



# RMUTL Engineering Journal

ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2566

ISSN 2465-4248

ISSN(Online) 2697-3839

## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Design of a Triple-band Microstrip Bandpass Filter with Wide Harmonic Suppression Based on Stepped-impedance Resonators Thaweewong Akkaraaertsest Suttee Tubtongdee Adisorn Sirikham Jessada Konpang and Nattapong Intarawiset	1
พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น ศุภัทร ศิลาลอย ปริญา ศรีสัตยกุล และ จิรวัดน์ ณ พัทลุง	11
การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียวและทราย เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีพลศาสตร์ ทรงฤทธิ์ พุทธลา สิทธิรักษ์ แจ่มใส จตุรงค์ ศรีทอง กัญญาภัค จอดนอก ปรีชาศาสตร์ มีเกาะ ดำเกิง จันทร์ส่อง และ สหลาก หอมวุฒิวังค์	21
ความเหมาะสมของวิธีการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโคคอสสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วย ผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว มานพ ยิ่งรัมย์	30
การประยุกต์ใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลร่วมกับแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติเพื่อจำลองแผนที่น้ำท่วมในลุ่มน้ำมูล วิรัชพร ดวงขวัญ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ และ ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์	39
การทำแผนที่แนวปะการังโดยการใช้กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจินประมวลผลข้อมูลจากดาวเทียม พีรพันธุ์ ทองวิไลพรรณ และ วิโรจน์ ละอองมณี	49



วารสารวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ได้รับการประเมินให้อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

Faculty of Engineering





# วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา RMUTL Engineering Journal

## วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นวารสารทางวิชาการจัดพิมพ์ฉบับแรกในเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ทางที่น่าสนใจในด้านวิจัยและงานบริการวิชาการ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ และมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ โดยสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ วิศวกรรมระบบควบคุม วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

## เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เลขที่ : 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

โทรศัพท์ : 0 5392 1444 ต่อ 2641, 1236

เว็บไซต์ : <https://engineering.rmutl.ac.th/journal> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

อีเมล : [EngineeringJournal@rmutl.ac.th](mailto:EngineeringJournal@rmutl.ac.th)

## ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจการนักศึกษา

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาระบบอย่างยั่งยืน

รองอธิการบดีฝ่ายแผนนโยบายและยุทธศาสตร์

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร

ผู้ช่วยอธิการบดี

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา



ผู้อำนวยการสถาบันถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน  
ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ  
ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ  
รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

### บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน คณะวิศวกรรมศาสตร์

### รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ คณะวิศวกรรมศาสตร์

### กองบรรณาธิการ

#### กองบรรณาธิการจากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จันทบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ลักขมณ	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.दनัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัครเอกพาลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ	รุจิฉานกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วตาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ	นันทะอาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสุวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ขจรศักดิ์	โสภากาจารย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภาดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ	โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริภรณ์	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธิพล	ดำรงชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวา	แก้วปลั่ง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ	หาญณรงค์ชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์	แพบัว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิโยรส	พรหมดิเรก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพงษ์	สุวลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### กองบรรณาธิการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา	ยีนยงกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิจ	เนื่องภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	จิ่นะวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร	พันธุ์ท่าช้าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวโรดม	ศิริลักษณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณชาติ	มันศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ภาณุ	อุทัยศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ณัฐชาติ	ชูเกียรติขจร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

### ฝ่ายจัดพิมพ์และเผยแพร่

นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายครรชิต	เงินคำคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาววัลลภา	วงศ์ชายะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์



## จดหมายจากบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - มิถุนายน 2566 อยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1 บทความวิจัยที่ส่งผ่านระบบได้รับการได้ผ่านการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการจะรักษาคุณภาพของวารสารให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) เป็นที่ยอมรับและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ทางวิชาการที่มีคุณภาพและทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 6 บทความ ประกอบด้วยบทความทางวิชาการในด้านวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ วิศวกรรมโยธา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และวิทยาศาสตร์ทางทะเล โดยผู้อ่านสามารถอ่านบทความฉบับปัจจุบันหรือฉบับย้อนหลังแบบออนไลน์ได้ทางเว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ส่งบทความมาพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาในการประเมินบทความ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาบทความให้มีคุณภาพ คณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ผู้สนับสนุน รวมทั้งคณะทำงานในกองบรรณาธิการวารสาร (RMUTL Eng. J.) และในโอกาสนี้ขอเชิญชวนผู้อ่านที่สนใจ ส่งบทความทางด้านวิชาการหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสาร (RMUTL Eng. J.) ในฉบับต่อ ๆ ไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



# สารบัญ

ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2566

## บทความวิชาการ

Design of a Triple-band Microstrip Bandpass Filter with Wide Harmonic Suppression Based on Stepped-impedance Resonators 1

Thaweewong Akkaralaertsest Suttee Tubtongdee Adisorn Sirikham Jessada Konpang and Nattapong Intarawiset

พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกรรณวิธีการผลิตลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น 11

ศุภภัทร ศิลาลอย ปริญา ศรีสัตยกุล และ จิรวัดน์ ณ พัทลุง

การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียวและทราย เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีพลศาสตร์ 21

ทรงฤทธิ์ พุทธลา ลิทธิรักษ์ แจ่มใส จตุรงค์ ศรีทอง กัญญาภัค จอดนอก ปรีชาศาสตร์ มีเกาะ คำเกิง จันทร์ส่อง และ สหลาภ หอมวุฒิมังค์

ความเหมาะสมของวิธีการตรวจจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอล สำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 30

มานพ ยิ่งรัมย์

การประยุกต์ใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลร่วมกับแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติเพื่อจำลองแผนที่น้ำท่วมในลุ่มน้ำมูล 39

วีรภัทร ดวงขวัญ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ และ ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์

การทำแผนที่แนวปะการังโดยการใช้กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจินประมวลผลข้อมูลจากดาวเทียม 49

พีรพันธุ์ ทองวิไลพรรณ และ วิโรจน์ ละอองมณี







## Design of a Triple-band Microstrip Bandpass Filter with Wide Harmonic Suppression Based on Stepped-impedance Resonators

Thaweewong Akkaralaertsest<sup>1</sup>, Suttee Tubtongdee<sup>1</sup>, Adisorn Sirikham<sup>1</sup>, Jessada Konpang<sup>1\*</sup> and Nattapong Intarawiset<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

2 Nanglingee Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, Thailand, 10120

<sup>2</sup>Department of Industrial Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

\*Corresponding Author: jessada.k@mail.rmutk.ac.th Phone Number: 06-4569-7560

*Received: 11 August 2022, Revised: 8 November 2022, Accepted: 9 November 2022*

### Abstract

This paper presents a triple-band microstrip bandpass filter with a broad harmonic suppression based on stepped-impedance resonators. This stepped-impedance resonator structure reduces the microstrip open-loop halfwave length resonator filter's circuit size. The straightforward design technique is based on three independently different bandpass filters combined in the triple-band filter form. The three independent filters are designed at 900, 1800 MHz, and 2450 MHz center frequency. The excited coupling feeders have also produced the transmission zeros between each filter. An acquirement of their transmission zeros between each passband results in a sharp out-off band rejection. Simulated and measured results show a remarkable agreement that the insertion losses  $/S_{21}/$  inside three passbands are less than 2.1 dB.

**Keywords:** Triple-band, microstrip bandpass filter, open-loop stepped-impedance, microwave filter.

### 1. Introduction

Recently, the advance of Radio Frequency (RF)/microwave communication requires a high quality of transmitting and receiving the signal with a small circuit component for multi-channel paths. Dual-band and multiband filters play an essential role in meeting these requirements of multiband services. Various methods are suggested for designing dual- and triple-band bandpass filters (BPFs). Microstrip dual- and triple-band-based microstrip

structures are more flexible circuit designs with low loss, small circuit size, and lightweight circuit layout filters [1]. The microwave dual-band filters are highly desirable in wireless communication systems and are discussed in many research works. A dual-band bandpass filter has been presented in [2]; however, the configuration still occupies a large area as a cascade connection of a wide-band bandpass filter and a band-stop filter. Dual-band filter design which is tunable dual-band resonators, presented with



stepped-impedance transmission-line sections [3]. Cross-coupled filters with a dual-passband response are designed as compact miniaturized hairpin resonators, which are elliptic function type designs [4]. Controllable fractional bandwidths of dual-band bandpass filters are constructed by multiple stepped-impedance resonators and parallel-coupled microstrip lines [5]. Dual-band bandpass filters (BPFs) with a simple design method are suggested using two independently controllable bandwidths [6]. Half-mode substrate integrated waveguide (HMSIW) resonators are introduced as a compact dual-band filter using the quasi-TEM mode and the TE<sub>102</sub> mode of the novel HMSIW resonator [7]. A Dual-band bandpass filter utilizing an asymmetrical stepped-impedance resonator is designed as a high-selectivity response for a dual-band filter [8]. The microstrip filters based on stepped-impedance resonators have a compact size and high signal performance resonator structure. Two adjacent coupling half-wavelength stepped-impedance resonators (SIRs) with a defective ground structure (DGS) is presented as dual-band bandpass filter [9]. Meandering stepped impedance resonators (SIRs) exhibit a size reduction in a miniaturized dual-band narrow bandpass filter (BPF) [10]. A coupling configuration of the stepped impedance resonator (SIR) has been introduced to design dual-band bandpass filters with a small circuit size [11]. Dual- and triple-band characteristics are achieved using Coupling structures with both Chebyshev and quasi-elliptic frequency responses [12].

Moreover, the dual- and triple-band filters are fabricated on various materials such as metal cavities and dielectric resonators. In [13], the dual- and triple-band tunable filters in a single cavity are achieved by putting two or three identical sets of metal-post

pairs. The manifold approach is used to design new multiband waveguide filters as in [14]. Triple-band dielectric resonator in a metallic cavity is represented in [15]. However, the design structure based on metallic waveguides is still in large constructions. A triple-band filter has been proposed in [16] with a half-wavelength resonator to design the miniaturizing planar circuit. A triple-band high temperature superconducting (HTS) filter using coupled-line stepped impedance-resonator (C-SIR) has been proposed in [17]. In [18], planar filters are designed by using a multi-stub-loaded differential-mode. Low profile and lightweight structures can be designed by substrate integrated waveguide (SIW), with a low-cost structure while maintaining good performance. SIW- are represented in [19]-[21] for dual- and triple-band resonator filters. All of these multiband filters are focused on various materials and structures. However, microstrip RF/microwave filters provide a flexible design with a small circuit, low loss, and low complexity designs.

This paper presents a triple-band microstrip bandpass filter with a wide harmonic suppression based on stepped-impedance resonators to offer low loss, low cost, and good rejection responses. The independent three resonator filters are combined using the same coupling feeder, which helps reduce tuning resonant frequencies.

## 2. Materials and Methods

The basis of the stepped-resonator filter design can be explained in this section. Microstrip stepped-impedance resonator can be represented in the form of a half-wavelength shown in figure 1(a). The stepped-impedance resonator configuration consists of two lines of different characteristic impedance  $Z_1$  and  $Z_2$ , admittance  $Y_1$  and  $Y_2$ , and electrical lengths

$\theta_1$  and  $\theta_2$ , respectively. The ABCD matrix can explain the non-uniform stepped impedance structure like the following matrix.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & jZ_1 \sin \theta_2 \\ j \frac{\sin \theta_2}{Z_2} & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 & jZ_2 \sin \theta_1 \\ j \frac{\sin 2\theta_1}{Z_1} & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & jZ_1 \sin \theta_2 \\ j \frac{\sin \theta_2}{Z_2} & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

The input admittance  $Y_{in}$  of the symmetric stepped-impedance can be expressed as;

$$Y_{in} = jY_2 \frac{2(K \tan \theta_1 + \tan \theta_2) \cdot (K - \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2)}{K(1 - \tan^2 \theta_1)(1 - \tan^2 \theta_2) - 2(1 + K^2) \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2} \quad (2)$$

Where  $K$  is the ratio of characteristic impedances of  $Z_2/Z_1 = (R_z < 1)$ . At resonant condition,  $Y_{in}$  is zero, then the first mode and second mode frequencies of the stepped-impedance resonator are explained in [22].

$$\tan \theta_1 = R_z \cot \theta_2 \quad (\text{at } f=f_1) \quad (3)$$

Where  $R_z$  is the ratio of characteristic impedance  $Z_2$  to  $Z_1$ , and the electrical length of the resonator is denoted as  $\theta_1$  and  $\theta_2$  for the first mode ( $f_1$ ). The second mode ( $f_2$ ) can be calculated as

$$\cot \theta_1 = -R_z \cot \theta_2 \quad (\text{at } f=f_2) \quad (4)$$

When ( $R_z < 1$ ), the resonator has a small size and wide stopband by selecting a ratio value of  $R_z$ .

The triple-band stepped-impedance resonator can achieve by using the filter design based on an independent filter. Firstly, the filter is designed independently at the center frequency of 900 MHz, 1800 MHz, and 2450 MHz. Based on the coupling method, the input/output external quality factors,  $Q_e$ , and the internal coupling coefficient between the adjacent resonators,  $K_{ij}$  can be expressed in the following equation.

$$Q_e = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (5)$$

$$K_{ij} = \frac{-FBW}{\sqrt{g_0 g_1}} \quad (6)$$

Where  $FBW$  is the fractional bandwidth of the bandpass filter, element values  $g_0$  and  $g_2$  are 1.0, and  $g_1$  is 1.4142 for Chebyshev lowpass filter elements [23]. The proposed triple-band filter for the center frequencies of 900MHz, 1800MHz, and 2450MHz with fractional bandwidth ( $FBW=6.6\%$  at 900 MHz, 4.4% at 1800 MHz, and 3.5% at 2450 MHz), respectively. The corresponding external quality factors ( $Q_e$ ) are 21.23 for the first band, 31.85 for the second band, and 48.49 for the third band. The coupling coefficient  $K_{12}$  is 0.046 for fundamental resonant frequency  $f_1 = 900$  MHz. The coupling coefficient  $K_{12}$  is 0.037 for the first mode  $f_1 = 1800$  MHz, and  $K_{12}$  is 0.029 at 2450 MHz, respectively.

A beginning design for the miniaturization of the filter structure is used to be the beginning structure of these triple-band stepped-impedance resonator filters, as shown in Fig. 1(b). Typically, a symmetric feeder placed near the center of the resonator has no attenuation poles. In contrast, an asymmetric feeder, including the feed placed near the resonator's edge, has two attenuation poles beside the passband, which has sharp cutoff rejection near the passband. However, the feeding position is shown in Fig. 1(b) still has two attenuation poles between the lower side- and upper-sideband. Besides, the wide harmonic suppression can be improved at the upper side-band. With the help of topology in Fig. 1(b) and the frequency response in Fig. 1 (c), the location of the feed line ( $t$ ) can be selected to meet the high performance of wide harmonic suppression on the upper side-band of the operating frequency band. Harmonic suppression is reduced by adjusting distance ( $t$ ) from the beginning point of the center ( $t=0$ ) to ( $t=20$  mm) of the

coupling feed line, as plotted in Fig. 1(c). It has been found that the harmonic level is less than -20 dB when TZs are located between the passband filter. The relationship between the external coupling factors ( $Q_e$ ) and the gap ( $g$ ) is shown in Fig. 1(d). The coupling coefficient ( $K_{ij}$ ) is depicted in Fig.1 (e).

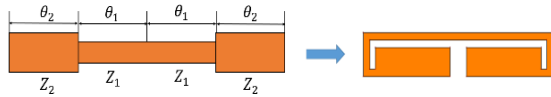


Fig. 1 (a) Basic layout of the stepped-impedance resonator ( $Rz < 1$ )

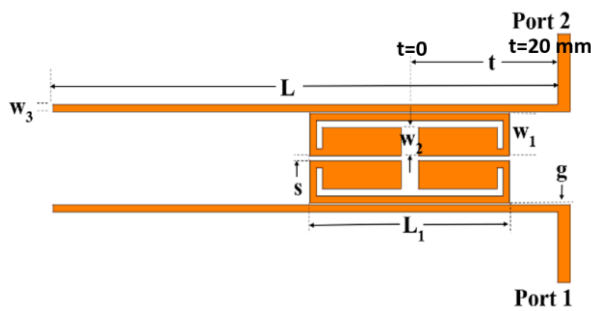


Fig. 1 (b) topology of the filter by changing feeding location

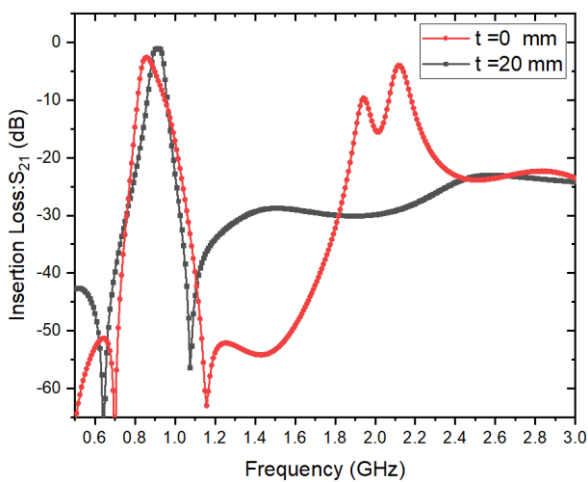


Fig. 1 (c) TZs and wide-band frequency response

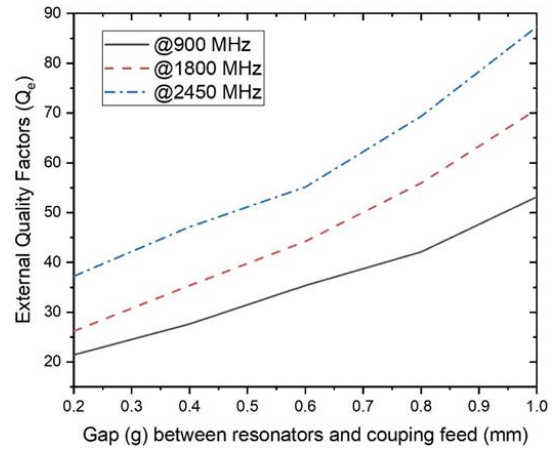


Fig. 1 (d) external coupling factors ( $Q_e$ )

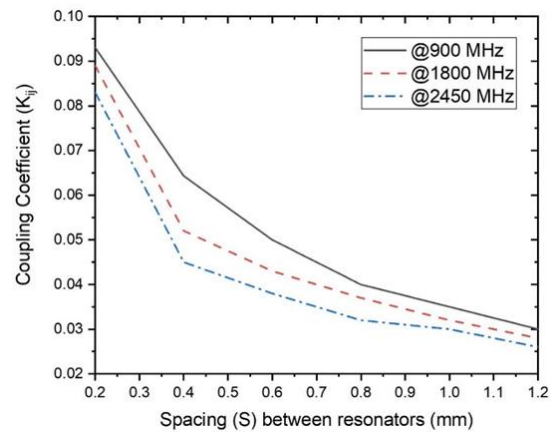


Fig. 1 (e) coupling coefficient ( $K_{ij}$ )

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Dual-band open-loop stepped-impedance resonator filter design

The filter was designed separately from each other and then combined to form dual-band and triple-band, respectively, to demonstrate the dual-band as the first example in this section. The input/output (I/O) structure is used to couple between microstrip lines and stepped-impedance resonators. An example of a dual-band resonator filter is operating at the frequency of 900 MHz, and the second resonator filter is designed at the operational frequency of 1800 MHz. The IE3D program is used to develop the filters with dielectric

substrate height  $h= 1.27\text{mm}$  and relative dielectric constant  $\epsilon_r =6.15$ .

Fig. 2 (a) shows the dual-band filter's schematic structure, designed in the form of two bandpass filters independently. The dimensions of the filters are listed in Table 1.

Table 1 The sizes of stepped-impedance dual-band and triple-band resonator

Dimensions	F1=900 MHz	F2=1800 MHz	F3=2450 MHz
Resonator width ( $w_1$ )	6mm	5.8mm	5.4mm
Stepped-impedance width ( $w_2$ )	4mm	4mm	4.29mm
Feed width ( $w_3$ )			
The gap between coupling-feed and stepped-impedance resonator ( $g$ )	1mm	1mm	1mm
Spacing between resonators( $s$ )	0.25mm	0.31mm	0.6mm
Feed length ( $L$ )			
Resonator length ( $L_1$ )			
Resonator length ( $L_2$ )	0.73mm	0.93mm	1.07mm
Resonator length ( $L_3$ )			
Distance between resonator filter ( $D_1$ )		75.13mm	
Distance between resonator filter ( $D_2$ )	29.67mm	14.4mm	9.6mm
	5.46mm	5.46mm	5.89mm

Moreover, Fig. 2(b) and 2(c) show the density of current flows on the resonator's metallic surface at the center frequencies of 900 MHz and 1800 MHz, respectively. When the dual-band operates in the first resonant filter (900 MHz), The current flows from the input port to the output port at its resonant frequency band at 900 MHz, not for the second band (1800 MHz). On the other hand, when the second resonant frequency band (1800 MHz) is operated, most electric current flows via the second resonator at its resonant frequency. The independent design can work adequately in its resonant frequency and cooperate very well when combining in the form of a dual-band filter.

The implementation of the dual-band second-order resonator filter is shown in Fig. 3(a). A circuit board plotter produces the dual-band filter prototype. The network analyzer is used to measure the reflection and insertion loss. The dual-band filter frequency response at 900 MHz and 1800 MHz is portrayed in Fig.3(b). The insertion loss in both frequency bands is better than 1.8 dB, and the passband's return loss is greater than 20 dB. The frequency responses demonstrate the emergence of the transmission zeros on both sides of the passband at 900 MHz and 1800 MHz, improving the filter performance. Most of the losses are due to the SMA connectors and fabrication process.

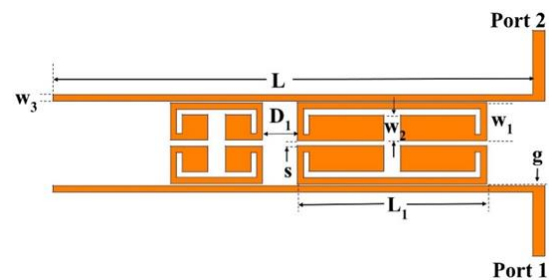


Fig. 2 (a) Layout of the dual-band filter at 900 and 1800 MHz

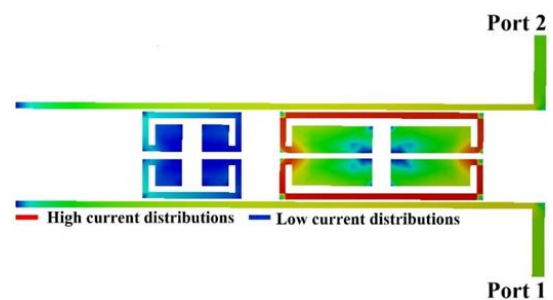


Fig. 2 (b) Current distribution of the dual-band at the first resonant frequency at 900 MHz

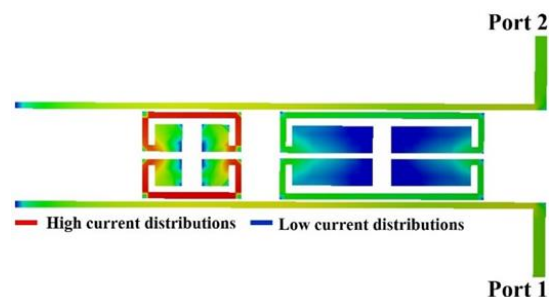


Fig. 2 (c) Current distribution of the dual-band at the second resonant frequency at 1800 MHz

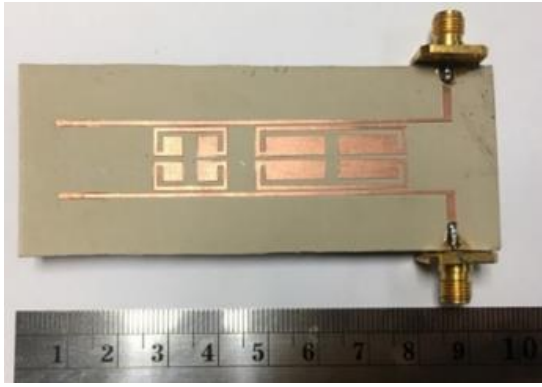


Fig. 3 (a) Fabricated dual-band filter at 900 and 1800 MHz

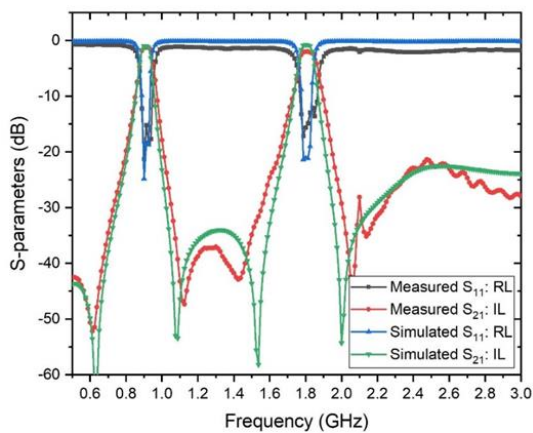


Fig. 3 (b) Frequency responses of the simulated results and the measured results.

Moreover, the principle of dual-band filter design can be proved by another dual-band frequency. Here, the dual-band filter at 1800 MHz and 2450 MHz can be introduced as another example. The dual-band filter structure was designed and simulated by the IE3D program, as shown in Fig. 4 (a). All dimensions are tabulated in table 1. Fig. 4(b) and 4(c) show the electric current distribution over the designed dual-band filter's strip conductor surface at the center frequencies of 1800 MHz and 2450 MHz, respectively.

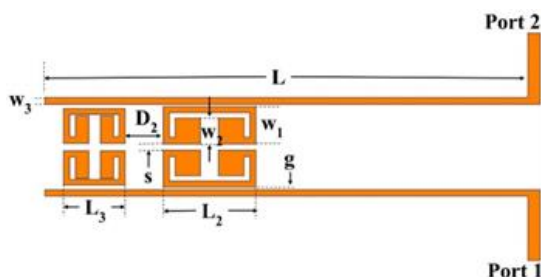


Fig. 4 (a) The filter at 1800 and 2450 MHz

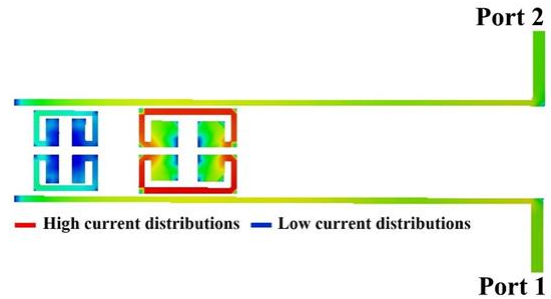


Fig. 4 (b) Distributed current at 1800 MHz

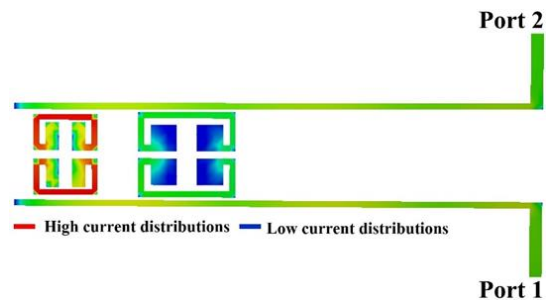


Fig. 4 (c) Distributed current at 2450 MHz

Fig. 5(a) displays the dual-band filter prototype at 1800 and 2450 MHz operating frequency, respectively. Fig. 5(b) shows the S-parameter responses of the dual-band filter in which the insertion loss inside the mid-band is better than 1.8 dB at 1800 MHz and 1.92 dB at 2450 MHz, respectively. The return losses are greater than 23 dB in both passbands. The filter exhibits two transmission zeros between the first- and the second frequency bands, improving the cut off rate of the filter response. The out-of-band rejections of both filters are more than 35 dB.

