016). Available (<http://www.dmr.go.th>)
- [10] Sherer, S. G. (1996). Geotechnical Investigations for Safety of Dams Study. **U. S. Army Corps of Engineers**. p. 116
- [11] URS Corporation. (2003). Success Dam Geophysical Investigation. **U. S. Army Corps of Engineers**. Vol. 205, p. 68
- [12] Park, C. B., Xia, J., and Miller, R. D. (1998). Imaging Dispersion Curves of Surface Waves on Multi-channel Record. **SEG Expanded Abstracts**. pp. 1377-1380
- [13] Foti, S. (2000). **Multi Station Methods for Geotechnical Characterisation Using Surface Waves**. Ph.D Diss. Politecnico di Torino, p. 229

- [14] Brian, J. E. and William, H. D. (1997). A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration. **Society of Exploration Geophysicists**. p. 305
- [15] Geometrics. (2016). **Surface Wave Analysis Software**. Access (20 December 2016). Available (<http://www.geometrics.com>)
- [16] Yilmaz, O. (1987). Seismic Data Processing. Society of Exploration of Geophysics-Investigations in Geophysics. Vol. 2, p. 526
- [17] Ted, A., Bethany, L. B., Michael, H. P., Brian, R., Paul, B., and Lewis, H. (2007). Electrical Characterization of Success Dam in Porterville. **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**. pp. 41-60
- [18] Building Seismic Safety Council. (1997). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings. **Federal Emergency Management Agency**. p. 290



การวิเคราะห์ลักษณะเสียงโพรงใต้แผ่นกระเบื้องด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว An Analysis of Hollow-Sounding Tiles using Fast Fourier Transform

เพชรรัตน์ ลิ้มสุปรีyarat¹ ชัยฤกษ์ จักรพัฒนจิต² และจันทนา ปัญญาวรรณ^{1*}

Received: July, 2017; Accepted: September, 2017

บทคัดย่อ

การตรวจเสียงโพรงใต้แผ่นกระเบื้องเป็นขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพงานก่อสร้างที่จำเป็นต้องทำ เพราะหากเกิดโพรงอาจส่งผลกระทบต่อความบกพร่อง เช่น กระเบื้องหลุดล่อนหรือแตกหักหากมีวัตถุหล่นบนผิวหน้า อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุและการบาดเจ็บในการใช้งานพื้นที่ การตรวจสอบเสียงโพรงจำเป็นต้องใช้การฟังของผู้ตรวจสอบเพื่อจำแนกลักษณะเสียงซึ่งขาดความเป็นมาตรฐาน งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เสียงที่ได้จากการตรวจสอบงานปูกระเบื้องโดยใช้หลักการวิเคราะห์สัญญาณเสียงในโดเมนความถี่เพื่อจำแนกลักษณะเสียงทึบและโพรง พื้นที่ปูกระเบื้องที่ใช้ทดสอบถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการสำหรับการทำการเคาะบนผิวกระเบื้องและจัดเก็บข้อมูลเสียงเพื่อนำไปวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถจำแนกลักษณะเสียงทึบและโพรง มีค่าความถูกต้องมากถึง 98.73 % งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการตรวจสอบคุณภาพงานปูกระเบื้องให้เป็นมาตรฐานขึ้น

คำสำคัญ : งานปูกระเบื้อง; การตรวจสอบ; สัญญาณเสียง; โดเมนความถี่

¹ Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri

² Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University, Si Racha Campus

* Corresponding Author E - mail Address: jantanap@eng.buu.ac.th

Abstract

Hollow-sounding tile inspection is the required process of construction quality inspection because hollows under tiles may lead to the defections such as unbonded tiles or broken tiles in case some objects fall onto the surface. These defects will be causes of accidents and injuries when those areas were occupied. In order to inspect a hollow-sounding tile, the inspector must listen to that sound to classify the type of sound which it lacks any standardize. This paper proposes the audio signal analysis from tiling inspection in frequency domain to classify a dull or hollow sound. The test tiling area was mocked up in laboratory for tapping on the tile surface and collecting the audio signal to analysis. The analysis results indicated the proposed method can identify the dull and hollow sounding tiles. The accuracy is up to 98.73 %. It can use to be a guideline for developing the standard tiling inspection method.

Keywords: Tilling; Inspection; Audio Signal; Frequency Domain

บทนำ

งานปูกระเบื้องเป็นขั้นตอนการก่อสร้างสำหรับตกแต่งพื้นผิวของอาคารเพื่อให้เกิดความสวยงาม วิธีการปูกระเบื้องที่นิยมในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีการปูแบบเปียกเป็นการปูกระเบื้องโดยการเทพูนปรับระดับแล้วทำการติดตั้งแผ่นกระเบื้องลงบนพื้นที่ที่เทพูนไว้ วิธีการปูแบบซาลาเปาเป็นวิธีการปูกระเบื้องโดยการปั้นปูนเป็นก้อนไว้กึ่งกลางด้านหลังแผ่นกระเบื้องก่อนติดตั้งลงบนพื้นที่ที่กำหนด และวิธีการปูแบบแห้งเป็นการปูกระเบื้องโดยการทาขาวซีเมนต์ลงบนพื้นผิวด้านหลังแผ่นกระเบื้องก่อนติดตั้งลงบนพื้นที่ที่ได้ทำการปรับระดับไว้เรียบร้อยแล้ว ผู้ควบคุมงานจะดำเนินการตรวจสอบคุณภาพการปูกระเบื้อง ได้แก่ การตรวจสอบสภาพและลวดลายของกระเบื้อง การตรวจสอบรูปแบบการจัดวางกระเบื้อง การตรวจสอบแนวและระดับในการปูกระเบื้อง การตรวจสอบร่องยาแนวกระเบื้อง และการตรวจสอบการหลุดล่อนของกระเบื้อง

การตรวจสอบการหลุดล่อนของกระเบื้องเป็นการตรวจสอบที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก หากกระเบื้องที่ได้ทำการติดตั้งไปแล้วเกิดโพรงภายใต้กระเบื้องจะส่งผลให้เมื่อใช้งานในพื้นที่ดังกล่าวอาจทำให้กระเบื้องแตกหรือหลุดออกจากบริเวณที่ติดตั้ง วิธีการตรวจสอบที่ผู้ควบคุมงานก่อสร้างมักใช้ในการตรวจสอบการหลุดล่อนของกระเบื้อง คือ การนำวัตถุ เช่น เหรียญหรือเหล็กเส้นทำการเคาะบนพื้นผิวหน้าของแผ่นกระเบื้องที่ได้ทำการติดตั้งลงบนพื้นที่ใช้งานบริเวณมุมทั้งสี่ด้านและกึ่งกลางของแผ่นกระเบื้องเนื่องจากเป็นบริเวณที่มักพบว่ามีปริมาณปูนซีเมนต์หรือขาวซีเมนต์ไม่ทั่วถึงโดยผู้ควบคุมงานก่อสร้างจะฟังเสียงกระทบที่เกิดขึ้น หากพบว่าเป็นเสียงโพรงผู้ควบคุมงานก่อสร้างจะพิจารณาว่างานปูกระเบื้องในบริเวณดังกล่าวมีความบกพร่องและอาจต้องดำเนินการแก้ไข วิธีการตรวจสอบดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ทักษะและประสบการณ์เฉพาะบุคคลของผู้ควบคุมงานซึ่งอาจทำให้ผลการจำแนกเสียงขาดความถูกต้องและแม่นยำ

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบการหลุดล่อนของกระเบื้องอยู่หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น วิธี Ultrasound-echo และ Impact echo [1] - [3] ทั้ง 2 วิธีไม่ได้รับการยอมรับเนื่องจากเป็นวิธีที่ต้องนำอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ไปติดตั้งที่พื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ วิธีนี้ไม่สะดวกกับการนำไปตรวจสอบในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือพื้นผิวอยู่บนที่สูง งานวิจัยของ Huang, Y. H. et al. [4] นำเสนอวิธี Shearography ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบที่ไวต่อสภาพแวดล้อมจริงและเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและ Hung, Y. Y. et al. [5] ได้นำเสนอวิธี Thermography ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องนำอุปกรณ์ไปติดตั้งที่ผิวสัมผัสแต่ใช้การตรวจจับอุณหภูมิบริเวณพื้นที่ผิว วิธี Thermography แบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ แบบดั้งเดิมและแบบ Active แบบดั้งเดิมจะไม่ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากภายนอกจึงทำให้เมื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบอาจได้รับผลกระทบจากแหล่งความร้อนตามธรรมชาติที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ส่วนแบบ Active เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างได้รับความนิยมน่าเชื่อถือ แต่อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์สร้างแหล่งกำเนิดความร้อนจากภายนอกค่อนข้างยุ่งยากและไม่เหมาะต่อการทำงานในอาคารสูง

นอกจากวิธีการตรวจสอบที่ได้นำเสนอไปข้างต้นมีวิธี Impact acoustics [6] ซึ่งเป็นการศึกษาการยืดเกาะระหว่างวัสดุ 2 ชนิด โดยพิจารณาคุณลักษณะเสียงที่แตกต่างกันในแต่ละสภาพ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายไม่มาก มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาการจำแนกเสียงเคาะที่ผิวของวัตถุด้วยเหรียญ [7] วิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องพึ่งพาทักษะและความสามารถของผู้ควบคุมงาน มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาการตรวจสอบด้วยวิธี Impact acoustics [8] - [10] เพื่อให้วิธีการตรวจสอบนี้เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่มีความสะดวก ง่ายต่อการใช้งานและมีค่าใช้จ่ายที่มีประสิทธิภาพ จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตพบว่า การนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาประยุกต์ในการจำแนกและวิเคราะห์ลักษณะเสียงที่เป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานปูกระเบื้องจึงเป็นแนวทางที่สามารถช่วยลดการพึ่งพาและการตัดสินใจโดยมนุษย์ ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนและสามารถยกระดับมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพงานก่อสร้างให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นได้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การวิเคราะห์ลักษณะเสียงทึบและเสียงโพรงใต้แผ่นกระเบื้องในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ซึ่งมีความแม่นยำกว่าการวิเคราะห์สัญญาณเสียงในโดเมนเวลา (Time Domain) พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลจากสเปกตรัมของสัญญาณเสียง โดยบทความวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก คือ บทนำ ทฤษฎีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว วิธีดำเนินการวิจัย ผลการทดสอบในพื้นที่จำลองและบทสรุป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform)

การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) คือ การแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform) อย่างเร็ว สามารถหาผลการแปลงได้จากสมการที่ (1)

$$F_k = \sum_{j=1}^N \left(L_j \cdot e^{\frac{2i\pi(j-1)(k-1)}{N}} \right), k = 1, \dots, N \quad (1)$$

โดยที่

L คือ ข้อมูล

N คือ จำนวนข้อมูล สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ข้อมูลหมายถึงสัญญาณเสียง

F คือ สเปกตรัมในเชิงความถี่

ค่า F เป็นได้ทั้งจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นสามารถหาขนาด (Magnitude) ของสเปกตรัมได้จากสมการที่ (2)

$$Magnitude = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

เมื่อ x คือ ค่าจริง และ y คือ ค่าจินตภาพ

จุดประสงค์หลักของการวิเคราะห์สัญญาณด้วย FFT เพื่อต้องการทราบว่าสัญญาณมีองค์ประกอบความถี่ใดบ้างและมีจำนวนความถี่มากน้อยเพียงใด

วัสดุและวิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุ

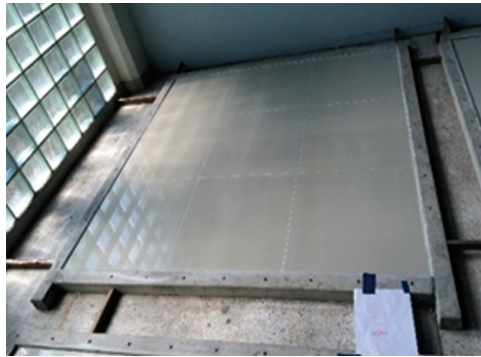
ในปัจจุบันนิยมตกแต่งอาคารด้วยกระเบื้องแกรนิตโต้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระเบื้องแกรนิตโต้ในการทดสอบ กระเบื้องที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดกว้างและยาวเท่ากับ 0.60×0.60 เมตร และมีความหนาของแผ่นกระเบื้องประมาณ 0.80 – 1.00 เซนติเมตร

วิธีดำเนินการวิจัย

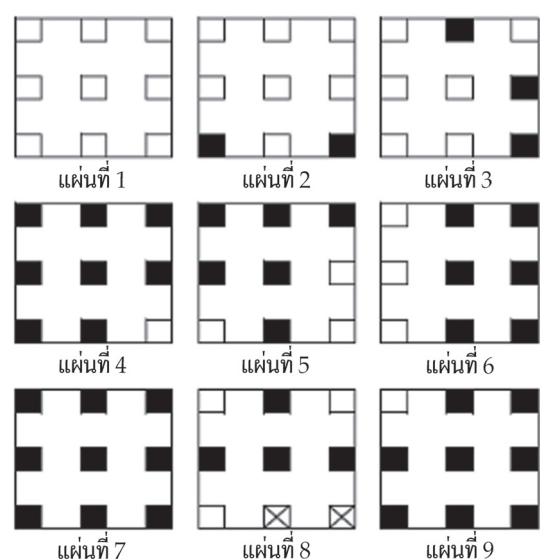
วิธีดำเนินการวิจัยในบทความนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน

1. จากการสำรวจเบื้องต้นในโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรและคอนโดมิเนียมในปัจจุบันพบว่าวิธีการปูกระเบื้องที่นิยมใช้คือการปูแบบแห้ง ดังนั้นพื้นที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 1 จึงเลือกใช้วิธีการปูกระเบื้องแบบแห้งโดยการปูกระเบื้องด้วยการใช้ปูนกาวซีเมนต์ทาที่ด้านหลังแผ่นกระเบื้องก่อนติดตั้งลงบนผิวพื้นคอนกรีตหล่อในที่ขนาด 2.00×2.00 เมตร และมีความหนา 5 เซนติเมตร กันขอบโดยรอบ การจำลองโพรงได้แผ่นกระเบื้องทำโดยเว้นพื้นที่ลาปูนกาวซีเมนต์ขนาด 5×5 เซนติเมตร ตำแหน่งโพรงได้แผ่นกระเบื้องถูกกำหนดไว้ตามตำแหน่งในรูปที่ 2 กรอบสี่เหลี่ยมสีขาวแสดงตำแหน่งโพรงได้แผ่นกระเบื้อง กรอบสีดำในภาพแสดงตำแหน่งที่มีปูนกาวทึบเต็มบริเวณและตำแหน่งที่กากบาทแสดงตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดในการปูกระเบื้อง

2. จัดเก็บผลการฟังลักษณะเสียงได้แผ่นกระเบื้องโดยผู้เชี่ยวชาญที่ปฏิบัติหน้าที่ในการตรวจสอบคุณภาพงานปูกระเบื้องในโครงการบ้านจัดสรรมากกว่า 10 ปี จำนวน 1 ท่าน โดยให้ผู้เชี่ยวชาญทำการเคาะบนผิวหน้ากระเบื้องบนพื้นที่จำลองตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ในรูปที่ 2 จากนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญทำการตัดสินใจลักษณะเสียงที่ได้ยินมีลักษณะเสียงทึบหรือโพรง ในการทดลองนี้เลือกให้ผู้เชี่ยวชาญเพียง 1 ท่าน เนื่องจากตำแหน่งที่มีลักษณะเสียงทึบหรือโพรงนั้นได้ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว ผลการฟังเสียงเคาะโดยผู้เชี่ยวชาญถูกใช้เพื่อยืนยันความถูกต้อง

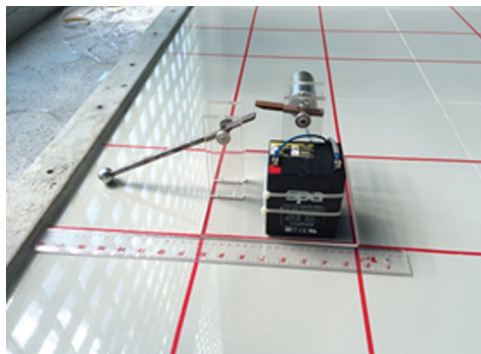


รูปที่ 1 พื้นที่ทดสอบ



รูปที่ 2 การกำหนดตำแหน่งโพรงใต้แผ่นกระเบื้องในพื้นที่จำลอง

3. ข้อมูลสัญญาณเสียงถูกเก็บโดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งควบคุมความเร็วและน้ำหนักในการเคาะด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ทำการเคาะกระเบื้องแผ่นละ 9 จุด จุดละ 10 ครั้ง ตำแหน่งที่ทำการเคาะทั้ง 9 จุด ประกอบด้วย มุมทั้งสี่ด้านของแผ่นกระเบื้อง กึ่งกลางกระเบื้องและกึ่งกลางของขอบกระเบื้องทั้งสี่ด้าน รวมจำนวนจุดเคาะทดสอบและเก็บสัญญาณเสียงบนพื้นที่จำลองเท่ากับ 79 จุด เนื่องจากในพื้นที่ทดสอบมี 2 ตำแหน่งที่ไม่สามารถทดสอบได้ เก็บชุดข้อมูลเสียงตำแหน่งละ 2 ครั้ง ฉะนั้นได้จำนวนชุดข้อมูลเสียงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 158 ชุดข้อมูล ข้อมูลเสียงถูกบันทึกด้วยอุปกรณ์บันทึกเสียงเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น

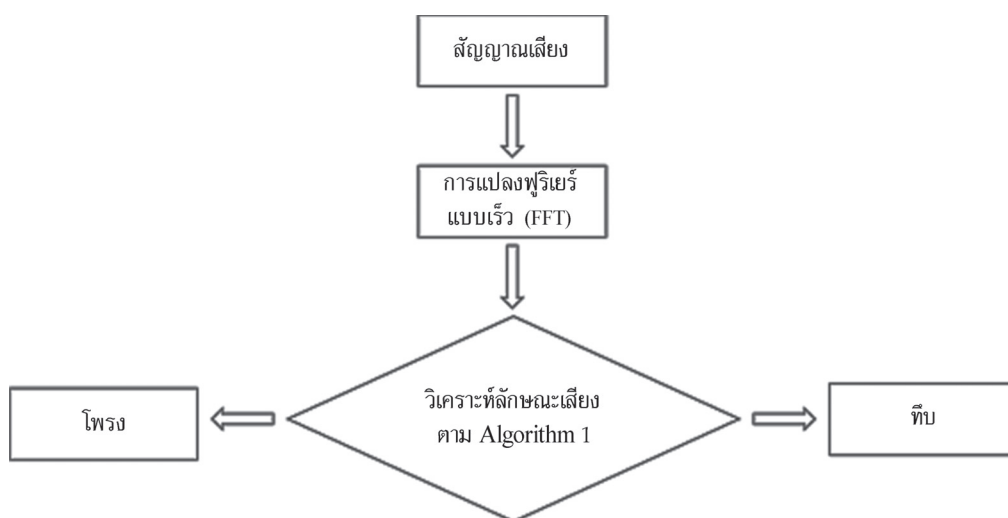


รูปที่ 3 เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการเคาะเก็บสัญญาณเสียง

4. พัฒนาอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ลักษณะเสียงโพรงใต้แผ่นกระเบื้องโดยใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ตามการวิเคราะห์สัญญาณเสียงดังแสดงในรูปที่ 4

- เริ่มจากนำสัญญาณเสียงที่บันทึกในรูปแบบ .wav
- เปลี่ยนสัญญาณเสียงจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่
- กำหนดค่าเทรชโฮลด์ (Threshold)
- นับจำนวนสเปกตรัม (count) ที่มากกว่าค่าเทรชโฮลด์
- ถ้าจำนวนสเปกตรัมมากกว่าค่าที่กำหนดไว้แสดงว่าสัญญาณเสียงที่นำมาวิเคราะห์เป็นลักษณะเสียงโพรง ถ้าจำนวนสเปกตรัมน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้แสดงว่าสัญญาณเสียงที่นำมาวิเคราะห์เป็นลักษณะเสียงทึบดังแสดงใน Algorithm 1 โดยที่ “PASS” หมายถึงเสียงทึบ “FAIL” หมายถึงเสียงโพรง และกำหนดตัวแปร MAX ที่ 20

5. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ด้วย FFT กับผลการฟังเสียงและวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ลักษณะเสียง

Algorithm 1: วิเคราะห์ลักษณะเสียง

```

1: Initialize: wav file (w), Threshold (T), MAX
2: [w, fs] = wavread(w)
3: n = length(w)-1, f = 0:fs/n:fs
4: w* ← abs(fft(w))
5: For i = 1:length(f)
6: If w*(i) > T Then
7:     count++
8: End If
9: End For
10: If count > MAX Then
11:     'FAIL'
12: Else If
13:     'PASS'
14: End If

```

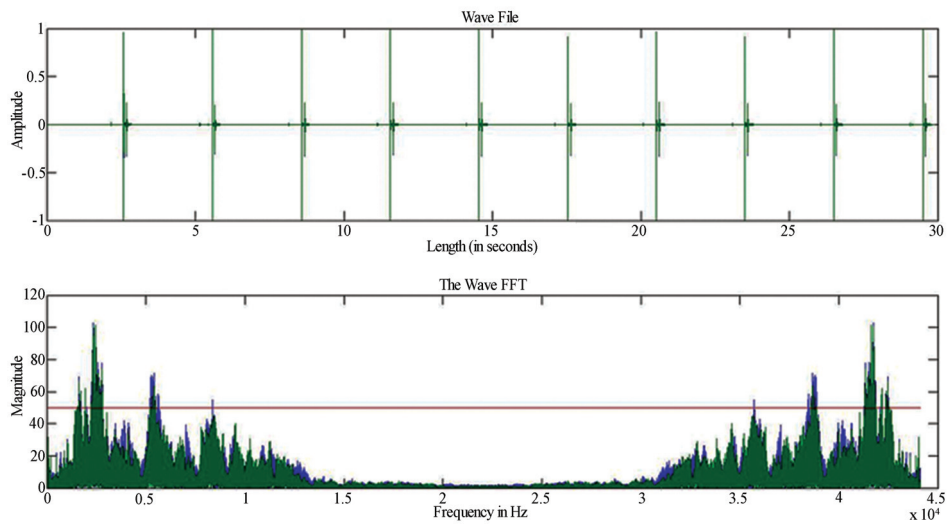
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากข้อมูลเสียงทั้งหมด 158 ชุดข้อมูลที่ถูกนำมาวิเคราะห์ข้อมูลเสียงด้วย FFT และพัฒนาอัลกอริทึมโดยใช้โปรแกรม MATLAB ผลการวิเคราะห์เสียงในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 5 - 8 โดยแกนนอนเป็นความถี่และแกนตั้งเป็นขนาดของสเปกตรัมที่คำนวณจากสมการที่ (1) - (2) จากรูปที่ 5 - 6 แสดงกราฟสเปกตรัมของสัญญาณเสียงที่ได้แผ่นกระเบื้องที่มีลักษณะเสียงโพรงและรูปที่ 7 - 8 เป็นกราฟสเปกตรัมของสัญญาณเสียงที่ได้แผ่นกระเบื้องมีปูนกาวซีเมนต์ทึบ จากผลการวิเคราะห์สังเกตเห็นได้ว่า ได้แผ่นกระเบื้องที่มีความทึบส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณเสียงมีค่าต่ำกว่า 50 ฉะนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกกำหนดค่าเทรชโฮลด์ไว้ที่ 50

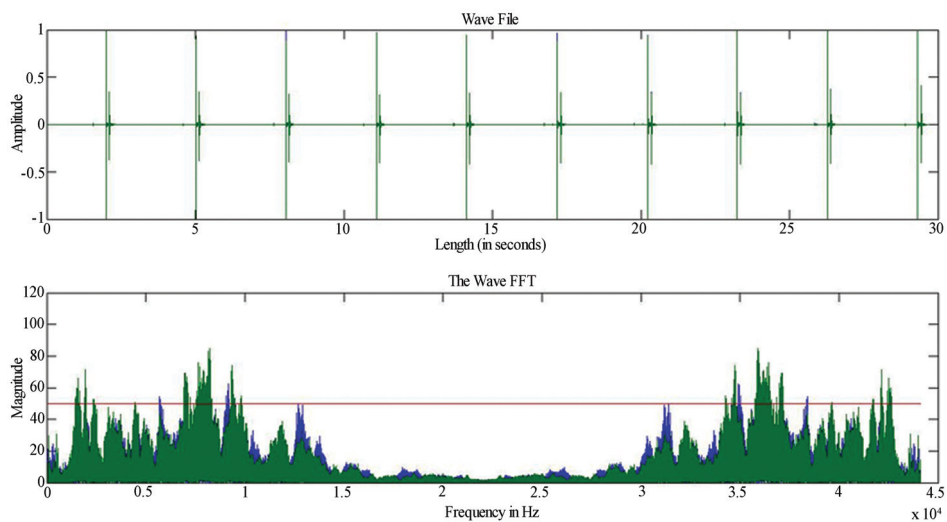
ผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์สัญญาณเสียงในโดเมนความถี่ด้วย FFT กับการวิเคราะห์ของผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบคุณภาพงานปูกระเบื้องพบว่า การวิเคราะห์ของผู้เชี่ยวชาญมีความสอดคล้องกับตำแหน่งที่ได้ทำการกำหนดความทึบหรือโพรงที่ได้ทำการกำหนดไว้ล่วงหน้า ผลเปรียบเทียบสรุปดังตารางที่ 1 จากข้อมูล 79 ชุดข้อมูล โปรแกรมวิเคราะห์ผลไม่ตรงกับผู้เชี่ยวชาญเพียง 1 จุดเท่านั้น รายละเอียดการเปรียบเทียบการวิเคราะห์แต่ละตำแหน่งที่ทำการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นกับผู้เชี่ยวชาญแสดงในตารางที่ 2 โดยที่ C หมายถึงจำนวนของสเปกตรัมมีค่ามากกว่าค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดไว้ การวิเคราะห์โดยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นบันทึกไว้ในช่อง 'โปรแกรม' และการวิเคราะห์ของผู้เชี่ยวชาญถูกบันทึกไว้ในช่อง 'ผลจริง' จากการวิเคราะห์สังเกตเห็นว่าเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่งกระเบื้องแผ่นที่ 7 จุดที่ 4 ทั้ง 2 ชุดข้อมูล เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวมีลักษณะข้อมูลเสียงที่ก้ำกึ่งระหว่างเสียงทึบและเสียงโพรง

ตารางที่ 1 สรุปผลการวิเคราะห์สัญญาณเสียงเคาะกระเบื้อง

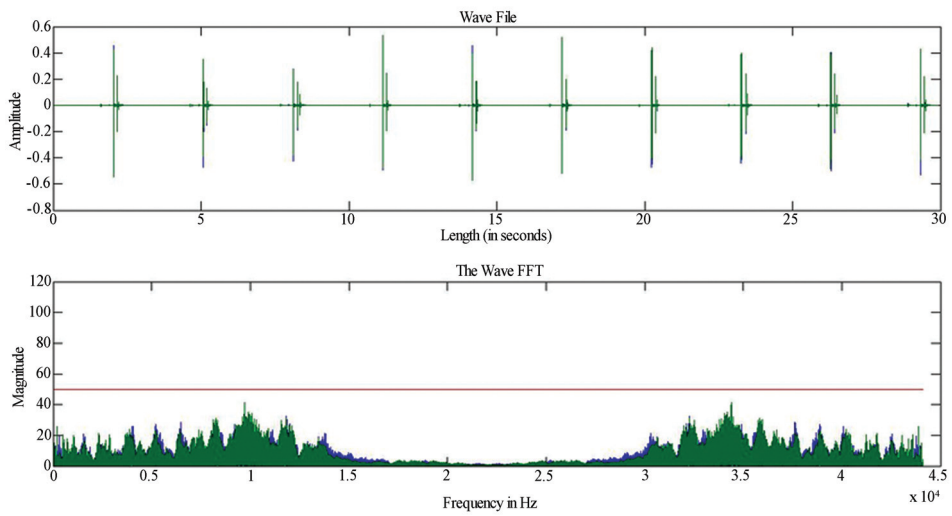
	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2
จำนวนข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณเสียง	79	79
จำนวนข้อมูลที่โปรแกรมวิเคราะห์ที่ไม่ตรงกับผู้เชี่ยวชาญ	1	1
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของโปรแกรม	98.73	98.73



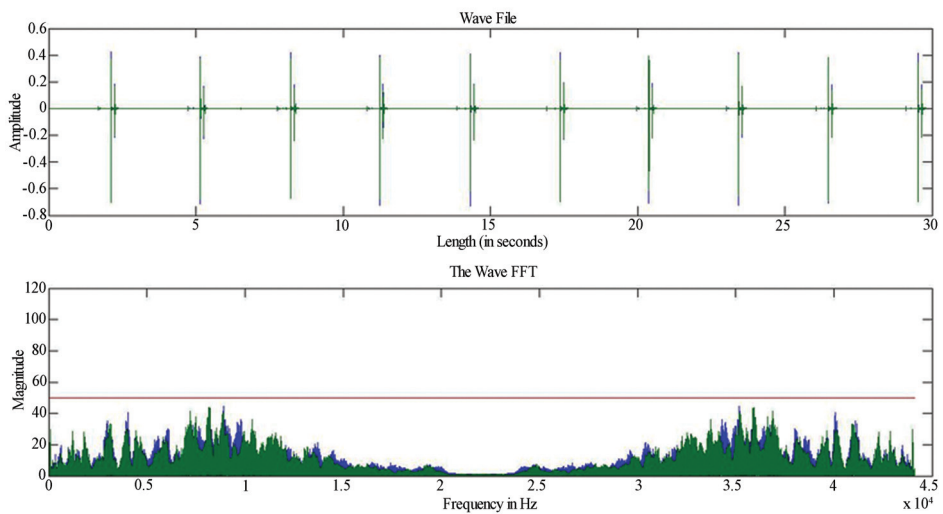
รูปที่ 5 ลักษณะเสียงของกระเบื้องแผ่นที่ 1 จุดที่ 2



รูปที่ 6 ลักษณะเสียงของกระเบื้องแผ่นที่ 8 จุดที่ 1



รูปที่ 7 ลักษณะเสียงของกระเบื้องแผ่นที่ 5 จุดที่ 5



รูปที่ 8 ลักษณะเสียงของกระเบื้องแผ่นที่ 7 จุดที่ 1

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณเสียงด้วย FFT

ทดสอบครั้งที่ 1																					
จุดที่	แผ่นที่ 1		แผ่นที่ 2		แผ่นที่ 3		แผ่นที่ 4		แผ่นที่ 5		แผ่นที่ 6		แผ่นที่ 7		แผ่นที่ 8		แผ่นที่ 9				
	C	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C			
1	29542	FAIL	โพรง	12478	FAIL	โพรง	34	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	4750	FAIL	โพรง	5804	FAIL	โพรง
2	7058	FAIL	โพรง	200	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
3	10120	FAIL	โพรง	4028	FAIL	โพรง	1536	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	2	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	8	PASS	ทึบ
4	11812	FAIL	โพรง	9998	FAIL	โพรง	2516	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	5220	FAIL	โพรง	6652	FAIL	ทึบ	0	PASS	ทึบ
5	21768	FAIL	โพรง	8366	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
6	19438	FAIL	โพรง	3716	FAIL	โพรง	1124	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
7	15298	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	252	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	21380	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
8	4786	FAIL	โพรง	6640	FAIL	โพรง	496	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	3914	FAIL	โพรง	22434	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ
9	78	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ

ทดสอบครั้งที่ 2																		
จุดที่	แผ่นที่ 1		แผ่นที่ 2		แผ่นที่ 3		แผ่นที่ 4		แผ่นที่ 5		แผ่นที่ 6		แผ่นที่ 7		แผ่นที่ 8		แผ่นที่ 9	
	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง	C	ไม่ผ่าน	ผลจริง
1	33870	FAIL	โพรง	8378	FAIL	โพรง	252	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	358	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ
2	5838	FAIL	โพรง	236	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
3	8160	FAIL	โพรง	3056	FAIL	โพรง	1838	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	14	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
4	10994	FAIL	โพรง	8318	FAIL	โพรง	4350	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	5494	FAIL	โพรง	11828	FAIL	ทึบ
5	20672	FAIL	โพรง	8584	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
6	9050	FAIL	โพรง	3398	FAIL	โพรง	1120	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ
7	12778	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	854	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	21802	FAIL	โพรง	9132	FAIL	โพรง
8	4412	FAIL	โพรง	8484	FAIL	โพรง	394	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ		0	PASS
9	644	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ	0	PASS	ทึบ	1244	FAIL	โพรง	6436	FAIL	โพรง	0	PASS	ทึบ

บทสรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ลักษณะเสียงโพรงใต้แผ่นกระเบื้องด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) เพื่อลดการพึ่งพามนุษย์ซึ่งขาดความแน่นอนและแม่นยำในการตรวจสอบคุณภาพงานก่อสร้าง การตรวจสอบคุณภาพงานปูกระเบื้องเป็นงานที่จำเป็นต้องใช้ประสบการณ์โดยเฉพาะการตรวจสอบโพรงใต้แผ่นกระเบื้อง การตรวจสอบนี้ต้องใช้การฟังของมนุษย์เพื่อทำการแยกแยะลักษณะเสียงทึบหรือโพรงก่อนตัดสินใจแก้ไขงาน อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้การพิจารณาขนาดของสเปกตรัมและกำหนดค่าเทรชโฮลด์เท่ากับ 50 ข้อมูลเสียง 158 ชุดข้อมูล ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยค่าความถูกต้องที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญมีค่ามากถึง 98.73 % ผลการพัฒนานี้วิธีการวิเคราะห์ลักษณะเสียงโพรงนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการสร้างระบบช่วยตรวจสอบคุณภาพงานปูกระเบื้องเพื่อให้เกิดมาตรฐานในงานก่อสร้างได้ โดยควรพิจารณาเกี่ยวกับเสียงรบกวนในหน่วยงานก่อสร้างจริงซึ่งต้องทำการตัดเสียงรบกวนก่อนทำการวิเคราะห์สัญญาณเสียง รวมไปถึงการพัฒนาต่อยอดเป็นอุปกรณ์อัตโนมัติหรือแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ที่สามารถเพิ่มความสะดวกในการทำงานให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยและพัฒนาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ วจพ. 7/2559

