RMUTL Engineering Journal

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

ISSN(Print) 3027-7426
ISSN(Online) 3027-7434

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Comparison of Water Levels By Sobel Fringe Method and First Order Differential Equations 1
Yutti Chatwaranon Sommart Thongkom Singha Manokruea Panet Suksing Kawin Jewsuwun and Mallika Chatchawankitkun

การวิเคราะห์การเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอก 10
วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา ศตคุณ เดชพันธ์ คมกร ไชยเดชาธร ชาญชัย เงาะปก เสริมศักดิ์ ติยะแสงทอง ชุดาภัค เดชพันธ์ กรกต เลิศชัยพงศ์ และ สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม

การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการก่อสร้างและบำรุงรักษางานทาง 22
ประดิษฐ์ เจียรกุลประเสริฐ ชาคริต ชูวุฒยากร และ ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง

ผลกระทบของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง 32
พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล ทศพร ประเสริฐศรี ธีระธัญ เสริมการดี ปวริศร์ วัฒนสุนทรศิลป์ พีทชญา ชมภูพล อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ และ ชิษณุพงศ์ สุธัมมะ

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิดสำหรับทดสอบแท่งคอนกรีตผสมโฟมเสริมเหล็ก 43
กรีฑา สมเกียรติกุล วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์ และ ชูตระกูล ศิริไพบูลย์

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา 52
สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว้ำ ชาตรี หอมเขียว ชัยวัฒนภัทร เลาสัตย์ ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร และ ทิพยสุคนธ์ บุญญโส

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง จังหวัดตาก 65
ภาณุพล เล็กประเสริฐ และ พีรภพ โพธิ์พงษ์

ระบบจำลองควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลผ่าน SMS 74
ชัยวัฒน์ สากุล และ สุรินทร์ กาญจนะ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ได้รับการประเมินให้อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

Faculty of Engineering

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
RMUTL Engineering Journal

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เลขที่ : 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
โทรศัพท์ : 0 5392 1444 ต่อ 2641, 1236
เวปไซต์ : https://engineering.rmutl.ac.th/journal และ https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ
อีเมล : EngineeringJournal@rmutl.ac.th

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจการนักศึกษา
รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาระบบอย่างยั่งยืน
รองอธิการบดีฝ่ายแผนนโยบายและยุทธศาสตร์
รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร
ผู้ช่วยอธิการบดี
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปะศาสตร์
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	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สักกมน	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ดนัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กาณฑ์	เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญารัตน์	สายสิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วตาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ	นันสะอาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสวรรค์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิฐ	ศรีสุริยจันทร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาต	โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุชา	วัชระภาสร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.พฤทธ์	สกุลช่างสัจจะทัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ	โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์	ใจสิน	มหาวิทยาลัยแม่โจ้

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

กองบรรณาธิการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา	ยืนยงกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พินิจ	เนื่องภิรมย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	จีนะวงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร	พันธุ์ท่าช้าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวโรฒม์	ศิริลักษณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณชาติ	มั่นศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	กิตติเดชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ภาณุ	อุทัยศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์โชคมงคล	นาดี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ณัฐชาสิทธิ์	ชูเกียรติขจร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

ฝ่ายจัดพิมพ์และเผยแพร่

นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายครรชิต	เงินคำคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาววัลลภา	วงศ์ษายะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์

จดหมายจากบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - มิถุนายน 2567 อยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1 บทความวิจัยที่ส่งผ่านระบบได้รับการได้ผ่านการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการจะรักษาคุณภาพของวารสารให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) เป็นที่ยอมรับและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ทางวิชาการที่มีคุณภาพและทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 8 บทความ ประกอบด้วยบทความวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมและเทคโนโลยี สำหรับผู้ที่สนใจสามารถอ่านบทความฉบับปัจจุบันหรือฉบับย้อนหลังแบบออนไลน์เพิ่มเติมได้ทางเว็บไซต์ https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ส่งบทความมาพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาในการประเมินบทความ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาบทความให้มีคุณภาพ คณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ผู้สนับสนุน รวมทั้งคณะทำงานในกองบรรณาธิการวารสาร (RMUTL Eng. J.) และในโอกาสนี้ผมขอเชิญชวนอาจารย์ นักวิจัย และนักศึกษา ส่งบทความวิจัย บทความวิชาการหรือบทความปริทัศน์ที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสาร (RMUTL Eng. J.) ในฉบับต่อ ๆ ไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน)
บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

สารบัญ

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567

บทความวิชาการ

Comparison of Water Levels By Sobel Fringe Method and First Order Differential Equations 1

Yutti Chatwaranon Sommart Thongkom Singha Manokruea Panet Suksing Kawin Jewsuwun and Mallika Chatchawankitkun

การวิเคราะห์การเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอก 10

วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา ศตคุณ เดชพันธ์ คมกร ไชยเดชาธร ชาญชัย เงาะปก เสริมศักดิ์ ติยะแสงทอง ชุดาภัค เดชพันธ์ กรกต เลิศชัยพงศ์ และ สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม

การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการก่อสร้างและบำรุงรักษางานทาง 22

ประดิษฐ์ เจียรกุลประเสริฐ ชาคริต ชูวุฒยากร และ ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง

ผลกระทบของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง 32

พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล ทศพร ประเสริฐศรี ธีระธัญ เสริมการดี ปวริศร์ วัฒนสุนทรศิลป์ พีทชญา ชมภูพล อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ และ ชิษณุพงศ์ สุธัมมะ

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิดสำหรับทดสอบแท่งคอนกรีตผสมโฟมเสริมเหล็ก 43

กรีฑา สมเกียรติกุล วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์ และ ชูตระกูล ศิริไพบูลย์

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา 52

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว้ำ ชาตรี หอมเขียว ชัยวัฒนภัทร เลาสัตย์ ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร และ ทิพยสุคนธ์ บุญญโส

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง จังหวัดตาก 65

ภาณุพล เล็กประเสริฐ และ พีรภพ โพธิ์พงษ์

ระบบจำลองควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลผ่าน SMS 74

ชัยวัฒน์ สากุล และ สุรินทร์ กาญจนะ

Comparison of Water Levels By Sobel Fringe Method and First Order Differential Equations

Yutti Chatwaranon[1 *], Sommart Thongkom[2], Singha Manokruea[2], Panet Suksing[1], Kawin Jewsuwun[3] and Mallika Chatchawankitkun[1]

[1] Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Bangkok Thonburi University
16/10 Leabklongtaweewattana Rd., Taweewattana, Taweewattana, Bangkok, Thailand, 10170
[2] Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Bangkok Thonburi University
16/10 Leabklongtaweewattana Rd., Taweewattana, Taweewattana, Bangkok, Thailand, 10170
[3] Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering,
Pathumwan Institute of Technology.
833 Rama 1 Rd., Wangmai, Pathumwan, Bangkok, Thailand 10330
[*]Corresponding Author : yuttiza@gmail.com Phone Number: 02-800-6800-5 ext. 2162
Received: 7 June 2023, Revised: 19 Semtember 2023, Accepted: 26 Semtember 2023

Abstract

This research is to determine the edge of the camera image using a model to create a water barrier. CCTV images were analyzed as color images and transformed to find the edge of the image by two methods: Sobel method and first-order derivative method. The number of images to be analyzed was 1000 frames and analyzed 1:1 frames for greater resolution and accuracy, then compared with MSE, RMSE and MAD. The results showed that the first order derivative method was the most detailed and accurate with an MSE of 13.968 %, RMSE of 1.18 and MAD of 0.491 compared to Sobel method with an MSE of 919.01. %RMSE of 9.586% and MAD of 8.645.
Keywords: Sobel edge detection, First order derivatives bounding, MSE, RMSE, MAD

1. Introduction

Still images or images from the video are used to check out things of interest. Technology is developed and applied to warn of what will happen before it is used in various applications. Especially in the field of disasters, in the rainy season there will be a lot of storms or rain. Flooding is one of the most widespread disasters affecting lives and property. In addition, the use of CCTV to monitor rainwater levels requires humans to make decisions. Analysis of images that detect water in different areas may require 24-hour detection. From the problems that arise, it is found that the water level analysis from images has limitations in that it requires humans to track and monitor the increase or decrease of water levels. In addition, there may be problems from various conditions, such as having water stuck in front of the camera, causing the water level to be invisible to be notified immediately.

In this research, the images from the CCTV camera were used to find the edge of the image to find the water level that has changed. Comparison of sobel method [1] and first derivative method [2]

for water level measurement by comparing MSE [3], RMSE [4] and MAD [5].

There are many ways to find the edge of an image and are used in various fields according to the literature review as follows:

Li Bin [6] has studied the comparison of the algorithm for finding the edges of objects by using aerial photographs of unmanned aerial vehicles. The obtained images were taken for the edges of the images by Robert Sobel, Prewitt, Gaussian and Canny methods and then analyzed by using the PR and PSNR indexes to test the similarity between images. The results of the Gaussian and Canny bounding experiments were able to find the edge of the object more efficiently than other methods.

Kevin R. Hutson. [7] has presented the design and development of image edge circuitry using the high-level Impulse C language, which is the development of FPGA technology to increase the efficiency of video signal processing. The high-level language and edge detection method by Robert Sobel and Prewitt using bmp images has shown that edge detection can actually be performed on FPGA technology before being implemented on the Spartan 3E board.

Sakunwutthichai, Phanuwat [8] presented a method for analyzing the size of the case study objects: Banana peeling using an image processing technique for analyzing the size of peeled bananas. In this experiment, 30 bananas were used to analyze the photographic characteristics, consisting of area, length, width, by point, line and thresholding methods. The results of the experimental method of finding edges by Thresholding were effective in finding the object size in 22 images out of 30 images, representing an accuracy of 73.33%.

Mangkorn Chenchai [9] studied the development of a model for forecasting average runoff in Nakhon Ratchasima Province by using data mining techniques. The modeling was ANN, LR, SMOreg and RBFN and predictions were performed using MAE and RMSE. The results showed that the SMOreg model had the best predictive performance of water content.

Anima Kujur [10] studied the convolutional neural networks (CNN) have shown promising results for various classification problems over the past years. However, selecting various CNN architectures is still challenging as each architecture performs differently with the same dataset.

Vibhor Kumar Vishnoi [11] studied Plant diseases are a severe cause of crop losses in the agriculture globally. Deep learning-based models provide promising ways to identify plant diseases using leaf images. Although, there exist several CNN models for crop disease detection with comparable.

In this research, the objective is to find the edge of the image to be used to measure the water level in different areas that need to be notified of the changing water level. There are many ways to find the edge of the image, but in this research, the two methods of finding the edge are used to compare the resolution of the edge finding and to find the accuracy of water level indication. Comparisons were made by both methods, Sobel and first order derivatives. The Sobel vignetting method is a widely used prototype of vignetting and is the basis for other vignetting methods such as Prewitt or Canny.

In this research, the Sobel method was used as a method to compare edge detection with first order derivatives to analyze edge detection from 1000-frame CCTV cameras. Then analyzed 1:1 frame to determine the accuracy and resolution of

water level determination. After that, it was analyzed 1:1 in order to determine the accuracy and resolution of water level determination by using 3 error determination methods, MSE, RMSE and MAD were used to find the least error value.

2. Materials and Methods

The edge detection method is one of the image processing methods aiming to find the boundaries in that image that are prominent. The sharpening of the image boundaries results from the difference in light intensity at each point of one image to another that is contiguous. The sharpness of edge detection depends on the light intensity between the image pixels. The process of finding the correct edges of an image is not an easy task, especially in finding edges that are of poor quality or whose intensity may be uneven across the entire image or where there is a difference between foreground and background with different values. In some cases, there may be a large number of strokes and different resolutions, these will help to find the edges of the image more perfectly.

2.1 Digital image definitions

or discrete 2D photographs are considered as two variable functions with x-axis and y-axis. Which is the number of rows (N) and the number of digits (M). The image will be divided into small squares. Called pixels (Pixel), with coordinates [m, n]. For images obtained from photography, there are 3 types of images: black and white images, gray images and color images.

2.2 Binary image [12-16]

Black and white images have elements in the image. A small square called a pixel, in which one pixel of a black and white image is worth only 1 bit, which is the binary number 0 and 1, where the value 1 means the white point, and the value 0 means the point. Black

2.3 Grayscale[17-

A grayscale image contains an image element for each pixel. There will be different light intensity from white to black. which is different from black and white images Because the grayscale image will have a gradation. In which the intensity of the light is using the gray level value. Normally, the gray level image has resolution (Resolution) equal to the number of 8 bits, which the image will have light intensity from 0 to 255.

2.4 Color image

A color image is an image that can be seen generally with elements of the image. Is a pixel of a color image and will store the light intensity level of the primary colors, which consist of red (Red), green (Green) and blue (Blue), also known as RGB, which will have different color values. different and will show the result of the color value in each pixel According to the intensity level in each light band.

The size of the image file will differ depending on the latter two components, namely the size of the image (Size) and the number of bits used to represent the color value or the intensity of light in each pixel of the image. If the image resolution is very high will have a large number of bits Storage will require more space (Memory unit).

2.5 Edge Detection

Edge detection is a method of determining whether a line is drawn across or close to a point, which is measured by the change in light intensity in the vicinity of that point. There are several ways to find the edges of an image. In this research, two methods of edge determination are compared: the first derivative method and the sobel edge determination method.

2.6 Adjustment of colors

Most of the resulting images are color images, which must be converted to color using the Gaussian filter method, which creates a submatrix (Mask) for filtering. The Gaussian equation can be expressed as Eq.(1).

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

when

(x,y) is position of the members in the submatrix.

σ is the parameter value.

2.7 Gradient Magnitude and Gradient Direction

Gradient Magnitude and Gradient Direction are shown by Eq.(2) and (3), respectively.

Gradient Magnitude

$$M(i,j)=\sqrt{g_x^2(i,j)+g_y^2(i,j)} \quad (2)$$

Gradient Direction

$$\alpha(i,j)=\arctan\left(\frac{g_y(i,j)}{g_x(i,j)}\right) \quad (3)$$

when

(i,j) is the position of the pixel.

g_x and g_y is the magnitude of the color shift along the axis, x and y .

2.8 Non – maxima suppression

Non – maxima suppression is likely to be the edges of the image and eliminate pixels that are not at the edges of the image which will be calculated as follows:

Consider the non – maxima suppression from the value $\arctan\theta$, which is from range $[-90^0, 90^0]$ to sub-range in the color adjustment as follows:

$-22.5^0<\alpha(i,j)\leq 22.5^0$ adjusted to $\alpha(i,j)=0^0$

$22.5^0<\alpha(i,j)\leq 67.5^0$ adjusted to $\alpha(i,j)=+45^0$

$-67.5^0<\alpha(i,j)\leq -22.5^0$ adjusted to $\alpha(i,j)=-45^0$

$\alpha(i,j)\leq -67.5^0$ or $\alpha(i,j)>67.5^0$ adjusted to $\alpha(i,j)=90^0$

Comparing the size and gradient Magnitude of an image pixel considers two neighboring pixels in the direction of the change, which in turn defines it as a potential margin. The magnitude of the chromatic aberration of a pixel is greater than or equal to the magnitude of the chromatic aberration of its two neighboring pixels.

2.9 Double thresholding

In order to identify edge of pixels, high threshold values (T_h) and low threshold values (T_l) are required to take into account only possible pixels as follows:

- The gradient magnitude is greater than or equal to (*Th*), that pixel is called dark edge.

- The gradient magnitude between (T_l) and (*Th*) is called light edge. The light edge can only be an edge as the neighboring pixel value is at least 1 dark edge.

- The magnitude of the pixel's color change is less than (T_l), so that pixel is not borderless.

2.10 Finding edges from intensity data

Edge detection using Intensity data is a way to convert color images, known as RGB, to grayscale images. This grayscale detection technique will be used to find the edge of the image that is considered by changing the gray intensity of one pixel called pixel intensity [12] to another pixel with consecutive channels. Edge detection using Intensity in this research is ranked first compared to Sobel.

2.11 The Edge Detection Methods

The Edge Detection Methods with the first derivative is one of the most popular methods like Sobel or Prewitt, etc. The edge of the image obtained from the first derivative is characterized by a thick line called (Thick Line) because the edge of the image obtained is compared with the threshold.

Edge determination using the first derivative is a discrete gradient transformation on numerical

image data. Therefore, discrete partial derivatives must be used along the direction perpendicular to the x-axis and y-axis, which can be determined by the following method:

$$\nabla_x g(x,y)=g(x,y)-g(x-1,y) \quad (4)$$

$$\nabla_y g(x,y)-y(x,y)-y(x,y-1) \quad (5)$$

The magnitude of the gradient g(x,y) can be determined from

$$|\nabla g(x,y)|=\sqrt{\nabla_x g(x,y))^2-(\nabla_y g(x,y))^2} \quad (6)$$

The magnitude of the gradient along the direction perpendicular to the x-axis and y-axis combined as the equation

$$|\nabla g(x,y)|=|(\nabla_x g(x,y))|-\left|(\nabla_y g(x,y))\right| \quad (7)$$

2.12 Finding edges by Sobel Convolution Mask method [13]

Sobel edging is a non-linear edging method that can change the discontinuity according to the scaling with the value of , which is the original image. The value of is the position value of each of the 8 pixels that will rotate counter-clockwise by giving:

where the magnitude of the edge detection by sobel will be $m \in R^x$ by

$$m(i,j)=\sqrt{u^2+v^2} \quad (8)$$

The direction of the gradient of image d is

$$d(i,j) = arctan\left(\frac{u}{v}\right)$$

$$S=\begin{bmatrix}-1 & 0 & 1\\ -2 & 0 & 2\\ -1 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T=\begin{bmatrix}0 & 2 & 1\\ 0 & 0 & 0\\ -1 & -2 & 1\end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\theta=\tan^{-1}\left(\frac{S}{T}\right) \quad (11)$$

where

S is the mask of the x axis.

T is the mask of the y-axis.

θ is the direction of the vector.

2.13 Euclidean distance [14]

The Euclidean distance is a method for calculating the distance between two points along a straight line using the Pythagorean theorem.

$$d_{x,y}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-y_i)^2} \quad (12)$$

$$x=[x_1 x_2 \ldots . x_m]^T \quad (13)$$

$$y=[y_1 y_2 \ldots . y_m]^T \quad (14)$$

where

$d_{x,y}$ is the j-dimensional intersects.

x is the first set of data

y is the second set of data

m is the size of the data

2.14 Tolerance values

2.14.1. Mean Squared Error: MSE [15]

$$u=(a_5+2a_6+a_7)-(a_1+2a_2+a_3) \quad (15)$$

$$v=(2a_0+a_1+a_7)-(a_3+2a_4+a_5) \quad (16)$$

$$MSE=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(Y_t-\hat{Y}_t)^2 \quad (17)$$

2.14.2. Root mean Squared Error: RMSE [16]

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(Y_t-\hat{Y}_t)^2} \quad (18)$$

2.14.3. Mean Absolute Deviation: MAD [17]

$$MAD=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|Y_t-\hat{Y}_t\right| \quad (19)$$

where

n is the amount of data used

Y_t is the true value at any time t.

$\hat{Y}_t$ is the value predicted at any time t.

3. Results and Discussion

From video images obtained from CCTV cameras and converting color images to grayscale images to find the edge of the image, shown in Fig.1. A converting the color images to grayscale images as shown in Fig.2.

Fig 1. Image from camera or CCTV.

Fig 2. Grayscale image.

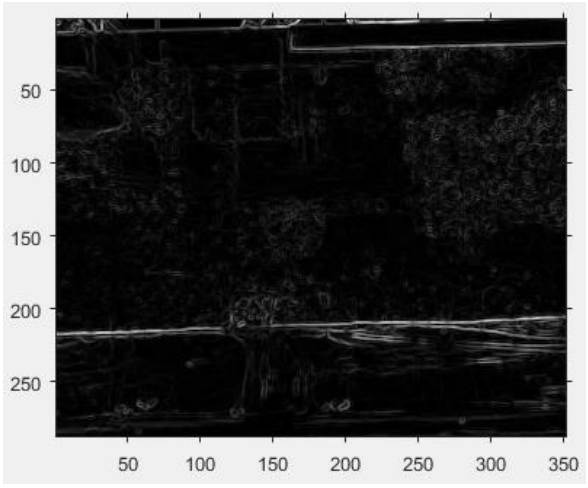


Fig 3 Process of finding edges with Sobel method.

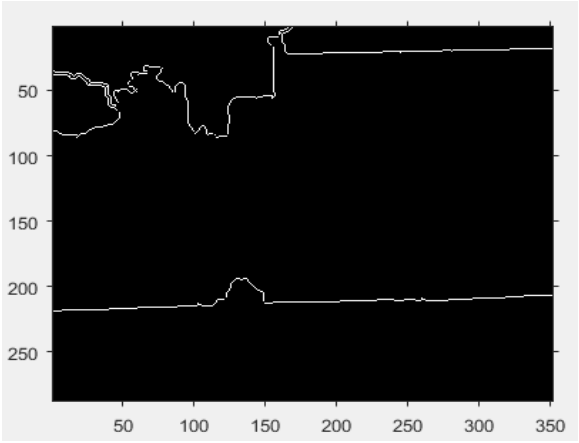


Fig 4 Finding the edge of the line with Euclidean distance.

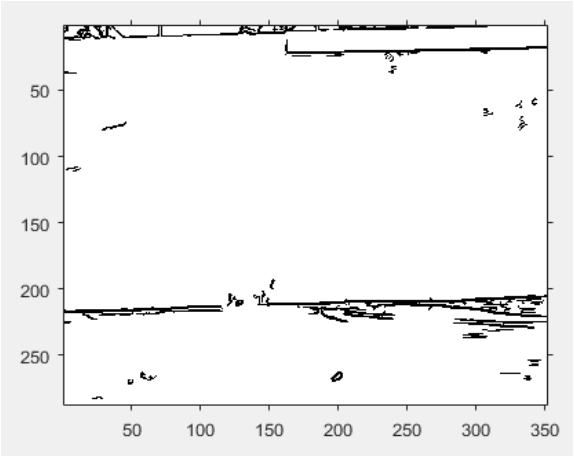


Fig 5 Process of finding edges using First derivative methods.

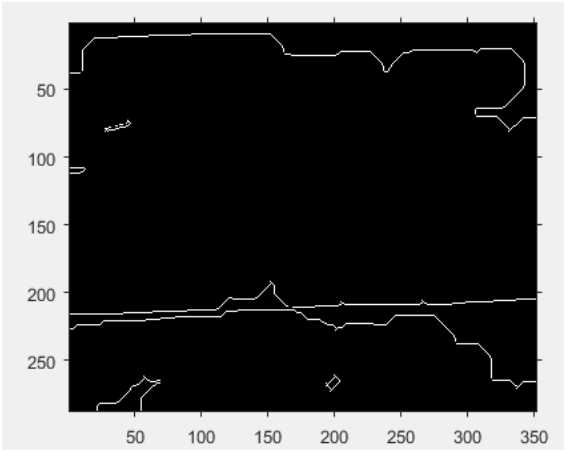


Fig 6. Finding the edge of the line with Euclidean distance.

After obtaining the image in grayscale and finding the edge of the image using 2 methods to compare with the first derivative Sobel method to determine the change in water level in each frame by the Euclidean distance method.

Sobel method for determining image edges and water levels.

For Fig.3, after converting a color image to a grayscale image, it can be entered into the equation of finding the edge by Sobel method.

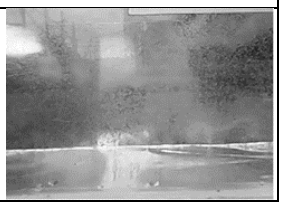
For Figure 4, it will find the edge of the water level line that has changed by checking from Figure 3 and enter the Euclidean distance equation to find the water level to check the accuracy of the image for Sobel method.

First derivative methods for determining image edges and water levels.

For Figure 5, after converting a color image to a grayscale image, it can enter into the edge finding equation by first derivative methods.

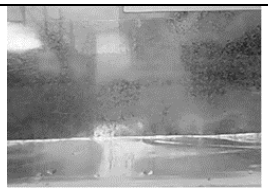
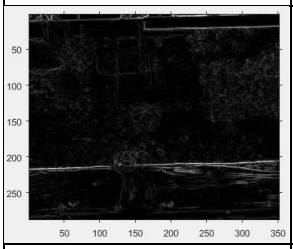
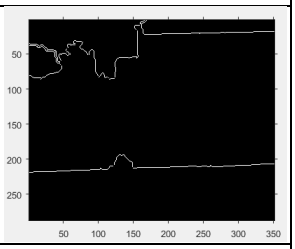
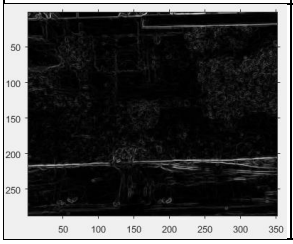
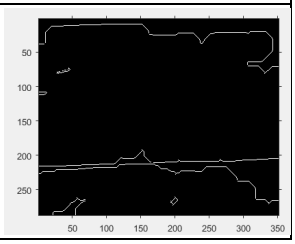
For Figure 6, it will find the edge of the water level line that has changed by checking from Figure 5 and enter the Euclidean distance equation to find the water level to check the accuracy of the image for First derivative methods.

Table 1 Summarizes methods and procedures

Image from camera or CCTV.	Grayscale image.
	

From Table 1, there are 2 methods for finding edges, namely Sobel method and first order differential equation by bringing images from 1,000 VDO frames that have been analyzed 1: 1, the resulting image frames will be color images and converted into grayscale images. This image will be the original image and will be taken to the edge of the image in both ways to find the water level using the Euclidean distance equation.

Table 2 Summarizes methods and procedures.

Image from camera or CCTV.	Grayscale image.
	
Sobel method	Euclidean distance for Sobel method
	
First derivative methods	Euclidean distance for First derivative methods
	

4. Conclusions

From the experiment using VDO images of the changing water level from the canal in Nakhon Pathom Province, Bang Len District to test the water level. The image was adjusted by 10 frames and the MSE, RMSE and MAD values were determined for the error value from the test. The test results were as shown in the table.

Table 3 Error test results.

method	Sobel method	First derivative methods
MSE	919.01 %	13.968 %
RMSE	9.586 %	1.18 %
MAD	8.645 %	0.491 %

Table 3 is the three methods for determining the error value, MSE, RMSE and MAD. In this research, 1,000 frames of captured VDO images were analyzed at a 1:1 frame rate. Comparing the error values of these 3 methods, it was found that the Edge Detection method with Filters Edge Detection had the lowest percentage of error values.

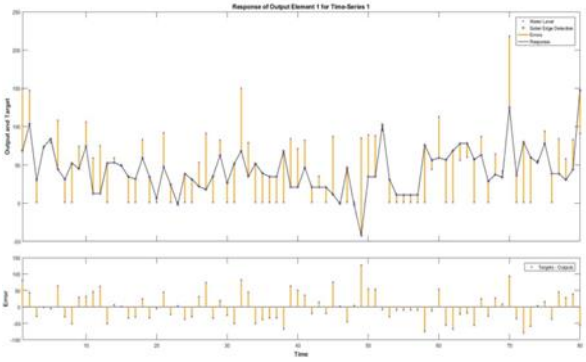


Figure 7. Error determination by Sobel Edge Detection method.

From Figure 7 shows the error value of edge detection by Sobel Edge Detection method. By comparing the water level detection value by edge detection with the actual measurement value.

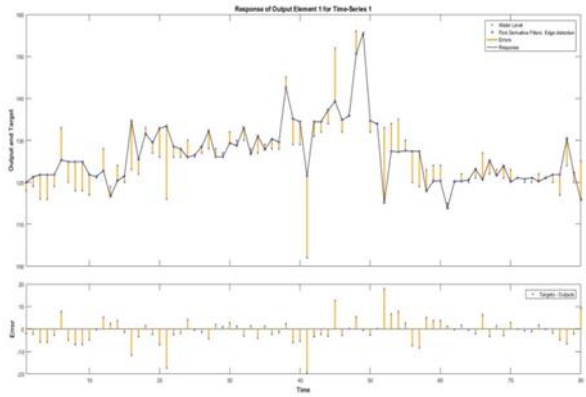


Figure 8. Error determination by Fist Derivative Filters Edge Detection method.

From Figure 8, it shows the error in finding the edge of the image by Filters Edge Detection method. By comparing the water level detection value by finding the edge of the image with the actual measurement value.

From the experimental results of finding the edge between the method of finding the edge by Sobel Method and first derivative bounding method were analyzed from VDO images taken with water level in the water level measurement model to compare the accuracy. The analysis of edge detection from a basic method by examining frame by frame for water level accuracy can be concluded that the first derivative edge determination is more accurate than the Sobel method when comparing MES, RMSE and MAD error determinations.

5. Acknowledgment

In this acknowledgment, the author would like to thanks the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkok Thonburi University for supporting the budget and location for this research work. In addition, I would like to thanks the professors of Electrical Engineering for helping me to conduct this research.

6. References

[1] Thepkasetkul N. Improvement of the canny method for detecting edges of images. 20th National Graduate Research Conference, Khon Kaen University, 2019, p. 299-308.

[2] Homnan B. Moving edge detection using hybrid algorithm. suthiparitat, Faculty of Engineering, Dhurakij Pundit University, p. 133 – 146.

[3] Kawinphas M. Prediction comparison between the bayesian network method and the exponential smoothing method. Journal of Science and Technology. 2015; 2(1): 203-211.

[4] Boonmana C. Comparison of forecasting accuracy with mixed time series models. Journal of Science and Technology, 2015; 2: p. 177 – 190.

[5] Nawaree P. Planning fresh chicken purchases to reduce the cost of wichian buri grilled chicken restaurants with forecasting methods. 4th Rajamangala University of Technology Rattanakosin Academic Conference; 2019 June 26-28; Bangkok, p. 1-12.

[6] Li B. Comparison of algorithms for finding edges of objects in aerial photography. J Sci Technol. 2022;(1):105–120.

[7] Kayakij V. Design and development of image edge circuit using impulse C high-level language. 7th Prince of Songkla University Engineering Conference, 2009; p. 120 – 125.

[8] Sakulwuttichai P. Size analysis of case study materials: peeled bananas. Asia Undergraduate Conference on Computing (AUC), 2022; p. 608 – 615.

[9] Janechai M, Thongkam J. Development of the average of water stream flow prediction models for Nakhonratsima province using data mining techniques. Journal of Science and Technology Mahasarakham University. 2017;36(3):302-12

[10] Kujur A, Raza Z, Khan AA, Wechtaisong C. Data Complexity Based Evaluation of the Model Dependence of Brain MRI Images for Classification of Brain Tumor and Alzheimer's Disease. IEEE Access, 2022;10: 112117-33.

[11] Vishnoi VK, Kumar K, Kumar B, Mohan S, Khan AA. Detection of Apple Plant Diseases Using Leaf Images Through Convolutional Neural Network. IEEE Access, 2022;11:6594-609.

[12] Chingthongka N. Image brightness adjustment using histogram properties. 9th National Academic Conference, Nakhon Pathom Rajabhat University, 2017, p. 291 – 295.

[13] Tepkasekul N. Modifications of canny method for image edge detection. 20th Male Graduate Research Conference, 2019, p. 299 – 308.

[14] Khayankit W. Design and development of image boundary circuits using impulse C high-level language. The 7th Prince of Songkla University Academic Conference of Engineering, 2009, p. 120 -125.

[15] Kulvanich N. Comparison of distance measures in cluster analysis for time- series data. Journal of Science and Technology, 2019; 27: p.1002 – 1014.

[16] Boonmana C, Kulvanich N. A comparative prediction accuracy of hybrid time series models. Science and Technology Journal. 2017;25(2):177-90.

[17] Akranuchart P. Comparing the effectiveness of predict model for price return of world gold by employing bootstrap and artificial neural network. 14th National Graduate Studies Research Conference, 2019: p. 425 - 436.