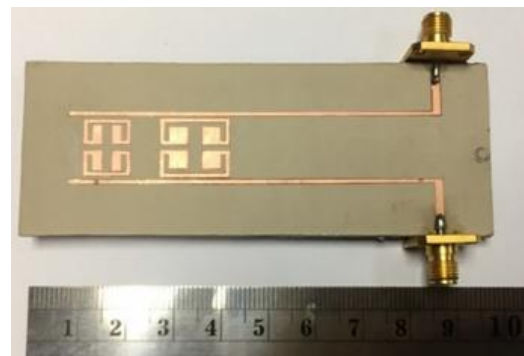


Fig. 5 (a) Fabricated dual-band filter at 1800 and 2450 MHz

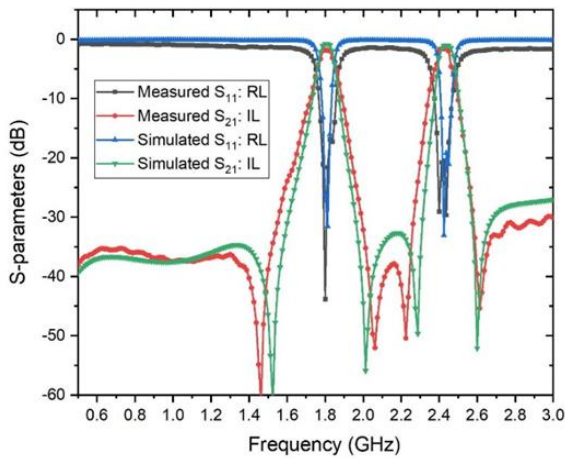


Fig. 5 (b) Frequency responses of the simulated results and the measured results

### 3.2. Triple-band stepped-resonator filter design

The triple-band filter geometry comprises three independent filters, as illustrated in Fig. 6(a). The design technique based on three filters with different frequencies is joined to form the triple-band filter. A coupled line is used to feed the signal between the input and output ports. To achieve the triple-band filter, the numerical simulator (IE3D program) can be used to simulate the current density and the S-parameters results. Fig.6(b), (c), and (d) show the distributed current flows of the designed triple-band filter at the center frequencies of 900 MHz, 1800 MHz, and 2450 MHz, respectively. All associated dimensions of the microstrip triple-band filter are detailed in Table 1.

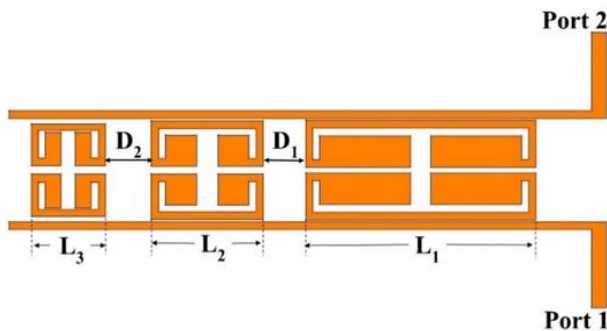


Fig. 6 (a) The triple-band resonator filter

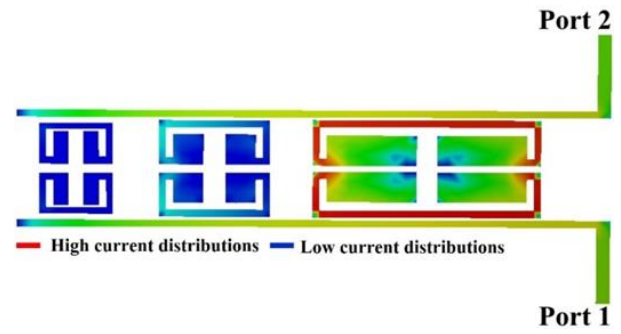


Fig. 6 (b) Distributed current at 900 MHz

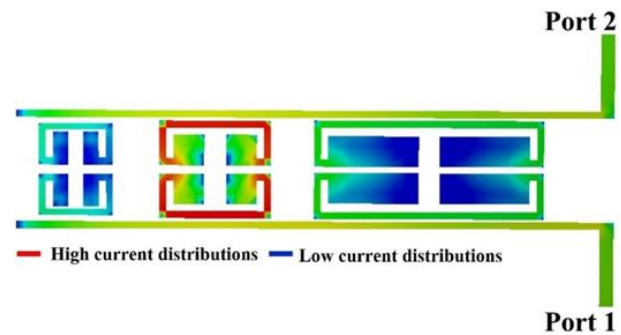


Fig. 6 (c) Distributed current at 1800 MHz

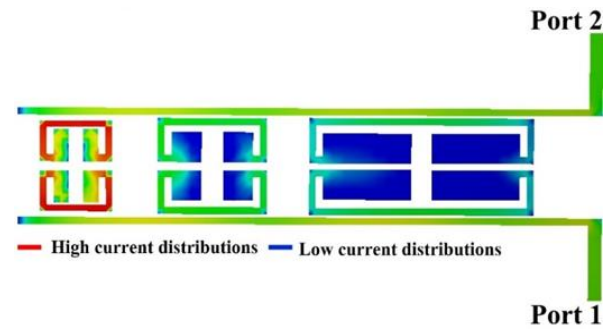


Fig. 6 (d) Distributed current at 2450 MHz

Table 2 The comparison with some previous triple-band bandpass filter (NG: Not Given)

Reference	Resonator type	Circuit size (mm)	Order	1 <sup>st</sup> /2 <sup>nd</sup> /3 <sup>rd</sup> passbands (GHz)	IL (dB)
[14]	Waveguide resonator		3	11/11.5/12	0.6/2.6
[15]	Dielectric resonator	NG	3	3.8/4/4.2	0.36/0.41
[16]	Shorted-circuit stepped-impedance resonator		2	3.49/4.13/5.57	4.15/4.18/4.5
[17]	High-temperature superconducting filter using coupled-line stepped impedance resonator				
	Microstrip stepped impedance resonator	15X20	2	1.57/3.5/5.5	0.1/0.2/0.66
This work		80X30	2	0.9/1.8/2.45	1.75/1.8/1.92

A photograph of the fabricated triple-band filter is pictured in Fig. 7(a). The designed triple-band filter was also measured using an HP network analyzer. The measured performance is shown in Fig. 7(b). The microstrip triple-band is designed at the operational frequency of 900 MHz, 1800 MHz, and 2450 MHz with fractional bandwidth (FBW=6.6% at 900 MHz, 4.4% at 1800 MHz, and 3.5% at 2450 MHz), respectively. The passband insertion loss (IL) is less than 1.75 dB, 1.8 dB, and 1.92 dB. The return loss (RL) in three channels is better than 20 dB in the passband, as shown in Fig. 7(b). The losses are mainly attributed to the conductor loss of copper. The transmission zeros are located at 600 MHz, 1100 MHz, 1500 MHz, 2000 MHz, 2300 MHz, and 2550 MHz, improving the selectivity of the triple-band filter. The microstrip triple-band filter can enhance the out-of-band rejection of more than 35 dB between each band. The comparison with some reference triple-band filter has listed in Table 2.

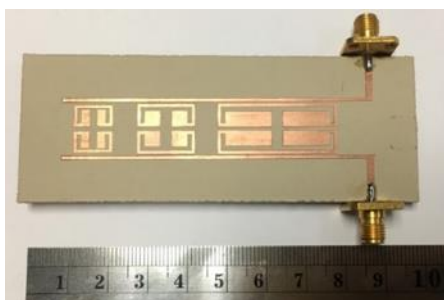


Fig. 7 (a) Fabricated triple-band filter at 900, 1800, and 2450 MHz, respectively

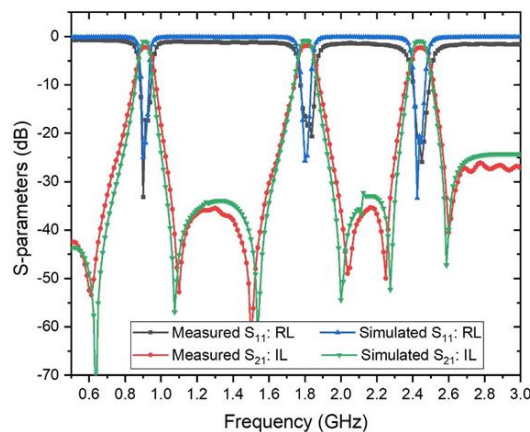


Fig. 7 (b) Frequency responses of the simulated results and the measured results

#### 4. Conclusions

This work presents the ease of a triple-band bandpass filter utilizing stepped-impedance resonators with coupled-feed lines. A compact triple-band high-performance filter is easily realized to design with multi-frequency bands. The triple-band filter is achieved by using three independently resonant filters combined input/output coupled-feed lines. All six transmission zeros are also continuously produced. As a result, the triple-band filter's out-of-band rejection performance has been greatly improved by more than 35 dB. The measured insertion losses inside the three passbands are lower than 2 dB. Finally, this proposed triple-band filter can achieve ease of structure and fabrication process.





## 5. Acknowledgment

Authors gratefully acknowledge Department of Electrical and telecommunication engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep and Department of industrial education and technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna to support the research successfully.

## 6. References

- [1] Pozar DM. Microwave engineering. John Wiley & sons; 2011 Nov 22.
- [2] Tsai LC, Hsue CW. Dual-band bandpass filters using equal-length coupled-serial-shunted lines and Z-transform technique. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2004 Apr 13;52(4):1111-7.
- [3] Lee HM, Chen CR, Tsai CC, Tsai CM. Dual-band coupling and feed structure for microstrip filter design. In 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No. 04CH37535) 2004 Jun 6 (Vol. 3, pp. 1971-1974). IEEE.
- [4] Kuo JT, Cheng HS. Design of quasi-elliptic function filters with a dual-passband response. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2004 Oct 4;14(10):472-4.
- [5] Sun S, Zhu L. Coupling dispersion of parallel-coupled microstrip lines for dual-band filters with controllable fractional pass bandwidths. In IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005. 2005 Jun 17 (pp. 2195-2198). IEEE.
- [6] Cho YH, Wang XG, Yun SW. Design of dual-band interdigital bandpass filters using both series and shunt resonators. IEEE microwave and wireless components letters. 2012 Feb 24;22(3):111-3.
- [7] Chen F, Song K, Hu B, Fan Y. Compact dual-band bandpass filter using HMSIW resonator and slot perturbation. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2014 Jul 30;24(10):686-8.
- [8] Wattikornsirikul N, Konpang J, Tubtongdee S, Sirikham A. High-selectivity Dual-band Bandpass Filter By Utilizing Asymmetrical Stepped-impedance Resonator. UTK Research Journal. 2020; 14(2) :10-8,
- [9] Wang JP, Wang BZ, Wang YX, Guo YX. Dual-band microstrip stepped-impedance bandpass filter with defected ground structure. Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2008 Jan 1;22(4):463-70.
- [10] Chu QX, Chen FC. A compact dual-band bandpass filter using meandering stepped impedance resonators. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2008 May 12;18(5):320-2.
- [11] Tsai LC. Design of dual-band bandpass filters using stepped-impedance resonators. In 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC) 2011 Aug 8 (pp. 6602-6605). IEEE.
- [12] Chen CF, Huang TY, Wu RB. Design of dual-and triple-passband filters using alternately cascaded multiband resonators. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006 Aug 28;54(9):3550-8.
- [13] Wong SW, Deng F, Wu YM, Lin JY, Zhu L, Chu QX, Yang Y. Individually frequency tunable dual-and triple-band filters in a single cavity. IEEE Access. 2017 Jun 26;5:11615-25.



- [14] Cogollos S, Micó P, Vague J, Boria VE, Guglielmi M. New design methodology for multiband waveguide filters based on multiplexing techniques. In 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) 2017 Jun 4 (pp. 741-744). IEEE.
- [15] Zhu L, Mansour RR, Yu M. Triple-band dielectric resonator bandpass filters. In 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) 2017 Jun 4 (pp. 745-747). IEEE.
- [16] Song K, Fan M, Zhang F, Zhu Y, Fan Y. Compact triple-band power divider integrated bandpass-filtering response using short-circuited SIRs. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2017 Apr 13;7(7):1144-50.
- [17] Guan X, Peng Y, Liu H, Lei J, Ren B, Qin F, Wen P, Liu F, Liu Y. Compact triple-band high-temperature superconducting filter using coupled-line stepped impedance resonator. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016 Aug 12;26(7):1-5.
- [18] Gómez-García R, Loeches-Sánchez R, Psychogiou D, Peroulis D. Multi-stub-loaded differential-mode planar multiband bandpass filters. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2017 Mar 28;65(3):271-5.
- [19] Chen XP, Wu K, Li ZL. Dual-band and triple-band substrate integrated waveguide filters with Chebyshev and quasi-elliptic responses. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2007 Dec 6;55(12):2569-78.
- [20] Tsai WL, Shen TM, Chen BJ, Huang TY, Wu RB. Triband filter design using laminated waveguide cavity in LTCC. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2014 May 13;4(6):957-66.
- [21] Wang S, Zhang D, Zhang Y, Qing L, Zhou D. Novel dual-mode bandpass filters based on SIW resonators under different boundaries. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016 Dec 23;27(1):28-30.
- [22] Zhang YP, Sun M. Dual-band microstrip bandpass filter using stepped-impedance resonators with new coupling schemes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006 Oct 2;54(10):3779-85.
- [23] Hong JS, Lancaster MJ. Microstrip filters for RF/microwave applications. John Wiley & Sons; 2004 Apr 7.



## พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น

### Parameter optimization of 7-wires strand process

ศุภัทร ศิลาลอย<sup>1\*</sup> ปริญญา ศรีสัตยกุล<sup>2</sup> จิรวัดน์ ณ พัทลุง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร จังหวัดกรุงเทพฯ 10120

Supat Silaloy<sup>1</sup> Parinya Srisattayakul<sup>2</sup> Chirawat Na-Badalung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering and Logistics, School of Engineering and Innovation,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6, Bang Phra, Si Racha, Chon Buri, Thailand, 20110

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep

2 Nanglinchi Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, Thailand, 10120

\*E-mail: supat\_si@mutto.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 06-3325-4941

Received: 4 August 2022, Revised: 15 September 2022, Accepted: 4 October 2022

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น เพื่อให้สมบัติเชิงกลเป็นตามข้อกำหนดของลูกค้า ได้แก่ แรงดึงพิสูจน์ มากกว่า 234.6 กิโลนิวตัน แรงดึงสูงสุด มากกว่า 261 กิโลนิวตัน และการยืดตัว มากกว่า 5 % ในปัจจุบันสมบัติเชิงกลลวดตีเกลียว 7 เส้นที่ผลิตได้นั้น มีสมบัติเชิงกลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งเกิดจากความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตขั้นตอนตีเกลียว ได้แก่ ความตึงลวด และ อุณหภูมิ แนวทางในการปรับปรุงจะเป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น คือ ความตึงลวด 12980 kg และอุณหภูมิ 376 °C เมื่อนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่า สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลในกระบวนการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้นได้เพิ่มมากขึ้น ได้แก่ แรงดึงพิสูจน์ 250.6595 กิโลนิวตัน แรงดึงสูงสุด 277.4124 กิโลนิวตัน และการยืดตัว 5.1985 %

**คำสำคัญ** ลวดตีเกลียว 7 เส้น สมบัติเชิงกล การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD)

#### Abstract

The objective of this research is to study the optimal conditions of mechanical properties on 7-wires strand, to comply customer's need of mechanical properties conditions respectively; the yield load > 234.6 kN, the breaking load > 261 kN and the elongation > 5%. At the present, the mechanical property of 7-wires strand does not conform to the customer's specification, which was caused by parameters of 7-wires strand process inconsistency, e.g. tension and temperature. The proposed improvement was applying the Design of Experiment



(DOE) using Central Composite Design (CCD) technique where statistical results of optimization indicated the tension of 12980 kg and temperature of 376 °C. When the appropriate values of these parameters were used in the process, it was found that the mechanical properties were increased e.g. the yield load was at 250.6595 kN, the breaking load improved to 277.4124 kN, and the elongation was developed to 5.1985 %.

**Keywords:** 7-wires strand, mechanical properties, central composite design (CCD)

### 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตเป็นกลุ่มธุรกิจหนึ่งที่มีอัตราการเติบโตอย่างต่อเนื่อง และการแข่งขันที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ผลิตจะต้องปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สร้างคุณภาพให้การบริหารภายในองค์กร เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตสินค้า และการแข่งขันทางการตลาด [1] เนื่องจากในการผลิตสินค้า ถ้าสินค้าไม่ได้คุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ เกิดของเสียตั้งแต่การเริ่มผลิตครั้งแรก เพราะพนักงานขาดประสบการณ์ในงาน ย่อมทำให้องค์กรประสบปัญหาการผลิต ในการศึกษาวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษากระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 mm ซึ่งกำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของสินค้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าด้านสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)[2] ได้แก่ แรงดึงพิสูจน์ (Yield Load) แรงดึงสูงสุด (Breaking Load) และการยืดตัว (Elongation) โดยจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment : DOE) เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพของสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า(Customer Specification) ซึ่งบทสรุปสุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้เหล่านี้ จะถูกนำมาสร้างเป็นมาตรฐานการทำงาน (Standard and Operation : S&OP) สำหรับเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นเหล่านี้ ทำให้ทางผู้วิจัยมีความต้องการศึกษาหาแนวทางการแก้ไขปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อลดปัญหาด้านคุณภาพของสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification) โดยดำเนินการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (DOE)

### 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในสภาวะปัจจุบันกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 mm ดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแสดงเป็นภาคตัดขวางได้ดังรูปที่ 2 ประสบกับปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของสินค้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification) ด้านสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ซึ่งข้อกำหนดของลูกค้าดังกล่าวนี้ คือ แรงดึงพิสูจน์ (Yield Load) > 234.6 kN, แรงดึงสูงสุด (Breaking Load) > 261 kN และการยืดตัว (Elongation) > 5%[3] แนวทางในการปรับปรุงปัญหาจะเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD)[4] โดยมีพารามิเตอร์สำคัญ 2 พารามิเตอร์ ที่ได้มาจากรายงานการผลิตและการวิเคราะห์เบื้องต้น (Pre-test) ได้แก่ ความตึงลวด (Tension : A) และอุณหภูมิ (Temperature : B)[5] สามารถแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับระดับของพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 1[6] ได้จากการกำหนดระดับปัจจัยของโปรแกรม ส่วนผลตอบสนอง (Response) จะเลือกเป็นข้อกำหนดของลูกค้าโดยให้ความสำคัญกับ การยืดตัว (Elongation : Y3) แรงดึงพิสูจน์ (Yield Load : Y1) และแรงดึงสูงสุด (Breaking Load : Y2) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำคัญตามการทดลอง CCD

ระดับพารามิเตอร์	ความตึงลวด (kg.) : A	อุณหภูมิ (°C) : B
ระดับ 1	12120	376
ระดับ 2	12440	380
ระดับ 3	13220	390
ระดับ 4	14000	400
ระดับ 5	14320	404



กรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนตีเกลียว (Stranding Process), ขั้นตอนอบอ่อน (Annealing Process) และขั้นตอนการลวด (Winding Process)

-ขั้นตอนตีเกลียว (Stranding Process) เป็นการนำลวดเส้นเดี่ยวจำนวน 7 เส้น มาตีรวมกันเป็นลวดเส้นเดี่ยว รูปที่ 3 Pay off & skip unit สำหรับใส่ลวดทั้ง 7 เส้น ใช้ก้านหน้า (First Capstan) รูปที่ 4 และก้านหลัง (Second Capstan) รูปที่ 5 ดึงลวดให้ยืดตัว โดยใช้แรงดึงระหว่างก้านหน้าและก้านหลังเพื่อให้เกิดความตึงลวดในระหว่างการผลิตที่กำหนดในแผนการทดลอง

-ขั้นตอนอบอ่อน (Annealing Process) เป็นการอบคลายความเค้นลวด [7] ณ อุณหภูมิ 370-400 °C โดยใช้อุณหภูมิที่กำหนดในแผนการทดลอง รูปที่ 6 Induction furnace และรูปที่ 7 Cooling system

-ขั้นตอนการลวด (Winding Process) เป็นการกรอลวดเพื่อเตรียมส่งลูกค้า แสดงข้อมูลดังรูปที่ 8

หลังจากผลิตเสร็จแล้ว นำมาทดสอบหาสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ดังแสดงในรูปที่ 9 ข้อมูลจากการดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองเชิงสถิติด้วยเทคนิค CCD ของกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 mm ดำเนินการทดลองตามพารามิเตอร์ในกระบวนการตีเกลียว ผ่านกระบวนการดึงลวดระหว่างก้านหน้าและก้านหลัง ผ่านกระบวนการอบอ่อนตามลำดับ ซึ่งจะแสดงกระบวนการผลิตดังรูปที่ 10 [8]



รูปที่ 1 ลักษณะลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำเร็จรูป



รูปที่ 2 ภาคตัดขวางของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น



รูปที่ 3 Pay off & skip unit



รูปที่ 4 First capstan



รูปที่ 5 Second capstan



รูปที่ 6 Induction furnace



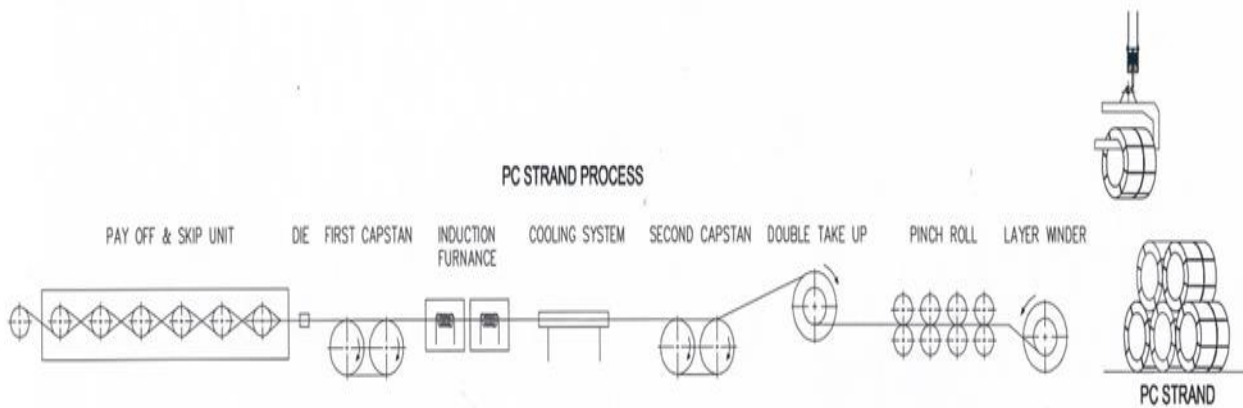
รูปที่ 7 Cooling system



รูปที่ 8 Layer Winder



รูปที่ 9 การทดสอบแรงทาสสมบัติเชิงกล



รูปที่ 10 กระบวนการผลิตลวดตีเกลียว 7 เส้น

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

หลังจากได้ข้อมูลจากการทดลอง ดังตารางที่ 2 นำมาวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) ตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง CCD

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ตามการทดลอง CCD

ลำดับ	A	B	Y1	Y2	Y3
	ความ ดึงลวด (kg)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดึง พิสูจน์ (kN)	แรงดึง สูงสุด (kN)	การ ยืดตัว (%)
1	12440	380	252.90	280.50	4.43
2	14000	380	240.70	265.40	5.67
3	12440	400	247.10	278.10	4.79
4	14000	400	239.30	266.90	5.90
5	13220	390	243.70	273.60	5.74
6	13220	390	245.90	275.40	5.56
7	13220	390	244.50	273.90	5.79
8	12120	390	248.60	279.80	4.52
9	14320	390	241.20	268.70	5.77
10	13220	376	250.40	277.60	5.46
11	13220	404	240.70	272.60	5.80
12	13220	390	245.80	275.00	5.62
13	13220	390	246.20	274.10	5.73
14	13220	390	244.30	275.80	5.81
15	12440	380	251.60	279.40	4.61
16	14000	380	242.60	267.20	5.52
17	12440	400	248.60	279.30	4.71
18	14000	400	240.60	268.00	5.77

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ตามการทดลอง CCD (ต่อ)

ลำดับ	A	B	Y1	Y2	Y3
	ความ ดึงลวด (kg)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดึง พิสูจน์ (kN)	แรงดึง สูงสุด (kN)	การ ยืดตัว (%)
19	13220	390	244.50	273.70	5.65
20	13220	390	245.70	274.00	5.71
21	13220	390	246.10	274.80	5.78
22	12120	390	247.90	278.50	4.40
23	14320	390	242.40	269.20	5.81
24	13220	376	251.00	277.90	5.54
25	13220	404	241.30	272.50	5.78
26	13220	390	245.40	275.30	5.59
27	13220	390	247.20	275.10	5.71
28	13220	390	244.80	274.60	5.80

การวิเคราะห์ผลแรงดึงพิสูจน์สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงพิสูจน์ (Y1) ได้ดังตารางที่ 3 โดยเมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) พบว่า ความดึงลวด (A) และอุณหภูมิ (B) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value <  $\alpha$  หรือ  $0.001 < 0.05$  นั่นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดึงลวดและอุณหภูมียิ่งมากมีผลทำให้แรงดึงพิสูจน์ (Y1) ลดลง ดังสมการที่ 1



$$\begin{aligned} \text{Yield Load} &= 1190 - 0.0311 \text{ Tension} \\ &+ 3.39 \text{ Temperature} - 0.000000 \text{ Tension} * \text{Tension} \\ &+ 0.00256 \text{ Temperature} * \text{Temperature} \\ &+ 0.000087 \text{ Tension} * \text{Temperature} \end{aligned} \quad (1)$$

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของแรงดึงพิสูจน์

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	5	294.031	49.005	19.31	< 0.001
A	1	190.744	190.744	75.14	< 0.001
B	1	97.804	97.804	38.53	< 0.001
A*A	1	0.391	0.391	0.15	0.699
B*B	1	0.940	0.940	0.37	0.549
A*B	1	3.645	3.645	1.44	0.244
Error	21	53.307	2.538		
Total	27	347.339			

การวิเคราะห์ผลแรงดึงสูงสุด สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงสูงสุด (Y2) ได้ดังตารางที่ 4 เมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) พบว่า ความตึงลวด (A) จะมีอิทธิพล อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value <  $\alpha$  หรือ 0.001 < 0.05 นั่นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความตึงลวดยิ่งมากมีผลทำให้แรงดึงสูงสุด (Y2) ลดลง ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} \text{Breaking Load} &= 440 - 0.0079 \text{ Tension} - \\ &0.27 \text{ Temperature} - 0.000001 \text{ Tension} * \text{Tension} \\ &- 0.00108 \text{ Temperature} * \text{Temperature} + \\ &0.000077 \text{ Tension} * \text{Temperature} \end{aligned} \quad (2)$$