References

- [1] Yang, S., Gu, L., and Gibson, R. F. (2001). Nondestructive of Weak Joints in Adhesively Bonded Composite Structures. **Composite Structures**. Vol. 51, Issue 1, pp. 63-71. DOI: 10.1016/S0263-8223(00)00125-2
- [2] Sansalone, M. and Carino, N. J. (1989). Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays using the Impact-Echo Model. **ACI Materials Journal**. Vol. 86, No. 2, pp. 177-184
- [3] Mori, K., Spagnoli, A., Murakami, Y., Kondo, G., and Torigoe, I. (2002). A New Non-Contacting Non-Destructive Testing Method for Defect Detection in Concrete. **NDT and E International**. Vol. 35, No. 6, pp. 399-406
- [4] Huang, Y. H., Ng, S. P., Liu, L., Li, C. L., Chen, Y. S., and Hung, Y. Y. (2009). NDT&E using Shearography with Impulsivethermal Stressing and Clustering Phase Extraction. **Opticsand Laser in Engineering**. Vol. 47, pp. 774-781

- [5] Hung, Y. Y., Chen, Y. S., Ng, S. P., Liu, L., Huang, Y. H., Luk, B. L., Ip, R. W. L., Wu, C. M. L., and Chung, P. S. (2009). Review and Comparison of Shearography and Active Thermography for Nondestructive Evaluation. **Materials Science and Engineering R Reports**. Vol. 64, No. 5, pp. 73-112. DOI: 10.1016/j.mser.2008.11.001
- [6] Luk, B. L., Liu, K. P., Tong, F., and Man, K. F. (2010). Impact-Acoustics Inspection of Tile-Wall Bonding Integrity Via Wavelet Transform and Hidden Markov Models. **Journal of Sound and Vibration**. Vol. 329, Issue 10, pp. 1954-1967. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.11.038
- [7] Wu, H. and Siegel, M. (2000). Correlation of Accelerometer and Microphone Data in the Coin Tap Test. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**. Vol. 49, No. 3, pp. 493-497
- [8] Ito, T. and Uomoto, T. (1997). Nondestructive Testing Method of Concrete using Impact Acoustics. **NDT & E International**. Vol. 30, Issue 4, pp. 217-222. DOI: 10.1016/S0963-8695(96)00059-X
- [9] Asano, M., Kamada, T., Kunieda, M., and Rokugo, K. (2003). Impact Acoustics Methods for Defect Evaluation in Concrete. In **Proceedings of Nondestructive testing - Civil Engineering 2003**. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.11.017
- [10] Tong, F., Xu, X. M., Luk, B. L., and Liu, K. P. (2008). Evaluation of Tile - Wall Bonding Integrity Based on Impact Acoustics and Support Vector Machine. **Sensors and Actuators A: Physical**. Vol. 144, pp. 97-104. DOI: 10.1016/j.sna.2008.01.020



ชนิดและปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้น้ำในพื้นที่เขื่อนน้ำอูน
จังหวัดสกลนคร

Species and Biomass Distribution of Aquatic Plant in Nam Oun Reservoir, Sakon Nakhon Province

สมศักดิ์ ระย่น^{1*} สุภิญญา คำหล้า¹ บุญทิวา ชาคิขันธ์¹ และอมรรตน์ รังสิวิวัฒน์¹

Received: August, 2016; Accepted: September, 2017

บทคัดย่อ

ชนิด และปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้น้ำในเขื่อนน้ำอูน จังหวัดสกลนคร ดำเนินการระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2556 ถึงเดือนตุลาคม 2557 โดยแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 เขต ได้แก่ เขตตอนบน เขตตอนกลาง และเขตตอนล่าง เขตพื้นที่ละ 2 จุด รวม 6 จุด สุ่มตัวอย่างโดยใช้กรอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1×1 เมตร ตามแนวเส้นเก็บตัวอย่าง 3 เส้น ๆ ละ 3 จุด ๆ ละ 3 ซ้ำ 4 ช่วงเวลา สุ่มพบชนิดพรรณไม้น้ำในเขื่อนน้ำอูนรวม 27 ชนิด 21 วงศ์ แยกเป็นประเภทพืชชายน้ำ 16 ชนิด ประเภทพืชลอยน้ำ 5 ชนิด ประเภทพืชใต้น้ำ 5 ชนิด และประเภทพืชไหลพันน้ำ 1 ชนิด ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ชนิดและปริมาณมวลชีวภาพของพรรณไม้น้ำแต่ละช่วงเวลามีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่เขตพื้นที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) มีปริมาณมวลชีวภาพพรรณไม้น้ำรวมเท่ากับ 14,589.05 กรัมต่อตารางเมตร ปริมาณการแพร่กระจายตามพื้นที่ของพรรณไม้น้ำพบว่า พื้นที่ตอนกลางมีมวลชีวภาพน้ำหนักรวมสูงสุดเท่ากับ 7,742.50 กรัมต่อตารางเมตร และปริมาณการแพร่กระจายตามช่วงเวลาสำรวจ ช่วงเวลาเดือนพฤศจิกายนถึงมกราคม (T1) มีมวลชีวภาพน้ำหนักรวมสูงสุดเท่ากับ 7,179.70 กรัมต่อตารางเมตร ชนิดพรรณไม้น้ำที่พบและมีปริมาณสูงสุด ได้แก่ ไมยราบยักษ์ ($4,457.78 \text{ g/m}^2$) รองลงมาได้แก่ ทุเรียนเทศ ($3,973.76 \text{ g/m}^2$) สาหร่ายข้าวเหนียว ($1,437.23 \text{ g/m}^2$) บัวสาย ($1,066.45 \text{ g/m}^2$) และแห้วทรงกระเทียม (832.23 g/m^2)

คำสำคัญ : ชนิดพรรณไม้น้ำ; ปริมาณพรรณไม้น้ำ; เขื่อนน้ำอูน; จังหวัดสกลนคร

¹ Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus

* Corresponding Author E - mail Address: somsakry@gmail.com

Abstract

Species and quantity distribution of biomass aquatic plants in Nam Oun reservoir, Sakon Nakhon province conducted during September 2013 to August 2014. Samplings of aquatic plants were conducted in 4 hydrological seasons, total of 6 stations, within 3 zones by quadrant 1×1 meter. The result showed that 27 species and 21 families; 16 species of marginal type, 5 species floating type, 5 species of submerged type and 1 species of emerged type. Analysis of variance showed that the species and quantity of biomass aquatic plants each time the survey significant difference ($P < 0.05$), but the zone is not statistically different ($P > 0.05$). The total wet weight of aquatic plant was $14,589.05 \text{ g/m}^2$. The most quantitative of aquatic plants was found during November to January $7,179.70 \text{ g/m}^2$. The aquatic plants with the highest wet weight of encounter was *Mimosa pigra* ($4,457.78 \text{ g/m}^2$) followed by *Leersia hexandra* ($3,973.76 \text{ g/m}^2$), *Utricularia aurea* ($1,437.23 \text{ g/m}^2$) *Nymphaea lotus* ($1,066.45 \text{ g/m}^2$), and *Eleocharis dulcis* (832.23 g/m^2).

Keywords: Aquatic Plant; Biomass; Nam Oun Reservoir; Sakon Nakhon Province

บทนำ

พรรณไม้น้ำจัดเป็นผู้ผลิตเบื้องต้น (Primary Producers) และเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศของแหล่งน้ำและมีบทบาทสำคัญมากทั้งในกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี เช่น การเป็นแหล่งที่อยู่อาศัย หลบซ่อนศัตรู และขยายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในน้ำ อีกทั้งเป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของน้ำ การสะสมตะกอนท้องน้ำ และช่วยเสริมสร้างความมั่นคงของตลิ่ง จึงมีส่วนสำคัญในการกำหนดรูปร่างลักษณะทางกายภาพของแหล่งน้ำ [1] โดยทั่วไปพื้นที่ชายฝั่งของทะเลสาบ และอ่างเก็บน้ำจะมีการกระจายของพรรณไม้น้ำอยู่เป็นจำนวนมาก ขอบเขตของการแพร่กระจายเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ความผันแปรของธาตุอาหาร และวัสดุพื้นท้องน้ำเป็นส่วนสำคัญทำให้เกิดความแตกต่างของชนิดพรรณไม้น้ำในแหล่งน้ำเดียวกัน [2] ปริมาณพรรณไม้น้ำที่มีพอเหมาะจะทำให้แหล่งน้ำอยู่ในสภาพสมดุล เหมาะกับการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตในน้ำและส่งผลให้มนุษย์สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำได้อย่างเต็มที่ [3] พรรณไม้น้ำมีความอ่อนไหวสูงต่อผลกระทบที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำ โดยความหลากหลายของพรรณไม้น้ำจะสูงเมื่อแหล่งน้ำไม่ถูกรบกวนโดยกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ และจะเป็นตรงกันข้ามหากแหล่งน้ำถูกรบกวนสูง [1]

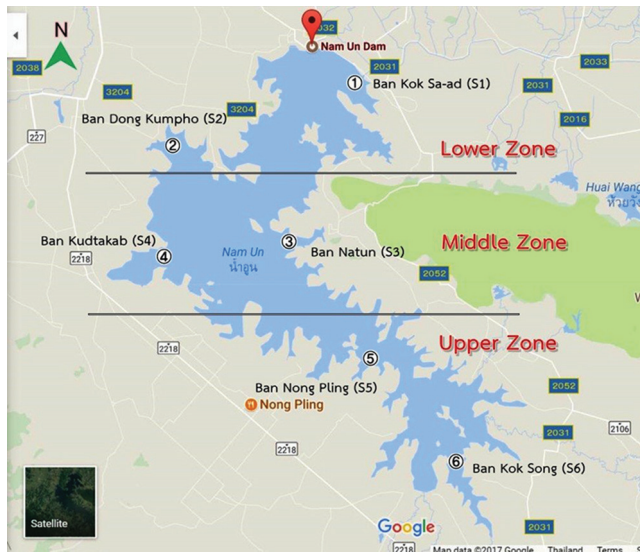
เขื่อนน้ำอูนเกิดจากการสร้างเขื่อนปิดกั้นลำน้ำอูน มีต้นน้ำจากทิวเขาภูพานในเขตอำเภอกุดบาก จังหวัดสกลนคร ตัวเขื่อนตั้งอยู่ที่หมู่บ้านหนองบัว หมู่ที่ 4 ตำบลแร่ อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร ลักษณะเป็นเขื่อนดินยาวทั้งสิ้น 3,330 เมตร สันเขื่อนกว้าง 8 เมตร มีพื้นที่รับน้ำฝนเหนือเขื่อน 1,100 ตารางกิโลเมตร เก็บน้ำได้เต็มที่ 520 ล้านลูกบาศก์เมตร มีพื้นที่ผิวน้ำ (Water Surface Area)

53,000 ไร่ ความลึกเฉลี่ย 6.4 เมตร [4] - [5] แม้ว่าจะมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อชลประทานการเกษตรกรรมเป็นหลัก แต่ประโยชน์ที่ได้รับอีกอย่างคือ ประโยชน์ทางด้านการประมง ราษฎรที่อาศัยอยู่บริเวณรอบ ๆ อ่างเก็บน้ำใช้ประโยชน์จากอ่างเก็บน้ำในการเป็นแหล่งทำมาหากินจากพืช ปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ เพื่อใช้บริโภคในครัวเรือนหรือจำหน่ายเพื่อเป็นรายได้ให้กับครอบครัว มีรายงานการศึกษาทางด้านทรัพยากรประมงในอ่างเก็บน้ำเขื่อนน้ำอูน [6] ศึกษาองค์ประกอบผลจับของปลาจากเครื่องมือช่วย ดำเนินการระหว่างเดือนพฤษภาคม 2551 - เมษายน 2552 พบปลาจำนวน 44 ชนิด 18 วงศ์ โดยมีวงศ์ปลาตะเพียนมีจำนวนมากที่สุด 18 ชนิด Panchan รายงานชีววิทยาการสืบพันธุ์บางประการของปลาตะเพียนทรายพบว่าปลาตะเพียนทรายสามารถสืบพันธุ์ได้ตลอดทั้งปี โดยมีฤดูกาลสืบพันธุ์สูงสุดอยู่ช่วงเดือนมิถุนายน - สิงหาคม ขนาดความยาวเริ่มแรกสืบพันธุ์ได้ร้อยละ 50 เท่ากับ 8.8 เซนติเมตร [7] Rangsiwivat, A. et al. รายงานผลการศึกษาชนิดและการแพร่กระจายของหอยฝาเดียว พบหอยฝาเดียวจำนวน 8 ชนิด 4 อันดับ มีการแพร่กระจายทั่วบริเวณอ่างเก็บน้ำ โดยมีความชุกชุมทั้งหมดในรอบปีเท่ากับ 1,942.03 ตัวต่อตารางเมตร [8] Chartchumni, B. et al. รายงานความหลากหลายของแมลงน้ำในเขื่อนน้ำอูน ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2556 - ตุลาคม 2557 พบแมลงน้ำจำนวน 8 วงศ์ โดยวงศ์ Aeshnidae มีจำนวนชนิดมากที่สุด 5 ชนิด [9] Rayan, S. et al. รายงานความสัมพันธ์ของคุณภาพน้ำบางประการต่อความชุกชุมของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังขนาดใหญ่พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีความสัมพันธ์กับหอยฝาเดียววงศ์ Lymnaeidae และกุ้งน้ำจืดวงศ์ Palaemonidae ซึ่งเป็นวงศ์ที่มีความชุกชุมสูงสุด [10] จากรายงานการศึกษาวิจัยในเขื่อนน้ำอูนยังไม่พบการรายงานเกี่ยวกับพรรณไม้น้ำ ดังนั้นในการศึกษารุ่นนี้เพื่อศึกษาชนิด และปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้น้ำในเขื่อนน้ำอูน สำหรับเป็นข้อมูลความหลากหลายของพรรณไม้น้ำ และเป็นข้อมูลเพื่อการบริหารจัดการแหล่งน้ำได้ต่อไป

วิธีการศึกษา

1. พื้นที่ศึกษา

การศึกษารุ่นนี้แบ่งพื้นที่อ่างเก็บน้ำเขื่อนน้ำอูนออกเป็น 3 บริเวณ คือ เขตตอนล่าง (Zone 1) ได้แก่ บ้านโคกสะอาด ตำบลแระ อำเภอฟังโคน จังหวัดสกลนคร (S1: 17°17'27.86"N 103°45'49.90"E) มีความลึกเฉลี่ย 1.92 เมตร และบ้านดงคำโพธิ์ ตำบลปลาไหล อำเภวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร (S2: 17°16'32.50"N 103°41'44.05"E) มีความลึกเฉลี่ย 1.81 เมตร เขตตอนกลาง (Zone 2) บ้านนาพันตำบลนาใน อำเภอพรรณานิคม จังหวัดสกลนคร (S3: 17°13'48.96"N 103°44'31.48"E) มีความลึกเฉลี่ย 1.73 เมตร และบ้านกุดตะกาบ ตำบลกุดตะกาบ อำเภวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร (S4: 17°14'12.72"N 103°41'05.76"E) มีความลึกเฉลี่ย 1.78 เมตร และเขตตอนบน (Zone 3) บ้านหนองปลิง อำเภอนิคมน้ำอูน จังหวัดสกลนคร (S5: 17°11'53.69"N 103°44'41.66"E) มีความลึกเฉลี่ย 1.66 เมตร และบ้านโคกสูง ตำบลหนองบัว อำเภอนิคมน้ำอูน จังหวัดสกลนคร (S6: 17°09'15.13"N 103°48'03.33"E) มีความลึกเฉลี่ย 1.61 เมตร รวมทั้งสิ้น 6 สถานี (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 Map and location of sampling station (●) in Nam Oun reservoir, Sakon Nakhon province. (ดัดแปลงจาก [18])

2. ช่วงเวลาการลุ่มตัวอย่าง

ทำการลุ่มเก็บตัวอย่าง 4 ช่วงเวลา (ตารางที่ 1) ตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำตามข้อมูลพื้นฐานทางอุทกศาสตร์ของพื้นที่ (ดัดแปลงจาก [11]) ดังนี้ ช่วงเวลาที่ 1 ฤดูปรับเปลี่ยนจากฤดูฝนเป็นฤดูแล้งระหว่างเดือนพฤศจิกายน - มกราคม (T1 : Rainy to Dry) ช่วงเวลาที่ 2 ฤดูแล้งระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน (T2 : Dry) ช่วงเวลาที่ 3 ฤดูปรับเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคม - กรกฎาคม (T3 : Dry to Rainy) และช่วงเวลาที่ 4 ฤดูฝนระหว่างเดือนสิงหาคม - ตุลาคม (T4 : Rainy)

ตารางที่ 1 Pattern and details of hydrological seasons in Nam Oun reservoir, Sakon Nakhon province (ดัดแปลงจาก [11])

Time	Month	Details
Rainy to Dry: T1	Nov - Jan	End of the rainy season, highest in water volume and water body is extremely expanded.
Dry: T2	Feb - Apr	The water level at the lowest end storage, low water temperature.
Dry to Rainy: T3	May - Jul	End of storage period at low water level, when rain starts to precipitate, the water temperature is quite high.
Rainy: T4	Aug - Oct	The period of heavy precipitation, the water level starts to rise and turbidity increase.

3. วิธีการสุ่มเก็บตัวอย่าง

สุ่มตัวอย่างปริมาณพรรณไม้น้ำโดยใช้กรอบไม้สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1×1 เมตร โดยการสุ่มตามแนวเส้นเก็บตัวอย่าง 3 เส้น ห่างกันเส้นละ 5 เมตร สุ่มตัวอย่างเส้นละ 3 จุด ๆ ละ 3 ซ้ำ นำตัวอย่างมาจำแนกชนิดและชั่งน้ำหนักตามประเภทของพรรณไม้น้ำที่พบในแต่ละจุดสำรวจตาม [3], [12] - [15]

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างของชนิดและกลุ่มพรรณไม้น้ำ และปริมาณมวลชีวภาพของน้ำหนักสด (Wet Weight Biomass) ตามวิธีของ [16] และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Fisher's Least - Significant Different (LSD) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ R-statistic version 2.9.0 [17]

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ชนิดของพรรณไม้น้ำในเขื่อนน้ำอูน จังหวัดสกลนคร ในช่วงระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2556 ถึงเดือนตุลาคม 2557 โดยออกเก็บตัวอย่าง 6 จุดสำรวจ พบพรรณไม้น้ำทั้งหมด 27 ชนิด 21 วงศ์ (ตารางที่ 2) จำแนกตามลักษณะนิเวศวิทยา 4 ประเภท [3] เป็นประเภทพืชชายน้ำ 16 ชนิด (59.26 %) ได้แก่ ผักเป็ดแดง หล้าเกล็ดหอย กกสามเหลี่ยม หัวทรงกระเทียม ผักแว่น ไมยราบยักษ์ ไมยราบ แพงพวยนา หล้าขน หล้าไซ หล้าเห็บ หล้าแพรง หล้าแดง เอื้องเพ็ดม้า หล้ามั่นลิง และหล้าเกล็ดปลา ประเภทพืชลอยน้ำ 5 ชนิด (18.52 %) ได้แก่ จอก ผักบู่ บัวบา ผักกระเฉด และกระเจ็บ 2 เขา ประเภทพืชใต้น้ำ 5 ชนิด (18.52 %) ได้แก่ สาหร่ายหางกระรอก เทป สาหร่ายข้าวเหนียว สาหร่ายเส้นด้าย และดีปลีน้ำ และประเภทพืชโผล่พ้นน้ำ 1 ชนิด (3.70 %) ได้แก่ บัวสาย ผลการศึกษาค้นพบกลุ่มพืชประเภทชายน้ำร้อยละ 59.26 สอดคล้องกับการศึกษาของ Ruekaewma, P. et al. ศึกษาพรรณไม้น้ำในหนองหารซึ่งเป็นพื้นที่ในจังหวัดสกลนคร พบพรรณไม้น้ำจำนวน 41 ชนิด เป็นประเภทพืชชายน้ำจำนวน 20 ชนิด หรือร้อยละ 52.22 [19] Kaonarumit, A., et al. รายงานความหลากหลาย ปริมาณและการแพร่กระจายพรรณไม้น้ำในหนองหาร จังหวัดสกลนครระหว่างเดือนพฤษภาคม - ธันวาคม 2552 พบพรรณไม้น้ำจำนวน 44 ชนิด 31 วงศ์ เป็นประเภทพืชชายน้ำ 24 ชนิด หรือร้อยละ 54.55 [20] และรายงานของ Ruekaewma, N., et al. ศึกษาความหลากหลายและการแพร่กระจายของพรรณไม้น้ำในบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬ พบพรรณไม้น้ำ 21 วงศ์ 38 ชนิด เป็นประเภทพืชชายน้ำ 21 ชนิด หรือร้อยละ 56.4 [21] แสดงให้เห็นว่าแหล่งน้ำนิ่งอ่างเก็บน้ำเขื่อนน้ำอูนและพื้นที่ใกล้เคียงมีประเภทพืชชายน้ำสูงกว่าพืชน้ำประเภทอื่น

ชนิดการแพร่กระจายตามพื้นที่ของพรรณไม้น้ำในเขื่อนน้ำอูน จังหวัดสกลนคร พบว่า เขตตอนล่างมีพรรณไม้น้ำจำนวนมากที่สุด 17 ชนิด เขตตอนบน และเขตตอนกลาง พบพรรณไม้น้ำเท่ากันจำนวน 15 ชนิด โดยสถานที่ 1 สถานที่ 3 และสถานที่ 4 ซึ่งอยู่ในเขตตอนล่างและเขตตอนกลางมีการพบจำนวนของชนิดมากที่สุด 13 ชนิด รองลงมาสถานที่ 5 พบจำนวน 12 ชนิด และสถานที่ 2 และสถานที่ 6 พบจำนวน 11 ชนิด เท่ากัน ซึ่งทั้ง 3 เขต ของพื้นที่การศึกษาค้นพบมีการพบชนิดของพรรณไม้น้ำที่มีจำนวนในการพบใกล้เคียงกันปริมาณการแพร่กระจายตามพื้นที่ของพรรณไม้น้ำในเขื่อนน้ำอูนพบมีปริมาณพรรณไม้น้ำเป็นน้ำหนักมวลชีวภาพรวม 14,589.05 กรัมต่อตารางเมตร โดยเขตตอนกลางมีการพบปริมาณของพรรณไม้น้ำมากที่สุดเท่ากับ 7,742.50 กรัมต่อตารางเมตร โดยสถานที่ 3 มีปริมาณ

ของพรรณไม้้ำเฉลี่ยสูงสุด 4,189.45 กรัมต่อตารางเมตร สถานีที่ 4 มีปริมาณเฉลี่ย 3,553.05 กรัมต่อตารางเมตร รองลงมาเป็นเขตตอนล่างมีปริมาณเท่ากับ 4,897.22 กรัมต่อตารางเมตร โดยสถานีที่ 1 มีปริมาณเฉลี่ย 2,538.34 กรัมต่อตารางเมตร และสถานีที่ 2 มีปริมาณเฉลี่ย 2,358.88 กรัมต่อตารางเมตร และเขตตอนบนมีปริมาณเท่ากับ 1,949.33 กรัมต่อตารางเมตร โดยสถานีที่ 6 มีปริมาณเฉลี่ย 1,094.87 กรัมต่อตารางเมตร และสถานีที่ 5 มีปริมาณเฉลี่ย 854.46 กรัมต่อตารางเมตร (ตารางที่ 2) อาจเนื่องมาจากลักษณะพื้นที่ในการศึกษาครั้งนี้พื้นที่ตอนกลางและตอนล่างของอ่างเก็บน้ำมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรรณไม้้ำ โดยพื้นที่ดังกล่าวจะมีความโปร่งใสของน้ำสูง ระดับน้ำมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ในขณะที่พื้นที่ตอนบนของอ่างเก็บน้ำระดับน้ำจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปล่อยน้ำให้ระบบการเกษตร และลักษณะของน้ำมีความโปร่งแสงต่ำ โดยมีความขุ่นที่เกิดจากตะกอนดิน แตกต่างจาก [21] ที่รายงานการแพร่กระจายของพรรณไม้้ำในบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬที่พบการแพร่กระจายของพรรณไม้้ำในพื้นที่ตอนบนสูงสุด 1,890 กรัมต่อตารางเมตร รองลงมาเป็นพื้นที่ตอนล่าง และตอนกลางเท่ากับ 1,603.90 และ 1,458.40 กรัมต่อตารางเมตร โดยมีพรรณไม้้ำชนิดบัวสาย (*Nymphaea lotus* Linn.) แห้วทรงกระเทียม (*Eleocharis dulcis* Burm.f.) แพงพวยนา (*Jussiaea repens* Linn.) และหญ้าไซ (*Leersia hexandra* Sw.) สามารถพบได้ทุกสถานี

ปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้้ำตามช่วงเวลาการสำรวจทุกเที่ยวที่สำรวจ พบพรรณไม้้ำประเภทพืชขายน้ำมากที่สุด มีปริมาณมวลชีวภาพรวมสูงสุดเท่ากับ 11,148.48 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 76.42 รองลงมา เป็นพรรณไม้้ำประเภทพืชใต้น้ำ ประเภทพืชใล่งพืชน้ำ และประเภทพืชลอยน้ำ มีปริมาณมวลชีวภาพรวมเท่ากับ 2,085.22 1,066.45 และ 288.90 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 14.29 7.31 และ 1.98 ตามลำดับ ทั้งนี้การพบพรรณไม้้ำประเภทขายน้ำมีปริมาณมวลชีวภาพสูงสุดเนื่องมาจากการที่อ่างเก็บน้ำเขื่อนน้ำอูนมีการแพร่กระจายของไมยราบยักษ์สูงทั่วบริเวณขายน้ำ สอดคล้องกับผลการศึกษาค้นคว้าที่พบว่าไมยราบยักษ์มีน้ำหนักรวมมวลชีวภาพสูงสุด การแพร่กระจายของพรรณไม้้ำตามช่วงเวลาพบว่า T1 มีปริมาณมวลชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 7,179.70 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 49.21 รองลงมาเป็นช่วงเวลา T4 T2 และ T3 มีปริมาณมวลชีวภาพ เท่ากับ 4,268.90 2,410.02 และ 730.43 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นร้อยละ 29.26 16.52 และ 5.01 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) โดยมีพรรณไม้้ำชนิดหญ้าไซ (*Leersia hexandra* Sw.) สาหร่ายเส้นด้าย (*Najas greminea* Del.) และสาหร่ายข้าวเหนียว (*Utricularia aurea* Lour.) สามารถพบทุกช่วงเวลาของการสำรวจ อาจเนื่องมาจากหญ้าไซ สาหร่ายเส้นด้าย และสาหร่ายข้าวเหนียวเป็นพืชชนิดเด่นในแหล่งน้ำ สอดคล้องกับรายงานในบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬ ที่เป็นแหล่งน้ำปิดเช่นกันที่พบสาหร่ายข้าวเหนียว สาหร่ายหางกระรอก แห้วทรงกระเทียม บัวสาย และสาหร่ายเส้นด้าย เป็นพรรณไม้้ำที่ขึ้นหนาแน่นมีปริมาณ และการแพร่กระจายสูงสุด [21]

พรรณไม้้ำที่พบและมีปริมาณมวลชีวภาพน้ำหนักรวมสูงสุดบริเวณอ่างเก็บน้ำเขื่อนน้ำอูน 5 อันดับแรก ได้แก่ ไมยราบยักษ์ หญ้าไซ สาหร่ายข้าวเหนียว บัวสาย และแห้วทรงกระเทียม มีมวลชีวภาพน้ำหนักรวมเฉลี่ย 4,457.78 3,973.76 1,437.23 1,066.45 และ 832.23 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากพรรณไม้้ำชนิดเด่นบริเวณแหล่งน้ำอื่นโดย [19] รายงานการสำรวจบริเวณหนองหารพบว่า ติปลี่น้ำ สาหร่ายหางกระรอก และผักตบชวา เป็นพรรณไม้้ำชนิดเด่นและมีปริมาณมากที่สุด และรายงานผลการศึกษาในบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬ พบสาหร่ายข้าวเหนียว สาหร่ายหางกระรอก แห้วทรงกระเทียม บัวสาย และสาหร่ายเส้นด้าย เป็นพรรณไม้้ำที่ขึ้นหนาแน่นมีปริมาณ และการแพร่กระจายสูงสุด [21]

สอดคล้องกับ [22] การแพร่กระจายของชนิดและปริมาณของพรรณไม้น้ำตามพื้นที่และฤดูกาลเนื่องจากความแตกต่างของปัจจัยสภาพแวดล้อม และ [2] อธิบายว่าอ่างเก็บน้ำจะมีการกระจายของพรรณไม้น้ำอยู่เป็นจำนวนมาก ขอบเขตของการแพร่กระจายเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ความผันแปรของธาตุอาหาร และวัสดุพื้นท้องน้ำเป็นส่วนสำคัญทำให้เกิดความแตกต่างของชนิดพรรณไม้น้ำในแหล่งน้ำเดียวกัน

ตารางที่ 2 Spatial biomass of aquatic plant in Nam Oun reservoir, Sakon Nakhon province. (g/m²)

Type	Scientific name	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Total
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	
floating plant	<i>Pistia stratiotes</i> L.			35.56				35.56
	<i>Nymphoides parvifolia</i> (Griseb.)					214.45		214.45
	<i>Neptunia oleracea</i> Lour.	5.56						5.56
	<i>Trapa bispinosa</i> Roxb.			5.00	5.00			10.00
	<i>Ipomoea aquatica</i> Forsk., I. reptans		23.33					23.33
emerged plant	<i>Nymphaea lotus</i> Linn.	6.67	111.11	25.56	908.67	10.00	4.44	1,066.45
submerged plant	<i>Hydrilla verticillata</i> (L.f.) Royle	202.00		46.66	2.67	12.22	12.22	275.77
	<i>Vallisneria spiralis</i> L.					40.00	66.67	106.67
	<i>Utricularia aurea</i> Lour.	480.00	752.23	186.66	1.67	16.67		1,437.23
	<i>Najas greminea</i> Del.			13.33	11.11	24.45	30.00	78.89
	<i>Potamogeton malaianus</i> Miq.		22.22	61.11	61.11	13.33	28.89	186.66
marginal plant	<i>Alternanthera sessilis</i> (L.) R. Br. DC.	2.67			16.67			19.34
	<i>Cyperus pilosus</i> Vahl.						13.33	13.33
	<i>Eleocharis dulcis</i> (Burm.f.) Trin ex	111.11	480.00	40.00	12.78	88.34	100.00	832.23
	<i>Marsilea crenata</i> Presl.					38.34		38.34
	<i>Mimosa pigra</i> L.	1,177.77		2,973.34	306.67			4,457.78
	<i>Mimosa pudica</i>			266.67				266.67
	<i>Jussiaea repens</i> Linn.	3.67	58.89	62.23	62.23	70.00	62.22	319.24
	<i>Brachiaria mutica</i> (Forsk.) Stapf		20.00					20.00
	<i>Leersia hexandra</i> Sw.	372.22	861.10	430.00	1,288.90	324.44	697.10	3,973.76
	<i>Paspalum conjugatum</i> Berg.	12.22	11.11					23.33
	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	136.67		43.33	566.67			746.67
	<i>Ischaemum rugosum</i> Salisb., I.		10.00					10.00
	<i>Polygonum tomentosum</i> Willd.				308.90	2.22		311.12
	<i>Lidernia crustacea</i> (L.) F.r.M. var. crustacea	16.67						16.67
	<i>Lippia nodiflora</i> L.						60.00	60.00
	<i>Drymaria diandra</i> BL.	11.11	8.89				20.00	40.00
Total species of stations		13	11	13	13	12	11	
Total species of zones		17		15		15		
Total biomass of station		2,538.34	2,358.88	4,189.45	3,553.05	854.46	1,094.87	14,589.05
Total biomass of zone		4,897.22		7,742.5		1,949.33		

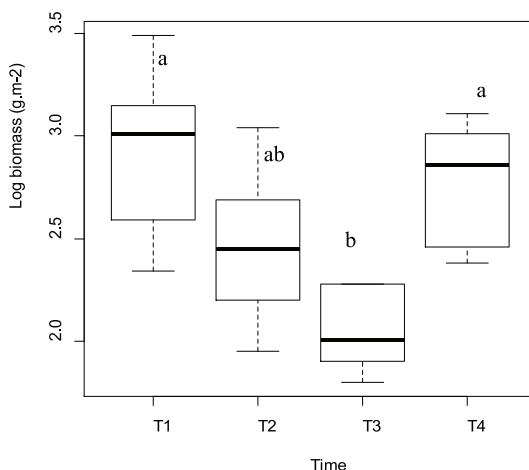
ตารางที่ 3 Temporal biomass of aquatic plant in Nam Oun reservoir, Sakon Nakhon province (g/m²)