การวิเคราะห์การเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอก

Large Displacement Analysis of Toroidal Dome Structures Having Variable Thickness under External Pressure

วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา[1 *] ศตคุณ เดชพันธ์[1] คมกร ไชยเดชาธร[1] ชาญชัย เงาะปก[1] เสริมศักดิ์ ติยะแสงทอง[1] ชุดาภัค เดชพันธ์[1] กรกต เลิศชัยพงศ์[2] และสิทธิศักดิ์ แจ่มนาม[3]

[1] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

[2] สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

[3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Weeraphan Jiammeepreecha[1 *], Satakhun Detphan[1], Komkorn Chaidachatorn[1], Chanchai Ngohpok[1], Sermsak Tiyasangthong[1], Chudapak Detphan[1], Korakot Lerdchaipong[2] and Sittisak Jamnam[3]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima
744 Suranarai Road, NaiMuang, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

[2] Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima
744 Suranarai Road, NaiMuang, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

[3] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: weeraphan.ji@rmuti.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 09-1779-0935

Received: 11 July 2023, Revised: 25 August 2023, Accepted: 27 August 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอก โดยใช้ทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ การนิยามค่าพลังงานความเครียดเนื่องจากผลของเมมเบรนและแรงดัดจะสามารถนิยามได้ในเทอมขององค์ประกอบเมตริกซ์เทนเซอร์และเมตริกซ์ความโค้ง การสร้างฟังก์ชันพลังงานของระบบโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกจะอาศัยหลักการของงานเสมือนและเขียนได้ในรูปแบบที่เหมาะสม การหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับกระบวนการทำซ้ำ ในการศึกษาครั้งนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ชิ้นส่วนย่อยแบบคาน 1 มิติ ที่นิยามด้วยฟังก์ชันรูปร่างโพลิโนเมียลอันดันห้า โดยทำการแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ตามแนวพิกัดเมอร์ริเดียน ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่า

ค่าการเสียรูปของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงดันภายนอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดจะทำให้พื้นที่ผิวของโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการเสียรูปมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการเพิ่มค่า อัตราส่วนความยาวรัศมีต่อความหนาของโครงสร้างจะส่งผลทำให้ค่าการเสียรูปมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากค่าความแข็งแกร่งของโครงสร้างมีค่าลดลง
คำสำคัญ การวิเคราะห์การเสียรูปขนาดใหญ่ โครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง ความหนาแปรเปลี่ยน ฟังก์ชันพลังงาน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This paper presents a large displacement analysis of a toroidal dome structure having variable thickness under external pressure using differential geometry. Membrane and flexural strain energies are defined in terms of metric tensor and curvature components. The energy functional of the toroidal dome structure under external pressure is derived from the principle of virtual work, and it is expressed in the appropriate forms. Numerical results can be obtained by finite element method and iterative procedure. In this study, finite element model is simulated using one-dimensional beam elements via a fifth-order polynomial shape function, and it is divided along the meridian line. The numerical results indicate that the displacement responses of the toroidal dome structure increase for larger external pressure. The surface of the toroidal dome structure increases for a large value of the cross-sectional bend radii ratio. Then the displacement responses increase under a large value of the cross-sectional bend radii ratio. In addition, the stiffness of the toroidal dome structure decreases if the cross-sectional radius-to-wall thickness ratios increase. Therefore, the displacement responses increase under a large value of the cross-sectional radius to wall thickness ratio.
Keywords: Large Displacement Analysis, Toroidal Dome Structure, Variable Thickness, Energy Functional, Finite Element Method

1. บทนำ

โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยาง (Toroidal Shells) จะมีลักษณะแตกต่างโครงสร้างเปลือกบางที่มีความสมมาตรตามแนวแกน (Axisymmetric Shells) ทั่วไป เช่นโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลม รูปทรงอีลิปติก รูปทรงกระบอก และรูปทรงแคปซูล เป็นต้น [1] เนื่องจากพื้นผิวของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางจะไม่มีการตัดกันรอบแกนหมุน (Axis of Revolution) โดยทั่วไปโครงสร้างประเภทนี้จะเป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมเช่น ถังบรรจุปิโตรเลียมเหลว, ท่อลมร้อน, เรือดำน้ำ และยางรถยนต์หรือเครื่องบิน เป็นต้น [2-3] โดยที่กระบวนการหาคำตอบแบบดั้งเดิมสำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมภายใต้แรงดันภายในสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีเมมเบรนแบบเชิงเส้นแต่เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของค่าการเสียรูปที่ตำแหน่งจุดยอด (Toroid Crest) ดังนั้น Clark [4], Jordan [5] และ Sanders and Liepins [6] จึงได้นำเสนอสมการสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางโดยใช้ทฤษฎีเชลล์แบบเชิงเส้น ทฤษฎีเมมเบรนแบบไม่เป็นเชิงเส้น และทฤษฎีการลดเทอมเป็นเมมเบรนแบบเชิงเส้น (Linearized Membrane Theory) ตามลำดับ ต่อมา Sun [7] ซึ่งได้นำเสนอผลเฉลยแบบแม่นตรงสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางแบบสมมาตรรูปทรงห่วงยางที่มีความชะลูดสูงโดยประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ขยายตัวของท่อลมร้อน

สำหรับการประยุกต์ใช้โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาและนอกชายฝั่งได้มีการจำลองเป็นโครงสร้างโดมในงานวิจัยของ Jiammeepreecha and Chucheepsakul [8] โดยใช้ทฤษฎีเชลล์และทฤษฎีเมมเบรนแบบไม่เป็นเชิงเส้น ตามลำดับ หลังจากนั้น Jiammeepreecha et al. [9–10] ได้ใช้ทฤษฎีเมมเบรนแบบไม่เป็นเชิงเส้นและทฤษฎีเชลล์เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างเปลือกบางรับแรงดันน้ำสถิตย์เมื่อพิจารณาผลของพลังงานความเครียดเนื่องจากของเหลวที่บรรจุภายใน (Internal

Fluid) พบว่าค่าการเสียรูปมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่โครงสร้างเปลือกบางไม่ได้บรรจุของเหลวภายใน สำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางที่มีหน้าตัดรูปทรงอื่น ๆ ในงานวิศวกรรมนอกชายฝั่งได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ Tanbanjongkij et al. [11] สำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางหน้าตัดรูปทรงอิลิปติก

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้คือเพื่อนำเสนอถึงผลตอบสนองการเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอกโดยใช้ทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential Geometry) ในการสร้างรูปทรงเรขาคณิตของแบบจำลอง [10,12] และนิยามค่าพลังงานความเครียดเนื่องจากผลของเมมเบรนและแรงดัดได้ในเทอมขององค์ประกอบเมตริกซ์เทนเซอร์ (Metric Tensor) และเมตริกซ์ความโค้ง (Curvature Tensor) การสร้างฟังก์ชันพลังงาน (Energy Functional) ของระบบโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกจะอาศัยหลักการของงานเสมือน (Principle of Virtual Work) [13] และเขียนได้ในรูปแบบที่เหมาะสม (Appropriate Form) การเขียนฟังก์ชันพลังงานในรูปแบบที่เหมาะสมเป็นการจัดรูปสมการเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Analysis) สำหรับการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขของค่าการเสียรูปขนาดใหญ่โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ร่วมกับกระบวนการทำซ้ำ (Iterative Procedure) [14] ในการศึกษาครั้งนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ชิ้นส่วนย่อยแบบคาน 1 มิติ ที่นิยามด้วยฟังก์ชันรูปร่างโพลิโนเมียลอันดับห้า (Fifth-order Polynomial) โดยทำการแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ตามแนวพิกัดเมอร์ริเดียน

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1.1 วัสดุของโครงสร้างมีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น (Linearly Elastic Material)

2.1.2 ความหนาของโครงสร้างเปลือกบางไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการเสียรูป

2.1.3 ค่าการเสียรูปเนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างจึงไม่นำมาพิจารณา

2.1.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างไม่ได้พิจารณาในบทความนี้ ดังนั้นแรงดันภายนอกจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันวิกฤติที่ทำให้โครงสร้างเกิดสูญเสียเสถียรภาพ

2.2 ทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์

จากรูปที่ 1 กำหนดให้ (X,Y,Z) เป็นระบบพิกัดฉาก $(\hat{i},\hat{j},\hat{k})$ เป็นเวคเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตามแนวแกนในระบบพิกัดฉาก และ (θ,ϕ) คือค่าพารามิเตอร์ของพื้นผิวซึ่งวัดตามแนวเส้นพิกัดเมอร์ริเดียนและเส้นพิกัดลองจิจูด ตามลำดับ ดังนั้นจะสามารถนิยามเวคเตอร์ระบุตำแหน่งของรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่พื้นผิวกึ่งกลางความหนา (Middle Surface) [12] ได้ดังสมการที่ (1)

$$\vec{P}=X\vec{i}+Y\vec{j}+Z\vec{k} \tag{1}$$

ในที่นี้

$$X=(R+r\cos\theta)\cos\phi \tag{2ก}$$

$$Y=(R+r\cos\theta)\sin\phi \tag{2ข}$$

$$Z=r\sin\theta \tag{2ค}$$

เมื่อ r คือ ความยาวรัศมีหน้าตัด, เมตร

R คือ ความยาวรัศมีการดัด, เมตร

จากนั้นเมื่อของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกจะทำให้เกิดการเสียรูปโดยพื้นผิวอ้างอิงเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวที่ตำแหน่งใหม่เรียกว่าพื้นผิวหลังการเสียรูป ดังนั้นเวคเตอร์ระบุตำแหน่งบนพื้นผิวที่เกิดการเสียรูปจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\vec{P}^{*}=\vec{P}+\frac{\vec{P}_{\theta}}{A}u+\frac{\vec{P}_{\phi}}{B}v+\vec{n}w \tag{3}$$

เมื่อ (u,v,w) คือค่าการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน แนวพิกัดลองจิจูดและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน ตามลำดับ ในที่นี้ตัวห้อย (θ,ϕ) แสดงถึงอนุพันธ์ย่อยตามแนวระบบพิกัดของโครงสร้างเปลือกบาง ดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากเป็นปัญหาสมมาตรตามแนวแกน (Axisymmetric Problem)

ดังนั้นค่าการเสียรูปตามแนวพิกัดลองจิจูดมีค่าเป็นศูนย์ $(\nu = 0)$ สำหรับ (A, B) คือค่าพารามิเตอร์ของ Lame ซึ่งจะมีค่าดังสมการที่ (4)

$$A=\sqrt{\vec{\mathbf{P}}_\theta \cdot \vec{\mathbf{P}}_\theta} \quad (4ก)$$

$$B=\sqrt{\vec{\mathbf{P}}_\phi \cdot \vec{\mathbf{P}}_\phi} \quad (4ข)$$

กำหนดให้ $\vec{\mathbf{n}}$ คือเวคเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย ซึ่งจะมีค่าดังสมการที่ (5)

$$\vec{\mathbf{n}} = \frac{\vec{\mathbf{P}}_\theta \times \vec{\mathbf{P}}_\phi}{\left|\vec{\mathbf{P}}_\theta \times \vec{\mathbf{P}}_\phi\right|} \quad (5)$$

จากทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ [10,12] สามารถนิยามรูปแบบพื้นฐานอันดับหนึ่ง (First Fundamental Form) ของพื้นผิวอ้างอิงและพื้นผิวหลังการเสียรูปได้ดังสมการที่ (6)

$$d\vec{\mathbf{P}} \cdot d\vec{\mathbf{P}} = (Ad\theta)^2 + (Bd\phi)^2 \quad (6ก)$$

$$d\vec{\mathbf{P}}^* \cdot d\vec{\mathbf{P}}^* = (A^* d\theta)^2 + (B^* d\phi)^2 \quad (6ข)$$

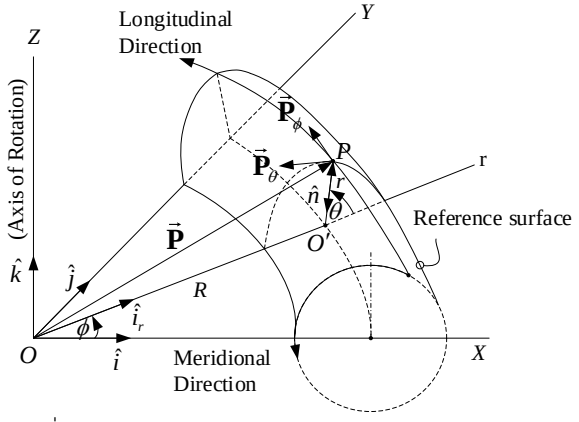
ในที่นี้ตัวยก $(*)$ แสดงถึงค่าพารามิเตอร์สำหรับพื้นผิวหลังการเสียรูป เมื่อ (A, B) คือส่วนประกอบของเมตริกซ์เทนเซอร์ที่สภาวะอ้างอิงสามารถนิยามได้ดังสมการที่ (4) ในขณะที่ (A^*, B^*) คือส่วนประกอบของเมตริกซ์เทนเซอร์ที่สภาวะหลังการเสียรูปมีค่าตามสมการที่ (7)

$$A^* = \sqrt{\vec{\mathbf{P}}_\theta^* \ \vec{\mathbf{P}}_\theta^*} \quad (7ก)$$

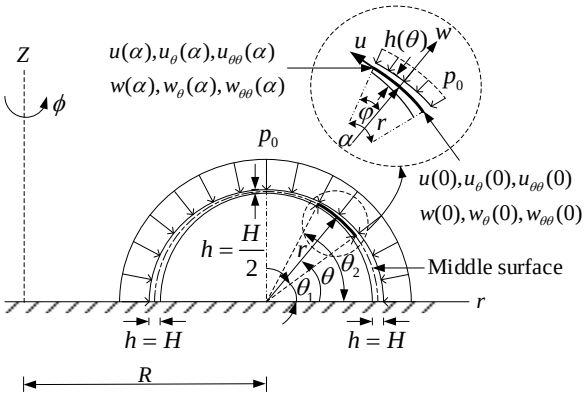
$$B^* = \sqrt{\vec{\mathbf{P}}_\phi^* \cdot \vec{\mathbf{P}}_\phi^*} \quad (7ข)$$

จากสมการที่ (4) และ (7) จะสามารถนิยามความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การเสียรูปในเทอมขององค์ประกอบเมตริกซ์เทนเซอร์ ดังสมการที่ (8)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_\phi \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} (A^*/A)^2 - 1 \\ (B^*/B)^2 - 1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$



รูปที่ 1 รูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง



รูปที่ 2 โครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับบแรงดันภายนอก

สำหรับรูปแบบพื้นฐานอันดับสอง (Second Fundamental Form) ของพื้นผิวอ้างอิง จะแสดงส่วนประกอบของเมตริกซ์ความโค้งได้ดังสมการที่ (9)

$$L = \vec{\mathbf{P}}_{\theta\theta} \cdot \vec{\mathbf{n}} \quad (9ก)$$

$$N = \vec{\mathbf{P}}_{\phi\phi} \cdot \vec{\mathbf{n}} \quad (9ข)$$

จากสมการที่ (4) และ (9) จะสามารถนิยามความสัมพันธ์ระหว่างความโค้ง-การเสียรูปในเทอมขององค์ประกอบเมตริกซ์เทนเซอร์และความโค้ง ดังสมการที่ (10)

$$\kappa_\theta = -\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\frac{w_\theta}{A}\right) - \frac{A_\phi w_\phi}{AB^2} \quad (10ก)$$

$$\kappa_\phi = -\frac{B_\theta w_\theta}{A^2} - \frac{1}{B}\frac{\partial}{\partial\phi}\left(\frac{w_\phi}{B}\right) \quad (10ข)$$

กำหนดให้ $\{\mathbf{g}\}^T = \lfloor u \quad w \quad u_\theta \quad w_\theta \quad u_{\theta\theta} \quad w_{\theta\theta} \rfloor$ ดังนั้นเราจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การเสียรูปในสมการที่ (8) ได้ดังสมการที่ (11)

$$\varepsilon_i = L^i_k g_k + \frac{1}{2} H^i_{kl} g_k g_l \tag{11}$$

ในที่นี้

$$\{\mathbf{L_1}\}^T = \left\lfloor 0 \quad -\frac{L}{A^2} \quad \frac{1}{A} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right\rfloor \tag{12ก}$$

$$\{\mathbf{L_2}\}^T = \left\lfloor \frac{B_\theta}{AB} \quad -\frac{N}{B^2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right\rfloor \tag{12ข}$$

$$[\mathbf{H_1}] = \begin{bmatrix} \frac{L^2}{A^4} & 0 & 0 & \frac{L}{A^3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L^2}{A^4} & -\frac{L}{A^3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L}{A^3} & \frac{1}{A^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{L}{A^3} & 0 & 0 & \frac{1}{A^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{12ค}$$

$$[\mathbf{H_2}] = \begin{bmatrix} \frac{B_\theta^2}{(AB)^2} & -\frac{B_\theta N}{AB^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{B_\theta N}{AB^3} & \frac{N^2}{B^4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{12ง}$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความโค้ง-การเสียรูปในสมการที่ (10) ในรูปแบบของเมตริกซ์ดังสมการที่ (13)

$$\boldsymbol{\kappa}_i = \mathbf{S}^i_k \mathbf{g}_k \tag{13}$$

ในที่นี้

$$\{\mathbf{S_1}\}^T = \left\lfloor 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{A_\theta}{A^3} \quad 0 \quad -\frac{1}{A^2} \right\rfloor \tag{14ก}$$

$$\{\mathbf{S_2}\}^T = \left\lfloor 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{B_\theta}{A^2 B} \quad 0 \quad 0 \right\rfloor \tag{14ข}$$

2.3 พลังงานความเครียดเนื่องจากผลของเมมเบรนและแรงดัด

สำหรับวัสดุของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น จะสามารถคำนวณหาค่าพลังงานความเครียดเนื่องจากผลของเมมเบรน (Strain Energy due to Membrane Stiffness) [12-13] จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (15)

$$U_m = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_\phi \end{Bmatrix}^T [\mathbf{C'}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_\phi \end{Bmatrix} d\theta \tag{15}$$

เมื่อ $[C']$ คือเมตริกซ์ความแข็งแกร่งเนื่องจากการยืดหดตัว (Extensional Rigidity) ซึ่งจะมีค่าดังสมการที่ (16)

$$[C'] = \frac{E'h(\theta)}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu \\ \mu & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

เมื่อ E' คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus), Pa

μ คือ อัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio)

และ $h(\theta)$ คือความหนาของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนตามแนวพิกัดเมอร์ริเดียนดังสมการที่ (17)

$$h(\theta) = H\left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) \quad \text{สำหรับ } 0 \le \theta \le \frac{\pi}{2} \tag{17ก}$$

$$h(\theta) = H\left(\frac{\theta}{\pi}\right) \quad \text{สำหรับ } \frac{\pi}{2} \le \theta \le \pi \tag{17ข}$$

เมื่อ H คือ ความหนาของโครงสร้างที่ฐานรองรับ, เมตร

การแปรเปลี่ยนความหนาของโครงสร้างมักโดยทั่วไปจะพิจารณาเฉพาะตำแหน่งฐานรองรับ (Support Condition) เนื่องจากมีแรงปฏิกิริยาสูง อย่างไรก็ตามสมการที่ (17) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกรณีที่โครงสร้างสามารถขึ้นรูปได้ โดยที่ความหนาแปรเปลี่ยนตลอดแนวพิกัดเมอร์ริเดียน ซึ่งเหมาะกับโครงสร้างติดตั้งในน้ำ (Underwater Structures) โดยแรงดันภายนอกที่เกิดขึ้นจะแปรเปลี่ยนตลอดความลึกของโครงสร้าง [8-10] ดังนั้นการพิจารณาความหนาแปรเปลี่ยนจะเกิดความประสิทธิภาพมากกว่าโครงสร้างที่มีความหนาคงที่ ดังนั้นจากสมการที่ (15) จะเขียนสมการแปรผันของพลังงานความเครียดเนื่องจากผลของเมมเบรนได้ดังสมการที่ (18)

$$\delta U_m = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta\{\mathbf{g}\}^T ([\tilde{\mathbf{k}}_m] + [\tilde{\mathbf{n}}_1] + [\tilde{\mathbf{n}}_2]) \{\mathbf{g}\} \, d\theta \tag{18}$$

ในที่นี้

$$[\tilde{k}_m]=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} C_{ij}\left(\{L_i\}\{L_j\}^T\right) \quad (19ก)$$

$$[\tilde{\mathbf{n}}_1]=\frac{1}{2}\sum_{=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\mathbf{C}_{ij}\begin{vmatrix}\left(\{\mathbf{L}_i\}\{\hat{\mathbf{g}}\}^T\right)[\mathbf{H}_j]+\\ \left(\{\hat{\mathbf{g}}\}^T\{\mathbf{L}_i\}\right)[\mathbf{H}_j]+\\ [\mathbf{H}_i]\left(\{\hat{\mathbf{g}}\}\{\mathbf{L}_j\}^T\right)\end{vmatrix} \quad (19ข)$$

$$[\tilde{\mathbf{n}}_1]=\frac{1}{2}\sum_{=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\mathbf{C}_{ij}\begin{vmatrix}\left(\{\mathbf{L}_i\}\{\hat{\mathbf{g}}\}^T\right)[\mathbf{H}_j]+\\ \left(\{\hat{\mathbf{g}}\}^T\{\mathbf{L}_i\}\right)[\mathbf{H}_j]+\\ [\mathbf{H}_i]\left(\{\hat{\mathbf{g}}\}\{\mathbf{L}_j\}^T\right)\end{vmatrix} \quad (19ค)$$

สำหรับพลังงานความเครียดเนื่องจากผลของแรงดัด (Strain Energy due to Bending Stiffness) ของวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น [12-13] จะมีค่าดังสมการที่ (20)

$$U_b=\int_{\theta_1}^{\theta_2}\frac{1}{2}\begin{Bmatrix}\kappa_\theta\\ \kappa_\phi\end{Bmatrix}^T[\mathbf{D}']\begin{Bmatrix}\kappa_\theta\\ \phi\end{Bmatrix}d\theta \quad (20)$$

เมื่อ $[D']$ คือเมตริกซ์ความแข็งแกร่งเนื่องจากการดัด (Flexural Rigidity) ซึ่งจะมีค่าดังสมการที่ (21)

$$[D']=\frac{E'h^3(\theta)}{12(1-\mu^2)}\begin{bmatrix}1 & \mu\\ \mu & 1\end{bmatrix} \quad (21)$$

จากสมการที่ (20) จะเขียนสมการแปรผันของพลังงานความเครียดเนื่องจากผลของแรงดัดได้ดังสมการที่ (22)

$$\delta U_b=\int_{\theta_1}^{\theta_2}\delta\{\mathbf{g}\}^T[\tilde{\mathbf{k}}_b]\{\mathbf{g}\}d\theta \quad (22)$$

ในที่นี้

$$[\tilde{\mathbf{k}}_b]=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\mathbf{D}'_{ij}\left(\{\mathbf{S}_i\}\{\mathbf{S}_j\}^T\right) \quad (23)$$

เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์การเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรับแรงดันแบบสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าพลังงานความเครียดแบบไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกจะพิจารณาเฉพาะเทอมของพลังงานความเครียดเนื่องจากผลของเมมเบรนเท่านั้น ในขณะที่เทอมของแรงดัดจะพิจารณาเฉพาะแบบเชิงเส้น

2.4 งานเสมือนเนื่องจากแรงดันภายนอก

งานเสมือนเนื่องจากแรงดันภายนอก (Virtual Work done by External Pressure) ที่มีค่าคงที่สม่ำเสมอกระทำต่อโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง [13] จะมีค่าดังสมการที่ (24)

$$\delta\Omega \quad 2\pi\int_{\theta_1}^{\theta_2}p_o\{\boldsymbol{\delta}\mathbf{w}\}D\,d\theta \quad (24)$$

เมื่อ $\bar{p}_o$ คือแรงดันสม่ำเสมอภายนอก, Pa

2.5 ผลรวมงานเสมือน

จากหลักการของงานเสมือน (Principle of Virtual Work) จะสามารถเขียนผลรวมงานเสมือน (Total Virtual Work) ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกซึ่งจะอยู่ในสภาวะสมดุลได้ถ้าผลรวมของงานเสมือนมีค่าเป็นศูนย์ [13] ดังสมการที่ (25)

$$\delta U_m+\delta U_b+\delta\Omega=0 \quad (25)$$

แทนค่าสมการที่ (18), (22) และ (24) ลงในสมการที่ (25) จะได้ดังสมการที่ (26)

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2}\delta\{\mathbf{g}\}^T\left([\tilde{\mathbf{k}}_L]+[\tilde{\mathbf{k}}_N]\right)\{\mathbf{g}\}d\theta +2\pi\int_{\theta_1}^{\theta_2}p_o\{\boldsymbol{\delta}\mathbf{w}\}D\,d\theta=0 \quad (26)$$

ในที่นี้

$$[\tilde{\mathbf{k}}_L]=[\tilde{\mathbf{k}}_m]+[\tilde{\mathbf{k}}_b] \quad (27ก)$$

$$[\tilde{\mathbf{k}}_N]=[\tilde{\mathbf{n}}_1]+[\tilde{\mathbf{n}}_2] \quad (27ข)$$

2.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความโค้ง-การเสียรูปในเทอมขององค์ประกอบเมตริกซ์เทนเซอร์และความโค้ง จะต้องพิจารณาถึงค่าอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของค่าการเสียรูป ดังแสดงในสมการที่ (10) ดังนั้นการวิเคราะห์การเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกจะสามารถทำได้โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับกระบวนการทำซ้ำ [14] โดยทำการแบ่งโครงสร้างเปลือกบางออกเป็นชิ้นส่วนย่อยตามแนวเส้นพิกัดเมอร์ริเดียนดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่ฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่ห้าในการประมาณค่าการเสียรูปจะสามารถนิยามได้ดังสมการที่ (28)

$$\{\mathbf{g}\}=[\boldsymbol{\psi}]\{\mathbf{d}\} \quad (28)$$

เมื่อ $\lfloor\mathbf{g}\rfloor$ คือ เวคเตอร์การเคลื่อนที่ที่จุดต่อ

$\lfloor \mathbf{d} \rfloor$ คือ เวคเตอร์ของดีกรีอิสระที่จุดต่อ

[ψ] คือ เมตริกซ์ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function)

ในที่นี้ $\lfloor \mathbf{d} \rfloor$ และ **[ψ]** สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (29) และ (30) ตามลำดับดังนี้

$$\{d\}^T = \begin{bmatrix} u(0)\ w(0)\ u_\theta(0)\ \dots \\ \dots\quad w_\theta(\alpha)\ u_{\theta\theta}(\alpha)\ w_{\theta\theta}(\alpha) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[\psi] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & \dots & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & N_6 \\ N_{1,\varphi} & 0 & N_{2,\varphi} & \dots & 0 \\ 0 & N_{1,\varphi} & 0 & \dots & N_{6,\varphi} \\ N_{1,\varphi\varphi} & 0 & N_{2,\varphi\varphi} & \dots & 0 \\ 0 & N_{1,\varphi\varphi} & 0 & \dots & N_{6,\varphi\varphi} \end{bmatrix} \quad (30)$$

ในที่นี้

$$N_1 = 1 - 10\frac{\varphi^3}{\alpha^3} + 15\frac{\varphi^4}{\alpha^4} - 6\frac{\varphi^5}{\alpha^5} \quad (31ก)$$

$$N_2 = \varphi - 6\frac{\varphi^3}{\alpha^2} + 8\frac{\varphi^4}{\alpha^3} - 3\frac{\varphi^5}{\alpha^4} \quad (31ข)$$

$$N_3 = \frac{1}{2}\varphi^2 - \frac{3}{2}\frac{\varphi^3}{\alpha} + \frac{3}{2}\frac{\varphi^4}{\alpha^2} - \frac{1}{2}\frac{\varphi^5}{\alpha^3} \quad (31ค)$$

$$N_4 = 10\frac{\varphi^3}{\alpha^3} - 15\frac{\varphi^4}{\alpha^4} + 6\frac{\varphi^5}{\alpha^5} \quad (31ฆ)$$

$$N_5 = -4\frac{\varphi^3}{\alpha^2} + 7\frac{\varphi^4}{\alpha^3} - 3\frac{\varphi^5}{\alpha^4} \quad (31ง)$$

$$N_6 = \frac{1}{2}\frac{\varphi^3}{\alpha} - \frac{\varphi^4}{\alpha^2} + \frac{1}{2}\frac{\varphi^5}{\alpha^3} \quad (31จ)$$

แทนค่าสมการที่ (28) ลงใน (26) จะสามารถเขียนผลรวมงานเสมือนของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกดังสมการที่ (32)

$$\{\delta\mathbf{d}\}^T \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\boldsymbol{\psi}]^T \left([\tilde{\mathbf{k}}_L] + [\tilde{\mathbf{k}}_N]\right)[\boldsymbol{\psi}]\, d\theta \{\mathbf{d}\} + \{\mathbf{f}\} = 0 \quad (32)$$

ในที่นี้

$$\{\mathbf{f}\} = -2\pi \{\boldsymbol{\delta}\mathbf{w}\}^T \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_w \{\boldsymbol{\psi}\} D\, d\theta \quad (33)$$

เนื่องจากดีกรีอิสระเฉพาะที่ (Local Degree of Freedom) **{d}** จะเหมือนกับค่าดีกรีอิสระรวม (Global Degree of Freedom) **{D}** ดังนั้นผลรวมของงานเสมือนสำหรับระบบโครงสร้างสามารถรวมได้โดยตรงโดยใช้สมการที่ (32) ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (34)

$$[[\mathbf{K}_L]+[\mathbf{K}_N]]\{\mathbf{Q}\}=-\{\mathbf{F}\} \quad (34)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่งฐานรองรับกำหนดให้เป็นแบบยึดแน่นจะมีค่าดังสมการที่ (35)

$$u = w = w_\theta = 0 \quad (35)$$

โดยที่ระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในสมการที่ (34) จะต้องทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่งฐานรองรับจากสมการที่ (35) จึงจะสามารถคำนวนหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขได้ด้วยวิธีกระบวนการทำซ้ำได้

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การศึกษาครั้งนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB R2015b ในการวิเคราะห์ผลการเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธีกระบวนการทำซ้ำในการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขโดยที่ค่าพารามิเตอร์สมบัติของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอกจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้าง

การหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเริ่มต้นจากการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่คำนวณได้จากวิธีกระบวนการทำซ้ำซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนของชิ้นส่วนย่อยที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยแบบจำลองที่ใช้ชิ้นส่วนย่อยทั้งหมด 24 ชิ้นจะให้คำตอบใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ใช้ชิ้นส่วนย่อย 28 ชิ้นนั่นคือมีค่าการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนที่ตำแหน่ง θ เท่ากับ 90 องศา ไม่เกินร้อยละ 0.05 ดังนั้นในบทความนี้จะกำหนดให้ใช้จำนวนชิ้นส่วนย่อยเท่ากับ 24 ชิ้นสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอก จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวนโดยใช้สมบัติของโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 1 โดย

ที่ความหนาของโครงสร้างมีค่าคงที่เท่ากับ 0.05 เมตร ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดแนวเส้นพิกัดเมอร์ริเดียน พบว่าค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม ABAQUS [15] ซึ่งใช้ชิ้นส่วนย่อยโครงสร้างเปลือกบางแบบสมมาตรนิยามด้วยฟังก์ชันรูปร่างอันดับที่สอง (SAX2) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4

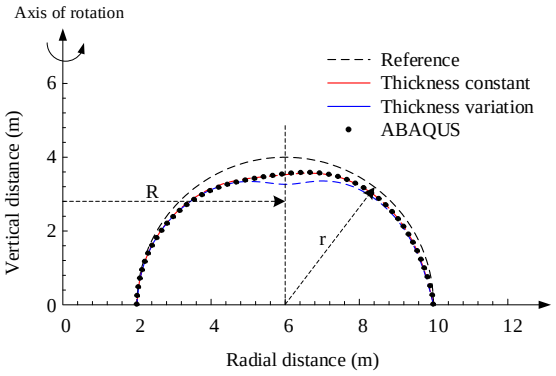
สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอกที่มีความหนาแปรเปลี่ยนตลอดแนวเส้นพิกัดเมอร์ริเดียนจะพบว่ามีค่าการเสียรูปสูงกว่ากรณีที่ความหนาของโครงสร้างมีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 เนื่องจากความหนาของโครงสร้างจะมีค่าลดลงตามแนวเส้นพิกัดเมอร์ริเดียนส่งผลทำให้ค่าความแข็งแกร่งของโครงสร้างมีค่าลดลง ซึ่งในกรณีที่ความหนาของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงจะไม่สามารถคำนวณได้โดยใช้โปรแกรม ABAQUS จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณจะสามารถทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการเสียรูปขนาดใหญ่ได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลและสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์

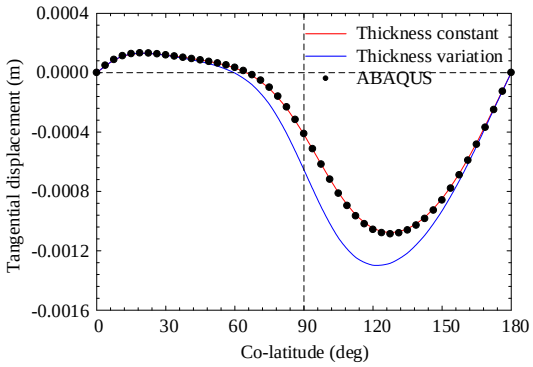
รายการ	ปริมาณ
1. ความยาวรัศมีหน้าตัด (r)	4 เมตร
2. ความยาวรัศมีการดัด (R)	6 เมตร
3. ความหนาของโครงสร้างที่ฐานรองรับ (H)	0.075 เมตร
4. แรงดันภายนอก (p_o)	$1x10^6$ ปาสคาล
5. โมดูลัสยืดหยุ่น (E')	$2x10^{11}$ ปาสคาล
6. อัตราส่วนปัวส์ซอง (μ)	0.3

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับจำนวนชิ้นส่วนย่อย

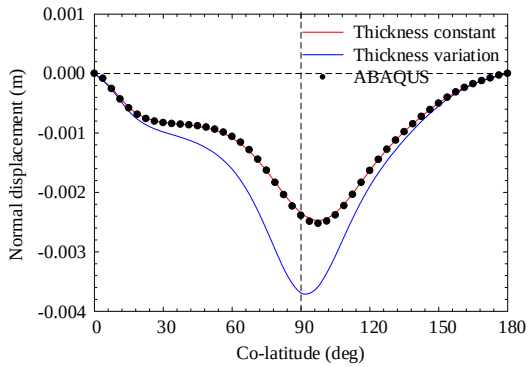
จำนวนชิ้นส่วนย่อย	ค่าการเสียรูป (เมตร)		ความแตกต่าง (%)	
	u	w	u	w
8	0.000416	0.002332	0.106	0.317
12	0.000416	0.002339	0.050	0.165
16	0.000417	0.002343	0.030	0.099
20	0.000417	0.002346	0.020	0.066
24	0.000417	0.002347	0.014	0.047
28	0.000417	0.002348	-	-



รูปที่ 3 การเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางรับแรงดันภายนอก