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของแรงดึงสูงสุด

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	5	419.347	69.891	29.07	< 0.001
A	1	386.622	386.622	160.82	< 0.001
B	1	13.754	13.754	5.72	0.026
A*A	1	6.318	6.318	2.63	0.120
B*B	1	0.166	0.166	0.07	0.795
A*B	1	2.880	2.880	1.20	0.286
Error	21	50.485	2.404		
Total	27	469.833			

การวิเคราะห์ผลการยืดตัว สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการยืดตัว (Y3) ได้ดังตารางที่ 5 โดยเมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) พบว่า ความตึงลวด (A) และอุณหภูมิ (B) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value <  $\alpha$  หรือ 0.001 < 0.05 นั่นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความตึงลวดและอุณหภูมิยิ่งมากมีผลทำให้การยืดตัว (Y3) เพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ 3

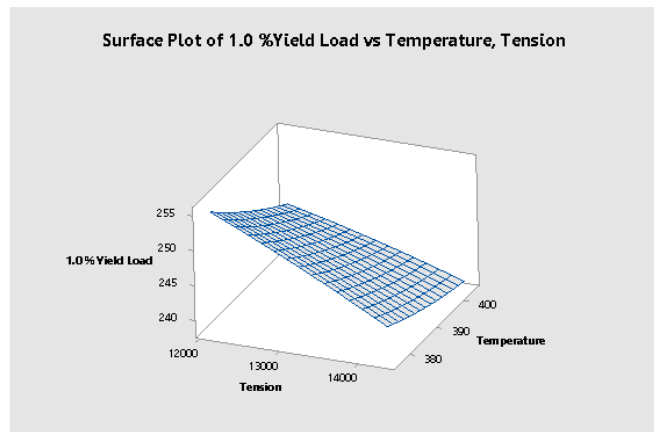
$$\begin{aligned} \text{Elongation} &= -234.2 + 0.01545 \text{ Tension} \\ &+ 0.674 \text{ Temperature} - 0.000001 \text{ Tension} \\ &* \text{Tension} - 0.000855 \text{ Temperature} \\ &* \text{Temperature} + 0.000000 \text{ Tension} * \text{Temperature} \end{aligned} \quad (3)$$

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของการยืดตัว

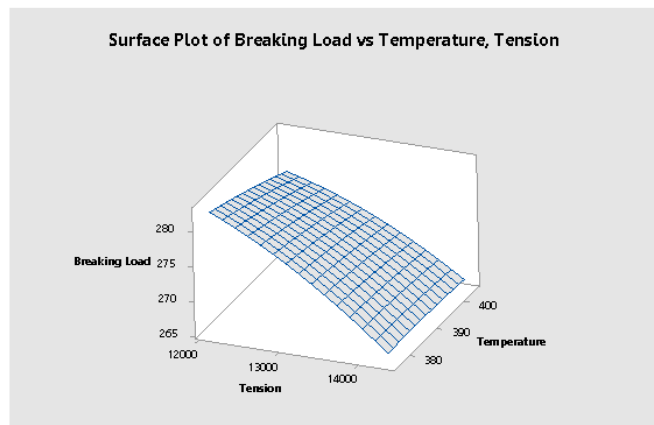
Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	5	6.17573	1.02929	97.95	< 0.001
A	1	4.08225	4.08225	388.47	< 0.001
B	1	0.19378	0.19378	18.44	< 0.001
A*A	1	1.74258	1.74258	165.82	< 0.001
B*B	1	0.10475	0.10475	9.97	0.005
A*B	1	0.00005	0.00005	0.00	0.946
Error	21	0.22068	0.01051		
Total	27	6.39641			

ในส่วนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง ในรูปที่ 11 และ 12 ระหว่างความตึงลวดและอุณหภูมิของแรงดึงพิสูจน์ และแรงดึงสูงสุด จะเห็นว่าเมื่อความตึงลวดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แรงดึงพิสูจน์และแรงดึงสูงสุดลดลง ในส่วนของอุณหภูมิส่งผลต่อแรงดึงพิสูจน์และแรงดึงสูงสุดไม่มาก ในรูปที่ 13 สามารถวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างความตึงลวดและอุณหภูมิของการยืดตัว พบว่าเมื่อความตึงลวดเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การยืดตัวเพิ่มขึ้น ในส่วนของอุณหภูมิส่งผลต่อการยืดตัวไม่มาก

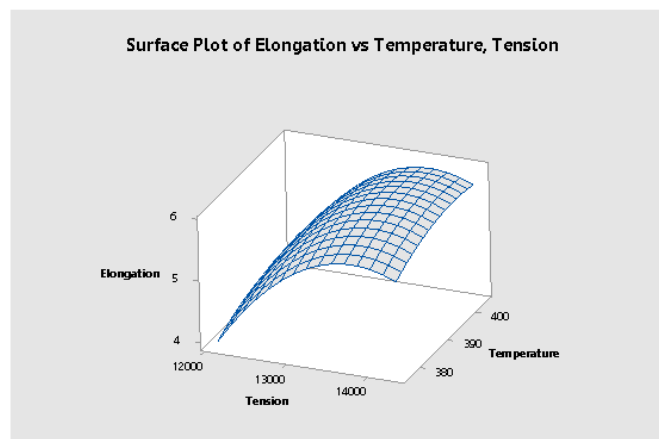




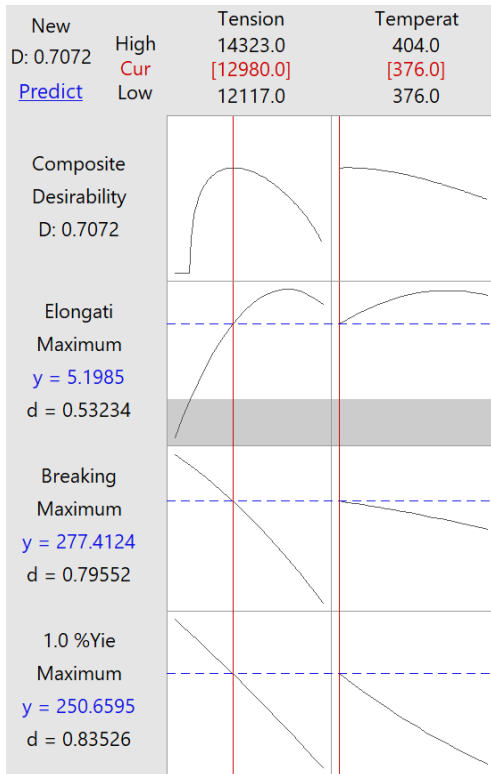
รูปที่ 11 Response surface for interaction effect of tension and temperature on yield load



รูปที่ 12 Response surface for interaction effect of tension and temperature on breaking load



รูปที่ 13 Response surface for interaction effect of tension and temperature on elongation



รูปที่ 14 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์

หลังจากได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้ว ดังรูปที่ 14 ความตึงลวด 12980 kg. และ อุณหภูมิ 376 °C ผู้วิจัยจึงนำพารามิเตอร์ไปดำเนินการผลิตจริง เพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ สรุปร่วมกันในที่ประชุมบริษัทกำหนดให้ทดลองผลิตจริงจำนวน 3 ครั้ง ดังนี้

- ครั้งที่ 1 จำนวน 10 ตัวอย่าง
- ครั้งที่ 2 จำนวน 10 ตัวอย่าง
- ครั้งที่ 3 จำนวน 10 ตัวอย่าง

มีเงื่อนไขการทดลอง ตรวจสอบผลการทดสอบสมบัติเชิงกลตัวอย่างหลังจากผลิตเสร็จสิ้นและทำรายงานการทดลองแต่ละครั้งที่ทดลองเสร็จสิ้น ถ้าครั้งที่ 1 หรือ 2 ไม่ผ่านให้หยุดการทดลองทั้งหมดทันที ซึ่งจากการทดลองเสร็จสิ้นทั้ง 3 ครั้งผลสรุปผลทดสอบสมบัติเชิงกลผ่านตามเกณฑ์ที่ลูกค้าต้องการดังตารางที่ 6 ข้อมูลการทดลองซ้ำของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จำนวน 30 ตัวอย่าง ของการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

ตารางที่ 6 ข้อมูลการทดลองซ้ำของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จำนวน 30 ตัวอย่าง

ลำดับ	A	B	Y1	Y2	Y3
	ความตึงลวด (kg)	อุณหภูมิ (°C)	แรงดึงพิสูจน์ (kN)	แรงดึงสูงสุด (kN)	การยืดตัว (%)
1	12980	376	252.30	276.60	5.14
2	12980	376	250.00	275.90	5.15
3	12980	376	250.22	276.00	5.19
4	12980	376	252.10	278.00	5.24
5	12980	376	251.10	277.30	5.20
6	12980	376	251.80	279.20	5.10
7	12980	376	249.80	276.20	5.21
8	12980	376	250.70	275.70	5.28
9	12980	376	250.20	276.20	5.21
10	12980	376	251.20	277.10	5.27
11	12980	376	250.00	275.90	5.18
12	12980	376	250.30	276.50	5.22
13	12980	376	249.80	276.10	5.17
14	12980	376	249.50	276.10	5.23
15	12980	376	251.20	277.30	5.22
16	12980	376	250.90	278.20	5.20
17	12980	376	252.10	278.60	5.21
18	12980	376	249.30	277.20	5.18
19	12980	376	249.50	277.00	5.24
20	12980	376	249.10	275.90	5.20
21	12980	376	249.90	275.90	5.21
22	12980	376	249.00	275.70	5.16
23	12980	376	250.60	277.20	5.22
24	12980	376	249.70	275.50	5.19
25	12980	376	249.00	275.20	5.24
26	12980	376	249.00	276.10	5.17
27	12980	376	249.80	275.80	5.27
28	12980	376	249.90	275.40	5.20
29	12980	376	249.90	276.20	5.22
30	12980	376	250.10	276.00	5.20



ตารางที่ 7 One-Sample Yiled Load

Null hypothesis	$H_0: \mu = 250.659$
T-Value	P-value
-0.05	0.957

ตารางที่ 7 การประมวลผลของโปรแกรม Minitab จะเห็นได้ว่าค่า P – Value อยู่ที่ 0.957 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $\alpha$  0.05 ซึ่งยอมรับ  $H_0$  นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับค่าเฉลี่ย 250.618

ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่า 1% Yiled Load คือ Tension 12980 kg. และ Temperature 376 °C จะทำให้ได้ค่า Yiled Load ที่สูงสุด คือ 250.659 kN

ตารางที่ 8 One-Sample Breaking Load

Null hypothesis	$H_0: \mu = 277.412$
T-Value	P-value
-1.68	0.104

ตารางที่ 8 จากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab จะเห็นได้ว่าค่า P – Value อยู่ที่ 0.104 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $\alpha$  0.05 ซึ่งยอมรับ  $H_0$  นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับค่าเฉลี่ย 277.351

ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่า Breaking Load คือ Tension 12980 kg. และ Temperature 376 °C จะทำให้ได้ค่า 1% Breaking Load ที่สูงสุด คือ 277.412 kN

ตารางที่ 9 One-Sample Elongation

Null hypothesis	$H_0: \mu = 5.198$
T-Value	P-value
1.63	0.113

ตารางที่ 9 จากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab จะเห็นได้ว่าค่า P – Value อยู่ที่ 0.113 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $\alpha$

0.05 ซึ่งยอมรับ  $H_0$  นั้นหมายความว่าข้อมูลยืนยันความถูกต้องที่ได้มาจาก 30 ข้อมูล คือ ประชากรกลุ่มเดียวกันกับค่าเฉลี่ย 5.210

ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่า Elongation คือ Tension 12980 kg. และ Temperature 376 °C จะทำให้ได้ค่า Elongation ที่สูงสุด คือ 5.198 kN

### 5. สรุป

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง พบว่า ปัจจัย ทั้ง 2 ปัจจัย คือ ความตึงลวดและอุณหภูมิ มีผลต่อแรงดึงสูงสุด แรงดึงพิสูจน์ และการยืดตัว ตามลำดับเมื่อนำสถานะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ (Parameters Optimization) สำหรับกระบวนการผลิตลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น คือ ความตึงลวด (Tension : A) 12980 kg และอุณหภูมิ (Temperature : B) 376 °C และนำมาทดลองอีก 3 ครั้ง จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่าค่าระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 95% ทำให้ได้มาซึ่งผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองที่มีค่าสูงสุด (Maximum) ซึ่งค่าผลตอบสนองทั้ง 3 จะมีค่าสูงมากกว่าข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification) [9] โดยสามารถประเมินเป็นความพึงพอใจ (Satisfaction) โดยรวมได้ 70.72 % หลังจากนั้นสร้างเป็นมาตรฐานการทำงาน (Standard and Operation : S&OP) สำหรับเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิด 7 เส้น ขนาด 15.2 มม.

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่กรุณาให้การสนับสนุนและการช่วยเหลือด้านการการเก็บรวบรวมข้อมูลทดลองการผลิต และการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบหาสมบัติเชิงกลของลวดตีเกลียว 7 เส้น ขนาด 15.2 มม. และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรม Minitab V.18 สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล



## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Supawat M, Jeerawat P. Defects reduction in metal Parts production process. Kasem Bundit Engineering Journal. 2016;6: 91-106.Thai
- [2] Jin Kook K, Jeong-Su K, Seung Hee K. Mechanical Properties of a new pre-stressing strand with ultimate strength of 2160 MPa. KSCE Journal of Civil Engineering (2014) 18(2): 607-615.
- [3] Thai Industrial Standards. TIS.420-2540(1997). Steel Wires Strands for Prestressed Concrete. Bangkok: TIS; 1997
- [4] Prapaisri S, Pongchanun L. Design and Analysis of Experimen. Bangkok: Top Publishing;2008
- [5] Dan T. The effect of stress relieving treatment condition on the quality of pressed concrete wire in Progressively Drawn Pearlitic Steel. PhD thesis. Kasetsart University; 2012.
- [6] Phumin S. Siam Prestressed Material Co.,Ltd. Stranding Data Report date: 17th February 2019.
- [7] Norasit A. Study of the Annealing Process for the Drawn Fine Copper. Master thesis. Chulalongkorn University;1999.
- [8] Quality Procedure Production, Siam Prestressed Material Co.,Ltd. Document number: QP-PD-01, 2018.
- [9] ASTM International Standards Institution. A416: 12. Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Pre-stressed Concrete. United States: ASTM; 2012



# การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียวและทราย เทียบกับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีพลศาสตร์

## Mathematical Model of Single Piles Embedded in Clay and Sand Layers Compared with the Dynamic Load Test

ทรงฤทธิ์ พุทธลา<sup>1</sup> สิทธิรักษ์ แจ่มใส<sup>1</sup> จตุรงค์ ศรีทอง<sup>1</sup> กัญญาภัค จอดนอก<sup>1</sup> ปรีชาศาสตร์ มีเกาะ<sup>1</sup> ดำเกิง จันทร์ส่อง<sup>1</sup> และสหलग Homwuttiwong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เลขที่ 680 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

<sup>2</sup> สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หมู่ที่ 7 245 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

Songrit Puttala<sup>1</sup>, Sittirik Jamsei<sup>1</sup>, Jaturong Srithong<sup>1</sup>, Kanyapak Jodnok<sup>1</sup>, Preechasart Meekoh<sup>1</sup>, Dumkerng Jansong<sup>1</sup> and Sahalaph Homwuttiwong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil and Architecture, Faculty of Industrial Technology Sakon Nakhon Rajabhat University 680 Nittayo Road, That Choeng Chum Sub-District, Mueang District, Sakon Nakhon Province, 47000, Thailand

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Mahasarakham University 245 Moo 7, Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150 Thailand

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: sahalaph.h@msu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-1661-3955

Received: 26 March 2022, Revised: 18 October 2022, Accepted: 19 October 2022

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ที่ตอกลงในบริเวณที่มีชั้นบนเป็นดินเหนียวอ่อนและลึกลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ส่วนปลายของเสาเข็มไปหยั่งอยู่บนชั้นทรายแน่น ใช้โปรแกรม PLAXIS 2D ทำการจำลองและวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวสี่เหลี่ยมตันขนาด 0.35x0.35x12.00 เมตร รับน้ำหนักบรรทุก 490 กิโลนิวตันและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 2.5 เท่า ทำการจำลองเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับเสาเข็มจนถึง 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ จากนั้นก็ทำการลดน้ำหนักบรรทุกลงจนหมด จากการจำลองจะได้น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวและค่าการทรุดตัว นำผลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Pile Load Test (DLT) จำนวน 8 ต้น จากผลการวิเคราะห์พบว่า การทดสอบเสาเข็มแบบ DLT ส่วนใหญ่มีการทรุดตัว Residual Displacement (RMD) ต่ำกว่าค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลอง PLAXIS 2D ทุกช่วงของน้ำหนักบรรทุก แต่ก็พบว่า มีเสาเข็มจำนวน 1 ต้น ที่มีค่าการทรุดตัวสูงกว่าเสาเข็มต้นอื่น ๆ และสูงกว่าค่าที่ได้จากการจำลองถึงร้อยละ 47 ซึ่งทำให้ผลทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์มีความแปรปรวน ผลการวิเคราะห์ก็ยังพบอีกว่า น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ไม่ได้แปรผันตรงกับค่าการทรุดตัวที่ลดลงและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าสูงระหว่าง 3.0 ถึง 3.7 เท่า และการทดสอบ DLT ควรทดสอบอย่างน้อย 3 ต้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อให้การประเมินน้ำหนักบรรทุกมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ** น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม การทดสอบแบบพลศาสตร์ การทรุดตัวของเสาเข็ม การจำลองทางคณิตศาสตร์



Abstract

This research presents mathematical modeling of prestressed concrete piles embedded into the area where the top layer was a soft clay and the stiff clay was a second layer. The end of the pile sat on a dense layer of sand. The PLAXIS 2D was used to model a solid square single pile in the size of 0.35x0.35x12.00 m. The loading capacity was 490 kN with a safety factor of 2.5. The simulation procedure was done by increasing the load up to 2.5 times the designed load, then the load was gradually reduced to zero. From the simulation, the load capacity of the single pile and the settlement were obtained. These results were compared with the results obtained from the Dynamic Pile Load Test (DLT) of 8 piles. The analysis revealed that most of the DLT tests had lower settlement Residual Displacement (RMD) values than the PLAXIS 2D model for all ranges of loading. However, it was found that one single pile had a higher settlement value than the other piles and also higher than the simulation value of about 47%. This resulted in variability in the DLT testing. The analysis also found that the loading capacity of the piles obtained from the DLT testing was not directly proportional to the reduction of settlement and the safety ratio was up to 3.0-3.7 times. And DLT testing should be more than 3 piles for averaged and analyzed in conjunction with PLAXIS 2D for a more reliable load capacity.

Keywords: Axial Bearing Capacity, Dynamic Load Test, Settlement of Pile, Mathematical Modeling.

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการพัฒนาไปค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งการก่อสร้างอาคารในประเทศส่วนใหญ่นั้นยังคงนิยมก่อสร้างด้วยฐานรากแบบมีเสาเข็ม เนื่องจากเป็นระบบฐานรากที่มีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างในสภาพของดินซึ่งมีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของดินได้ค่อนข้างน้อย ซึ่งหากเลือกก่อสร้างด้วยฐานรากแบบแผ่ ในบริเวณสภาพของดินที่รับน้ำหนักบรรทุกได้ค่อนข้างน้อยนั้น จำเป็นที่จะต้องขยายพื้นที่ของฐานรากเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกของอาคารได้ ดังนั้นจะส่งผลทำให้ขนาดของฐานรากแบบแผ่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับฐานรากแบบระบบเสาเข็ม และในกรณีที่ดินก่อสร้างที่มีจำกัดฐานรากแผ่จึงไม่เหมาะสม ดังนั้นส่วนมากจึงนิยมก่อสร้างฐานรากอาคารเป็นแบบระบบเสาเข็มหรือฐานรากแบบลึก ด้วยเหตุผลที่คำนึงถึงด้านความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ และสภาพของดินบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง [1]

สำหรับฐานรากระบบเสาเข็มมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อความยาว ขนาด และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม เช่น ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน กล่าวคือ ข้อมูลของดินที่ทำการเจาะสำรวจนั้นอาจมีความ

คลาดเคลื่อนทำให้การคำนวณแปรผลคลาดเคลื่อนได้ หรือไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของบริเวณก่อสร้าง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ เช่น งบประมาณ การลดระยะเวลาในการก่อสร้าง รวมไปถึงความแปรปรวนของชั้นดิน เป็นต้น เมื่อการเจาะสำรวจชั้นดินเสร็จ จะได้ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างดินในบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง ซึ่งเมื่อนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้มาทำการคำนวณ กำลังน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ขนาด และความยาวของเสาเข็ม ข้อมูลที่ได้นำมาประกอบเพื่อคำนวณออกแบบฐานรากระบบเสาเข็ม ค่ารวมค่าการตอกเสาเข็ม จากการตอกเสาเข็มในสถานที่ก่อสร้าง จะมีการเก็บข้อมูลผลการตอกเสาเข็ม เช่น ความยาวของเสาเข็มที่ตอกได้ ระยะเยื้องในแนวตั้ง ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม 10 ครั้งสุดท้าย (Last Ten Blow) ที่ต้องเป็นไปตามรายการคำนวณ เนื่องจากการตอกเสาเข็มและการควบคุมการตอกนั้นมีความสำคัญต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากระบบเสาเข็ม กระบวนการตอกเสาเข็มจึงมีความสำคัญ ต้องมีการควบคุมการทำงานอย่างมีระบบ โดยวิศวกรหรือผู้ควบคุมงาน ในบางกรณี พบว่าดินบริเวณโครงการก่อสร้างนั้นเมื่อมีสภาพความชื้นสูง จะทำให้สมบัติของดินในบริเวณก่อสร้างเปลี่ยนแปลง และส่งผลให้



ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง [2] เกิดความแตกต่างเมื่อเทียบกับผลการคำนวณที่ได้ก่อนหน้า และผลที่เสาเข็มไม่สามารถรับน้ำหนักได้ตามรายการคำนวณในขณะที่ทำการตอกเสาเข็ม ทำให้ต้องเพิ่มความยาวของเสาเข็ม หรือต้องตอกเสาเข็มลึกกว่าเดิม เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่วิศวกรผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Pile Load Test, SLT) [3-5] นั้นให้ผลของการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่มีความแม่นยำมากที่สุด แต่วิธีการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงและใช้เวลานาน ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test, DLT) ตามมาตรฐาน ASTM D4545-12 จึงได้ถูกนำมาประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่ทราบผลอย่างรวดเร็วและมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ อย่างไรก็ตามการทดสอบวิธี DLT ตามมาตรฐานนั้นไม่ได้รับขอบเขตความแม่นยำไว้ เนื่องจากอาจมีผลของความแปรปรวนมาจากหลายปัจจัย เช่น สภาพของดินรอบเสาเข็ม เครื่องจักรที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม สภาพของเสาเข็ม และอื่น ๆ ซึ่งผลกระทบจากปัจจัยที่กล่าวมาทำให้ไม่สามารถกำหนดความแม่นยำในวิธีการทดสอบนี้ได้ [6]

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น หากมีการศึกษาเปรียบเทียบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสาเข็มเดี่ยวรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ที่ใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดิน โดยนำมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวด้วยวิธี DLT เพื่อศึกษาประเมินความแม่นยำของผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี DLT ให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์ของน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ตอกในดิน 3 ชั้น โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D จำลองเสาเข็มเดี่ยวที่รับน้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็ม เพื่อหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มตอกผลที่ได้นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DLT ที่หน้างานจริง

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)

ทำการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 4945-12 เป็นการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มในแนวแกน และหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มสำหรับฐานรากลึก โดยใช้เครื่องมือ Pile Dynamic Analyzer (PDA) เก็บข้อมูลจากการทดสอบในสนามแล้วนำมาประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนามด้วย Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) [7] โดยใช้การวิเคราะห์แบบแยกน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กำลังที่เกิดขึ้นจากแรงต้านของดินรอบผิวเสาเข็มตลอดความยาว (Skin Friction) และกำลังต้านทานที่ปลายของเสาเข็ม (End Bearing) ซึ่งวิเคราะห์ส่วนของเสาเข็มเป็นแบบยืดหยุ่น (Linear-Elastic) และชุดข้อมูลของดินเป็นแบบ Elasto-Plastic โดยทั่วไปแรงที่กระทำที่หัวเสาเข็ม และการวัดความเร็วที่ได้จากความเครียดสูงสุดจากแรงกระแทกของค้อนน้ำหนักตอกเสาเข็ม ซึ่งสามารถจะทำการวิเคราะห์โดยการใช้อุปกรณ์ของสัญญาณด้วยแรงที่ยอมให้ ตลอดจนระยะเวลาการทดสอบตามความยาวของเสาเข็มที่ทำการทดสอบ จะมีการสร้างแผนภูมิแรงสถิตเทียบเท่าจากแรงที่กระทำบนหัวเสาเข็มกับการทรุดตัว เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในการประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบ DLT กับเสาเข็มตอกคอนกรีตอัดแรง กำลังอัดของคอนกรีตอัดแรงเท่ากับ 35 เมกะปาสกาล รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.35x0.35 เมตร ยาว 12 เมตร จำนวน 8 ต้น มีการติดตั้งตัวรับสัญญาณการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องมือบันทึกผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 1 (ข) ส่วนผังแสดงตำแหน่งการเจาะทดสอบชั้นดินและตำแหน่งการทดสอบ DLT ของเสาเข็มแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเสาเข็มที่ทดสอบ DLT ทั้ง 8 ต้น นั้นฝังอยู่ในดินลึก 12 เมตรจากระดับผิวดินเดิมที่ทำการตอกเสาเข็ม โดยในการสร้างแบบจำลอง PLAXIS 2D ได้ใช้ข้อมูลดินที่มีความสอดคล้องกับสมมุติฐานการวิเคราะห์กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเดี่ยวด้วยโปรแกรม CAPWAP ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดสอบแบบ DLT

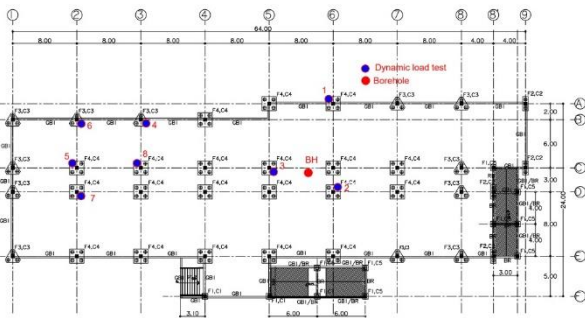


(ก) การติดตั้งตัวรับสัญญาณการทดสอบ



(ข) เครื่องมือ

รูปที่ 1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบ DLT



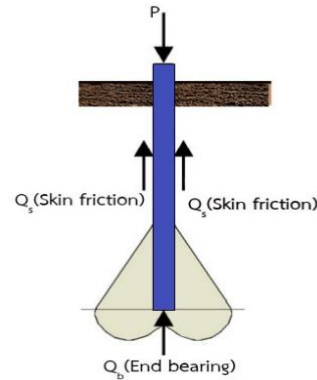
รูปที่ 2 ตำแหน่งหลุมเจาะทดสอบชั้นดิน และตำแหน่งการทดสอบ DLT เสาเข็ม ทั้ง 8 ต้น บริเวณก่อสร้าง ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมืองสกลนคร จังหวัดสกลนคร