Type	Scientific name	T1	T2	T3	T4	Total
floating plant	<i>Pistia stratiotes</i> L.				35.56	35.56
	<i>Nymphoides parvifolia</i> (Griseb.)	106.67			107.78	214.45
	<i>Neptunia oleracea</i> Lour.				5.56	5.56
	<i>Trapa bispinosa</i> Roxb.			10.00		10.00
	<i>Ipomoea aquatica</i> Forsk., I. reptans	23.33				23.33
emerged plant	<i>Nymphaea lotus</i> Linn.	928.67	16.67		121.11	1,066.45
submerged plant	<i>Hydrilla verticillata</i> (L.f.) Royle	213.00		15.00	47.77	275.77
	<i>Vallisneria spiralis</i> L.	66.67	40.00			106.67
	<i>Utricularia aurea</i> Lour.	816.66	120.01	1.67	498.89	1,437.23
	<i>Najas greminea</i> Del.	46.67	6.67	13.33	12.22	78.89
	<i>Potamogeton malaianus</i> Miq.			36.66	150.00	186.66
marginal plant	<i>Alternanthera sessilis</i> (L.) R. Br. DC.	19.34				19.34
	<i>Cyperus pilosus</i> Vahl.	13.33				13.33
	<i>Eleocharis dulcis</i> (Burm.f.) Trin ex	101.67	226.67		503.89	832.23
	<i>Marsilea crenata</i> Presl.	16.67			21.67	38.34
	<i>Mimosa pigra</i> L.	2,900.00			1,557.78	4,457.78
	<i>Mimosa pudica</i>	266.67				266.67
	<i>Jussiaea repens</i> Linn.	53.68			265.56	319.24
	<i>Brachiaria mutica</i> (Forsk.) Stapf			20.00		20.00
	<i>Leersia hexandra</i> Sw.	803.33	1,703.33	623.77	843.33	3,973.76
	<i>Paspalum conjugatum</i> Berg.				23.33	23.33
	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	746.67				746.67
	<i>Ischaemum rugosum</i> Salisb., I.			10.00		10.00
	<i>Polygonum tomentosum</i> Willd.	56.67	236.67		17.78	311.12
	<i>Lidernia crustacea</i> (L.) F.r.M. var. crustacea				16.67	16.67
	<i>Lippia nodiflora</i> L.		60.00			60.00
	<i>Drymaria diandra</i> BL.				40.00	40.00
Total of species		17	8	8	17	
Total of biomass		7,179.70	2,410.02	730.43	4,268.90	14,589.05

ตารางที่ 4 Two-way ANOVA for differences among season and station for species and log-transform of biomass composition

Source of variation	Species			Biomass		
	Df	MS	P-value	Df	MS	P-value
Time	3	103.37	0.008**	3	0.922	0.000***
Zone	2	17.34	0.476	2	0.203	0.069
Residuals	15	18.21		15	0.078	

จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพหลังจากแปลงค่าด้วย Logarithm (ตารางที่ 4) พบว่า ชนิดและปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้น้ำในแต่ละเขตพื้นที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ชนิดและมวลชีวภาพของพรรณไม้น้ำที่พบในเขื่อนน้ำอูนแต่ละช่วงเวลาการสำรวจมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยค่าเฉลี่ยมวลชีวภาพของพรรณไม้น้ำที่พบในช่วงเวลา T1 และช่วงเวลา T4 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับช่วงเวลา T3 แต่ไม่แตกต่างกันกับช่วงเวลา T2 (รูปที่ 2) จากการที่มวลชีวภาพของช่วงเวลา T1 และช่วงเวลา T4 มีความแตกต่างกันทางสถิติกับช่วงเวลา T3 อาจเนื่องมาจากการที่ช่วงเวลา T1 เก็บตัวอย่างอยู่ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม และช่วงเวลา T4 เก็บตัวอย่างระหว่างเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคมซึ่งเป็นระยะเวลาที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี และลักษณะทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำมีความเหมาะสมเนื่องจากเป็นช่วงฤดูฝนต่อเนื่องถึงปลายฤดูฝนต่อเนื่องต้นฤดูหนาวปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำจะมีระดับสูงที่สุดและน้ำจะมีความชุ่มชื้นเนื่องจากเริ่มตกตะกอน ในขณะที่ช่วงเวลา T3 การเจริญเติบโตของพรรณไม้น้ำซึ่งส่วนมากเป็นพืชอายุสั้นเริ่มลดลง มีการออกดอกและตายไป ประกอบกับการที่อ่างเก็บน้ำมีการปล่อยน้ำเพื่อการเกษตรส่งผลให้ระดับน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งพื้นที่ระดับน้ำลดลงจะพบพรรณไม้น้ำทั้งชนิดและปริมาณลดลง ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ตอนกลางในสถานีที่ 3 และสถานีที่ 4 มีปริมาณพรรณไม้น้ำสูงสุด โดยที่ปริมาณพรรณไม้น้ำจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา T4 ที่เป็นฤดูฝน และมีปริมาณสูงสุดในช่วงเวลา T1 ซึ่งเป็นช่วงฤดูการระหว่างปลายฝนต้นฤดูหนาวที่เป็นช่วงเวลาการผสมพันธุ์วางไข่และเลี้ยงดูตัวอ่อนของสัตว์น้ำ สอดคล้องกับรายงานผลจับต่อหน่วยแรงงานประมงที่แสดงถึงความชุกชุมของปลาในเขตตอนกลางในสถานีที่ 4 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.26 ± 0.77 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน และพบจำนวนชนิดในวงศ์ปลาตะเพียนที่จัดอยู่ในกลุ่มปลากินพืชมากที่สุด [6] แสดงถึงบริเวณตอนกลางของอ่างเก็บน้ำที่มีปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้น้ำสูงเป็นระบบนิเวศที่เหมาะสมต่อการเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของปลาดังนั้นควรมีมาตรการบางอย่าง เช่น การห้ามทำการประมง หรือ การอนุรักษ์บางพื้นที่ในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อเป็นแหล่งผสมพันธุ์วางไข่และเลี้ยงดูตัวอ่อนของสัตว์น้ำ เป็นแนวทางการบริหารจัดการแหล่งน้ำเพื่อให้มีผลผลิตสัตว์น้ำในอ่างเก็บน้ำเขื่อนน้ำอูนอย่างยั่งยืน



รูปที่ 2 Result on temporal contributions of biomass.

^{ab}Median with difference superscripts differ significantly ($P < 0.05$)

สรุป

1. การศึกษาชนิดพรรณไม้ในเขื่อนน้ำอูนทั้งหมด 6 จุด ทั้ง 4 ช่วงเวลา พบความหลากหลายของพรรณไม้ทั้งหมด 27 ชนิด 21 วงศ์ โดยแยกเป็นประเภทชายน้ำ 16 ชนิด ประเภทลอยน้ำ 5 ชนิด ประเภทใต้น้ำ 5 ชนิด 5 วงศ์ และประเภทไหลพันน้ำ 1 ชนิด

2. จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ชนิดและมวลชีวภาพของพรรณไม้ที่พบในเขื่อนน้ำอูนแต่ละช่วงเวลาการสำรวจมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยช่วงเวลาที่ 1 และช่วงเวลาที่ 4 แตกต่างทางสถิติกับช่วงเวลาที่ 3 แต่ชนิดและปริมาณการแพร่กระจายของพรรณไม้ในแต่ละเขตพื้นที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$)

3. ปริมาณพรรณไม้ในเขื่อนน้ำอูนคิดเป็นผลผลิตมวลชีวภาพน้ำหนักสด (Wet Weight) มีผลรวมเท่ากับ 14,589.05 กรัมต่อตารางเมตร โดยพื้นที่ตอนกลางมีผลผลิตด้านมวลชีวภาพน้ำหนักสดสูงสุดเท่ากับ 7,742.50 กรัมต่อตารางเมตร และช่วงเวลาเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม (T1) มีปริมาณมวลชีวภาพน้ำหนักสดมากที่สุดเท่ากับ 7,179.70 กรัมต่อตารางเมตร

4. พรรณไม้ที่พบและมีปริมาณมวลชีวภาพน้ำหนักสดสูงสุดบริเวณอ่างเก็บน้ำเขื่อนน้ำอูน 5 อันดับแรก ได้แก่ ไมยราบยักษ์ หญ้าไซ สาหร่ายข้าวเหนียว บัวสาย และแห้วทรงกระเทียม มีมวลชีวภาพน้ำหนักสดเฉลี่ย 4,457.78 3,973.76 1,437.23 1,066.45 และ 832.23 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ

คำขอบคุณ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Nagmsnae, P. (2011). **Monitoring and Bio-Indicators for Assessment of Freshwater Ecosystems**. Department of Fisheries, Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University (in Thai)
- [2] Pieczynska, E. (1990). Littoral Habitats and Communities. In Guideline of Lake Management Volume 3: Lake Shore Manaement. **International Lake Environment Committee, UNEP**, Japan. pp. 39-73
- [3] Sripen, S. (1999). **Aquatic Plants in Thailand**. Bangkok : Amarin Printing and Publishing P.C.L.
- [4] Department of Fisheries. (1974). **The Fishery and the Economic Condition of the People in Lam Reservoir Canal**. Reservoir was the Fire, Nakhon Ratchasima, Lam Pao District, Kalasin Reservoir Nam Oon, Sakon Nakhon, Sirindhorn Dam and Reservoir, Ubon Ratchathani. Annual Report from Department of Fisheries, Department of Fisheries (in Thai)
- [5] Department of Fisheries. (1975). **Statistics Surveys of Fish from the Reservoir Hibiscus in the Northeast**. Annual report from Department of Fisheries, Department of Fisheries
- [6] Panchan, R. and Pankaew, J. (2010). Fish Species Composition by Using Gillnets in Num Oun Reservoir, Sakon Nakhon Province. In **Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference**. Kasetsart University. pp. 377-386 (in Thai)
- [7] Panchan, P. (2010). Reproductive Biology of Swamp Barb (*Puntius brevis*; Bleeker, 1850) in Num Oun Reservoir, Sakon Nakhon Province. In **Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference**, Kasetsart University. pp. 407-414 (in Thai)
- [8] Rangsiwiat, A., Rayan, S., and Chartchumni, B. (2015). Species Diversity and Distribution of Fresh Water Gastropods in Nam Oun Reservoir, Sakon Nakhon province. In **Fisheries Conference 9th**, Maejo University. p. 111 (in Thai)
- [9] Chartchumni, B., Rayan, S., and Rangsiwiat, A. (2015). Biodiversity of Aquatic Insects as Relations of Water Quality in Nam Oun Reservoir, Sakon Nakhon province. In **Fisheries Conference 9th**, Maejo University. p. 112 (in Thai)
- [10] Rayan, S., Chartchumni, B., and Rangsiwiat, A. (2015). Relationship Between Selected Water Quality and Abundance of Macro Invertebrate in Nam Oun Reservoir, Sakon Nakhon Province. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 43, Supplement 1, pp. 595-602 (in Thai)
- [11] Wudneh, T. (1998). **Biology and Management of Fish Stocks in Bahir Dar Gulf, Lake Tana, Ethiopia**. Doctor's Thesis, Wageningen University
- [12] Samitinand, T. (2001). **Thai Plant Names**. 2nded. The Forest Herbarium. Forest Research Office: Royal Forest Department

- [13] Rodloy, A., Nukwan, S., and Saichan, Y. (2010). Species and Distribution of Aquatic Plants on the Upper Part of Northeast Thailand. In **Proceeding of the Annual Conference on Fisheries 2013**. Inland Fisheries Research and Development Center. Aquatic Plants and Ornamental Fish Research Institute, Department of Fisheries
- [14] Kohanantakul, K. (n.d). **Aquatic Plants in Nong Han**. Department of Fisheries.
- [15] Han, E. T. (2002). **The Aquarium Plant Handbook**. Oriental Aquarium (S) : Pte Ltd, Singapore.
- [16] Kent, M. and Coker, P. (1999). **Vegetation Description and Analysis : A Practical Approach**. New York : John Wiley and Sons Inc.
- [17] R Development Core Team. (2009). **R : A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna : Austria.
- [18] Google map. (2016). **Nam Un Dam**. Access (14 March 2017). Available (<https://www.google.co.th/maps/search/nam+un+dam/@17.3264095,103.7416524,14z?hl=th>)
- [19] Ruekaewma, P., Ngoichansri, S., Thongphant, W., Rayan, W., and Sutti-arj, S. (2005). **Species, Biomass and Distribution of Aquatic Macrophytes in Nong Han Swamp, Sakon Nakhon Province**. Inland Fisheries Research and Development Center, Department of Fisheries
- [20] Kaonaruemitr, A., Sanitchon, A., and Ngoichansri, S. (2009). Diversity, Abundance and Distribution of Aquatic Plant in Nong Han Swamp Sakon Nakhon province, Department of Fisheries
- [21] Ruekaewma, N., Ruekaewma, P., and Rubdee, W. (2015). Diversity and Distribution of Aquatic Plants in Bueng Khong Long, Bueng Kan Province. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 43, Supplement 2, pp. 255-264 (in Thai)
- [22] Santamaria, L. (2002). Why are Most Aquatic Plants Widely Distribution? Dispersal Clonal Growth and Small-Scale Heterogeneity in a Stressful Environment. **Acta Oecologica**. Vol. 23, Issue 3, pp. 137-154. DOI: 10.1016/S1146-609X(02)01146-3



ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อคุณภาพของมันสำปะหลัง
แผ่นทอดกรอบปรุงรสปาปริก้า

Effect of Frying Temperature and Time on the Quality of Paprika Flavored Cassava Chips

พราวตา จันทโร^{1*} เทพกัญญา หาญศีลวัตร² และปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์³

Received: April, 2017; Accepted: June, 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสปาปริก้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อคุณภาพของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ นำมันสำปะหลังแผ่น (หนา 0.5 มิลลิเมตร) ที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 นาน 5 นาที มาทอดที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (140, 160 และ 180 °C) และเวลาในการทอด 3 ระดับ (2, 4 และ 6 นาที) ปรุงรสด้วยผงปาปริก้า และอบที่ 180 °C นาน 10 นาที วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอดส่งผลให้ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) ค่าความแข็ง (breaking force) และค่าความสว่าง (L^*) ลดลง แต่ปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอดมีผลทำให้คะแนนความชอบในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบลดลงด้วย โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบคือการทอดที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 2 นาที และมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า และคาร์โบไฮเดรตในปริมาณร้อยละ 1.45, 1.44, 30.60, 2.04, 2.12 และ 62.35 ตามลำดับ

คำสำคัญ : มันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ; อุณหภูมิ; เวลา; การทอด

¹ Faculty of Science and Technology, Surat Thani Rajabhat University

² Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University

³ Faculty of Agriculture, Kasetsart University

* Corresponding Author E - mail Address: prawta.cha@gmail.com

Abstract

This research was to develop cassava chips flavored with paprika. The objective was to study the effect of frying temperature and frying time on the qualities of cassava chips. Cassava slices (0.5 mm thick) were soaked in 1 % sodium bicarbonate solution for 5 min. Then, the cassava slices were fried at 3 levels of temperature (140, 160 and 180 °C) with frying time of 2, 4 and 6 min respectively. Finally, cassava chips were seasoned with paprika powder, followed by baking at 180 °C for 10 min. The chemical, physical and sensory qualities were investigated. The result revealed that increasing the frying temperature and time caused a decreased in moisture content, water activity (a_w), breaking force and lightness (L^*), but an increased in fat content of the product. In addition, the increase of frying temperature and time resulted in decreasing liking score of cassava chips. The optimum temperature and time for producing cassava chips was 160 °C for 2 min. The moisture content, protein, fat, fiber, ash and carbohydrate of paprika flavored cassava chips were 1.45, 1.44, 30.60, 2.04, 2.12 and 62.35 %, respectively.

Keywords: Cassava Chips; Temperature; Time; Frying

บทนำ

ประเทศไทยมีแนวโน้มการบริโภคขนมขบเคี้ยวเพิ่มขึ้นในทุกปี ซึ่งมูลค่าของตลาดขนมขบเคี้ยวปี 2559 อยู่ที่ประมาณ 39,587 ล้านบาท โดยมูลค่าของตลาดขนมขบเคี้ยวเติบโตขึ้นร้อยละ 9.5 จากปี 2558 [1] เมื่อพิจารณาส่วนแบ่งตลาดของขนมขบเคี้ยวตามประเภทพบว่าขนมขบเคี้ยวรูปรี้อยู่ที่ 35 มันทิ้งร้อยละ 25 สาทิ้งร้อยละ 10 ถั่วร้อยละ 5 - 10 และปลาเส้นร้อยละ 5 - 10 [2] แต่เนื่องด้วยปัญหาด้านทุนการผลิตที่สูงขึ้นมากของขนมขบเคี้ยวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 อีกทั้งการนำเข้าขนมขบเคี้ยวจากอินโดนีเซียและมาเลเซียซึ่งมีราคาถูก และกำลังซื้อของผู้บริโภคที่อาจลดลงจากค่าครองชีพที่สูงขึ้น การปรับเปลี่ยนผลิตภัณฑ์เพื่อลดต้นทุนการผลิตจึงเป็นอีกหนึ่งกลยุทธ์ที่ผู้ผลิตนำมาใช้ในการปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดได้

อุตสาหกรรมผลิตมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมอาหารว่างประเภทขนมขบเคี้ยวที่ได้รับความนิยมบริโภคอย่างแพร่หลายในประเทศไทย และมีความต้องการมันฝรั่งเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตประมาณปีละ 124,100 ตัน [3] เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตขนมขบเคี้ยวระหว่างมันฝรั่งและมันสำปะหลัง พบว่ามันสำปะหลังมีราคาถูกกว่ามันฝรั่งมากกว่า 10 เท่า [4] - [5] ดังนั้นหากสามารถนำมันสำปะหลังสดมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนมันฝรั่งสดในการผลิตขนมขบเคี้ยวประเภทมันฝรั่งแผ่น ซึ่งมีมูลค่าส่วนแบ่งตลาดเป็นอันดับสองในตลาดขนมขบเคี้ยว จะเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้ และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่มันสำปะหลังของไทยซึ่งยังมีการบริโภคเพียงเล็กน้อย

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* (L.) Crantz) เป็นพืชเศรษฐกิจของไทยที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญ จัดเป็นวัตถุดิบแข็งที่มีราคาถูกกว่าพืชผลิตแป้งชนิดอื่น ๆ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นไม่ทำให้เกิดภูมิแพ้ จึงมีการนำแป้งมันสำปะหลังไปแปรรูปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร เครื่องสำอาง และเคมีภัณฑ์ [6] มันสำปะหลังที่ประเทศไทยผลิตส่วนมากใช้เป็นวัตถุดิบส่งให้โรงงานทำแป้งมัน สาคุ และอาหารสัตว์โดยทำเป็นมันเส้นหรือมันอัดเม็ด และใช้บริโภคเป็นอาหารเพียงเล็กน้อย ราคามันสำปะหลังที่เกษตรกรขายได้สอดคล้องกับปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังในแต่ละปี โดยในปีที่มีผลผลิตออกมาจากราคามักจะอยู่ในระดับต่ำและในปีที่ผลผลิตน้อยราคาจะปรับตัวขึ้น สำหรับผลผลิตมันสำปะหลังของไทยในปี 2559 - 2560 เริ่มออกสู่ตลาดตั้งแต่เดือนตุลาคม 2559 - กันยายน 2560 คาดว่ามีพื้นที่เก็บเกี่ยว 8.64 ล้านไร่ ผลผลิต 31.19 ล้านตัน และราคาหัวมันสำปะหลังสดเฉลี่ยกิโลกรัมละ 1.33 บาท [4]

ผู้วิจัยได้มองเห็นถึงความสำคัญของมันสำปะหลัง และเกิดแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ โดยการใช้น้ำมันสำปะหลังสดที่ประกอบด้วย โปรตีน เส้นใย เถ้า และไขมันผ่านการแปรรูปโดยการทอดจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ประเภทมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบมีจำหน่ายอยู่บ้างแล้วในท้องตลาดในรูปของผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบที่วางจำหน่ายในขณะนี้ มีลักษณะแข็ง ซึ่งการวิจัยเกี่ยวกับการแปรรูปและพัฒนามันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบยังมีน้อยมาก [7] - [8] โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปและพัฒนามันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ [9] - [13] แครอท [14] และผลิตภัณฑ์ธัญชาติ [15] ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสที่ผู้บริโภคยอมรับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อคุณภาพของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสปาร์ก้า ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาอุณหภูมิในการทอดที่ 140, 160 และ 180 °C เนื่องจากการทอดมันฝรั่งแผ่นโดยปกติแล้วจะทอดในน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิ 150 - 190 °C [11] และใช้ผงปรุงรสปาร์ก้าซึ่งปกติจะใช้ในการโรยหรือเคลือบลงบนอาหารหลายชนิด เช่น มันฝรั่งเกลียว มันฝรั่งทอด กล้วยฉาบ มันทอด ข้าวเกรียบ หรือขนมต่าง ๆ เพื่อปรุงรสเพิ่มกลิ่นและสีให้กับผลิตภัณฑ์

วิธีดำเนินการวิจัย

มันสำปะหลัง (ชนิดหวาน) ปอกเปลือก ล้าง หั่นเป็นแผ่นวงกลมบางตามแนวขวาง (หนา 0.5 มิลลิเมตร) แช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 1 นาน 5 นาที นำขึ้นมาสะเด็ดน้ำทอดในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C (อัตราส่วนมันสำปะหลังแผ่นสด : น้ำมัน = 1 : 20) เป็นเวลา 2, 4 และ 6 นาที โดยจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล (3 × 3) ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) นำมันสำปะหลังแผ่นที่ทอดแล้วมาปรุงรสปาร์ก้า (i-chef, ไทย) (ผงปาร์ก้า 20 กรัม ต่อมันสำปะหลังแผ่นทอด 1 กิโลกรัม) อบไล่ความชื้นสุดท้ายที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งให้เย็น บรรจุถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนก่อนนำมาวิเคราะห์ค่าคุณภาพทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสภายใน 1 สัปดาห์

1. การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ทางด้านเคมี

วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน เยื่อใย เถ้า และคาร์โบไฮเดรตในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบโดยใช้วิธีการของ AOAC [16]

2. การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ทางด้านกายภาพ

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) : บดตัวอย่างมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบให้มีขนาดเล็ก ใส่ในถ้วยและนำลงในเครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี (รุ่น CH-8303, Rotronic, Switzerland) รอจนกระทั่งค่า a_w ที่เครื่องคงที่ และบันทึกค่าที่ได้ โดยวัดค่า 3 ครั้ง ในการทดลอง 1 ซ้ำ

ความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) : นำแผ่นมันสำปะหลังทอดกรอบมา 1 แผ่น ซึ่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง วัดปริมาตรมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบโดยการแทนที่น้ำ และคำนวณความหนาแน่นโดยรวม โดยวัดค่า 10 ครั้ง ในการทดลอง 1 ซ้ำ

ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) โดยใช้เครื่องวัดสี (รุ่น CR-400, Konica Minolta, Japan) : เลือกโปรแกรม Hunter Lab (L^* , a^* , b^*), illuminate = D65 และ observer = 10° ก่อนวัดค่าสีทำการปรับมาตรฐานสีโดยใช้แผ่นเทียบสีขาวมาตรฐาน จากนั้นนำตัวอย่างไปวางในตำแหน่งที่วัดค่าสีค่าที่วัดได้เป็น L^* , a^* และ b^* โดยวัดค่า 10 ครั้ง ในการทดลอง 1 ซ้ำ

ค่าความแข็ง : วัดค่าความแข็ง (breaking force) ด้วยเครื่อง texture analyzer (รุ่น CT3, Brookfield, German) โดยใช้หัวตัด knife edge (60 มิลลิเมตร) ตัดตัวอย่างให้ขาด ความเร็วของหัวตัด 0.5 มิลลิเมตร/วินาที (ความเร็วก่อนวัดและหลังวัดเท่ากับ 1 และ 5 มิลลิเมตร/วินาที) บันทึกค่า breaking force หน่วยเป็นนิวตัน โดยวัดค่า 10 ครั้ง ในการทดลอง 1 ซ้ำ

3. การวิเคราะห์คุณภาพด้านประสาทสัมผัส

ทำการประเมินการยอมรับ (affective test) ด้วยวิธี 9-point hedonic scale โดยใช้ผู้ทดสอบกลุ่มนักศึกษาในมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานีซึ่งโดยปกติบริโภคขนมขบเคี้ยวจำนวน 30 คน ทำการประเมินคุณภาพทางด้านลักษณะปรากฏโดยรวม ความกรอบ กลิ่นรส รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (RCBD)

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความแปรปรวน (One-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Version 21)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาสภาวะในการทอดมันสำปะหลังแผ่น โดยการทอดมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 นาที ส่งผลต่อคุณภาพของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบในด้านเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัส ดังนี้

1. ด้านเคมี

ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดมันสำปะหลังแผ่นต่อปริมาณความชื้นในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ แสดงดังตารางที่ 1 เมื่ออุณหภูมิในการทอดเพิ่มขึ้นที่เวลาการทอดเท่ากันส่งผลให้ปริมาณความชื้นในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทอดจาก 140 °C เป็น 180 °C ที่เวลาในการทอด 2 นาที ส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลงจากร้อยละ 1.68 เป็นร้อยละ 1.18 เช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของเวลาในการทอดที่อุณหภูมิเท่ากัน ส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการทอดที่อุณหภูมิ 140 °C เมื่อเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที เป็น 6 นาที ส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลงจากร้อยละ 1.68 เป็นร้อยละ 1.43 (ตารางที่ 1) ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนมันทอดได้กำหนดปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ต้องไม่เกินร้อยละ 6 ดังนั้นผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนมันทอด (มพช. 110/2546) [17]

ตารางที่ 1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) และปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสป้า

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ปริมาณความชื้น (%)	ค่า a_w	ปริมาณไขมัน (%)
140	2	1.68 ± 0.16^{ab}	0.38 ± 0.01^a	30.93 ± 0.58^{cd}
	4	1.78 ± 0.10^a	0.35 ± 0.03^{ab}	34.51 ± 0.40^a
	6	1.43 ± 0.15^{bcd}	0.33 ± 0.02^{ab}	34.05 ± 1.48^{ab}
160	2	1.45 ± 0.21^{bc}	0.30 ± 0.06^{ab}	30.60 ± 0.57^d
	4	1.24 ± 0.12^{cde}	0.28 ± 0.06^{ab}	32.98 ± 1.12^{abcd}
	6	1.20 ± 0.07^{cde}	0.27 ± 0.06^b	34.73 ± 1.16^a
180	2	1.18 ± 0.12^{de}	0.32 ± 0.06^{ab}	31.71 ± 0.82^{bcd}
	4	1.03 ± 0.20^e	0.30 ± 0.06^{ab}	33.34 ± 1.12^{abc}
	6	0.97 ± 0.09^e	0.29 ± 0.09^{ab}	34.81 ± 1.19^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) ของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ แสดงในตารางที่ 1 ซึ่ง a_w เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพและการเน่าเสียของอาหาร เพราะความชื้นในอาหารและค่า a_w จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีหรือปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์อย่างช้า ๆ และมีการเจริญของจุลินทรีย์เกิดขึ้นซึ่งเป็นต้นเหตุที่ทำให้อาหารเน่าเสีย [18] ค่า a_w มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณความชื้น การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอดส่งผลให้ปริมาณความชื้นและค่า a_w ลดลง เนื่องจากเมื่อวางแผ่นมันสำปะหลังลงในน้ำมันร้อน อุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผ่นมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

และน้ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำจึงเริ่มแห้ง อุณหภูมิที่ผิวมันสำปะหลังแผ่นจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันร้อน และอุณหภูมิภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ถึง 100 °C เปลือกนอกมันสำปะหลังแผ่นมีลักษณะเป็นรูพรุน น้ำและไอน้ำจะเคลื่อนที่ออกจากรูพรุนและถูกแทนที่ด้วยน้ำมันในระหว่างการทอด โดยความชื้นจะเคลื่อนที่ผ่านผิวมันสำปะหลังแผ่นและฟิล์มบาง ๆ ของน้ำมัน [19] ปริมาณความชื้นในชิ้นอาหารภายหลังการทอดจะเป็นตัวบ่งบอกถึงอายุการเก็บรักษาหรืออายุในการวางจำหน่าย โดยอาหารที่มีปริมาณน้ำเหลืออยู่ภายในชิ้นอาหารมากจะมีอายุการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำมันเกิดขึ้นภายในชิ้นอาหารระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งระยะเวลาในการเก็บจะขึ้นอยู่กับลักษณะบรรจุและสภาวะที่ใช้ในการเก็บรักษาด้วย [20]

ปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 นาที แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า เวลาในการทอดมีผลต่อปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ ซึ่งเมื่อทอดที่อุณหภูมิเดียวกันการเพิ่มเวลาในการทอดส่งผลให้ปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบเพิ่มขึ้น โดยการทอดที่อุณหภูมิ 140 °C เมื่อเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที เป็น 6 นาที ทำให้ปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30.93 เป็นร้อยละ 34.05 สำหรับการทอดที่อุณหภูมิ 160 °C เมื่อเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที เป็น 6 นาที ทำให้ปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30.60 เป็นร้อยละ 34.73 และการทอดที่อุณหภูมิ 180 °C เมื่อเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที เป็น 6 นาที ทำให้ปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 31.71 เป็นร้อยละ 34.81 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่พบในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ โดยการเพิ่มเวลาในการทอดส่งผลให้ปริมาณไขมันในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบเพิ่มขึ้น [9] - [10] ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิในการทอดไม่ทำให้ปริมาณไขมันแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แม้ว่าโดยทั่วไปการทอดที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้มีการดูดซับน้ำมันในอาหารมากกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากน้ำจะมีการระเหยมากกว่าและน้ำมันจะเข้าไปแทนที่น้ำในเวลาเดียวกัน ในบางกรณีการที่อุณหภูมิการทอดเพิ่มขึ้นก็ไม่มีส่งผลต่อการดูดซับน้ำมัน และการทอดที่ใช้เวลาน้อยจะมีการดูดซับน้ำมันน้อยกว่าการทอดที่ใช้เวลานาน [19] อย่างไรก็ตามมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบในงานวิจัยนี้มีปริมาณไขมันประมาณร้อยละ 30 - 35 ซึ่งยังคงน้อยกว่าที่พบในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบในท้องตลาดซึ่งมีปริมาณไขมันอยู่ในช่วงร้อยละ 30 - 40 [21] - [22] นอกจากนี้ยังเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบโดยพบว่าปริมาณไขมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำลดลงซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของไขมันเข้าไปแทนที่น้ำในระหว่างการทอด

องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate) ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เยื่อใย ความชื้น เถ้า และคาร์โบไฮเดรต จากการทดลองพบว่าสภาวะในการทอดที่อุณหภูมิและเวลาในการทอดต่างกันไม่มีผลทำให้ปริมาณโปรตีน เยื่อใย และเถ้าแตกต่างกัน (ไม่แสดงข้อมูล) แต่มีผลต่อปริมาณไขมันและความชื้น กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอดส่งผลให้ปริมาณไขมันในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้นลดลง โดยมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบมีความชื้นร้อยละ 0.97 - 1.78 โปรตีนร้อยละ 1.29 - 1.82 ไขมันร้อยละ 30.60 - 34.87 เยื่อใยร้อยละ 1.86 - 2.20 เถ้าร้อยละ 2.09 - 3.04 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 57.94 - 62.35 อย่างไรก็ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนมันทอดไม่ได้มีข้อกำหนดในด้านองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ โดยได้กำหนดแค่ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ต้องไม่เกินร้อยละ 6 (มพช. 110/2546) [17]

2. ด้านกายภาพ

ความหนาแน่นคืออัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรของผลิตภัณฑ์ เป็นดัชนีที่บ่งถึงการพองตัวหรือรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีความหนาแน่นต่ำจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบ ผลของอุณหภูมิในการทอดต่อความหนาแน่นของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบแสดงดังตารางที่ 2 การเพิ่มอุณหภูมิในการทอดที่เวลาในการทอดเท่ากัน ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบหลังทอดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่ออุณหภูมิในการทอดเพิ่มขึ้นจาก 140°C เป็น 180°C ที่เวลาการทอด 2 นาที ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 0.93 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 1.25 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (ตารางที่ 2) เช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของเวลาในการทอดที่อุณหภูมิเท่ากันโดยที่อุณหภูมิการทอด 140°C การเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที เป็น 6 นาที ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 0.93 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 1.04 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (ยกเว้นที่อุณหภูมิ 160°C ความหนาแน่นของมันสำปะหลังไม่ต่างกันทางสถิติ)

ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อความหนาแน่นและค่าความแข็งของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสปริก้า

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (min)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าความแข็ง (N)
140	2	0.93 ± 0.04^c	515.80 ± 8.25^a
	4	1.01 ± 0.13^{bc}	480.42 ± 41.79^a
	6	1.04 ± 0.07^{bc}	495.00 ± 36.35^a
160	2	1.07 ± 0.20^{bc}	411.00 ± 39.69^b
	4	1.10 ± 0.24^{bc}	361.57 ± 18.83^{bc}
	6	1.01 ± 0.14^{bc}	358.77 ± 28.06^{bc}
180	2	1.25 ± 0.14^{ab}	365.16 ± 23.42^{bc}
	4	1.11 ± 0.04^{bc}	357.13 ± 10.51^{bc}
	6	1.42 ± 0.07^a	339.73 ± 53.10^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ลักษณะเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบถูกวัดในรูปของค่า breaking force ซึ่งหมายถึงแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบแตก ผลของอุณหภูมิในการทอดต่อค่า breaking force ของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการทอดโดยที่เวลาในการทอดเท่ากันส่งผลให้ค่าความแข็งในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งที่เวลาในการทอด 2 นาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทอดจาก 140°C เป็น 180°C ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงจาก 515.80 นิวตัน เป็น 365.16 นิวตัน (ตารางที่ 2) เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของเวลาในการทอดที่อุณหภูมิเท่ากันส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