(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน

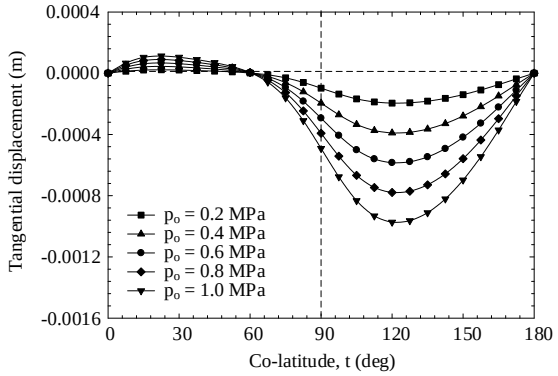


(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

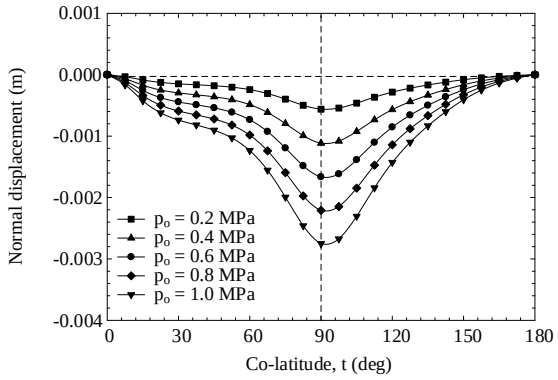
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับแนวเส้นพิกัดเมอร์ริเดียนของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง

3.2 ผลของการแปรเปลี่ยนค่าแรงดันภายนอก

การศึกษาผลของการแปรแปลี่ยนค่าแรงดันภายนอก (p_o) ที่กระทำต่อโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนจะสามารถทำได้โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และทำการแปรเปลี่ยนค่าแรงดันภายนอกตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.0 เมกะปาสคาล พบว่าค่าการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าแรงดันภายนอกมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5



(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน

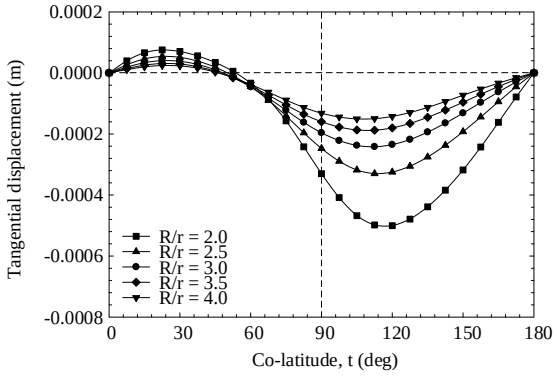


(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

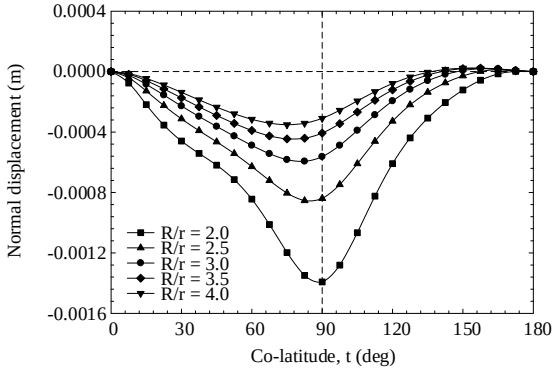
รูปที่ 5 ผลของการแปรเปลี่ยนค่าแรงดันภายนอกที่มีต่อโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง

3.3 ผลของการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของการแปรแปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัด (R/r) ที่มีผลต่อค่าการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอกจะสามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดตั้งแต่ 2.0 ถึง 4.0 โดยที่ค่าความยาวรัศมีการดัด (R) มีค่าคงที่เท่ากับ 6 เมตร และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในตารางที่ 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาพบว่าค่าการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการเสียรูปที่เพิ่มสูงขึ้นนี้เนื่องจากการที่ค่าอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ความยาวรัศมีการดัดมีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทำให้พื้นผิวที่รองรับแรงดันภายนอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง



(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน



(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

รูปที่ 6 ผลของการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดที่มีต่อโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง

3.4 ผลของการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดต่อความหนาของโครงสร้าง

สำหรับการศึกษาผลของการแปรแปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดต่อความหนาของโครงสร้าง (r/H) ที่มีผลต่อค่าการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอกจะสามารถทำได้โดยการแปรแปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดต่อความหนาของโครงสร้างตั้งแต่ 30 ถึง 50 โดยที่ค่าความยาวรัศมีหน้าตัด (r) มีค่าคงที่เท่ากับ 4 เมตร และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในตารางที่ 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อความหนาของโครงสร้างมีค่าลดลงหรืออัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดต่อความหนาของโครงสร้างมีค่าเพิ่งสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการเสียรูปของโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7

3.5 ผลของการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีการดัดต่อความหนาของโครงสร้าง

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความยาวรัศมีการดัด (R) เป็นพารามิเตอร์เฉพาะสำหรับโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างโดมที่มีความสมมาตรตามแนวแกนอื่น ๆ เช่น โครงสร้างโดมรูปทรงกลม ทรงรี หรือทรงกรวย เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเสียรูปของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางนั่นเอง ดังนั้นในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนความยาวรัศมีการดัดต่อความหนาของโครงสร้าง (R/H) ที่มีผลต่อค่าการเสียรูปของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนแรงดันภายนอกจะสามารถทำได้โดยการแปรแปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดต่อความหนาของโครงสร้างตั้งแต่ 60 ถึง 100 โดยที่ค่าความยาวรัศมีการดัด (R) มีค่าคงที่เท่ากับ 6 เมตร และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในตารางที่ 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากผลการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนความยาวรัศมีการดัดต่อความหนาของโครงสร้างมีค่าเพิ่งสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการเสียรูปของโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจะสอดคล้องกับผลของการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 7

4. บทสรุป

การศึกษาผลตอบสนองของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอกโดยใช้ทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ และหลักการของงานเสมือนในการสร้างฟังก์ชันพลังงาน จากนั้นใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับกระบวนการทำซ้ำในการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขสำหรับค่าการเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีความหนาแปรเปลี่ยนรับแรงดันภายนอก สามารถสรุปได้ดังนี้

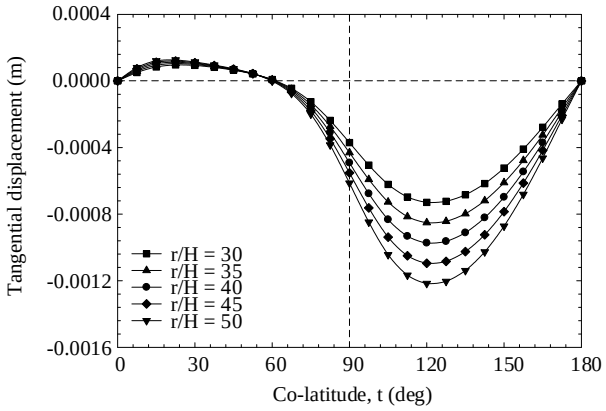
4.1 ค่าการเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงดันภายนอก (p_o) ที่กระทำต่อโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

4.2 ถ้าความยาวรัศมีหน้าตัด (r) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้พื้นที่ผิวในการรับแรงดันภายนอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการเสียรูปมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

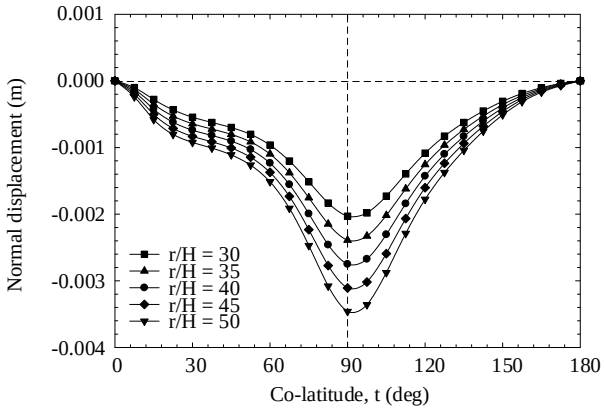
4.3 ค่าความหนาของโครงสร้าง (H) จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง นั่นคือเมื่อความหนาของโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการเสียรูปมีค่าลดลง

4.4 ค่าความยาวรัศมีการดัด (R) เป็นพารามิเตอร์เฉพาะสำหรับโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง ดังนั้นเมื่ออัตราส่วน R/H มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการเสียรูปมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับกรณีการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน r/H นั่นเอง

4.5 ผลการศึกษาการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน R/r, r/H และ R/H จะเป็นแนวทางในการกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นสำหรับการออกแบบเพื่อให้ได้โครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ทุกตัวส่งผลต่อการเสียรูปขนาดใหญ่ของโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยางนั่นเอง

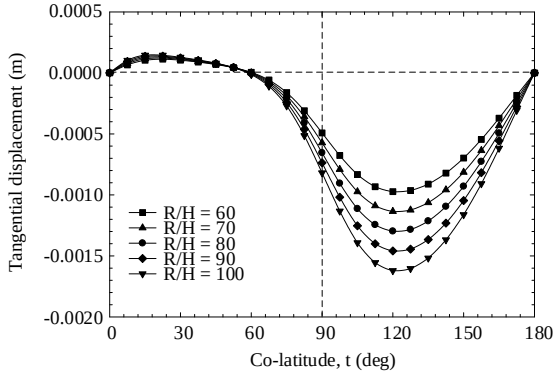


(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน

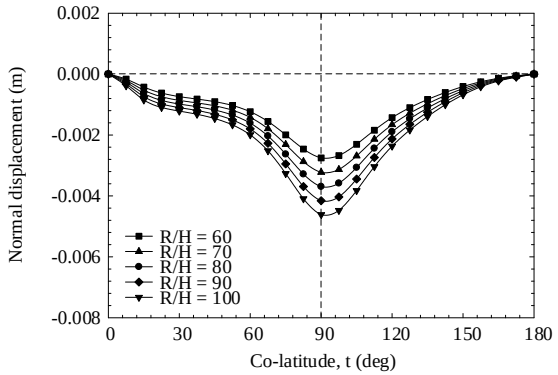


(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

รูปที่ 7 ผลของการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีหน้าตัดต่อความหนาที่มีต่อโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง



(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน



(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

รูปที่ 8 ผลของการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีการดัดต่อความหนาที่มีต่อโครงสร้างโดมรูปทรงห่วงยาง

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตามสัญญาเลขที่ NKR2566INC045

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Pai PF, Young LG. Fully nonlinear modeling and analysis of precision membranes. International Journal of Computational Engineering Science. 2003;4(1):19-65.

[2] Zhan HJ, Redekop D. Static and dynamic loading of an ovaloid toroidal tank. Thin-Walled Structures. 2009;47(6-7):760-7.

[3] Tangbanjongkij C, Chucheepsakul S, Pulngern T, Jiammeepreecha W. Analytical and numerical approaches for stress and displacement components of pressurized elliptic toroidal vessels. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2022; 199:104675.

[4] Clark RA. On the theory of thin elastic toroidal shells. Journal of Mathematics and Physics. 1950; 29(1-4):146-78.

[5] Jordan PF. Stresses and deformations of the thin-walled pressurized torus. Journal of the Aerospace Sciences. 1962; 29(2):213-25.

[6] SANDERS JR JL, LIEPINS AA. Toroidal membrane under internal pressure. AIAA Journal. 1963; 1(9):2105-10.

[7] Sun B. Closed-form solution of axisymmetric slender elastic toroidal shells. Journal of Engineering Mechanics. 2010; 136(10): 1281-8.

[8] Jiammeepreecha W, Chucheepsakul S. Nonlinear static analysis of an underwater elastic semi-toroidal shell. Thin-Walled Structures. 2017; 116:12-8.

[9] Jiammeepreecha W, Suebsuk J, Chucheepsakul S. Nonlinear static analysis of liquid-containment toroidal shell under hydrostatic pressure. Journal of Structural Engineering. 2020 ; 146(1):04019169.

[10] Jiammeepreecha W, Chaidachatorn K, Chucheepsakul S. Nonlinear static response of an underwater elastic toroidal storage container. International Journal of Solids and Structures. 2021; 228:111134.

[11] Tangbanjongkij C, Chucheepsakul S, Pulngern T, Jiammeepreecha W. Axisymmetric buckling analysis of submerged hemi-elliptic toroidal shells. Thin-Walled Structures. 2023 ; 183:110383.

[12] Langhaar HL. Foundations of practical shell analysis. Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois; 1964.
[13] Langhaar HL. Energy methods in applied mechanics. Courier Dover Publications. 2016.
[14] Cook RD. Concepts and applications of finite element analysis. John wiley & sons; 2007.
[15] ABAQUS US, Manual SU. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen. Inc V5. 2005; 8.

การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการก่อสร้างและบำรุงรักษางานทาง

Unmanned Aerial Vehicle Surveying for Roads Construction and Maintenance

ประดิษฐ์ เจียรกุลประเสริฐ[1], ชาคริต ชูวุฒยากร[1*], ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง[1]

[1] สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Pradit Jiagulprasert[1], Chakrit Choovuthayakorn[1*], Thitibhorn Phantachang[1]

[1]Division of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology
128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: Chakrit@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-8253-9099

Received: 11 July 2023, Revised: 27 August 2023, Accepted: 18 September 2023

บทคัดย่อ

บทความได้ประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อรังวัดปริมาตรงานทางหรืองานถนนจากภาพถ่าย เพื่อคำนวณปริมาตรงานดินคันทาง โดยประมวลผลจากพื้นผิวถึงพื้นผิวและเปรียบเทียบค่าจากแบบจำลองระดับพื้นผิว ที่ได้จากการสำรวจด้วยกล้องสำรวจชนิดสถานีรวม (Total Station) โดยภาพถ่ายทางอากาศจุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 5 จุด ณ พื้นที่วิจัยในจังหวัดลำปาง โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม กำหนดตำแหน่งของหมุดควบคุม ในระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ และการบินด้วย อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) เพื่อถ่ายภาพ ได้ใช้การบินรูปแบบกริดที่ระดับความสูง 131 เมตร เหนือภูมิประเทศ ด้วยระยะระหว่างจุดศูนย์กลางจุดภาพบนพื้นดินเท่ากับ 3.60 ซม.ต่อพิกเซล กำหนดการซ้อนทับกันของภาพถ่ายทางด้านหน้าและด้านข้างเท่ากับร้อยละ 85 และ 75 ตามลำดับ ภาพถ่ายจำนวน 35 ภาพ ผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบภาพถ่ายความคลาดเคลื่อนในแกน X Y Z มีค่าเท่ากับ 6.787 4.023 และ 5.048 ซม. ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนทางแนวราบและแนวดิ่งที่ได้กับมาตรฐาน ASPRS, 2014 มีระดับชั้นความแม่นยำในแนวราบในชั้นคุณภาพ 12.5 ซม. มีระดับชั้นความแม่นยำแนวดิ่ง กรณีมีพืชปกคลุม เท่ากับ 20 ซม. การคำนวณปริมาตรดินจากอากาศยานไร้คนขับและกล้องสำรวจชนิดสถานีรวม มีปริมาตรเท่ากับ 570.7 ลบ.ม. และ 620.5 ลบ.ม. ตามลำดับ ค่าความแตกต่างปริมาตรดินจากอากาศยานไร้คนขับน้อยกว่าการสำรวจด้วยกล้องสำรวจชนิดสถานีรวม 49.8 ลบ.ม. หรือร้อยละ 8 ผลการศึกษาที่ได้ จะเป็นแนวทางในการพัฒนาใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อการคำนวณปริมาณงานทาง เพื่อการควบคุมงานก่อสร้างและการบำรุงรักษางานทาง

คำสำคัญ อากาศยานไร้คนขับ ยูเอวี ถนน งานบำรุงรักษา รังวัดปริมาตร

Abstract

This article studies the application of unmanned aerial vehicles (UAVs) for measuring earthwork volume by using the surface-to-surface method. It compares embankment volume between total station survey and UAV. The aerial photographs are controlled using Ground Control Points (GCPs), with a total of 5 points. The GCPs are measured using a Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver in a Network Real-Time Kinematic (RTK) system. The study area is a local road in Lampang Province. The flying heights were 131 meters above the terrain with total of 35 images at average ground sampling distance (GSD) about 3.60 cm per pixel. Frontal and

side overlap settings were at 85% and 75% respectively. The positional accuracy of the aerial photographs acquired by the UAV is compared to the check points, and the displacements in the X, Y, and Z axes are found to be 6.787 4.023 and 5.048 cm. respectively. The horizontal and vertical positional accuracies are evaluated against the ASPRS standards. The horizontal accuracy is within the class 12.5 cm, and the vertical accuracy is within the class 20 cm for vegetated areas. The earth volume calculation is performed using the Earthwork Reports method, employing the Surface-to-Surface calculation approach. The calculated earth volumes from the surveying camera and aerial photographs are determined to be 620.5 cu.m. and 570.7 cu.m. respectively, resulting in a difference of 49.8 cubic meters or approximately 8%. This study shows the application of unmanned aerial vehicles and GNSS-Based DEMs for evaluating earthwork volume which can be applied road construction and maintenance works.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, UAV, Roads, Earthworks, Measurement

1. บทนำ

เทคโนโลยีด้านการสำรวจปัจจุบันได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว ทั้งในด้านความละเอียดและเทคโนโลยีของกล้องสำรวจ รวมถึงการใช้เทคโนโลยีดาวเทียม Global Navigation Satellite Systems (GNSSs) และ Robotic Total Station เพื่อให้การสำรวจมีความรวดเร็วและความละเอียดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้งานสำรวจที่ต้องใช้เวลาในการดำเนินการรวมถึงเครื่องมือสำรวจคุณภาพสูง และผู้มีความชำนาญในการวิเคราะห์ ดังนั้นวิธีการที่เป็นกึ่งอัตโนมัติ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทันสมัยในปัจจุบันร่วมกับโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณ เพื่อให้ได้งานสำรวจที่มีความรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ในปัจจุบันมีประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก ที่มีการติดตั้งกล้องบันทึกภาพที่มีการพัฒนากล้อง RGB ที่เป็นแบบ Multi-Spectral จนถึงพัฒนาไปเป็นกล้องแบบเลเซอร์ติดเครื่องบิน (Light Detection and Ranging, LIDAR) และพัฒนาแอพพลิเคชั่นหรือโปรแกรมประยุกต์เพื่อใช้ในการวางแผนการบินบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้ผู้สนใจสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีได้ง่าย สำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธา การสำรวจมีบทบาทเพื่อวางแผนงานก่อสร้าง การติดตามความก้าวหน้างานก่อสร้างอาคาร การคำนวณปริมาณของวัสดุ เช่น เหมืองแร่และหิน การสำรวจเพื่องานก่อสร้าง เขื่อน และอ่างเก็บน้ำ งานท่อส่งแก๊สและน้ำมัน เป็นต้น [1] กล่าวได้ว่า การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ มีบทบาทอย่างสูงในการสำรวจแผนที่ภูมิประเทศในพื้นที่กว้างหรือเฉพาะจุด เพราะลดระยะเวลาการทำงาน ลดข้อจำกัดในการสำรวจที่สูง ลดต้นทุน ข้อมูลมีความละเอียดและมีความน่าเชื่อถือ มีความยืดหยุ่นในการสำรวจ สามารถสร้าง Orthophoto Mosaic, Point Clouds และภาพรูปแบบสามมิติได้ [2] แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพของงานภาพถ่าย และต้องมีการตรวจสอบความถูกต้อง เพื่อกำหนดแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการสำรวจงานทางให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานนั้น ๆ ได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ประยุกต์การใช้งานอากาศยานไร้คนขับในงานด้านวิศวกรรมโยธา อาทิ เช่น พัฒนาการใช้งานอากาศยานไร้คนขับ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โปรแกรมประยุกต์ที่ใช้วิเคราะห์ รวมถึงการเอาไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาในรูปแบบต่าง ๆ เช่น งานทาง การขนส่ง เป็นต้น [3] การวิจัยที่นำอากาศยานไร้คนขับเพื่องานก่อสร้างและบำรุงรักษางานทาง โดย Inzerillo L. et al. [4] ศึกษาการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ ตรวจสอบความเสียหายของผิวทางแล้วทำการประเมินผลจากภาพถ่าย เพื่อการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงผิวทาง Julge k. et al [5] ใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับในการติดตามความก้าวหน้างานก่อสร้างคันทางสำหรับงานก่อสร้างถนน กิตติคุณ จิตไพโรจน์ และพชร เครือวิทย์ [6] ศึกษาการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อประเมินผลสภาพกายภาพของพื้นผิวจราจรบนสะพาน โดยใช้เทคนิคตรวจสอบความเสียหายด้วยการประเมินผลภาพ ประเมินพื้นที่ที่มีความเสียหาย เพื่อนำไปวางแผนงานการบำรุงรักษา พลปรีชา ชิดบุรี และคณะ [7] ประยุกต์ใช้ อากาศยานไร้คนขับ ในการสำรวจติดตามการ

เคลื่อนพังของลาดไหล่ทางเขื่อนแควน้อย จังหวัดพิษณุโลก สำหรับการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจปริมาณของวัสดุ เช่น ต่อลาภ การปลื้มจิตร และคณะ [8] นำอากาศยานไร้คนขับมาใช้เพื่อการสำรวจรังวัดปริมาตรหินบริเวณเหมืองหินเขาบันไดนางศิลา จังหวัดสงขลา และการศึกษาของกิติพงศ์ ทองเชื้อ และวิษุวัมก์ แต้สมบัติ [9] ทำการสำรวจลำน้ำรูปตัดขวางแม่น้ำลำภาชี ด้วยอากาศยานไร้คนขับ เพื่อหารูปตัดลำน้ำในการวิเคราะห์ทางอุทกวิทยา เป็นต้น จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับมีบทบาทในด้านงานวิศวกรรมโยธาเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในการติดตามความก้าวหน้างานก่อสร้าง เก็บข้อมูลในสนามเพื่อติดตามความก้าวหน้าที่ช่วยให้ประหยัดเวลาการทำงาน และสามารถติดตามความก้าวหน้าซ้ำได้ในช่วงเวลาที่จำกัด มีความถูกต้องในเกณฑ์มาตรฐาน จึงเหมาะสมในการใช้งานสำรวจที่ใช้เพื่อการสำรวจที่ต้องการติดตามการทำงาน รวมทั้งงานซ่อมบำรุง ดูแลรักษา งานโครงสร้างที่ต้องการตรวจสอบดูแล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประยุกต์ใช้ข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวจากภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ แล้วนำไปคำนวณปริมาตรถนนและคันทาง เพื่อการก่อสร้างและบำรุงรักษา โดยประมวลผลจากพื้นผิวถึงพื้นผิวแล้วนำไปเปรียบเทียบการหาปริมาตรของถนนจากแบบจำลองระดับพื้นผิวที่ได้จากการสำรวจด้วยกล้องสำรวจชนิดสถานีรวม เพื่อศึกษาแนวทางการถ่ายภาพ การคำนวณวิเคราะห์ และศึกษาแนวทางในการนำอากาศยานไร้คนขับเพื่อการก่อสร้างและบำรุงรักษางานทางหลวงหรือถนนในท้องถิ่นได้ในอนาคต

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มีการศึกษาข้อกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องและการสำรวจสภาพภูมิประเทศเบื้องต้น เพื่อใช้ในการวางแผนและการจัดเตรียมข้อมูล การใช้เครื่องมือในการสำรวจ และการประมวลผลข้อมูลจากภาคสนาม เพื่อให้ได้ข้อมูลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.2 การวางแผนและการจัดเตรียมข้อมูล

2.2.1 การกำหนดปริมาณงานและการควบคุมคุณภาพงานโดยดำเนินการวิจัยถนนแอสฟัลท์ติกคอนกรีตกว้าง 6 เมตร อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง พื้นที่ได้ใช้เครื่องมือในการสำรวจภูมิประเทศ มีขนาดพื้นที่ 1,200 ตารางเมตร หรือ 0.75 ไร่ โดยใช้เครื่องมือ 2 ประเภท ที่มีความแตกต่างทางด้านเทคโนโลยี จึงต้องมีการกำหนดปริมาณงานและควบคุมคุณภาพงาน โดยระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการสร้างและการใช้ระวางแผนที่ พ.ศ. 2547 และจากข้อกำหนดมาตรฐานความถูกต้องเชิงตัวเลข (Digital Map) โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานของ ASPRS ปี ค.ศ. 2014 ด้วยพื้นที่สำรวจมีขนาดพื้นที่ น้อยกว่า 1 ไร่ จากระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการสร้างและการใช้ระวางแผนที่ พ.ศ. 2547 [10] ได้กำหนดเกณฑ์การเลือกใช้มาตราส่วนคือ 1:500 การควบคุมคุณภาพงานภาพถ่ายทางอากาศ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASPRS ปี ค.ศ. 2014 ด้วยมาตราส่วน 1:500 [11] ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วน และ Ground Sample Distance (GSD) คือ มาตราส่วนของแผนที่ 1:500 มีค่า GSD เท่ากับ 6.30 ซม/pixel (รูปที่ 1)

2.2.2 การกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) และจุดตรวจสอบภาพถ่าย (CP) จากการสำรวจสภาพภูมิประเทศเบื้องต้น และตามมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม [12] ได้กำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 5 จุด มีการจัดวางตำแหน่งบริเวณมุมและกึ่งกลางของพื้นที่สำรวจ และจุดตรวจสอบภาพถ่าย จำนวน 6 จุด เพื่อดูการกระจายของความผิด โดยแบ่งเป็นบริเวณผิวทางจำนวน 2 จุด และบริเวณไหล่ทางด้านละ 2 จุด

2.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือสำรวจ สำหรับหาสภาพพื้นผิวของพื้นที่ ประกอบด้วยเครื่องมือดังต่อไปนี้

2.3.1 กล้องสำรวจสถานีรวม (Total Station) ยี่ห้อ NIKON รุ่น DTM-352 คุณสมบัติ ความยาวส่องเล็ง 158 มม. กำลังขยาย 33 เท่า ระยะโฟกัสใกล้สุด 1.3 ม. ค่าความถูกต้อง ±(3+2ppmXD) mm. (รูปที่ 2)

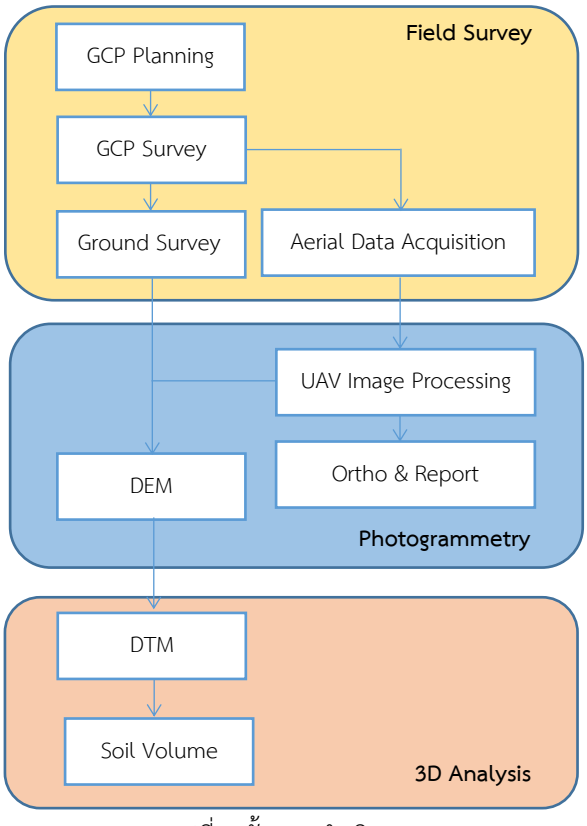
2.3.2 อากาศยานไร้คนขับ แบบปีกหมุน ยี่ห้อ ดีเจไอรุ่น Phantom 4 Pro คุณสมบัติ เซนเซอร์กล้องขนาด 1 นิ้ว ความละเอียดของจุดภาพ 20 ล้านจุดภาพ สำหรับการถ่ายภาพทางอากาศ เพื่อใช้ประมวลผล (รูปที่ 3)

รูปที่ 1 พื้นที่วิจัยและผังการกำหนดหมุดสำรวจในสนาม

รูปที่ 2 กล้องสำรวจสถานีรวม (Total Station)

รูปที่ 3 อากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนDJI-Phantom 4 Pro

รูปที่ 4 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS-Trimble (R8s)



รูปที่ 5 ขั้นตอนดำเนินงาน

รูปที่ 6 การใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ใน ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียบแบบจลน์ (RTK) ในการรังวัดค่าพิกัดหมุดควบคุม

2.3.3 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ยี่ห้อ Trimble รุ่น R8s คุณสมบัติความคลาดเคลื่อนในการสำรวจด้วยระบบ Network RTK ค่าพิกัดทางราบ 8mm+0.5ppm RMS และค่าระดับ 15mm+0.5ppm RMS ในการรังวัดค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) และจุดตรวจสอบภาพถ่าย (CP) (รูปที่ 4)

2.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.4.1 การรังวัดภาคสนาม ประกอบด้วย การรังวัดหมุดควบคุมและหมุดตรวจสอบ การสำรวจภูมิประเทศด้วยกล้องสำรวจ และการบินถ่ายภาพทางอากาศ เพื่อหาค่าพิกัดของหมุดควบคุม หมุดตรวจสอบ และสภาพภูมิประเทศของพื้นที่วิจัย โดยใช้เครื่องมือในการสำรวจที่แตกต่างกัน ซึ่งแบ่งออกเป็นขั้นตอน ดังรูปที่ 5

1. การรังวัดหมุดควบคุม หลังจากการวางแผนการกำหนดหมุดควบคุม ตามสภาพของพื้นที่ โดยไม่มีอุปสรรคในการรับสัญญาณดาวเทียมและการวางบนพื้นที่ราบ โดยการวิจัยครั้งนี้มีหมุดควบคุม จำนวน 5 จุด ได้รังวัดโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในระบบ Network RTK ดังรูปที่ 6 โดยมีค่าพิกัดทางราบและทางดิ่ง ในระบบพิกัด UTM Zone47N WGS84

2. การสำรวจภูมิประเทศด้วยกล้องสำรวจเป็นการสำรวจภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษาด้วยกล้องสำรวจชนิดสถานีรวม กำหนดจุดสำรวจภูมิประเทศเป็นแบบกริด แต่ละจุดที่สำรวจจะมีระยะห่าง 2 ม. ครอบคลุมพื้นที่ กว้าง 12 ม. ยาว 100 ม. มีการตั้งกล้องจำนวน 4 ครั้ง และมีหมุดฐานสำหรับออกงานอยู่จำนวน 4 จุด รวมจำนวนจุดสำรวจจำนวน 360 จุด (รูปที่ 7)

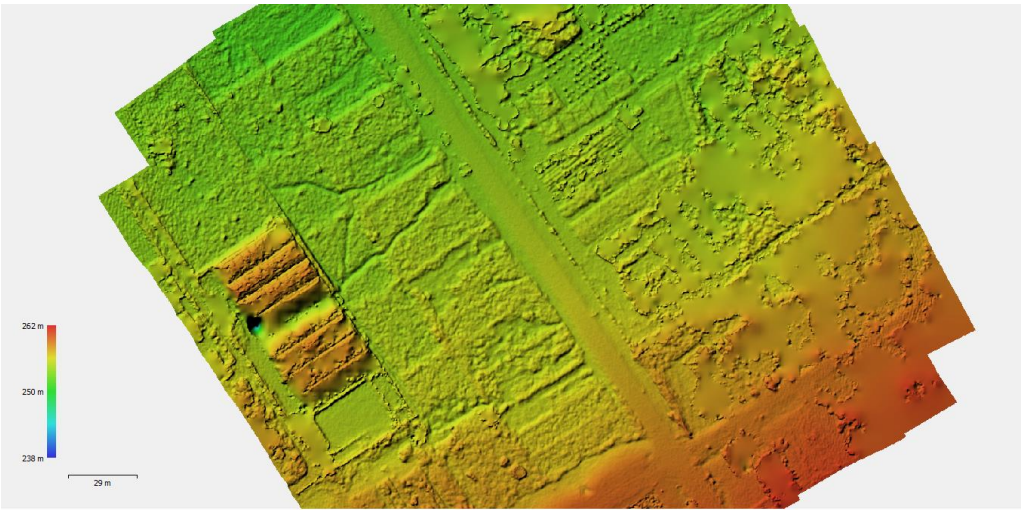
3. การบินถ่ายภาพทางอากาศ ขั้นตอนการบินถ่ายภาพทางอากาศ มีการเก็บข้อมูลโดยอากาศยานไร้คนขับรุ่น Dji Phantom 4 pro โดยใช้โปรแกรม Pix4DCapture เป็นการบินในรูปแบบกริดด้วยความสูง 131 ม. ด้วย GSD เท่ากับ 3.60 ซม./พิกเซล กำหนดการซ้อนทับกันของภาพถ่ายทางด้านหน้าและด้านข้างเท่ากับ 85 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [12] ภาพถ่ายที่ได้มีจำนวน 35 ภาพ

2.4.2 การประมวลผลผลภาพถ่ายทางอากาศ ขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับใช้โปรแกรม Agisoft Metashape Professional โดยมีลำดับการทำงาน คือ การนำข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเข้าสู่โปรแกรม แล้วทำการจัดเรียงรูปภาพ (Align Photos) การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเลนส์กล้องถ่ายภาพ (Optimize Camera) และการสร้าง Marker ไว้บนจุด GCP และ CP แล้วสร้าง Dense Cloud แสดงถึงกลุ่มจุดสามมิติ ในพิกัดฉากสามมิติ (X Y Z) และแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model: DEM) เฉพาะส่วนที่เป็นพื้นดินตามที่โปรแกรมสามารถแยกประเภท ผลการประมวลผลเป็นไปดังรูปที่ 8