### 2.2 การจำลองการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

PLAXIS 2D เป็นการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยจะใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และวิธีการคำนวณเชิงเลข ซึ่งมีขั้นตอนหลัก ๆ 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง ขั้นตอนการหาค่าตอบ และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ จำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียว และดินทราย ที่มีพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเสาเข็มจะรับแรงเสียดทานที่ผิว (Skin Friction) ตลอดความยาวเสาเข็ม และรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) ซึ่งสามารถคำนวณค่าการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม ได้ดังแสดงในสมการที่ 1

$$Q_a = Q_s + Q_b / F.S. \quad (1)$$

เมื่อ  $Q_a$  = กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม  
 $Q_s$  = กำลังเสียดทานของเสาเข็ม  
 $Q_b$  = กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็ม  
F.S. = Factor Safety 2.5 ถึง 3.0



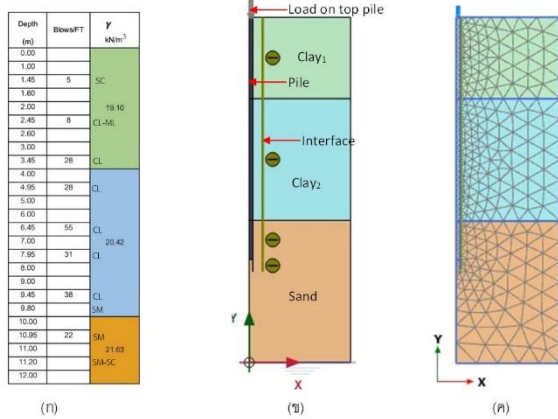
รูปที่ 3 พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวที่ฝังในชั้นดินเหนียว และชั้นดินทราย

การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดิน บริเวณที่จะทำการก่อสร้างอาคาร โดยแสดงในรูปที่ 4 (ก) ทำการจำลองเสาเข็มตอกที่ฝังลงไปดิน 3 ชั้น โดย ชั้นที่ 1 มีความลึกจากผิวดินเดิมถึงระยะ 4 เมตร เป็นดินเหนียวอ่อน ชั้นที่ 2 เป็นดินเหนียวแข็งถึงแข็งปานจากความลึก 4 ถึง 10 เมตร และชั้นสุดท้ายที่ความลึก 10 ถึง 17 เมตร เป็นดินทรายที่มีความแน่นมาก มีระดับน้ำใต้ดินที่ความลึก 8 เมตร จากผิวดิน ตารางที่ 1 เป็นการสรุปสมบัติทางกายภาพของดินและเสาเข็มตอก ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

การจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D จะสร้างตาข่ายรูปร่างสามเหลี่ยมแบบ 15 จุด ซึ่งจะมีการประมาณค่าช่วงในการแสดงผล 4 อันดับสำหรับค่าการทรุดตัว และการรวมกันเชิงตัวเลขแบบเกาส์ 12 จุด ในรูปที่ 4 (ข) จะแสดงการจำลองชั้นดิน และเสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน ซึ่งในการจำลองพฤติกรรมของดินแบ่งดินออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ Clay<sub>1</sub> Clay<sub>2</sub> และ Sand พฤติกรรมของดินจำลองด้วย Mohr-Coulomb และชั้นดิน Sand กำหนดเป็นแบบ Hardening Soil [8] ขนาดของขอบเขตแบบจำลองมีความกว้าง 5 เมตร ลึก 17 เมตร ซึ่ง Mesh ถูกแบ่งเป็น Medium ในรูปแบบ 3 เหลี่ยม มีจำนวน Element โดยประมาณ 575 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) จำลองให้มีเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงตอกฝังในชั้นดินที่มี



ความลึก 12 เมตร ผ่านชั้นดินทั้ง 3 ชั้น โดยปลายเสาเข็มวางอยู่บนชั้นทรายที่มีความแน่นมาก



รูปที่ 4 (ก) ข้อมูลชั้นดินจากหลุมเจาะ (ข) แบบจำลองชั้นดินเสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน (ค) แบบจำลองการสร้าง Mesh

การหลุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยวิเคราะห์การหลุดตัวของเสาเข็มในแนวตั้งที่รับน้ำหนักบรรทุก 490 กิโลนิวตัน และมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 เท่า ทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกลงบนเสาเข็ม 0 123 245 368 490 613 736 858 981 1 103 และ 1 226 กิโลนิวตัน แล้วเพิ่มน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ DLT ของแต่ละต้น ดังแสดงในตารางที่ 2 มากำหนดเป็นน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มที่ทำการจำลองทั้ง 8 ต้น จากนั้นทำการลดน้ำหนักบรรทุกลงตามลำดับจนหมด จะได้ค่าการหลุดตัวของ Mesh ในแต่ละช่วงของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนหัวเสาเข็มในแบบจำลอง จากนั้นนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับการทดสอบ DLT ที่ได้จากสนาม เพื่อประเมินความแม่นยำของการทดสอบ DLT

ตารางที่ 1 สมบัติของดิน และเสาเข็ม

Parameters Linear Elastic /Unit	Pile Concrete	Soil		
		Clay <sub>1</sub>	Clay <sub>2</sub>	Sand
Type	Non-Porous	Undrained	Undrained	Drained
$\gamma_u$ (kN/m <sup>3</sup> )	25.00	19.10	20.42	21.63
$E'$ (kN/m <sup>2</sup> )	35×10 <sup>6</sup>	38,863	409,526	11×10 <sup>4</sup>
$\nu'$ -	0.20	0.30	0.30	0.30
$c'$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	89.34	235.36	-
$\phi'$ -	-	-	-	39
Depth (m)	12	0-4	4-10	10-17

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

#### 3.1 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวด้วยวิธี Dynamic Pile Load Test

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเสาเข็มทั้ง 8 ต้น มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่ามีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดอยู่ในช่วง 1,490 กิโลนิวตัน ถึง 1,829 กิโลนิวตัน และมีการหลุดตัวของเสาเข็มอยู่ในช่วง 8.11 ถึง 23.36 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดสอบมีค่าการหลุดตัวอยู่ในช่วงแนะนำสำหรับค่าการหลุดตัวที่ยอมรับได้ไม่เกิน 25 มิลลิเมตร [9] และหากพิจารณาในรูปที่ 5 จะเห็นว่าค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ลดลงนั้นไม่ได้แปรผันตามการหลุดตัวของเสาเข็มที่ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแปรปรวนของชั้นดินในบริเวณที่เสาเข็มฝังลงไป จึงอาจส่งผลกระทบต่อค่าการหลุดตัวที่สูงแต่กลับให้ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกที่น้อยกว่า ทั้งนี้การทดสอบ DLT ยังแสดงให้เห็นอีกว่ามีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.7 เท่า เมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกในการออกแบบที่ 490 กิโลนิวตัน ต่อต้น

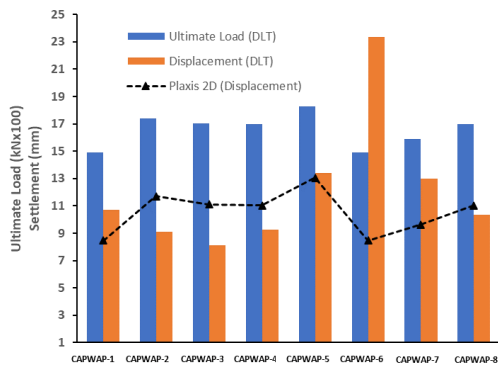
ผลที่ได้จากการทดสอบ DLT เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าการหลุดตัวเทียบกับน้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็มเดี่ยวโดยอาศัยหลักการวิธี SLT ซึ่งวิเคราะห์ด้วย CAPWAP จะได้ค่าการหลุดตัวจากการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกับการหลุดตัวของเสาเข็ม จากนั้นเมื่อปลดน้ำหนักบรรทุกออกจนหมดก็จะได้ค่าการหลุดตัวเนื่องจากการคืนตัว (Rebound) ของเสาเข็ม หลังจากการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าการหลุดจากการคืนตัวหลังจากลดน้ำหนักบรรทุกนั้น เสาเข็มส่วนใหญ่เหลือค่าการหลุดตัวอยู่ในช่วง 1.16 ถึง 3.19 มิลลิเมตร ยกเว้นเสาเข็มต้นที่ 6 (CAPWAP-6) พบว่าค่าการคืนตัวน้อยกว่าเสาเข็มต้นอื่น โดยเมื่อหลังจากลดน้ำหนักออกจนหมดแล้วยังเหลือค่าการหลุดตัวเท่ากับ 8.22 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการหลุดตัวของเสาเข็มที่ทดสอบด้วย DLT ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าชั้นดินในพื้นที่การตอกเสาเข็มในการทดสอบนี้มีความแปรปรวน เมื่อพิจารณาพร้อมกับตำแหน่งหลุมเจาะทดสอบชั้นดินและตำแหน่งการทดสอบ DLT ที่แสดงในรูปที่ 2



ตารางที่ 2 ผลการทดสอบที่ได้จาก PLAXIS 2D และจากการทดสอบ Dynamic Pile Load Test

Pile No.	UTL (kN)	MDM (mm)	RDM (mm)	FS
Plaxis 2D	1,226	6.43	3.25	2.5
CAPWAP-1	1,490	10.73	3.16	3.0
CAPWAP-2	1,740	9.12	3.04	3.6
CAPWAP-3	1,702	8.11	3.10	3.5
CAPWAP-4	1,696	9.24	1.16	3.5
CAPWAP-5	1,829	13.39	2.17	3.7
CAPWAP-6	1,493	23.36	8.22	3.0
CAPWAP-7	1,589	13.00	3.19	3.2
CAPWAP-8	1,697	10.35	2.02	3.5

UTL = Ultimate Load, MDM = Maximum Displacement, RDM = Residual Displacement, FS = Factors Safety



รูปที่ 5 น้ำหนักบรรทุกสูงสุด และการทรุดตัวของเสาเข็มจาก DLT และ PLAXIS 2D

### 3.2 ผลการจำลองการทรุดตัวของเสาเข็มตอก ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

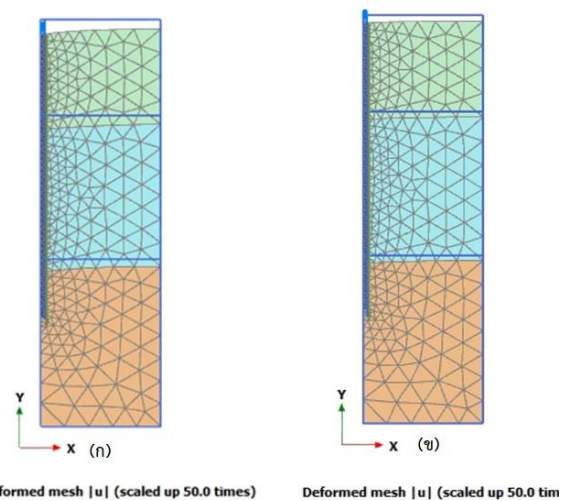
ผลการจำลองการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D แสดงถึงค่าการทรุดตัวของ Mesh เมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่ 2.5 เท่า ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากการออกแบบ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการทรุดตัวของเสาเข็มแบบ SLT ตามมาตรฐาน ASTM D1143-07 [10] โดยผลการวิเคราะห์แสดงการเสียรูปของ Mesh ซึ่งจะวัดจากตำแหน่งการทรุดตัวบริเวณหัวเสาเข็มตอก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) ค่าการทรุดตัวของ Mesh เท่ากับ 6.43 มิลลิเมตร และเมื่อลดน้ำหนักบรรทุกลงจนหมด พบว่ามีการ Rebound ทำให้ค่าการทรุดตัวลดลงเหลือ 3.25 มิลลิเมตร ที่แสดงในรูปที่ 6 (ข) จะเห็นได้ว่าแนวโน้มการทรุดตัวจะสูงขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าการทรุดตัวมีแนวโน้มลดลงในช่วงที่

น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นระหว่าง 1100 ถึง 1220 กิโลนิวตัน เมื่อเทียบกับการเพิ่มน้ำหนักช่วงต้นที่ 123 ถึง 1100 กิโลนิวตัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากปลายเสาเข็มฝังอยู่ในชั้นทรายที่แน่นมากจึงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้สูง [11] ส่วนรูปที่ 7 แสดงถึงการทรุดตัวบริเวณรอบเสาเข็มเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุก 2.5 เท่า สังเกตได้ว่าจะมีความเข้มของสีรอบเสาเข็มในแบบจำลองของชั้นดินด้านบนที่เป็นดินเหนียวอ่อนจากนั้นสีจะลดความเข้มลงในชั้นทรายบริเวณปลายของเสาเข็มอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งเป็นพฤติกรรมการยุบตัวของชั้นดินที่เกิดจาก Stress Distribution โดยอาศัยหลักการทางด้านวิศวกรรมปฐพี

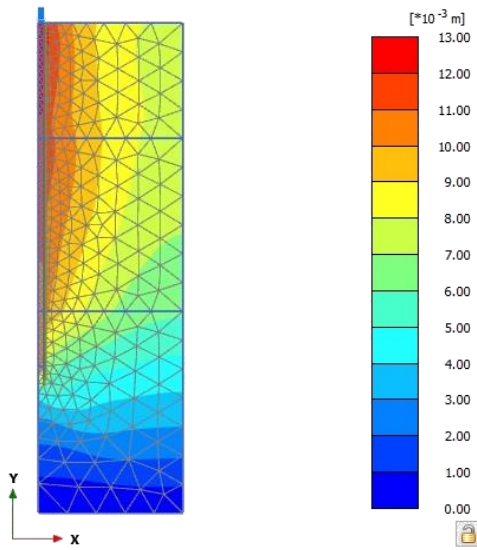
### 3.3 ผลเปรียบเทียบการน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวจากการทดสอบ DLT กับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

ผลการจำลองโปรแกรม PLAXIS 2D เทียบกับผลการทดสอบการทรุดตัวจาก DLT ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ได้จากสนาม จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าการทรุดตัวจากการทดสอบ DLT มีค่าการทรุดตัวคงเหลือน้อยกว่าการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ในขณะที่ปลดน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดและจะสังเกตได้ว่าผลการทรุดตัวของ DLT มีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับผลในจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ที่ไม่ได้ขึ้นกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากปลายเข็มยังอยู่บนชั้นทราย ผลของการทรุดตัวคง

Load on pile	Displacement (mm)
(a) Max-Load 1226 kN	6.4
(b) Un-Load 0 kN	3.3



รูปที่ 6 การเสียรูปของ Mesh เมื่อรับน้ำหนักสูงสุด และ การเสียรูปของ Mesh เมื่อปลดน้ำหนักออก

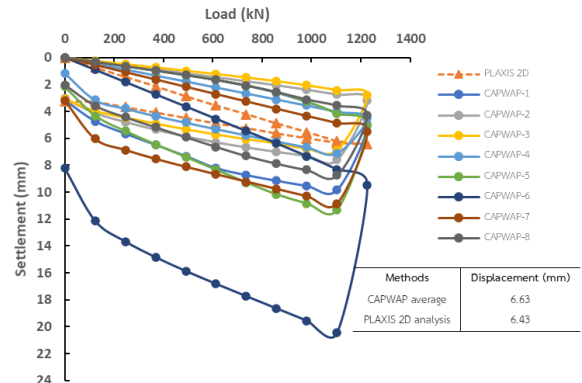


Total displacements [u] (scaled up 50.0 times)

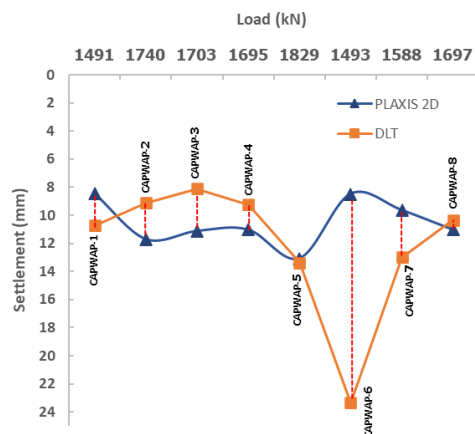
รูปที่ 7 การทรุดตัวรวมของเสาเข็มเดี่ยวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก 2.5 เท่า

ค้ำของเสาเข็มที่ทดสอบด้วย DLT เกือบทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า PLAXIS 2D อยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 56 ยกเว้นเสาเข็มตัวอย่าง CAPWAP-6 ที่มีค่าการทรุดตัวสูงกว่า PLAXIS 2D ถึงร้อยละ 47 เป็นที่สังเกตได้ว่าการทดสอบ DLT แบบ Restrike (เป็นการทดสอบหลังทำการตอกเสาเข็มเสร็จแล้ว โดยจะต้องทิ้งระยะเวลาพอสมควรเพื่อให้ดินรอบเสาเข็มนั้นคืนสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ ทิ้งไปแล้วต้องไม่น้อยกว่า 7 วัน หลังการตอกเสาเข็ม) นั้นค่าการทรุดตัวมีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากผลของการตอกเสาเข็ม ปั่นจั่นที่ใช้ในการปล่อยตุ้มเหล็กกระแทกลงบนหัวเสาเข็มขณะทดสอบ ความแปรปรวนของชั้นดิน และดินรอบบริเวณที่เสาเข็มหลังจากการตอกเสาเข็ม รูปที่ 8 แสดงกราฟระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่อการทรุดตัวซึ่งทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบ DLT เทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D พบว่าค่าการค้ำตัวของเสาเข็มที่ทดสอบด้วย DLT นั้นมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D และค่าการทรุดตัวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่ 2.5 เท่า ของน้ำหนักที่ออกแบบ โดยค่าเฉลี่ยของการทรุดตัวที่ทดสอบด้วย DLT และ PLAXIS 2D มีค่าเท่ากับ 6.63 และ 6.43 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีนั้นมีค่าการทรุดตัวไม่เกิน 25 มิลลิเมตร [12] ในการประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้นถือว่า

เสาเข็มต้นที่ทำการทดสอบสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ผู้ออกแบบกำหนด



รูปที่ 8 น้ำหนักกับการทรุดตัวของเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุก 2.5 เท่าของน้ำหนักที่ออกแบบ



รูปที่ 9 การทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของ DLT เทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS

ในกรณีที่น่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ DLT ทั้ง 8 ต้น มาทำการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D พบว่าเสาเข็ม CAPWAP-2 ถึง 4 และ CAPWAP-8 มีค่าการทรุดตัวมากกว่า DLT ส่วน CAPWAP-5 และ CAPWAP-8 มีค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกับ DLT ดังแสดงในรูปที่ 9 ส่วนตำแหน่งการทดสอบ DLT กับตำแหน่งการเจาะทดสอบชั้นดินที่แสดงในรูปที่ 2 นั้น ไม่มีนัยสำคัญกับผลของมีค่าการทรุดตัวที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจน ในผลการทดสอบ DLT และพารามิเตอร์ในแบบจำลอง PLAXIS 2D ด้วยดินแบบ Mohr-Coulomb กับการแบ่ง Mesh แบบ Medium ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในการวิจัยในครั้งนี้มีความเหมาะสมโดยผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [13]



#### 4. บทสรุป

การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธี DLT เป็นวิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวที่ใช้เป็นทางเลือกในการประเมินผลการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม แต่การทดสอบด้วยวิธีนี้ก็ยังคงมีปัจจัยหลายอย่างที่มีความแปรปรวนในการประเมินและวิเคราะห์ผลการทดสอบ จากผลการทดสอบข้างต้นในงานวิจัยนี้จะเห็นว่าการทดสอบด้วยวิธี DLT นั้นยังคงมีความแปรปรวนในการทดสอบของเสาเข็มบางต้นอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ค่าการทรุดตัวนั้นยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับค่าการทรุดตัวของฐานรากอาคารสำนักงานซึ่งมีค่าการทรุดตัวที่ยอมรับให้เท่ากับ 25 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบแบบ DLT นี้ยังให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.7 เท่าของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ และค่าการทรุดตัวที่เปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D นั้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี DLT ถึงร้อยละ 29.25

ผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ยังสามารถสรุปได้ว่าการจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb เมื่อใช้ร่วมกันกับการแบ่ง Mesh แบบ Medium นั้นมีความเหมาะสมในการสร้างแบบจำลอง ส่วนการทดสอบ DLT นั้นถึงแม้ว่าจะให้ค่าการทดสอบที่เป็นที่น่าพอใจ แต่ควรมีการทดสอบอื่น ๆ หรือควรสร้างแบบจำลอง PLAXIS 2D เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผล DLT ให้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

#### 5. ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาการทดสอบกับเสาเข็มที่มีขนาดที่แตกต่างกัน หรือเสาเข็มเจาะ แล้วสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับกรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อเสนอเป็นข้อมูลสำหรับประกอบในกรณีการเลือกใช้วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเดี่ยว แบบ DLT ซึ่งได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน และควรให้ดินรอบเสาเข็มตอกคืนสภาพไม่น้อยกว่า 6 ถึง 28 วัน เพื่อให้ผลการทดสอบมีค่าที่เหมาะสมยิ่งขึ้น [14]

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ ตลอดจนข้อมูลการทดสอบเสาเข็มของโครงการก่อสร้างภายใน มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร และ

ขอขอบคุณความร่วมมือจาก สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ร่วมทำวิจัยในครั้งนี้

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Phojan W, Leeanansaksir A, Pongnam TH. A comparision of bearing capacity of pile from pile driving formulas and dynamic load test. RMUTI JOURNAL Science and Technology. 2019;12(3):125-37.
- [2] Ricken Marques V, Belincanta A, Beroya-Eitner MA, Almada Augusto JL, Guelssi E, Zachert H, editors. Effect of soil moisture content on the bearing capacity of small bored piles in the unsaturated soil of Maringá, Paraná, Brazil. MATEC Web of Conferences; 2021: EDP Sciences.
- [3] Rajagopal C, Solanki C, Tandel Y. Comparison of static and dynamic load test of pile. Electron J Geotech Eng. 2012;17:1905-14.
- [4] Osman MA, Ahmed EMA, Ahmed OBEM. Comparison between dynamic and static pile load testing. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2013;18:3615-24.
- [5] Mhaiskar S, Khare M, Vaidya R, editors. High strain dynamic pile testing and static load test—a correlation study. Proc Indian Geotechnical Conference; 2010.
- [6] ASTM D4945. Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations. 2017.
- [7] CHAN C, CHONG W, Mukhtar RA. Pile Dynamic Analyzer (PDA) Test: An overview of the pile integrity evaluation technique. Progress in Engineering Application and Technology. 2020;1(1):48-54.
- [8] Naveen B, Parthasarathy C, Sitharam T. Numerical modeling of pile load test. Proc, 4th China Int Piling and Deep Foundations Summit. 2014:156-61.



- [9] Bowles JE. Foundation Analysis and Design. 1988.
- [10] ASTM D1143. Standard Test Methods for Deep Foundations under Static Axial Tensile Load. 2007.
- [11] Kishanrao W, Prasad A. Numerical modeling of single pile in a two-layered soil. Int J Mech Prod Eng. 2016.
- [12] Coduto DP, Kitch WA, Yeung M-cR. Foundation Design: Principles and Practices: Prentice Hall USA; 2001.
- [13] Tjie-Liong G. Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems. International Journal of Applied Engineering Research. 2014;9(21):8291-311.
- [14] Moayedi H, Mosallanezhad M, Nazir R. Evaluation of maintained load test (MLT) and pile driving analyzer (PDA) in measuring bearing capacity of driven reinforced concrete piles. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017; 54(3):150-4.





## ความเหมาะสมของวิธีการตรวจจัดการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอลสำหรับ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

### Suitability of Local Islanding Detection Methods for Grid-Connected Inverter in Multi-Distributed Generation

มานพ ยิ่งรัมย์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

167 ถนนชัยภูมิ-ตาดโตน อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

Manop Yingram<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Science and Technology, Faculty of Arts and Science, Rajabhat Chaiyaphum University

167 Chaiyaphum-Tadton Road, Muang, Chaiyaphum, Thailand, 36000

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: manopyin@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 08-5134-6476

Received: 9 October 2022, Revised: 4 November 2022, Accepted: 28 November 2022

#### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอความเหมาะสมของเทคนิคการตรวจจัดการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอลสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์เทคนิคแบบโลคอลสำหรับต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระซึ่งเกิดจากการติดตั้งหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในบทความนี้ใช้หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวน 5 ตัว ทำให้ได้ 15 รูปแบบ จากผลการจำลองการทำงานพบว่าหากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีจำนวนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งปริมาณกำลังไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่ากันหรือใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้งระบบ ถ้าอินเวอร์เตอร์ของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้ง 5 ตัวใช้เทคนิคแบบพาสซีฟจะไม่สามารถตรวจจับได้ ถ้าใช้เทคนิคแบบแอคทีฟทั้งหมดจะสามารถตรวจจับได้ภายในเวลา 0.24 วินาที ถ้าใช้เทคนิคแบบไฮบริดทั้งหมดจะสามารถตรวจจับได้ภายในเวลา 0.282 วินาที และถ้าผสมเทคนิคแบบพาสซีฟ แบบแอคทีฟ และแบบไฮบริดจะสามารถตรวจจับได้ภายในเวลา 0.315 วินาที

**คำสำคัญ** การตรวจจัดการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เชื่อมต่อกริด

#### Abstract

The research paper presents a suitability of local islanding detection methods for grid-connected inverter in multi-distributed generation, and possible usage of local techniques for an anti-islanding condition, which is caused by the ever-increasing installation of distributed generation. The paper uses 5 distributed generations, resulting in 15 forms. According to the simulation results, it was found that if the distributed generation is increasing until the power of the distributed generation equal or close to the power of the whole load, and if the inverter of all 5 distributed generations used a passive technique, they cannot be detected. If they used an active technique, they can be detected in 0.24 seconds. If they used a hybrid technique, they can be detected in 0.282 seconds. If they mixed passive, active and hybrid techniques, they can be detected in 0.315 seconds.