($p \geq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิในการทอด 140°C เมื่อเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที เป็น 6 นาที ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงจาก 515.80 นิวตัน เป็น 495.00 นิวตัน (ตารางที่ 2) การทอดที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลานานขึ้นส่งผลให้ค่า breaking force ลดลง เนื่องจากเกิดการพองตัวของมันสำปะหลังอันเป็นผลมาจากความร้อนและความดันในระหว่างการทอด โดยความร้อนส่งผลให้แป้งเกิดการสุก (Gelatinization) และไอน้ำในมันสำปะหลังทำให้เกิดการขยายตัวของช่องว่างหรือรูพรุนในแผ่นมันสำปะหลังทำให้เกิดการพองตัว ซึ่งในช่วงการพองตัวน้ำจะระเหยออกไป [23] นอกจากนี้ในระหว่างการทอดโครงสร้างของมันสำปะหลังเกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือโครงสร้างเปราะบางลงจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Garcia-Segovia, P. et al. [8] ซึ่งรายงานว่าการใช้อุณหภูมิในการทอดสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของมันสำปะหลังแผ่นลดลงเช่นกัน นอกจากนี้การวิจัยในมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบ รายงานว่าการเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที จนถึง 6 นาที ส่งผลให้ค่า breaking force เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาในการทอดมากกว่า 6 นาที จะทำให้ค่า breaking force ลดลง [9]

ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าอุณหภูมิและเวลามีผลต่อค่าความสว่าง (L^*) ความเป็นสีแดง (a^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) ของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ การเพิ่มอุณหภูมิในการทอด ณ เวลาการทอดที่เท่ากันส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่เวลาในการทอด 2 นาที เมื่ออุณหภูมิในการทอดเพิ่มขึ้นจาก 140°C เป็น 180°C ส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบลดลงจาก 62.72 เป็น 55.05 (ตารางที่ 3) นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิในการทอดยังส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่เวลาในการทอด 2 นาที เมื่ออุณหภูมิในการทอดเพิ่มขึ้นจาก 140°C เป็น 180°C ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้นจาก 0.34 เป็น 2.27 และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิในการทอดส่งผลให้ค่า L^* ของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Garcia-Segovia, P. et al. [8] สำหรับการเพิ่มขึ้นของเวลาในการทอดต่อค่าสีของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทอด กล่าวคือเมื่อเวลาในการทอดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างลดลง (L^*) แต่ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น (a^*) ดังเช่นการทอดมันสำปะหลังแผ่นที่อุณหภูมิ 140°C เมื่อเพิ่มเวลาในการทอดจาก 2 นาที ไปเป็น 6 นาที ทำให้ค่า L^* ลดลงจาก 62.72 เป็น 56.91 แต่ค่า a^* เพิ่มขึ้นจาก 0.34 เป็น 2.35 เป็นต้น ค่า L^* , a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์ควรเป็นเท่าไรขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ สำหรับกรณีของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบพบว่าค่าคะแนนความชอบของผู้บริโภคสูงขึ้นเมื่อค่า L^* เพิ่มขึ้น ค่า a^* และ b^* ลดลง (ตารางที่ 3 และ 4) เมื่ออาหารทุกชนิดได้รับความร้อนจะมีการสูญเสียน้ำ มีการสลายตัว และมีการรวมตัวกันของหมู่อะมิโนกับสารประกอบบริดวซิง พัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง เรียกว่าปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลจากโมเลกุลของน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่เอมีนที่อยู่ในโมเลกุลของแอมโมเนีย กรดอะมิโน หรือโปรตีน ได้เป็นไกลโคซิลเอมีนและจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล [18] เมื่อองค์ประกอบของมันสำปะหลังแผ่นสดมีน้ำตาลและโปรตีนซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเมลลาร์ดจึงเกิดการเปลี่ยนสีจากขาวไปเป็นเหลืองในระหว่างการทอด ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของอาหารแต่ละชนิดเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีทั้งสี กลิ่นและรสชาติเกิดขึ้นแตกต่างกัน

อีกทั้งปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง และจะผันแปรตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ การทอดที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลานานขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทอดเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราเร็วของปฏิกิริยานี้จะเพิ่มขึ้นเป็นสองถึงสามเท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]

ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอดต่อค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสป้า

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (min)	L^*	a^*	b^*
140	2	62.72 ± 1.77^a	0.34 ± 0.08^d	17.54 ± 0.77^{ab}
	4	59.40 ± 0.42^b	1.92 ± 0.19^{bc}	18.04 ± 1.11^a
	6	56.91 ± 0.30^c	2.35 ± 0.55^b	17.08 ± 0.57^{ab}
160	2	57.77 ± 0.51^c	1.63 ± 0.77^c	16.20 ± 0.84^{bc}
	4	55.16 ± 0.26^d	2.30 ± 0.26^b	18.35 ± 0.89^a
	6	54.80 ± 0.86^d	3.12 ± 0.48^a	17.57 ± 0.36^{ab}
180	2	55.05 ± 0.49^d	2.27 ± 0.55^{bc}	17.27 ± 1.61^{ab}
	4	56.41 ± 1.44^{cd}	2.17 ± 0.36^{bc}	15.19 ± 1.01^c
	6	53.03 ± 0.33^c	3.55 ± 0.20^a	13.23 ± 0.31^d

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. ด้านประสาทสัมผัส

คะแนนความชอบของผู้ทดสอบต่อมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบในด้านลักษณะปรากฏโดยรวม ความกรอบ กลิ่นรส รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า เมื่อเวลาในการทอดเท่ากันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทอดส่งผลให้คะแนนความชอบในมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบมีแนวโน้มลดลง โดยการเพิ่มของอุณหภูมิและเวลาในการทอดส่งผลให้ค่าคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏโดยรวมลดลงเนื่องจากสีของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบที่เข้มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างกันในด้านความกรอบ สำหรับในด้านกลิ่นรส รสชาติ และความชอบโดยรวมของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการทอดส่งผลให้คะแนนความชอบลดลงอาจเนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทอดส่งผลให้มันสำปะหลังแผ่นมีกลิ่นรสและรสชาติที่เข้มขึ้น ซึ่งคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏโดยรวมอยู่ในช่วง 5.78 - 7.64 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบมาก) คะแนนความชอบด้านความกรอบอยู่ในช่วง 7.06 - 7.64 (ชอบปานกลางถึงชอบมาก) คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสอยู่ในช่วง 6.12 - 7.34 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง) คะแนนความชอบด้านรสชาติอยู่ในช่วง 6.30 - 7.40 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง) และคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในช่วง 6.44 - 7.46 (ชอบปานกลาง)

ตารางที่ 4 ค่าคะแนนความชอบของผู้ทดสอบที่มีต่อมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบปรุงรสปลาปrikka

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ลักษณะปรากฏ โดยรวม	ความกรอบ ^{ns}	กลิ่นรส	รสชาติ	ความชอบ โดยรวม
140	2	7.64 ± 1.09 ^a	7.24 ± 1.31	7.34 ± 1.15 ^a	7.18 ± 1.50 ^a	7.44 ± 1.19 ^a
	4	7.46 ± 0.93 ^{ab}	7.40 ± 1.51	6.98 ± 1.54 ^{ab}	7.40 ± 0.98 ^a	7.62 ± 1.06 ^a
	6	7.20 ± 0.98 ^{abc}	7.14 ± 1.49	7.12 ± 1.23 ^a	7.32 ± 1.25 ^a	7.32 ± 1.30 ^a
160	2	6.96 ± 1.53 ^{bcd}	7.32 ± 1.28	6.92 ± 1.41 ^{ab}	6.84 ± 1.58 ^{abc}	7.18 ± 1.28 ^{ab}
	4	6.72 ± 1.41 ^{cd}	7.42 ± 1.19	6.82 ± 1.32 ^{ab}	7.02 ± 1.33 ^{ab}	7.14 ± 1.12 ^{ab}
	6	6.44 ± 1.21 ^d	7.64 ± 1.25	7.10 ± 1.12 ^a	7.40 ± 1.21 ^a	7.46 ± 1.03 ^a
180	2	6.50 ± 1.47 ^d	7.14 ± 1.44	6.42 ± 1.32 ^{bc}	6.56 ± 1.57 ^{bc}	6.72 ± 1.45 ^{bc}
	4	6.52 ± 1.51 ^d	7.36 ± 1.42	7.02 ± 1.25 ^a	6.34 ± 1.28 ^c	6.44 ± 1.14 ^c
	6	5.78 ± 1.28 ^c	7.06 ± 1.47	6.12 ± 1.58 ^c	6.30 ± 1.55 ^c	6.56 ± 1.34 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตัวอักษร ns ในคอลัมน์เดียวกันแสดงความไม่แตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

สรุป

อุณหภูมิและเวลาในการทอดมีผลต่อคุณภาพทางด้านเคมี กล่าวคือ ปริมาณความชื้น และค่า a_w ลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น ด้านกายภาพพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอดส่งผลให้ค่าสีด้านความสว่าง (L^*) ลดลง ผู้บริโภคชอบมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบซึ่งได้จากสภาวะการทอดที่อุณหภูมิ 140 °C และ 160 °C เป็นเวลา 2, 4 และ 6 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และชอบมากกว่ามันสำปะหลังแผ่นซึ่งทอดที่อุณหภูมิ 180 °C แต่การทอดที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบลดลง โดยการทอดที่อุณหภูมิ 160 °C แม้จะเพิ่มเวลาการทอดจาก 2 นาที เป็น 4 นาที ก็ไม่ทำให้ค่าความแข็งแตกต่างกัน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบคือการทอดที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 2 นาที เพราะให้มันสำปะหลังแผ่นทอดกรอบที่มีค่าความสว่าง (L^*) สูงกว่าการทอดที่ 4 นาที

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานีสำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

References

- [1] Food Intelligence Center Thailand. (2017). **Food Market Share in Thailand**. Access (26 May 2017). Available (<http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewDomesticDetail.php?id=138>) (in Thai)
- [2] Marketeer. (2015). **Snack Market**. Access (2 May 2016). Available (<http://www.marketeer.co.th>) (in Thai)
- [3] Srikanlayanukul, M., Cheunbarn, T., Cheunbarn, S., and Wongputtisin, P. (2012). **Production of Mold Culture Medium from Potato Chip Effluent**. Report. Maejo University. (in Thai)
- [4] Office of Agricultural Economics. (2016). **Cassava**. Access (2 May 2016). Available (http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=21291&filename=news) (in Thai)
- [5] Kasikorn Research Center. (2010). ‘Tiger Year’ Snacks: Intense Competition with World Cup, 9% Growth. Business Brief. **K-Econ Analysis**. Vol. 16, No. 2757, pp. 1-7 (in Thai)
- [6] National Science and Technology Development Agency. (2011). **Ministry of Science and Technology**. Strategic Planning Alliance II: SPA II. Pathumthani (in Thai)
- [7] Ahza, A. B., Fidiena, T. I., and Suryatman, S. (2015). Physical, Sensorial and Chemical Characteristics of Simulated Chips of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz): Rice (*Oryza sativa* L.) mix. **Procedia Food Science**. Vol. 3, pp. 82-95
- [8] Garcia-Segovia, P., Urbano-Ramos, A. M., Fiszman, S., and Martinez-Monzo, J. (2016). Effect of Processing Conditions on the Quality of Vacuum Fried Cassava Chips (*Manihot esculenta* Crantz). **LWT-Food Science and Technology**. Vol. 69, pp. 515-521
- [9] Su, Y., Zhang, W., Adhikari, B., and Yang, Z. (2016). Application of Novel Microwave-Assisted Vacuum Frying to Reduce the Oil Uptake and Improve the Quality of Potato Chips. **LWT-Food Science and Technology**. Vol. 73, pp. 490-497
- [10] Yu, L., Li, J., Ding, S., Hang, F., and Fan, L. (2016). Effect of Guar Gum with Glycerol Coating on the Properties and Oil Absorption of Fried Potato Chips. **Food Hydrocolloids**. Vol. 54, pp. 211-219
- [11] Hua, X., Wang, K., Yang, R., Kang, J., and Yang, H. (2016). Edible Coatings from Sunflower Head Pectin to Reduce Lipid Uptake in Fried Potato Chips. **LWT-Food Science and Technology**. Vol. 62, pp. 1220-1225
- [12] Bouaziz, F., Koubaa, M., Neifar, M., Zouari-Ellouzi, S., Besbes, S., Chaari, F., Kamoun, A., Chaabouni, M., Chaabouni, S. E., and Ghorbel, R. E. (2016). Feasibility of Using Almond Gum as Coating Agent to Improve the Quality of Fried Potato Chips: Evaluation of Sensorial Properties. **LWT-Food Science and Technology**. Vol. 65, pp. 800-807
- [13] Pedreschi, F., Mariotti, S., Granby, K., and Risum, J. (2011). Acrylamide Reduction in Potato Chips by Using Commercial Asparaginase in Combination with Conventional Blanching. **LWT-Food Science and Technology**. Vol. 44, pp. 1473-1476

- [14] Akdeniz, N., Sahin, S., and Sumnu, G. (2006). Functionality of Batters Containing Different Gums for Deep-Fat Frying of Carrot Slices. **Journal of Food Engineering**. Vol. 75, Issue 4, pp. 522-526. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.035
- [15] Albert, S. and Mittal, G.S. (2002). Comparative Evaluation of Edible Coatings to Reduce Fat Uptake in a Deep-Fried Cereal Product. **Food Research International**. Vol. 35, No. 5, pp. 445-458. DOI: 10.1016/S0963-9969(01)00139-9
- [16] Association of Official Analytical Chemist (AOAC). (2000). **Official Methods of Analysis**. 17th eds. Maryland : AOAC International Publishers
- [17] Thai Industrial Standards Institute. (2005). **Thai Community Product Standards (TCPS110/2546)**
- [18] Nithiya, R. (2010). **Food Chemistry**. Bangkok : O-dean Store (in Thai)
- [19] Vilai, R. (2003). **Processing Technology**. 3rd eds. Bangkok: O-dean Store (in Thai)
- [20] Rungnaphar, P. (2001). **Analysis of Frying Process on Snack Food Products**. Report. Kasetsart University (in Thai)
- [21] Kita, A., Lisinska, G., and Gołubowska, G. (2007). The Effects of Oils and Frying Temperatures on the Texture and Fat Content of Potato Crisps. **Food Chemistry**. Vol. 102, No. 1, pp. 1-5. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.08.038
- [22] Mazurek, S., Szostak, R., and Kita, A. (2016). Application of Infrared Reflection and Raman Spectroscopy for Quantitative Determination of Fat in Potato Chips. **Journal of Molecular Structure**. Vol. 1126, pp. 213-218



การศึกษาศักยภาพการปลูก ผลผลิต และการใช้ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อเป็นวัตถุดิบพลังงานทดแทนในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร จังหวัดนครราชสีมา

A Study of the Potential of Planting, Yield and Utilization of Napier Pakchong 1 Grass as Feedstock for Renewable Energy in Lam Chiang Krai Watershed, Nakhon Ratchasima Province

กฤษกร เข้มพิลลา^{1*} ฌภัทร น้อยน้ำใส¹ และนิรันดร์ คงฤทธิ์¹

Received: February, 2017; Accepted: June 2017

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินศักยภาพค่าที่ดินและหาพื้นที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยใช้หลักการขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติเพื่อการศึกษาศักยภาพการปลูก ผลผลิตและการใช้ประโยชน์สำหรับเป็นวัตถุดิบพลังงานทดแทนในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร จังหวัดนครราชสีมา การทดลองแบบ 2 x 5 แฟกทอเรียล วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ 4 ซ้ำ ด้วยแปลงทดลอง ที่มีค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ที่ต่างกัน (6.58 และ 7.80 dS/m) และอายุหญ้า 5 ช่วง (30, 45, 60, 75 และ 90 วัน) ผลวิเคราะห์พบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เหมาะสมปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 84.78 มีค่า EC 4 - 8 dS/m และมีดัชนีธาตุอาหารต่ำต้องปรับปรุงดินโดยใส่ปุ๋ยก่อนปลูกจากผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปัจจัยที่ใช้วัดทุกตัวในแต่ละช่วงอายุ พบว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 dS/m มีศักยภาพสูงกว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 7.80 dS/m ทุกช่วงอายุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ยกเว้นจำนวนหน่อต่อกอ เยื่อใย

¹ Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

* Corresponding Author E - mail Address: gis_taw51@hotmail.com

NDF และ ADF ที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.01$) และในภาพรวมปริมาณและคุณภาพที่ช่วงอายุหญ้า 90 วันของการทดลองพบว่า มีการให้ผลผลิตต่อไร่สูงสุดโดยเก็บเกี่ยวผลผลิต 4 รอบต่อปี การใช้ประโยชน์พบว่าพื้นที่ศักยภาพการให้ผลผลิตหญ้าสดเพื่อผลิตไฟฟ้า คือ พื้นที่เหมาะสมสูงปานกลาง และน้อย คิดเป็นร้อยละ 0.47, 84.78 และ 6.13 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ตามลำดับ ในภาพรวมของพื้นที่ลุ่มน้ำสามารถให้ผลผลิตหญ้าสดเฉลี่ย 61.11 ตันต่อไร่ต่อปี คิดเป็นผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 60 ให้ผลผลิตหญ้าสดเพื่อผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 37.45 ล้านตันต่อปี ผลิตไฟฟ้าได้ 1,044.99 เมกะวัตต์ โดยพื้นที่เหมาะสมปานกลางมีศักยภาพการให้ผลผลิตหญ้าสดเพื่อผลิตไฟฟ้าสูงสุด

คำสำคัญ : หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1; วัตถุประสงค์พลังงานทดแทน; ลุ่มน้ำลำเชียงไกร; ดินเค็ม

Abstract

This research aims to evaluate land, determine suitable areas for the Napier Pakchong 1 grass, using the principles of the Food and Agriculture Organization of the United Nations, and study the potential of planting, yield and utilization as feedstock for renewable energy in Lam Chiang Krai watershed, Nakhon Ratchasima province. An experimental design of 2 x 5 factorial in RCBD, with 4 replication was created including the different electrical conductivity of the two experimental plots (6.58, 7.80 dS/m) and the five periods of plant age (30, 45, 60, 75, 90 days). The results revealed that the majority of watershed's area was moderately suitable area (84.78 %), with EC 4 - 8 dS/m, and Low nutrient availability index, therefore, fertilizing before planting was necessary for good results. It was found that the experimental plot at EC 6.58 dS/m was higher than that of the experimental plot at the EC 7.80 dS/m in all ages, significantly ($P < 0.01$), except for the number of shoots per clump; NDF fiber and ADF fiber, had no statistical significant differences ($P > 0.01$). Overview, the quantity and quality of grass on the experiment at 90 days revealed that the highest yields, harvesting 4 times per year. The Utilization showed that the potential areas yielding fresh grass for the power generation of the suitability areas including highly, moderate and marginal areas were 0.47, 84.78 and 6.13 % of the watershed, respectively. Thus, overview of the watershed area had an average of fresh grass yield at 61.11 tons per rai per year with the spatial yield of 60 %. The potential of the fresh grass yield for power generation mean was at 37.45 million tons per year, power generation at 1,044.99 megawatts. The moderate suitable area had the highest fresh grass yield potential for maximum power generation.

Keywords: Napier Pakchong1; Feedstock of Renewable Energy; Lam Chiang Krai Watershed; Saline Soil

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศโดยหาก๊าซธรรมชาติได้เองร้อยละ 80 นำเข้าอีกร้อยละ 20 [1] ถึงจะเพียงพอต่อความต้องการภายในประเทศและจากการพยากรณ์สภาพฉายอนาคตของความต้องการพลังงานในปี 2573 จะเพิ่มขึ้นถึง 1.7 เทา [2] ปัจจุบันปัญหาด้านพลังงานเกิดขึ้นมากมาย และประชาชนไม่ยอมรับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงาน เพราะกลัวมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการนำเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลมาใช้เป็นวัตถุดิบ (Feedstock) ในการผลิตพลังงาน ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมทั่วโลก การแก้ไขวิกฤตด้านพลังงานและลดสาเหตุที่ทำให้ภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง จึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการนำพลังงานทดแทน (Renewable Energy) มาเป็นพลังงานทางเลือก โดยภาครัฐมีนโยบายส่งเสริมเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทนสนับสนุน การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจภาคเกษตร ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนสีเขียวและส่งเสริมขยายพื้นที่ปลูกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืชพลังงาน ในท้องถิ่นควบคู่กับการผลิตพืชอาหารหรือพืชเศรษฐกิจท้องถิ่น

พื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกรในจังหวัดนครราชสีมาจึงเป็นพื้นที่ที่น่าสนใจในการขยายพื้นที่ปลูกพืชพลังงานมากที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ขนาดใหญ่ 3,322 ตารางกิโลเมตร และเป็นพื้นที่เกิดผลกระทบจากการแพร่กระจายดินเค็มมากกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ [3] ส่งผลต่อการใช้ประโยชน์ที่ดินภาคการเกษตรโดยตรง ซึ่งจำเป็นต้องหาแนวทางแก้ไขเพื่อให้เกษตรกรสามารถนำที่ดินมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด คุ่มค่า และส่งผลที่ดีต่อชุมชน การปลูกพืชพลังงานทดแทนเค็มจึงเป็นพืชทางเลือกที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (Pennisetumpurpureum) เป็นพืชที่ให้พลังงานประเภทลิกโนเซลลูโลสมีคุณสมบัติในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) ที่ให้ก๊าซมีเทนสูง [4] ปรับตัวได้ดีกับดินทุกสภาพโตเร็ว ดูแลง่าย ทนแล้ง ใช้น้ำน้อย และมีศัตรูพืชน้อย ซึ่งสามารถปลูกร่วมกับพืชเศรษฐกิจอื่นได้ ประกอบกับการปลูกครั้งเดียวสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นานถึง 6 - 7 ปี [5] และระบบรากฝอยของหญ้ายังสามารถฟื้นฟูดินในการลดความเค็มของดิน และดินเสื่อมโทรมให้กลับมามีสภาพอุดมสมบูรณ์ขึ้นหลังการปลูก [6]

ในการศึกษาเพื่อหาศักยภาพการปลูกและผลผลิตต่อไร่ที่เหมาะสมกับพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร จึงจำเป็นต้องนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเหมาะสมมาใช้ในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยใช้หลักการประเมินศักยภาพค่าที่ดินขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization System : FAO) [7] ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) ซึ่งหลักการนี้มี کاربرยุกต์ใช้ในการประเมินศักยภาพค่าที่ดิน และการวางแผนการใช้ที่ดินในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำลำพระเพลิง ด้วยอาศัยการสำรวจข้อมูลทางกายภาพด้านต่าง ๆ ให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษามากที่สุดและเป็นปัจจุบันที่สุดมาวิเคราะห์ร่วมกันกับความต้องการของสายพันธุ์พืชแต่ละชนิด เพื่อประเมินความเหมาะสมของคุณภาพค่าที่ดินกับสภาพพื้นที่ของการทำกิจกรรมต่าง ๆ ในพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาจากผลกระทบในการใช้ที่ดินที่ไม่ถูกต้องให้น้อยลงได้ และสามารถใช้อย่างยั่งยืนจากทรัพยากรธรรมชาติให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [8] การวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการส่งเสริมการใช้ที่ดินทำกินเพื่อเกษตรกรรมในพื้นที่ดินเค็มให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่าที่สุดในการเสริมรายได้และอาชีพใหม่ให้แก่เกษตรกร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการประเมินศักยภาพค่าที่ดินและพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ด้วยเทคโนโลยีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร จังหวัดนครราชสีมา
2. เพื่อศึกษาศักยภาพการปลูก ผลผลิต และการใช้ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อเป็นวัตถุดิบของพลังงานทดแทนในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การประเมินศักยภาพค่าที่ดินและหาพื้นที่ที่เหมาะสมเชิงพื้นที่
การศึกษาวิจัยจะทำการประเมินศักยภาพค่าที่ดินและหาพื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ด้วยหลักการประเมินศักยภาพค่าที่ดินของ FAO โดยนำปัจจัยคุณภาพที่ดินตามความต้องการของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ซ้อนทับกัน (Overlay) แบบถ่วงน้ำหนัก ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) รวบรวมข้อมูลจากแผนที่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ได้แก่ แผนที่ขอบเขตการปกครอง แผนที่ภูมิประเทศความลาดชันแผนที่แหล่งน้ำผิวดิน แผนที่เส้นทางน้ำ แผนที่พื้นที่เสี่ยงน้ำท่วม แผนที่เส้นทางคมนาคม แผนที่พื้นที่ป่าไม้ และแผนที่แหล่งชุมชน ปี 2547 มาตราส่วน 1 : 50,000 ขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนครราชสีมา แผนที่ชุดดินปี 2553 ประกอบด้วย ข้อมูลคุณสมบัติของดินในแต่ละชุดดิน ได้แก่ ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ความเป็นกรดเป็นด่าง เนื้อดิน ความลึกดิน การระบายน้ำในดิน ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน และความอิ่มตัวด้วยค่างในดิน และแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี 2554 มาตราส่วน 1 : 25,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน และข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี ในช่วง 30 ปี พ.ศ. 2524 - 2553 จำนวน 5 สถานี และข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายปี ในช่วง 21 ปี พ.ศ. 2524 - 2545 จำนวน 2 สถานี ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร จังหวัดนครราชสีมา กรมอุตุนิยมวิทยา และทำการวิเคราะห์เป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ได้แผนที่ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี และแผนที่อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี ซึ่งในการประเมินศักยภาพค่าที่ดินจะใช้คุณภาพที่ดิน 10 ปัจจัย ประกอบด้วย ปัจจัยวินิจฉัย 15 ปัจจัย ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยการประเมินจะกำหนดเงื่อนไขระดับความเหมาะสมของพื้นที่ ตามเกณฑ์ค่าคะแนนปัจจัยความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์ค่าคะแนนปัจจัยความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

ความต้องการของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (Crop Requirement)			คะแนนค่าปัจจัย (Factor Rating) ความเหมาะสม				ที่ มา
คุณภาพที่ดิน (ตัวย่อ)	ปัจจัยวินิจฉัย	หน่วย	สูง	ปานกลาง	น้อย	ไม่มี ศักยภาพ	
			(S1 : 1.0)	(S2 : 0.8)	(S3 : 0.5)	(N : 0.2)	
T	อุณหภูมิในช่วงการเจริญเติบโต ของพืช	องศาเซลเซียส	24 - 32	32 - 34 19 - 24	34 - 35 15 - 19	> 35 < 15	[5]

ตารางที่ 1 เกณฑ์ค่าคะแนนปัจจัยความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (ต่อ)

ความต้องการของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (Crop Requirement)			คะแนนค่าปัจจัย (Factor Rating) ความเหมาะสม				ที่มา
คุณภาพที่ดิน (ตัวย่อ)	ปัจจัยวินิจฉัย	หน่วย	สูง	ปานกลาง	น้อย	ไม่มี ศักยภาพ	
			(S1 : 1.0)	(S2 : 0.8)	(S3 : 0.5)	(N : 0.2)	
W	ปริมาณน้ำฝนในช่วง การเจริญเติบโตของพืช	มิลลิเมตรต่อปี	≥ 1,000 < 1,500	800 - 900 1,500 - 2,500	500 - 700 2,500 - 4,000	< 500 > 4,000	[5], [7]
O	การระบายน้ำของดิน	Class	ดี, ดีมาก	ดีปานกลาง	ค่อนข้างดี	เลว, เลวมาก	[9]
NAI	ดัชนีธาตุอาหารพืช (NAI = $N * P * K * pH$)	-	≥ 0.64	0.1024 - 0.6400	0.0010 - 0.1024	< 0.0001	[10]
	- ไนโตรเจน (N)	%	> 0.2	0.1 - 0.2	< 0.1		
	- ฟอสฟอรัส (P)	ppm	> 25	6 - 25	< 6	-	
	- โพแทสเซียม (K)	ppm	> 60	30 - 60	< 30	-	
	- ความเป็นกรด (pH)	-	5.6 - 7.3	7.4 - 7.8, 4.5 - 5.6	7.9 - 8.4, 4.0 - 4.5	> 8.4, < 4.0	
C	ความจุในการดูดซับธาตุอาหาร ($C = C.E.C * B.S.$)	-	0.820 - 1.000	0.445 - 0.820	0.145 - 0.445	0.040 - 0.145	
	- ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (C.E.C): ดินล่าง	mEq/ 100g	> 10	< 10	-	-	[7]
	- ความอิ่มตัวด้วยตัวต่าง ในดิน (B.S.): ดินล่าง	%	≥ 35	< 35	-	-	
X	เนื้อดิน	-	SiC, L,SiCL, C, SCL, SiL, Si, CL	SL	LS	Cm,SC, SiCm	[7]
R	ความลึกของดิน (ความลึกที่รากหยั่งถึง)	ซม.	>100	50-100	30-50	<30	[5]
F	ความเสียหายจากน้ำท่วม - ความรุนแรงจากน้ำท่วม - จำนวนครั้งในช่วงรอบปี	Class ปี/ครั้ง	ต่ำ 10/1	กลาง 6 - 9/1	สูง 3 - 5/1	- 1 - 2/1	[7]
D	การมีเกลือมากเกินไป - ระดับความเค็ม ของดิน	Class	ไม่เค็ม, เค็มน้อย	ปานกลาง, แพร่กระจายดินเค็ม	เค็มมาก	เค็มจัด - เค็มจัดมาก	[11]
	- การนำไฟฟ้าของดิน	dS/m	2 - 4	4 - 8	8 - 16	> 16	

* L	=	Loam,	LS	=	Loamy Sand,
S	=	Sand,	SCL	=	Sandy Clay Loam,
SL	=	Sandy Loam,	Si	=	Silt,
SiC	=	Silty Clay,	SiCL	=	Silty Clay Loam,
SiL	=	Silty Loam,	SiCm	=	Massive Silty Clay,
Cm	=	Massive Clay			

การประเมินศักยภาพค่าที่ดิน ทำการวิเคราะห์โดยนำชั้นข้อมูลคุณภาพที่ดิน 10 ปัจจัย มากำหนดเงื่อนไขระดับความเหมาะสมและให้ค่าคะแนนของแต่ละปัจจัยตามเกณฑ์ที่กำหนด ด้วยการซ้อนทับแบบถ่วงค่าน้ำหนัก โดยเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\text{การประเมินศักยภาพค่าที่ดิน} = T * W * O * NAI * C * X * R * F * D * G \quad (1)$$

ในการประเมินศักยภาพค่าที่ดินจะกำหนดเกณฑ์ช่วงค่าคะแนนระดับความเหมาะสมใหม่โดยนำปัจจัยคุณภาพที่ดิน 10 ปัจจัย ที่ใช้ในการวิเคราะห์มารวบรวมคำนวณด้วย ทั้งนี้เพราะยังจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณามากเท่าใด จะส่งผลต่อผลคูณของค่าคะแนนรวมน้อยลงเท่านั้น [8] ซึ่งจะทำให้การประเมินค่าระดับความเหมาะสมไม่ถูกต้อง ซึ่งการจัดช่วงค่าคะแนนระดับความเหมาะสมใหม่ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์ช่วงค่าคะแนนและระดับความเหมาะสมของการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

ระดับความเหมาะสม	คะแนน ค่าปัจจัย	ช่วงค่าคะแนน วินิจัย 10 ปัจจัย	ช่วงค่าคะแนน ที่จัดใหม่
ศักยภาพสูง (S1)	1.0	$(1^{10} + 0.8^{10})/2 - (1^{10})$	0.5537 - 1.0000
ศักยภาพปานกลาง (S2)	0.8	$(0.8^{10} + 0.5^{10})/2 - (1^{10} + 0.8^{10})/2$	0.0542 - 0.5536
ศักยภาพน้อย (S3)	0.5	$(0.5^{10} + 0.2^{10})/2 - (0.8^{10} + 0.5^{10})/2$	0.0005 - 0.0541
ไม่มีศักยภาพ (N)	0.2	$0.2^{10} - 0.0004$	0.0000 - 0.0004

การพิจารณาผลการวิจัยระดับความเหมาะสมที่ได้จากการคำนวณปัจจัยคุณภาพที่ดิน มีความสอดคล้องกับผลผลิตของพืชในระดับความเหมาะสมใดจะถือตามหลักเกณฑ์การให้ผลผลิตของ FAO ที่กำหนดไว้ ได้แก่ ระดับเหมาะสมสูง (S1) จะให้ผลผลิตเชิงพื้นที่มากกว่าร้อยละ 80 ระดับเหมาะสมปานกลาง (S2) ให้ผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 40 - 80 และระดับเหมาะสมน้อย (S3) ให้ผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 20 - 40 [8] โดยพื้นที่ที่ไม่เหมาะสม (N) จะไม่นำมาประเมินผลผลิตด้วย ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ของคุณภาพที่ดินจะได้ชั้นข้อมูลการประเมินศักยภาพค่าที่ดิน จากนั้นนำชั้นข้อมูลพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมในการทำเกษตรกรรมมาวิเคราะห์ร่วมด้วยการซ้อนทับข้อมูลแบบการรวมข้อมูลเข้าด้วยกัน (Union) ซึ่งผลวิเคราะห์จะได้แผนที่พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

ทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความสอดคล้องของข้อมูลด้วยค่าสัมประสิทธิ์แคปปา ระหว่างข้อมูลเชิงพื้นที่กับพื้นที่จริงจำนวน 30 จุดสำรวจ ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่ายในแผนที่พื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยการเปรียบเทียบข้อมูลดินและการใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละจุดสำรวจ

คัดเลือกตัวแทนพื้นที่ที่มีพื้นที่มากที่สุดในลุ่มน้ำจากแผนที่พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อหาศักยภาพการปลูก ผลผลิต และการใช้ประโยชน์ โดยสุ่มจากแผนที่เพื่อคัดเลือกแปลงทดลองขนาด 1,400 ตารางเมตร ที่มีค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ต่างกัน 2 แปลง ๆ ละอำเภอ และลงพื้นที่ภาคสนามเก็บตัวอย่างดินก่อนปลูก ด้วยวิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างดิน

จำนวน 15 จุด แบบสลับฟันปลาทั่วแปลงทดลอง โดยดินที่เก็บตัวอย่างแต่ละจุดมีความลึก 15 เซนติเมตร รวบรวมดินและคลุกเคล้าให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ จัดเก็บดินใส่ถุงพลาสติกหนึ่งกิโลกรัม และนำส่งห้องปฏิบัติการทดลองเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดิน โดยพารามิเตอร์ที่ใช้วัดและวิธีการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ด้วยวิธีการ Electrical conductivity meter ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH) ด้วยวิธีการ Standard glass electrode ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (%N) ด้วยวิธีการหาปริมาณเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุ $\times 0.05$ ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P) ด้วยวิธีการ Bray II ค่าโพแทสเซียมทั้งหมด (Total K) ด้วยวิธีการ NH_4OAc and Atomic absorption spectrophotometer ค่าอินทรีย์วัตถุ (OM) ด้วยวิธีการ Wet Oxidation

การเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินด้วยวิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำโดยเก็บห่างจากฝั่งประมาณ 30 เซนติเมตร และระดับได้ผิวน้ำ 15 เซนติเมตร จำนวน 5 จุด ซึ่งแต่ละจุดจะเก็บตัวอย่างน้ำใส่ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพน้ำภาคสนาม (Multi parameter) ทำการบันทึกค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (EC) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TDS) และค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ (pH) ในแต่ละจุดและหาค่าเฉลี่ยแต่ละพารามิเตอร์ โดยผลการวิเคราะห์นั้นจะไม่นำมาคำนวณค่าความแปรปรวนทางสถิติ

2. การศึกษาศักยภาพการปลูก ผลผลิต และประโยชน์ของพืชพลังงาน

การศึกษาศักยภาพการปลูกและผลผลิต จะทำการวางแผนการทดลองทางการเกษตรแบบ 2×5 แฟกทอเรียล (Factorial Experiment) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Random Complete Block Design : RCBD) 4 ซ้ำ ศึกษาอิทธิพล 2 ปัจจัยประกอบด้วย ปัจจัยที่ 1 คือ แปลงทดลองที่มีค่า EC ต่างกัน 2 แปลง ๆ ละ 20×70 เมตร ได้แก่ แปลงทดลองที่มีค่า EC 6.58 และ 7.80 dS/m ซึ่งในการสุ่มคัดเลือกแปลงทดลองจากพื้นที่เหมาะสมปานกลางที่เป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ในลุ่มน้ำลำเชียงไกรในช่วงค่า EC 4 - 8 dS/m ในการทดลองปลูกจะพิจารณาจากระดับความเค็มของดินที่มีผลกระทบต่อพืชเศรษฐกิจท้องถิ่น โดยสุ่มเลือกพื้นที่ที่มีช่วงค่า EC 6 - 8 dS/m เพราะการนำไฟฟ้า (EC) มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเกลือที่ละลายในดิน ซึ่งจะส่งผลต่อศักยภาพการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตต่อไร่ของพืชตามไปด้วย [12] และปัจจัยที่ 2 คือ ช่วงอายุหญ้าต่างกัน 5 ช่วง ๆ ละ 15 วัน ได้แก่ 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ปัจจัยที่ใช้วัด ได้แก่ จำนวนหน่อต่อกอ ความสูง น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง สัดส่วนใบต่อลำต้น เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกลาง (Neutral Detergent Fiber : NDF) เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (Acid Detergent Fiber : ADF) และค่าพลังงานความร้อน (Calories) โดยหลังการปลูกจะทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มด้วยวิธีของดันแคน (Duncan's New Multiple Range Test : DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการคำนวณ และศึกษาการใช้ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อใช้เป็นพืชพลังงานทดแทนจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ ได้แก่ เอกสารงานวิจัย วารสาร และอินเทอร์เน็ตออนไลน์ที่เชื่อถือได้ โดยทำการทดลองในช่วงฤดูแล้งระหว่างเดือนธันวาคม 2556 ถึงเดือนมีนาคม 2557 ระยะเวลา 90 วัน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทดลองปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยการเตรียมดินก่อนปลูกทำการไถพรวนปรับสภาพดินด้วยการใส่ปุ๋ยคอก 1,750 กิโลกรัมต่อแปลง และปุ๋ยรองพื้นสูตรเสมอ (15-15-15) 44 กิโลกรัมต่อแปลง ทำการปลูกแบบยกร่อง (Raised Beds) ด้วยรถไถพาน 4 ยกร่องปลูกระยะ 120 เซนติเมตร ร่องลึก 5 เซนติเมตร ได้ 13 ร่องต่อแปลง นำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ทำการคัดเลือกท่อนพันธุ์ที่แข็งแรงและมีตาที่สมบูรณ์ มาวางในร่องแบบต่อเนื่องโดยให้ส่วนโคนและยอดสลับเกยกัน ประมาณ 30 เซนติเมตร ได้ร่องละ 23 ท่อน ๆ ละ 3 เมตร ซึ่งจะใช้ท่อนพันธุ์ทั้งหมด 299 ท่อนต่อแปลง ใช้มัดคัตท่อนพันธุ์เป็น 3 ส่วน และกลบดินประมาณ 5 เซนติเมตร โดยใช้แรงงานคนทำการให้น้ำแบบปล่อยน้ำไหลไปตามร่องหน้าดินจากสระน้ำจนดินอุ่มตัวด้วยน้ำ หรือประมาณ 2 ชั่วโมง การให้น้ำจะให้ทุก ๆ 3 - 4 วัน หรือสัปดาห์ละ 2 ครั้ง จนหญ้ามีอายุ 30 วัน หลังจากนั้นลดการให้น้ำเป็นสัปดาห์ละครั้ง ตลอดการทดลองปลูกและหยุดให้น้ำ 1 สัปดาห์ ก่อนการเก็บตัวอย่างครั้งสุดท้ายเมื่อหญ้าอายุ 90 วัน โดยวัดปริมาณน้ำด้วยมิเตอร์วัดน้ำ กำจัดวัชพืชเมื่ออายุหญ้า 14, 30, 45, 60 และ 75 วัน ด้วยการใช้มือถอนและจอบตากกลาง ใส่ปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 ประมาณ 18 กิโลกรัมต่อแปลง ได้กอกหญ้ากอละ 1 ช่อนโต๊ะเมื่อหญ้ามีอายุ 30 และ 45 วัน ซึ่งวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลในแปลงทดลองจะทำการแปลงย่อย 4 แปลง โดยการวางตำแหน่งจะใช้วิธีแบบสลับฟันปลากระจายทั่วแปลงทดลอง ด้วยเสาไม้ 4 เสาซึ่งเชือกฟางขนาด 1 x 1 เมตร เพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูลและเก็บตัวอย่างหญ้าในแต่ละช่วงอายุ 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ของทั้งสองแปลงทดลอง

ขั้นตอนที่ 2 เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตและตัวอย่างหญ้าทุกช่วงอายุ ปัจจัยที่ใช้วัด ได้แก่ จำนวนหน่อตอกกอก ความสูง และน้ำหนักหญ้าสด โดยการสุ่มวัดในแปลงย่อย ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างหญ้าสด จำนวน 12 ต้น โดยการตัดแปลงย่อยละ 3 ต้น ทำการแยกใบและลำต้น ชั่งน้ำหนัก และหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต่อต้น ชั่งน้ำหนักใบและลำต้นอย่างละ 500 กรัม ด้วยการสับเป็นท่อน ๆ ละ 2 นิ้ว ส่งห้องปฏิบัติการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างหญ้า ปัจจัยที่ใช้วัด ได้แก่ ผลผลิตน้ำหนักแห้ง ด้วยวิธีหาปริมาณความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven Method) และหาน้ำหนักแห้งของใบและลำต้น ด้วยวิธีการนำน้ำหนักแห้งที่ช่วงอายุปัจจุบันลบด้วยน้ำหนักแห้งครั้งที่แล้วและหารด้วยน้ำหนักแห้งครั้งที่แล้วคูณด้วยหนึ่งร้อย ซึ่งจะได้น้ำหนักเปอร์เซ็นต์ใบและลำต้นและนำผลทั้งสองปัจจัยมาคำนวณด้วยวิธีการหาร เพื่อหาสัดส่วนใบต่อลำต้นในแต่ละช่วงอายุ และเยื่อใยประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายในน้ำ ได้แก่ เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกลาง (NDF) เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (ADF) ด้วยวิธีการใช้สารฟอก (Detergent) โดยวิธีของ Goering, H. K. and Van Soest, P. J. [13] ส่วนการหาค่าพลังงานความร้อนจะทำการวิเคราะห์เมื่อหญ้าอายุ 90 วัน ด้วยวิธีหาค่าพลังงานความร้อนที่สะสมในพืช (Bomb Calorimetry) หลังการเก็บเกี่ยว 90 วัน และเก็บตัวอย่างดินหลังปลูกส่งห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีข้อมูลที่เกิดขึ้นรวบรวมได้จากภาคสนามและผลวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการจะนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างแปลงทดลองที่มีค่า EC ต่างกัน เพื่อพิจารณาความแตกต่างในการเจริญเติบโต ผลผลิตต่อไร่ และดินก่อนและหลังปลูกของทั้งสองแปลง ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นพืชพลังงานและการประเมินศักยภาพในการใช้ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบพลังงานทดแทน โดยทำการประมาณค่าการใช้พื้นที่ปลูกตามความต้องการปริมาณหญ้าสดให้เพียงพอ

ต่อการผลิตไฟฟ้าขนาด 1 เมกะวัตต์ ซึ่งเป็นโรงงานไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กเหมาะสมในการลงทุนและผลิตไฟฟ้าใช้ในชุมชนและภาคอุตสาหกรรมท้องถิ่น จากการศึกษาข้อมูลทุติยภูมิงานวิจัยในการผลิตไฟฟ้าจากหญ้าเนเปียร์พบว่าต้องใช้ปริมาณหญ้าสด 35,837 ตันต่อเมกะวัตต์ [14] ในการวิเคราะห์ศักยภาพพื้นที่ปลูกต่อเมกะวัตต์ จะกำหนดให้พื้นที่ที่เหมาะสมสูง (S1) ให้ผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 81 พื้นที่เหมาะสมปานกลาง (S2) ให้ผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 40 - 80 และพื้นที่เหมาะสมน้อย (S3) ให้ผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 20 - 40 ซึ่งผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 100 จะคำนวณจากผลผลิตต่อไร่ต่อปีที่ทดลองปลูกในพื้นที่เหมาะสมปานกลาง โดยกำหนดให้ผลผลิตเชิงพื้นที่เท่ากับค่าช่วงสูงสุด คือ ร้อยละ 80 ดังสมการที่ (2) - (3)

$$\text{ผลผลิตที่ได้รับเชิงพื้นที่ร้อยละ 100} = \text{ผลผลิตต่อไร่ต่อปีของพื้นที่เหมาะสมปานกลาง} \div 0.8 \quad (2)$$

$$\text{ความต้องการพื้นที่ปลูกต่อเมกะวัตต์} = \frac{\text{ความต้องการปริมาณหญ้าสดต่อเมกะวัตต์ (35,837 ตัน)}}{\text{ผลผลิตเชิงพื้นที่ที่ได้รับ}} \quad (3)$$

ผลการวิจัย

1. ผลการประเมินศักยภาพค่าที่ดินและพื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เหมาะสมปานกลาง (S2) คิดเป็นร้อยละ 84.78 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และพบว่าคุณภาพที่ดินสอดคล้องกับการให้ผลผลิตเชิงพื้นที่ร้อยละ 40 - 80 ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 1

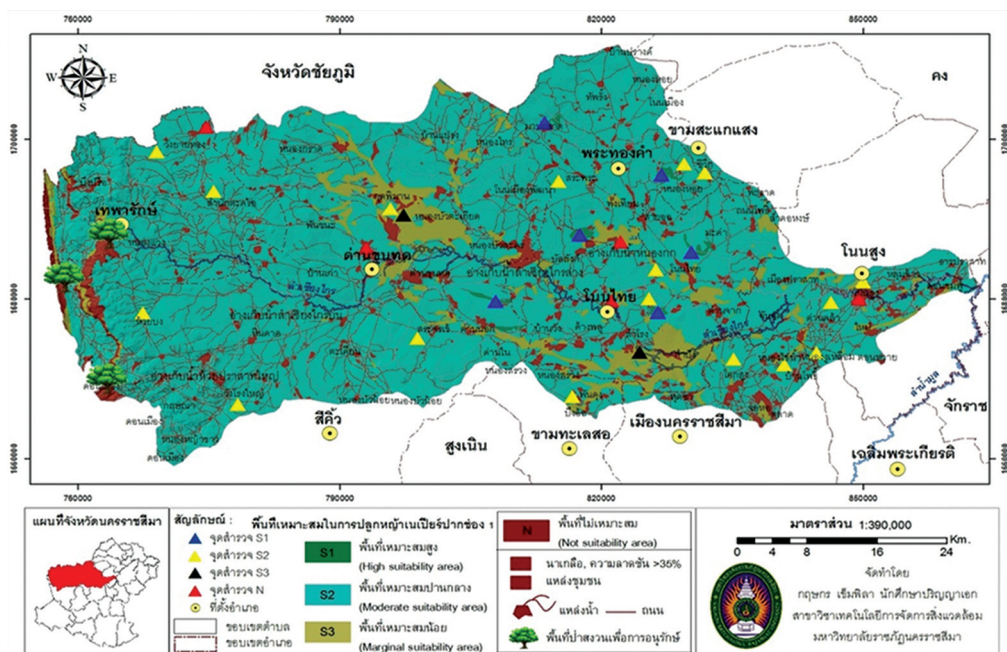
ตารางที่ 3 พื้นที่ระดับความเหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร

ระดับความเหมาะสม	ค่า คะแนน	ค่าช่วงคะแนน ปัจจัยรวม	ขนาดพื้นที่ปลูก		ผลผลิต เชิงพื้นที่ (ร้อยละ)
			ตร.กม.	ร้อยละ	
1. พื้นที่เหมาะสมในการปลูก					
1.1 เหมาะสมสูง (S1)	1.0	0.5537 - 1.0000	15.72	0.47	มากกว่า 80
1.2 เหมาะสมปานกลาง (S2)	0.8	0.0542 - 0.5536	2,816.43	84.78	40 - 80
1.3 เหมาะสมน้อย (S3)	0.5	0.0005 - 0.0541	203.59	6.13	20 - 40
รวมพื้นที่เหมาะสมทั้งหมด			3,035.74	91.38	-
2. พื้นที่ไม่เหมาะสม (N)	0.2	0.0000 - 0.0004	286.32	8.62	-
รวมพื้นที่ทั้งหมด			3,322.06	100.00	-

ตรวจสอบผลการวิเคราะห์แผนที่พื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 พบว่าคุณภาพที่ดิน 10 ปัจจัยมีความสอดคล้องกับค่าคะแนนปัจจัยรวมของแต่ละระดับความเหมาะสมของพื้นที่ปรากฏผลตัวอย่างดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพที่ดิน 10 ปัจจัย ของแผนที่พื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

จุดตรวจสอบ ในแผนที่ (อำเภอ)	ระดับ ความ เหมาะสม	ค่า คะแนน	คุณภาพที่ดิน 10 ปัจจัย										รวม คะแนน
			T	W	O	NAI	C	R	X	F	D	G	
ด่านขุนทด	S1	1.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.00
โนนไทย	S2	0.8	1	1	1	0.8	0.8	1	0.8	1	0.8	1	0.41
เทพารักษ์	S3	0.5	1	0.5	1	0.5	0.8	0.5	0.8	1	0.2	1	0.02
พระทองคำ	N	0.2	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1	0.8	1	0.00



รูปที่ 1 แผนที่พื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และจุดเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบกับพื้นที่จริง

ผลการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แคปปาเท่ากับ 0.84 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเชิงพื้นที่กับพื้นที่จริงในระดับพื้นที่ที่เหมาะสมมาก (S1) ปานกลาง (S2) และไม่เหมาะสม (N) ดังตารางที่ 5

2. ผลการศึกษาศักยภาพการปลูก ผลผลิต และการใช้ประโยชน์ในพื้นที่เหมาะสมปานกลาง

2.1 ผลการวิเคราะห์ดินก่อนและหลังปลูกผลการเปรียบเทียบดินก่อนและหลังปลูกของแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 และ 7.80 dS/m โดยปรับปรุงดินก่อนปลูกด้วยวิธีการใส่ปุ๋ยคอกและปุ๋ยเคมี พบว่าอิทธิพลทั้งสองแปลงทดลองมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของดินเกือบทุกตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ไม่มีผลต่อค่าฟอสฟอรัส (Total P) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และพบว่าดินหลังปลูกของแปลงทดลองทั้งสองมีความอุดมสมบูรณ์ของดินเพิ่มขึ้นโดยแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 dS/m จะมีศักยภาพของดินหลังปลูกมากกว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 7.80 dS/m ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แคปปาระหว่างข้อมูลเชิงแผนที่กับข้อมูลพื้นที่จริง

ระดับพื้นที่เหมาะสม		S1	S2	S3	N	รวมจุดสำรวจ (พื้นที่จริง)	ค่าสัมประสิทธิ์ แคปปา
เหมาะสมมาก	S1	5	-	-	-	5	
เหมาะสมปานกลาง	S2	-	15	-	-	15	
เหมาะสมน้อย	S3	-	-	2	-	2	
ไม่เหมาะสม	N	1	2	-	5	8	
รวมจุดสำรวจ (แผนที่)		6	17	2	5	30	0.84

ตารางที่ 6 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตัวอย่างดินก่อนและหลังปลูกกระถางแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 และ 7.80 dS/m

แปลงทดลอง (dS/m) อำเภอ	เวลา เก็บตัวอย่าง ดิน (ปลูก)	ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมีของดิน					
		EC (dS/m)	N (%)	Total P (ppm)	Total K (ppm)	pH	OM (%)
EC 6.58	ก่อน	6.58	0.043	10.30	50.06	5.37	0.86
โนนสูง	หลัง	5.18	0.077	18.80	142.86	5.39	1.54
EC 7.80	ก่อน	7.80	0.033	10.56	23.00	4.50	0.66
ด่านขุนทด	หลัง	6.23	0.073	18.46	112.40	5.34	1.47
ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.		6.45 ± 0.97	0.06 ± 0.02	14.53 ± 4.24	82.08 ± 49.34	5.15 ± 0.39	1.13 ± 0.39
แปลงทดลอง (P-Value)		0.00*	0.00*	0.64	0.00*	0.00*	0.00*
เวลา (P-Value)		0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*

* = Level of Significance (α) = .05 ($P < 0.05$, DMRT), S.D. = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ppm = ส่วนในล้านส่วน

2.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำผิวดินพบว่าค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่ใช้วัดทุกตัวไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรกรรมทั้งสองแปลงทดลองเมื่อเปรียบเทียบการให้น้ำตลอดการทดลองปลูก 90 วัน พบว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 dS/m มีปริมาณการใช้น้ำน้อยกว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 7.80 dS/m ดังตารางที่ 7

2.3 ผลการวิเคราะห์ศักยภาพการปลูกและผลผลิตต่อไร่ผลวิเคราะห์ศักยภาพการปลูกและผลผลิตต่อไร่ พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 และ 7.80 dS/m และช่วงอายุหญ้า (Plots x days) เกือบทุกตัวไม่มีปฏิสัมพันธ์ร่วมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.01$) แสดงว่าอิทธิพลร่วมไม่มีผลต่อปัจจัยที่ใช้วัดเกือบทุกตัวยกเว้นน้ำหนักสดที่พบว่ามีความสัมพันธ์ร่วมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 แสดงว่าอิทธิพลร่วมมีผลต่อน้ำหนักสด โดยพบว่าเมื่อช่วงอายุหญ้ามามากขึ้นค่าเฉลี่ยจำนวนหน่อตอกอและสัดส่วนใบต่อลำต้นลดลง ค่าเฉลี่ยความสูงและผลผลิตน้ำหนักสดเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัยที่ใช้วัดจะเห็นได้ชัดเจนที่ช่วงอายุ 45 - 60 วัน และที่ช่วงอายุ 90 วัน

จะให้ผลผลิตมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปัจจัยที่ใช้วัดในแต่ละช่วงอายุ พบว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 dS/m มีศักยภาพสูงกว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 7.80 dS/m ทุกช่วงอายุ ยกเว้นค่าเฉลี่ยจำนวนหน่อต่อกอที่มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติของทั้งสองแปลงทดลอง ปรากฏผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำผิวดินระหว่างแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 และ 7.80 dS/m

แปลงทดลอง (dS/m) อำเภอทดลองปลูก	ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำและ *คุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรกรรม						
	EC : (dS/m)	คุณภาพ น้ำ EC	pH	คุณภาพ น้ำ pH	**TDS (mg/l)	คุณภาพ น้ำ TDS	การใช้ ปริมาณน้ำ (m ³)
EC 6.58 อำเภอโนนสูง	0.71	≤ 3	8.00	≤ 8.5	1,240.00	≤ 2,000	231.47
EC 7.80 อำเภอด่านขุนทด	0.26		8.30		620.00		245.28

* ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรกรรมของ FAO [12],

** TDS = Total Dissolved Solid

ตารางที่ 8 ผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของจำนวนหน่อต่อกอ ความสูง น้ำหนักสดและสัดส่วนใบต่อลำต้นระหว่างแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 และ 7.80 dS/m ที่ช่วงอายุต่างกัน

แปลง EC (dS/m)	ปัจจัย ที่ใช้วัด	ช่วงอายุทุย้านเปียร์ปากช่อง 1 (วัน)					Mean	Plotsxdays (P-Value)
		30 (*Mean ± S.D.)	45 (Mean ± S.D.)	60 (Mean ± S.D.)	75 (Mean ± S.D.)	90 (Mean ± S.D.)		
6.58	หน่อต่อกอ	30.33 ^a ± 1.26	28.67 ^b ± 1.16	23.17 ^c ± 1.26	22.00 ^c ± 0.82	22.00 ^c ± 1.29	37.70	0.681
7.80	(หน่อ)	30.17 ^a ± 1.63	28.67 ^b ± 0.82	22.67 ^c ± 1.63	22.00 ^c ± 1.41	21.66 ^c ± 0.82		
6.58	ความสูง	72.15 ^c ± 1.58	110.30 ^d ± 0.67	164.60 ^c ± 2.91	185.50 ^b ± 3.20	206.75 ^a ± 2.76	146.56	0.408
7.80	(ชม.)	69.75 ^c ± 1.50	108.50 ^d ± 1.47	163.35 ^c ± 0.60	180.65 ^b ± 0.87	204.00 ^a ± 1.41		
6.58	น้ำหนักสด	5,392 ^c ± 0.07	9,248 ^d ± 0.10	14,096 ^c ± 1.14	17,584 ^b ± 1.16	21,360 ^a ± 0.83	12,800	**0.000
7.80	(กก./ไร่)	4,528 ^c ± 0.61	8,784 ^d ± 1.25	12,816 ^c ± 1.30	14,816 ^b ± 0.89	19,376 ^a ± 1.11		
6.58	สัดส่วนใบ ต่อลำต้น	2.66 ^a ± 0.09	1.74 ^b ± 0.06	1.19 ^c ± 0.05	1.05 ^d ± 0.01	1.03 ^d ± 0.02	1.49	0.013
7.80	(ร้อยละ)	2.45 ^a ± 0.12	1.65 ^b ± 0.04	1.11 ^c ± 0.01	1.02 ^d ± 0.03	1.01 ^d ± 0.03		

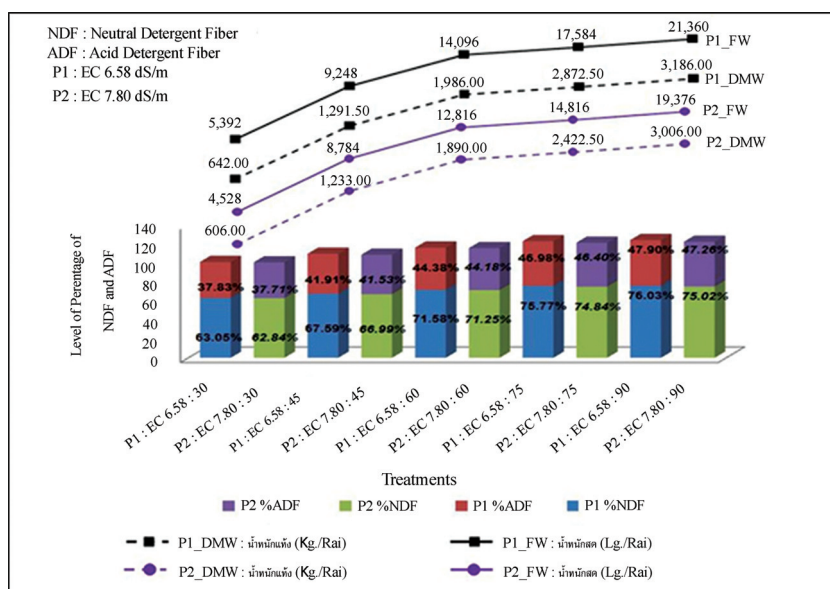
abcde = ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรเดียวกันในแนวนอนเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P > 0.01, DMRT)

* = ค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงอายุจากแปลงทดลองย่อยขนาด 1 × 1 เมตร จำนวน 4 แปลง

** = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P < 0.01) ของอิทธิพลร่วมระหว่างแปลงทดลองทั้งสองและช่วงอายุทุย้าน (Plots x days)

จากผลการวิเคราะห์น้ำหนักแห้งและเยื่อใยของหญ้า พบว่าผลผลิตน้ำหนักสดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับผลผลิตน้ำหนักแห้งระดับเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกลาง (NDF) และเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (ADF) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และในช่วงอายุ 90 วัน พบว่าให้ผลผลิตต่อไร่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปัจจัยที่ใช้วัดในแต่ละช่วงอายุ พบว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 dS/m มีศักยภาพผลผลิตน้ำหนักแห้งสูงกว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 7.80 dS/m ทุกช่วงอายุ ส่วนระดับเยื่อใย NDF และระดับเยื่อใย ADF พบว่ามีศักยภาพการให้ผลผลิตต่อไร่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งสองแปลงทดลองดังรูปที่ 2

ผลการเปรียบเทียบการให้ค่าพลังงานความร้อน พบว่าในช่วงอายุ 90 วัน พบว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 dS/m มีค่าเฉลี่ยพลังงานความร้อน 4,148 แคลอรีต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (17.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ซึ่งสูงกว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 7.80 dS/m ที่มีค่าความร้อน 4,101 แคลอรีต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (17.17 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)



รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และระดับเยื่อใย NDF และ ADF

2.4 ผลการประเมินศักยภาพการใช้ประโยชน์หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อเป็นวัตถุดิบพลังงานทดแทนในภาพรวมของพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกรพบว่า พื้นที่ที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์ร้อยละ 91.38 โดยมีพื้นที่เหมาะสมสูง (S1) ปานกลาง (S2) และน้อย (S3) คิดเป็นร้อยละ 0.47, 84.78 และ 6.13 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ พบว่าค่ารวมเฉลี่ยของศักยภาพพื้นที่ลุ่มน้ำสามารถให้ผลผลิตหญ้าสดเฉลี่ย 61.11 ตันต่อไร่ต่อปี คิดเป็นผลผลิตเชิงพื้นที่เฉลี่ยร้อยละ 60 มีศักยภาพพื้นที่การให้ผลผลิตหญ้าสดเพื่อผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 37.45 ล้านตันต่อปี โดยสามารถผลิตไฟฟ้า 1,044.99 เมกะวัตต์ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการประเมินพื้นที่ศักยภาพการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร

ระดับความ เหมาะสม ของพื้นที่	พื้นที่ ลุ่มน้ำ ลำเชียงไกร (ตร.กม.)	ผลผลิต เชิงพื้นที่ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย ผลผลิต หญ้าสด (ตัน/ไร่/ปี)	ประเมิน พื้นที่ปลูก เพื่อผลิตไฟฟ้า (*ไร่ต่อเมกะวัตต์)	พื้นที่ศักยภาพการปลูก หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อผลิตไฟฟ้า ของลุ่มน้ำลำเชียงไกร	
					(เมกะวัตต์)	(ล้านตันหญ้าสด/ปี)
มาก (S1)	15.72	80 - 100	81.47 - 101.84	439.87 - 549.84	22.34 - 27.93	0.80 - 1.00
ปานกลาง (S2)	2,816.43	40 - 80	40.74 - 81.47	439.87 - 879.74	2,000.90 - 4,001.79	71.71 - 143.41
น้อย (S3)	203.59	20 - 40	20.37 - 40.74	879.74 - 1,759.48	72.32 - 144.64	2.59 - 5.18
ไม่เหมาะสม (N)	286.32	< 20	-	-	-	-
รวมทั้งหมด	3,322.06	**รวมเฉลี่ย	61.11	824.76	1,044.99	37.45

* 1 ตารางกิโลเมตร = 625 ไร่, ** รวมเฉลี่ย = ผลรวมของค่าเฉลี่ยทั้งหมดหารด้วยจำนวนของข้อมูล

การอภิปรายผล

1. ผลการวิจัยการประเมินศักยภาพค่าที่ดินและพื้นที่ที่เหมาะสมเชิงพื้นที่ในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 พบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เหมาะสมปานกลาง (S2) คิดเป็นร้อยละ 84.78 ของพื้นที่ลุ่มน้ำเนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มชุดดินที่ 20 คุณภาพที่ดินมีลักษณะเด่นเป็นดินเค็มและธาตุอาหารหลักของพืชต่ำ โดยเฉพาะลักษณะเนื้อดินบนเป็นดินร่วนปนทรายมีการระบายน้ำดี และดินล่างเป็นดินเหนียวร่วนปนทรายอุ้มน้ำได้ดี แต่มีข้อจำกัดของการสูญเสียไนโตรเจนในดินสูงทำให้ดินเกิดการขาดแคลนความชื้น [15] ต้องใช้น้ำในการเกษตรมากขึ้นโดยเฉพาะหน้าแล้ง ส่วนสภาพอากาศมีระดับเหมาะสมสูงถึงน้อย มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 700 - 1,000 มิลลิเมตรต่อปี และอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 32 องศาเซลเซียส เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ต้องการน้ำฝนปริมาณเฉลี่ย 1,000 มิลลิเมตรต่อปี และอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 32 องศาเซลเซียส [5] โดยลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่มีความลาดชันร้อยละ 0 - 5 เป็นลูกคลื่นลอนลาดถึงที่ราบ จึงเหมาะสมสูงต่อการปลูกหญ้าเนเปียร์ [7] สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kareerat, N. et al. [16] ที่ประเมินพื้นที่ที่เหมาะสมในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 พบว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เหมาะสมปานกลางมีลักษณะพื้นที่เป็นที่ราบพบกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ศึกษา มีพื้นที่ร้อยละ 72.96 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และจากข้อจำกัดบริเวณพื้นที่ราบลุ่มน้ำลำเชียงไกรส่วนใหญ่จะพบการแพร่กระจายดินเค็ม เพราะมีชั้นเกลือหินของแอ่งโคราชอยู่บริเวณด้านล่างในตอนกลางของพื้นที่ไปทางทิศตะวันออกเป็นพื้นที่ต่ำมากพบการแพร่กระจายร้อยละ 50 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ [3] และพื้นที่ดินเค็มส่วนใหญ่อยู่ในระดับปานกลางมีช่วงค่า EC 4 - 8 dS/m [11]

2. ศักยภาพการปลูก ผลผลิต และการใช้ประโยชน์พบว่าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ดินเค็มที่ระดับความเค็มปานกลาง ที่ค่า EC 6.58 - 7.80 dS/m โดยต้องมีการปรับปรุงดินก่อนปลูก เนื่องจากดินมีดัชนีธาตุอาหารพืชต่ำกว่าความต้องการของหญ้าและเป็นดินเค็มด้วยการใส่ปุ๋ยคอกและปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 เนื่องจากปุ๋ยคอกมีฮิวมัสสูงมีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยจุลสามารถดูดซับ

ประจวบถ้วนได้บนผิวและแลกเปลี่ยนประจวบถ้วนที่อยู่ในสารละลายดินได้ จึงมีผลทำให้โซเดียมคลอไรด์ในดินลดลงและเพิ่มธาตุอาหารในดิน ทำให้หลังการปลูกดินมีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น และจากศักยภาพการเจริญเติบโตในภาพรวม พบว่าช่วงระยะการเจริญเติบโตของหญ้ามมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนทั้งทางกายภาพและค่าเฉลี่ยของปัจจัยที่ใช้วัดในช่วงอายุหญ้า 45 - 60 วัน และชะลอการเจริญเติบโตที่อายุ 60 - 90 วัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของการเจริญเติบโตรูปตัวเอส (S-curve) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปัจจัยที่ใช้วัดแต่ละช่วงอายุในการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ พบว่าแปลงทดลองที่ค่า EC 6.58 dS/m จะมีศักยภาพพื้นที่ที่สูงกว่าแปลงทดลองที่มีค่า EC 7.80 dS/m เพราะค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) จะมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับความเข้มข้นของเกลือในดินที่อาจส่งผลต่อศักยภาพการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของหญ้ามลดลงและจากผลการวิจัยศักยภาพการปลูกของพื้นที่เหมาะสมปานกลางในภาพรวม พบว่าเมื่อช่วงอายุหญ้ามมากขึ้นจำนวนหน่อตอกอลดลงและความสูงหญ้ามเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wijitphan, S. [17] ที่กล่าวถึงการตัดหญ้าที่อายุมากทำให้ความสูงของหญ้ามเพิ่มขึ้นและเกิดการแย่งแสงแดดกันส่งผลให้การแตกหน่อใหม่ลดลงและแขนงเก่าตายลง และเมื่อเปรียบเทียบศักยภาพการปลูกและผลผลิตในพื้นที่ศึกษาอื่นพบว่าให้ผลแตกต่างจากงานวิจัยของ Hoshino, M. [18] ในการทดลองปลูกหญ้ามเนเปียร์ในดินชุดปากช่อง อำเภอปากช่อง พบว่าการเก็บเกี่ยวที่อายุ 60 วัน จะให้ผลผลิตน้ำหนักสดสูงสุด 58 ตันต่อไร่ ซึ่งมีศักยภาพการให้ผลผลิตสูงกว่าผลการวิจัยที่ให้ผลผลิตน้ำหนักสด 20.37 ตันต่อไร่ ที่การเก็บเกี่ยว 90 วัน โดยความแตกต่างของผลผลิตต่อไร่อาจมาจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพราะดินชุดปากช่องจะมีความอุดมสมบูรณ์มากกว่าดินชุดกุลาร้องไห้และชุดดินประทาย และไม่เป็นดินเค็ม รวมทั้งปริมาณและคุณภาพน้ำที่ได้รับมีศักยภาพสูงกว่าด้านการให้ผลผลิตระดับย่อย NDF และ ADF พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Satchapong, R. [19] ที่ทดลองปลูกหญ้ามเนเปียร์ในจังหวัดลพบุรี โดยทำการเก็บเกี่ยว 60 วัน พบว่ามีค่าเฉลี่ยร้อยละ 66.50 และ 50.50 และผลงานวิจัยมีการรวมเฉลี่ยของทั้งสองแปลงคิดเป็นร้อยละ 71.42 และ 44.28 ด้านการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่เหมาะสมจากรายงานของ Kulasuwan, P. et al. [20] กล่าวว่าเมื่อตัดหญ้าอายุมากที่ระยะการเก็บเกี่ยว 180 วัน หญ้ามจะให้ผลผลิตสูงสุดและให้ก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนต่อพื้นที่สูงสุดและจากผลการวิจัยพบว่าการให้ผลผลิตสูงสุดอยู่ที่ช่วงอายุ 90 วันของการทดลอง และด้านการใช้ประโยชน์การประเมินศักยภาพพื้นที่ลุ่มน้ำเพื่อการผลิตไฟฟ้า พบว่าสามารถให้ผลผลิตหญ้ามสดรวมเฉลี่ย 61.11 ตันต่อไร่ต่อปี ซึ่งต้องใช้พื้นที่ปลูกรวมเฉลี่ย 824.76 ไร่ต่อเมกะวัตต์ จากรายงานของ Jeenanurugk, D. [14] ที่ศึกษาสภาพทั่วไปของการปลูกหญ้ามเนเปียร์ปากช่อง 1 ในตำบลลำสมพุง อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี พบว่าพื้นที่มีศักยภาพการให้ปริมาณหญ้ามสด 60 - 80 ตันต่อไร่ต่อปี ใช้พื้นที่ปลูกประมาณ 500 ไร่ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปเป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 1 เมกะวัตต์ โดยจะใช้ปริมาณหญ้ามสด 35,837 ตันต่อปีต่อเมกะวัตต์ ซึ่งพบว่าศักยภาพการให้ผลผลิตหญ้ามสดมีความใกล้เคียงกับศักยภาพพื้นที่เหมาะสมปานกลางในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกรที่ให้ผลผลิตหญ้ามสด 40.78 - 81.47 ตันต่อไร่ต่อปี โดยใช้พื้นที่ปลูก 439.87 - 879.74 ไร่ต่อเมกะวัตต์

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาศักยภาพการปลูก ผลผลิต และการใช้ประโยชน์ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เพื่อเป็นวัตถุดิบพลังงานทดแทน ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเชียงไกร สรุปได้ว่า ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เหมาะสมปานกลาง (S2) (EC 4 - 8 dS/m) คิดเป็นร้อยละ 84.78 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ก่อนปลูกต้องปรับปรุงสภาพดินโดยการใส่ปุ๋ยคอก และปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 เพื่อลดความเค็มของดินและเพิ่มธาตุอาหาร และใส่ปุ๋ยยูเรียในการเร่งผลผลิต (30 และ 45 วัน) ทั้งนี้แปลงที่ค่า EC น้อยกว่า (6.58 dS/m) จะให้ผลผลิตน้ำหนัสดและน้ำหนักแห้งต่อไร่สูงกว่าแปลงที่ค่า EC สูง (7.80 dS/m) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) การพิจารณาภาพรวมทั้งปริมาณและคุณภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ช่วงอายุ 90 วัน จะให้ผลผลิตต่อไร่สูงสุด เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ให้อาชน้ำสูงและพบว่าศักยภาพการใช้ประโยชน์พื้นที่ลุ่มน้ำสามารถให้ผลผลิตหญ้าสดเฉลี่ย 61.11 ตันต่อไร่ต่อปี คิดเป็นผลผลิตเชิงพื้นที่เฉลี่ยร้อยละ 60 มีศักยภาพการให้ผลผลิตหญ้าสดเพื่อผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 37.45 ล้านตันต่อปี สามารถใช้ผลิตไฟฟ้า 1,044.99 เมกะวัตต์ โดยพบว่าพื้นที่เหมาะสมปานกลาง (S2) มีศักยภาพพื้นที่มากที่สุดในการให้ผลผลิตหญ้าสดเพื่อการผลิตไฟฟ้าสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่สนับสนุนทุนวิจัย แผนพลังงานทดแทน ปีงบประมาณ 2556 มา ณ โอกาสนี้รวมทั้งท่านอาจารย์และผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และเกษตรกรทุกท่านที่ร่วมมือและให้องค์ความรู้ในการทำเกษตรกรรมท้องถิ่น

References

- [1] Ministry of Energy. (2014). **AEC : Connecting Energy for Stability and a Business Opportunity Thailand Energy. Energy Knowledge Management.** Access (9 September 2016). Available (<http://energy.go.th/km-energy/wp-content/uploads/2016/08/AEC5.pdf>)
- [2] Bandit Uea-aphon. (2012). **The Energy Crisis with the Direction of the AEC Linkages, and Exit of Thailand 1/4.** Access (9 December 2013). Available (<http://www.siamintelligence.com/energy-crisis-linkages-aec-and-thai-1-4/>)
- [3] Noinumsai, N. and Foypikul, W. (2012). **Saline Soil Distribution Potential Assessment and Ecological Environmental Technology Development for Rehabilitate Lam Chiang Kai Basin Ecosystem in Non Thai District, Nakhon Ratchasima Province.** Research report. Nakhon Ratchasima Rajabhat University (in Thai)
- [4] Buranasing, N. (2015). **Energy Crop : Napier Grass.** Access (13 February 2016). Available (http://www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/parliament_parcy/ewt_dl_link.php?nid=30598)

- [5] Kiyothong, K. (2011). **Napier Pakchong 1 Grass Manual**. Nakhon Ratchasima : Mittraphap Karnpim (in Thai)
- [6] Chongjian Ma., Ravi Naidu., Faguang Liu., Changhua Lin., and Hui Ming. (2012). Influence of Hybrid Giant Napier Grass on Salt and Nutrient Distributions with Depth in a Saline Soil. **Biodegradation**. Vol. 23, No. 6, pp. 907-916. DOI: 10.1007/s10532-012-9583-4
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1983). **Guideline : Land Evaluation for Rainfed Agriculture**. FAO soils bulletin no:52 0253-2050. Bibliography. pp.233-237
- [8] Charupatt, T. (2002). **Landuse Change Detection, Land Evaluation and Landuse Planning in Lam Phra Phloeng Watershed**. Doctor of Science Thesis in Soil Science, Graduate School, Khon Kaen University (in Thai)
- [9] Sys, C., Van Ranst, E., and Debaveye, j. (1991). **Land Evaluation-Part I : Principles in Land Evaluation and Crop Production Calculation**. Agricultural Publication-Number 7. General Administration for Development Cooperation. Place du Champ de Mars 5 bte 5-1050 Brussels, Belgium
- [10] Tansiri, B. (1999). **A Guide to Evaluation Land for Crops**. Bangkok : Office of Soil Resources Survey and Research, Land Development Department
- [11] Land Development Department. (2004). **Management of Soil Salinity**. Bangkok : Ministry of Agriculture and Cooperatives
- [12] Ayers, R. S. and Westcot, D. W. (1994). **Water Quality for Agriculture**. FAO Corporate Document Repository. Handbook. Access (25 December 2013). Available : (<http://www.fao.org/docrep/003/T0234E/T0234E00.html>)
- [13] Goering, H. K. and Van Soest, P. J. (1970). **Forage Fiber Analysis (apparatus, reagents, procedures and some applications)**. USDA Agricultural. Handbook, No. 379. Access (25 May 2015). Available (<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT87209099/PDF>)
- [14] Jeenanurugk, D. (2014). **The Feasibility Study of Investment on Biomass Power Plant from Napier Pakchong 1 Grass Amphoe Muak Lek Changwat Saraburi**. Master of Economics, Business Economics, Faculty of Economics at Sriracha (in Thai)
- [15] Encyclopædia Thai. (n.d). **Some Important Properties of Soil Associated with Cultivation. The Encyclopedia Project for Thai youth. Vol. 18, Title 8. Soil and Fertilizer**. Access (30 April 2015). Available (<http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=18&chap=8&page=t18-8-infodetail04.html>)
- [16] Kareerat, N., Siriwi, S., and Reungsang, P. (2015). **Spatial Identification of Suitable Area for Napier Grass Energy Crop Planting in Northeast of Thailand**. Access (23 October 2016). Available(<http://www.arts.chula.ac.th/~geography/TSG2015/docs/FullPaper/FullPaper/1.8%20Napier%20Grass.pdf>)

- [17] Wijitphan, S. (2011). Effects of Cutting Interval on Yields and Nutritive Values of King Napier Grass (*Pennisetum purpureum* cv. King grass) under Irrigation Supply. **KKU Research Journal**. Vol. 6, No. 3, pp. 215-224 (in Thai)
- [18] Hoshino, M. (1975). **Studies on the Tropical Forage Crop in Thailand**. TARC. Ministry of Agriculture and Forestry. Japan
- [19] Satchapong, R., Maneerat, W., and Putsakum, M. (2007). Effect of Napier Pak Chong 1 Grass on Productive Performance in Thai Lavo Chicken. In **the 5th STOU Graduate Research Conference**. November 27, 2015. Sukhothai Thammathirat Open University. P-ST 026. (in Thai)
- [20] Kulasuwan, P., Thobunluepop, P., Tonmukayakyl, N., Mani-in, P., Pongtip, A., Muangpan, J., Vinijchevit, N., and Changkaewmanee, J. (2014). Effect of Seasonal and Cutting Interval of Napier Pak Chong 1 on Growth Biomass and Biogas Productivity. **Agricultural Science Journal**. Vol. 45, No. 2, pp. 721-724 (in Thai)



การสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยเทคนิคการแทรกซอลท์ร่วมกับแฮชฟังก์ชัน
โดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt

An Improved Password Security Based on Salted Password and Hash Emotion using Bcrypt Algorithm

ปริญญานาโท^{1*} และศิริปรัช บัญครอง¹

Received: June, 2017; Accepted: August, 2017

บทคัดย่อ

การใช้งาน Cryptographic Hash ถือเป็นส่วนหนึ่งในวิธีการจัดเก็บรหัสผ่านที่มีความปลอดภัย แต่เนื่องจากแฮชฟังก์ชันนั้นมีความเร็วในการประมวลผล ซึ่งมีโอกาสที่จะถูกโจมตีด้วยเรนโบว์เทเบิลได้ ทำให้การจัดเก็บรหัสผ่านโดยผ่านกระบวนการแฮชฟังก์ชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับการรักษาความปลอดภัยของรหัสผ่านได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการนำเสนอวิธีการสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยเทคนิคการแทรกซอลท์ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt เพื่อให้รักษาความปลอดภัยของรหัสผ่านก่อนทำการจัดเก็บลงในฐานข้อมูล ซึ่งตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยของรหัสผ่านทดสอบการโจมตีด้วยโปรแกรม Hashcat ผลจากการทดลองพบว่าการจัดเก็บรหัสผ่านโดยไม่ต้องใช้ซอลท์ด้วยอัลกอริทึม Bcrypt สามารถช่วยลดความเสี่ยงที่เกิดจากการโจมตีได้และถ้าหากใช้ซอลท์ควบคู่กัน ก็ทำให้ไม่สามารถทำการโจมตีด้วยโปรแกรม Hashcat ได้เช่นกัน

คำสำคัญ : ความปลอดภัยรหัสผ่าน; อัลกอริทึม Bcrypt; ซอลท์

¹ Department of Information Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding Author E - mail Address: p.natho@hotmail.com

Abstract

Cryptographic hash functions are ones of many methods used for password storing. However, cryptographic hash functions were designed to be very fast, which means there is a clack for Rainbow Table attack therefore, using hash functions alone is, therefore, not enough for storing passwords security. This paper proposed a method which uses a salt value with Bcrypt before storing the password in the database. The security was proved by using Hashcat. The results showed that Bcrypt on its own and Bcrypt with a salt value could withstand the attack.

Keywords: Password Security; Bcrypt Algorithm; Salt

บทนำ

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสาร การรับส่ง และการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก เมื่อข้อมูลส่งจากผู้ส่งไปยังผู้รับจะต้องมีความปลอดภัย แนวความคิดหลักเกี่ยวกับความปลอดภัยของข้อมูล ได้แก่ การรักษาความลับของข้อมูล (Confidentiality) คือ ความสามารถในการรักษาความลับที่ไม่ให้ผู้ที่ไม่มีสิทธิ์สามารถอ่านข้อมูลได้ ความถูกต้องสมบูรณ์ของข้อมูล (Integrity) คือ ความสามารถในการรักษาความถูกต้องและสมบูรณ์ของข้อมูลว่าข้อมูลจะต้องไม่มีการสูญหายหรือถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขใด ๆ และความพร้อมใช้งาน (Availability) คือ ความสามารถในการตอบสนองเมื่อผู้ใช้งานต้องการใช้งานข้อมูลก็สามารถเรียกใช้ได้ทันทีตามสิทธิ์ที่ได้รับ [1]

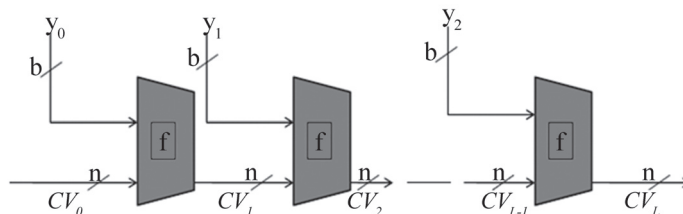
โดยแนวความคิดและจากวัตถุประสงค์ความปลอดภัยในด้านความพร้อมใช้งานข้อมูลนั้น จะมีเทคนิคที่ใช้สำหรับตรวจสอบการเข้าใช้ระบบงานต่าง ๆ คือ วิธีการยืนยันตัวตน (Authentication) สำหรับเข้าใช้งานซึ่งโดยส่วนใหญ่ของระบบการยืนยันตัวตนที่นิยมใช้นั้นจะประกอบด้วย การยืนยันตัวตนด้วยชื่อผู้ใช้ (Username) ร่วมกับรหัสผ่าน (Password) ซึ่งข้อมูลรหัสผ่านที่ใช้สำหรับยืนยันการเข้าระบบนั้นควรที่จะมีการจัดเก็บไว้ให้เป็นความลับ เนื่องจากถ้าหากผู้โจมตีหรือผู้ไม่ประสงค์ดีสามารถล่วงรู้ถึงรหัสผ่านได้ ข้อมูลที่จัดเก็บไว้เป็นความลับอาจจะไม่เป็นความลับอีกต่อไปได้ ซึ่งในการกำหนดรหัสผ่านถึงแม้จะมีกลไกที่สามารถเข้ามาควบคุมเพื่อช่วยทำให้การสร้างความปลอดภัยเพิ่มขึ้น เช่น การกำหนดความยาวและรูปแบบของรหัสผ่าน หรือแม้แต่การบังคับให้เปลี่ยนรหัสผ่านใหม่เมื่อครบระยะเวลาตามที่กำหนด [2] แต่ก็มีผู้ใช้งานจำนวนไม่น้อยที่กำหนดรหัสผ่านเดียวกันสำหรับการเข้าใช้งานในทุกระบบ เนื่องจากทำให้ผู้ที่มีความง่ายต่อการจดจำในการเข้าใช้งาน ซึ่งถ้าหากรหัสผ่านที่จัดเก็บในระบบฐานข้อมูลไม่มีความปลอดภัยที่ดีแล้ว หากระบบถูกโจมตีอาจจะทำให้รหัสผ่านที่จัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลถึงแม้ว่าบางครั้งการจัดเก็บรหัสผ่านจะมีวิธีการป้องกันโดยทำการนำรหัสผ่านที่จะจัดเก็บผ่านกระบวนการแฮชฟังก์ชันก่อนทำการจัดเก็บลงในฐานข้อมูล เช่น อัลกอริทึม MD5 ซึ่งอาจช่วยลดความเสี่ยงหรือโอกาสที่เกิดปัญหาในการถูกโจรกรรมข้อมูลได้ แต่เนื่องจากการประมวลผลของแฮชฟังก์ชันนั้นสามารถคำนวณผลลัพธ์ของค่าแฮชได้อย่างรวดเร็วซึ่งทำให้การโจมตีด้วยเรนโบว์เทเบิลเนื่องจากเรนโบว์เทเบิลเป็นตารางขนาดใหญ่

ที่สร้างขึ้นเพื่อทำการจัดเก็บค่าแฮชของรหัสผ่านเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบในการโจมตีก็สามารถทำงานได้รวดเร็วเช่นเดียวกัน [3] อีกทั้งค่าที่จัดเก็บในเรโนโบว์เทเบิลที่สร้างมานั้นสามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้อีก ทำให้รูปแบบการจัดเก็บรหัสผ่านโดยผ่านกระบวนการแฮชฟังก์ชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับการรักษาความปลอดภัยของรหัสผ่านได้ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอวิธีการสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยเทคนิคการแทรกซอลที่ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt เนื่องจากอัลกอริทึม Bcrypt เป็นการเข้ารหัสตามอัลกอริทึม Blowfish และสามารถกำหนดการเพิ่มซอลท์ อีกทั้งยังสามารถกำหนดจำนวนรอบในการทำซ้ำเพื่อให้การคำนวณหาค่าผลลัพธ์ของค่าแฮชมีการทำงานที่ช้าลง ซึ่งจะส่งผลให้การโจมตีทำงานได้ช้าลงด้วยเช่นเดียวกัน

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. แฮชฟังก์ชัน (Hash Function)

แฮชฟังก์ชัน [4] เป็นการแปลงรูปแบบของข้อมูลที่ได้รับเข้ามาไม่ว่าข้อมูลต้นฉบับจะมีขนาดเท่าใดก็ตามจะถูกย่อให้อยู่ในรูปแบบที่มีขนาดคงที่ ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะทำการย้อนกลับเพื่อเรียกดูข้อมูลต้นฉบับได้ จะทำได้เพียงแค่ตรวจสอบว่าข้อมูลที่ส่งมานั้นถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขหรือมีการสูญหายของข้อมูลหรือไม่ โดยการทำงานของแฮชฟังก์ชันแสดงดังรูปที่ 1 ทั้งนี้ขนาดของค่าแฮชจะขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้ เช่น อัลกอริทึม MD5 จะมีขนาดค่าแฮช 128 บิต

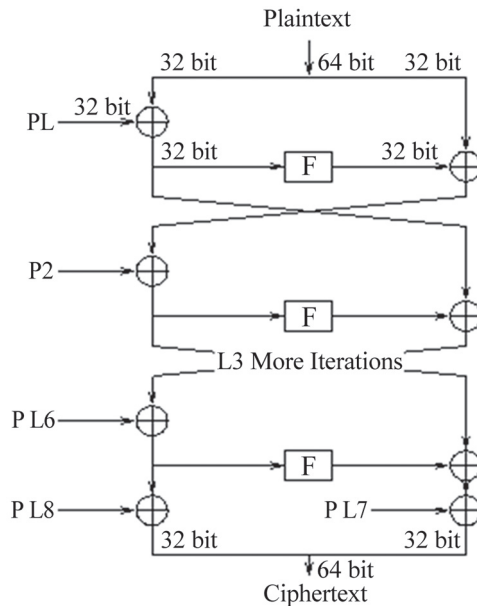


รูปที่ 1 การทำงานของแฮชฟังก์ชัน

แฮชเป็นฟังก์ชันที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติของการกระจายที่ดี กล่าวคือ ข้อมูลเดียวกันเมื่อผ่านแฮชฟังก์ชันแล้ว จะต้องได้ผลลัพธ์เหมือนเดิมเสมอ และหากข้อมูลต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อผ่านแฮชฟังก์ชันแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้ควรมีค่าแตกต่างกันมาก สำหรับกระบวนการแฮชฟังก์ชันนั้น จะมีรูปแบบต่างกันตามอัลกอริทึมสามารถแบ่งเป็นกลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มของ MDC (Modification Detection Codes) และกลุ่มของ MAC (Message Authentication Codes)

2. อัลกอริทึม Bcrypt

อัลกอริทึม Bcrypt [5] เป็นการเข้ารหัสตามอัลกอริทึม Blowfish และสามารถกำหนดการเพิ่มซอลท์ อีกทั้งยังสามารถปรับเพิ่มขนาดจำนวนรอบการวนซ้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติจะทำการวนซ้ำจำนวน 4 รอบ ทำให้การทำงานช้าลงได้ ดังนั้นจึงมีความสามารถในการป้องกันการโจมตีแบบ Brute Force ที่ใช้การค้นหารหัสผ่านที่ถูกต้องได้แม้ว่าจะมีความสามารถในการคำนวณเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยการทำงานของอัลกอริทึม Bcrypt แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทำงานของอัลกอริทึม Bcrypt

อัลกอริทึม Bcrypt ในค่าแฮชข้อความหรือในไฟล์ข้อมูลที่จะทำการปกปิดรหัสผ่านจะมีค่าเริ่มต้นที่ประกอบด้วย \$2a\$ หรือ \$2y\$ เพื่อเป็นตัวระบุว่าเป็นรูปแบบการแฮชด้วยอัลกอริทึม Bcrypt ส่วนที่เหลือของแฮชข้อความรวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วย ค่าซอลท์ 128 บิต และค่าแฮช 184 บิต [5]

3. Salting

Salt เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มความยาวให้กับรหัสผ่าน ค่าของ Salt อาจเป็นตัวอักษร ตัวเลขหรือตัวอักขระพิเศษที่ได้จากการสุ่มหรือกำหนดขึ้นมาเพื่อนำมาประกอบรวมกับรหัสผ่านเพื่อทำให้ค่าแฮชของรหัสผ่านที่รวมกับค่าซอลท์ [6] ยกตัวอย่างเช่น ผู้ใช้กำหนดรหัสผ่าน “password” หลังจากนั้นระบบทำการสุ่มค่าซอลท์ขึ้นมาค่าหนึ่ง สมมติได้ค่าเป็น “fh90\$PA28” เมื่อสุ่มค่าซอลท์ได้แล้วหลังจากนั้นจะทำการคำนวณค่าแฮชของรหัสผ่าน “password+Salt” แทนค่าได้ Hash(passwordfh90\$PA28) เมื่อผ่านกระบวนการแฮชฟังก์ชันด้วยอัลกอริทึม MD5 แล้วจะทำให้ผลลัพธ์ของค่าแฮช คือ 29e20a65f0d03364b0391174ac74b3 และเนื่องจากค่าซอลท์ของผู้ใช้แต่ละคนจะมีค่าที่แตกต่างกันเพื่อนำมารวมกับรหัสผ่านทำให้มีการคำนวณค่าผสมระหว่างรหัสผ่านกับค่าซอลท์นั้นมีความเป็นไปได้ของจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้มีความยากต่อการโจมตีมากยิ่งขึ้นด้วย [7]

4. การจัดเก็บรหัสผ่านและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบสำหรับการจัดเก็บรหัสผ่านนั้นมีเทคนิคและวิธีการจัดเก็บได้หลากหลายวิธี รวมถึงมีงานวิจัยได้นำเสนอเทคนิคและวิธีการต่าง ๆ ประกอบด้วยดังนี้

1) การจัดเก็บรหัสผ่านในรูปแบบข้อความปกติ (Plaintext)

การจัดเก็บวิธีนี้เป็นวิธีการจัดเก็บรหัสผ่านที่ง่ายที่สุด โดยจะไม่มีมีการเข้ารหัสรหัสผ่านใด ๆ [8] ถึงแม้ว่าการจัดเก็บที่ดีควรจะเป็นรหัสผ่านที่มีความยาวอย่างน้อย 8 ตัวอักษร และต้องประกอบด้วย

ตัวอักษรพิเศษและตัวเลขผสมกับตัวอักษรก็ตาม [9] แต่ก็ยังทำให้การจัดเก็บรหัสผ่านแบบนี้มีความปลอดภัยน้อยมากเนื่องจากถ้าผู้โจมตีสามารถเข้าถึงฐานข้อมูลที่จัดเก็บรหัสผ่านได้สามารถที่จะมองเห็นรหัสผ่านนั้นได้ทันที

2) การจัดเก็บรหัสผ่านแบบผ่านแฮชฟังก์ชัน (Hash Password)

การจัดเก็บวิธีนี้จะทำการนำรหัสผ่านไปผ่านกระบวนการแฮชฟังก์ชันก่อน เช่น อัลกอริทึม MD5 อัลกอริทึม SHA1 หรืออัลกอริทึม SHA2 แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปจัดเก็บลงในฐานข้อมูล [8], [10] ซึ่งการจัดเก็บรูปแบบนี้เมื่อผู้โจมตีสามารถเข้าถึงฐานข้อมูลที่จัดเก็บรหัสผ่านจะสามารถมองเห็นแค่เพียงค่าแฮชเท่านั้น โดยการจัดเก็บวิธีนี้สามารถถูกโจมตีได้โดยการใช้เรนโบว์เทเบิล ซึ่งเป็นตารางขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้นเพื่อทำการจัดเก็บค่าแฮชของรหัสผ่านและค่าแฮชของรหัสผ่านนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อการเปรียบเทียบกับเวลาที่นำไปใช้ในการโจมตี เนื่องจากค่าแฮชฟังก์ชันมีคุณสมบัติในการคำนวณทิศทางเดียวไม่สามารถทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาผลลัพธ์ได้ ถึงแม้ว่าเรนโบว์เทเบิลที่สร้างมานั้นจะใช้พื้นที่ในการจัดเก็บค่อนข้างมาก แต่เรนโบว์เทเบิลที่ถูกสร้างมาแล้วนั้นสามารถถูกนำมาใช้งานซ้ำอีกได้ [10]

3) การจัดเก็บรหัสผ่านแบบผ่านแฮชฟังก์ชันสองครั้ง (Double Hash Password)

การจัดเก็บวิธีนี้จะเหมือนกับวิธีการจัดเก็บรหัสผ่านแบบแฮชฟังก์ชัน แต่จะแตกต่างกันคือวิธีการนี้จะนำค่าแฮชที่ได้จากการทำรอบที่หนึ่งมาทำการแฮชซ้ำอีกครั้ง ซึ่งการทำซ้ำนี้ผลลัพธ์ของค่าแฮชในรอบที่สองอาจเปลี่ยนแปลงหรือเหมือนกับรอบแรกก็ได้ [11] ซึ่งการจัดเก็บแบบนี้ผู้โจมตีสามารถเข้าถึงฐานข้อมูลที่จัดเก็บรหัสผ่านได้ก็จะมองเห็นเพียงค่าแฮชเท่านั้น ซึ่งมีความปลอดภัยมากกว่าการจัดเก็บรหัสผ่านแบบแฮชรอบเดียว แต่เนื่องจากความเร็วในการประมวลผลของค่าแฮชก็อาจทำให้ผู้โจมตีก็สามารถทำการทดสอบค่าของจำนวนรอบที่ใช้ในการแฮชแล้วสร้างเรนโบว์เทเบิลขึ้นมาใหม่เพื่อทำการโจมตีได้เช่นกัน [12]

4) การจัดเก็บแบบเติมซอลท์ในแฮชฟังก์ชัน (Salted Hash Password)

การจัดเก็บวิธีนี้จะทำการเติมค่าซอลท์ลงไปในรหัสผ่านก่อนแล้วค่อยนำไปผ่านกระบวนการแฮชฟังก์ชัน [13] โดยค่าซอลท์ คือ ค่าที่ถูกสร้างขึ้นมาอาจจะสร้างขึ้นมาโดยการกำหนดค่าแบบ prefix salt หรือแบบ suffix salt หรือแม้แต่การใช้เทคนิคการปรับค่าซอลท์ที่เหมาะสม [11] โดยแทรกซอลท์ลงในรหัสผ่านนั้นทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างกันทำให้มีส่วนช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับรหัสผ่านมากขึ้นทำให้การโจมตีด้วยตารางเรนโบว์เทเบิลทำได้ยากขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าซอลท์ที่ถูกสร้างขึ้นมาจะต้องทำการจัดเก็บลงในฐานข้อมูลด้วย ทำให้ผู้โจมตีทราบค่าซอลท์นั้นประกอบกับความเร็วในการประมวลผลของค่าแฮชจะสามารถทำการโจมตีได้เช่นกัน

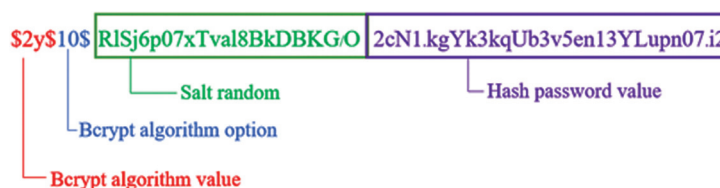
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยการแทรกซอลที่ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt โดยทำการพัฒนาด้วยภาษา PHP Version 7 ที่ทำงานบนความเร็ว CPU Core i3-3227U 1.90 GHz หน่วยความจำ 4 GB โดยเริ่มต้นการทำงาน เมื่อรับรหัสผ่านดั้งเดิมเข้ามาแล้วระบบจะทำการสุ่มค่าซอลท์ที่ได้จากชุดข้อมูลดังตารางที่ 1 ซึ่งชุดข้อมูลที่น่ามาสร้างซอลท์จะเป็นชุดข้อมูลตัวอักษร ชุดข้อมูลตัวเลขหรือชุดข้อมูลอักขระพิเศษ

ตารางที่ 1 ชุดตัวอักษรที่สร้างชอลท์

ชุดข้อมูล	ตัวอักษร
อักษร	abcdefghijklmnopqrstuvwxyz ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
ตัวเลข	0123456789
อักขระพิเศษ	!@#\$%^&*()_+~[]\ ;:./?><,'"

หลังจากนั้นจะทำการนำค่าชอลท์ที่ได้จากการสุ่มนำมาแทรกต่อท้ายของรหัสผ่านที่รับเข้ามา ตั้งต้นผ่านกระบวนการแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt ยกตัวอย่างเช่น รหัสผ่านตั้งต้นคือ “password” ระบบทำการสุ่มค่าชอลท์ขึ้นมาจำนวน 8 ตัว ซึ่งการสุ่มแต่ละครั้งจะได้ค่าชอลท์ที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ค่าชอลท์ที่ได้จากการสุ่ม DM<9^C%I ในการสุ่มค่าชอลท์ขึ้นมาเพื่อให้รหัสผ่านนั้นมีรูปแบบของรหัสผ่านที่ดี คือ มีความยาวอย่างน้อย 8 ตัวอักษร ผสมรวมกับตัวอักขระพิเศษหรือตัวเลข [9] หลังจากนั้นจะทำการนำค่าชอลท์ที่สุ่มได้แทรกรวมกับรหัสผ่านโดยวิธีการนำค่าชอลท์ต่อท้ายรหัสผ่าน จะได้ “passwordDM<9^C%I” หลังจากนั้นจะนำค่าของรหัสผ่านที่รวมกับค่าชอลท์ที่สุ่มขึ้นมาทำการคำนวณหาค่าผลลัพธ์ของรหัสผ่านด้วยอัลกอริทึม Bcrypt จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้จากการสุ่มค่าชอลท์ของรหัสผ่านมีขนาด 128 บิต ได้ค่า RlSj6p07xTval8BkDBKG/O และผลลัพธ์ค่าแฮชของรหัสผ่านมีขนาดความยาว 184 บิต ได้ค่า 2cN1.kgYk3kqUb3v5en13YLupn07.i2 โดยรูปแบบของผลลัพธ์เมื่อผ่านการทำงานแล้วจะประกอบด้วยส่วนตั้งต้นของอัลกอริทึม Bcrypt คือ \$2y\$ ถัดไป คือ ส่วนขยายจำนวนรอบของอัลกอริทึม เช่น 10 จะได้ค่า 10\$ หลังจากนั้นจะต่อด้วยผลลัพธ์ค่าชอลท์ของรหัสผ่านที่ได้จากการสุ่ม และสุดท้ายจะต่อท้ายด้วยผลลัพธ์ค่าแฮชของรหัสผ่าน เมื่อนำมารวมกันแล้วแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งผลลัพธ์ของค่าชอลท์ที่ได้จากการสุ่มของรหัสผ่านและผลลัพธ์ค่าแฮชนี้จะถูกนำลงไปจัดเก็บในฐานข้อมูลต่อไป