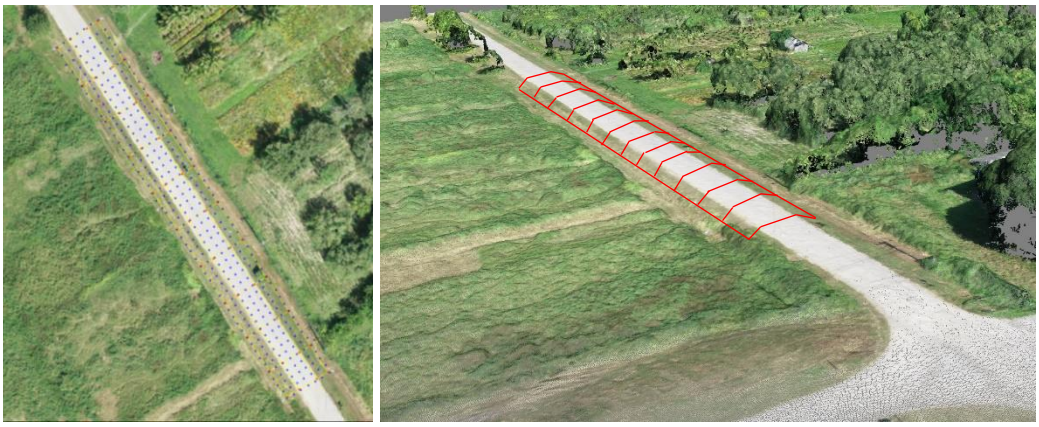
2.4.3 ประมวลผลปริมาตรดิน จากการสำรวจด้วยกล้องสำรวจ และภาพถ่ายทางอากาศ ขั้นตอนการหาปริมาตรดินจากการสำรวจทั้งสองประเภท จะนำเข้าข้อมูล DEM สู่โปรแกรม Terramodel ทีละข้อมูล ข้อมูลที่นำเข้าจะเป็น Text File ใน Layer ชื่อว่า “Point” ที่ระบุค่า X Y Z (E N Z) มีขนาด Pixel ทุกระยะ 2 เมตร สร้างแบบจำลองลักษณะภูมิประเทศ (Digital Terrain Model: DTM) จากข้อมูลที่ได้จากกล้องสำรวจและจากภาพถ่ายทางอากาศ จากนั้นสร้างพื้นผิวจำลองด้วย Layer ชื่อว่า “BOUNDARY” ซึ่งแบ่งพื้นที่ออกเป็นสามส่วน ประกอบด้วย ส่วนด้านซ้าย ส่วนตรงกลาง และส่วนด้านขวา เพื่อแยกตามชนิดของพื้นผิวที่ปรากฏด้วยสายตา โดยที่ส่วนตรงกลางคือส่วนที่เป็นพื้นผิวจราจร ที่มีความกว้างประมาณ 5 ม. ส่วนด้านซ้ายและด้านขวาเป็นส่วนไหล่ทางที่มีหญ้าขึ้นปกคลุม ดังรูปที่ 9

ค่าระดับที่กำหนดในพื้นผิวจำลอง กรณีข้อมูลจากกล้องสำรวจจะใช้ค่าระดับที่ได้จากการประมวลผล ส่วนกรณีข้อมูลที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศ จะใช้ค่าที่ได้จากประมวลผลลบด้วยความสูงของหญ้าที่ความสูง 10 ซม. เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่จริง ซึ่งภาพสามมิติแสดงพื้นผิวที่ได้จากการสำรวจและพื้นผิวจำลองแสดงดังรูปที่ 10 จากนั้นจะทำการคำนวณปริมาตรดิน ด้วยคำสั่ง Earthwork Reports โดยกำหนดวิธีการคิดคือให้คิดแบบ Surface to Surface หรือพื้นผิวถึงพื้นผิว โดยแบ่งการคำนวณปริมาตรแยกเป็นโซน ประกอบด้วย 12 โซน ผลที่ได้จะออกมาในรูปแบบ Text File ที่ระบุ ปริมาตรดินขุด (Excavation Volume) และปริมาตรดินถม (Fill Volume)

รูปที่ 7 รังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบภาพถ่าย



รูปที่ 8 แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model: DEM) จากการประมวลผลด้วยภาพถ่ายทางอากาศ



รูปที่ 9 การนำเข้าข้อมูล DEM สู่โปรแกรม และการแบ่งพื้นที่ คำนวณปริมาตร จำนวน 12 โซน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวจากภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ รังวัดปริมาตรงานดิน จากการประมวลผลด้วยภาพถ่ายทางอากาศ ได้ผลลัพธ์เป็นกลุ่มของจุดสามมิติที่เก็บค่าของพื้นผิวพื้นที่วิจัย ในพิกัดฉาก (X Y Z) ดังรูปที่ 10 ซึ่งมาพร้อมกับค่าสีของพื้นผิวพื้นที่วิจัย โดยสามารถส่งออกข้อมูลเป็นแบบจำลองความสูงต่ำของพื้นที่ (DEM) ที่ความละเอียดต่ำสุด คือ 0.13 ซม. ทั้งนี้ได้ส่งออกข้อมูลเพื่อทำการประมวลผล ด้วยความละเอียด เท่ากับ 2 ม. เพื่อมีค่าใกล้เคียงกับการสำรวจด้วยกล้องสำรวจ

ผลของการสร้างภาพสามมิติ ความสูงต่ำของพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 11 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเมื่อเปรียบเทียบกับจุดควบคุมภาพถ่าย ความคลาดเคลื่อนในแกน X Y Z มีค่าเท่ากับ 1.184 2.119 2.030 ซม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ

เปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบภาพถ่าย ความคลาดเคลื่อนในแกน X Y Z มีค่าเท่ากับ 6.787 4.023 5.048 ซม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับชุดตรวจสอบภาพถ่ายออร์โธ มีค่า RMSE เท่ากับ 9.212 ซม.และมีค่าความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งในทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 15.944 ซม.และพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลมีค่า RMSE ทางดิ่งเท่ากับ 19.137 ซม. และมีค่าความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งในแนวดิ่งที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ 37.509 ซม. ดังตารางที่ 3

ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนทางแนวราบที่ได้กับมาตรฐาน ASPRS 2014 เมื่อนำค่า RMSEx RMSEy และ RMSEr มาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดความถูกต้องสูงสุดในมาตรฐาน ASPRS 2014 ในชั้นคุณภาพ 12.5 พบว่าภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายภาพมีความถูกต้องตามมาตรฐานและสามารถเทียบเท่ากับระดับงานชั้นที่ 1 ตามมาตรฐาน ASPRS, 1990

ผลการเปรียบเทียบผลการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนทางแนวดิ่งที่ได้กับมาตรฐาน ASPRS 2014 ค่าความต่างของช่วงชั้นความสูงที่ทำการสำรวจจากภาคสนามระหว่างจุดที่สูงที่สุดและจุดที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.347 ม. ในการทำงานสามารถยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 5% จากค่าความต่างของช่วงชั้นความสูงดังนั้นจึงสามารถยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 16.735 ซม. สามารถเทียบเท่ากับชั้นคุณภาพทางแนวดิ่งในมาตรฐาน ASPRS 2014 ได้ที่ชั้นคุณภาพ X เท่ากับ 20 ซม. ที่ยอมให้มีค่า RMSEz ในพื้นที่ที่ไม่มีพืชปกคลุมอยู่มีค่าสูงสุดไม่เกิน 20 ซม. และระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ไม่เกิน 39.30 ซม. ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลผล RMSEz มีค่าเท่ากับ 19.137 ซม. และมีค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ที่ 37.51 ซม. ในตารางที่ 4

3.2 ผลเปรียบเทียบการหาปริมาตรดิน จากแบบจำลองระดับพื้นผิว ที่ได้จากการสำรวจด้วยกล้องสำรวจ กับภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

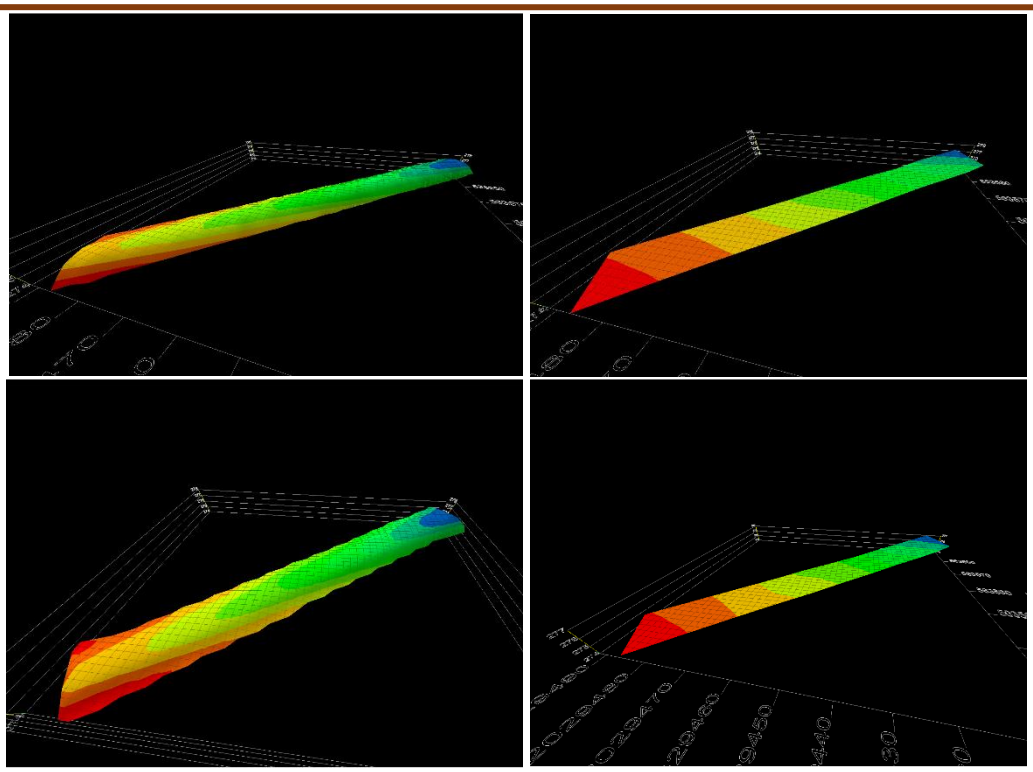
การคำนวณหาปริมาตรดินด้วยคำสั่ง Earthwork Reports โดยกำหนดวิธีการคำนวณ คือใช้การคำนวณแบบ Surface to Surface โดยพื้นผิวแรกเป็นค่าระดับจากการสำรวจหรือจากภาพถ่ายทางอากาศ และพื้นผิวที่สองคือค่าระดับที่ฐานคันดิน ผลลัพธ์จากการประมวลผล (รูปที่ 11)

ผลการคำนวณปริมาตรดิน ด้วยคำสั่ง Earthwork Reports ในโปรแกรม Terramodel โดยกำหนดวิธีการคิดคือให้คิดแบบ Surface to Surface ได้ผลลัพธ์ปริมาตรดินจากการสำรวจด้วยกล้องและจากภาพถ่ายทางอากาศ เท่ากับ 620.5 ลบ.ม. และ 570.7 ลบ.ม. ตามลำดับ มีความแตกต่างปริมาตรดินเท่ากับ 49.8 ลบ.ม. หรือคิดเป็น 8%

4. บทสรุป

4.1 การใช้อากาศยานไร้คนขับสร้างแบบจำลองพื้นผิวจากภาพถ่าย เพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงตรวจสอบงานทาง งานถนน โดยใช้กรณีศึกษา คือ ถนนแอสฟัลท์ติกคอนกรีตกว้าง 6 ม. อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง มีพื้นที่ทำการวิจัยขนาด 0.75 ไร่ บินถ่ายภาพที่ความสูง 131 ม. ด้วย GSD เท่ากับ 3.60 ซม./พิกเซล จำนวน 35 ภาพ รังวัดและประมวลผลภาพถ่ายร่วมกับการกำหนดจุดควบคุมทางราบ (GCP) จำนวน 5 จุด ผลการทดสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ของภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบภาพถ่าย มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแกน X Y Z เท่ากับ 6.783 -4.023 5.048 ซม. ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางแนวราบและแนวดิ่งที่ได้กับมาตรฐาน ASPRS 2014 มีระดับชั้นความแม่นยำในแนวราบ ในชั้นคุณภาพ 12.5 ซม. ผลการเปรียบเทียบผลการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนทางแนวดิ่ง มีระดับชั้นความแม่นยำแนวดิ่ง กรณีมีพืชปกคลุม เท่ากับ 20 ซม.

4.2 การคำนวณปริมาตรดิน สำหรับกรณีนี้พื้นที่วิจัยมีลักษณะเป็นคันดิน ผิวจราจรเป็นแอสฟัลท์มีหญ้าขึ้นปกคลุมไหล่ทาง พบว่าปริมาตรดินที่ได้จากการสำรวจด้วยกล้องสำรวจและจากภาพถ่ายทางอากาศ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 8% จากการสำรวจในสนาม สามารถสรุปได้ว่า การใช้ภาพถ่ายทางอากาศสร้างแบบจำลองสภาพภูมิประเทศเพื่อหาปริมาตรดินคันทาง สามารถทดแทนการสำรวจด้วยกล้องสำรวจได้ แต่ทั้งนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความถูกต้องของระดับพื้นดินที่แท้จริงในพื้นที่ที่มีหญ้าขึ้นปกคลุม ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของข้อมูลควรมีการลดระดับจุดความสูงต่ำของพื้นที่จำลองที่นำมาคิดปริมาตรดินลงไปตามความสูงโดยเฉลี่ยของหญ้าที่ขึ้นปกคลุมเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 10 ภาพสามมิติแสดงพื้นผิวที่ได้จากการสำรวจด้วยกล้องสำรวจและจากการประมวลด้วยภาพถ่ายทางอากาศ และพื้นผิวจำลองสำหรับคิดปริมาตรดิน

ตารางที่ 1 การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเมื่อเปรียบเทียบกับจุดควบคุมภาพถ่าย

จุด	ความคลาดเคลื่อนในแกน X (ซม.)	ความคลาดเคลื่อนในแกน Y (ซม.)	ความคลาดเคลื่อนในแกน Z (ซม.)
GCP1	-2.010	-3.216	-1.914
GCP2	1.424	2.572	2.533
GCP3	0.196	1.982	-1.370
GCP4	-0.447	-1.248	2.414
GCP5	0.836	-0.086	-1.677
Total	1.184	2.119	2.030

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบภาพถ่าย

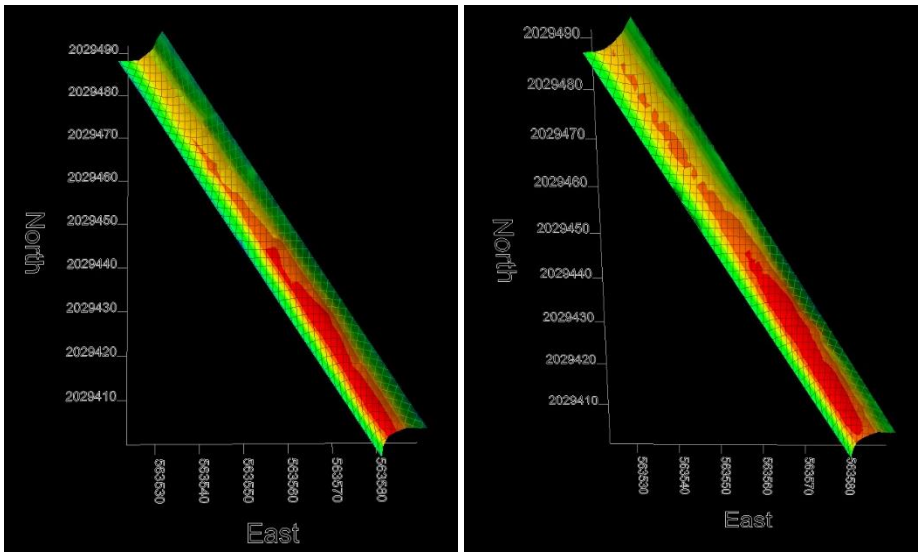
จุด	ความคลาดเคลื่อนในแกน X (ซม.)	ความคลาดเคลื่อนในแกน Y (ซม.)	ความคลาดเคลื่อนในแกน Z (ซม.)
CP1	2.311	-6.274	8.346
CP2	4.654	-9.397	11.270
CP3	9.433	-0.709	4.961
CP4	6.877	-5.540	37.495
CP5	5.532	1.342	-21.594
CP6	11.915	-3.561	-10.192
จำนวนของจุดตรวจสอบภาพ	6	6	6
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (ซม.)	6.787	-4.023	5.048

ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายที่ได้จาก UAV เปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบภาพถ่าย

จุด	ความคลาดเคลื่อนในแกน X (ซม.)	ความคลาดเคลื่อนในแกน Y (ซม.)	ความคลาดเคลื่อนในแกน Z (ซม.)
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ซม.)	3.448	3.905	20.221
RMSE (ซม.)	7.481	5.375	19.137
$RMSE_R$ (ซม.)	9.212	$\sqrt{RMSEx^2+RMSEy^2}$	
NSSDA ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในแนวราบ	15.944	RMSEr x 1.7308	
NSSDA ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในแนวดิ่ง	37.509	RMSEz x 1.9600	

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนทางแนวดิ่งที่ได้กับมาตรฐาน ASPRS, 2014

ระดับชั้นความแม่นยำในแนวดิ่ง (ซม.)	ความแม่นยำแน่นอน	
	RMSEz ไม่มีพืชปกคลุม (ซม.)	ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%ในแนวดิ่ง (มีพืชปกคลุม) (ซม.)
X (ซม.)	≤ X	≤ 1.96 x X
20	20	39.3
ค่าที่ได้จากการคำนวณ	19.137	37.51



รูปที่ 11 การวิเคราะห์ในสามมิติเปรียบเทียบผลต่างปริมาตรดินจากการสำรวจและ UAV

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณอาจารย์เอกชัย กิตติวรากูลและคุณวิชชุ อาหาสิเม ผู้จัดการส่วนบริหารงานที่ดิน ฝ่ายรัฐสัมพันธ์ หนังสืออนุญาตและประทานบัตรบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และคุณปรีชา เสาร์เขียว นายช่างสำรวจอาวุโส สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน และบริษัทคอนเซอร์เทคจำกัด สำหรับคำแนะนำและการสนับสนุนโปรแกรมวิเคราะห์ ขอขอบคุณ ณรงค์ มีโหลง และพิมพิศา มุ่งเจริญ นักศึกษาผู้ช่วยดำเนินงานวิจัย และ Assoc.Prof.Graeme Wend-Walker อนุเคราะห์ตรวจทาน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Otto A, Agatz N, Campbell J, Golden B, Pesch, E. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones. A survey. 2018; 72(4): 411-58.

[2] Skorobogatov G, Barrado C, Salamí E. Multiple UAV systems: A survey. Unmanned Systems. 2020; 8(02):149-69.

[3] Liu P, Chen AY, Huang YN, Han JY, Lai JS, Kang SC, Wu TH, Wen MC, Tsai MH. A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. Smart Struct. Syst. 2014; 13(6):1065-94.

[4] Inzerillo L, Di Mino G, Roberts R. Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. Automation in Construction. 2018; 96:457-69.

[5] Julge K, Ellmann A, Köök R. Unmanned aerial vehicle surveying for monitoring road construction earthworks. The baltic journal of road and bridge engineering. 2019; 14(1):1-7.

[6] Jitpairod A, Kruavit P. A study of image processing technique by using an unmanned aerial vehicle for wearing surface assessment. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering. 2023; STR53-1. Thai.

[7] Chidburi P, Nusid K, Wisitticade T, Sarathongmao T, Thongkhumyard S, Kernmanee P. The application of UAV photogrammetry to monitor the deformation of side-slope protection: A case study of Khwae Noi Bamrungdan Dam, Phitsanulok Province. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering. 2023; SGI11-1. Thai.

[8] Kranpleumjit T, Chantongpoon J, Keawtong N. Applications of Unmanned Aerial Vehicle for Quarry Mapping Case study Phet Muang Lei Crashing Plant. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering.2023; SGI01-8. Thai.

[9] Wisuwat T. A river cross section survey by UAV photogrammetry in Lam Pa Chi River, Kanchanaburi Province. Rajamangala University of Technology Srivijaya Research J. 2022; 14(2): 465-84. Thai.

[10] Regulation of Department of land for build and use aerial photo maps (2547BE). 2004. Thai.

[11] Smith DL, Abdullah QA, Maune D, Heidemann KH. New ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data 2014.

[12] Subcommittees of UAV standard for engineering project. UAV Standard for Engineering Project. No.012033-22. 2022.

ผลกระทบของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง

Effect of the Angle between Steel Fiber Orientation and Failure Plane on Compressive and Flexural Strengths of Self-Compacting Mortars

พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล[1] ทศพร ประเสริฐศรี[2] ธีระธัญ เสริมการดี[3] ปวริศร์ วัฒนสุนทรศิลป์[3]
พีทชญา ชมภูพล[3] อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ[4] และชิษณุพงศ์ สุธัมมะ[5*]
[1]กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
[3]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตศรีราชา ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230
[4]กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230
[5]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140
Ponpan Setpittayakul[1] Tosporn Prasertsri[2] Teeratan Sermkandee[3] Pavarit Vattanasoontronsil[3]
Peetchaya Chomphoophol[3] Anuwat Attachaiyawuth[4] and Chisanuphong Suthumma[5*]
[1]The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha,
Kasetsart University Sriracha Campus Tung Sukla, Sri Racha, Chon Buri, 20230
[2]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Pathumwan, Pathumwan, Bangkok 10330
[3]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Tung Sukla, Sri Racha, Chon Buri, 20230
[4]The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha,
Kasetsart University Sriracha Campus, Tung Sukla, Sri Racha, Chon Buri, 20230
[5]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: chisanuphong.s@ku.th เบอร์โทรศัพท์ 087-806-4687
Received: 25 January 2023, Revised: 13 August 2023, Accepted: 24 August 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติ (θ_f) ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง ส่วนผสมมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 และ 45 มีอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 40 45 และ 50 เปรียบเทียบปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.8 และ 1.6 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ และศึกษาอิทธิพลของมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยและระนาบวิบัติเท่ากับ 0 30 45 และ 90 องศา ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.8 แต่พบว่ามีกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 1.6 มุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติ (θ_f) เท่ากับ 30 และ 45 องศา ส่งผลให้มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 50-70 เมื่อเปรียบเทียบกับมุม 0 องศา อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังรับแรงดัดลดลงจากค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 20-30 เมื่อค่า θ_f เท่ากับ 90 องศา การเสริมเส้นใยเหล็กในมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจำเป็นต้องพิจารณาปริมาณเส้นใยร่วมกับมุมระหว่างการเรียงตัวและระนาบวิบัติขององค์อาคาร

คำสำคัญ กำลังรับแรงอัด การเรียงตัวเส้นใย กำลังรับแรงดัด มอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง เส้นใยเหล็ก

Abstract

This paper presents effects of the angle between steel fiber orientation and failure plane (θ_f) on compressive strength and flexural strength of self-compacting mortar. Mortar proportions contained water to cement ratio of 35% and 45% with sand to mortar ratio of 40%, 45% and 50%. Fiber quantity of 0.8% and 1.6% by volume of mortar are compared and the influence of the angle between steel fiber orientation and failure plane (θ_f) of 0°, 30°, 45°, and 90° is studied. Research results showed that the compressive strength increased approximately 20% by increasing fiber amount of 0.8%, but it was found that the compressive strength reduced with the increase of steel fiber to 1.6%. The angle between steel fiber orientation and failure plane (θ_f) at 30° and 45°. affected in an increase in flexural strength by an average of 50%-70% when compared to the θ_f of 0°. However, it was found that the compressive strength decreased from the highest value by approximately 20%-30% with the θ_f of 90°. The most efficient reinforcing steel fiber in self-compacting mortar requires a consideration of fiber content, fiber orientation, and failure plane.

Keywords: Compressive strength, Fiber orientation, Flexural strength, Self-compacting mortar, Steel fibers

1. บทนำ

การเสริมเส้นใยเหล็กถือเป็นวิธีที่ช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงดึงและแรงเฉือนของคอนกรีตได้เป็นอย่างดีและลดโอกาสเกิดการวิบัติแบบเปราะของคอนกรีตได้ [1-2] เส้นใยเหล็กที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังสามารถหาซื้อได้จากภาคอุตสาหกรรม [3-4] งานวิจัยที่ผ่านมาได้พิจารณาเลือกใช้การเสริมเส้นใยเหล็กเพื่อปรับปรุงสมบัติการรับแรงอัด [5-8] การรับแรงดึง [5-6] การรับแรงดัด [6-8] การรับแรงเฉือน [9-10] และการรับแรงกระแทกเนื่องจากกระสุนปืน [11-12] นอกจากการเสริมเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติวัสดุของคอนกรีตแล้วนั้น อีกทางหนึ่งสามารถพิจารณาเลือกใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงเพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกในการก่อสร้างได้ เพิ่มความกำลังรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ตลอดจนเพิ่มความคงทนของโครงสร้างได้เช่นเดียวกัน และคอนกรีตประเภทหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) ในอดีตมีการพัฒนาคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองเพื่อเพิ่มคุณภาพโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากบางครั้งผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถเทคอนกรีตให้มีความอัดแน่นที่ดีได้ [13-14] ในช่วง 7 ปีที่ผ่านมาได้มีการเสนอวิธีการเพิ่มความสามารถอัดแน่นด้วยตัวเองของคอนกรีตโดยการขจัดฟองอากาศขนาดใหญ่และกักฟองอากาศขนาดเล็กผ่านการใช้

สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Agent) ร่วมกับสารขจัดฟองอากาศ (Defoaming Agent) ในปริมาณที่เหมาะสม การผสมคอนกรีตด้วยวิธีพิเศษ ตลอดจนการปรับปริมาณสารผสมเพิ่ม ถือเป็นแนวทางการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองตามที่เสนอไว้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [15-24] ในที่นี้สามารถพิจารณาได้ว่าการประยุกต์คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กถือเป็นแนวทางในการรวบรวมข้อดีของการใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูงร่วมกับการเพิ่มประสิทธิภาพการรับกำลังของโครงสร้าง

แนวคิดในข้างต้นได้รับการศึกษาผ่านงานวิจัยเชิงทดสอบที่มีการนำคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองมาจัดเตรียมเป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กและเส้นใยเหล็กในขนาดเท่าโครงสร้างจริง [25-29] ถึงแม้ว่าการเสริมเส้นใยเหล็กจะลดความสามารถในการทำงานได้และความสามารถไหลได้ของคอนกรีตสด [25] แต่กำลังต้านทานแรงดัดของตัวอย่างทดสอบกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [25-26] เส้นใยเหล็กช่วยลดความกว้างรอยร้าวและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานได้ ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานมีค่าสูงขึ้น [27] นอกจากนี้ การเสริมเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดในตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กกล่องได้เช่นเดียวกัน [28] ในกรณีตัวอย่างทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีการเสริมเหล็กและเส้นใยเหล็ก พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเจาะทะลุและความสามารถต้านทานการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นในกรณีที่มีการเสริมเส้นใยเหล็ก [29] งานวิจัยเชิงทดสอบอื่นได้ทำการยืนยันแนวคิดการเสริมเส้นใยในคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองจากการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ประเภทและรูปทรงของเส้นใย การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษวัสดุเหลือใช้ และการปรับสัดส่วนของสารผสมเพิ่ม โดยที่ผลการศึกษาของทุกงานวิจัยบ่งชี้ว่าการเสริมเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดได้ดี [30-35]

จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตและพิจารณาช่องว่างในการวิจัยตามที่ได้กล่าวมา พบว่าการจัดเรียงทิศทางของเส้นใยเหล็กถือเป็นตัวแปรที่ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย คณะผู้วิจัยจึงสนใจดำเนินการทดสอบเพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยเหล็กและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเอง นอกจากนี้ ปริมาณการใช้ทรายและสารลดน้ำพิเศษจัดเป็นตัวแปรที่ได้รับการพิจารณาร่วมด้วย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ตามมาตรฐาน มอก. [36] และ ASTM C150-07 [37] มวลรวมละเอียดเลือกใช้ทรายแม่น้ำที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีความถ่วงจำเพาะและโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.62 และ 2.73 ตามลำดับ น้ำผสมมอร์ตาร์ใช้เป็นน้ำประปาทั่วไป รวมถึงมีการใช้สารลดน้ำแบบพอลิคาร์บอกซิเลตอีเทอร์ ซึ่งจัดเป็นสารลดน้ำประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C 494 [38] และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.08 นอกจากนี้ มีการเสริมกำลังมอร์ตาร์ด้วยเส้นใยเหล็กแบบงอปลายที่มีความยาว 35 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 สมบัติเชิงกลของเส้นใยในด้านกำลังรับแรงดึงประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1.345 และ 210,000 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กแบบงอปลาย [39]

2.2 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กในงานวิจัยประกอบด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อมอร์ตาร์ และสารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้เป็นปริมาณที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 550-650 มิลลิเมตร โดยอ้างอิงจากงานวิจัยคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเองช่วงการไหลแผ่ที่แนะนำโดยยังมอร์ต้ายังไหลได้และไม่เกิดการแยกตัวของส่วนผสม [15-16]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

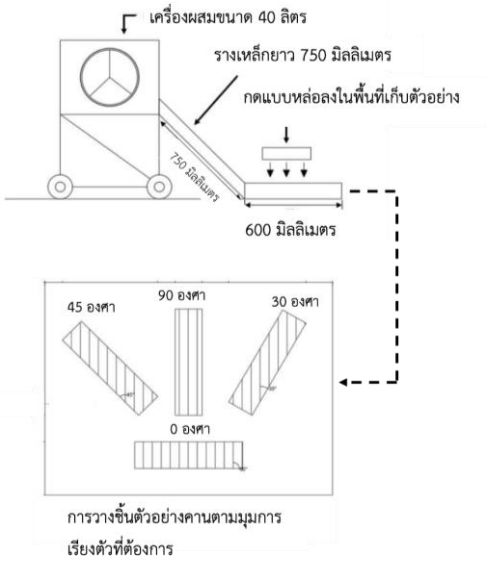
อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, %)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, %)	อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อมอร์ตาร์ (f/m, %)	อัตราส่วนสารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์ (SP/C, %)
35	40	0.0	0.4
		0.8	0.5
		1.6	0.6
	45	0.0	0.45
		0.8	0.7
		1.6	0.9
	50	0.0	0.8
		0.8	0.9
		1.6	1.2
45	40	0.0	0.35
		0.8	0.6
		1.6	0.4
	45	0.0	0.5
		0.8	0.7
		1.6	0.7
	50	0.0	0.65
		0.8	0.7
		1.6	0.85

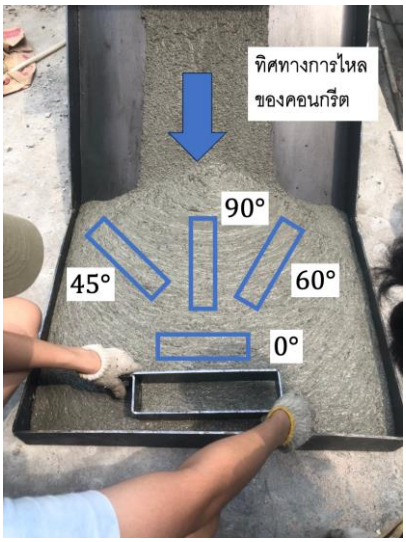
2.3 ขั้นตอนการผสมและเก็บตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

ในการผสมมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กผสมตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Pan Mixer โดยมีการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ก่อนเก็บตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างทดสอบมี 2 รูปแบบคือ ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีลักษณะทรงกระบอกขนาด 100x200 มิลลิเมตรและตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ใช้เป็นคานขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร

สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัดดำเนินการโดยปล่อยมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กไหลจากเครื่องผสมลงบนรางลาดยาว 750 มิลลิเมตร เมื่อมอร์ตาร์ไหลลงสู่พื้นที่เก็บตัวอย่างด้านล่างจนได้ความหนา 75 มิลลิเมตรแล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างคานโดยการนำแบบหล่อคานกดลงในพื้นที่เก็บตัวอย่าง โดยทำมุมกับในทิศการไหลของมอร์ตาร์เพื่อให้ได้มุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบวิบัติตามต้องการคือ 0 30 45 และ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ได้เก็บตัวอย่างคานเสริมเส้นใยเหล็กที่มีการเรียงตัวแบบสุ่มและตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมเส้นใยเหล็กโดยตักมอร์ตาร์จากพื้นที่เก็บตัวอย่างใส่ลงแบบหล่อโดยตรง

สำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดนั้นเก็บตัวอย่าง 2 ส่วนผสมคือมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กที่มีการเรียงตัวแบบสุ่ม และตัวอย่างทรงกระบอกที่ไม่มีการเสริมเส้นใยเหล็ก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการเรียงตัวของเส้นใยในตัวอย่างทรงกระบอกได้





รูปที่ 2 การผสมและการเก็บตัวอย่างของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กในทิศทางการเรียงตัวต่าง ๆ