**Keywords:** Islanding Detection, Distributed Generation, Grid-Connected



### 1. บทนำ

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานทดแทนนับเป็นแนวโน้มที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจาก เชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าส่วนมากได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งจะต้องหมดไป ความต้องการลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อนเนื่องจากก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมทั้งแนวโน้มใน ความนิยม ไมโครกริด และสมาร์ตกริด ที่เพิ่มมากขึ้น [1-2] ทั้งหมดนี้ล้วนมีความสัมพันธ์กับ หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation, DG) หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นช่วยสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า แต่ก็สร้างปัญหาให้กับระบบไฟฟ้าเช่นกัน หนึ่งในปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นคือ สภาวะการแยกตัวอิสระ สภาวะนี้ควรหลีกเลี่ยงรายละเอียดและเทคนิคต่าง ๆ มีอยู่ในหัวข้อที่ 2

โดยทั่วไปเทคนิคการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระหรือสภาวะการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ เพื่อต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ (Anti-Islanding Condition) สามารถแบ่งได้หลัก ๆ คือ 1. เทคนิคแบบรีโมท เทคนิคแบบรีโมทใช้การตรวจจับผ่านระบบสื่อสาร ซึ่งเทคนิคในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากและไม่มี พื้นที่ไร้การตรวจจับ (Non-Detection Zone) แต่จุดด้อยคือมีราคาแพงมากจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (หน่วยผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ  $\leq 10$  kW) 2. เทคนิคแบบโลคอล เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กับหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดเล็กเพราะราคาไม่แพง [3-9]

การเพิ่มมากขึ้นของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยเฉพาะขนาดเล็กที่ติดตั้งตามบ้านเรือน หรือโรงงาน เช่น การติดตั้งการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา Solar PV Rooftop ภายในระบบจะประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยที่อินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งตามบ้านเรือนหรือโรงงานเหล่านี้จะใช้เทคนิคในกลุ่มโลคอล การใช้เทคนิคแบบโลคอลนี้เมื่อมีหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวนมากอาจทำให้ไม่สามารถตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้ เนื่องจากแม้โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้ว แต่ถ้าหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวนมากยังทำงานและมีปริมาณมากพอที่จะจ่ายภาระไฟฟ้าเป็นไปได้อินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถตรวจจับได้ว่าสภาวะการแยกตัว

อิสระได้เกิดขึ้นแล้วเพราะผลจากการที่ระดับของแรงดันหรือความถี่ไม่เกินขอบเขตหรืออาจเกิดจากการรบกวนระหว่างสัญญาณของอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวที่ฉีดเข้ามาในระบบเพื่อตรวจสอบสภาวะที่เกิดขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวนั้นใช้เทคนิคใดในการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระ [10-11] ดังนั้นการค้นคว้าความเหมาะสมของเทคนิคแบบโลคอลสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อในหลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว นับเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการทำวิจัย บทความนี้นำเสนอผลจากการวิจัยในประเด็นดังกล่าวโดยเป็นการสร้างแบบจำลองในรูปแบบอินเวอร์เตอร์หลายตัว บน Matlab/Simulink ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยวิเคราะห์แล้วเห็นว่าควรเลือกใช้ 5 ตัว โดยเลือกเทคนิคที่มีแนวโน้มที่จะใช้งานในอินเวอร์เตอร์เพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระจากทั้ง 3 กลุ่มของแบบโลคอลดังนี้ เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำจากกลุ่มพาสซีฟ เทคนิคเปลี่ยนแรงดันแบบชานเดียวจากกลุ่มแอกทีฟ และเทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำจากกลุ่มไฮบริด การจำลองการทำงานเป็นการสลับสับเปลี่ยนแต่ละเทคนิคภายในอินเวอร์เตอร์ทั้ง 5 ตัว ผลการจำลองการทำงานจะแสดงให้เห็นถึงผลการตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระจากจำนวนการใช้แต่ละเทคนิคภายในอินเวอร์เตอร์ทั้ง 5 ตัว รายละเอียดต่าง ๆ ของบทความมีดังต่อไปนี้

### 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 2.1 เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ

เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Detection Techniques) เพื่อตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระ และต่อต้านการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระไม่ให้เกิดขึ้นนั้นมีอยู่หลากหลายเทคนิค โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคหลัก คือ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบโลคอล (Local Islanding Detection Techniques) และ เทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระแบบรีโมท (Remote Islanding Detection Techniques) โดยเทคนิคแบบโลคอลนี้สามารถแบ่งได้อีก 3 แบบ คือ เทคนิคแบบพาสซีฟเป็นการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป อาทิ แรงดัน ความถี่ ผลรวมฮาร์โมนิกส์ อื่น ๆ ข้อดีคือเทคนิคนี้จะไม่มีการฉีดสัญญาณเข้าไปรบกวนระบบแต่ข้อเสียคือมี พื้นที่ไร้





การตรวจจับกว้าง เทคนิคแบบแอดทีฟเป็นการฉีดสัญญาณเข้าไปสู่ระบบในจังหวะที่เกิดความสงสัยว่าเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระแล้วหรือไม่โดยเทคนิคนี้มีพื้นที่ไร้การตรวจจับเล็กกว่าแบบพาสซีฟ แต่มีข้อเสียคือมีสัญญาณเข้าไปรบกวนคุณภาพไฟฟ้าของระบบ และเทคนิคสุดท้ายคือ เทคนิคแบบไฮบริดเป็นการนำคุณลักษณะของทั้ง แบบพาสซีฟ และแบบแอดทีฟ มารวมกัน [3-8]

สภาวะการแยกตัวอิสระ (Islanding Condition) เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อ โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง หยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายภาระไฟฟ้า แต่หน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ยังคงจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าอยู่ สภาวะการแยกตัวอิสระนี้อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ การเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระนี้ควรจะหลีกเลี่ยง เพราะ เมื่อเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้ แรงดันและความถี่ ณ จุดที่เกิดการแยกตัวออกไปนั้นเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นไปได้ที่ขนาดของแรงดันและความถี่ที่เกิดขึ้นจะไม่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับของอุปกรณ์เป็นผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์นั้น ๆ อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของการไฟฟ้า อาจสร้างอันตรายให้เกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงาน ณ สายส่งที่สัมพันธ์กับการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระเพราะในสายส่งยังมีไฟฟ้าที่ส่งมาจากหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว แต่มีการสันนิษฐานว่าไม่มีไฟฟ้าในสายส่งนั้นแล้ว เมื่อมีการกลับเข้ามาเชื่อมต่อในโครงข่ายระบบไฟฟ้าอีกครั้งหลังจากที่แยกออกไปก่อนหน้าอาจจะส่งผลให้เกิดการ รีทริบ (Re-Tripping) หรือ เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพราะ เกิดความต่างเฟส การแก้ปัญหาสภาวะการแยกตัวอิสระมีมาตรฐานหลัก ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย IEEE Std. 929, IEEE Std. 1547, The International Standard IEC 62116, UL 1741, Japanese Standard (JET Std. 2002), และ Korean Standard (Korean PV 501, 2008) โดยทั่วไปทุกมาตรฐานมีบทสรุปที่สำคัญตรงกันหรือไปทำนองเดียวกันว่าระบบเชื่อมต่อของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จะต้องตรวจจับและหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังภายในสองวินาทีนับตั้งแต่สภาวะการแยกตัวอิสระเริ่มเกิดขึ้น รายละเอียดของเทคนิคการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระทั้งหมดได้กล่าวถึงแล้วในรายงานการวิจัย และบทความต่าง ๆ [3-9] ในบทความนี้จะให้รายละเอียดเบื้องต้น

เฉพาะเทคนิคแบบโลคอลที่เลือกจากทั้ง 3 กลุ่ม คือ พาสซีฟ แอดทีฟ และไฮบริด ดังนี้

### 2.1.1 เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ และ ความถี่เกิน/ความถี่ต่ำ (Over/Under-Voltage (OUV) and Over/Under-Frequency (OUF) Technique)

เป็นเทคนิคจากกลุ่มพาสซีฟเป็นการวัดแรงดันหรือวัดความถี่ ณ จุด Point of Common Coupling (PCC) ซึ่งสามารถใช้รีเลย์ตรวจจับ ณ จุด PCC เพื่อต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ โดยทำการตั้งค่ารีเลย์ให้ตรวจจับ แรงดัน/ความถี่ เกิน หรือแรงดัน/ความถี่ ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน

### 2.1.2 เทคนิคเปลี่ยนแรงดันแบบซานเดีย (Sandia Voltage Shift (SVS) Technique)

เป็นเทคนิคจากกลุ่มแอดทีฟ เทคนิคนี้ใช้การควบคุมแบบกระตุ้นย้อนกลับในการป้องกันการแยกตัวอิสระ เทคนิคเปลี่ยนแรงดันแบบซานเดีย จะทำการเปลี่ยนขนาดกระแสในฟังก์ชันของขนาดแรงดัน เมื่อสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น การเปลี่ยนขนาดกระแสจะขึ้นกับการเปลี่ยนขนาดแรงดันโดยทำการเปลี่ยนแรงดันอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดมากกว่า Over Voltage Relay (OVR) หรือน้อยกว่า Under Voltage Relay (UVR) ซึ่งเมื่อหากสภาวะที่เกิดขึ้นเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ OVR หรือ UVR จะทำงานเป็นผลให้อินเวอร์เตอร์หลุดออกจากโครงข่ายระบบไฟฟ้า

### 2.1.3 เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

#### (Over/Undervoltage and Undervoltage Shift Technique)

เป็นเทคนิคจากกลุ่มไฮบริด เทคนิคนี้จะวัดแรงดันทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแล้วใช้การตรวจจับแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ โดยใช้มาตรฐานสากล IEC 62116 แรงดันเกินคือมากกว่า 115% และแรงดันต่ำน้อยกว่า 85% ในการตรวจสอบซึ่งเป็นลักษณะของเทคนิคในกลุ่มแบบพาสซีฟ โดยหากยังไม่เป็นสภาวะการแยกตัวอิสระ DG จะยังไม่หยุดทำงาน จะทำการตรวจสอบอีกครั้งว่าเป็นสภาวะการแยกตัวอิสระหรือไม่โดยการเปลี่ยนแรงดันต่ำ 84% 3 รูปคลื่น เข้าสู่ระบบเพื่อทำการตรวจสอบอีกครั้ง

### 2.2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 2 เพียงแต่ปราศจาก



บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ รายละเอียดต่าง ๆ ของการสร้างแบบจำลองได้แสดงไว้แล้วในรายงานวิจัย [9] รวมทั้งมีการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สำหรับเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในทางปฏิบัติในหัวข้อ 2.3 โดยทำการจำลองการทำงานทั้งหมด 8 กรณี เริ่มจาก สภาวะมีการเกิดการแยกตัวอิสระ  $\Delta P/P = -40\%$  จนถึง  $\Delta P/P = 40\%$  จะทำการสร้างสภาวะการแยกตัวอิสระโดยทำการปลด Grid ออกไป ณ เวลา 0.2 วินาที ในบทความนี้นำเสนอเฉพาะค่าที่ได้รับจากผลการจำลองการทำงานดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลองการทำงานบน Matlab/Simulink

$\Delta P/P$ (%)	On Grid			Off Grid
	$V_{PCC}$ (V)	$V_{PCC} * 115\%$	$V_{PCC} * 85\%$	$V_{PCC}$ (V)
-40	220	253	187	293
-30	220	253	187	281
-20	220	253	187	212
-10	220	253	187	206
0	220	253	187	200
10	220	253	187	196
20	220	253	187	191
30	220	253	187	189
40	220	253	187	174

### 2.3 ผลการจำลองการทำงาน เปรียบเทียบกับ ผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสในทางปฏิบัติ

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นว่าหลังจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระเกิดขึ้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีผลการจำลองการทำงานที่สอดคล้องกับผลการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสในทางปฏิบัติ ในตารางที่ 3 เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองในอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ขนาด 1 kW ในการทดลองในห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยนำเสนอเฉพาะค่าที่ได้รับไม่รวมรูปที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคป [9]

เมื่อพิจารณาตารางที่ 3 ในหลักที่ 4 คือ  $\Delta P/P$ (%) การเปลี่ยนแปลงของหลักนี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหลังจากการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระในหลักที่ 8 คือ  $V_{PCC}$  ณ ช่วง Off Grid ซึ่งทั้งสองหลักแปรผกผันกัน เมื่อพิจารณาผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 และผลการทดลองในห้องปฏิบัติการในตารางที่ 2 จะพบว่ามีความสอดคล้องกัน

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง

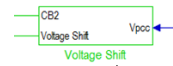
$P_{load}$ (kW)	P (kW)	$\Delta P$ (kW)	$\Delta P/P$ (%)	On Grid			Off Grid
				$V_{PCC}$ (V)	$V_{PCC} * 15\%$	$V_{PCC} * 85\%$	$V_{PCC}$ (V)
0.6	1	-0.4	-40	226.3	260.2	192.4	253.2
0.77	1	-0.3	-30	233.4	268.4	198.4	249.3
0.8	1	-0.2	-20	231.6	266.3	196.9	240.5
0.9	1	-0.1	-10	229.8	264.3	195.3	191.0
1	1	0	0	229.8	264.3	195.3	175.0
1.1	1	0.1	10	226.3	260.2	192.4	159.1
1.2	1	0.2	20	229.8	264.3	195.3	148.5

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

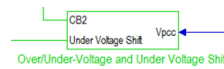
เมื่อทำการสร้างบล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระของทั้ง 3 เทคนิค จะทำให้ได้บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ ดังในรูปที่ 1 ส่วนในรูปที่ 2 แสดงการใช้บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระภายในแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส จำนวน 1 ตัว โดยผลการจำลองการทำงาน รายละเอียดภายในแต่ละบล็อก และรายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละเทคนิคได้รับการตีพิมพ์มาแล้ว [4],[5],[7]



(ก) เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ



(ข) เทคนิคเปลี่ยนแรงดัน



(ค) เทคนิคแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

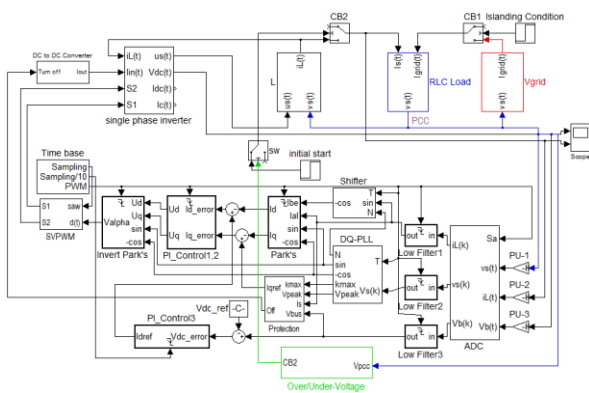
#### รูปที่ 1 บล็อกต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระ

เมื่อนำแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ในรูปที่ 2 จำนวน 5 ตัวมารวมกันจ่ายโหลดแบบเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้าจะทำให้ได้ดังรูปที่ 3

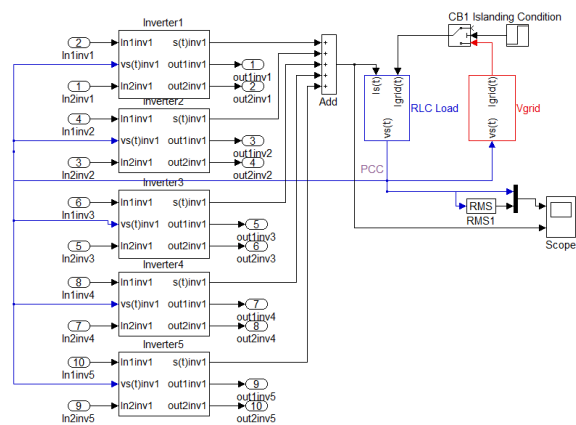
เมื่อพิจารณาการจำลองการทำงานของทั้ง 3 เทคนิคภายในอินเวอร์เตอร์ทั้ง 5 ตัวพบว่าสามารถจำลองการทำงานได้ 15 รูปแบบ โดยการจำลองการทำงานของทั้ง 15 รูปแบบจะกระทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ เมื่อเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระที่ปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดเท่ากับกำลังไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว นั่นคือจุดที่  $\Delta P/P = 0\%$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ตรวจจับและต่อต้านสภาวะการแยกตัวอิสระที่ยากที่สุด จากนั้นจะนำเสนอผลการจำลองการทำงานใน



แต่ละเทคนิคพร้อมอภิปรายผล และนำเสนอรูปภาพเฉพาะ การจำลองการทำงานในรูปแบบที่ 1 รูปแบบที่ 4 รูปแบบที่ 6 และรูปแบบที่ 10 เพราะเป็นภาพผลการจำลองการทำงานที่ น่าสนใจ โดยรายละเอียดผลการจำลองการทำงานทั้งหมด สามารถหาเพิ่มเติมได้จากรายงานการวิจัยเรื่อง “การค้นคว้า ความเหมาะสมของวิธีการตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบ แยกตัวอิสระแบบโลคอลสำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อใน หลายหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว” ที่กำลังจัดพิมพ์ เผยแพร่ในโอกาสต่อไป การจำลองการทำงานจะสร้างสภาวะ การแยกตัวอิสระให้เกิดขึ้นที่เวลา 0.2 วินาที



รูปที่ 2 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยใช้บล็อกเทคนิค แบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

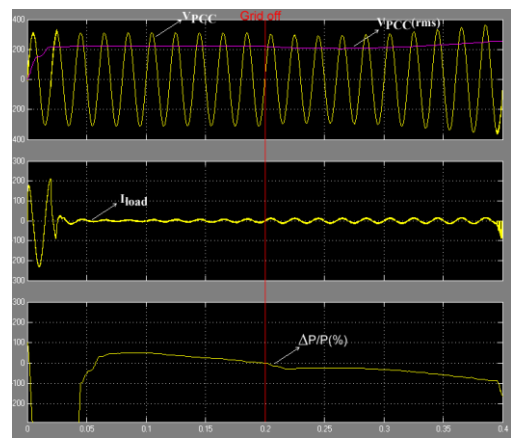


รูปที่ 3 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส 5 ตัว ร่วมกันจ่าย โหลดแบบเชื่อมต่อโครงข่ายระบบไฟฟ้า

### 3.1 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 5 ตัว

จากผลการจำลองการทำงานสร้างสภาวะการแยกตัว อิสระที่เวลา 0.2 วินาที จะเห็นได้จากรูปที่ 4 และ 5 ว่าไม่ สามารถตรวจจับสภาวะการแยกตัวอิสระได้ เนื่องจากแรงดัน

ภายหลังจากสภาวะการแยกตัวอิสระอยู่นอกขอบเขต ที่เทคนิคนี้สามารถตรวจจับได้ ในบทความนี้ใช้มาตรฐาน IEC 62116 ดังนั้นเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำนี้จะตรวจจับ สภาวะการแยกตัวอิสระได้เมื่อแรงดันมากกว่า 253 V ( $V > 115%$  ถ้ากำหนดแรงดันก่อนการเกิดสภาวะการแยกตัวอิสระ ให้คงที่เท่ากับ 220 V จะได้  $220 \times 115% = 253$  V) หรือ แรงดันน้อยกว่า 187 V ( $V < 85%$  จะได้  $220 \times 85% = 187$  V) โดยภาพจาก Scope ใน Inverter ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 5 มี ลักษณะเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ภาพจาก Scope หลัก รูปแบบที่ 1



รูปที่ 5 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-5 รูปแบบที่ 1

### 3.2 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 4 ตัว เทคนิคแบบ เปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว

รูปแบบที่ 2 ใช้เวลาตรวจจับและต่อต้านสภาวะการ แยกตัวอิสระได้ภายในเวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก



Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-4 จะมีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ส่วน Inverter ตัวที่ 5 มีลักษณะของรูปคลื่นกระแส  $I_{load}$  แตกต่างออกไป เนื่องจากผลของเทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.3 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 3 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

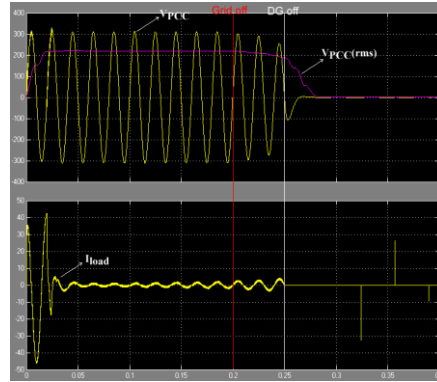
รูปแบบที่ 3 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-3 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ส่วน Inverter ตัวที่ 4 มีลักษณะของรูปคลื่นกระแส  $I_{load}$  แตกต่างออกไป เนื่องจากผลของเทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดันส่วน Inverter ตัวที่ 5 มีลักษณะคล้ายคลึงกับภาพ Inverter ตัวที่ 1-3 เพียงแต่ขนาดกระแส  $I_{load}$  ในช่วงรูปคลื่น สุดท้ายก่อนที่ DG<sub>off</sub> จะมีขนาดกระแสที่น้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ โดยที่ทั้งหมดหยุดที่เวลาเดียวกัน

3.4 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 2 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 2 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

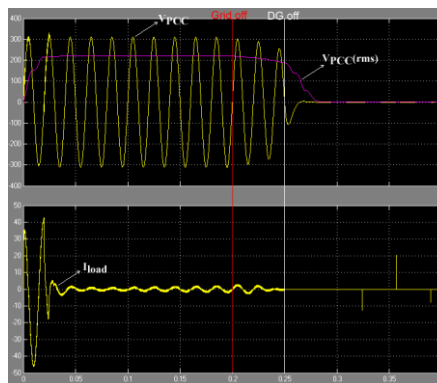
รูปแบบที่ 4 ใช้เวลา 0.25 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-2 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกับรูปที่ 6 ส่วน Inverter ตัวที่ 3-4 แสดงดังรูปที่ 7 ส่วนในรูปที่ 8 เป็นภาพจาก Scope ของ Inverter ตัวที่ 5 โดยใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ แต่เมื่อสังเกตจะเหมือนกับรูปที่ 6

3.5 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 2 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 2 ตัว

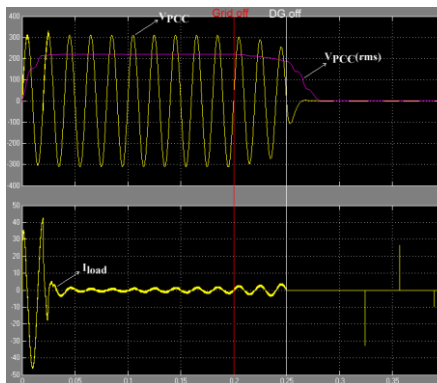
รูปแบบที่ 5 ใช้เวลา 0.25 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1 ใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ และ Inverter ตัวที่ 4-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 2-3 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน



รูปที่ 6 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-2 รูปแบบที่ 4



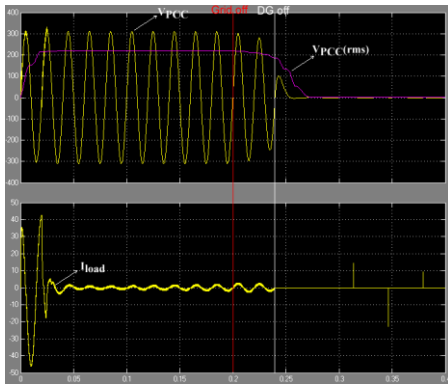
รูปที่ 7 ภาพจาก Scope ใน Inverter 3-4 รูปแบบที่ 4



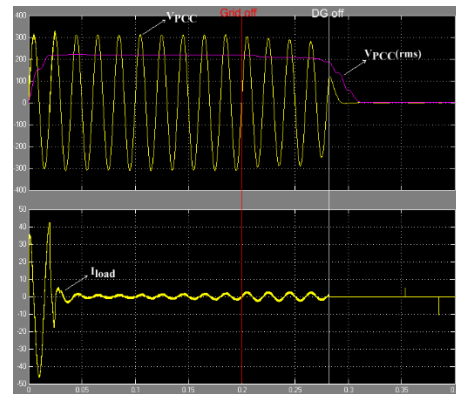
รูปที่ 8 ภาพจาก Scope ใน Inverter 5 รูปแบบที่ 4

3.6 เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 5 ตัว

รูปแบบที่ 6 ใช้เวลา 0.24 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-5 มีลักษณะเดียวกับรูปที่ 9



รูปที่ 9 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-5 รูปแบบที่ 6



รูปที่ 10 ภาพจาก Scope ใน Inverter 1-5 รูปแบบที่ 10

3.7 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 4 ตัว

รูปแบบที่ 7 ใช้เวลา 0.243 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 2-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 1 ที่ใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

3.8 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 3 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

รูปแบบที่ 8 ใช้เวลา 0.245 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 2-4 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.9 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 2 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 2 ตัว

รูปแบบที่ 9 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-2 และ ตัวที่ 4-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 3 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.10 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 5 ตัว

รูปแบบที่ 10 ใช้เวลา 0.282 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-5 มีลักษณะเดียวกับรูปที่ 10

3.11 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 4 ตัว

รูปแบบที่ 11 ใช้เวลา 0.284 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 2-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 1 ที่ใช้เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

3.12 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 1 ตัว เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 3 ตัว

รูปแบบที่ 12 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 3-5 มีลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเหมือนกัน เพียงแต่ขนาดกระแส Iload ในช่วงรูปคลื่นสุดท้ายก่อนที่ DG<sub>off</sub> ของ Inverter ตัวที่ 3-5 จะมีขนาดกระแสที่น้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ ซึ่งจะแตกต่างจาก Inverter ตัวที่ 2 ที่ใช้เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

3.13 เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ 4 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

รูปแบบที่ 13 ใช้เวลา 0.315 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-4 มีรูปคลื่นลักษณะเดียวกับ ส่วน Inverter ตัวที่ 5 จะแตกต่างออกไปเนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ



3.14 เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 4 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 1 ตัว

รูปแบบที่ 14 ใช้เวลา 0.243 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 1-4 มีรูปคลื่นลักษณะเดียวกับ ส่วน Inverter ตัวที่ 5 จะแตกต่างออกไปเนื่องจากผลของเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ

3.15 เทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน 1 ตัว เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำและเปลี่ยนแรงดันต่ำ 4 ตัว

รูปแบบที่ 15 ใช้เวลา 0.264 วินาที ภายในบล็อก Inverter แต่ละตัวหยุดภายในเวลาเดียวกัน โดย Inverter ตัวที่ 2-5 มีรูปคลื่นลักษณะเดียวกับ ส่วน Inverter ตัวที่ 1 จะแตกต่างออกไปเนื่องจากผลของเทคนิคแบบเปลี่ยนแรงดัน

4. บทสรุป

เทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำเป็นเทคนิคแบบพาสซีฟ เมื่อปริมาณของกำลังไฟฟ้าของหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่ากันหรือใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้งระบบจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับสถานะการแยกตัวอิสระได้ ดังจะเห็นได้จากรูปแบบที่ 1 เนื่องจากแรงดันภายหลังจากสถานะการแยกตัวอิสระอยู่นอกขอบเขตที่เทคนิคนี้สามารถตรวจจับได้ บทความนี้ใช้มาตรฐาน IEC 62116 ดังนั้นเทคนิคแบบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ จะตรวจจับได้เมื่อแรงดันมากกว่า 253 V หรือ แรงดันน้อยกว่า 187 V

จากผลการจำลองรูปแบบที่ 2 ถึง รูปแบบที่ 15 พบว่า สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระได้ทั้งหมดโดยใช้เวลาแตกต่างกันเล็กน้อย โดยถ้าใช้เทคนิคแบบแอคทีฟทั้งหมดจะใช้เวลา 0.24 วินาที และถ้าใช้เทคนิคแบบไฮบริดทั้งหมดจะใช้เวลา 0.282 วินาที และถ้าผสมผสานเทคนิคแบบพาสซีฟแบบแอคทีฟ และแบบไฮบริดเข้าด้วยกันจะใช้เวลา 0.315 วินาที แต่ทั้งหมดยังอยู่ในเงื่อนไขของมาตรฐานที่กำหนดว่า ต้องตรวจจับและหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลังภายในสองวินาที นับตั้งแต่เมื่อสถานะการแยกตัวอิสระเริ่มเกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรใช้เทคนิคที่แตกต่างกันไปในอินเวอร์เตอร์แต่ละตัว หรือ ใช้เทคนิคแบบไฮบริดในอินเวอร์เตอร์ทั้งหมดเพื่อลดผลกระทบจากการฉีดยุติ

เข้าไปตรวจสอบสถานะที่เกิดขึ้นในทุก ๆ ครั้งที่ต้องการตรวจสอบสถานะที่เกิดขึ้นหากใช้เทคนิคแบบแอคทีฟ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัย จาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.) : งบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2565

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sawin JL, Rutovitz J, Sverrisson F, et al. A comprehensive annual overview of the state of renewable energy. Advancing the global renewable energy transition-Highlights of the REN21 Renewables 2018 Global Status Report in perspective. Available from: <https://www.ren21.net/gsr-2018/> [Accessed 8th July 2022].
- [2] Energy Policy and Planning Office. The plan to drive Thailand's smart grid operations in the short term (B.E.2560-2564). Ministry of Energy. Available from: [https://www.eppo.go.th/images/Power/pdf/smart\\_grid\\_actionplan.pdf](https://www.eppo.go.th/images/Power/pdf/smart_grid_actionplan.pdf) [Accessed 8th July 2022].
- [3] Yingram M. Passive islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation. Ladkrabang Engineering Journal. 2013;30(3):19-24.Thai.
- [4] Yingram M. Over/under-voltage islanding detection technique of anti-islanding for grid-connected distributed generation on matlab/simulink. Ladkrabang Engineering Journal. 2015;32(1):67-72.Thai.
- [5] Yingram M, Premrudeepreechacharn S. Over/undervoltage and undervoltage Shift of hybrid islanding detection method of distributed generation. The Scientific World Journal. 2015.
- [6] Yingram M. Active islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation: part 1. Ladkrabang Engineering Journal. 2016;33(2):1-7.Thai.