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลลัพธ์ค่าแฮชจากอัลกอริทึม Bcrypt

ตรวจสอบความถูกต้องของรหัสผ่านสามารถทำได้โดยเมื่อเริ่มต้นการทำงานจะรับรหัสผ่านตั้งต้นที่ต้องการตรวจสอบยกตัวอย่างเช่น รหัสผ่านที่รับเข้ามาคือ “password” เมื่อรับเข้ามาระบบจะทำการนำค่าชอลท์ของรหัสผ่านที่จัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลเพื่อนำมาต่อท้ายกับรหัสผ่านตั้งต้นที่รับเข้ามา คือ DM<9^C%I ซึ่งก็คือชอลท์ของรหัสผ่าน “password” ที่ได้ทำการจัดเก็บตั้งแต่เริ่มต้นในกระบวนการสร้างรหัสผ่านครั้งแรก เมื่อได้ผลลัพธ์ของค่าชอลท์แล้วจะนำรหัสผ่านตั้งต้นรวมกับค่าชอลท์ของรหัสผ่านจากฐานข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้คือ “passwordDM<9^C%I” ต่อจากนั้นจะนำค่ารหัสผ่านที่รวมกับค่าชอลท์มาทำการสุ่มหาค่าชอลท์ของรหัสผ่านด้วยกระบวนการทำงานของอัลกอริทึม Bcrypt ตามจำนวนรอบที่กำหนดคือ 10 แล้วทำการหาผลลัพธ์ค่าแฮชของรหัสผ่านตั้งต้นที่รวมกับค่าชอลท์เมื่อได้ผลลัพธ์แล้วนำมาทำการ

เปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ที่คำนวณกับค่าผลลัพธ์ที่จัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลว่าผลลัพธ์ของค่าแฮชที่ได้มีค่าตรงกันหรือไม่ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบแล้วถ้าผลลัพธ์มีค่าที่ตรงกันก็แสดงให้เห็นว่ารหัสผ่านที่รับเข้ามาคือ ค่าเดียวกันกับค่าที่จัดเก็บไว้ แต่ถ้าค่าไม่ตรงกันก็แสดงให้เห็นว่าค่าของรหัสผ่านตั้งต้นที่รับเข้ามาไม่ใช่ค่าเดียวกันที่ถูกจัดเก็บไว้นั่นเอง

ผลการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยเทคนิควิธีการแทรกซอลท์ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt ผู้วิจัยได้ทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ด้านความเร็วในการทำงานและด้านความทนทานต่อการโจมตีดังนี้

1. ผลทดสอบด้านระยะเวลาในการทำงาน

การทดสอบด้านความทนทานต่อการโจมตีแล้วผู้วิจัยได้ทำการทดสอบด้านความเร็วในการทำงาน โดยทำการทดสอบโดยการสร้างและจัดเก็บรหัสผ่านด้วยวิธีการที่นิยมใช้กันปัจจุบัน [14] จัดเก็บลงในฐานข้อมูลซึ่งข้อมูลของรหัสผ่านที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมว่าเป็นรหัสผ่านที่มีผู้ใช้นิยมใช้มากซึ่งประกอบด้วยรหัสผ่านทั้งหมด 10,000 รหัสผ่าน [15] ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าวิธีการที่ผู้วิจัยได้นำเสนอใช้เวลา 2.59 มิลลิวินาทีต่อรหัสผ่าน ซึ่งช้ากว่าวิธีการแบบไม่มีซอลท์ที่ใช้เวลาเพียง 2.01 มิลลิวินาที และแบบ Double md5 ที่ใช้เวลาเพียง 2.04 และแบบ Fix salt ที่ใช้เวลา 2.11 มิลลิวินาที และใช้เวลาใกล้เคียงกับวิธีการแบบ Bcrypt ปกติซึ่งมีขนาดความยาวของผลลัพธ์เท่ากันที่ใช้เวลา 2.24 มิลลิวินาที ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เวลาที่ใช้ในการสร้างรหัสผ่านในกระบวนการต่าง ๆ

รูปแบบวิธี	เวลา (มิลลิวินาที)
No salt 128 bit (md5(\$password))	2.01
Double md5 128 bit (md5(md5(\$password)))	2.04
Fix salt 128 bit (md5(\$password.fixsalt))	2.11
Bcrypt 184 bit (bcrypt(\$password))	2.24
Bcrypt * 184 bit (bcrypt(\$password+salt))	2.59

* วิธีที่นำเสนอ

2. ผลการทดสอบด้านความทนทานต่อการโจมตี

ทำการทดสอบโดยจำลองสถานการณ์การโจมตีโดยทำการทดสอบด้านความปลอดภัยต่อการโจมตี ซึ่งรหัสผ่านที่นำทดสอบในงานวิจัยนี้จะใช้รายการรหัสผ่านที่ทำการรวบรวมโดย SplashData [15] ซึ่งเป็นรหัสผ่านที่แย่สุดจากรายงานในปี 2016 จำนวน 25 รหัส ดังรูปที่ 4 โดยการนำรหัสผ่านทั้งหมดมาทำการจัดเก็บรหัสผ่านโดยกระบวนการแฮชฟังก์ชันด้วยอัลกอริทึม MD5 ในรูปแบบต่าง ๆ ที่กำหนดและทำการทดสอบการจัดเก็บรหัสผ่านด้วยอัลกอริทึม Bcrypt ที่ไม่ได้ทำการแทรกซอลท์และทดสอบกับรูปแบบที่ผู้วิจัยนำเสนอคือการแทรกซอลท์ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt เช่นเดียวกัน

RANK PASSWORD			
1	123456	14	abc123
2	password	15	admin
3	12345	16	121212
4	12345678	17	flower
5	football	18	password
6	qwerty	19	dragon
7	1234567890	20	sunshine
8	1234567	21	master
9	princess	22	hottie
10	1234	23	loveme
11	login	24	zaq1zaq1
12	welcome	25	password1
13	solo		

รูปที่ 4 ข้อมูลรหัสผ่านที่แย่งชิงถูกใช้ในปี 2016

หลังจากนั้นทำการทดสอบการโจมตีรหัสผ่าน ด้วยโปรแกรม Hashcat ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการโจมตีค่าแฮชโดยใช้รูปแบบคำสั่งของการโจมตี [16] ได้ดังนี้

```
hashcat -m [Hash-type] -a [Attack-mode] hashfile
```

ยกตัวอย่างเช่น

```
hashcat -m 3200 -a 3 bcrypt.txt
```

ผลการทดสอบพบว่าวิธีการจัดเก็บรหัสผ่านด้วยอัลกอริทึม MD5 ด้วยรูปแบบวิธีทั่วไป ซึ่งสามารถทำการโจมตีรหัสผ่านได้ 24 รหัส จากทั้งหมด 25 รหัส คิดเป็น 96 % จากระหัสผ่านทั้งหมด นอกจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการโจมตีจากการจัดเก็บรหัสผ่านด้วยอัลกอริทึม Bcrypt โดยที่ไม่ได้ทำการแทรกซอลทิ้งไปในรหัสผ่าน ผลจากการทดสอบพบว่าไม่สามารถทำการโจมตีได้ นอกจากนี้รูปแบบที่ผู้วิจัยนำเสนอ คือ การสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านโดยวิธีการแทรกซอลที่ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt ผลจากการทดสอบพบว่าไม่สามารถโจมตีได้เช่นกันแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการโจมตีรหัสผ่านด้วยโปรแกรม Hashcat

วิธีการจัดเก็บรหัสผ่าน	รูปแบบ	ผลการโจมตี
No salt	md5(\$password)	96 %
Double md5	md5(md5(\$password))	96 %
Fix salt	md5(\$password.fixsalt)	96 %
Bcrypt	bcrypt(\$password)	0 %
Bcrypt *	bcrypt(\$password+salt)	0 %

* วิธีที่นำเสนอ

จากผลการทดสอบด้านความทนทานการโจมตีดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยเทคนิควิธีการแทรกซอลที่ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt ที่ผู้วิจัยนำเสนอ ยังคงสามารถรักษาความลับของข้อมูลรหัสผ่านในสถานการณ์จำลองกรณีที่ระบบถูกโจรกรรมฐานข้อมูลรหัสผ่านออกไปได้ ซึ่งทำให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้นำอัลกอริทึม Bcrypt เข้ามาช่วยในการรักษาความปลอดภัยข้อมูลของผู้ใช้ในการใช้งานบริการซื้อของออนไลน์ก่อนทำการบันทึกลงฐานข้อมูลโดยทำการเข้ารหัสขนาด 512 บิต [17]

สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้แนะนำการสร้างความปลอดภัยรหัสผ่านด้วยเทคนิควิธีการแทรกซอลที่ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt โดยได้ทำการจำลองสถานการณ์การโจมตีในกรณีที่ระบบถูกโจรกรรมรหัสผ่านที่จัดเก็บในฐานข้อมูลออกไป ผลจากการทดสอบพบว่าถ้าหากต้องการรักษาความปลอดภัยของรหัสผ่านวิธีการเพิ่มซอลที่ร่วมกับรหัสผ่านมีความจำเป็นหากใช้แฮชฟังก์ชันทั่วไปในการจัดเก็บรหัสผ่าน เช่น อัลกอริทึม MD5 แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองนำแฮชฟังก์ชันจำพวก Slow Hash มาทำการทดสอบสองรูปแบบด้วยกัน คือ อัลกอริทึม Bcrypt อย่างเดียวในการจัดเก็บรหัสผ่าน ซึ่งทำให้สามารถที่จะลดความเสี่ยงที่เกิดจากการโจมตีด้วยโปรแกรม Hashcat ได้ เนื่องจากอัลกอริทึม Bcrypt มีจำนวนรอบการทำงานตั้งแต่ 4 รอบ ไปจนถึง 31 รอบการทำงาน ซึ่งส่งผลให้การประมวลผลของการสร้างค่าแฮชของผลลัพธ์มีความช้าหรือเร็วขึ้นขึ้นอยู่กับความเร็วของการประมวลผลของซีพียูที่ใช้ในการประมวลผลและยังถ้าหากใช้วิธีการแทรกซอลที่ร่วมกับแฮชฟังก์ชันโดยใช้อัลกอริทึม Bcrypt ที่ผู้วิจัยนำเสนอ ก็ยังคงไม่สามารถโจมตีได้ซึ่งทำให้สามารถรักษาความลับของรหัสผ่านเอาไว้ได้เช่นกัน ถึงแม้ว่าระยะเวลาในการสร้างรหัสผ่านที่ใช้รูปแบบอัลกอริทึม Bcrypt ที่ผู้วิจัยนำเสนอ คือ การเพิ่มซอลที่เข้าไปจะมีระยะเวลายาวกว่ารูปแบบ Bcrypt เพียงอย่างเดียว แต่การแทรกซอลที่เพิ่มเติมจะช่วยให้มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการประมวลผลที่ช้ากว่ารูปแบบของอัลกอริทึม Bcrypt เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะทำให้การโจมตีสามารถทำได้ช้าลงเช่นเดียวกัน ทำให้รูปแบบอัลกอริทึม Bcrypt แบบเพิ่มซอลที่มีความปลอดภัยเพิ่มมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในอนาคตสามารถทำการทดสอบการโจมตีได้ด้วยรูปแบบวิธีอื่น หรือทำการทดสอบด้วยโปรแกรมอื่นที่ใช้ในการโจมตี

References

- [1] Stallings, W. (2005). **Cryptography and Network Security**. Prentice Hall
- [2] Kumari, C. S. and Rani, M. D. (2013). Hacking Resistance Protocol for Securing Passwords using Personal Device. In **7th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)**. pp. 458-463
- [3] Kumar, H. (2013). Rainbow Table to Crack Password using MD5 Hashing Algorithm. In **IEEE Conference on Information and Communication Technologies**.

- [4] Li, P., Sui, Y., and Yang, H. (2010). The Parallel Computation in One-Way Hash Function Designing. In **International Conference on Computer, Mecharronics, Control and eLectornic Engineering (CMCE)**. pp. 189-192
- [5] Provos, N. and Mazerries, D. (1999). A Future Adaptable Password Scheme. In **Proceedings of the FREENIX Track: 1999 USENIX Annual Technical Conference, June 6-11, 1999**. Monterey, California, USA 1999.
- [6] Cindy, M., Kioon, A., Wang Z., and Deb, S. (2013). Security Analysis of MD5 algorithm in Password Storage. In **Proceeding of the 2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation, (ISCCCA-13)**. DOI: 10.2991/isccca.2013.177.
- [7] Boonkrong, S. (2012). Security of Passwords. **Journal of Information Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 112-117
- [8] Sood, S. K. Sarje, A. K., and Singh, K. (2009). Cryptanalysis of Password Authentication Schemes: Current Status and Key Issues. In **Methods and Models in Computer Science, 2009. ICM2CS 2009. Proceeding of International Conference on**, Dec 2009. pp. 1-7
- [9] Ma, W., Campbell, J., Tran, D., and Kleeman, D. (2010). Password Entropy and Password Quality. In **4th International Conference on Network and System Security (NSS)**. pp. 583-587
- [10] Zheng, X. and Jin, J. (2012). Research for the Application and Safety of MD5 Algorithm in Password Authentication. In **Proceedings of the 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)**. pp. 2216-2219
- [11] Gauravaram, P. (2012). Security Analysis of salt||password Hashes. In **Advanced Computer Science Applications and Technologies (ACSAT), 2012 International Conference on**. pp. 25-30
- [12] Kumar, H., Kumar, S., Joseph, R., Kumar, D., Shrinarayan Singh, S. K., Kumar, P., and Kumar, H. (2013). Rainbow Table to Crack Password using MD5 Hashing Algorithm. In **IEEE Conference on Information Communication Technologies (ICT)**. pp. 433-439
- [13] Boonkrong, S. and Somboonpattanakit, C. (2016). Dynamic Salt Generation and Placement for Secure Password Storing. **International Journal of Computer Science**. Vol. 43, No. 1, pp. 27-36
- [14] Whitney, L. (2017). **Millions of LinkedIn passwords reportedly leaked online**. Access (4 July 2017). Available (<https://www.cnet.com/news/millions-of-linkedin-passwords-reportedly-leaked-online/>)
- [15] Slain, M. (2016). **Worst Passwords of 2016**. Access (14 March 2017). Available (<https://www.teamsid.com/worst-passwords-2016>)
- [16] University of South Wales: Information Security & Privacy. (2013). **Kali How to crack passwords using Hashcat - The Visual Guide**. Access (14 March 2017). Available (<http://uwnthesis.wordpress.com/2013/08/07/kali-how-to-crack-passwords-using-hashcat/>)
- [17] Sriramya, P. and Karthika, R. A. (2015). Providing Password Security By Salted Password Hashing Using Bcrypt Algorithm. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**. Vol. 10, Issue 13, pp. 5551-5556



การปรับปรุงลีโอนาร์ไคต์และดินแดงเป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์
ออกจากแก๊สชีวภาพ

Modification of Leonardite and Red Clay as Adsorbents for H₂S Removal from Biogas

อาทิตย์ อัสวสุชี^{1*} คันธพจน์ ศรีสถิตย์² และตะวัน สุขน้อย³

Received: May, 2017; Accepted: July, 2017

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ใช้ลีโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ได้จากการทำเหมืองแม่เมาะซึ่งมีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาเป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ การทดลองดำเนินการโดยใช้แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่มีแก๊สมีเทน 72 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 เปอร์เซ็นต์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 4,400 พีพีเอ็ม ซึ่งวิเคราะห์โดยเครื่องจีโอเทค จีเอ 5000 ตัวดูดซับบรรจุในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร เพื่อให้แก๊สชีวภาพไหลผ่านอย่างต่อเนื่องในอัตรา 50 มิลลิลิตรต่อนาที ผลปรากฏว่าความจุในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลีโอนาร์ไคต์และดินแดงมีค่า 0.2087 และ 0.0134 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อปรับปรุงลีโอนาร์ไคต์และดินแดงโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (5 - 40 เปอร์เซ็นต์) และถ่านกะลามะพร้าว (15 - 70 เปอร์เซ็นต์) สามารถเพิ่มความจุในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อเปรียบเทียบกับลีโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ไม่ได้รับการปรับปรุง จากการคำนวณความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ลีโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการปรับปรุงสามารถใช้เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพสำหรับใช้ในชุมชนได้

คำสำคัญ : ลีโอนาร์ไคต์; ดินแดง; ไฮโดรเจนซัลไฟด์; แก๊สชีวภาพ; โซเดียมไฮดรอกไซด์; ถ่านกะลามะพร้าว

¹ Innovative Materials for Energy and Environment Research Group, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

² Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok

³ Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

* Corresponding Author E - mail Address: ausavasukhi@gmail.com

Abstract

In this study, leonardite and red clay obtained from Mah Moh mine, which they were utilized as low cost and eco-friendly adsorbents for hydrogen sulphide (H_2S) removal from biogas. The experiments were performed with a synthetic biogas: 72 % CH_4 , 28 % CO_2 and 4,400 ppm H_2S . The adsorbents were packed in a column of 3.0 cm in diameter. Geotech GA5000 was used to analyze synthetic biogas, at the continuous flow rate of 50 mL/min. The H_2S adsorption capacity of leonardite and red clay were 0.2087 and 0.0134 mg/g, respectively. Modified leonardite and red clay were upgraded by sodium hydroxide (NaOH) (5 - 40 %) and coconut shell biochar (CSB) (15 - 70 %) can provide higher H_2S adsorption capacity than the non-modified sample. From the economic feasibility calculations, the modified leonardite and red clay can be used as suitable adsorbent for H_2S removal from biogas for community use.

Keywords: Leonardite; Red Clay; Hydrogen Sulphide; Biogas; Sodium Hydroxide; Coconut Shell Biochar

บทนำ

ปัจจุบันแก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้รับการส่งเสริมทั้งจากหน่วยงานของภาครัฐและภาคเอกชนหลายแห่งเพื่อแก้ปัญหาการใช้พลังงานจากฟอสซิล (Fossil fuel) ซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดลงและมีราคาสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อนำมาใช้ในภาคครัวเรือนด้วยระบบถังหมัก ซึ่งทำให้ภาคครัวเรือนประหยัดการใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas; LPG) รวมถึงการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมสำหรับเป็นเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามแก๊สชีวภาพนอกจากจะให้แก๊สมีเทน (Methane; CH_4) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแล้ว ยังให้ผลิตภัณฑ์พลอยได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide; CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide; H_2S) อีกด้วย [1] - [2] โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้มีกลิ่นรบกวนที่รุนแรง อีกทั้งยังมีสมบัติในการกัดกร่อนโลหะ [3] ทำให้หัวเตาทุ้มเกิดเป็นสนิมอุดตัน และทำให้เครื่องยนต์เกิดการสึกหรอได้ ทำให้การส่งเสริมการพัฒนาพลังงานทดแทนจากแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นอยู่ในวงจำกัด ดังนั้นเพื่อให้การส่งเสริมการใช้แก๊สชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนอย่างยั่งยืนจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนมากับแก๊สชีวภาพ และกระบวนการนี้จะต้องมีราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ประชาชนทั่วไปเมื่อได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีสามารถนำไปใช้ปฏิบัติได้จริง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่ามีการใช้กระบวนการดูดซับด้วยน้ำ (Water scrubbing) [4] กระบวนการดูดซับด้วยสารเคมี (Chemical absorption) เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ [5] แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [5] โมโนเอทานอลามีน [5] ไอร์ออน-เอททิลีน

ไดเอมีนเตตระอะซิติก แอซิด (Iron-ethylenediaminetetraacetic acid; Fe-EDTA) [6] การแยกด้วยเมมเบรน [7] การใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพที่เรียกว่า Microaerobic desulphurisation unit (MDU) [8] อย่างไรก็ตามกระบวนการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้ง รวมถึงจำเป็นที่จะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง และดำเนินงานโดยผู้เชี่ยวชาญ กระบวนการที่ง่าย มีราคาถูก และเหมาะสมกับผู้ผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อนำมาใช้ในภาคครัวเรือน หรือในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ได้แก่ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยพบว่าการใช้ตัวดูดซับ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด X และ Y ซึ่งทำการเติมแต่งเงิน และทองแดงโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน [9] โลหะผสมออกไซด์ซึ่งมีสังกะสีและไททาเนียมเป็นส่วนประกอบ [10] ถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการเติมแต่งโดยวิธีการฝังตัว (Impregnation) โดยใช้คอปเปอร์ (II) ไนเตรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) [11] ถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการฝังตัว 2 เปอร์เซนต์ โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI) [12] รวมถึงการพัฒนาตัวดูดซับที่มีราคาถูกลง ได้แก่ เฟอร์ริก คลอไรด์ (FeCl_3) และโซดาไฟ (NaOH) ร่วมกับปูนซีเมนต์และทราย [13] ถ่านกัมมันต์ ซักลิ่งเทิลิกปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ซักลิ่งเทิลิกไม่ปรับสภาพและถ่านกัมมันต์ร่วมกับซักลิ่งเทิลิกไม่ปรับสภาพ [14]

แม้ว่าตัวดูดซับดังกล่าวจะสามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีขั้นตอนการเตรียมที่ยุ่งยาก รวมถึงมีการใช้สารเคมีที่มีราคาแพงและเป็นอันตราย จึงมีความพยายามที่จะใช้ลิโอนาร์ไต์ (Leonardite) และดินแดง (Red clay) [15] เป็นตัวดูดซับที่ได้จากธรรมชาติซึ่งหาได้ง่าย ราคาไม่แพง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่ากำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยลิโอนาร์ไต์ และดินแดงเป็นวัสดุที่มีมูลค่าต่ำที่ได้จากการทำเหมืองแร่ลิโนไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปัจจุบันวัสดุนี้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จนกลายเป็นปัญหาในการจัดการ จากการศึกษาพบว่าลิโอนาร์ไต์ และดินแดงมีองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งมีโลหะทรานซิชัน (Transition metal) เช่น เหล็ก เป็นส่วนประกอบ รวมถึงมีสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง ทำให้มีศักยภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับ [15] อย่างไรก็ตาม การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ลิโอนาร์ไต์ และดินแดงเพียงลำพัง ยังมีประสิทธิภาพต่ำ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการปรับปรุงลิโอนาร์ไต์ และดินแดงให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากขึ้น โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นเบส และใช้ฟอยเหล็กซึ่งเป็นโลหะทรานซิชัน รวมถึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ เช่น อัตราส่วนของลิโอนาร์ไต์ และดินแดง ต่อสารเพิ่มประสิทธิภาพ โดยพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากความจุของการดูดซับ จนกระทั่งไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการหลุดออก (Breakthrough capacity) ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ และกลไกการดูดซับ รวมทั้งการประเมินศักยภาพการนำตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการปรับปรุงไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะช่วยทำให้การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพในชุมชน และในอุตสาหกรรมขนาดเล็กมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวดูดซับลิโอนาร์ไต์และดินแดงที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพ
นำลิโอนาร์ไต์หรือดินแดงที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับ 5, 10,

15, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการฝังตัว (Impregnation) ซึ่งทำได้โดยการหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปในลีโอนาร์โดต์หรือดินแดง ในขณะที่หยดให้ส่วนผสมสารเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวดูดซับลีโอนาร์โดต์ที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า $x\text{NaOH}/\text{Leo}$ ในขณะที่ตัวดูดซับดินแดงที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า $x\text{NaOH}/\text{RC}$ เมื่อ x คือ เปอร์เซ็นต์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในตัวอย่าง (5 - 40 เปอร์เซ็นต์) ส่วนในกรณีของการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าว (Coconut shell biochar; CSB) ทำได้โดยการนำลีโอนาร์โดต์หรือดินแดงมาผสมกับถ่านกะลามะพร้าวระดับ 15, 30, 45, 50, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน อบให้แห้ง และขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับ ตัวดูดซับลีโอนาร์โดต์ที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า $x\text{CSB}/\text{Leo}$ ส่วนของดินแดงเรียกว่า $x\text{CSB}/\text{RC}$ เมื่อ x คือ เปอร์เซ็นต์ของถ่านกะลามะพร้าวในตัวอย่าง (15 - 70 เปอร์เซ็นต์) ส่วนการเติมแต่งด้วยฟอยเหล็ก ทำได้โดยนำลีโอนาร์โดต์หรือดินแดงมาผสมกับฟอยเหล็กที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้วในระดับ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน อบให้แห้ง แล้วขึ้นรูปเป็นตัวดูดซับ ตัวดูดซับลีโอนาร์โดต์ที่เตรียมได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า $50\text{Fe}/\text{Leo}$ ส่วนของดินแดงเรียกว่า $50\text{Fe}/\text{RC}$ สำหรับการเตรียมลีโอนาร์โดต์และดินแดงที่ผ่านการเติมแต่งทั้งถ่านกะลามะพร้าวระดับ 50 เปอร์เซ็นต์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเรียกตัวดูดซับนี้ว่า $15\text{NaOH}/50\text{CSB}/\text{Leo}$ และ $15\text{NaOH}/50\text{CSB}/\text{RC}$ ตามลำดับ

2. การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ

ดำเนินการตามงานวิจัยของ Ausavasukhi, A. et al. [15] ซึ่งมีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้ นำลีโอนาร์โดต์ และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งที่ผ่านการขึ้นรูปมาศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแผงทดสอบ โดยใช้แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่มีแก๊สมีเทน 72 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 เปอร์เซ็นต์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 4,400 พีพีเอ็ม การทางองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ที่ตอนเริ่มต้น และหลังการดูดซับใช้เครื่องจีโอเทค จีเอ 5000 (Geotech GA 5000)

3. การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

การนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนอิ่มตัวแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทำได้โดยการให้ความร้อนตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวดูดซับที่ได้ไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในสภาวะเดิม

4. การศึกษากลไกการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะออกซิเดชันของไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟต (Sulfate; SO_4^{2-}) ทำได้โดยการนำตัวดูดซับภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนอิ่มตัวจำนวน 5 กรัม ไปปั่นกวนในน้ำที่ปราศจากไอออนจำนวน 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองแยกตัวดูดซับออก จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาตกตะกอนด้วยสารละลายแบเรียมไนเตรด ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 20 มิลลิลิตร และวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ที่เกิดขึ้น มากไปกว่านั้นยังสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะออกซิเดชันของไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟตโดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transformed infrared spectroscopy; FTIR) โดยการนำตัวดูดซับภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนอิ่มตัวปริมาณ 50 มิลลิกรัม ใส่ภาชนะบรรจุและนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันตั้งแต่เลขคลื่น $1,600 - 600$ เซนติเมตร⁻¹

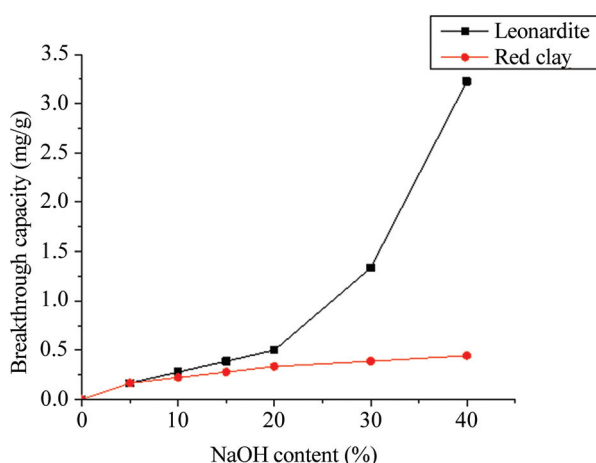
5. การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

กำหนดให้วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับมีราคา ดังนี้ ลิโอนาร์ไดต์ ดินแดง โซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกะลามะพร้าว และฟลอยเทิลิก มีราคา 0.25, 0.25, 25.7 และ 10 บาทต่อกิโลกรัม และกำหนดให้ค่าติดตั้งระบบแก๊สชีวภาพขนาด 15 ลูกบาศก์เมตร พร้อมอุปกรณ์ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 6,000 บาท มีอายุใช้งาน 5 ปี ส่วนค่ารักษาระบบการผลิตแก๊สชีวภาพกำหนดให้ใช้มูลสุกรจำนวน 1,460 กิโลกรัมต่อปี และกำหนดให้มูลสุกรมีราคา 1.50 บาทต่อกิโลกรัม โดยแก๊สชีวภาพที่ผลิตขึ้นมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ 857 พีพีเอ็ม และกำหนดให้มีการใช้แก๊สชีวภาพจากบ่อหมักด้วยอัตรา 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยใช้ 4.67 ชั่วโมงต่อวัน นอกจากนั้นยังกำหนดให้แก๊สชีวภาพจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตรทดแทนการใช้แก๊สทุ้งต้มได้ 0.46 กิโลกรัม [16] จากนั้นศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในการใช้งานตัวดูดซับที่เตรียมได้สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพกับราคาแก๊สทุ้งต้มโดยกำหนดให้แก๊สทุ้งต้ม 1 ถึงมีราคา 380 บาท (แก๊สทุ้งต้ม 1 ถังมีน้ำหนัก 15 กิโลกรัม)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ [15] พบว่าเมื่อใช้ลิโอนาร์ไดต์ และดินแดงปริมาณ 200 กรัม อุณหภูมิในการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส ลิโอนาร์ไดต์และดินแดงให้ความจุในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Breakthrough capacity) มีค่า 0.2087 และ 0.0083 มิลลิกรัมต่อกรัม อย่างไรก็ตาม เมื่อลดปริมาณลิโอนาร์ไดต์ และดินแดงเหลือ 30 กรัม พบว่าไม่สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายใต้สภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลิโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 1 ซึ่งปรากฏว่า

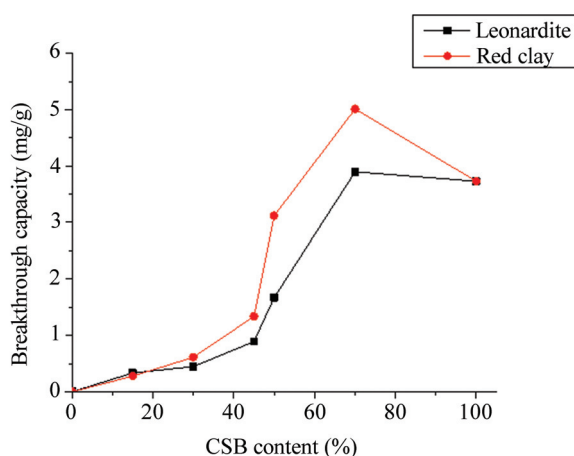


รูปที่ 1 ความจุของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จนกระทั่งเกิดการหลุดออก (Breakthrough capacity) ของตัวดูดซับลิโอนาร์ไดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม

การปรับปรุงลิโอนาร์ไคต์และดินแดงให้มีสมบัติเป็นเบสมากขึ้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์มีค่าสูงขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับลิโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ไม่ได้รับการปรับปรุง จากรูปที่ 1 เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ (5NaOH/Leo และ 5NaOH/RC) จะให้ Breakthrough capacity เป็น 0.1670 และ 0.1670 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยในกรณีของลิโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ (40NaOH/Leo และ 40NaOH/RC) จะมีค่า Breakthrough capacity เป็น 3.2279 และ 0.4452 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นเบสแก่ ทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดอ่อนได้มากขึ้น [17] - [18] อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับของดินแดงให้มีสมบัติเป็นเบสเพิ่มมากขึ้นนั้นพบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับลิโอนาร์ไคต์ที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนและอลูมิเนียมที่เป็นองค์ประกอบในดินแดง ทำให้ความเป็นเบสต่ำลง และอาจนำไปสู่การลดลงของพื้นที่ผิว [19] การเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในดินแดง (40NaOH/RC) จึงให้ค่า Breakthrough capacity เพิ่มขึ้นไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ในลิโอนาร์ไคต์ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ [20]

2. ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าว

เมื่อมีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของลิโอนาร์ไคต์และดินแดง โดยการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าว (CSB) ซึ่งเป็นวัสดุที่เตรียมได้จากการเผ่าถ่านกะลามะพร้าวในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ให้ผลดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่า Breakthrough capacity ของตัวดูดซับลิโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าว (CSB)

สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าถ่านกะลามะพร้าวที่มีสมบัติเป็นรูพรุนมีความสามารถในการดูดซับสูง โดยถ่านกะลามะพร้าวจำนวน 30 กรัม (100 % CSB) ให้ค่า Breakthrough capacity เท่ากับ 3.7289 มิลลิกรัมต่อกรัม อย่างไรก็ตามถ่านกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับที่มีราคาสูงกว่าตัวดูดซับลิโอนาร์โดต์และดินแดง ดังนั้นการใช้ลิโอนาร์โดต์และดินแดงเป็นส่วนผสมจะช่วยลดต้นทุนในการผลิต แต่ยังคงประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพ นอกจากนี้ลิโอนาร์โดต์และดินแดงยังช่วยในการขึ้นรูปถ่านกะลามะพร้าวโดยทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) ทำให้เหมาะสมกับการเตรียมตัวดูดซับไปใช้งานในสภาวะจริงที่มีอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพสูง โดยกรณีของลิโอนาร์โดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ (15CSB/Leo และ 15CSB/RC) จะให้ค่า Breakthrough capacity เป็น 0.3339 และ 0.2783 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกะลามะพร้าวให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้นด้วย การใช้ถ่านกะลามะพร้าวปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ คือ 70CSB/Leo และ 70CSB/RC จะให้ค่า Breakthrough capacity เป็น 3.8958 และ 5.0090 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับชนิดเดียว (100 % CSB) ซึ่งมีค่า Breakthrough capacity เท่ากับ 3.7289 มิลลิกรัมต่อกรัม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen-Thanh D. and Bandosz T. J. [21] ที่รายงานว่า การเติมเบนโทไนด์เป็นตัวช่วยประสานถ่านกัมมันต์ที่มีการเติมแต่งโลหะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าลิโอนาร์โดต์และดินแดงสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับและตัวประสาน โดยไม่มีส่วนรบกวนรูพรุนของถ่านกะลามะพร้าวให้เกิดการอุดตัน (Pore blocking) จนทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำลง ดังนั้นลิโอนาร์โดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวระดับ 70 เปอร์เซ็นต์ จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพได้ในระดับที่พอใจ

3. ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าวและเบส

ผลการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของลิโอนาร์โดต์และดินแดงที่เติมแต่งด้วยวัสดุต่าง ๆ ได้แก่ ถ่านกะลามะพร้าว โซเดียมไฮดรอกไซด์ และฟอยเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย 15NaOH/Leo, 50CSB/Leo, 15NaOH/50CSB/Leo และ 50Fe/Leo สำหรับลิโอนาร์โดต์ และ 15NaOH/RC, 50CSB/RC, 15NaOH/50CSB/RC และ 50Fe/RC สำหรับดินแดง ผลการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Breakthrough capacity ของตัวดูดซับลิโอนาร์โดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าว ฟอยเหล็ก และโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่า Breakthrough capacity (mg/g)
15NaOH/Leo	0.3896
50CSB/Leo	1.6696
15NaOH/50CSB/Leo	4.2297
50Fe/Leo	0.1670

ตารางที่ 1 ค่า Breakthrough capacity ของตัวดูดซับลิโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วย ถ่านกะลามะพร้าว ฝอยเหล็ก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ต่อ)

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่า Breakthrough capacity (mg/g)
15NaOH/RC	0.2783
50CSB/RC	3.1167
15NaOH/50CSB/RC	1.3357
50Fe/RC	0.1670

สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม

จากตารางที่ 1 พบว่าการใช้ลิโอนาร์ไคต์ที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ (15NaOH/50CSB/Leo) จะให้ Breakthrough capacity มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.2297 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าลิโอนาร์ไคต์ที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ระดับ 15 เปอร์เซ็นต์ (15NaOH/Leo) และลิโอนาร์ไคต์ที่เติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าวระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ (50CSB/Leo) เนื่องจากมีตำแหน่งที่ว่างในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการใช้ ดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าวระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ (15NaOH/50CSB/RC) จะให้ค่า Breakthrough capacity เป็น 1.3357 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการใช้ 50CSB/RC ทั้งนี้อาจเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมแต่งเพิ่มเข้าไปอาจทำ ปฏิกิริยากับซิลิกอนและอลูมิเนียมที่เป็นองค์ประกอบในดินแดง ทำให้ความเป็นเบสต่ำลง และนำไปสู่การลดลง ของพื้นที่ผิว [19] ดังนั้นในกรณีของการปรับปรุงสมบัติการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ ของลิโอนาร์ไคต์ อาจทำได้ทั้งการปรับปรุงทางเคมีโดยการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีสมบัติเป็นเบส และการใช้วัสดุที่เป็นรูพรุน เช่น ถ่านกะลามะพร้าว รวมถึงการใช้วัสดุข้างต้นมาเป็นส่วนผสมร่วมกัน จะช่วยทำให้ลิโอนาร์ไคต์เป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4. ประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ได้รับการเติมแต่งด้วยฝอยเหล็ก

ผลการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของลิโอนาร์ไคต์และดินแดงโดยการเตรียมให้เป็นวัสดุ ประกอบที่มีส่วนผสมของฝอยเหล็ก แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าการเติมแต่งฝอยเหล็กลงในลิโอนาร์ไคต์ และดินแดงระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ (50Fe/Leo และ 50Fe/RC) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของ ลิโอนาร์ไคต์และดินแดงได้ เนื่องจากโลหะเหล็กทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ [22] อย่างไรก็ตาม โลหะเหล็กมีพื้นที่ผิวดำทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่าการเติมแต่งถ่านกะลา มะพร้าวในระดับที่เท่ากัน

5. การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

การศึกษานำตัวดูดซับ 60CSB/RC, 30NaOH/Leo และ 30NaOH/RC กลับมาใช้ใหม่ ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่า Breakthrough capacity (mg/g)
60CSB/RC	4.5637
หลังการดูดซับครั้งที่ 1	3.2280
หลังการดูดซับครั้งที่ 2	2.6158
30NaOH/Leo	1.3357
หลังการดูดซับครั้งที่ 1	0.1670
30NaOH/RC	0.3340
หลังการดูดซับครั้งที่ 1	0.1113

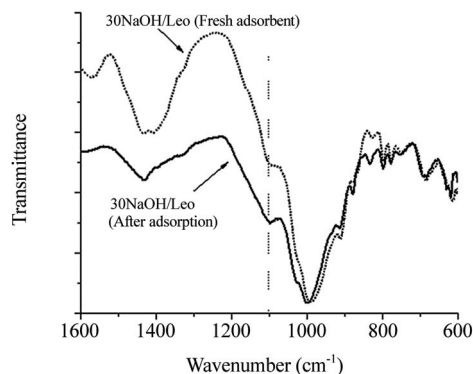
สภาวะในการดูดซับ: อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม

จากตารางที่ 2 พบว่าตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่นำกลับมาใช้ใหม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงลิโวนาร์โดต์และดินแดงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ต่ำมาก (0.1670 และ 0.1113 มิลลิกรัมต่อกรัม) ในขณะที่ดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งถ่านกะลามะพร้าว (60CSB/RC) มีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่สูง โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งแรกมีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 3.2280 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของการดูดซับครั้งแรก อย่างไรก็ตามการนำ 60CSB/RC กลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 2 กลับมีประสิทธิภาพลดต่ำลงมาก (2.6158 มิลลิกรัมต่อกรัม)

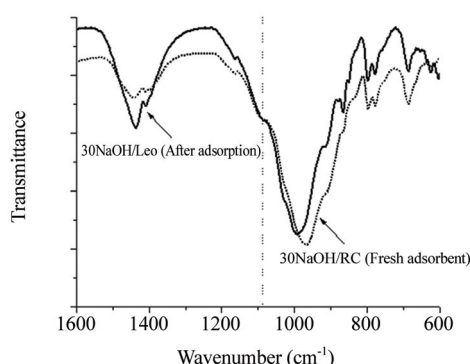
6. กลไกการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

เมื่อนำตัวดูดซับลิโวนาร์โดต์และดินแดงที่ได้รับ และไม่ได้รับการเติมแต่งไปหาปริมาณซัลเฟต (Sulfate; SO_4^{2-}) ภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยแบเรียมไนเตรต ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) พบว่าปริมาณซัลเฟตของตัวดูดซับภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อเกิดการดูดซับจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidative adsorption) เปลี่ยนเป็นซัลเฟตมากกว่านั้นในกรณีของตัวดูดซับลิโวนาร์โดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งเบส ภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถสังเกตการเกิดขึ้นของซัลเฟตได้อย่างชัดเจน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งปรากฏว่าตัวดูดซับลิโวนาร์โดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จะให้ความถี่ของการสั่น (Vibration frequency) ของหมู่ซัลเฟตเพิ่มขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 1100 เซนติเมตร⁻¹ [23] ส่วนตัวดูดซับอื่น ๆ ที่ไม่ได้รับการเติมแต่งด้วยเบส สังเกตสัญญาณการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1100 เซนติเมตร⁻¹ ได้ไม่ชัดเจน สอดคล้องกับผลของการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (ตารางที่ 2) โดยตัวดูดซับ 60CSB/RC สามารถนำกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คาดว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในรูปของซัลไฟด์ (Sulfide; S^{2-}) ที่มีอันตรกิริยากับเหล็ก และอยู่ในรูปของถ่านกะลามะพร้าว โดยมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่วนน้อยที่เกิดการออกซิเดชันเป็นซัลเฟต ในขณะที่ตัวดูดซับลิโวนาร์โดต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดการดูดซับอาจเกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นโซเดียมซัลไฟด์

(Sodium sulfide; Na_2S) และเกิดการออกซิเดชันต่อด้วยอากาศ (เมื่อนำออกมาจากภาชนะบรรจุ) เกิดเป็นโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ก่อนที่จะเกิดการออกซิเดชันต่อเป็น โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate; Na_2SO_4) [24]



รูปที่ 3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของลิโอนาร์ไคต์ที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก่อนและหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ก่อนและหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

ส่วนในกรณีของการดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าว ไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจเกิดอันตรกิริยากับเหล็กที่เป็นส่วนประกอบทั้งในกรณีของลิโอนาร์ไคต์และดินแดง (ปริมาณเหล็กประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) โดยอันตรกิริยาเกิดขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกับเหล็กซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันซึ่งมี d -ออร์บิทัล (d -orbital) ที่ว่างทำหน้าที่ รับอิเล็กตรอนได้ [25] ส่วนในกรณีของสารอินทรีย์ที่อยู่ในลิโอนาร์ไคต์ สารอินทรีย์ดังกล่าวมีหมู่ฟังก์ชัน ที่เป็นเบส เช่น หมู่เอมีน อาจเกิดอันตรกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีสมบัติเป็นกรดได้ดี [26] โดยอาจเกิดขึ้น จากไฮโดรเจนจำนวน 2 อะตอมของไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจนของหมู่เอมีน ในสารประกอบอินทรีย์ของลิโอนาร์ไคต์ [27] และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดการดูดซับนี้อาจถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากออกซิเจนที่ว่องไวที่พื้นผิว (Active surface oxygen) หรือทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง

เพื่อเป็นการยืนยันว่าสารอินทรีย์ในลิโณอาร์ไคต์มีบทบาทสำคัญในการดูดซับ จึงทำการทดลองกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในลิโณอาร์ไคต์โดยการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับของลิโณอาร์ไคต์หลังจากการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าลดลงอย่างมาก โดยไม่สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสภาวะการทดลองเดียวกันได้ แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ในลิโณอาร์ไคต์เป็นตำแหน่งที่ว่องไวในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จริง

7. การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในการใช้ตัวดูดซับลิโณอาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่ง การประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ลิโณอาร์ไคต์ และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งเป็นตัวดูดซับในเชิงพาณิชย์ พบว่า ตัวดูดซับลิโณอาร์ไคต์และดินแดงที่ได้รับการเติมแต่งด้วยถ่านกะลามะพร้าวในช่วง 45 - 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถนำมาใช้งานจริงได้ โดยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในช่วง 80 - 170 บาทต่อการใช้แก๊สชุดัมจำนวน 1 ถึง ส่วนการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในลิโณอาร์ไคต์ที่ระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ (40NaOH/Leo) สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 84 บาทต่อการใช้แก๊สชุดัมจำนวน 1 ถึง

บทสรุป

ลิโณอาร์ไคต์และดินแดงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทำเหมืองแร่ลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เมื่อนำมาปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยวิธีการฝังตัว และการใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นวัสดุประกอบสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในช่วง 80 - 170 บาทต่อการทดแทนการใช้แก๊สชุดัมจำนวน 1 ถึง (ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ) ภายหลังการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวดูดซับสามารถกำจัดโดยการฝังกลบซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากตัวดูดซับเตรียมขึ้นจากวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายหลังการดูดซับจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟตทำให้ไม่เกิดกลิ่นรบกวนของตัวดูดซับภายหลังจากการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยตามโครงการความร่วมมือระหว่างไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RDG59D0003

References

- [1] Leonzio, G. (2016). Upgrading of biogas to bio-methane with chemical absorption process: simulation and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 131, pp. 364-375. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.020
- [2] Makaruk, A., Miltner, M., and Harasek, M. (2010). Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute. **Separation and Purification Technology**. Vol. 74, pp. 83-92. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.05.010

- [3] Gerçel, O., Koparal, A. S., and Ogütveren, Ü. B. (2008). Removal of hydrogen sulfide by electrochemical method with a batchwise operation. **Separation and Purification Technology**. Vol. 62, pp. 654-658
- [4] Budzianowski, W. M., Wylock, C. E., and Marciniak, P. A. (2017). Power requirements of biogas upgrading by water scrubbing and biomethane compression: Comparative analysis of various plant configurations. **Energy Conversion and Management**. Vol. 141, pp. 2-19. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.018
- [5] Tippayawong, N. and Thanompongchart, P. (2010). Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. **Energy**. Vol. 35, Issue 12, pp. 4531-4535. DOI: 10.1016/j.energy.2010.04.014
- [6] Maia, D. C. S., Niklevicz, R. R., Arioli, R., Frare, L. M., Arroyo, P. A., Gimenes, M. L., and Pereira, N. C. (2017). Removal of H₂S and CO₂ from biogas in bench scale and the pilot scale using a regenerable Fe-EDTA solution. **Renewable Energy**. Vol. 109, pp. 188-194. DOI: 10.1016/j.renene.2017.03.023
- [7] Tilahun, E., Bayrakdar, A., Sahinkaya, E., and Çalli, B. (2017). Performance of polydimethylsiloxane membrane contactor process for selective hydrogen sulfide removal from biogas. **Waste Management**. Vol. 61, pp. 250-257. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.011
- [8] Ramos, I., Pérez, R., and Fdz-Polanco, M. (2013). Microaerobic desulphurisation unit: A new biological system for the removal of H₂S from biogas. **Bioresource Technology**. Vol. 142, pp. 633-640. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.05.084
- [9] Kumar, P., Sung, C. -Y., Muraza, O., Cococcioni, M., Hashimi, S.A., McCormick, A., and Tsapatsis, M. (2011). H₂S adsorption by Ag and Cu ion exchanged faujasites. **Microporous and Mesoporous Materials**. Vol. 146, pp. 127-133
- [10] Polychronopoulou, K., Fierro, J. L. G., and Efstathiou, A. M. (2005). Novel Zn-Ti-based mixed metal oxides for low-temperature adsorption of H₂S from industrial gas streams. **Applied Catalysis B: Environmental**. Vol. 57, pp. 125-137
- [11] Huang, C. -C., Chen, C. -H., and Chu, S. -M. (2006). Effect of moisture on H₂S adsorption by copper impregnated activated carbon. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 136, pp. 866-873
- [12] Pipatmanomai, S., Kaewluan, S., and Vitidsant, T. (2009). Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**. Vol. 86, pp. 669-674. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.07.007
- [13] Tangtaweewipat, S., Songsee, O., and Cheva-Isarakul, B. (2012). Diminishing of hydrogen sulfide from biogas for community use. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 40, pp. 201-204 (in Thai)
- [14] Tanusilp, V. and Laowansiri, S. (2012). Hydrogen sulfide removal from biogas by activated carbon and iron. In **The 9th National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference**. Kasetsart University. Nakhonpathom. Thailand. pp. 419-427 (in Thai)

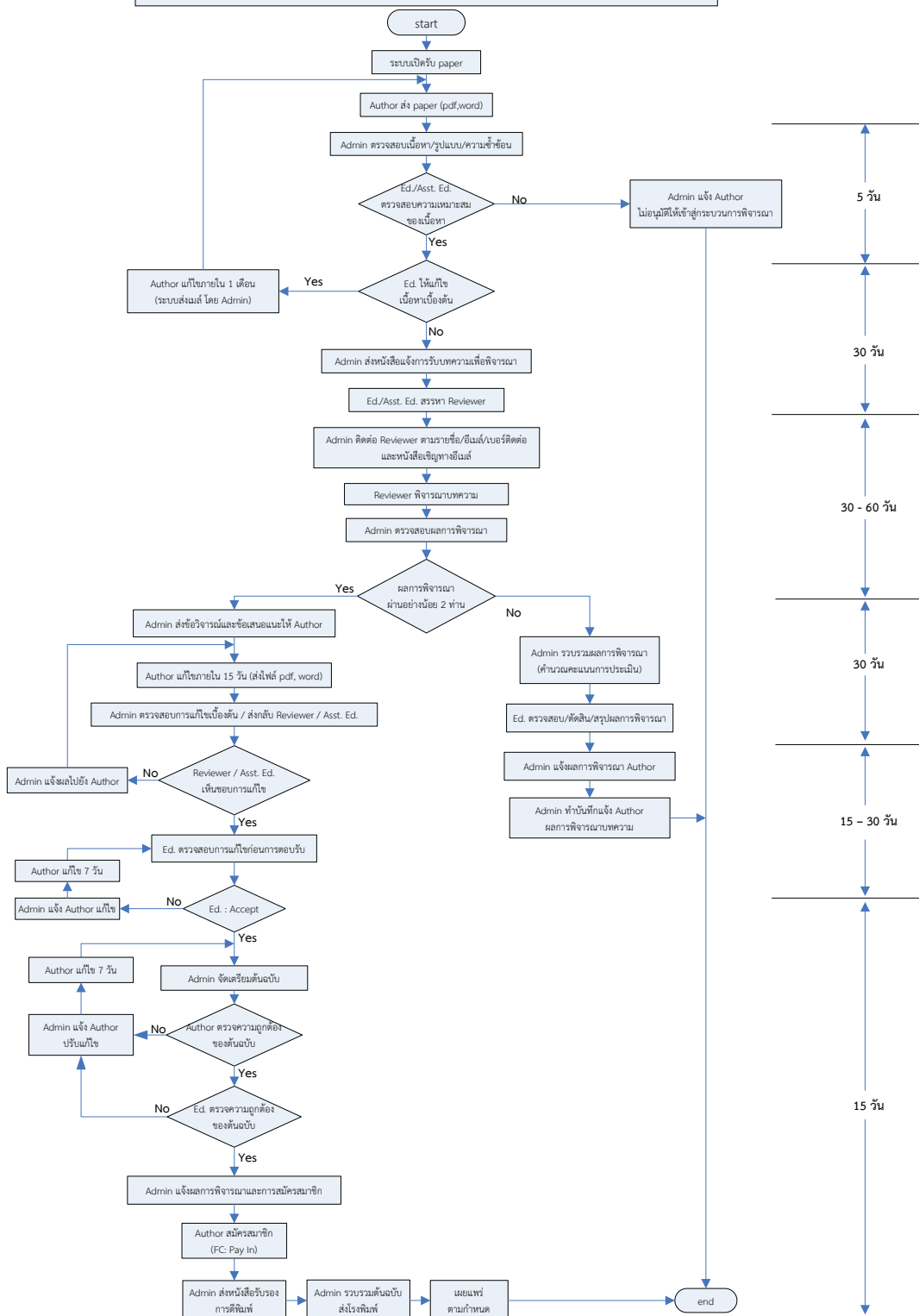
- [15] Ausavasukhi, A., Cherdnaimuang, N., Klaiklang, C., Phinitkij, D., Srisathit, K., and Sooknoi, T. (2017). Leonardite and red clay as low cost and eco-friendly adsorbents for H₂S removal from biogas. In **The 6th Phayao Research Conference**. Phayao University. Phayao. Thailand. pp. 1482-1489 (in Thai)
- [16] Phonphunthin, T., Uttamaprakrom, W., and Reubroycharoen, P. (2014). A study of biogas production potential from industrial wastewater. **Journal of Energy Research**. Vol. 11, No. 1, pp. 50-62 (in Thai)
- [17] Sitthikhankaew, R., Chadwick, D., Assabumrungrat, S., and Laosiripojana N. (2014). Effects of humidity, O₂, and CO₂ on H₂S adsorption onto upgraded and KOH impregnated activated carbons. **Fuel Processing Technology**. Vol. 124, pp. 249-257
- [18] Choo, H. S., Lau, L. C., Mohamed, A. R., and Lee, K. T. (2013). Hydrogen sulfide adsorption by alkaline impregnated coconut shell activated carbon. **Journal of Engineering Science and Technology**. Vol. 8, No. 6, pp. 741-753
- [19] Seidel, H., Csepregi, L., Heuberger, A., and Baumgartel, H. (1990). Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. Orientation dependence and behavior of passivation layers. **Journal of the Electrochemical Society**. Vol. 137, No. 11, pp. 3612-3626
- [20] Ausavasukhi, A., Kampoosaen, C., and Kengnok O. (2016). Adsorption characteristics of Congo red on carbonized leonardite. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 134, pp. 506-514
- [21] Nguyen-Thanh, D. and Bandosz, T. J. (2005). Activated carbons with metal containing bentonite binders as adsorbents of hydrogen sulfide. **Carbon**. Vol. 43, pp. 359-367
- [22] Mebel, A. M. and Hwang, D. Y. (2001). Theoretical study of the reaction mechanism of Fe atoms with H₂O, H₂S, O₂ and H⁺. **The Journal of Physical Chemistry A**. Vol. 105, pp. 7460-7467
- [23] Periasamy, A., Muruganand, S., and Palaniswamy, M. (2009). Vibrational studies of Na₂SO₄, K₂SO₄, NaHSO₄ and KHSO₄ crystals. **Rasayan Journal of Chemistry**. Vol. 2, No. 4, pp. 981-989
- [24] Sigot, L., Ducom, G., and Germain P. (2016). Adsorption of hydrogen sulfide (H₂S) on zeolite (Z): Retention mechanism. **Chemical Engineering Journal**. Vol. 287, pp. 47-53
- [25] Lin, C., Qin, W., and Dong, C. (2016). H₂S adsorption and decomposition on the gradually reduced α -Fe₂O₃(001) surface: A DFT study. **Applied Surface Science**. Vol. 387, pp. 720-731
- [26] Jaiboon, V., Yoosuk, B., and Prasassarakich, P. (2014). Amine modified silica xerogel for H₂S removal at low temperature. **Fuel Processing Technology**. Vol. 128, pp. 276-282
- [27] Ma, X., Wang, X., and Song, C. (2009). Molecular basket sorbents for separation of CO₂ and H₂S from various gas streams. **Journal of the American Chemical Society**. Vol. 131, pp. 5777-5783



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน RMUTI JOURNAL

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

- 1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย
- 1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้
 1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
 2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใหม่ ๆ
 3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
 4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- ระยะขอบ
 - ขอบบน (Top Margin) 2.54 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.54 ซม.
 - ขอบขวา (Right Margin) 2.54 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 3.17 ซม.
- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า
- รูปแบบตัวอักษร บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK
บทความภาษาอังกฤษใช้ Time New Roman
- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- จำนวนหน้า 8 - 12 หน้า หากเกินจำนวนคิดค่าใช้จ่ายหน้าละ 400 บาท (แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า)
- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียน กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 และจัดชิดซ้าย
กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย
- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 14
- ที่อยู่ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 12
กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 10
- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย” “สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
 - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 ตัวหนา
 - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 10 ตัวหนา

- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ

กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 10

- ชื่อตาราง

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “ตารางที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านบน ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 10 ตัวหนา
วางด้านบน ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 10 ไม่หนา

- ชื่อรูปภาพ

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “รูปที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Figure x” ใช้ขนาดตัวอักษร 14 ตัวหนา
วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 14 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป
ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

2. ชื่อผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียด
ต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding
Author) ด้วยการระบุ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ด้วย
กำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. บทคัดย่อ (Abstract) ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา
ประกอบไปด้วยเนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียน
ลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ
1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมาย
เดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ

4. คำสำคัญ (Key words) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน เป็นการ
กำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้สืบค้นในระบบฐานข้อมูล กำหนดให้มีความสำคัญได้อย่างน้อย 3 คำ
แต่ไม่เกิน 5 คำ

****หมายเหตุ :** เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (Materials and Methods) / วิธีดำเนินการวิจัย (Research Methodology) อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน

3. ผลการวิจัย (Results) เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/หรือ ตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. การอภิปรายผล (Discussion) เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้ายตาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัย และการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. บทสรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

7. เอกสารอ้างอิง (References) เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหา โดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (Method) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ

3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็น โดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. สรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. เอกสารอ้างอิง (References) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้ ระบบตัวเลข (Numerical System) เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมายวงเล็บ กรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับ จากน้อยไปหามาก เช่น [1] - [3] หรือ [1], [2], [5] เป็นต้น

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference list)

1) หนังสือ

[X] ผู้แต่ง.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อหนังสือ.// ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).// เมืองที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น

- [1] Herren, Ray V. (1994). The Science of Animal Agriculture. Albany, N.Y. : Delmar Publishers.

2) หนังสือแปล

[X] ผู้แต่ง.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อเรื่องของหนังสือแปล// แปลจาก(ชื่อเรื่องในภาษาเดิม).// โดย/ ชื่อผู้แปล.// ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).// เมืองที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [2] Grmek, Mirko D. (1990). History of AIDS : Emerging and Origin of a Modern Pandemic. Translated by Russell C. Maulitz, and Jacalyn Duffin. Princeton, N.J.: University Press

3) บทความหรือบทในหนังสือ

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ.// ใน/ ชื่อเรื่อง.// ชื่อบรรณาธิการหรือผู้รวบรวม(ถ้ามี).// หน้า/เลขหน้า.// สถานที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [3] McTaggart, J.M.E. (1993). The Unreality of Time. In Philosophy of Time. Robin Le Poidevin, and Murray MacBeath, eds. pp. 23-34. Oxford : Oxford University Press

4) บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ.// ชื่อบรรณาธิการ(ถ้ามี).// ใน/ ชื่อเรื่องรายงานการประชุม.// หน้า/เลขหน้า.// สถานที่พิมพ์.// สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [4] Beales, P.F. (1980). The Status of Malaria in Southeast Asia. In Proceedings of the Third Asian Congress of Pediatrics. Aree Valyasevi, and Vidhaya Mekanandha, eds. pp. 52-58. Bangkok : Bangkok Medical Publisher

5) วารสาร

[X] ผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ.// ชื่อวารสาร.// ปีที่.// ฉบับที่.// หน้า/เลขหน้า
ตัวอย่างเช่น

- [5] Vitsanusat A. and Phachirarat S. (2015). Measurement of Radon in Drinking Water at Amphur Meaung, Khonkhaen Province with Ionization chamber. RMUTI Journal Science and Technology. Vol. 8. No. 2. pp. 12-20

6) บทความในหนังสือพิมพ์

[X] ชื่อผู้เขียน.// (ปี./วัน./เดือน).// ชื่อบทความ./ใน/ชื่อหนังสือพิมพ์./หน้า/เลขหน้า
ตัวอย่างเช่น

- [6] Vitit Muntarbhorn. (1994. 21. March). The Sale of Children as a Global Dilemma. Bangkok Post. p. 4

7) บทความในสารานุกรม

[X] ชื่อผู้เขียนบทความ.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อบทความ./ใน/ชื่อสารานุกรม.// เล่มที่./: หน้า/เลขหน้า-เลขหน้า
ตัวอย่างเช่น

- [7] Morrow, Blaine Victor. (1993). Standards for CD-Rom Retrieval. Encyclopedia of Library and Information Science. Vol. 51. pp. 380-389

8) วิทยานิพนธ์

[X] ผู้เขียนวิทยานิพนธ์.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อวิทยานิพนธ์.// ระดับวิทยานิพนธ์/ชื่อสาขา/คณะ/
มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างเช่น

- [8] Phillips, O.C., Jr. (1962). The Indfluence of Ovidd on Lucan's Bellum Civil. Ph.D. Dissertation University of Chicago

9) สื่ออิเล็กทรอนิกส์ (สื่ออิเล็กทรอนิกส์) :www

[X] ผู้เขียน.// ปี.// ชื่อบทความ.// ชื่อวารสารหรือนิตยสาร.// ปีที่(เดือนหรือฉบับที่):/เลขหน้า(ถ้ามี).//
เข้าถึงเมื่อ (วัน เดือน ปีที่ค้นข้อมูล)/เข้าถึงได้จาก (ที่อยู่ของบทความหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์ URL)

ตัวอย่างเช่น

- [9] Department of the Environment and Heritage. (1999). Guide to Department and Agency Libraries. Access (17 November 2000). Available (<http://www.erin.gov.au/library/guide.html>)

10) ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

[X] ชื่อหน่วยงาน.// (ปีที่พิมพ์).// ชื่อหนังสือ/เล่มที่(ถ้ามี).// ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี).// เมืองที่พิมพ์./:
สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [10] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (2552). รายงานประจำปี 2551. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

[X] ชื่อบรรณาธิการ หรือผู้รวบรวม หรือผู้เรียบเรียง.// (ปีที่พิมพ์.)/ /ชื่อหนังสือ.//เล่มที่ (ถ้ามี)//
ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี)//เมืองที่พิมพ์/:/สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[11] เรืองวิทย์ ลิ้มปนาท. (2543). ท้องถิ่น - อินเดีย. ชลบุรี: ภาควิชาประวัติศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์
และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภavnั้น ๆ
- 3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียด
ไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ
ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภavn้อย ควรจัดให้รูปภavn้อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความ
ภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปภavn้อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปภavn้อยที่ 1



(ข) รูปภavn้อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),... แทนการกำหนดรูปภavn้อย

7) หลีกเลี่ยงการใช้รูปภาพสีหากไม่จำเป็น ทางวารสารอนุญาตให้มีการใช้รูปที่เป็นภาพสี
ในแต่ละบทความได้ไม่เกิน 2 รูปต่อบทความ หากเกินทางวารสารขอคิดค่าใช้จ่าย รูปละ 50 บาท
กรณีที่เป็นกราฟ ควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์
แบบขาว - ดำ

8) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของ
หน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

- 1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Time New Roman ขนาด 10
- 3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

$$y = ax + b \quad (1)$$

- 4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้ระบุเลขและเขียนไว้ในวงเล็บ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

- 1) กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข
- 2) เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการ และจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสาร จะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขสมาชิก

.....

(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก.....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ ☐ บทความจากวิทยานิพนธ์/สารนิพนธ์

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม

1.

2.

3.

4.

สาขาหลักของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ วิศวกรรมศาสตร์ ENG ☐ เกษตรศาสตร์ AGR ☐ สหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถิติ IG

สาขารองของบทความ (สามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)

☐ ไฟฟ้า ☐ อิเล็กทรอนิกส์ ☐ คอมพิวเตอร์

☐ สื่อสาร-โทรคมนาคม ☐ ลัทธิศาสตร์ ☐ ศิลปะและการออกแบบ

☐ วัสดุและโลหะ ☐ โยธา-สำรวจ ☐ สิ่งแวดล้อม

☐ พลังงาน ☐ สถาปัตยกรรม ☐ พืชไร่

☐ พืชสวน ☐ วิทยาศาสตร์การอาหาร ☐ ICT

☐ อุตสาหการ ☐ เคมี ☐ คณิตศาสตร์

☐ สถิติประยุกต์ ☐ เครื่องกล ☐ โภชนศาสตร์

☐ ฟิสิกส์ ☐ อื่น ๆ

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

2. ชื่อ-สกุลตำแหน่งทางวิชาการ.....

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์
2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ
3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำผู้เขียน” ที่ทางกองบรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด้านฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง
.....
โดย
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสาร มทร.อีสาน
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)

(.....)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ที่อยู่ (สำหรับส่งวารสาร).....

รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

โทรสาร.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ.....

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

☐ วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี 3 ฉบับ 1000 บาท/ปี)

โดย ☐ สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

☐ ต่ออายุสมาชิก จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน.....บาท

(ตัวอักษร).....

ซึ่งได้โอนเงินผ่านทางบัญชี ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชื่อบัญชี “วารสาร มทร.อีสาน”

บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 986-4-38484-8

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการจ่ายเงินและใบสมัครสมาชิก มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail :
rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน การสมัครสมาชิกจะมีผลสมบูรณ์
เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้สมัคร
(.....)



หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
สังกัดหน่วยงาน
มีความประสงค์ขออนการพิจารณาบทความเรื่อง
.....
.....
ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่..... และยินยอม
รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน บาท
(.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีวารสาร มทร.อีสาน
ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชื่อบัญชี “วารสาร มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์
เลขที่ 986-4-38484-8

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการถอนบทความ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่
E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลการชำระเงิน
จะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ
(.....)



หนังสือยืนยันการชำระค่าตีพิมพ์
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
สังกัดหน่วยงาน
มีความประสงค์ขอชำระค่าตีพิมพ์วารสาร มทร.อีสาน เรื่อง
.....
.....

เป็นค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์ที่เกินจากข้อกำหนดของวารสาร มทร.อีสาน

- ☐ จำนวนหน้า หน้า หน้าละ 400 บาท คิดเป็นเงิน บาท
☐ จำนวนรูปสี รูป รูปละ 50 บาท คิดเป็นเงิน บาท

รวมเป็นเงินทั้งสิ้น บาท (.....) โดยชำระเงิน
ผ่านทางบัญชีวารสาร มทร.อีสาน ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชื่อบัญชี “วารสาร
มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 986-4-38484-8

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการชำระค่าตีพิมพ์ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่
E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลจะมีผลสมบูรณ์
เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้เขียนบทความ
(.....)



RMUTI

ราชมงคลอีสาน



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol. 11 No. 1 January - April 2018



Institute of Research and Development

Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064

RMUTI E-mail : rmuti.journal@gmail.com <http://ird.rmuti.ac.th/2015>