2.4 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

การทดสอบกำลังรับแรงอัดดำเนินการโดยการนำชิ้นตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100x200 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุชุดทดสอบ เข้าสู่เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดที่สามารถให้น้ำหนักกระทำได้ถึง 1000 กิโลนิวตัน ให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกกำลังอัดสูงสุดที่เกิดขึ้น

2.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

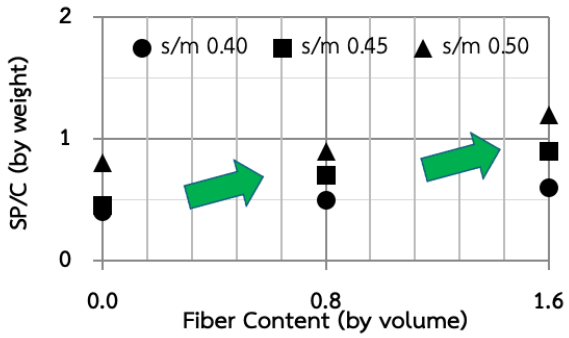
การทดสอบกำลังรับแรงดัดดำเนินการโดยการนำชิ้นตัวอย่างคานขนาด 75x75x300 มิลลิเมตร เข้าสู่เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบ 3 จุด (Three-Points Bending test) โดยให้น้ำหนักกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างคานด้วยอัตรา 0.05 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกค่าแรงกระทำและการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานด้วยความถี่ 5 เฮิรตซ์

3.ผลการวิจัยและอภิปราย

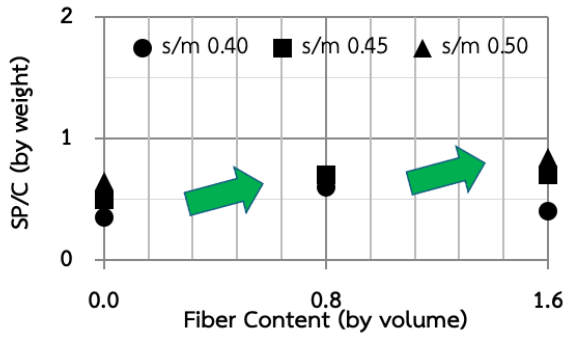
จากระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อที่ 2 สามารถนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมาวิเคราะห์และอภิปรายได้ดังนี้

3.1 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็ก

มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมถูกนำไปทดสอบค่าการไหลแผ่ก่อนนำไปเทเข้าอุปกรณ์และเก็บตัวอย่าง ทุกส่วนผสมต้องมีค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 550–650 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการไหลแผ่ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณสารลดน้ำพิเศษ โดยทุกส่วนต้องมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงดังกล่าวจึงนำไปทดสอบขั้นตอนต่อไป รูปที่ 3 แสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ทำให้แต่ละส่วนผสมมีค่าการไหลแผ่ 550–650 มิลลิเมตร เห็นได้ชัดเจนว่าส่วนผสมมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) และปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแข็งลงในส่วนผสมทำให้ขัดขวางการไหลของมอร์ตาร์ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนสารลดน้ำพิเศษต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้อยู่ในช่วงร้อยละ 0.4–1.2 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) 0.45 ต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่าส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.35 เล็กน้อย เนื่องจากส่วนผสมมีความเหลวจากปริมาณน้ำที่มากกว่าจึงต้องการสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่า



a) W/C 0.35



b) W/C 0.45

รูปที่ 3 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมสำหรับมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็ก

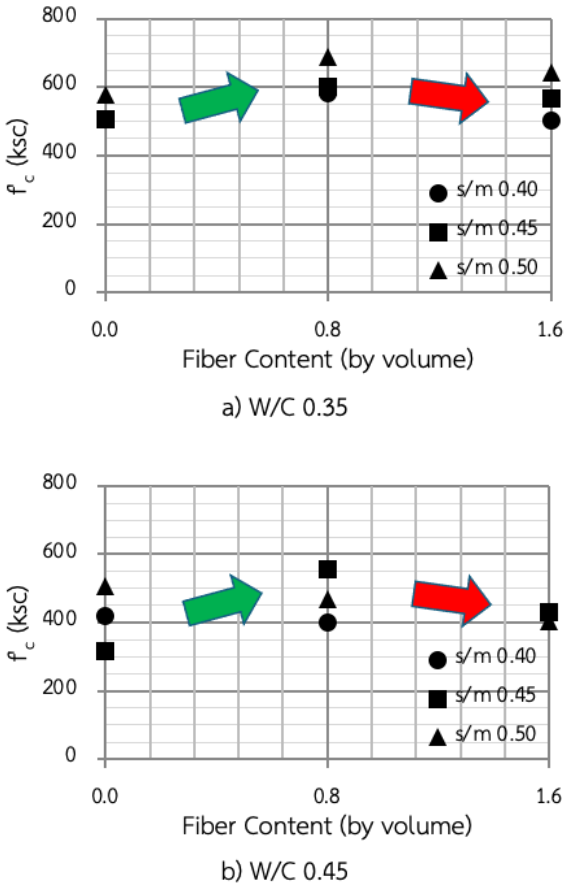
3.2 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็ก

รูปที่ 4 แสดงกำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเมื่อปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นสำหรับส่วนผสมที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ไปในทางเดียวกันคือกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 1.6 มอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 และไม่เสริมเส้นใยเหล็กมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 550 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 0.8 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 550 เป็นประมาณ 640 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 16.3 จากกำลังอัดเดิม

และมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 400 เป็นประมาณ 470 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ17.5 จากกำลังอัดเดิม สำหรับมอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ เส้นใยเหล็กที่กระจายตัวในมอร์ตาร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของมอร์ตาร์ ได้เป็นอย่างดี เมื่อตัวอย่างรับแรงอัดจนเกิดความเครียดภายในเส้นใยเหล็กสามารถยึดรั้งและช่วยลดความเครียดในช่วงแรกได้ดีซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [8-9] ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นร้อยละ 1.6 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด มีค่าลดลงโดยลดลงจากประมาณ 640 เป็นประมาณ 580 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 9.3 จากกำลังอัดเดิม และมีค่าลดลงจากประมาณ 470 เป็นประมาณ 420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 10.5 จากกำลังอัดเดิม สำหรับมอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กจากร้อยละ 0.8 เป็นร้อยละ 1.6 คือปริมาณเส้นใยเหล็กมากเกินไปทำให้มีบางส่วนในมอร์ตาร์กระจุกไปด้วยเส้นใยเหล็ก ทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นจุดอ่อนของมอร์ตาร์ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อมีเส้นใยเหล็กมากเกินไป เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างมอร์ต้าและเส้นใยลดลง [9]

3.3 ผลทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็ก

การเสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตช่วยให้ชิ้นส่วนโครงสร้างมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงดัดขึ้นอยู่กับมุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กที่สอดคล้องกับทิศทางการเทคอนกรีตและระนาบการวิบัติของตัวอย่าง จากผลการทดสอบพบว่ากำลังค่าสูงสุดเมื่อมุม θ_f มีค่า 30 และ 45 องศา แสดงดังรูปที่ 5 a), c), และ d) ยกเว้นกรณีมอร์ตาร์ที่มี W/C เท่ากับ 0.35 รับแรงดัดในภาพ



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัดแน่นด้วยตัวเองเสริมเส้นใยเหล็กเมื่อมีปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น

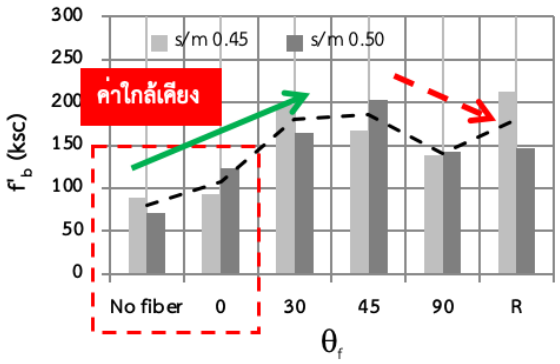
รวมพิจารณาทุกค่า s/m มี และปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.6 ดังรูปที่ 5 b) ซึ่งค่ามุม θ_f มีค่า 30 และ 45 องศา ไม่ได้ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่างดังกล่าวนี้อาจมีปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดผลเชิงลบต่อกำลังรับแรงดัด เช่น การกระจายตัวของเส้นใยบนระนาบวิบัติไม่ทั่วทั้งหน้าตัด เป็นต้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใยเหล็กและตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และ 1.6 เมื่อมีค่า θ_f เท่ากับ 0 องศาในกรอบเส้นประสีแดงพบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันมากหรือมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยเหล็กประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กมีส่วนสำคัญต่อกำลังรับแรงดัดชัดเจน ดังนั้นการเทมอร์ตาร์จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อการเรียงตัวของเส้นใยเสมอ พิจารณาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัด (ลูกศรเส้นทึบ) เมื่อ θ_f เพิ่มขึ้นจาก 0 30 และ 45 องศา พบว่ามีค่ามากขึ้นตามค่า θ_f ที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยในอดีต [9] ที่ให้เหตุผลว่าเมื่อค่า θ_f เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเหล็กที่ผ่านระนาบวิบัตินั้นเพิ่มขึ้น เพราะมีลักษณะเป็นวงรีซึ่งมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่หน้าตัดรูปวงกลม โดยกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 50-70 เมื่อ θ_f เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 30-45 องศา จากนั้นเมื่อ θ_f มีค่า เท่ากับ 90 องศา พบว่าตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดลดลงประมาณร้อยละ 20-30 เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีค่า θ_f เท่ากับ 30-45 องศา ประเด็นพิจารณาสุดท้ายคือการเทมอร์ตาร์ โดยการตักมอร์ตาร์ลงแบบหล่อเพื่อให้การเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่ม (Random) พบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าไม่แน่นอน พิจารณาเส้นประสีแดงโดยมีค่าใกล้เคียงค่าสูงสุด (ตัวอย่างที่มีค่า θ_f 30-45 องศา) ดังรูปที่ 5 b) และ d) ซึ่งเป็นกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.6 และพบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 20-30 เปรียบเทียบกับค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 5 a) และ c) ซึ่งเป็นกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.8 สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณเส้นใยเหล็กสูง (ร้อยละ1.6) ร่วมกับการเรียงตัวแบบสุ่มอาจส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดสามารถเพิ่มหรือลดกำลังรับแรงดัดเนื่องจากเกิดการขัดกันของเส้นใย อย่างไรก็ดีการเรียงตัวแบบสุ่มไม่สามารถควบคุมทิศทางของเส้นใยเหล็กได้ จำเป็นต้องทดสอบตัวอย่างปริมาณมากเพื่อวิเคราะห์ผลทดสอบในเชิงสถิติร่วมด้วยอีกประการหนึ่ง

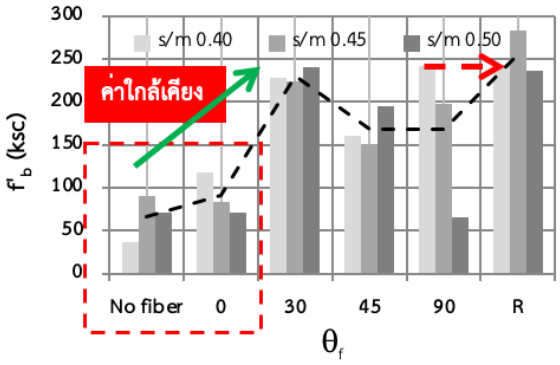
3.4 ผลทดสอบกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยเหล็ก

ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใย 1 เส้น โดยคิดจากกำลังรับแรงดัดหารด้วยจำนวนเส้นใยในหน้าตัด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6 การเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กที่นับได้ที่ระนาบวิบัติของตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.6 นั้นกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8

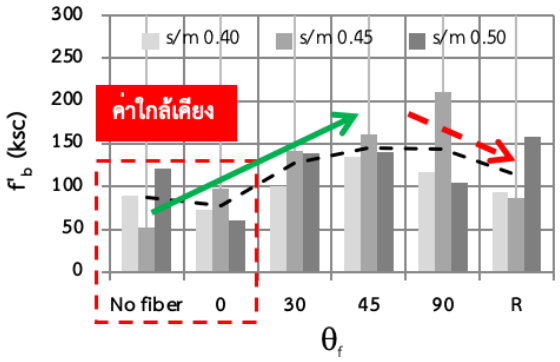
ทั้งในกรณี W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ทุกลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยเหล็ก เนื่องจากจำนวนเส้นใยเหล็กที่นับได้บนระนาบวิบัติมีจำนวนมากขึ้นแต่กำลังแรงดัดที่เพิ่มขึ้นไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนเส้นใย อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยของตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และ 1.6 มีค่าประมาณ 1.5 และ 1.1



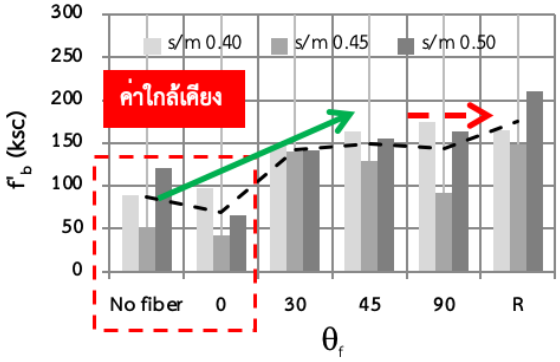
a) W/C 0.35, fiber 0.8%



b) W/C 0.35, fiber 1.6%



c) W/C 0.45, fiber 0.8%



d) W/C 0.45, fiber 1.6%

รูปที่ 5 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเส้นใยเหล็ก

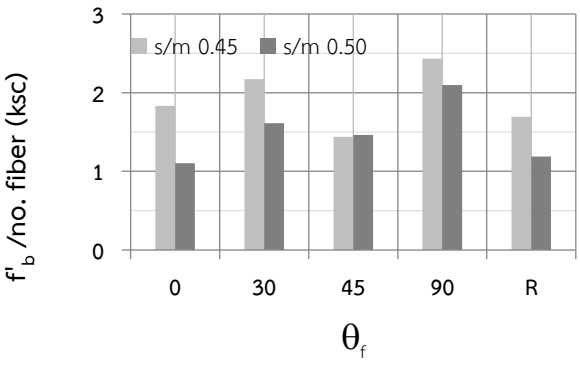
กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดตัวอย่างที่มี W/C เท่ากับ 0.35 และอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อจำนวนเส้นใยของตัวอย่างที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.8 และ 1.6 มีค่าประมาณ 1.3 และ 0.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดตัวอย่างที่มี W/C เท่ากับ 0.45 เนื่องจากมอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.6 มีจำนวนเส้นใยอัดแน่นบนระนาบวิบัติส่งผลให้เส้นใยชิดกันมากเกินไปไม่มีมอร์ตาร์เพียงพอให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและมอร์ตาร์จึงทำให้กำลังรับแรงดัดที่เส้นใยเหล็กสามารถรับได้ต่อเส้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าแม้การเพิ่มปริมาณเส้นใยสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดแล้วพบว่าความคุ้มค่าของราคาเส้นใยเหล็กต่อกำลังที่เพิ่มขึ้นอาจไม่เหมาะสม วิศวกรควรพิจารณาสมบัติด้านกำลังของวัสดุและงบประมาณร่วมกันอย่างรอบคอบ

4. บทสรุป

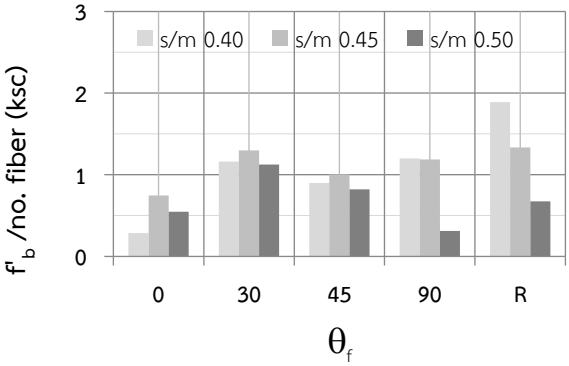
จากผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

1. ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นสำหรับผลิตมอร์ตาร์เสริมเส้นใยเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4-1.2 และร้อยละ 0.3-0.8 เมื่อมอร์ตาร์มีค่า W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ สามารถประหยัดสารลดน้ำพิเศษได้โดยการเพิ่มปริมาณน้ำแต่จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติทางกลร่วมด้วย โดยปริมาณสารลดน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m) และปริมาณเส้นใยเหล็กเมื่อเพิ่มขึ้น ส่วนผสมมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากขึ้น

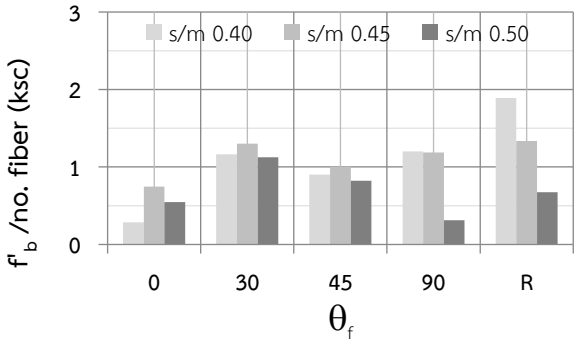
2. กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงสุดประมาณ 640 และ 470 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.8% และมีค่า W/C เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.6 การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กไม่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ในงานวิจัยนี้



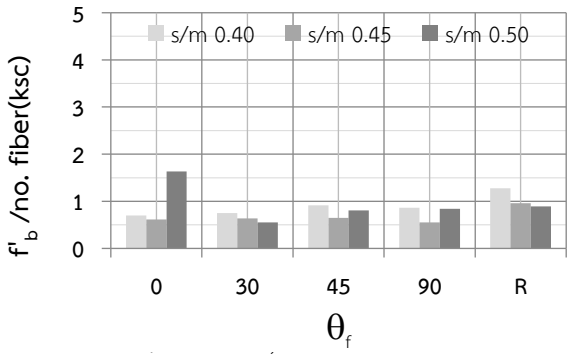
a) W/C 0.35, fiber 0.8%



b) W/C 0.35, fiber 1.6%



c) W/C 0.45, fiber 0.8%



d) W/C 0.45, fiber 1.6%

รูปที่ 6 อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อเส้นใยเหล็กเมื่อมีการเรียงตัวต่างกัน

3. มุมระหว่างการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและระนาบการวิบัติมีผลต่อกำลังรับแรงดัดอย่างชัดเจน โดยมุม θ_f ที่ส่งผลให้มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญคือ 30 และ 45 องศา เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเหล็กที่ระนาบวิบัติเป็นวงรีจึงมีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กในทุกปริมาณเส้นใย ผลวิจัยนี้อาจประยุกต์ได้สำหรับการผลิตคานคอนกรีตสำเร็จรูปโดยหล่อคอนกรีตตามที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้และกดแบบหล่อคานที่ทำให้เกิดมุม θ_f เท่ากับ 30 และ 45 องศา ซึ่งจำเป็นต้องทำการวิจัยในโครงสร้างคานขนาดจริงต่อไป

4. การเรียงตัวแบบสุ่มของเส้นใยเหล็กส่งผลต่อกำลังรับแรงดัด บางชุดตัวอย่างทำให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดสูงที่สุด บางชุดตัวอย่างมีกำลังรับแรงดัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีเส้นใยเหล็กเพียงเล็กน้อย การเทมอร์ตาร์ให้เส้นใยมีการเรียงตัวแบบสุ่มจำเป็นต้องศึกษาวิจัยเชิงปริมาณและวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อให้ผลการทดสอบสามารถประยุกต์ใช้จริงได้

5. เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กมากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามจำนวนเส้นใยเหล็กบนระนาบวิบัติไม่ได้แปรผันตรงกับกำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้น หากเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กมากเกินไปทำให้เส้นใยอัดแน่นจนเกินไป มอร์ตาร์ไม่เพียงพอทำให้เส้นใยเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ดีทั้งยังสิ้นเปลืองอีกประการหนึ่ง งานวิจัยนี้ระบุปริมาณเส้นใยที่คุ้มค่าที่สุดคือร้อยละ 0.8 ต่อปริมาตรมอร์ตาร์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท BASF (Thai) จำกัด ที่ได้สนับสนุนสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาที่สนับสนุนทุนวิจัยแบบบูรณาการประจำปีงบประมาณ 2563 ไว้ ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Larsen IL, Thorstensen RT. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A Review. Construction and Building Materials. 2020 ; 30256:119459.

[2] Wang X, Fan F, Lai J, Xie Y. Steel fiber reinforced concrete: A review of its material properties and usage in tunnel lining. InStructures 2021; 1 (34), 1080-1098.

[3] Frazao C, Barros J, Bogas JA, Garcia-Cortes V, Valente T. Technical and environmental potentialities of recycled steel fiber reinforced concrete for structural applications. Journal of Building Engineering. 2022; 45:103579.

[4] Qin X, Kaewunruen S. Environment-friendly recycled steel fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2022 ;327:126967.

[5] Vairagade VS, Kene KS. Strength of normal concrete using metallic and synthetic fibers. Procedia Engineering. 2013;51:132-40.

[6] Zheng Y, Wu X, He G, Shang Q, Xu J, Sun Y. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology. Advances in Civil Engineering. 2018.

[7] Sukontasukkul P, Chaisakulkiet U, Jamsawang P, Horpibulsuk S, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand. Case Studies in Construction Materials. 2019; 11:e00271.

[8] Trabucchi I, Tiberti G, Conforti A, Medeghini F, Plizzari GA. Experimental study on Steel Fiber Reinforced Concrete and Reinforced Concrete elements under concentrated loads. Construction and Building Materials. 2021 ;307:124834.

[9] Jongvivatsakul P, Attachaiyawuth A, Pansuk W. A crack-shear slip model of high-strength steel fiber-reinforced concrete based on a push-off test. Construction and Building Materials. 2016 ;126:924-35.

[10] Smittakorn W, Prasertsri T, Pattharakorn W, Jongvivatsakul P. Shear performance of special dry joints for precast concrete segments. ASEAN Engineering Journal. 2021;11:60-72.

[11] Sukontasukkul P, Jamnam S, Sappakittipakorn M, Banthia N. Preliminary study on bullet resistance of double-layer concrete panel made of rubberized and steel fiber reinforced concrete. Materials and Structures. 2014; 47(1-2):117-125.

[12] Maho B, Sukontasukkul P, Jamnam S, Yamaguchi E, Fujikake K, Banthia N. Effect of rubber insertion on impact behavior of multilayer steel fiber reinforced concrete bulletproof panel. Construction and Building Materials. 2019; 216:476-84.

[13] Okamura H, Ouchi M. Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2003;1(1):5-15.

[14] Ouchi M, Attachaiyawuth A. History and Development of High-Performance Concrete in Japan. J. of Thailand Concrete Association. 2015 ; 3(2):1-7.

[15] Attachaiyawuth A, Rath S, Tanaka K, Ouchi M. Improvement of Self-Compactability of Air-Enhanced Self-Compacting Concrete with Fine Entrained Air. Journal of Advanced Concrete Technology. 2016;14(3):55-59. Available from: https://doi.org/10.3151/jact.14.55

[16] Puthipad N, Ouchi M, Rath S, Attachaiyawuth A. Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash. Construction and Building Materials. 2016 ;128:349-60.

[17] Ouchi M, Kameshima K, Attachaiyawuth A. Improvement in self-compacting properties of fresh concrete by eliminating large air bubbles using an antifoaming agent. Journal of Advanced Concrete Technology. 2017; 15(1):10-8.

[18] Puthipad N, Ouchi M, Rath S, Attachaiyawuth A. Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content. Construction and Building Materials. 2017; 144:1-2.

[19] Rath S, Ouchi M, Puthipad N, Attachaiyawuth A. Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage. Construction and Building Materials. 2017 ;148:531-7.

[20] Rath S, Puthipad N, Attachaiyawuth A, Ouchi M. Critical size of entrained air to stability of air volume in mortar of self-compacting concrete at fresh stage. Journal of Advanced Concrete Technology. 2017; 15(1):29-37.

[21] Puthipad N, Ouchi M, Attachaiyawuth A. Effects of fly ash, mixing procedure and type of air-entraining agent on coalescence of entrained air bubbles in mortar of self-compacting concrete at fresh state. Construction and Building Materials. 2018; 180:437-44.

[22] Falmata AM, Sulaiman A, Mohamed RN, Shettima AU. Mechanical properties of self-compacting high-performance concrete with fly ash and silica fume. SN Applied Sciences. 2020; 2:1-1.

[23] Yanweerasak T, Kittikornjarus B, Pakwat P, Plongpan T, Attachaiyawuth A. Flowability, Viscosity and Internal Friction of Self-Compacting Mortar as Affected by Its Mix Proportions. KMUTT Research & Development Journal. 2021; 44(3):409-426. Thai.

[24] Attachaiyawuth A, Puthipad N, Ouchi M. Effects of air-entraining agent, defoaming agent and mixing time on characteristic of entrained bubbles in air-enhanced self-compacting concrete mixed at concrete plant. Engineering Journal. 2022; 26(2):37-48.

[25] Mahmod M, Hanoon AN, Abed HJ. Flexural behavior of self-compacting concrete beams strengthened with steel fiber reinforcement. Journal of Building Engineering. 2018; 16:228-37.

[26] Devi GS, Prasad CV, Rao PS. Influence of mineral admixtures on structural behaviour of Quaternary Blended Self Compacting Concrete reinforced beams with addition of crimpled steel fibers. Materials Today: Proceedings. 2022 ;57:2325-9.

[27] aldeen Odaa S, Hason MM, Sharba AA. Self-compacting concrete beams reinforced with steel fiber under flexural loads: A ductility index evaluation. Materials Today: Proceedings. 2021 ; 42:2259-67.

[28] Li N, Lu Y, Li S, Gao D. Axial compressive behaviour of steel fibre reinforced self-stressing and self-compacting concrete-filled steel tube columns. Engineering Structures. 2020 ;222:111108.

[29] Zamri NF, Mohamed RN, Awalluddin D, Abdullah R. Experimental evaluation on punching shear resistance of steel fibre reinforced self-compacting concrete flat slabs. Journal of Building Engineering. 2022 ;15.52:104441.

[30] Ramkumar KB, Rajkumar PK, Ahmmad SN, Jegan M. A review on performance of self-compacting concrete–use of mineral admixtures and steel fibres with artificial neural network application. Construction and Building Materials. 2020 ;261:120215.

[31] Sanjeev J, Nitesh KS. Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened ฬ properties of vibrated concrete and self-compacting concrete. Materials Today: Proceedings. 2020; 27:1559-68.

[32] Magbool HM, Zeyad AM. The effect of various steel fibers and volcanic pumice powder on fracture characteristics of Self-Compacting concrete. Construction and Building Materials. 2021; 312:125444.

[33] Saba AM, Khan AH, Akhtar MN, Khan NA, Koloor SS, Petrů M, Radwan N. Strength and flexural behavior of steel fiber and silica fume incorporated self-compacting concrete. Journal of Materials Research and Technology. 2021 ;12:1380-90.

[34] Alrawashdeh A, Eren O. Mechanical and physical characterisation of steel fibre reinforced self-compacting concrete: Different aspect ratios and volume fractions of fibres. Results in Engineering. 2022; 13:100335.

[35] Kotwal S, Singh H, Kumar R. Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates. Materials Today: Proceedings. 2022 ;48:1032-7.

[36] Thailand Industrial Standard. Tis no. 15-1 Specifications for Portland Cement Type 1. 2012 Thai.

[37] Astm C. 150, Standard specification for Portland cement. Annual book of ASTM standards. 2002;4:134-8.

[38] ASTM A. A123/A123M-17, Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products.

[39] bosfa.com [Internet]. Products dramix-5d-4d-3d [cited 2023 Feb 27]. Available from: https://bosfa.com/wpcontent/uploads/2017/08/3D_6535BG.pdf

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิดสำหรับทดสอบแท่งคอนกรีตผสมโฟมเสริมเหล็ก

Design and fabrication of torsion testing machine for reinforced foam concrete

กรีฑา สมเกียรติกุล[1] วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์[2] ชูตระกูล ศิริไพบูลย์[3*]

Kreetha Somkeattikul[1] Wuttikon Jariyatontivait[2] Chootrakul Siripaiboon[3*]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ ตำบลบางตลาด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120

[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสยาม แขวงบางหว้า เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160

[3]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แขนงวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ตำบลบางพูด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120

[1]Department of Automotive Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management, Nonthaburi 11120, Thailand

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siam University, Bangkok 10160, Thailand

[3]Department of Industrial Technology, School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi 11120, Thailand

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: Chootrakulsiripaiboon@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 08-6404-6063

Received: 18 March 2023, Revised: 21 September 2023, Accepted: 19 December 2023

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อการออกแบบสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิด เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้วัสดุที่มีการผสมด้วยคอนกรีตรับแรงที่เกิดจากแรงบิดมากขึ้น โดยใช้หลักการจากแรงบิดจากมอเตอร์ที่มีเกียร์ทดส่งผ่านไปยังชุดเฟืองโซ่ แล้วใช้โหลดเซลล์วัดแรงที่เกิดขึ้นจากแรงดึงของโซ่สามารถใช้งานได้ จากการสอบเทียบกับชิ้นงานมาตรฐานที่มีค่าคุณสมบัติในการรับแรงบิด ซึ่งจากการทดลองได้ค่าทนแรงบิดทั้งสามชิ้นในช่วง 75-100 นิวตันเมตร และจะขาดออกจากกันหลังจากเกิดมุมบิดมากกว่า 35 องศา เมื่อนำมาใช้ในการบิดคอนกรีตผสมโฟมเสริมเหล็ก พบว่าลักษณะรอยแตกเป็นไปตามแรงที่เกิดขึ้นกับแนวแกน ซึ่งยืนยันในการเกิดแรงบิดกับวัสดุทดสอบได้ และยังสามารถหาค่าการทนแรงบิดเฉลี่ยของคอนกรีตผสมโฟมเสริมเหล็กตามสูตรที่เปลี่ยนความหนาแน่นประมาณ 600 700 และ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้ 13.05 22.67 และ 31.87 นิวตันเมตร ตามลำดับ และเครื่องทดสอบนี้สามารถใช้ในการหาคุณสมบัติการทนแรงบิดของวัสดุผสมอื่น ๆ เช่น คอนกรีตผสมไฟเบอร์ และคอนกรีตผสมไม้

คำสำคัญ: เครื่องทดสอบการทนแรงบิด คอนกรีต โฟม

Abstract

The objective of this research was to design and fabricate a torsion testing machine. Recently, there have been more applications of composite concrete materials for torsion. The torsion testing machine used the principle of torque from the motor with a gear ratio-reduced speed, which was then transmitted to the chain. The load cell was used to measure the force generated by the chain's tension. During calibration, the standard workpiece properties were compared to the experimental data of the new torsion testing machine, and the results showed that they were acceptable. From the experiments, the torsion resistance values of all three pieces were in the

range of 75-100 N·m, and they would break apart after the twisting angle exceeded 35 degrees. In the case of reinforced foam concrete, cracks were observed to appear along the axial direction, confirming torsion. The average torsional resistance of reinforced foam concrete, calculated using formulas that adjusted the densities to approximately 600, 700, and 800 kg/m3, were found to be 13.05, 22.67, and 31.87 N·m, respectively. Furthermore, these findings can be helpful in determining the torsional resistance properties of other materials, such as fiber-concrete and wood-concrete.