- [7] Y Ingram M, Soonrad D. Active islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation (part 2). *RMUTI Journal Science and Technology*. 2017;10(1):11-21.Thai.
- [8] Y Ingram M. Remote islanding detection techniques of anti-islanding for grid-connected distributed generation. *RMUTI Journal Science and Technology*. 2020;13(2):1-17.Thai.
- [9] Y Ingram M. Development of anti-islanding hybrid detection technique in grid-connected distributed generation. PhD thesis. Chiang Mai University; 2014.
- [10] Chen X, Li Y, Crossley P. A novel hybrid islanding detection method for grid-connected microgrids with multiple inverter-based distributed generators based on adaptive reactive power disturbance and passive criteria. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018 Dec 14;34(9):9342-56.
- [11] Ke J, Zhengxuan Z, Qijuan Z, Zhe Y, Tianshu B. Islanding detection method of multi-port photovoltaic DC micro grid based on harmonic impedance measurement. *IET Renewable Power Generation*. 2019 Oct;13(14):2604-11.







## การประยุกต์ใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลร่วมกับแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติเพื่อจำลองแผนที่น้ำท่วมในลุ่มน้ำมูล

### Application of Remote Sensing Data with HEC-RAS 2D Model to Simulate Floodplain in Mun River Basin

วีรภัทร ดวงขวัญ<sup>1\*</sup> ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์<sup>1</sup> และดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10140

Weeraphat Duangkwan<sup>1\*</sup>, Chaiwat Ekkawatpanit<sup>1</sup> and Duangrudee Kositgittiwong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha Uthit Rd, Bang Mot, Thung Khru, Bangkok 10140

\* ผู้รับผิดชอบบทความ: weeraphat.bay@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 08-2431-7661

Received: 24 June 2022, Revised: 16 September 2022, Accepted: 6 October 2022

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลโดยการนำภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT-8 ในการจำแนกการใช้ที่ดินเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงในการประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ โดยมีการจำแนกการใช้ที่ดินเป็น 4 ประเภท และใช้การจำแนกแบบกำกับดูแลด้วยวิธี Minimum Distance และทำการตรวจสอบความถูกต้องของการจำแนกการใช้ที่ดิน จากนั้นนำข้อมูลการใช้ที่ดินนี้มากำหนดสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงเชิงพื้นที่และข้อมูลน้ำท่ามาจำลองด้วยแบบจำลองการไหลสองมิติ ข้อมูลการศึกษานี้ได้สอบเทียบแบบจำลองในปี พ.ศ. 2554 และตรวจพิสูจน์ในปี พ.ศ.2557 ได้ผลที่ดีที่สุดคือมีค่า NSE อยู่ในช่วง 0.95-0.97 และมี  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.96-0.99 ซึ่งหมายถึงแบบจำลองมีความแม่นยำสูง โดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลจากภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT-8 ในแบบจำลอง HEC-RAS สองมิตินี้มีข้อดีคือสามารถจำลองพื้นที่น้ำท่วมในลักษณะการใช้ที่ดินต่างๆ ได้

**คำสำคัญ** การจำแนกการใช้ที่ดิน แบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ พื้นที่น้ำท่วม ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 แม่น้ำมูล

#### Abstract

This paper presents an application of remote sensing data using LANDSAT-8 satellite images for land use identification to estimate Manning's roughness coefficient. Then, the land use from satellite images with a two-dimensional HEC-RAS mathematical model is presented. The accuracy of the land use classification was tested, and four categories of land use were categorized using the minimum distance which is a supervised classification technique. Then, the Manning's roughness coefficient determined from the land-use data was used for two-dimensional simulation. To calibrate and validate this study, data from 2011 and 2014 were used. The best result has an NSE of 0.95-0.97 and an  $R^2$  of 0.96-0.99, indicating that it is highly accurate. This two-dimensional



HEC-RAS model has the benefit of being able to simulate flooded regions in varied land use characteristics while using remote sensing data from LANDSAT-8 satellite images.

**Keywords:** Land use classification, HEC-RAS 2D model, Inundation area, LANDSAT-8 satellite imagery, Mun River

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันแบบจำลองทางชลศาสตร์ HEC-RAS สองมิติ เป็นแบบจำลองการไหลที่พัฒนาโดย U.S Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center นิยมถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการจำลองสถานการณ์น้ำท่วม โดยในการจำลองการไหลของน้ำสองมิติต้องใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model, DEM) ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งของพื้นที่โดยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของพื้นที่ เช่น ลักษณะของสิ่งปกคลุมดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น

การจำแนกการใช้ที่ดินสามารถจำแนกได้โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมแล้วอาศัยการประมวลผลจากอัลกอริทึมต่าง ๆ ซึ่งทำให้สามารถจำแนกประเภทการใช้ที่ดินได้ ที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ใช้ข้อมูลดาวเทียม Landsat ในการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น Minimum Distance [1],[2], Maximum Likelihood [1-5], Support Vector- Machine [5] และวิธี Neural Network [6] เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นวิธีการจำแนกแบบกำกับดูแลที่ต้องกำหนดพื้นที่ฝึก (Training Area) โดยการกำหนดเกณฑ์ของการจำแนกประเภทข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อจำแนกข้อมูลให้กับข้อมูลภาพทั้งหมด

ที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HEC-RAS สองมิติรวมกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากข้อมูล National Land Cover Dataset, NLCD ที่จำแนกการใช้ที่ดินด้วยวิธี Decision Tree พัฒนาขึ้นโดย United States Geological Survey, USGS ในการจำลองพื้นที่น้ำท่วมโดยใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งตามชนิดการใช้ที่ดิน [7] โดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แมนนิ่งจากการศึกษาของ Kalyanapu et al. [8] ที่ทำการศึกษาเพื่อดูความแตกต่างระหว่างการใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งที่ถูกกำหนดโดยการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของสัมประสิทธิ์แมนนิ่งตามข้อมูลการใช้ที่ดินของ NLCD กับสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งที่ใช้โดยทั่วไปและ

นอกจากนั้น Pinos et al.[9] ใช้ข้อมูลการใช้ที่ดินที่จำแนกและปรับปรุงโดย The National Water Secretariat of Ecuador, SENAGUA [10] ในการจำลองเปรียบเทียบพื้นที่น้ำท่วมในพื้นที่ต่างๆ ด้วยแบบจำลองการไหลสองมิติ โดยผลการจำลองพบว่าแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติให้ผลการคำนวณพื้นที่น้ำท่วมน้อยกว่าการจำลองหาพื้นที่น้ำท่วมที่ใช้ในการเปรียบเทียบประมาณ 7%-53% และมีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าการจำแนกประเภทการใช้ที่ดิน 3,5 และ 10 ประเภทให้ผลน้ำท่าที่ไม่แตกต่างกันในแต่ละกรณี [11]

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองพื้นที่น้ำท่วมด้วยแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติโดยใช้การจำแนกการใช้ที่ดินที่สร้างขึ้นจากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 จากการจำแนกข้อมูลแบบกำกับดูแลด้วยวิธี Minimum Distance ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปอย่างกว้างขวางในการจำแนกการใช้ที่ดิน แล้วจึงนำข้อมูลการใช้ที่ดินไปใช้ในการกำหนดสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งเพื่อเปรียบเทียบกับการจำลองพื้นที่น้ำท่วมที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งแบบค่าเดียวที่ไม่ขึ้นกับลักษณะการใช้ที่ดิน โดยมีขอบเขตพื้นที่การศึกษาอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล

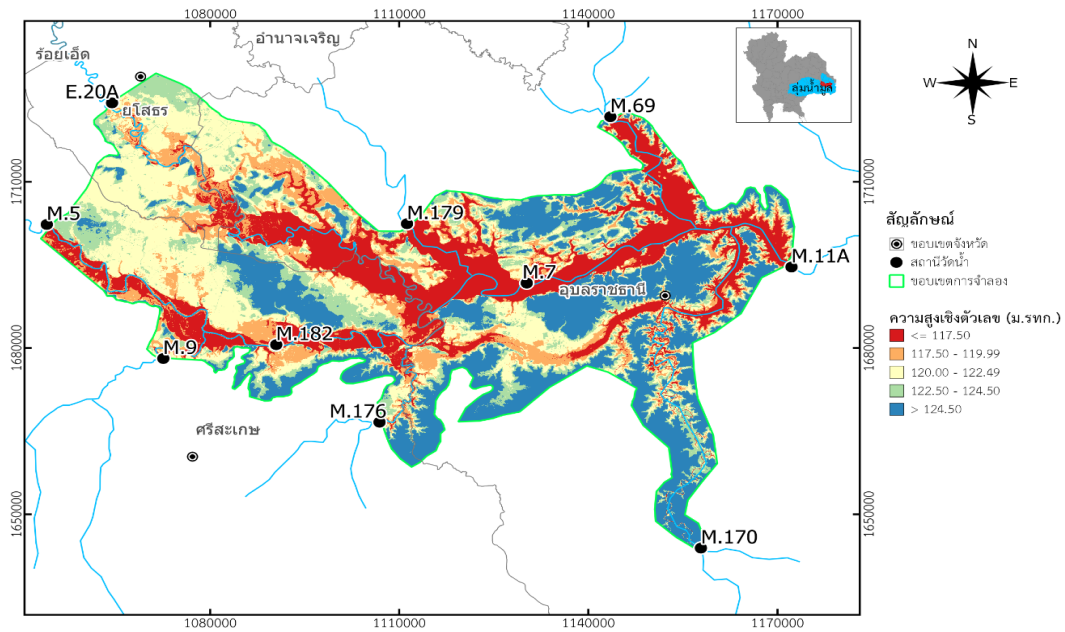
### 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 2.1 พื้นที่การศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้มีพื้นที่ศึกษาอยู่ภายในลุ่มน้ำมูลซึ่งครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของจังหวัดยโสธร ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ดังรูปที่ 1

#### 2.2 ข้อมูลอุทกวิทยาและแผนที่น้ำท่วม

ข้อมูลน้ำท่าในการศึกษาครั้งนี้รวบรวมข้อมูลจากกรมชลประทาน โดยประกอบด้วยข้อมูลน้ำท่าและระดับน้ำรายวัน จากสถานีวัดน้ำทั้งหมด 10 สถานีได้แก่ สถานี M.5 M.7 M.9 M.11A M.69 M.170 M.176 M.179 M.182 และ E.20A ของปี พ.ศ.2554 และ พ.ศ.2557 โดยมีตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำดังรูปที่ 1



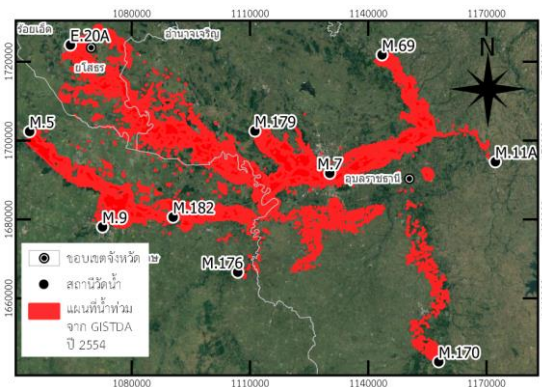
รูปที่ 1 แผนที่แสดงพื้นที่ศึกษา

โดยมีสถานีวัดน้ำท่าที่ด้านเหนือน้ำได้แก่ สถานี M.5 M.9 M.11A M.170 M.176 M.179 และสถานี E.20A และมีสถานีวัดน้ำท่าที่ด้านท้ายน้ำคือสถานี M.11A โดยการจำลองครั้งนี้มีสถานีวัดน้ำ M.7 และ M.182 เป็นสถานีที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง

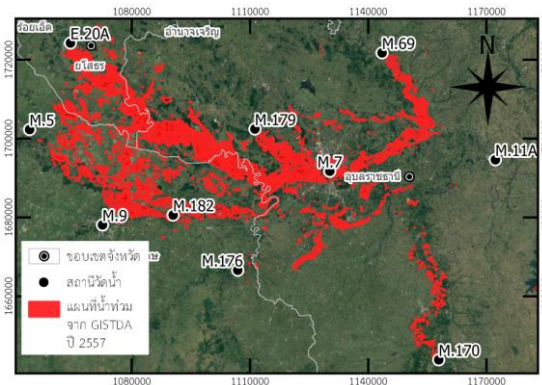
สำหรับการเปรียบเทียบพื้นที่น้ำท่วมกับแบบจำลองในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ข้อมูลพื้นที่น้ำท่วมที่จัดทำโดยสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน, GISTDA) โดยใช้ข้อมูลของปี พ.ศ.2554 และ พ.ศ.2557 ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีพื้นที่น้ำท่วมในขอบเขตของแบบจำลองประมาณ 839.2 ตารางกิโลเมตรและ 500.5 ตารางกิโลเมตรตามลำดับ

### 2.3 ข้อมูลการใช้ที่ดิน

ในการจำแนกข้อมูลการใช้ที่ดินจากดาวเทียม Landsat-8 จะมีการสอบเทียบข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงซึ่งกรมพัฒนาที่ดินจะจัดทำข้อมูลใหม่ทุกๆ 4 ปี และสามารถดาวน์โหลดได้จาก เว็บไซต์ <https://dinonline.ddd.go.th/> โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลการใช้ที่ดินครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของจังหวัดยโสธร ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นข้อมูลที่จัดทำในปี พ.ศ.2562

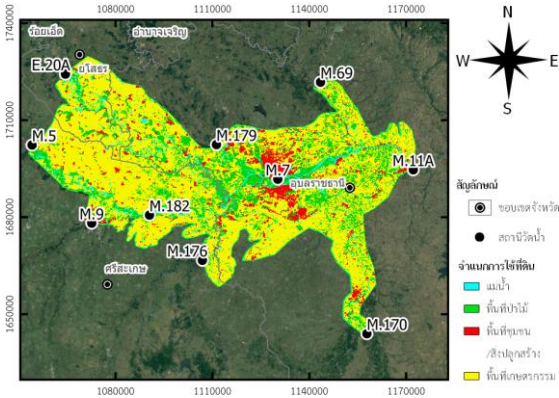


(ก) ปี พ.ศ.2554



(ข) ปี พ.ศ.2557

รูปที่ 2 แผนที่น้ำท่วมในพื้นที่ศึกษาจากภาพถ่ายดาวเทียมของ GISTDA



รูปที่ 3 แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษา

### 2.4 ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8

สำหรับการจำแนกการใช้ที่ดินในการศึกษาคั้งนี้ เลือกใช้ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 ระบบ Operational Land Imagery (OLI) เนื่องจากดาวเทียม Landsat-8 เป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติที่มีความละเอียดภาพ 30 เมตร โคจรซ้ำตำแหน่งเดิมทุกๆ 16 วัน โดยในการศึกษาคั้งนี้ได้เลือกใช้ภาพถ่ายดาวเทียมที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นภาพที่อยู่ในช่วงวันที่ 3-12 ธันวาคม พ.ศ.2562 โดยมีปริมาณเมฆน้อยเหมาะสมกับการจำแนกข้อมูล สำหรับภาพถ่ายดาวเทียมนี้สามารถดาวน์โหลดได้จาก <https://earthexplorer.usgs.gov>

ตารางที่ 1 ข้อมูล Path/Row ของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8

ลำดับที่	ตำแหน่ง Path	ตำแหน่ง Row	บันทึกข้อมูลวันที่
1	126	49	12/12/2562
2	126	50	12/12/2562
3	127	49	03/12/2562
4	127	50	03/12/2562

### 2.5 ข้อมูลภูมิประเทศเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model, DEM)

ข้อมูลภูมิประเทศเชิงตัวเลข (DEM) ในการศึกษานี้ได้ใช้แผนที่ความละเอียดภาพจุด 30 เมตรของโครงการ The Shuttle Radar Topography Mission, SRTM ซึ่งเป็นความร่วมมือของ National Aeronautics and Space Administration, NASA และ National Geospatial-Intelligence Agency, NGA ในการจัดทำข้อมูลพื้นผิวภูมิ

ประเทศทั่วโลกและสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://earthexplorer.usgs.gov> เช่นเดียวกัน

### 2.6 วิธีการศึกษา

#### 2.6.1 การเตรียมข้อมูลการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียม

ในการศึกษานี้ได้รวมแบนด์ (Composite Band) ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 โดยทำการรวมแบนด์ 2-7 จากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 โดยใช้โปรแกรม QGIS มีรายละเอียดช่วงคลื่นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความยาวคลื่นของภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 ในแต่ละแบนด์

แบนด์	ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)
2	0.45-0.51
3	0.53-0.59
4	0.64-0.67
5	0.85-0.88
6	1.57-1.65
7	2.11-2.29

#### 2.6.2 การจำแนกข้อมูลแบบกำกับดูแล

1) การกำหนดพื้นที่ ตัวอย่าง (Training Area) ในการศึกษานี้แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 4 ชนิดได้แก่พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่แหล่งน้ำ พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ชุมชน

2) การจำแนกข้อมูลดาวเทียมด้วยเทคนิคการจำแนกแบบ Minimum Distance โดยจะทำการจำแนกข้อมูลจากการพิจารณาค่าสะท้อนช่วงคลื่นของแต่ละจุดภาพว่ามีระยะห่างน้อยที่สุดจากจุดศูนย์กลางของค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลตัวอย่างที่ทำการจำแนกไว้จากขั้นตอนการกำหนดพื้นที่ตัวอย่าง

3) การประเมินความถูกต้อง (Accuracy Assessment) ของการจำแนกภาพถ่ายดาวเทียม ด้วยเทคนิคการสุ่มตัวอย่างอย่างง่าย (Simple Random Sampling) โดยการคำนวณหาจำนวนตัวอย่างจากสมการที่ (1)

$$n = \left( \frac{\sum W_i S_i}{S(\bar{O})} \right)^2 \quad (1)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนตัวอย่าง,  $W_i$  คือสัดส่วนของพื้นที่ของสิ่งปกคลุมประเภท  $i$ ,  $S(\bar{O})$  คือความคลาดเคลื่อนของค่าความถูกต้องโดยรวมที่ต้องการและ  $S_i$  คือส่วนเบี่ยงเบน



มาตรฐานคำนวณได้จาก ความถูกต้องของผู้ใช้ ( $U_i$ ) ดังสมการที่ (2)

$$S_i = \sqrt{U_i(1 - U_i)} \quad (2)$$

แล้วสร้างเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน (Error Matrix) เพื่อคำนวณค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์แคปปาโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (4) โดยที่สัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa coefficient) บ่งบอกถึงความสอดคล้องกันของข้อมูลทั้งสองกลุ่มมีค่าตั้งแต่ 0-1 โดยที่ 0 หมายถึงความไม่สอดคล้องของข้อมูล และหากค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึงข้อมูลมีความสอดคล้องกันมาก [12]

$$\text{ความถูกต้องรวม} = \frac{\text{จำนวนที่ถูกต้อง}}{\text{จำนวนข้อมูล}} \quad (3)$$

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \times n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \times n_{+i})} \quad (4)$$

โดยที่  $k$  คือประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน,  $n_{ii}$  คือผลรวมของแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน,  $n_{i+}$  คือผลรวมของแถวของเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน,  $n_{+i}$  คือผลรวมของคอลัมน์ของ เมทริกซ์ความคลาดเคลื่อน,  $N$  คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

ตารางที่ 3 เกณฑ์ความสอดคล้องของสัมประสิทธิ์แคปปา [12]

ลำดับ	สัมประสิทธิ์แคปปา	ขนาดความสอดคล้อง (Strength of Agreement)
1	<0.00	แย่ (Poor)
2	0.00-0.20	น้อย (Slight)
3	0.21-0.40	พอใช้ (Fair)
4	0.41-0.60	ปานกลาง (Moderate)
5	0.61-0.80	ดี (Substantial)
6	0.81-1.00	ดีมาก (Almost perfect)

## 2.7 แบบจำลองชลศาสตร์ HEC-RAS สองมิติ

แบบจำลอง HEC-RAS สองมิติใช้สมการที่เรียกว่า 2D Diffusion Wave โดยอาศัยหลักการของการอนุรักษ์มวลและอนุรักษ์โมเมนตัมดังสมการที่ (5) (6) และ (7)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial(hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (5)$$

โดยที่  $H$  คือระดับผิวน้ำ(เมตร),  $h$  คือความลึกของน้ำ(เมตร),  $t$  คือเวลา(วินาที),  $u$  และ  $v$  คือความเร็วในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ (m/s) และ  $q$  คืออัตราการไหลของน้ำจากแหล่งกำเนิดน้ำต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (m/s)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(u)}{\partial x} + v \frac{\partial(u)}{\partial y} = -g \frac{\partial(H)}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial(v)}{\partial x} + v \frac{\partial(v)}{\partial y} = -g \frac{\partial(H)}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (7)$$

และจากสมการที่ (6) และ (7) ซึ่งก็คือสมการอนุกรมโมเมนตัมแบบสองมิติ โดยที่  $g$  คือแรงโน้มถ่วง,  $v_t$  คือสัมประสิทธิ์ความหนืด,  $c_f$  คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน,  $f$  คือสัมประสิทธิ์ของโคริโอลิส โดยที่แบบจำลอง HEC-RAS ประยุกต์ใช้สมการทั้งสามเพื่อแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [13]

### 2.7.1 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง HEC-RAS

สอบเทียบแบบจำลองโดยใช้น้ำท่าในการสอบเทียบที่สถานี M.7 และ M.182 โดยมีดัชนี Nash Sutcliffe Efficiency, NSE เพื่อวัดความแม่นยำของแบบจำลองซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (8) โดยที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 เมื่อค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ยังใช้ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) ดังสมการที่ (9) โดยที่เมื่อค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึงแบบจำลองมีความแม่นยำสูง และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เมื่อค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึงผลของแบบจำลองมีความแม่นยำสูงคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (10)$$



โดยที่ S คือค่าที่ได้จากแบบจำลอง, O คือค่าที่ได้จากการตรวจวัด,  $\bar{S}$  และ  $\bar{O}$  คือค่าเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองและตรวจวัดตามลำดับ

### 2.8 สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง

ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการแก้ไขในการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์คือสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง โดยที่การศึกษาครั้งนี้จะแบ่งการเลือกใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงเป็น 2 กรณี

โดยกรณีที่ 1 ใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงของพื้นที่น้ำท่วมถึงและทางน้ำเปิดโดยอ้างอิงจากการศึกษาที่ผ่านมา [14],[15] ซึ่งใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของพื้นที่น้ำท่วมเพียงค่าเดียวโดยมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.03-0.15

ส่วนกรณีที่ 2 คือกำหนดสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้ที่ดินโดยใช้ค่าจากการศึกษาที่ผ่านมา [8] ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงสำหรับการใช้ที่ดินแต่ละชนิด

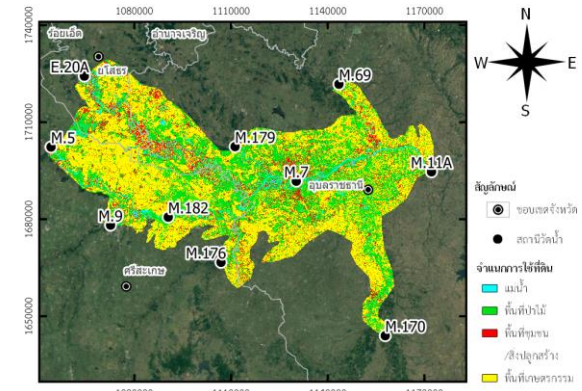
Land cover Description	Manning's n
Open water	0.001
Developed, open space	0.0404
Developed, low intensity	0.0678
Developed, medium intensity	0.0678
Developed, high intensity	0.0404
Barren land	0.0113
Deciduous forest	0.36
Evergreen forest	0.32

## 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

### 3.1 การจำแนกการใช้ที่ดิน

จากการจำแนกการใช้ที่ดินโดยใช้วิธีกำกับดูแลในการจำแนกโดยจำแนกเป็น 4 ประเภทได้แก่ พื้นที่แหล่งน้ำ พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ชุมชนดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีพื้นที่รวมทั้งหมดของพื้นที่ที่สนใจ 3,789 ตารางกิโลเมตร จากการตรวจสอบข้อมูลตัวอย่างโดยเริ่มจากการหาจำนวนข้อมูลตัวอย่างที่เหมาะสมในการตรวจสอบ ได้ตัวอย่างสุ่มเท่ากับ 117 ตัวอย่างแล้วนำไปสอบเทียบกับข้อมูลการใช้ที่ดินจากกรมพัฒนาที่ดิน แล้วหาค่าความแม่นยำด้วยวิธีเมทริกซ์ความคลาดเคลื่อนได้ผลดังตารางที่ 5

นำไปคำนวณหาความแม่นยำโดยรวมทั้งหมดได้เท่ากับ 87.18 เปอร์เซ็นต์และมีสัมประสิทธิ์แคปปาเท่ากับ 0.81 โดยผลการจำแนกการใช้ที่ดินในพื้นที่ที่ศึกษาครั้งนี้พบว่าการจำแนกข้อมูลแบบกำกับดูแลโดยใช้วิธี Minimum Distance สามารถจำแนกการใช้ที่ดินโดยมีค่าความถูกต้องโดยรวมที่สูง และมีค่าสัมประสิทธิ์ แคปปาในการจำแนกการใช้ที่ดินนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 4 แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินจากการจำแนกด้วยดาวเทียม Landsat-8