Keywords: Torsion Testing Machine, Concrete, Foam

1. บทนำ

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาทางวิศวกรรม เนื่องจากวัสดุในปัจจุบันมีความหลากหลายมากขึ้น อาทิเช่น วัสดุผสม เมื่อมีการทำวัสดุผสมขึ้นชนิดใหม่จำเป็นต้องทดสอบค่าคุณสมบัติ เพื่อนำมาเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยกับวัสดุชนิดอื่นก่อนจะนำวัสดุที่มาใช้จริง

ในการทดสอบค่าความแข็งแรงวัสดุของคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งในรูปแบบของการกดอัด การโก่ง มีเครื่องทดสอบที่มีใช้เป็นมาตรฐานในปัจจุบัน[1] เช่น เครื่องทดสอบแรงอัด (Compression Machine) และเครื่องทดสอบภายใต้แรงดัด (Flexural and Transverse Machine) ซึ่งเครื่องทดสอบทั่วไปนั้นมีแนวคิดพื้นฐานมาจากแรงที่เกิดจากการใช้งานจริงของวัสดุประเภทคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงทำให้มีค่าแรงบิด (Torsion) ของวัสดุประเภทคอนกรีตเสริมแรงเหล็กยังไม่เป็นปัจจัยที่มีความสนใจเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทเพลาส่งกำลังที่มีเครื่องทดสอบมาตรฐานทั่วไป

ในปัจจุบันมีการนำวัสดุโฟมมาผสมกับคอนกรีตเสริมแรงเหล็ก[2] เพื่อทำให้คอนกรีตเสริมแรงสามารถลอยน้ำได้ ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้งานในการรับแรงที่มากระทบจะบนผิวน้ำ และให้ความเสถียรสำหรับพื้นที่ต้องการลอยบนผิวน้ำ เนื่องจากแรงที่มาจากผิวน้ำ เช่น คลื่น สามารถกระทำภาระแรงบิดต่อโฟมผสมคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้มีความจำเป็นต้องค่าหาการทนรับแรงบิด ซึ่งเป็นแรงที่เกิดจากการใช้งานจริง

ในงานวิจัยนี้ต้องการทดสอบค่าแรงบิดของวัสดุประเภทคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อนำค่าไปเป็นดัชนีชี้วัดการรับแรงบิดของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงจำเป็นต้องสร้างเครื่องทดสอบการทนต่อแรงบิด ซึ่งจากเครื่องทดสอบทั่วไปนั้นไม่สามารถหาเครื่องทดสอบที่เหมาะสมได้ เนื่องจากเครื่องทดสอบแรงบิดทั่วไปนั้นจะออกแบบให้ทดสอบวัสดุที่แรงรับแรงบิดประเภทเพลาที่เป็นวัสดุประเภทโลหะ ทำให้แรงบิดที่ออกแบบไม่เหมาะสมกับการใช้กับวัสดุประเภทคอนกรีต รวมไปถึงลักษณะหัวจับที่เหมาะสมในการทดสอบ โดยออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิดของแท่งคอนกรีต สามารถวัดแรงบิดได้ไม่น้อยกว่า 1,000 นิวตันเมตร ความยาวของชิ้นงานทดสอบไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร สามารถบิดหมุนได้มากที่สุด 180 องศา และมีการสอบเทียบกับชิ้นงานมาตรฐานตามงานวิจัย[3] ก่อนนำทดสอบกับวัสดุเพื่อให้ได้ที่ถูกต้องของเครื่องทดสอบก่อนนำไปใช้ในการทดสอบจริง

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การออกแบบเครื่องทดสอบการทนแรงบิด

การออกแบบเครื่องทดสอบการทนแรงบิดของแท่งคอนกรีต ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรมสามมิติมีลักษณะดังแสดงใน รูปที่ 1 (a) ในส่วนหลักการของเครื่องทดสอบจะใช้มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ที่มีอัตราทดสูงเป็นตัวบิด ซึ่งการใช้มอเตอร์อัตราทดสูงจะทำให้ความเร็วในการใช้งานลดลง และได้แรงบิดสูงขึ้นซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการในการใช้ทดสอบการทนแรงบิด อีกทั้งการใช้อัตราทดสูงจะทำให้มอเตอร์ไม่จำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงด้วย เมื่อมอเตอร์หมุนผ่านชุดลูกปืนที่ต่อเข้ากับเฟืองโซ่ (Sprocket) จากนั้นเฟืองโซ่ที่ต่อกับมอเตอร์จะส่งการเคลื่อนที่ไปยังเฟืองโซ่ที่มีการยึดจับกับชิ้นงานผ่านโซ่ที่คล้องกัน ซึ่งจะมีอุปกรณ์วัดแรงดึง (Load Cell) จะทำหน้าที่อ่านค่าแรงที่เกิดขึ้นจากโซ่ และส่งไปเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเป็นค่าของแรงบิด เมื่อผ่านการคูณกับระยะทางหน่วยเป็นนิวตันเมตร ซึ่งจะใช้โปรแกรมที่เขียนใช้ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

(Microcontroller) ซึ่งความยาวของการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์วัดแรงดึงต้องเพียงพอที่ทำให้ชิ้นทดสอบหักออกจากกัน โดยออกแบบให้สามารถบิดชิ้นงานทดสอบที่มุมบิดมากที่สุด 180 องศา

จากขอบเขตในการออกแบบข้างต้น ความต้องการในการทดสอบการทนต่อแรงบิดของวัสดุประเภทซีเมนต์เสริมเหล็กเครื่องทดสอบแรงบิดต้องสามารถทดสอบแรงบิดได้สูงสุด 1,000 นิวตันเมตร และสามารถทดสอบมุมบิดได้มากที่สุด 180 องศา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเพลาที่มีหน้าที่สำคัญในการรับแรงบิด 1,000 นิวตันเมตร ด้วยหลักการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(4) ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน รูปที่ 1 (b) จะเห็นได้ว่ามีค่าความเผื่อ (Factor of Safety) ประมาณ 1.293 ซึ่งสามารถยืนยันการรับแรงบิด 1,000 นิวตันเมตร ได้จากการออกแบบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบจะใช้การขึ้นรูปวัสดุผสมด้วยแบบหล่อคอนกรีต ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ซึ่งจะได้ชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 2 (a) คอนกรีตที่ใช้มาเป็นส่วนผสมเป็นคอนกรีตแห้งทนซัลเฟต ดังรูปที่ 2 (b)

การเลือกโซ่เป็นอุปกรณ์ในการรับแรงดึง เนื่องจากมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นจึงเลือกโซ่เดี่ยวเบอร์ 80 ซึ่งสามารถรับแรงได้ 14.71 กิโลนิวตัน อีกทั้งโซ่ยังสามารถตัดต่อเป็นข้อทำให้มีความสะดวกในการประกอบติดตั้งและใช้งาน ในการวัดองศาการบิดจะใช้อุปกรณ์วัดการหมุน (Encoder) สามารถวัดองศาที่เป็นเปลี่ยนไปของการบิดซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่ใช้ จากนั้นจะส่งค่าไปเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์เพื่อเป็นค่าอินพุตในการคำนวณเป็นมุมบิด หน่วยเป็น องศา โดยคำนวณและเลือกใช้เฟืองโซ่ที่มีจำนวนฟันและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟืองโซ่ที่เหมาะสมและเพียงพอกับแรงดึงในโซ่และแรงบิดจึงเลือกขนาดของเฟืองโซ่ ซึ่งเลือกใช้เฟืองโซ่เบอร์ 80 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 468 มิลลิเมตร จำนวนฟัน 56 ฟัน นำมาคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นในแนวโซ่ จะได้แรงดึงประมาณ 4,300 นิวตัน โซ่เบอร์ 80 สามารถทนต่อแรงดึงได้ถึง 14,000 นิวตัน มีค่าความเผื่อ (Factor of Safety) ประมาณ 3 เท่า ในส่วนของเซนเซอร์วัดแรงต้านการบิดเลือกใช้โหลดเซลล์ (Load Cell) ในการวัดแรงดึงที่เกิดขึ้นในแนวโซ่ ประมาณ 4,300 นิวตัน ดังนั้นจึงเลือกใช้โหลดเซลล์ ประเภท S-Type ที่สามารถทนและวัดค่าแรงดึงได้สูงสุด 10,000 นิวตัน และการเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและหัวเกียร์ทดให้เหมาะสมและเพียงพอต่อแรงบิดและความเร็วรอบในการหมุนของการทดสอบ จากการคำนวณได้เลือกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์แบบเฟสเดี่ยว กำลังไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์ โดยความเร็วรอบ 1,430 รอบต่อนาที และหัวเกียร์อัตราทด 1:180 จะส่งผลให้มีความเร็วรอบสูงสุดประมาณ 7 รอบต่อนาที มีความเหมาะสมในการทดสอบ และมีแรงบิดสูงสุดประมาณ 2,500 นิวตันเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานทดสอบ จากนั้นจึงได้ดำเนินการในการสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิดตามต้องการ

2.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ

2.2.1 สมการแรงบิดตามแนวแกน

เมื่อมีแรงกระทำตามแนวยาวของวัสดุจะเกิดการบิดในแนวแกน (Torsion) โดยสมมุติให้แรงที่เกิดมีความสมมาตรกันในเนื้อวัสดุ จะมีสมการแสดงดังนี้ (5)

$$\theta = \frac{Tl}{GJ} \quad (1)$$

เมื่อ θ คือ มุมที่บิด (Angle of Twist) องศา

T คือ แรงบิด (Torque) นิวตันเมตร

l คือ ความยาว (Length) เมตร

G คือ โมดูลัสของความแข็งแรงของวัสดุ (Modulus of Rigidity) จิกะปาสกาล

J โมเมนต์ต้านทานการเปลี่ยนรูปในแนวองศา (Polar Second Moment Area) เมตร^4

2.2.2 สมการโมเมนต์ต้านทานการเปลี่ยนรูปในแนวองศา

ในการหาค่าโมเมนต์ต้านทานการเปลี่ยนรูปในแนวองศา (J) สามารถหาได้หน้าตัด (Cross Section) ของวัสดุทดสอบจากสมการดังนี้[5]

$$J = \int r^2 dA = \int (x^2 + y^2) dA = I_x + I_y \quad (2)$$

เมื่อ r คือ ผลรวมโมเมนต์ต้านทานการเปลี่ยนรูป

A คือ พื้นที่หน้าตัด

x คือ โมเมนต์พื้นที่รอบแกน x

y คือ โมเมนต์พื้นที่รอบแกน y

I_x คือ โมเมนต์ต้านทานการเปลี่ยนรูปในแนวแกน x

I_y คือ โมเมนต์ต้านทานการเปลี่ยนรูปในแนวแกน y

2.2.3 สมการการยืดหยุ่นยืดตามสัดส่วนของแรง

ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยหลักการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้กฎของฮุค (Hooke's Law) เพื่ออธิบายว่าลักษณะการยืดหยุ่นยืดตามสัดส่วนของแรงดังสมการต่อไปนี้ [6] โดยจะได้ค่าโมดุลัสความยืดหยุ่น จะนำไปใช้คำนวณการเสียรูปในเชิงมุม ในสมการที่ (1) ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

$$\sigma=E\varepsilon \quad (3)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น ปาสคาล

E คือ โมดุลัสความยืดหยุ่น จิกะปาสกาล

ε คือ ความเครียด

2.2.4 สมการเกณฑ์การวิเคราะห์ความเสียหายแบบการเสียรูปมากที่สุด

ในการวิเคราะห์ความเสียหายจะใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ความเสียหาย แบบการเสียรูปมากที่สุด (Maximum Distortion Criterion หรือ Von Mises Yield Criterion) โดยเมื่อความเค้นภายในมีลักษณะทั่วไป และอยู่ในเงื่อนไขแบบไม่ข้อจำกัด มีสมการดังนี้[7]

$$\sigma_v=\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2]+3(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2)} \quad (4)$$

เมื่อ σ_v คือ ความเค้นจากเกณฑ์การเสียรูปมากที่สุดของ Von Mises Yield Criterion

σ_{11} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางแกน 1 ในระบบแกน 3 มิติ

σ_{22} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางแกน 2 ในระบบแกน 3 มิติ

σ_{33} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางแกน 3 ในระบบแกน 3 มิติ

σ_{12} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางเริ่มต้นที่แกน 1 ไปยังทิศทางแกน 2 ในระบบแกน 3 มิติ

σ_{23} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางเริ่มต้นที่แกน 2 ไปยังทิศทางแกน 3 ในระบบแกน 3 มิติ

σ_{31} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางเริ่มต้นที่แกน 3 ไปยังทิศทางแกน 1 ในระบบแกน 3 มิติ

2.2.5 สมการการหาค่าเฉลี่ยการทนต่อแรงบิด

ในการวิเคราะห์หาการทนต่อแรงบิดจะใช้ค่าเฉลี่ยของในการทดสอบการทนต่อแรงบิดจะใช้ทั้งหมด 3 ค่าจากการทดลอง โดยที่จะเลือกค่าที่มากที่สุด ก่อนที่แรงตึงโซ่จะลดลงแบบรวดเร็วตามกราฟที่ได้จากการทดลองซึ่งหมายถึงวัสดุได้มีการแตกหักโดยสมบูรณ์

$$\tau_{ave}=\frac{\tau_{\max,1}+\tau_{\max,3}+\tau_{\max,3}}{3} \quad (5)$$

เมื่อ τ_{ave} คือ ค่าเฉลี่ยการทนแรงบิดได้จากการทดลอง

$\tau_{\max,1}$ คือ ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 1

$\tau_{\max,2}$ คือ ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 2

$\tau_{\max,3}$ คือ ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ 3

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การสอบเทียบเครื่องทดสอบการทนแรงบิดสำหรับแท่งคอนกรีต

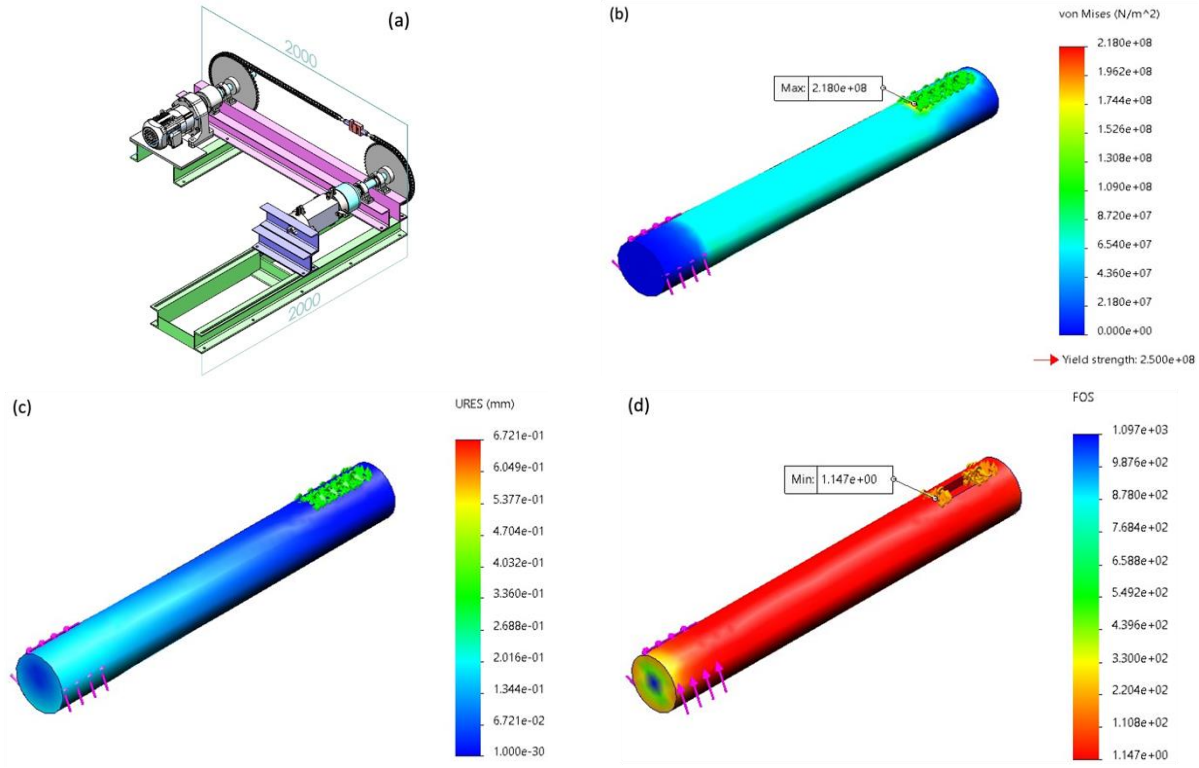
ในการทดสอบ และสอบเทียบเครื่องทดสอบทนแรงบิดของแท่งคอนกรีตจะใช้การอ้างอิงจากงานวิจัยทดสอบของวัสดุเหล็กชิ้นทดสอบ[3] มีลักษณะดังแสดงใน รูป 3 และมีขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการสอบเทียบดังแสดงใน ตารางที่ 2 นำชิ้นงานทดสอบมาบิดเพื่อดูลักษณะการเสียหาย จะได้ผลกราฟแรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นงานทดสอบหลังจากทดสอบแล้วดังแสดงดัง ตารางที่ 3 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของกราฟจะใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชิ้นทดสอบ รวมทั้งยังมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่อ้างอิง โดยจะแตกต่างกันตรงช่วงในการรับแรงบิด ซึ่งจากการทดลองได้ค่าทนแรงบิดทั้งสามชิ้นในช่วง 75-100 นิวตันเมตร และจะขาดออกจากกันหลังจากเกิดมุมบิดมากกว่า 35 องศา ดังนั้นการสอบเทียบเครื่องทดสอบการทนแรงบิดสามารถเทียบได้กับเครื่องที่ใช้ในการงานวิจัยที่นำมาอ้างอิงได้

3.2 ผลการทดสอบการทนแรงบิดของแท่งซีเมนต์ผสมโฟมเสริมเหล็ก

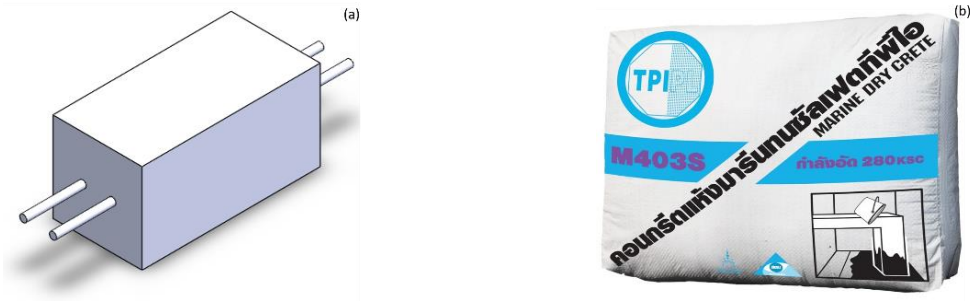
การทดสอบแท่งซีเมนต์เสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยจำนวน 3 สูตร ได้แก่สูตรที่ 1-3 ดังแสดงใน ตารางที่ 1 โดยจะทดสอบสูตรละ 3 ครั้ง โดยแต่ละสูตรจะมีความหนาแน่นต่างกันคือ 600 700 และ 800 kg/m^3 และรูปภาพชิ้นงานทดสอบหลังจากบิดจะแสดงใน ตารางที่ 4 5 และ 6 โดยที่ ตารางที่

4 จะเป็นอัตราส่วนผสมที่ 1 ในส่วน ตารางที่ 5 จะเป็นอัตราส่วนผสมที่ 2 และ ตารางที่ 6 จะเป็นอัตราส่วนผสมที่ 3 จากผลการทดลอง และการคำนวณหาค่าทนต่อแรงบิดในสมการที่ (5) จะสังเกตได้ว่าการทนต่อแรงบิดของส่วนผสมคอนกรีตสูตรที่ 1 จะน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยในการรับแรงอยู่ที่ 13.05 นิวตันเมตร ต่อมาจะเป็นอัตราส่วนผสมคอนกรีตสูตรที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยในการรับแรงอยู่ที่ 22.67 นิวตันเมตร และอัตราส่วนผสมคอนกรีตสูตรที่ 3 โดยมีค่าเฉลี่ยในการรับแรงอยู่ที่ 31.87 นิวตันเมตร จะทนต่อแรงบิดได้มากที่สุด

จากผลการทดสอบที่ได้จะสังเกตได้ว่าเนื่องจากสูตรที่ 1 มีส่วนผสมของซีเมนต์น้อยและมีปริมาณโฟมมากจึงทำให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคและความสม่ำเสมอในการผสมไม่ดี จึงทำให้สามารถทนต่อแรงบิดได้น้อยและลักษณะการแตกไม่แน่นอนเช่นเดียวกับสูตรที่ 2 แต่เนื่องจากสูตรที่ 2 มีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์สูงกว่าสูตรที่ 1 จึงส่งผลทำให้สามารถทนต่อแรงบิดได้มากกว่าสูตรที่ 1 และจากผลการทดสอบอัตราส่วนผสมในสูตรที่ 3 จะเห็นได้ว่าแท่งซีเมนต์ผสมโฟมที่มีประมาณซีเมนต์มากที่สุด สามารถทนต่อแรงบิดได้มากที่สุด และมีลักษณะการแตกร้าวไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเกิดขึ้นตามแนวยาวของวัสดุเนื่องจากแรงบิดที่กระทำตามแนวแกน และยังสามารถคาดเดาลักษณะการแตกร้าวได้ ดังนั้นเครื่องทดสอบการทนแรงบิดนั้นสามารถนำมาใช้งานในการทดสอบแรงบิดของวัสดุต่าง ๆ ได้โดยสามารถทดสอบชิ้นงานได้ยาวมากที่สุดถึง 1 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากสุด 30 เซนติเมตร จึงทำให้เครื่องทดสอบการทนแรงบิดนี้มีประโยชน์ในการหาคุณสมบัติในการทนแรงบิดของวัสดุอย่างอื่นได้อีกมาก



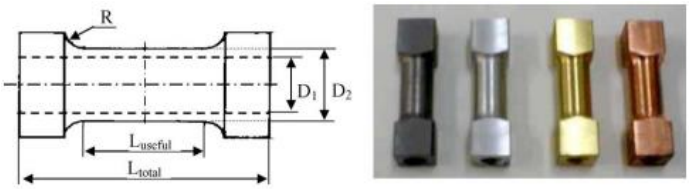
รูปที่ 1 การออกแบบเครื่องทดสอบการทนแรงบิดด้วยโปรแกรมสามมิติ
a) ลักษณะของเครื่องทดสอบการทนแรงบิด b) แบบจำลองค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเมื่อมีแรงกระทำ
c) แบบจำลองระยะการเสียรูปเมื่อวัสดุทดสอบถูกแรงกระทำ d) แบบจำลองค่าความเผื่อ (FOS) ในการรับแรงของชิ้นส่วนเพลา



รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ: a) ลักษณะวัสดุที่ใช้ในการทดสอบการทนแรงบิด b) คอนกรีตแห้งมารีนทนซัลเฟต

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์กับโฟม 3 สูตร

	ส่วนผสม (%โดยปริมาตร)				ความหนาแน่น (kg/m^3)	
สูตร	ซีเมนต์	น้ำ	โฟม	รวม	ซีเมนต์ผสมโฟม	ซีเมนต์ผสมโฟมเสริมเหล็ก
1	32.00	9.60	58.40	100.00	500	600
2	40.00	12.00	48.00	100.00	600	700
3	44.00	13.20	42.80	100.00	700	800

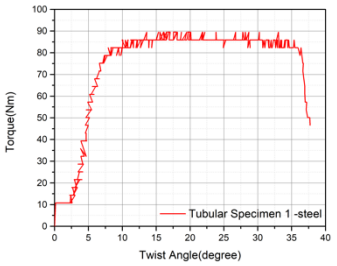
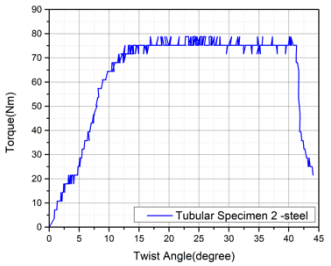
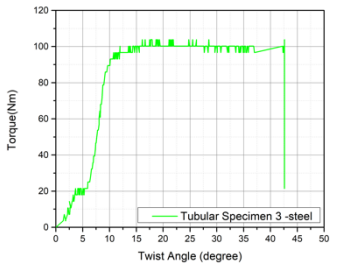


รูปที่ 3 ลักษณะ และขนาดของวัสดุที่นำมาสอบเทียบตามงานวิจัย(3)

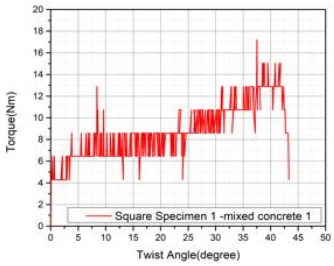
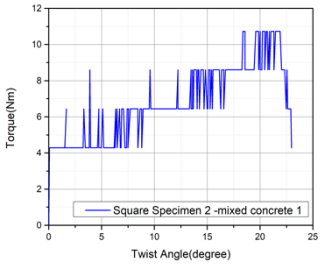
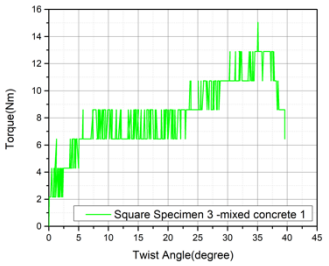
ตารางที่ 2 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการสอบเทียบ

Tubular specimen	Tubular					
Material/dimension	L_{useful}(mm)	L_{total}(mm)	D_1(mm)	D_2(mm)	Thickness(mm)	R(mm)
AISI 1020 steel	16	50	8	12	2	5

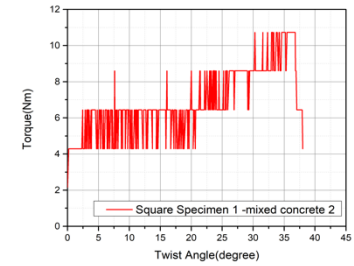
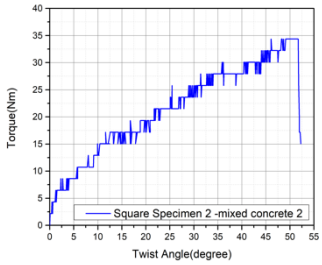
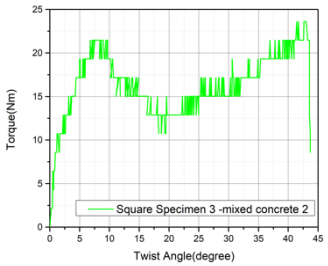
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์แรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นงานสอบเทียบ ซึ่งเป็นเหล็ก AISI 1020 หลังจากเกิดความเสียหายจากแรงบิด โดยมีการการทำซ้ำ 3 ครั้ง

ชิ้นที่	กราฟแรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นทดสอบ
1	
2	
3	

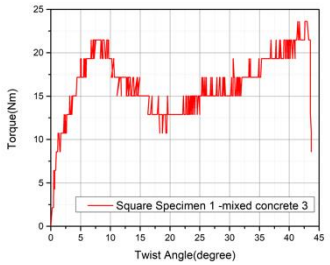
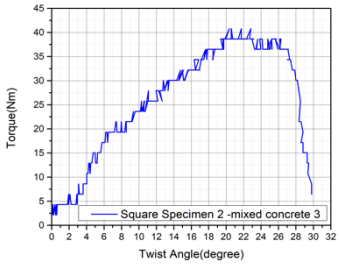
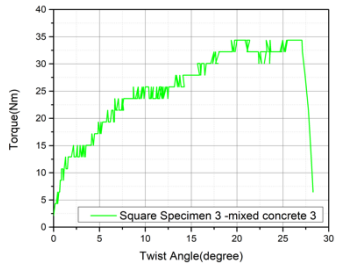
ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์แรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นซีเมนต์ผสมโฟมเสริมเหล็กส่วนผสมที่ 1 ที่มีความหนาแน่น 600 kg/m3 โดยมีการการทำซ้ำ 3 ครั้ง

ชิ้นที่	กราฟแรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นทดสอบ
1	
2	
3	

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์แรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นซีเมนต์ผสมโฟมเสริมเหล็กส่วนผสมที่ 2 ที่มีความหนาแน่น 700 kg/m^3 โดยมีการการทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งแสดงดังตารางเรียงตามแถว และชิ้นงาน

ชิ้นที่	กราฟแรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นทดสอบ
1	
2	
3	

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์แรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเป็นซีเมนต์ผสมโฟมเสริมเหล็กส่วนผสมที่ 3 ที่มีความหนาแน่น 800 kg/m3 ซึ่งแสดงดังตารางเรียงตามแถว และชิ้นงาน

ชิ้นที่	กราฟแรงบิดต่อองศา และรูปชิ้นทดสอบ
1	
2	
3	

4. บทสรุป

การออกแบบสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิดสำหรับแท่งคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังนี้

1.สามารถสร้างเครื่องทดสอบการทนแรงบิดโดยใช้หลักการใช้แรงบิดจากมอเตอร์ที่มีเกียร์ทดส่งผ่านไปยังชุดเฟืองโซ่ แล้วใช้โหลดเซลล์วัดแรงที่เกิดขึ้นจากโซ่สามารถใช้งานได้จริง

2.สามารถสอบเทียบความแม่นยำของเครื่องทดสอบกับงานวิจัยอื่น โดยใช้ชิ้นทดสอบชิ้นเดียวกันได้

3.สามารถนำมาบิดแท่งซีเมนต์ผสมโฟมเสริมเหล็กเพื่อหาคุณสมบัติของการทนต่อแรงบิดได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอแสดงความขอบคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้สถานที่ในการทำงาน และบริษัท ดอลฟินอินดัสทรีส์ จำกัด และโครงการ ITAP ที่ให้ความร่วมมือแหล่งทุน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Elwell DJ, Fu G. Compression testing of concrete: cylinders vs. cubes. 1995.

[2] Ramamurthy K, Nambiar EK, Ranjani GI. A classification of studies on properties of foam concrete. Cement and Concrete Composites. 2009; 31(6):388-96.

[3] Bressan JD, Unfer RK. Construction and validation tests of a torsion test machine. Journal of Materials Processing Technology. 2006; 179(1-3):23-9.

[4] Akin JE. Finite element analysis concepts: via SolidWorks: World Scientific; 2010.

[5] Shigley JE, Mischke CR. Standard handbook of machine design. (No Title). 1996.

[6] Larrabee Jr WF. A finite element model of skin deformation. I. Biomechanics of skin and soft tissue: a review. The Laryngoscope. 1986 ; 96(4):399-405.

[7] Mises RV. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. 1913;1913: 582-92.

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา

Application of Quality Function Deployment Techniques with Kansei Engineering for the Design and Development of Bags in the Lygodium

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[1*] อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว้ำ[1] ชาตรี หอมเขียว[1] ชัยวัฒนภัทร เลาสัตย์[2] ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร[1] และทิพยสุคนธ์ บุญญโส[3]

[1] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

[2] สาขาการออกแบบ, คณะศิลปกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Surasit Rawangwong[1*], Apichon Thongmung Kamnerdwam[1], Chatree Homkhiew[1], Chaiwattanapat Laosat[2], Chainarong Srivabut[1] and Thipsukon Boonyaso[3]

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

[2]Department of Product Design, Faculty of Fine and Applied Arts, Songkhla Rajabhat University

[3]Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: surasit.r@rmutsv.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-7291-2560

Received: 10 January 2023, Revised: 31 August 2023, Accepted: 23 September 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ ด้วยการสำรวจและแปลงความต้องการของลูกค้าที่มีต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ ในการประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของเมริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้าในรูปแบบข้อกำหนดเชิงเทคนิค จึงนำวิศวกรรมคันเซมาสนับสนุนการวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สื่อถึงอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้า ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ผลการวิจัยพบว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในส่วนของการวิเคราะห์การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพได้รับการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบ การใช้งาน วัสดุ คุณภาพ ความสะดวก และราคา โดยในส่วนการวิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทที่ 1 ของวิศวกรรมคันเซ ได้รับการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จำนวน 6 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ คือ ขนาด รูปแบบ ลักษณะกระเป๋า การใช้งาน โทนสี และรูปทรง พร้อมทั้งได้รับการเปลี่ยนแปลงให้ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบที่สื่อถึงอารมณ์ความรู้สึกสร้างสรรค์ เรียบง่าย และโดดเด่นน่าสนใจ ดังนั้นสำหรับการพัฒนาและออกแบบกระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา พบว่าลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านแนวทางการสานมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 และมีความพึงพอใจด้านความรู้สึกเรียบง่ายมากที่สุด โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51

คำสำคัญ กระเป๋าสตางค์ ย่านลิเภา การออกแบบผลิตภัณฑ์ การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ วิศวกรรมคันเซ

Abstract

This research aims to develop and design the Lygodium wallet product by using of quality function deployment techniques with Kansei Engineering. Exploring and converting customer needs into product purchase decisions. The results were analyzed using the qualitative functional transformations in the product planning matrix. It

focuses on converting customer requirements into technical specifications. Kansei Engineering is therefore used to support further analysis of product design that conveys the emotions of the customer, which is an important part of product development. The results showed that product development in the qualitative functional conversion analysis section has changed from material, usability, quality, convenience, and cost. In the first quantitative analysis section of Kansei Engineering has been changed product characteristics. The number 6 product features, namely size, style, style of bag, usage, color tone, and shape have been changed to make the product design that conveys creative emotions, simplicity, and outstanding interest. Therefore, for the development and design of Lygodium wallets, it was found that the customers were most satisfied with the characteristics of the weaving method as the priority. The level of satisfaction was at a very good level (Average= 4.50), along with the satisfaction of feeling simple. The satisfaction level was very good (Average = 4.51).

Keywords: Wallet, Lygodium, Product Design, Quality Function Deployment, Kansei Engineering

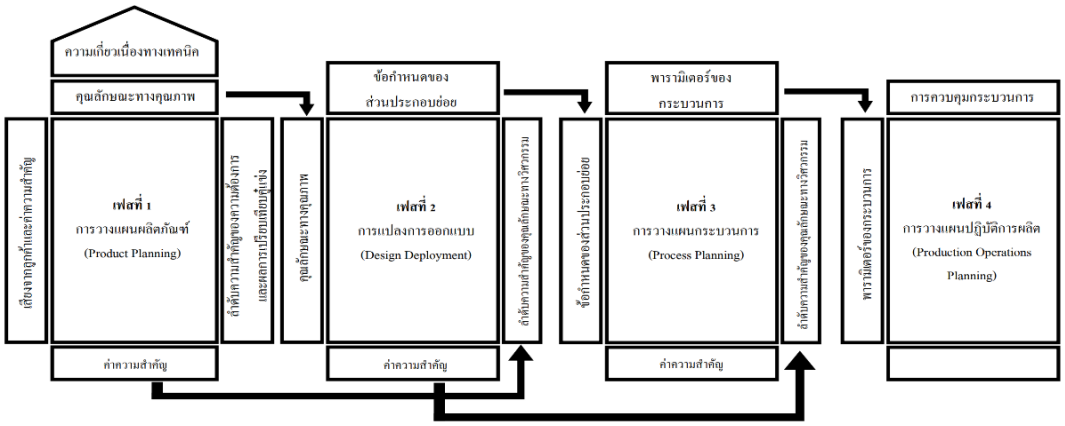
1. บทนำ

ย่านลิเภา เป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นใต้ต้นยางมีหน้าที่ปิดดินให้ชุ่มชื้น และเกิดขึ้นเองโดยเฉพาะทางภาคใต้ที่มีฝนตกบ่อยครั้ง ส่งผลให้เส้นมีลักษณะเหนียว และมีอายุเป็นร้อยปี แม้ว่าทิ้งให้แก่กับต้นก็จะไม่มีแมลงมากัดกิน การมีเส้นใยที่เหนียวเป็นลักษณะพิเศษของย่านลิเภา เป็นพืชเศรษฐกิจที่เหมาะแก่การนำมาจักสานเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ ดังรูปที่ 1 [1] ภูมิปัญญาศิลปหัตถกรรมย่านลิเภาของจังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นหนึ่งในมรดกทางวัฒนธรรมที่ล้วนสืบทอดมายาวนาน เป็นภูมิปัญญาด้านการจักสานโดยนำวัชพืชในท้องถิ่นที่มีเส้นใยทนทาน มีความเหนียว ไม่มีแมลงกัดกิน โดยจักสานเป็นภาชนะและเครื่องใช้พื้นบ้านหลายชนิด เนื่องจากมีอายุการใช้งานยาวนาน [2]

จากการลงพื้นที่ของผู้วิจัยพบว่า ผลิตภัณฑ์ย่านลิเภาที่ขายในประเทศโดยทั่วไปจะมีหลายระดับคุณภาพ ความประณีต และราคาที่แตกต่างกัน เพื่อให้ลูกค้าในแต่ละกลุ่มได้เกิดการเลือกสรรตามวัตถุประสงค์ของการใช้สอย เนื่องจากความต้องการของลูกค้าในแต่ละกลุ่มไม่เหมือนกัน อาจจะมีความต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทน แข็งแรง ความประณีตสวยงามน้อยกว่ากลุ่มนักสะสมซึ่งเน้นราคาที่ไม่สูงเกินไป ส่วนกลุ่มนักท่องเที่ยวชาวไทยและต่างชาติอาจจะไม่ค่อยพิถีพิถันเกี่ยวกับความประณีตและรูปแบบการผลิตมากนัก ดังนั้น จึงทำให้กลุ่มผู้ผลิตย่านลิเภา กรณีศึกษา มีความต้องการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายเพื่อรองรับความต้องการของลูกค้าในแต่ละกลุ่มและเพิ่มช่องทางการตลาดสำหรับนักท่องเที่ยวและลูกค้าทั่วไปที่กว้างขวางมากขึ้น

รูปที่ 1 เส้นย่านลิเภาและผลิตภัณฑ์ย่านลิเภา

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นเทคนิคการพัฒนาคุณภาพการออกแบบที่มุ่งสร้างความพึงพอใจแก่ลูกค้า เป็นการวางแผนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากที่สุด กระบวนการจะเริ่มต้นจากการแปลงความต้องการของลูกค้ามาเป็นผลิตภัณฑ์อย่างเป็นขั้นตอนและมีระบบ โดยอาศัยหลักการและเทคนิคทางวิศวกรรมเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการ เพื่อเจาะลึกไปยังส่วนประกอบต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ในด้านคุณภาพที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ [3] ส่วนวิศวกรรมคันเซ เป็นเทคนิคเชิงวิศวกรรมในการแปลความรู้สึกและความต้องการของผู้ใช้หรือลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ แล้วนำมากำหนดเป็นตัวแปรที่นำมาใช้ในการออกแบบ หรือรวบรวมความต้องการเชิงอารมณ์ของลูกค้าและกำหนดเป็นตัวแบบการพยากรณ์เชิงคณิตศาสตร์ของความต้องการเชิงอารมณ์ที่มีผลต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ [4]



รูปที่ 2 รูปแบบพื้นฐาน QFD [8]

จากเหตุดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยได้พบปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่ตรงกับความต้องการของลูกค้า ของกลุ่มผู้ผลิตย่านลิเภา กรณีศึกษา จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภาโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซของกลุ่มผู้ผลิตย่านลิเภา จังหวัดนครศรีธรรมราช

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD)

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ช่วยในการออกแบบและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า โดยนำข้อมูลที่ได้จากผู้ใช้หรือลูกค้ามาระบุความต้องการที่แท้จริงของลูกค้า อีกทั้งช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ [5,6] รูปแบบพื้นฐานของ QFD แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย 4 เฟส แต่ละเฟสจะแสดงผลของข้อกำหนดสำหรับการออกแบบ ซึ่งได้มาจากข้อมูลเบื้องต้นในแต่ละส่วน และความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดกับข้อมูลในการให้คะแนนความสัมพันธ์แบบเมทริกซ์ หลังจากนั้นนำค่าคะแนนแบบเมทริกซ์ในรูปแบบตัวเลขไปกำหนดความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น เพื่อจัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดในการออกแบบ [7]

2.2 ทฤษฎีวิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering; KE)

วิศวกรรมคันเซ (KE) เป็นการแปลความรู้สึก ความประทับใจ และความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ให้เป็นแนวทางการออกแบบหรือข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ [9,10] วิศวกรรมคันเซได้รวบรวมอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าเข้าไว้ด้วยกัน [11] ซึ่งหลักการทั่วไปของวิศวกรรมคันเซ มีดังนี้ [12] 1) การเลือกกลุ่มตลาดหรือผลิตภัณฑ์ ควรเริ่มจากการตัดสินใจที่จะสร้างหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเฉพาะ 2) การกำหนดกรอบด้านความรู้สึก รวบรวมคำแสดงความรู้สึกที่เกี่ยวข้องกับตัวผลิตภัณฑ์ที่ต้องการศึกษา 3) การกำหนดกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ระบุออกเป็นเชิงกายภาพให้ตรงกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้กำหนดโดยสามารถทำคู่ขนานกับการกำหนดกรอบด้านความรู้สึกของผลิตภัณฑ์ 4) การสังเคราะห์ คือ การเชื่อมโยงกันระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และ 5) ทวนสอบความถูกต้องและการสร้างแบบจำลอง คือ การนำผลที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้อง โดยทำการสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปสอบถามกลุ่มเป้าหมายอีกครั้ง โดยนำข้อมูลที่ผ่านการคัดเลือกจากการสังเคราะห์มาทำการทวนสอบอีกครั้ง

2.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ ใช้แบบสอบถามการวิจัยจำนวน 6 ชุด ดังต่อไปนี้

แบบสอบถามที่ 1 สำหรับศึกษาความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา แบบสอบถามที่ 2 สำหรับสำรวจระดับคะแนนของปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ แบบสอบถามที่ 3 สำหรับการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก แบบสอบถามที่ 4 สำหรับกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ แบบสอบถามที่ 5 สำหรับการ

กำหนดเชิงคุณลักษณะซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามที่ 3 และแบบสอบถามที่ 4 โดยเป็นการสำรวจและรวบรวมความต้องการ อารมณ์ และความรู้สึกของลูกค้า อีกทั้งยังสามารถให้ข้อมูลคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสอดคล้องกัน และแบบสอบถามที่ 6 สำหรับการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายที่มีต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา

นอกจากนี้ ในส่วนของผู้ประเมินแบบสอบถามได้กำหนดขอบเขตผู้ประเมินที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และระยะเวลาการตอบแบบสอบถาม โดยสามารถจัดกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถาม ดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มเป้าหมายที่เป็นลูกค้าเพศหญิง อายุกลางคนขึ้นไป กลุ่มผู้ผลิตสินค้าหรือตัวแทนจำหน่าย และกลุ่มผู้สนใจผลิตภัณฑ์หัตถกรรมจักสานจากย่านลิเภา จำนวน 245 ตัวอย่าง เนื่องจากผู้ตอบแบบสอบถามในกลุ่มนี้สามารถให้ข้อมูลในส่วนของความต้องการ ระดับคะแนนของปัจจัย คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และความพึงพอใจ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ จึงสามารถประเมินในส่วนของแบบสอบถามที่ 1 แบบสอบถามที่ 2 แบบสอบถามที่ 4 และแบบสอบถามที่ 6

กลุ่มที่ 2 กลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ ผู้เชี่ยวชาญด้านการขึ้นรูปหัตถกรรมจักสานย่านลิเภา และกลุ่มนักการตลาด เนื่องจากผู้ประเมินแบบสอบถามในกลุ่มนี้จำเป็นต้องเป็นผู้มีประสบการณ์ ความรู้ และความเชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ ด้านการขึ้นรูปหัตถกรรมจักสานย่านลิเภา และด้านการตลาด ดังนั้นจึงสามารถรวบรวมกลุ่มตัวอย่างได้จำนวน 51 ตัวอย่าง โดยดำเนินการประเมินในส่วนของแบบสอบถามที่ 3

กลุ่มที่ 3 กลุ่มเป้าหมายที่เป็นลูกค้าเพศหญิง อายุกลางคนขึ้นไป เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 1 แต่เนื่องด้วยกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามในกลุ่มนี้มีการกำหนดขนาดน้อยกว่ากลุ่มที่ 1 เนื่องจากแบบสอบถามที่ใช้ในกลุ่มนี้มีระยะเวลาการตอบแบบสอบถามที่มากกว่าแบบสอบถามในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ดังนั้นจึงต้องลดขนาดกลุ่มตัวอย่างเหลือเพียง 85 ตัวอย่าง จึงส่งผลให้สามารถประเมินในส่วนของแบบสอบถามที่ 5

ทั้งนี้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลในช่วง เดือน มกราคม - พฤษภาคม 2565 โดยสามารถสรุปขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัยดังนี้

1) การสำรวจความต้องการของลูกค้าเพื่อหาเสียงเรียกร้องของลูกค้า

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการสำรวจด้วยการเก็บแบบ สอบถามแบบปลายเปิด และการสัมภาษณ์ โดยคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของลูกค้า ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% และใช้สมการของ W.G. Cochran [13] เป็นสมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากร แสดงดังสมการที่ 1

$$n = \frac{P(1-P)z^2}{d^2} \quad (1)$$

เมื่อค่า n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ ค่า P คือ สัดส่วนของประชากรที่ต้องการสุ่ม (กำหนดใช้ P = 0.20) ค่า Z คือ ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (กำหนดใช้ Z = 1.96 เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 95%) ค่า d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้น (กำหนดใช้ d = 0.05 เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 95%) จากสูตรสามารถคำนวณกลุ่มตัวอย่างได้ 245 ตัวอย่าง

ดังนั้นในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของลูกค้าด้วยแบบสอบถามที่ 1 ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้า (Voice of Customer) จำนวน 245 ตัวอย่าง เพื่อจัดเรียงถ้อยคำใหม่ พร้อมทั้งจัดกลุ่มคุณลักษณะความต้องการของลูกค้า จากนั้นใช้เครื่องมือทางคุณภาพ คือ แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง และแผนผังต้นไม้ สำหรับการคัดกรองข้อมูลไม่ให้เกิดความสับสน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปจัดทำแบบสอบถามสำรวจระดับคะแนนของปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาต่อไป

2) การประยุกต์เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

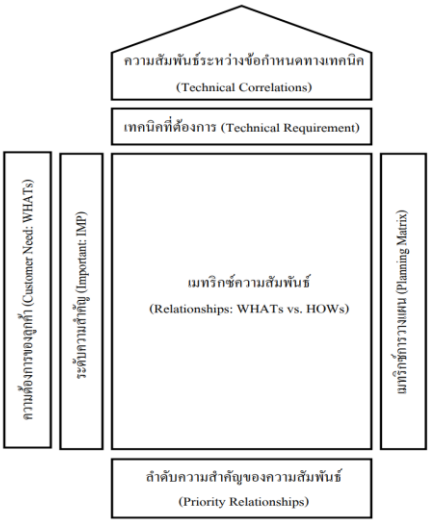
หลังจากที่ได้จัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นการนำข้อมูลเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ (HOQ) ประกอบด้วยเมทริกซ์ย่อย 7 ข้อหลัก ๆ แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย

(1) ความต้องการของลูกค้า (Customer Need; WHATs) จากการสอบถามความต้องการของลูกค้าโดยทำแบบสอบถามและสัมภาษณ์ความต้องการในผลิตภัณฑ์จำนวน 245 คน มาจัดถ้อยคำใหม่ (2) ระดับความสำคัญ (Important; IMP) คือ ข้อมูลสำหรับนำไปจัดทำ

แบบสอบถามที่ 2 เพื่อสำรวจระดับคะแนนความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ และคำนวณค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญ (3) เมทริกซ์การวางแผน (Planning Matrix) เป็นการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์รูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ เพื่อกำหนดอัตราการปรับปรุงในผลิตภัณฑ์ โดยลักษณะของเมทริกซ์การวางแผน (4) เทคนิคที่ต้องการ (Technical Requirement; HOWs) เป็นการเปลี่ยนความต้องการของลูกค้าให้เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพทางเทคนิคหรือทางวิศวกรรม โดยเกิดจากการแปลภาษาของลูกค้าให้เป็นภาษาทางเทคนิคและมีหน่วยวัดหรือเป็นคำอธิบายทั่วไปของผลิตภัณฑ์ (5) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships; WHATs vs. HOWs) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้ากับคุณลักษณะทางคุณภาพหรือทางวิศวกรรมทำให้สามารถมองเห็นว่าลักษณะทางคุณภาพต่าง ๆ มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้ามากน้อยเพียงใด โดยค่าคะแนนเป็นตัวเลข 0 คือ ไม่มีความสัมพันธ์ 1 คือ มีความสัมพันธ์น้อย 3 คือ มีความสัมพันธ์ปานกลาง และ 9 คือ มีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ (6) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิค(Technical Correlations) เป็นส่วนของหลังคาบ้าน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพหรือทางวิศวกรรมประเด็นต่าง ๆ ด้วยการระดมสมองฝ่ายที่เกี่ยวข้อง มีสัญลักษณ์แทนความสัมพันธ์ (O) คือ มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก (X) คือ มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และไม่มีสัญลักษณ์ คือไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน และ (7) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ (Priority Relationships) เป็นส่วนอยู่ใต้ถุนบ้านเป็นส่วนที่แสดงถึงความสำคัญในปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ผู้พัฒนาทราบว่าความต้องการใดและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพใดที่ต้องได้รับการเอาใจใส่มากขึ้น โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และส่วนของค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ โดยข้อกำหนดของที่มีความสำคัญจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภาต่อไป

3) การประยุกต์เทคนิควิศวกรรมคันเซ

วิศวกรรมคันเซเป็นเทคนิคที่ช่วยในการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อตอบสนองความต้องการ อารมณ์ ความรู้สึก และของลูกค้า โดยมี 5 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเมทริกซ์การวางแผน [13]

3.1) การเลือกขอบเขต เป็นการศึกษาผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา โดยมีขอบเขตของกลุ่มเป้าหมายเป็นกลุ่มนักท่องเที่ยว ผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ ผู้จำหน่าย และกลุ่มผู้สนใจผลิตภัณฑ์หัตถกรรมจักสาน โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำการพัฒนา คือ กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา

3.2) การกำหนดกรอบด้านความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์ เป็นการรวบรวมคำแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ โดยจัดทำแบบสอบถามที่ 3 เพื่อหาคำแสดงความรู้สึก โดยมีผู้ประเมินแบบสอบถาม จำนวน 51 คน จากนั้นทำการหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence; IOC) โดยค่า IOC ต้องมีค่ามากกว่า 0.5 เพื่อแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเที่ยงตรงและยอมรับได้ตามหลักเครื่องมือในการวิจัย [14]

3.3) การกำหนดกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ หรือความเกี่ยวเนื่องระหว่างความต้องการของลูกค้าต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เป็นการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนาจากนิตยสาร สื่ออินเทอร์เน็ต สิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ หรือผู้เชี่ยวชาญด้านย่านลิเภา และการสร้างแนวความคิดใหม่ที่ได้จากการผสมผสานของผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกัน จากนั้นสร้างแบบสอบถามที่ 4 โดยมีผู้ประเมินแบบสอบถาม จำนวน 245 คน จึงนำข้อมูลจากแบบสอบถามมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ยและทำการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

3.4) การคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ เป็นการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มีรูปแบบหลากหลายและมีความแตกต่างกัน จากนั้นใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) ในการแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่ตรงกับกรอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุดใช้เป็นภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์เป็นส่วนประกอบในแบบสอบถามที่ 5

3.5) การประเมินผลการสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล เป็นการสังเคราะห์ผลจากแบบสอบถามที่ 5 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันมาก คือ ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type I; QT1) คือ วิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อหาค่า R-Square Adjust หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง (Square Multiple Correlation Coefficient; MCC^2) โดยทั่วไปแล้วค่า MCC^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง +1.00 สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า $MCC^2 > 0.7$ จึงสามารถยอมรับผลได้ [15] และการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มากและมีค่า P-Value < 0.05 [16]

4) การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ตรวจทานข้อกำหนดเชิงเทคนิคและเชิงความรู้สึกเพื่อส่งข้อมูลให้กับทีมออกแบบสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา และทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่อไป

5) การประเมินความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์

สำรวจความพึงพอใจของกลุ่มลูกค้าเป้าหมายที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาแบบใหม่ โดยการลงพื้นที่เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 6 จำนวน 245 คน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา ดังวิธีการข้างต้น สามารถสรุปผลการวิจัยดังนี้

3.1 ผลการประยุกต์เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

3.1.1 ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ สำหรับผลการนำข้อมูลที่ได้มาเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ พบว่า มีรายละเอียดของผลการดำเนินงาน 7 ส่วน แสดงดังรูปที่ 4 ดังนี้

1) ความต้องการของลูกค้าผลจากการสัมภาษณ์ผู้ประเมินแบบสอบถามที่ 1 พบว่า มีความต้องการของลูกค้า 6 กลุ่มหลัก คือ รูปแบบ วัสดุ การใช้งาน คุณภาพ ความสะดวก และอื่น ๆ โดยมีความต้องการทั้งหมด 23 ความต้องการ ในส่วนนี้จะอยู่ด้านซ้ายของบ้านคุณภาพ

2) ระดับความสำคัญ ผลจากการให้คะแนนความสำคัญกับความพึงพอใจในกลุ่มด้านวัสดุที่ทำจากธรรมชาติมากที่สุด โดยมีค่าระดับความสำคัญเฉลี่ย 4.58 คะแนน ในส่วนนี้อยู่ภายในบ้านคุณภาพ

3) เมทริกซ์การวางแผน หลังจากที่ได้ผลความต้องการของลูกค้าและนำผลของค่า IMP หรือค่าเฉลี่ยเรขาคณิตจากขั้นตอนก่อนหน้า นำมาใส่ในบ้านคุณภาพ

4) เทคนิคที่ต้องการ เป็นข้อกำหนดที่ได้จากการระดมสมองของทีมนักวิจัย ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และผู้ผลิตย่านลิเภา เพื่อหาความสัมพันธ์และข้อกำหนดที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อีกทั้งยังกำหนดเป้าหมายทางเทคนิคหรือเป็นค่าเป้าหมายที่สามารถวัดได้ โดยมีข้อกำหนดทางเทคนิคทั้งหมด 21 ข้อกำหนด

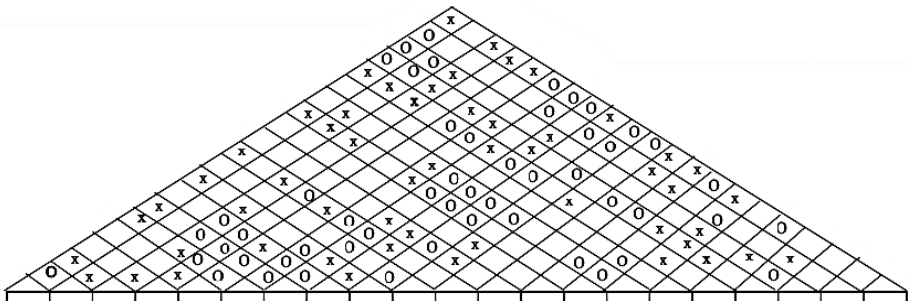
5) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ เป็นการให้การให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้าและข้อกำหนดเทคนิคที่ต้องการ พบว่า ได้ผลการให้คะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการให้คะแนนได้ทำการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ ๆ โดยใช้การระดมสมองของทีมนักวิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และผู้ผลิตย่านลิเภา

6) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิค ผลจากการระดมสมองของฝ่ายที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดที่จะนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ย่านลิเภาและตรงต่อความต้องการของลูกค้า

7) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ พบว่าจากการประยุกต์ใช้แผนภาพพาเรโต เพื่อช่วยในการคัดกรองข้อกำหนดที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา ประกอบด้วยลำดับคะแนนลำดับแรก ๆ 15 ข้อ แสดงดังรูปที่ 5

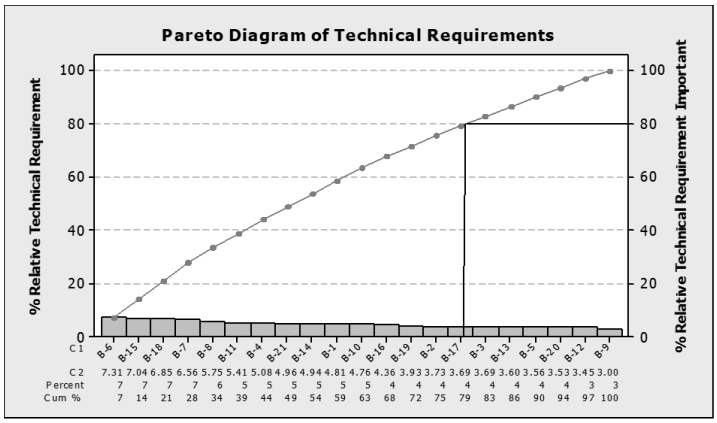
สัญลักษณ์แสดงความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค	
สัญลักษณ์	ความหมาย
o	มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก
x	มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย
ช่องว่าง	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

สัญลักษณ์ค่าการเคลื่อนไหวของค่าเป้าหมาย	
สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	ยิ่งมากยิ่งดี
○	เป้าหมายเหมาะสม
↓	ยิ่งน้อยยิ่งดี



ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Requirement)			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
			○	○	↑	○	○	↑	○	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	○	↑	○	↑	○	↑	○	
			รูปแบบ									คุณภาพ					วัสดุ			การใช้งาน			อื่น ๆ	
ความต้องการของลูกค้า (Customer Requirement)		No.	ขนาด	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีความหลากหลาย	ลวดลาย	โทนสี	มีความสวยงาม	แนวความคิด	มีความพิเศษและไม่เหมือนลักษณะเฉพาะตัว	มีเทคนิคการผลิตที่เหมาะสมกับวัสดุนำมาผลิตภัณฑ์	อายุการใช้งาน	ความประณีตและความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์	ความคงทนของวัสดุและสี	การป้องกันสิ่งรบกวน	ความคงทนของโครงสร้าง	วัสดุที่ใช้ในการผลิต	ความปลอดภัยของวัสดุ	วัสดุคุณค่า	การใช้งานเหมาะสม	การพกพา	มีความสะดวกต่อการดูแลรักษา	ราคา	
		No.	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15	B-16	B-17	B-18	B-19	B-20	B-21	
		IMP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
รูปแบบ	สวยงาม	A-1	4.42	3		3	9	9	9	9	9	3	1	9	3	1		9	3	3			3	9
	ลวดลายสวยงาม	A-2	4.34			3	9	9	9	9	9	3	1	9	3	1		3	3	3			3	3
	มีความทันสมัย	A-3	4.25	9		3	9	3	9	3	9	9		9	1	1	3	3	3	9	3		1	9
	รูปทรงมีความหลากหลาย	A-4	4.19	9	1	9	3	1	3		9	3		3			3	9	3	3	3			1
	โทนสีสวยงามและหลากหลาย	A-5	4.10			3	3	9	9	3	1			3	3			3		3				1
	แสดงเอกลักษณ์ของท้องถิ่น	A-6	4.34			3	9	3	9	9	9			9				9		3				9
คุณภาพ	ไม่มีตำหนิหรือรอยแตก	A-7	4.29				1		9	9		3	1	9	3	1	9	3		1	1	1	1	
	ไม่เป็นเชื้อรา	A-8	4.35						9		1		9	1	3	9		9	3	1	9	1	9	
	เงางาม	A-9	4.31			3	9	3	9		1	9	9	3	3	9		1		3		1	3	1
	สีไม่ซีดหรือลอกออกง่าย	A-10	4.29				3	9	9			9	3	1	9	3		1	1	1	3	3	3	
	อายุการใช้งานที่ยาวนาน	A-11	4.26							9		3	9	9	3	9	9	9	3	1	9		3	1
	ผลิตภัณฑ์ไม่เสียรูปทรง	A-12	4.29	3	1	3			9	9	3	1	3	1			9	9	3	3	9	3	3	3
	งานสานมีความละเอียดประณีต	A-13	4.42	3		9	9	3	9	9	9		3	9			3			3			1	9
วัสดุ	ใช้วัสดุมีมาตรฐาน	A-14	4.44		1				1	9	3	3	9	1	9	9	9	9	9	3	1	1	3	9
	ใช้วัสดุที่ทำจากธรรมชาติ	A-15	4.58				9	3	3	9	3	1	3	3	3	9	9	9	9	3	1	3	3	1
	ทนต่อทุกสภาวะอากาศ	A-16	4.29					3					9		9	3	9	9	3	1	9	3	3	1
ความละเอียด	น้ำหนักเหมาะสม	A-17	4.45	3	9				1				1				1	3	3	3	9	9		1
	ขนาดที่เหมาะสม	A-18	4.36	9	9	3			3	1	3	1	1				1	3	3	3	9	9	1	1
การใช้งาน	เหมาะสมต่อการใช้งาน	A-19	4.44	9	9	3					9	1	3		1		3	1	3		9	9	1	3
	สะดวกต่อการใช้งาน	A-20	4.41	9	9	3					3							1	3	1	9	9	3	3
	พกพาได้สะดวก	A-21	4.36	9	9	9					3							1	9	3	9	9	3	3
	รองรับน้ำหนักได้ดี	A-22	4.27	9	9					9		3				9	1	3	3	9	1	1	3	
อื่น ๆ	ราคามีความเหมาะสม	A-23	4.34	3	3	3	9	3	9	9	9		9	9	3	3	3	9	3	3	9	1	9	9
ลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์			10	14	16	7	18	1	4	5	21	11	6	20	17	9	2	12	15	3	13	19	8	รวม
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์			338.28	262.55	259.53	357.03	250.13	513.94	461.32	404.74	211.14	334.64	380.85	242.84	253.52	347.51	494.95	306.69	259.77	481.88	276.53	248.21	348.76	7034.81
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ			4.81	3.73	3.69	5.08	3.56	7.31	6.56	5.75	3.00	4.76	5.41	3.45	3.60	4.94	7.04	4.36	3.69	6.85	3.93	3.53	4.96	100.00
เป้าหมายทางด้านเทคนิค			ผลิตภัณฑ์มีขนาดที่เหมาะสม	ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักที่เหมาะสม	สามารถเลือกขนาดรูปร่างได้หลากหลาย	ลวดลายมากกว่า 2 ลวดลาย	โทนสีมากกว่า 2 สี	ผู้พึงพอใจมากกว่า 80 % ขึ้นไปว่าสวยงาม	สามารถผสมผสานลวดลายได้หลากหลาย	ความโค้งเว้าเรียบไม่มีรอยคม	เป็นวิธีการผลิตให้เหมาะสมกับวัสดุนำมาของผลิตภัณฑ์	อายุการใช้งานมากกว่า 3 ปี	ไม่มีตำหนิการขึ้นรูป	สีไม่ลอกและซีดภายใน 3 ปี	คราบ/ตะไคร่ลดความเหมาะสม	โครงสร้างสามารถรองรับน้ำหนักของวัสดุการผลิตได้เหมาะสม	ใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงในการผลิต	ใช้วัสดุที่มีความปลอดภัย	ใช้วัสดุที่มีคุณภาพและสวยงาม	สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม	สามารถพกพาได้สะดวก	สามารถทำความสะอาดได้ง่าย	ราคามีความเหมาะสมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์	

รูปที่ 4 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา



รูปที่ 5 แผนภาพพาเรโตสำหรับจัดลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ผลิตภัณฑ์กระเป๋าย่านลิเภา

3.2 ผลการประยุกต์เทคนิควิศวกรรมคันเซ

3.2.1 ผลการกำหนดกรอบด้านความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากการสำรวจในกลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาได้แสดงออกทางความต้องการด้านความรู้สึกสูงสุด 15 คำแสดงความรู้สึก จากทั้งหมด 32 คำแสดงความรู้สึก ซึ่งเป็นคำแสดงความรู้สึกผ่านการคัดกรองจากผู้เชี่ยวชาญ พร้อมทั้งผ่านการประเมินโดยมีค่า IOC > 0.5 เนื่องจากคำแสดงความรู้สึกมีความหมายคล้ายคลึงกัน ดังนั้น ผู้เชี่ยวชาญจึงรวมความรู้สึกน่าสนใจและโดดเด่นเข้าด้วยกันจนกลายเป็น “โดดเด่นน่าสนใจ” และตัดคำแสดงความรู้สึก จำนวน 17 คำ เพราะพบว่า คำเหล่านั้นไม่สื่อถึงผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์

3.2.2 ผลการกำหนดความเกี่ยวเนื่องระหว่างความต้องการของลูกค้าต่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จำนวนทั้งหมด 11 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก และ 23 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย โดยคัดเลือกเฉพาะคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยทั้งหมดของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสำรวจข้อมูล คือ 4.30 จากนั้น นำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้มาระดมสมองเพื่อคัดกรองคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่า คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดกรอง โดยมีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและย่อย คือ 7 และ 14 ตามลำดับ

3.2.3 การคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ พบว่า ภาพผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ในแต่ละคุณลักษณะมีความแตกต่างกันหลากหลายแบบ แต่เนื่องจากภาพตัวอย่างผลิตภัณฑ์มีจำนวนมากเกินไป จึงได้ดำเนินการคัดเลือกเพื่อให้เหลือเพียงภาพที่สามารถตอบโจทย์และควบคุมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์ก่อนหน้าได้มากที่สุด จึงระดมสมองกับผู้เชี่ยวชาญเพื่อคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ผลการระดมสมองสามารถ สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุด 5 ภาพ โดยควบคุมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่ผ่านเกณฑ์ก่อนหน้าได้มากที่สุด จำนวน 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย แตกต่างกันหลากหลายแบบ แต่เนื่องจากภาพตัวอย่างผลิตภัณฑ์มีจำนวนมากเกินไป จึงได้ดำเนินการคัดเลือกเพื่อให้เหลือเพียงภาพที่สามารถตอบโจทย์และควบคุมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์ก่อนหน้าได้มากที่สุด จึงระดมสมองกับผู้เชี่ยวชาญ เพื่อคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ผลการระดมสมองสามารถ สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุด 5 ภาพ โดยควบคุมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่ผ่านเกณฑ์ก่อนหน้าได้มากที่สุด จำนวน 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย

3.2.4 ผลการแสดงถึงระดับคะแนนค่าเฉลี่ยของคำแสดงความรู้สึกที่มีต่อภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ เป็นการหาคะแนนค่าเฉลี่ยเพื่อดูแนวโน้มของข้อมูล พบว่าในแต่ละคำแสดงความรู้สึกเมื่อพิจารณาจากภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์แล้ว คำแสดงความรู้สึกนั้น ๆ มีความโดดเด่นในภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน

3.2.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสองของผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์โดยเป็นค่าที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ค่าคะแนนคำแสดงความรู้สึก และภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ พบว่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ขนาดกระเป๋า รูปแบบกระเป๋า ลักษณะกระเป๋า การใช้งาน โทนสีกระเป๋า และรูปทรงกระเป๋า ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 สำหรับผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ						คำแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์	ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์สำหรับแนวทางการออกแบบ	MCC[2]
	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	PCC	P-Value	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	CS	P-Value			
1	ขนาดกระเป๋า	0.899	0.000	กระเป๋ามีขนาดเล็ก	1.012	0.000	ประณีต		0.75
				กระเป๋ามีขนาดกลาง	0.872	0.000			
		1.021	0.000	กระเป๋ามีขนาดเล็ก	1.056	0.000	สร้างสรรค์		0.75
				กระเป๋ามีขนาดกลาง	1.004	0.000			
2	รูปแบบกระเป๋า	0.525	0.000	กระเป๋ามีรูปแบบสั้น	0.548	0.000	ประณีต		0.75
				กระเป๋ามีแบบยาว	0.506	0.000			
		1.472	0.000	กระเป๋ามีรูปแบบสั้น	1.339	0.000	สร้างสรรค์		0.75
				กระเป๋ามีแบบยาว	1.490	0.000			
		1.347	0.000	กระเป๋ามีรูปแบบสั้น	1.052	0.000	โดดเด่นดูน่าสนใจ		0.74
				กระเป๋ามีแบบยาว	1.242	0.000			
		0.224	0.003	กระเป๋ามีรูปแบบสั้น	0.533	0.000	สะดวกสบาย		0.71
				กระเป๋ามีแบบยาว	0.488	0.000			
		0.880	0.000	กระเป๋ามีรูปแบบสั้น	0.252	0.006	น่าพกพา		0.75
				กระเป๋ามีแบบยาว	0.548	0.000			
3	ลักษณะกระเป๋า	0.414	0.009	กระเป๋ามีลักษณะก้นขยาย	0.433	0.009	สร้างสรรค์		0.75
				กระเป๋ามีลักษณะข้างขยาย	0.373	0.000			
		1.062	0.003	กระเป๋ามีลักษณะก้นขยาย	1.067	0.003	ดีไซน์เก๋		0.75
				กระเป๋ามีลักษณะข้างขยาย	0.820	0.048			
		0.657	0.003	กระเป๋ามีลักษณะก้นขยาย	0.639	0.027	ดูเป็นธรรมชาติ		0.70
4	การใช้งาน	0.904	0.000	จัดเก็บง่าย	0.882	0.000	ดีไซน์เก๋		0.75
				พกพาสะดวก	0.902	0.000			
		0.073	0.000	พกพาสะดวก	0.589	0.000	เรียบง่าย		0.77
		0.559	0.001	จัดเก็บง่าย	0.745	0.002	สะดวกสบาย		0.71
		0.746	0.011	พกพาสะดวก	0.521	0.000	น่าพกพา		0.75
5	โทนสีของกระเป๋า	1.842	0.001	โทนสีอ่อน	1.791	0.001	โดดเด่นดูน่าสนใจ		0.74
				โทนสีทึบ	1.927	0.001			
6	รูปทรงกระเป๋า	0.437	0.027	กระเป๋ามีรูปทรงแบบโค้ง	0.784	0.015	น่าพกพา		0.75