ตารางที่ 5 ค่าความถูกต้องจากการจำแนกการใช้ที่ดิน

ประเภทสิ่งปกคลุมดิน	ประเภทดิน	ข้อมูลอ้างอิง				
		W <sup>1</sup>	F <sup>2</sup>	A <sup>3</sup>	U <sup>4</sup>	Total
ข้อมูลจากการจำแนก	W	13	3	2	0	18
	F	0	36	3	0	39
	A	0	3	42	0	45
	U	0	3	1	11	15
	Total	13	45	48	11	117

- 1 W หมายถึงพื้นที่แหล่งน้ำ
- 2 F หมายถึงพื้นที่ป่าไม้
- 3 A หมายถึงพื้นที่เกษตรกรรม
- 4 U หมายถึงพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง

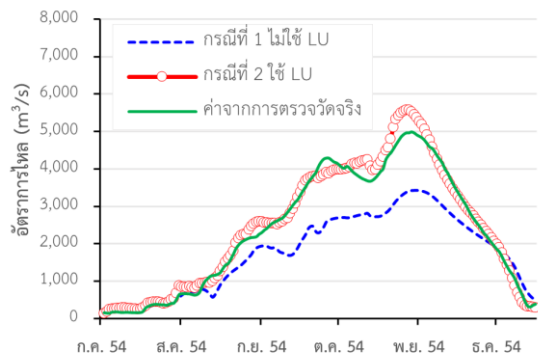
### 3.2 การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ

สำหรับผลการจำลองแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ โดยใช้ข้อมูลการใช้ที่ดินและใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงทั้ง 2 กรณีเป็นไปดังรูปที่ 5-8 โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการปรับพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงเพื่อทำการสอบเทียบแบบจำลองโดยได้ผลของการปรับสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงในกรณีที่ 1 คือ พื้นที่น้ำท่วมถึงมีค่า 0.07 และสำหรับทางน้ำเปิดมีค่าเท่ากับ 0.03 โดยได้ผลน้ำท่าจากการจำลองในปี พ.ศ. 2554 ดังแสดงในรูป

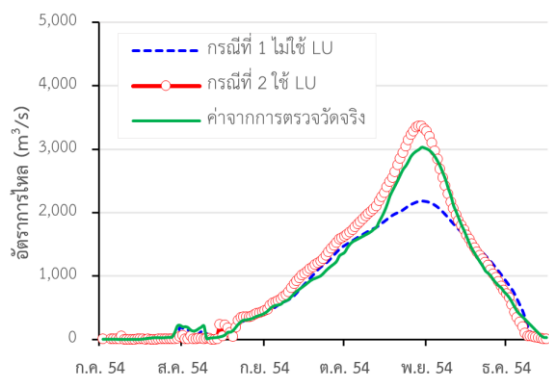


ที่ 5 และ 6 คำนวณหาดัชนี NSE R<sup>2</sup> และ RMSE ที่สถานี M.7 และ M.182 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6 และสำหรับสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งในกรณีที่ 2 ได้ผลการปรับพารามิเตอร์ คือ 0.002 สำหรับพื้นที่แหล่งน้ำ 0.2 สำหรับพื้นที่ป่า 0.0404 สำหรับพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง และ 0.01 สำหรับพื้นที่การเกษตร ผลการคำนวณหา NSE R<sup>2</sup> และ RMSE ที่สถานี M.7 และ M.182 ดังแสดงในตารางที่ 6 ตารางที่ 6 ค่า NSE R<sup>2</sup> และ RMSE ของการสอบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ

สถานี	ดัชนี	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
M.7 (1/6/2554-15/12/2554)	NSE	0.69	0.97
	R <sup>2</sup>	0.95	0.97
	RMSE	888.79	287.32
M.182 (1/5/2557-31/3/2558)	NSE	0.92	0.97
	R <sup>2</sup>	0.94	0.99
	RMSE	270.42	172.82



รูปที่ 5 น้ำท่าที่สถานี M.7 จากแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าปี พ.ศ.2554



รูปที่ 6 น้ำท่าที่สถานี M.182 จากแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าปี พ.ศ.2554

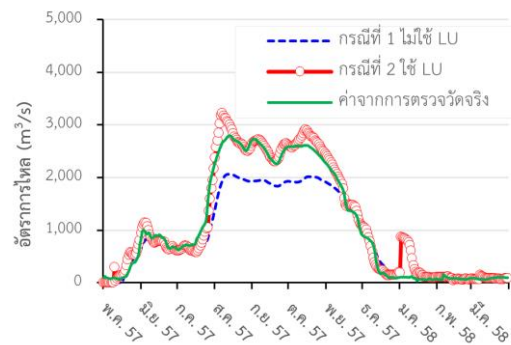
จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นการใช้ข้อมูลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยใช้ดาวเทียม Landsat-8 เพื่อการกำหนดสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งนั้นมีค่า NSE R<sup>2</sup> และ RMSE ที่แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของแบบจำลองมากกว่ากรณีที่ 1 ทั้งสถานี M.7 และ M.182

### 3.3 การตรวจพิสูจน์แบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ

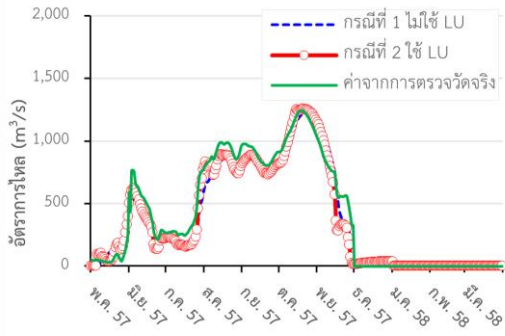
สำหรับผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง HEC-RAS สองมิติในกรณีที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 พบว่าที่สถานี M.7 จะเห็นถึงความแตกต่างของกราฟน้ำท่าของทั้งสองกรณีอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้ามที่สถานี M.182 จะเห็นความแตกต่างของกราฟอัตราการไหลค่อนข้างน้อย โดยค่า NSE R<sup>2</sup> และ RMSE เป็นไปตามตารางที่ 7

จากการวิเคราะห์ค่า NSE R<sup>2</sup> และ RMSE ในตารางที่ 7 พบว่าการจำลองแบบจำลองกรณีที่ 2 มีความแม่นยำมากกว่าในกรณี 1 เฉพาะที่สถานี M.7 ในขณะที่ที่สถานี M.182 พบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำใกล้เคียงกันสำหรับทั้งสองกรณี โดยที่ในกรณีที่ 1 มีค่า NSE และ RMSE ที่แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของแบบจำลองมากกว่ากรณีที่ 2 เพียงเล็กน้อย ตารางที่ 7 ค่า NSE R<sup>2</sup> และ RMSE ของการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ

สถานี	ดัชนี	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
M.7 (1/6/2554-15/12/2554)	NSE	0.86	0.95
	R <sup>2</sup>	0.95	0.98
	RMSE	383.40	225.96
M.182 (1/5/2557-31/3/2558)	NSE	0.95	0.90
	R <sup>2</sup>	0.96	0.96
	RMSE	96.50	129.14



รูปที่ 7 น้ำท่าที่สถานี M.7 จากแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าปี พ.ศ.2557



รูปที่ 8 น้ำท่าที่สถานี M.182 จากแบบจำลองHEC-RAS สองมิติโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าปี พ.ศ.2557

### 3.4 วิเคราะห์ผลการจำลองแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ

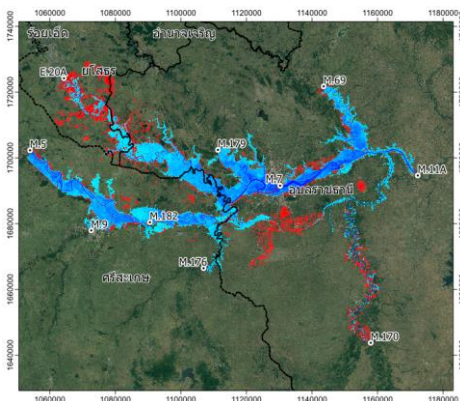
จากการจำลองแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติโดยใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งทั้งสองกรณีพบว่าในกรณีที่หนึ่งคือการใช้สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่งสำหรับพื้นที่น้ำท่วมโดยไม่กำหนดตามการใช้ประโยชน์ที่ดินจะมีกราฟน้ำท่าที่ต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัดจริงโดยมี NSE อยู่ในช่วง 0.69 ถึง 0.95 และ R<sup>2</sup> อยู่ในช่วง 0.94 ถึง 0.96 ส่วนในกรณีที่สองสามารถให้ผลการจำลองที่แม่นยำกว่าเนื่องจากมี NSE และ R<sup>2</sup> ที่มากกว่ากรณีที่หนึ่งและยังมี RMSE ที่ต่ำกว่ากรณีที่หนึ่ง โดยมี NSE อยู่ในช่วง 0.95 ถึง 0.97 และ R<sup>2</sup> อยู่ในช่วง 0.96 ถึง 0.99 โดยในกรณีที่สองนั้นค่าความคลาดเคลื่อนออกนอกมาอยู่ในเกณฑ์ที่บอกว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง

จากตารางที่ 8 พบว่าการจำลองแผนที่น้ำท่วมในกรณีที่ 1 มีพื้นที่น้ำท่วมใกล้เคียงกับแผนที่น้ำท่วมจาก GISTDA มากกว่ากรณีที่ 2 นอกจากนั้นในการจำลองแผนที่น้ำท่วม

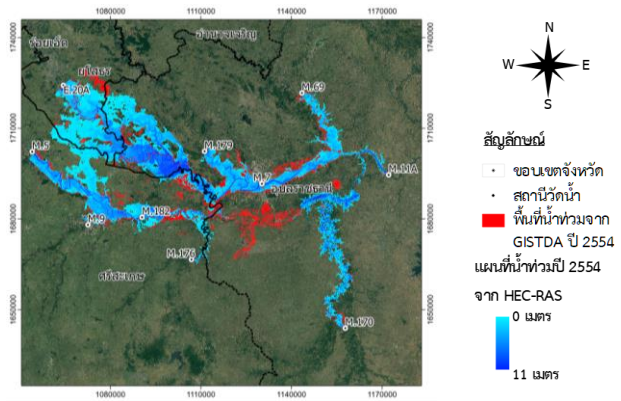
กรณีที่ 2 ของปี พ.ศ.2554 และ พ.ศ.2557 จะมีพื้นที่น้ำท่วมมากกว่ากรณีที่ 1 คิดเป็น 59.5% และ 48.2% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบแผนที่น้ำท่วมพบว่าทั้งสองกรณีจะมีพื้นที่บางส่วนดังรูปที่ 9 และ 10 ที่ไม่มีพื้นที่น้ำท่วมเมื่อเทียบกับแผนที่น้ำท่วมของ GISTDA ซึ่งเป็นผลจากการที่ DEM ที่ใช้มีความละเอียดไม่เพียงพอทำให้ไม่มีการไหลไปบริเวณดังกล่าวและนอกจากนั้นยังพบว่าในทั้งสองกรณีมีพื้นที่น้ำท่วมมากกว่าพื้นที่น้ำท่วมจากแผนที่ GISTDA ดังตารางที่ 8 ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่ผลจำลองที่ได้จากแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติจะมีความต่อเนื่องของข้อมูลพื้นที่น้ำท่วมมากกว่าแผนที่น้ำท่วมที่ได้จากแผนที่ดาวเทียมของ GISTDA ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ [9] ที่เปรียบเทียบแผนที่น้ำท่วมระหว่างแบบจำลอง HEC-RAS หนึ่งมิติกับ HEC-RAS สองมิติพบว่าแบบจำลองสองมิติมีพื้นที่น้ำท่วมแตกต่างกันประมาณ 7-50% ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่และปริมาณการไหล

ตารางที่ 8 พื้นที่น้ำท่วมจากแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ ทั้ง 2 กรณี

ปี พ.ศ.	พื้นที่น้ำท่วม (ตารางกิโลเมตร)		
	GISTDA	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
2554	839.2	815.76	1,301.18
2557	500.5	582.61	863.30



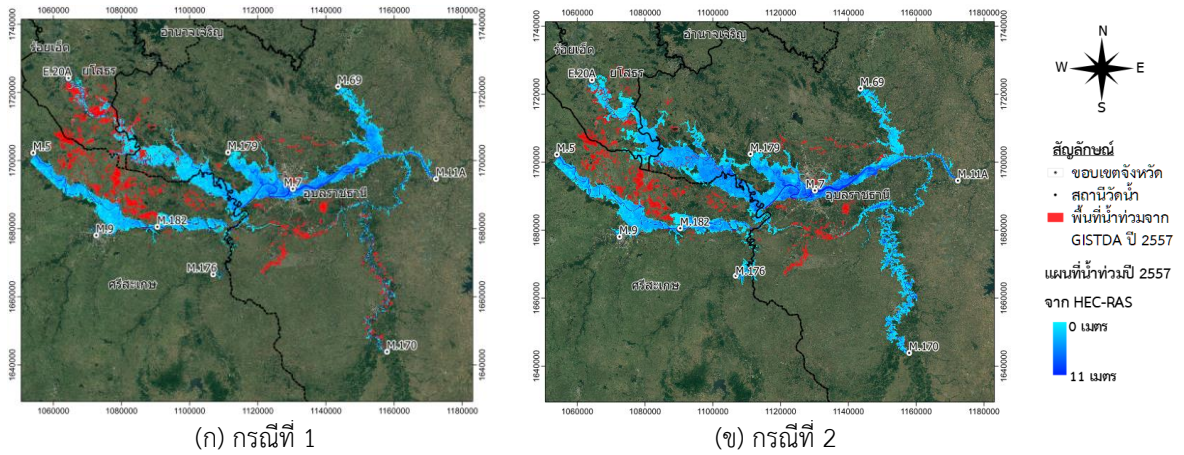
(ก) กรณีที่ 1



(ข) กรณีที่ 2

รูปที่ 9 แผนที่น้ำท่วมปี พ.ศ.2554 จากแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ





รูปที่ 10 แผนที่น้ำท่วมปี พ.ศ.2557 จากแบบจำลอง HEC-RAS สองมิติ

#### 4. บทสรุป

จากการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลโดยการนำภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 ใช้ในการจำแนกการใช้ที่ดินเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงเพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ HEC-RAS สองมิติ โดยการศึกษาครั้งนี้จำแนกการใช้ที่ดินเป็น 4 ชนิด ได้แก่ พื้นที่แหล่งน้ำ พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ชุมชน โดยการจำแนกข้อมูลแบบกำกับดูแล (Supervised Classification) ด้วยวิธี Minimum Distance โดยทำการตรวจสอบความแม่นยำของการจำแนกการใช้ที่ดินได้ความแม่นยำโดยรวมเท่ากับ 87.18 % และสัมประสิทธิ์แคปปามีค่า 0.81 จากนั้นนำข้อมูลการใช้ที่ดินนี้เพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงเชิงพื้นที่และข้อมูลน้ำท่ามาจำลองด้วยโปรแกรม HEC-RAS แบบสองมิติในการศึกษาครั้งนี้มีสถานีสอบเทียบสองสถานีได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า M.7 และ M.182 และใช้ข้อมูลสอบเทียบปี พ.ศ.2554 ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน ถึง 15 ธันวาคม และปี พ.ศ.2557 ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ.2557 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ.2558 พบว่าการจำแนกการใช้ที่ดินเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิงสามารถให้การจำลองน้ำท่าที่แม่นยำแต่ให้แผนที่น้ำท่วมที่มีพื้นที่มากกว่าแผนที่น้ำท่วมจาก GISTDA

ข้อดีของจำลองแผนที่น้ำท่วมจากข้อมูลการจำแนกการใช้ที่ดินด้วยภาพถ่ายดาวเทียมคือสามารถประเมินเหตุการณ์น้ำท่วมในอดีตตามสภาพการใช้ที่ดินในอดีตเพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้น และจำลองแผนที่น้ำท่วมตามการ

เปลี่ยนแปลงที่ดินเพื่อรองรับกับภาวะโลกรวนในอนาคต โดยที่แบบจำลอง HEC-RAS สองมิตียังคงมีข้อจำกัดคือไม่สามารถใส่อาคารชลศาสตร์เข้าไปในแบบจำลองทำให้ไม่สามารถจำลองในพื้นที่ที่มีเขื่อนหรือฝายได้ดังนั้นในพื้นที่ดังกล่าวอาจจะเลือกใช้แบบจำลอง HEC-RAS หนึ่งมิติ หรือควบคู่ระหว่างหนึ่งมิติและสองมิติแทนแบบจำลองสองมิติ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลอุทกวิทยาจากสำนักอุทกวิทยาและบริหารจัดการน้ำ กรมชลประทาน และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Al-Ahmadi FS, Hames AS. Comparison of four classification methods to extract land use and land cover from Raw Satellite Images for Some Remote Arid Areas, Kingdom of Saudi Arabia. Journal of King Abdulaziz University - Earth Sciences. 2009;20:167-91.
- [2] Lu D, Mausel P, Batistella M, Moran E. Comparison of land-cover classification methods in the Brazilian Amazon Basin. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2004;70:723-31.



- [3] Yuan F, Sawaya KE, Loeffelholz BC, Bauer ME. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 2005;98(2-3):317-28.
- [4] Lu D, Batistella M, Moran E. Land-cover classification in the Brazilian Amazon with the integration of Landsat ETM+ and Radarsat data. *International Journal of Remote Sensing*. 2007;28(24):5447-59.
- [5] Kavzoglu T, Colkesen I. A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2009;11(5):352-9.
- [6] Aitkenhead MJ, Aalders IH. Classification of Landsat Thematic Mapper imagery for land cover using neural networks. *International Journal of Remote Sensing*. 2008;29(7):2075-84.
- [7] Garcia M, Juan A, Bedient P. Integrating Reservoir Operations and Flood Modeling with HEC-RAS 2D. *Water*. 2020;12(8).
- [8] Alfred K, Steven B, Timothy M. Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output. *Journal of Spatial Hydrology*. 2009;9:51-71.
- [9] Pinos J, Timbe L. Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering. Eng*. 2019;12(1).
- [10] Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), 2014. Vulnerability Assessment to Flood Events of the Santa Barbara River, Volume 2: Hydraulic Study. SENAGUA, Quito, p. 108 (in Spanish).
- [11] Huang J, Zhou P, Zhou Z, Huang Y. Assessing the influence of land use and land cover datasets with different points in time and levels of detail on watershed modeling in the North River Watershed, China. *Int J Environ Res Public Health*. 2012;10(1):144-157.
- [12] Rwanga SS, Ndambuki JM. Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*. 2017;08(04):611-22.
- [13] Brunner GW. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers; 2016. Report No.: CPD-69.
- [14] Connell RJ, Painter DJ, Beffa C. Two-Dimensional Flood Plain Flow. II: Model Validation. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2001;6(5):406.
- [15] Liu, Z, Merwade, V, Jafarzadegan, K. Investigating the role of model structure and surface roughness in generating flood inundation extents using one- and two-dimensional hydraulic models. *J Flood Risk Management*. 2019;12:e12347.



## การทำแผนที่แนวปะการังโดยใช้กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจินประมวลผลข้อมูลจากดาวเทียม Coral Reef Mapping Using Google Earth Engine Satellite Data Processing

พีรพันธุ์ ทองวิไลพรรณ<sup>1</sup> และ วิโรจน์ ละอองมณี<sup>1\*</sup>

คณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

57 หมู่ 1 ถนนชลประทาน ตำบลโขมง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดจันทบุรี 22170

Peeraphan Tongwilaiphon<sup>1</sup> and Wirote Laongmanee<sup>1\*</sup>

Faculty of Marine Technology Burapha University Chanthaburi Campus

57, Moo 1, Chonpratan Road, Kamong Sub-District, Tha Mai District, Chanthaburi Province, 22170

\* ผู้รับผิดชอบบทความ: wirote\_lao@buu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-6776-0330

Received: 5 July 2022, Revised: 25 August 2022, Accepted: 8 September 2022

### บทคัดย่อ

ปะการังเป็นหนึ่งในระบบนิเวศชายฝั่งที่มีความสำคัญทั้งในเชิงชีววิทยา และมูลค่าทางเศรษฐกิจ แนวปะการังมีความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม และกิจกรรมการใช้ประโยชน์ ดังนั้นการบริหารจัดการ การใช้ประโยชน์ที่เหมาะสม จึงจำเป็นที่จะต้องติดตามสถานะของปะการังอย่างต่อเนื่อง แต่การสำรวจปะการังด้วยการดำน้ำตามวิธีมาตรฐานมีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานาน การศึกษานี้เสนอการใช้กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจิน (GEE) ในการสร้างแผนที่แนวปะการัง จากข้อมูลของดาวเทียม Sentinel-2 ด้วยเทคนิคการจำแนกแบบระยะห่างน้อยที่สุด และใช้โดรนเก็บข้อมูลภาคสนามมากำกับกับการจำแนก และตรวจสอบความถูกต้อง ผลการทดสอบการจำแนกแนวปะการังบริเวณชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต พบว่าบริเวณนี้มีพื้นที่ปะการังประมาณ 348 ไร่ แผนที่แนวปะการังมีความถูกต้องรวมร้อยละ 71, มีค่าสัมประสิทธิ์แคปปา 0.57, มีค่าความถูกต้องในการจำแนกรายชนิด เป็นทราย, ปะการัง และปะการังปนทราย เท่ากับร้อยละ 58.6, 86.2 และ 68.8 ตามลำดับ

**คำสำคัญ** แผนที่แนวปะการัง การสำรวจระยะไกล กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจิน

### Abstract

Coral reefs are an important coastal ecosystem in terms of biological and economic points of view. They are vulnerable to both environment change and resource utilization. Therefore, continuous monitoring is necessary for applying the appropriate management. However, the in-situ coral reefs standard method survey is expensive and time-consuming. This study presents the use of Google Earth Engine (GEE) using Sentinel-2 satellite data with a minimum distance classification technique to map coral reefs. Ground truth data for satellite data training and validating was collected using drones. Coral reefs at Rawai beach are classified using this method as 348 rai. The total accuracy of classification is 71% and the kappa coefficient is 0.57. The accuracy of individual classification of sand, coral, and sandy coral is 86.2%, 68.8%, and 58.6%, respectively.

**Keywords** Coral Reef Map, Remote Sensing, Google Earth Engine



### 1. บทนำ

ปะการัง เป็นสัตว์ทะเลชนิดหนึ่งซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในอุณหภูมิน้ำทะเล 8-27 องศาเซลเซียส น้ำใส มีแสงแดดส่องถึง [1] ในบริเวณพื้นที่ศึกษาชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต ปี 2561 กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งรายงานไว้ว่า มีการแพร่กระจายของปะการังอยู่ในเขตน้ำตื้นตามแนวชายฝั่งความลึกไม่เกิน 10 เมตร ปกคลุมพื้นที่กว่า 603 ไร่ มีสภาพที่เสียหายมาก สภาพน้ำทะเลค่อนข้างขุ่น มีพื้นเป็นทรายละเอียดปนโคลน ปะการังที่พบมากคือ ปะการังวงแหวน, ปะการังช่องเหลี่ยม, ปะการังดอกไม้ทะเล, ปะการังเห็ด, ปะการังสมอง และมีปะการังไซด เป็นชนิดเด่น [2]

การศึกษาสำรวจและประเมินสถานภาพปะการังในปัจจุบัน ใช้การดำน้ำสำรวจด้วยวิธี Manta Tow และวิธี Line Intercept Transect ซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานาน รวมทั้งมีความเสี่ยงต่อผู้ดำน้ำ [3] ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีอื่น เข้ามาช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงาน เช่น การใช้โดรน และเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล เป็นต้นงานวิจัยของ Lyons et. al. [4] แสดงให้เห็นว่าสามารถจัดทำแผนที่แนวปะการังโดยใช้กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจิน (Google Earth Engine) และ GIS โดยใช้ข้อมูลภาคสนามจากการดำน้ำมาทำการจำแนกแนวปะการังได้ โดยทดลองทำแผนที่แนวปะการัง Heron, แนวปะการังบริเวณพื้นที่บริหารจัดการ Cairns to Cooktown, Great Barrier Reef และแนวปะการังแปซิฟิกตะวันตก ซึ่งคิดเป็นพื้นที่แนวปะการังกว่า 6,000,000 ตร.กม. นอกจากนี้ Bennett et. al. [5] ได้ใช้กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจินร่วมกับโดรนทำแผนที่แสดงแนวปะการังบริเวณเกาะ Heron

ทางผู้วิจัยเห็นประโยชน์ของกูเกิ้ลเอิร์ธเอนจินในการจัดทำเป็นแผนที่แนวปะการัง จึงดำเนินงานวิจัยนี้ขึ้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาที่อยู่ของแนวปะการังบริเวณอื่นได้ต่อไป

### 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 2.1 ปะการังและความสำคัญ

แนวปะการังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดอาศัยอยู่ร่วมกัน ทั้งยังมีความสำคัญต่อระบบนิเวศทางทะเล เช่น เป็นแหล่งอาหาร เป็นที่หลบภัย เป็นแหล่งเพาะพันธุ์วางไข่ เป็นต้น ทำให้มนุษย์เข้ามาใช้ประโยชน์จากแนวปะการังจาก

กิจกรรมต่าง ๆ เช่น การทำประมง กิจกรรมดำน้ำของนักท่องเที่ยว เป็นต้น [6]

#### 2.2 การสำรวจแนวปะการังในปัจจุบัน

ในปัจจุบันการสำรวจปะการังที่นิยมคือ วิธีดำน้ำลึก (SCUBA) กับใช้วิธี Manta Tow และ Line Intercept transect [3] วิธี Manta Tow และ Line Intercept Transect เป็นวิธีที่ต้องใช้นักดำน้ำ ใช้งบประมาณและเวลาค่อนข้างมากในการสำรวจแต่ละครั้ง เนื่องจากปะการังมีความเสื่อมโทรมหรือฟื้นฟูแตกต่างกัน และในปัจจุบันสามารถประเมินและติดตามสถานการณ์ปะการัง โดยใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเป็นตัวช่วยในการติดตามความสมบูรณ์หรือเสื่อมโทรมของปะการังได้อีก [7]

#### 2.3 กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจิน

กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจิน Google Earth Engine (GEE) เป็นเทคโนโลยีที่นำเอาข้อมูลจากการรับรู้ระยะไกล ที่ประมวลผลแบบ Cloud-based ทำงานบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตโดยอาศัยเว็บเบราว์เซอร์ ทำให้สามารถเข้าถึงทรัพยากรต่าง ๆ ที่มาจากภาพถ่ายโดยดาวเทียม สามารถใช้ชุดคำสั่งต่าง ๆ สำหรับประยุกต์ใช้ในการประมวลผลข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8] การใช้ข้อมูลจากดาวเทียมมาศึกษาทรัพยากรใต้น้ำต้องมีกระบวนการปรับแก้ค่าสะท้อนรังสี [12]

#### 2.4 ดาวเทียม Sentinel-2

เป็นดาวเทียมสำรวจโลกมีวงโคจรสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ [6] ที่สร้างขึ้นในโครงการดาวเทียมสำรวจทรัพยากรของ EU Copernicus Programmed โดยเป็นดาวเทียมคู่แฝด ทำการสำรวจเก็บข้อมูลร่วมกันคือ Sentinel-2A และ Sentinel-2B โดยใช้ระบบ Multispectral Instrument (MSI) มีความละเอียดเชิงรังสี 12 bit ตัวรับสัญญาณ 16 สัญญาณ ความละเอียดเชิงพื้นที่ 10 เมตร 20 เมตร และ 60 เมตร [9] แต่ละตัวรับสัญญาณมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1

#### 2.5 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนจากน้ำ (Water Column Correction)

เป็นกระบวนการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนจากน้ำ ที่มีผลต่อการสะท้อนในพื้นที่ที่มีน้ำปกคลุม โดยกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวออกจากข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์อาศัยวิธีการ Depth Invariant Bottom Index [10] ซึ่งมีการดังนี้

$$depth - iv_{ij} = \ln(L_i - L_{Si}) - \left[ \left( \frac{k_i}{k_j} \right) \times \ln(L_j - L_{Sj}) \right] \quad (1)$$

เมื่อ  $iv_{ij}$  = ค่า invariant index<sub>ij</sub>  
 $L_i, L_j$  = ค่าการสะท้อนของ Pixel ใน Band-i, j  
 $L_{Si}, L_{Sj}$  = ค่าการสะท้อนเฉลี่ยของน้ำทะเลลึก Band-i, j  
 $\frac{k_i}{k_j}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของมวลน้ำ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณสมบัติของตัวรับสัญญาณ

Name	Description	Resolution	Wavelength	Scale
B1	Aerosols	60 meters	443.9nm (S2A) / 442.3nm (S2B)	0.0001
B2	Blue	10 meters	496.6nm (S2A) / 492.1nm (S2B)	0.0001
B3	Green	10 meters	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	0.0001
B4	Red	10 meters	664.5nm (S2A) / 665nm (S2B)	0.0001
B5	Red Edge 1	20 meters	703.9nm (S2A) / 703.8nm (S2B)	0.0001
B6	Red Edge 2	20 meters	740.2nm (S2A) / 739.1nm (S2B)	0.0001
B7	Red Edge 3	20 meters	782.5nm (S2A) / 779.7nm (S2B)	0.0001
B8	NIR	10 meters	835.1nm (S2A) / 833nm (S2B)	0.0001
B8A	Red Edge 4	20 meters	864.8nm (S2A) / 864nm (S2B)	0.0001
B9	Water vapor	60 meters	945nm (S2A) / 943.2nm (S2B)	0.0001
B10	Cirrus	60 meters	1373.5nm (S2A) / 1376.9nm (S2B)	0.0001
B11	SWIR 1	20 meters	1613.7nm (S2A) / 1610.4nm (S2B)	0.0001
B12	SWIR 2	20 meters	2202.4nm (S2A) / 2185.7nm (S2B)	0.0001

อ้างอิงมาจาก The European Space Agency [11]

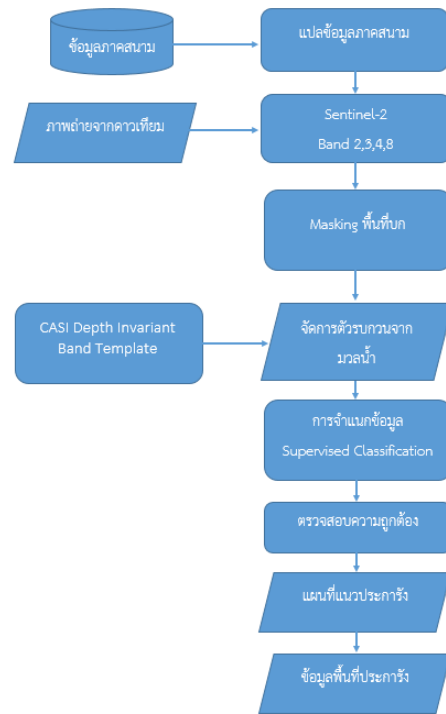
โดยใช้ข้อมูลช่วงคลื่นใหม่ที่ได้มานั้นมีค่าการสะท้อนจากพื้นน้ำที่แตกต่างกัน จึงต้องเลือกช่วงคลื่นที่สามารถทะลุผ่านลงไปใต้ผิวน้ำได้ดี [12] โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบของตัวรับสัญญาณของดาวเทียมที่นำมาใช้

### 2.6. การจำแนกข้อมูลด้วยวิธีการแบบระยะห่างน้อยที่สุด

เป็นการจำแนก (Classification) ข้อมูลโดยอาศัยวิธีการทางสถิติ ของข้อมูลแสงที่สะท้อนวัตถุกลับไปยังตัวรับสัญญาณ วิธีการนี้ทำได้โดยการหาค่าของแต่ละจุดภาพเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยกำหนดขอบเขตของระยะห่าง หากมีจุดภาพที่มีค่าระยะห่างจากค่าเฉลี่ยแต่ละชั้นข้อมูลมากกว่าระยะห่างที่จากกลุ่มตัวอย่าง จุดภาพนั้นจะไม่สามารถจำแนกประเภทได้

### 2.7. วิธีดำเนินการวิจัย

เก็บข้อมูลภาคสนาม ด้วยโดรนที่ความสูง 20 เมตร ทำการแปลงข้อมูลภาคสนามเป็นข้อมูล ปะการัง ปะการังปนทราย และทราย ชนิดละ 30 ข้อมูล และดำเนินการตามแผนผังวิธีดำเนินการวิจัย และมีรายละเอียดดังนี้ แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังวิธีการในการทำแผนที่แนวปะการัง

ขั้นตอนการวิจัยสามารถแยกย่อยได้ดังนี้

#### 2.7.1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ดำเนินการเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยการโดรนบินถ่ายภาพบริเวณชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต โดยเลือกวันและเวลาที่น้ำลดต่ำสุด เพื่อที่จะสามารถมองเห็นปะการังได้อย่างชัดเจนในภาพ จำนวนชนิดข้อมูล ละ 30 ภาพ

#### 2.7.2 การแปลงข้อมูลภาคสนาม

ดำเนินการคัดแยกข้อมูลภาพถ่าย แบ่งตามประเภทพื้นที่ดึงข้อมูลตำแหน่งในขณะบันทึกภาพ จัดทำเป็น Data Set แปลงข้อมูลตำแหน่งเป็นจุดในรูปแบบ ESRI Shapefile

#### 2.7.3 การเลือกภาพจากดาวเทียม

ดำเนินการคัดเลือกภาพในช่วงเวลาใกล้เคียงกับเวลาเก็บข้อมูลภาคสนาม ข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel-2 Level 2 เลือกใน band 2, 3, 4, และ 8 ซึ่งมีความละเอียดจุดภาพ 10 เมตร ในพื้นที่ชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต รวมถึงการกรองภาพที่มีเมฆปกคลุมออก

#### 2.7.4 การ Masking พื้นที่บนฝั่ง

ดำเนินการกันพื้นที่บนฝั่ง จากข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 ที่เลือกโดยใช้ข้อมูลขอบเขตของน้ำจากค่าการสะท้อนของน้ำใน band 8 หาค่าเฉลี่ย แล้วจึงนำค่าที่ได้



ไปทำ Mask Threshold เพื่อให้ได้เฉพาะพื้นที่ที่เป็นน้ำ สำหรับนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 2.7.5 การปรับแก้ค่าการสะท้อนจากมวลน้ำ

โดยอาศัยวิธี CSCI Depth Invariant Band Template มาปรับแก้จากสมการ Depth Invariant Bottom Index ใน 2.5 ใช้ข้อมูล Sentinel-2 Bands ที่ 2 (Blue), 3 (Green), 4 (Red) สร้างข้อมูลชุดใหม่ dii\_1, dii\_2 และ dii\_3

### 2.7.6 การจำแนกข้อมูล

จำแนกข้อมูลจากข้อมูลดาวเทียมที่ทำการวิเคราะห์ ปรับแก้แล้วด้วยวิธี Supervised classification จากข้อมูล band ใหม่ที่ได้จากข้อ 2.7.5 โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจากข้อมูลภาคสนามด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยระยะใกล้ที่สุด

### 2.7.7 การตรวจสอบความถูกต้อง

ตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้ จากการจำแนกปะการัง และสิ่งปกคลุมดิน เทียบกับข้อมูลภาคสนามโดยใช้ตารางความผิดพลาด (Confusion Matrix) ค่าความถูกต้องที่สนใจ คือ ค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) ค่าความถูกต้องรายชนิด (Producer’s Accuracy, PA) , ค่าความถูกต้องของผู้ใช้ (User’s accuracy, UA) และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa Hat Coefficient of Agreement) [14] จากสมการ

$$\text{ความถูกต้องรวม} = \frac{\text{ผลรวมของข้อมูลที่ถูกต้องทั้งหมด}}{\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

$$PA = \frac{\text{ผลการจำแนกที่ถูกต้อง}_i}{\text{ผลรวมของข้อมูล Training}_i} \quad (3)$$

$$UA = \frac{\text{ผลการจำแนกที่ถูกต้อง}_i}{\text{ผลรวมของข้อมูล Validation}_i} \quad (4)$$

$$K = \frac{NA \cdot B}{(N \times N) \cdot B} \quad (5)$$

โดยที่  $\hat{K}$  = ค่าสัมประสิทธิ์แคปปา  
N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด  
A = ผลรวมของข้อมูลที่ถูกต้องทั้งหมด  
B = ผลรวมของผลคูณชุดข้อมูลแต่ละชุดในแถวกับสตมภ์

### 2.7.8 ข้อมูลพื้นที่ปะการัง

วิเคราะห์หาพื้นที่ของแนวปะการัง จากข้อมูลเชิงจุดภาพ โดยใช้วิธีการนับแบบ Unique Values Report ความละเอียดเชิงตำแหน่งของข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 มีขนาด 10x10 ตารางเมตรต่อ 1 จุดภาพ ทำให้สามารถคำนวณพื้นที่เป็นไร่ได้ต่อไป

## 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการศึกษาการทำแผนที่แสดงแนวปะการังโดยใช้กูเกิ้ลเอิร์ธเอนจิน ในพื้นที่ชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต นั้นสามารถแยกผลตามวิธีดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

### 3.1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

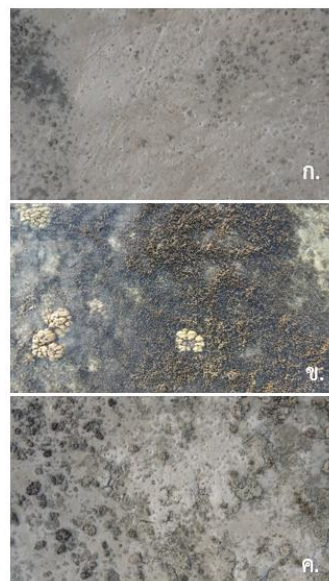
ผลจากการเก็บข้อมูลสนามโดยการใช้โดรนในการบินเก็บภาพบริเวณชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต เมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2565 และวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2565 นำมาแสดงข้อมูลลงในแผนที่โดยใช้พิกัดตำแหน่งเปิดถ่ายภาพ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งจุดถ่ายภาพ

### 3.2 การแปลข้อมูลภาคสนาม

ผลการแปลข้อมูลภาคสนามด้วยการจำแนกด้วยสายตาอ้างอิงตามเกณฑ์ในตารางที่ 1 ได้พื้นที่เป็น 3 ประเภท คือ ก) พื้นที่ทราย ข) พื้นที่ปะการัง และ ค) พื้นที่ปะการังปนทราย ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ประเภทของพื้นที่ในสนาม



ตารางที่ 2 เกณฑ์การจำแนกรูปภาพที่ถ่ายจากโดรน

อัตราส่วนของ ปะการังในภาพ (%)	ประเภทของพื้นที่	Value
$X < 50$	ทราย	1
$X \geq 70$	ปะการัง	2
$50 \leq X < 70$	ปะการังปนทราย	3

แยกข้อมูลตำแหน่งด้วยสีในแผนที่ โดยให้สีเหลืองแสดงถึงทราย สีแดงแสดงถึงปะการัง และสีเทาคือปะการังปนทราย ดังแสดงเป็นรูปแผนที่ในรูปที่ 2

### 3.3 การเลือกภาพจากดาวเทียม

เกณฑ์ในการพิจารณาข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 คือมีการรวบรวมจากเมฆต่ำที่สุด และเลือกวันใกล้เคียงกับวันที่ออกไปเก็บข้อมูลภาคสนามมากที่สุด ผลที่ได้คือได้ข้อมูลภาพในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2565 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ข้อมูลภาพจากดาวเทียม Sentinel-2

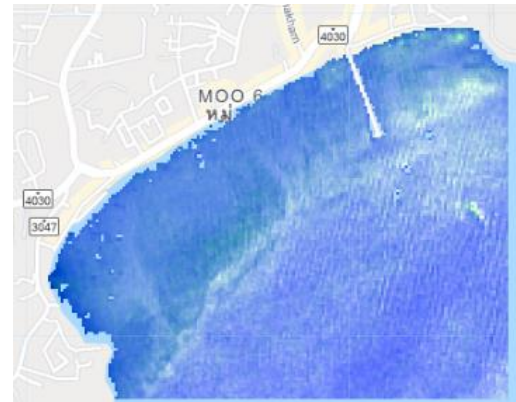
### 3.4 การ Masking พื้นที่บก

ผลการคัดแยกพื้นที่บก กับพื้นที่น้ำโดยอาศัยค่าสะท้อนพลังงานในช่วงคลื่นอินฟราเรด ใน band NIR ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยของค่า NIR ได้เท่ากับ 1302 และใช้เป็นเกณฑ์ในการแยกข้อมูลพื้นที่น้ำ จากนั้นทำการตัดข้อมูลเลือกส่วนเฉพาะที่เป็นพื้นที่น้ำสำหรับประมวลผลขั้นต่อไป

### 3.5 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนพลังงานจากมวลน้ำ

การหาตัวแปรจากสมการ DII ด้วย CASI Depth Invariant Template โดยที่  $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$ ,  $L_{s3}$  คือ ค่าการสะท้อนเฉลี่ยของน้ำทะเลลึก Band ที่ 2, 3, 4 ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 1404, 1329, 1216 และ  $k_1/k_2$ ,  $k_2/k_3$ ,  $k_1/k_3$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของมวลน้ำระหว่าง Band 2 กับ 3, Band 3 กับ

4, และ Band 2 กับ 4 ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 1.0194, 1.3854, 1.4365 และนำไปแทนในสมการจะเกิด Band ใหม่ขึ้น คือ dii\_1, dii\_2, dii\_3 ซึ่งเมื่อรวม Band ใหม่จะได้ข้อมูลที่กำจัดการรบกวนจากมวลน้ำแล้ว ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการรวมกันของ Band dii\_1, dii\_2, dii\_3

### 3.6 การจำแนกข้อมูล

การจำแนกข้อมูลบนกูเกิลเอิร์ธเอนจิน ด้วยการจำแนกด้วยวิธีการระยะห่างน้อยที่สุด ของ Band dii\_1, dii\_2 และ dii\_3 แสดงตัวอย่างโค้ดในรูปที่ 6

```

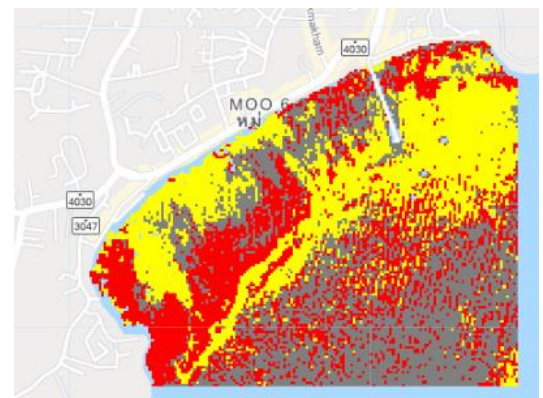
Coral_rawai
Get Link Save Run Reset Apps
Imports (10 entries)
var sen2Vis: B4, B3 and B2 from 1895.058220891771 to 2555.864748...
var Mixed: Table users/MT_Remotesensing/workshop/mix
var DIIVIS: dii_3, dii_2 and dii_1 from -874.9849178738156 to -1...
var selectVis: b3, b2 and b1 from 1163.54 to 3589.46
var deep: Polygon, 4 vertices
var ROI: Polygon, 4 vertices
var LC: Table users/MT_Remotesensing/30_lc-mix-sand/30lc
var Mix: Table users/MT_Remotesensing/30_lc-mix-sand/30mix
var Sand: Table users/MT_Remotesensing/30_lc-mix-sand/30sand
var diivis2: dii_3, dii_2 and dii_1 from -3.1670921096925406 to ...

1 /**เรียกใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2**/
2 var INPUT_BANDS = ['b1', 'b2', 'b3', 'b4'];
3 Map.centerObject(ROI);
4 var satImage= ee.Image(ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR") //2022-02-
5
6

```

รูปที่ 6 โค้ดในกูเกิลเอิร์ธเอนจิน code editor

กำหนดสีของพื้นที่ที่ทำการจำแนกไว้คือ สีเหลืองแสดงถึงทราย สีแดงแสดงถึงปะการัง และสีเทาแสดงถึงปะการังปนทราย ผลการจำแนกแสดงในรูปแผนที่ได้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การจำแนกปะการังด้วยกูเกิลเอิร์ธเอนจิน



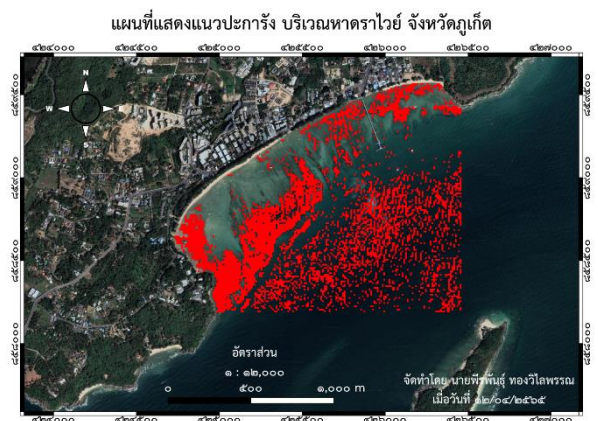
### 3.7 การตรวจสอบความถูกต้อง

การตรวจสอบความถูกต้องด้วยกระบวนการ Confusion matrix เพื่อคำนวณค่าของ Overall Accuracy, และ Kappa Statistic โดยกำหนดเป็นประเภทของตำแหน่งอ้างอิงได้แก่ ทราบ, ปะการัง, และปะการังปนทราย

ได้ค่าความถูกต้องรวมเท่ากับร้อยละ 71, มีค่าสัมประสิทธิ์แคปปาเท่ากับ 0.57, มีค่าความถูกต้องรายชนิด (Producer’s Accuracy) ดังนี้ ทราบ 86.2% ปะการัง 68.8% และ ปะการังปนทราย 58.6% และมีค่าความถูกต้องของผู้ใช้ (User’s Accuracy) คือ ทราบ 83.3% ปะการัง 73.3% และ ปะการังปนทราย 56.7%

### 3.8 แผนที่แนวปะการัง

เมื่อคัดเลือกเฉพาะพื้นที่ที่เป็นปะการังและนำมาแสดงในรูปแบบแผนที่ จะได้เป็นแผนที่แสดงแนวปะการัง บริเวณหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนที่แนวปะการัง ชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต

### 3.9 ข้อมูลพื้นที่ปะการัง

ผลการคำนวณพื้นที่ปะการัง บริเวณชายฝั่งหาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต โดยเมื่อจำแนกพื้นที่ของทราบ ปะการัง และ ปะการังปนทรายแล้ว ได้พื้นที่ดังแสดงในตารางที่ 3 ตารางที่ 3 พื้นที่ปกคลุมบริเวณอ่าวราไวย์

ประเภท	จำนวน พิกเซล	พื้นที่(ตาราง เมตร)	พื้นที่(ไร่)
ทราบ	5,895	589,500	368
ปะการัง	5,566	556,600	348
ปะการังปนทราย	6,378	637,800	399
รวม	17,840	1,784,000	1,115

### 3.10 อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ใช้เทคโนโลยีสำรวจระยะไกลบนภูเกิ้ล เอิร์ธเอนจิน โดยอาศัยเทคนิค Water Column Correction ด้วยวิธี Depth Invariant Index (DII) ร่วมกับการจำแนกโดยวิธีระยะห่างน้อยที่สุด ผลที่ได้มีการปกคลุมของปะการังเท่ากับ 348 ไร่ และใช้เทคนิค Confusion Matrix ในการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล โดยมีค่าความถูกต้องรวมเท่ากับร้อยละ 71 และมีค่าสัมประสิทธิ์แคปปาเท่ากับ 0.57

เมื่อเปรียบเทียบกับผลรายงานการปกคลุมของปะการัง โดย กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งรายงานไว้ในปี 2556 [13] ว่า มีปะการังในพื้นที่อ่าวราไวย์ประมาณ 603 ไร่ จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า มีปะการังในพื้นที่อ่าวราไวย์ประมาณ 348 ไร่ ซึ่งอาจยังมีปะการังที่ปกคลุมในอ่าวราไวย์อีก แต่ถูกจัดอยู่ในประเภทของปะการังปนทรายอีกประมาณ 399 ไร่ หากนำปะการังพื้นที่ 2 ประเภทมารวมกันจะเท่ากับ 757 ไร่ ทำให้พื้นที่ที่มีปะการังปกคลุมมีความสอดคล้องกับรายงานของกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง หากเปรียบเทียบกับงาน Bennett et al. [5] ซึ่งจัดทำแผนที่ปะการังบริเวณ Southern Great Barrier Reef โดยภาพถ่ายทางอากาศจากโดรน ด้วยวิธีกึ่งอัตโนมัติ Semi-automatic work บนภูเกิ้ล เอิร์ธเอนจินเช่นเดียวกัน รายงานความถูกต้องรวมไว้ที่ร้อยละ 86 ซึ่งได้ผลที่ดีกว่าการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel – 2 MSI แสดงให้เห็นว่า รายละเอียดจุดภาพ (Spatial Resolution) ยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการจำแนกปะการังจากภาพถ่ายจากอากาศและจากดาวเทียม ซึ่งน่าจะได้อะเอียดศึกษาในแนวปะการังประเทศไทยต่อไป

## 4. บทสรุป

แผนที่แนวปะการังที่ได้จากการใช้ภูเกิ้ลเอิร์ธเอนจิน บริเวณพื้นที่หาดราไวย์ จังหวัดภูเก็ต ใช้ข้อมูลจาก Sentinel-2 ในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2565 แก่การบวกรวมจากมวลน้ำวิธี DII แล้วทำการจำแนกแบบควบคุมด้วยวิธีระยะห่างน้อยที่สุดได้ ข้อมูลจากการจำแนกสิ่งปกคลุมเป็น ทราบ ปะการัง ปะการังปนทราย ตรวจสอบความถูกต้องด้วย Confusion Matrix ผลที่ได้คือมีความถูกต้องโดยรวมเท่ากับ 71%, ค่าสัมประสิทธิ์แคปปาเท่ากับ 0.57 มีค่าความถูกต้องรายชนิด (Producer’s Accuracy) คือ ทราบ 86.2% ปะการัง 68.8% และ ปะการังปนทราย 58.6% และมีค่าความถูกต้องของผู้ใช้ (User’s





Accuracy) คือ ทราบ 83.3% ปะการัง 73.3% และ ปะการัง ปนทราย 56.7%, และคำนวณพื้นที่การปกคลุมของปะการัง ด้วยโปรแกรม QGIS ได้ผลคือ มีปะการังปกคลุมในพื้นที่อ่าว ราวไวย์ประมาณ 348 ไร่

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์เพ็ญจันทร์ ละอองมณี และ อาจารย์ ดร.สรารุช ศิริวงศ์ คณบดีคณะ เทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี ที่ รับเป็นกรรมการควบคุมงานวิจัยนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Marine and Coastal Resources. Techniques and methods for surveying coral resource status of the Department of Marine and Coastal Resources. [Internet]. 2014 [cited 2022 April 27] Available from: <https://bit.ly/3z3NGnD> Thai.
- [2] Department of Marine and Coastal Resources. Marine and Coastal Resources Information of Phuket Province. Marine and Coastal Resources Information Center; 2018;34-45 Thai.
- [3] Naline T. Methods for surveying and collecting specimens in coral ecosystems. Research and Development Institute for Marine, Coastal and Mangrove Forest Resources. Bangkok: Research and Development Institute for Marine, Coastal and Mangrove Forest Resources Department of Marine and Coastal Resources; 2014. Thai.
- [4] Lyons M, Roelfsema C, Kennedy E, Kovacs ME, Borrego-Acevedo R, Markey K, et al. Mapping the world's coral reefs using a global multiscale Earth Observation Framework. Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2020;6(4):557–68.
- [5] Bennett MK, Younes N, Joyce K. Automating drone image processing to map coral reef substrates using Google Earth engine. Drones. 2020;4(3):50.
- [6] Sasithorn S. Algorithm for classifying reef flat condition using THEOS satellite data: a case study at Sirinart National Park, Phuket Province, Thailand. [Thesis]. Prince of Songkla University; 2011.
- [7] Siriluk P, Varatip B, Watchara K, Apisit K, Nuttom K. The assessment of coral situation in Thailand by using geo-informatics technology. RMUTSV Research Journal 2013;5(1):61-77. Thai.
- [8] Watchara D, Sawarin L. Water feature extraction using Google Earth Engine. Area Based Development Research Journal. 2020;1(2): 14-23. Thai.
- [9] Nattapon Y, Thongthit C. Estimation of wet direct- seeding rice Evapotranspiration in Irrigated Areas of Chao Phraya Basin by using remote sensing technology. In: Pattarapong A, Wanwarang R, Petcharat S, editors. NCCE25. Proceedings of the 25<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering; 2020 July 15-17; Online Conference Chonburi province; 2020 .p. 2036-42. Thai.
- [10] Lyzenga DR. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. International Journal of Remote Sensing, 1981;2:71-82.
- [11] The European Space Agency. Resolution and Swath. [Internet]. [cited 2022 April 25] Available from: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>.



- [12] Wisarut I, Werapong K, Supasit B, Chanida S. An Integrated Field and Remote Sensing Approach for Mapping Seagrass Boundary and Distribution, A Case Study of Paklok Bay, Phuket Province. In: Srisakul P, Supiyani M, editors. Marine Science 4<sup>th</sup>: Blue Ocean Science. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Marine Science seminar; 10-12 June 2014. Songkhla province; p.102-112. Thai.
- [13] Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation. Coral, the thread of life. [Internet]. [cited 2022 April 17] Available from: [https://www.dnp.go.th/park/sara/coralreef/d\\_coral.htm](https://www.dnp.go.th/park/sara/coralreef/d_coral.htm) Thai.
- [14] Banerjee M, Capozzoli M, McSweeney L, Sinha D. Beyond kappa: A review of interrater agreement measures. Canadian Journal of Statistics. 1999;27(1):3–23.



# RMUTL Engineering Journal

Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Lanna



**วารสารวิศวกรรมศาสตร์**  
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**