3.2.6 ผลการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา เป็นการแปลงความต้องการของลูกค้าด้วยเทคนิค QFD เพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา พบว่าได้ข้อกำหนดทางเทคนิคด้านต่าง ๆ ส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ หรือบ้านคุณภาพได้ 15 ข้อ เนื่องจากเทคนิค QFD เป็นเพียงการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้า จึงนำวิศวกรรมคันเซมาสนับสนุนการวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สื่อถึงอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้า ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งสิ่งที่ได้คือข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงเทคนิค โดยสามารถสื่อถึงอารมณ์ และความรู้สึกของลูกค้าเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ จึงสามารถกำหนดข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่สื่อถึงความรู้สึกได้จำนวนทั้งหมด 8 คำแสดงความรู้สึก ได้แก่ ประณีต ดีไซน์เก๋ โดดเด่นน่าสนใจ ดูเป็นธรรมชาติ เรียบง่าย

สะดวกสบาย สร้างสรรค์ และน่าพกพา แต่เนื่องจากทีมออกแบบและผู้เชี่ยวชาญได้ใช้คำแสดงความรู้สึก 3 คำหลัก ๆ คือ สร้างสรรค์ เรียบง่าย และโดดเด่นน่าสนใจ พร้อมนำแรงบันดาลใจในด้านการออกแบบเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ตอบสนองความต้องการของลูกค้า จึงสามารถสรุปข้อกำหนดในการออกแบบและขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาได้จำนวน 19 ข้อ จากจำนวนทั้งหมด 21 ข้อ เนื่องจากมีข้อกำหนด 2 ประเด็นที่คล้ายกันคือ ขนาดและการใช้งานของกระเป๋าสตางค์

ดังนั้นผลการออกแบบผลิตภัณฑ์ จะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของการขึ้นรูปของผู้ผลิต ความนิยมและความเหมาะสมของลูกค้า ดังนั้นจึงมีรายละเอียดการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้ 1) ผลิตภัณฑ์มีความสวยงาม โดยออกแบบความสวยงามในหลากหลายมิติ เกิดจากการใช้วัสดุธรรมชาติเพื่อส่งเสริมวัสดุในท้องถิ่น 2) วัสดุที่ใช้ในการผลิต ขึ้นรูปโดยใช้วัสดุธรรมชาติที่มีความแข็งแรง มีลักษณะเหนียวและดูเป็นธรรมชาติ 3) การใช้งานเหมาะสม มีลักษณะการใช้งานที่เหมาะสม อาทิเช่น มีการจัดเก็บได้ง่าย พกพาสะดวก เป็นต้น อีกทั้งมีการใช้งานที่เข้ากับโอกาสต่าง ๆ และสามารถใช้สำหรับเป็นของฝากที่ระลึกได้อย่างเหมาะสม 4) แนวทางการสาน มีลักษณะแนวการสานที่ผสมผสานกันอย่างลงตัว 5) ความทันสมัยและเป็นเอกลักษณ์ 6) ความประณีตและความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์มีสภาพเรียบร้อย ไม่มีตำหนิที่เกิดจากการขึ้นรูป 7) ลวดลายของผลิตภัณฑ์ มีการเลือกใช้ลวดลายเป็นลวดลายดั้งเดิมผสมผสานกับลวดลายที่เกิดจากกลุ่มผู้ผลิต ซึ่งมีความสวยงามเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ 8) ราคาของผลิตภัณฑ์ มีการกำหนดราคาที่เหมาะสมตามต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยคำนึงถึงราคาของชิ้นส่วน ราคาวัสดุตกแต่ง ให้อยู่ในเกณฑ์ราคาที่เหมาะสม 9) ความคงทนของโครงสร้าง มีการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการสานแบบทึบ ซึ่งมีการนำหวายขดมาขึ้นรูปโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ เพื่อสามารถที่จะรองรับน้ำหนักอย่างเหมาะสม 10) ขนาดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์มีขนาดกลาง โดยมีลักษณะทรงยาว ขนาด 12 x 20 x 4.5 เซนติเมตร เนื่องจากตอบโจทย์ต่อวัยทำงานในช่วงอายุ 25 - 45 ปี และพัฒนาให้ต่างจากกระเป๋าสตางค์ทรงดั้งเดิม 11) อายุการใช้งาน มีการออกแบบที่สามารถใช้งานได้มากกว่า 3 ปี เนื่องจากย่านลิเภามีความแข็งแรง มีความเหนียว พร้อมทั้งมีการใช้วัสดุเคลือบผิวที่มีคุณภาพ 12) ความปลอดภัยของวัสดุ การออกแบบใช้วัสดุที่มีคุณภาพ เหมาะสมและปลอดภัยของผู้ใช้งาน 13) การพกพาของผลิตภัณฑ์ มีการออกแบบให้สามารถพกพาสะดวก และมีความกะทัดรัดที่สามารถเข้ากับโอกาสต่าง ๆ 14) น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ มีการเลือกใช้วัสดุหรือชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเหมาะสมกับการใช้งาน ไม่เบาหรือหนักเกินไป 15) วัสดุตกแต่ง มีการใช้วัสดุตกแต่งเป็นหนังแท้ เพื่อสามารถตกแต่งผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ให้มีความสวยงามมากยิ่งขึ้น 16) รูปแบบของกระเป๋า มีลักษณะรูปแบบเป็นทรงยาว 17) ลักษณะของกระเป๋า มีด้านข้างที่สามารถขยายได้ เพื่อใช้สำหรับการจัดเก็บสิ่งของได้ง่ายและสะดวก 18) โทนสีของผลิตภัณฑ์ ใช้โทนสีของย่านลิเภา คือ โทนสีน้ำตาลเข้มและสีอ่อน ผสมผสานการขึ้นรูปที่ความสวยงามและสื่อถึงเอกลักษณ์เฉพาะตัวของตัวย่านลิเภา 19) รูปทรงของกระเป๋า รูปทรงของผลิตภัณฑ์ มีลักษณะภาพรวมเป็นรูปทรงโค้ง ให้ความรู้สึกน่าพกพา แตกต่างจากกระเป๋าสตางค์แบบดั้งเดิม และทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 ผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา

จากรูปที่ 6 เมื่อทำการพิจารณาเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาได้ โดยนำข้อกำหนดทั้ง 15 ข้อ ในมิติต่าง ๆ ของกระเป๋าสตางค์ เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิต การใช้งาน แนวทางการสาน ความทันสมัยและเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ความประณีตและความเรียบร้อย ลวดลาย เกณฑ์ราคา หรือความคงทนของโครงสร้าง ในเรื่องขนาด ความปลอดภัยของวัสดุ การพกพา น้ำหนักที่พอดี เสริมด้วยวัสดุตกแต่งจึงเกิดความสวยงามมากขึ้น และสุดท้ายอายุการใช้งานด้วยการใช้วัสดุที่สามารถยืดอายุการใช้งานได้มากขึ้น จากนั้นทำการพิจารณาเชิงความรู้สึกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ตอบโจทย์ต่อลูกค้ามากขึ้น โดยพบว่า ความรู้สึกของความประณีตและสร้างสรรค์ที่แสดงออกเรื่องขนาดกระเป๋า นั้นจะแสดงออกว่ามีความสมดุลพอดีสำหรับกระเป๋าเหมาะสมกับทุกวัย ส่วนความรู้สึกความประณีต สร้างสรรค์ โดดเด่นน่าสนใจ สะดวกสบาย และน่าพกพา ที่แสดงออกเรื่องรูปแบบกระเป๋า จะแสดงออกในส่วนของรูปแบบกระเป๋าแบบยาว อีกทั้งในส่วนความรู้สึกสร้างสรรค์ ดีไซน์เก๋ และดูเป็นธรรมชาติที่แสดงออกเรื่องลักษณะกระเป๋า โดยจะแสดงออกในส่วนลักษณะด้านข้างขยายของกระเป๋า ต่อมาความรู้สึกดีไซน์เก๋ เรียบง่าย สะดวกสบาย และน่าพกพาที่แสดงออกในเรื่องการใช้งาน นั้นจะแสดงออกว่ามีลักษณะที่สามารถจัดเก็บง่าย และสามารถพกพาสะดวก ส่วนภายในกระเป๋าสตางค์ มี 1 ช่อง สำหรับใส่สิ่งของและเหรียญ 2 ช่อง สำหรับใส่ธนบัตรและโทรศัพท์มือถือ ในส่วนความรู้สึกโดดเด่นน่าสนใจที่แสดงออกในเรื่องโทนสี จะแสดงออกว่าโทนสีที่มีความผสมผสานระหว่างสีเข้มกับสีอ่อน และความรู้สึกน่าพกพาแสดงออกในเรื่องรูปทรง จะแสดงออกว่าในส่วนของแบบโค้ง ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ได้รับการพัฒนาเชิงเทคนิคและเชิงคุณลักษณะนั้นสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากขึ้น

ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bupakdee [17] ได้ออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทขนมเปี๊ยะทั้งด้านรูปทรงของบรรจุภัณฑ์ ด้านการใช้งาน และด้านโครงสร้าง หรือการออกแบบเฟอร์นิเจอร์ ได้มีการเปลี่ยนแปลงในด้านรูปทรง ด้านขนาด ด้านคุณภาพ และด้านการใช้งาน [18] อีกทั้งการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับแปรงสีฟันไฟฟ้า [19] ต่อมาเป็นการประยุกต์วิศวกรรมคันเซในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องหนัง [20] และการออกแบบวัสดุสำหรับทำเฟอร์นิเจอร์ [21]

3.2.7 ผลการประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์หลังจากทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภาแบบ

ใหม่แล้ว ผู้วิจัยได้นำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจของลูกค้าที่เป็นกลุ่มเป้าหมายเดิม เพื่อศึกษาระดับคะแนนความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ พบว่า ลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านแนวทางการสานมากที่สุด เป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 และมีความพึงพอใจด้านความรู้สึกเรียบง่าย โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซเพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จากย่านลิเภา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า สามารถลดข้อร้องเรียนจากลูกค้า พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาขึ้นมามีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบ วัสดุ การใช้งาน คุณภาพ ความสะดวก และราคาโดยเฉพาะในด้านวัสดุที่ทำจากธรรมชาติที่สามารถสร้างความพึงพอใจมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยรวมการประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของเมริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้าในรูปแบบข้อกำหนดเชิงเทคนิค จากนั้นนำวิศวกรรมคันเซมาสนับสนุนการวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สื่อถึงอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้า ผลการวิเคราะห์เทคนิควิศวกรรมคันเซ พบว่า คำแสดงความรู้สึกที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ย่านลิเภา ประกอบด้วย 3 คำหลัก ๆ ได้แก่ สร้างสรรค์ เรียบง่าย และโดดเด่นน่าสนใจ โดยผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้ทำการออกแบบตามคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 6 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ คือ ขนาดกระเป๋า รูปแบบกระเป๋า ลักษณะกระเป๋า การใช้งาน โทนสี และรูปทรงผลิตภัณฑ์ จากนั้นดำเนินการขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีค่าคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านแนวทางการสานมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 และมีความพึงพอใจด้านความรู้สึกเรียบง่าย โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี 2565

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Chanmuang N, Anumanee A, Rodjaroen S, Chailikit O, Chuaychai N. Requirements for contemporary Lipao crafts products. Narkbutparitat Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University. 2022; 14(2): 138-150. Thai.

[2] Rattanapan C. Design of Yan Lipao Handicraft products of Nakhon Si Thammarat Province to suit the needs of the target groups. Academic Journal for the Humanities and Social Sciences Dhonburi Rajabhat University. 2022; 5(2): 86-101. Thai.

[3] Makmee A, Klomjit P. Evaluation of relationship between brake performances, properties of brake pad and hot-pressing process parameters by QFD technique. Naresuan University Engineering Journal. 2020; 15(1): 54-65. Thai.

[4] Thongrak A. Sitjongsataporn S. Kansei engineering: product development methodology. RMUTP Research Journal. 2014; 8(1): 197-204. Thai.

[5] Kanoksirirujisaya N, Poonikom K. Product development using quality conversion technique in the health industry Srinagarind Hospital with the design of 3D automatic transportation vehicles. Princess of Naradhiwas University Journal. 2021; 13(1): 244-261. Thai.

[6] Akao Y. Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. SteinerBooks; 2004.

[7] Yodwangjai S. Product design and development process. Journal of Engineering and Innovation. 2015; 8(1): 131-142. Thai.

[8] Trongpanich S, Kengphon A. The improvement of quality in the service of logistics business by using quality function deployment and analytic hierarchy process techniques: A case study of battery logistics. The Journal of KMITNB. 2007; 17(3): 47-56. Thai.

[9] Yodwangjai S. Product design and development for dinner chair of kansei engineering. KKU Engineering Journal. 2014; 41(2): 191-200. Thai.

[10] Faishal M, Mohamad E, Jaafar R, Rahman AA, Adiyanto O, Jatmiko HA, Novera I. Integrated approach to customer requirement using quality function deployment and Kansei engineering to improve packaging design. Asia-Pacific J. Sci. Technol. 2021; 26(2): 1-10.

[11] Nagamachi M. Kansei engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development. Applied ergonomics. 2002; 33(3): 289-294.

[12] Schütte S. Designing feelings into products. Linköping Studies in Science and Technology, Thesis. 2002; (946).

[13] Sinthavalai S, Ruengrong S. An application of house of quality (HOQ) for designing rice product as a souvenir. Naresuan University Journal: Science and Technology. 2018; 26(3): 36-51. Thai.

[14] Pasunon P. Validity of questionnaire for social science research. Journal of Social Sciences Srinakharinwirot University. 2015; 18. 375-396. Thai.

[15] Ratner B. The correlation coefficient: Its values range between+ 1/− 1, or do they?. Journal of targeting, measurement and analysis for marketing. 2009; 17(2): 139-142.

[16] Kennedy-Shaffer L. Before p< 0.05 to beyond p< 0.05: using history to contextualize p-values and significance testing. The American Statistician. 2019; 73(1): 82-90.

[17] Bupakdee T, Pachonklaew P. Packaging design for chinese pastries of community products by applying Quality function deployment. Journal of Learning Innovation and Technology. 2022; 2(1): 72-84. Thai.

[18] Ouyang C, Wu KY. A DFA-Based Wood Frame Furniture Design Using Quality Function Deployment: A Case Study in School Open Spaces. International Conference on Chemical, Material and Food Engineering. 2015;p. 517-520.

[19] Woo JC, Luo F, Lin ZH, Chen YT. Research on the sensory feeling of product design for electric toothbrush based on kansei engineering and Back propagation neural network. Journal of Internet Technology. 2022; 23(4): 863-871.

[20] Rawangwong S, Homkhiew C, Pirom T, Kamnerdwam AT, Boonyaso T. An application of kansei engineering technique for the design and development of leather product: A case study of leather manufacturer, muang district, songkhla province. Journal of Engineering and Innovation. 2022; 15(1): 144-156. Thai.

[21] Lei Q, Zhao QQ, Zhang ZF. Study on the materials design of furniture based on kansei engineering. International Journal of Engineering Innovation & Research. 2015; 4(5): 752-756

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง จังหวัดตาก

Application of Data from GNSS Continuously Operating Reference Station for Monitoring the Mine Wall in Padaeng Mine Tak

ภาณุพล เล็กประเสริฐ[1] พีรภพ โพธิ์พงษ์[1 *]

[1]สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
41/1 หมู่ 7 ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก ประเทศไทย 63000

Panupon Lekprasert[1], Perapop Popong[1 *]

[1]Department of Civil and Environmental Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak
41/1 Moo 7 Mai Ngam Subdistrict Mueang Tak District Tal Province Thailand 63000

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: perapop_p@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-7845-5423

Received: 9 October 2022, Revised: 19 May 2023, Accepted: 15 June 2023

บทคัดย่อ

สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรเป็นสถานีที่จัดสร้างไว้สำหรับการรับและส่งข้อมูลสัญญาณดาวเทียมไปยังส่วนควบคุมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบโครงข่ายจลน์ในทันที ปัจจุบันจะใช้สำหรับงานสำรวจแปลงที่ดินจัดสร้างโดยกรมที่ดิน งานวิจัยนี้จึงนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาประมวลเป็นสถานีฐานสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนตัวผนังเหมืองผาแดงจังหวัดตากโดยใช้การรังวัดแบบสถิตอย่างเร็ว โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ขั้นตอนคือ 1. การทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่เหมืองผาแดง พบว่าสถานีแม่สอด จังหวัดตาก มีความเหมาะสมมากที่สุด ซึ่งดีกว่าการใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่อยู่ไกลมาร่วมประมวลผล 2. ทดสอบความถูกต้องของค่าพิกัดโดยใช้ค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม พบว่าค่ามีความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งเฉลี่ยเท่ากับ ± 0.020 เมตรและ ± 0.040 เมตร ตามลำดับ 3. การทดสอบหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงโดยกำหนดจุดทดสอบ 12 จุดที่ครอบคลุมพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดการเคลื่อนตัว พบว่าผนังเหมืองผาแดงมีการเคลื่อนตัวที่น้อยมากโดยค่าพิกัดแนวราบมีเคลื่อนตัวไม่เกิน 0.002 เมตร และพิกัดแนวดิ่งมีการขยับตัวไม่เกิน 0.003 เมตร

คำสำคัญ การรังวัดด้วยดาวเทียม สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร ดินถล่ม งานเหมืองแร่

Abstract

Continuously operating reference station is a station established for the immediate reception and transmission of satellite data to the control stations as part of the network RTK in Thailand for Cadastral Surveying created by the Department of Lands. In this research, the satellite signal data from the continuously operating reference station is compiled as a reference station for checking the wall movement of Pha Daeng mine in Tak province by using rapid static survey. There are three steps to testing. The first step is testing for a suitable continuously operating reference station for the Pha Daeng mine area. It was found that Mae Sot Station in Tak Province was

the most suitable. The second step is testing the accuracy of the coordinates by using the coordinates obtained from the GNSS survey to compare them with the coordinates obtained from the total station. It was found that the accuracy of the average horizontal and vertical coordinates was ±0.020 meters and ±0.040 meters, respectively. The third step is testing for the displacement of the walls of Pha Daeng mine by specifying 12 test points covering the area prone to displacement. It was found that the walls of Pha Daeng mine had less movement, with the horizontal rating of no more than 0.002 meters and the vertical rating of no more than 0.003 meters.

Keywords: GNSS, CORS, Landslide, Mining

1. บทนำ

เหมืองผาแดงตั้งอยู่ที่ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เป็นเหมืองสังกะสีที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย เนื้อที่รวม 2,077 ไร่ ได้รับสัมปทานขุดขนแร่สังกะสีโดยบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ซึ่งปัจจุบันได้หมดสัมปทานและยุติการทำเหมืองในพื้นที่ดังกล่าวไปแล้ว ได้ส่งมอบพื้นที่คืนให้กรมป่าไม้ดูแลต่อไปและมีแผนดำเนินการจัดทำเหมืองผาแดงให้เป็น สวนพฤกษศาสตร์ผาแดง ตามแนวพระราชดำริของสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้ากรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯสยามบรมราชกุมารี เพื่อที่จะฟื้นฟู อนุรักษ์ ขยายพันธ์ป่าไม้ในพื้นที่ให้อุดมสมบูรณ์เหมือนเดิมรวมถึงพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวต่อไป ในอนาคต โดยความร่วมมือของกรมป่าไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช องค์การสวนพฤกษศาสตร์ ทส. และบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) โดยจะทำในรูปแบบของสวนเอเดน (The Eden Project) ประเทศอังกฤษ ซึ่งเป็นที่เก็บรักษาพันธุ์พืชต่างๆ ทั่วโลกแต่เดิมก็เคยเป็นเหมืองแร่มาก่อนเช่นเดียวกัน [1],[2]

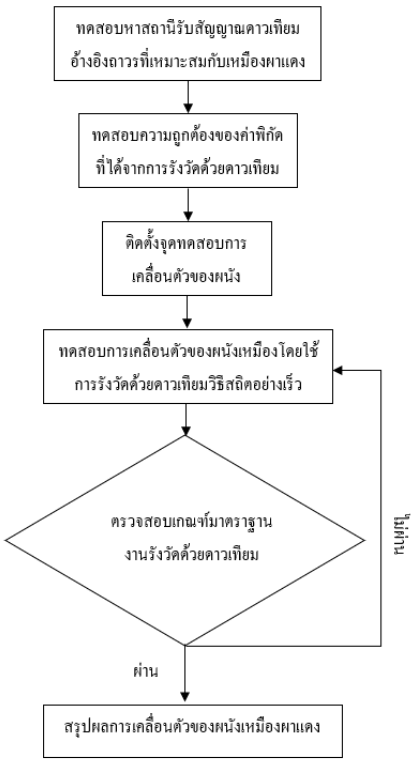
จากที่กล่าวขั้นต้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรหาวิธีในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ทำเหมืองเป็นลักษณะของภูเขาที่มีความสูงชัน พื้นดินบางส่วนถูกน้ำกัดเซาะและมีร่องรอยการถล่มเกิดขึ้น อีกทั้งพื้นที่เหมืองยังอยู่ใกล้รอยเลื่อนของเปลือกโลกที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวขึ้นได้ โดยการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างประเทศจีนที่นำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียมโดยใช้เทคนิค Satellite-Based Augmentation Systems (SABS) และInterferometric Syntheti Aperture Radar (InSAR) มาทำการตรวจสอบสภาพการเปลี่ยนแปลงของเหมืองและเสถียรภาพของตัวเหมืองบริเวณเทือกเขาเทียนชานและยังมีการนำอากาศไร้คนขับมาทำการวางแผนในการขุดเหมือง ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและตรวจสอบเสถียรภาพของผนังเหมือง [3],[4] ส่วนประเทศแถบทวีปยุโรปและทวีปแอฟริกาใต้ได้มีการนำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียมมาใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวเหมือง รวมถึงใช้ในการวางแผนและขุดขนถ่านหินเช่นกัน [5-7] ในส่วนของเหมืองแม่เมาะ ประเทศไทย ได้นำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียม การใช้กล้องประมวลผลรวมแบบอัตโนมัติ (Robotic Total Station) การใช้เครื่องสแกนเนอร์ และการใช้คลื่นเรดาร์ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง การวางแผนและการหาปริมาตรการขุดขนทรัพยากรในเหมือง [8] จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองที่หลากหลาย ทำให้ผู้ประกอบการเหมืองแร่หรือหน่วยงานที่ดูแลเหมืองแร่สามารถเลือกใช้เทคโนโลยีให้เหมาะสมกับงบประมาณและลักษณะทางกายภาพของเหมืองนั้น ๆ สำหรับการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเหมืองผาแดงควรเลือกใช้วิธีการตรวจสอบที่ไม่ซับซ้อน ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบไม่สูงมาก เนื่องจากเป็นเหมืองที่ปิดตัวลงแล้วไม่ได้มีหน่วยงานที่เชี่ยวชาญด้านเหมืองแร่ดูแลรับผิดชอบ ซึ่งวิธีการเหมาะสมในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเหมืองผาแดงคือการใช้เทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียมเพราะเป็นวิธีที่มีการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบไม่สูงมาก

และใช้กำลังคนในการดำเนินงานเพียงคนเดียวก็สามารถเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองได้

ในปัจจุบันกรมที่ดินได้พัฒนาระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันที (RTK GNSS Network) สำหรับใช้ในการรังวัดแปลงที่ดินให้มีความถูกต้องและมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น [9] ซึ่งจากการทดสอบการหาความถูกต้องเชิงตำแหน่งพบว่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตรซึ่งสามารถใช้ในการรังวัดแปลงที่ดินได้ เนื่องจากระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีจะมีสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร (Continuously Operating Reference Station, CORS) ส่วนประกอบของระบบ โดยการทำงานของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมีหน้าที่ในการรับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมตลอดเวลาและส่งข้อมูลสัญญาณที่ได้ไปยังส่วนควบคุม (Server) ซึ่งสามารถนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร มาใช้ในการรังวัดตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองได้ โดยลงทะเบียนขอใช้งานระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีได้ผ่านระบบออนไลน์ของกรมที่ดิน ในปัจจุบันพบว่ามีสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ใกล้กับเหมืองผาแดง จังหวัดตากมีอยู่ 3 สถานีคือ สถานีแม่สอด สถานีอุ้มผาง และสถานีบ้านตาก จึงสามารถนำสถานีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อให้การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงมีความสะดวกยิ่งขึ้น อีกทั้งยังใช้ประโยชน์จากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรให้คุ้มค่ามากยิ่งขึ้นด้วย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเริ่มจากการทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับเหมืองผาแดง โดยคัดเลือกสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่อยู่ใกล้กับเหมืองผาแดงจำนวน 3 สถานีและนำข้อมูลสัญญาณดาวเดียวมาประมวลผลเป็นสถานีฐานเพื่อทดสอบกับหมุดควบคุมที่มีอยู่บริเวณเหมืองผาแดง เมื่อได้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับเหมืองผาแดงแล้วจะทำการทดสอบหาความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม โดยนำข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาเป็นสถานีฐานและทำการทดสอบหาค่าพิกัดด้วยวิธีสถิตอย่างเร็ว โดยทดสอบ 4 รูปแบบคือ การใช้สถานีแม่สอด สถานีบ้านตาก และสถานีอุ้มผางสลับกันเป็นสถานีฐานทีละสถานีและแบบสุดท้ายจะนำสถานีทั้งสามเป็นสถานีฐานทั้งหมด จากนั้นนำค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม ทำการติดตั้งจุดทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง หลังจากนั้นทำการรังวัดด้วยดาวเทียมวิธีสถิตอย่างเร็วในการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง และตรวจสอบมาตรฐานการรังวัดด้วยดาวเทียมโดยอ้างอิงมาตรฐาน Federal Geodetic Control Committee 1989 (FGCC 1989) [10] ถ้าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะทำการรับสัญญาณดาวเทียมใหม่ จากนั้นจะนำค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแต่ละครั้งมาทำการเปรียบเทียบหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง ดังรูปที่ 1

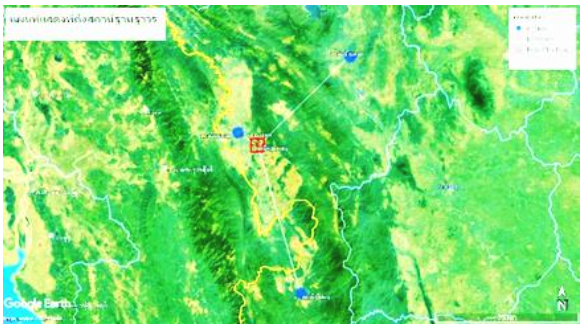


รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

2.1 การทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับเหมืองผาแดง

เนื่องจากสถานีโครงข่ายดาวเทียมอ้างอิงถาวรของกรมที่ดินมีกระจายอยู่ทั่วประเทศไทย โดยอ้างอิงจากเอกสารประชาสัมพันธ์กรมที่ดินได้กล่าวไว้ว่าในปี 2563 มีสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรจำนวน 134 สถานีและมีแผน

ขยายสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรเพิ่มเติมในปี 2564 จำนวน 47 สถานี รวมเป็นทั้งสิ้น 181 สถานี ดังนั้นจึงควรทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับพื้นที่ดำเนินงานวิจัย โดยความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการรังวัดด้วยดาวเทียมจะแปรผันตามประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัย โดย Charoenkalunyuta T, et al. พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งแปรผันตามระยะทางของเส้นฐานทั้งทางราบและทางดิ่งโดยระยะทางของเส้นฐานที่มีระยะทางที่ไกลจากหมุดทดสอบจะให้ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มากขึ้น [11] งานวิจัยนี้จึงเลือกจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ใกล้กับเหมืองผาแดงจำนวน 3 สถานี คือ สถานีแม่สอด สถานีบ้านตาก และสถานีอุ้มผาง ซึ่งมีระยะห่างกับจุดที่ทำการทดสอบเป็นระยะเท่ากับ 11.110 กิโลเมตร 61.631 กิโลเมตร และ 74.330 กิโลเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 เนื่องจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้ง 3 สถานีนี้มีระยะทางที่ใกล้กับเหมืองผาแดงที่สุด



รูปที่ 2 แผนที่ตำแหน่งเหมืองผาแดงและจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

จากนั้นทำการทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมโดยนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้ง 3 มาทำการรับสัญญาณดาวเทียมร่วมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัย โดยให้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรเป็นสถานีฐานและใช้ค่าพิกัดจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแต่ละสถานีเป็นจุดที่ใช้อ้างอิงค่าพิกัดสถานีฐาน สำหรับจุดที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของค่าพิกัดจะใช้หมุดควบคุมที่ทำการรังวัดหาค่าพิกัดโดยใช้มาตรฐานการรังวัดด้วยดาวเทียมชั้นที่ 1 บริเวณเหมืองผาแดงจำนวน 4 จุด เป็นจุดทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบจากค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบและแนวดิ่งระหว่างค่าพิกัดของจุดทดสอบและค่าพิกัดที่ได้จากการใช้ข้อมูลดาวเทียมของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาร่วมประมวลผล ดังสมการที่ (1) และ (2)

สมการที่ (1) ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบ

$$error_H = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2} \quad (1)$$

เมื่อ $error_H$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบ

ΔN คือ ค่าความแตกต่างของพิกัดระหว่างพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้ของจุดทดสอบและพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้จากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

ΔE คือ ค่าความแตกต่างของพิกัดระหว่างพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตกของจุดทดสอบและพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตกจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

สมการที่ (2) ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวดิ่ง

$$error_V = Z_T - Z_C \quad (2)$$

เมื่อ $error_V$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวดิ่ง

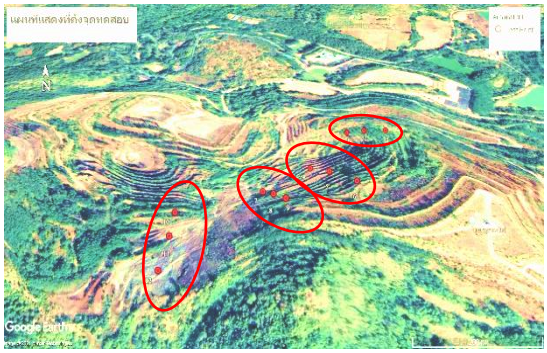
Z_T คือ ค่าพิกัดทางดิ่งของจุดทดสอบ

Z_C คือ ค่าพิกัดทางดิ่งจากการใช้ข้อมูล ของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

2.2 การทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

1. การกำหนดจุดทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง จะทำการเลือกผนังเหมืองที่เคยเกิดการถล่มหรือบริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดถล่ม โดยดูจากลักษณะของความลาดชันที่มีมากเกินไป มีร่องรอยของทางน้ำหรือมีน้ำขัง มีรอยแตกตามยอดของความลาดชัน หน้าผนังเหมืองมีการเปลี่ยนรูป เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ผนังเหมืองจะถูกน้ำจากธรรมชาติกัดเซาะ งานวิจัยนี้จึงเลือกผนังทางทิศตะวันออกและทิศใต้ซึ่งมีความลาดชันที่สูงมากกว่าบริเวณอื่นๆในเหมืองและมีมวลของดินที่อยู่ด้านบนของขอบบ่อเหมืองที่มากทำให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดการถล่มมากที่สุด หลังจากที่ได้ศึกษาลักษณะทาง

กายภาพของบ่อเหมืองด้วยสายตาแล้ว จะแบ่งผนังเหมืองออกเป็น 3 ชั้นแต่ละชั้นจะมีจุดทดสอบที่หล่อด้วยคอนกรีตมีขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.2 เมตร และลึก 0.5 เมตรตรงกลางวางหมุดที่เป็นสแตนเลสเพื่อใช้สำหรับตั้งอุปกรณ์ทดสอบ ทำให้มีจำนวนจุดทดสอบชั้นละ 4 จุดแต่ละชั้นจะสูงห่างกันประมาณ 20 เมตรจำนวน 3 ชั้นรวมทั้งสิ้น 12 จุด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งของจุดทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

2. การทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม จะใช้ค่าพิกัดของกล้องประมวลผลรวมเป็นค่าเปรียบเทียบในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพิกัด โดยจะทำการรังวัดด้วยดาวเทียมที่จุดทดสอบที่สร้างไว้ 12 จุดด้วยวิธีสถิตอย่างเร็ว ใช้เวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมจุดละ 1 ชั่วโมง Epoch ละ 1 วินาที จากนั้นนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมมาทำการประมวลผลโดยให้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแม่สอดเป็นสถานีฐาน เมื่อได้ค่าพิกัดของการรังวัดด้วยดาวเทียมเสร็จสิ้นแล้วจะใช้กล้องประมวลผลรวมเก็บข้อมูลค่าพิกัดที่จุดทดสอบเดียวกันกับการรังวัดด้วยดาวเทียม โดยตั้งกล้องประมวลผลรวมและเป้าสะท้อนธงหลังบริเวณหมุดควบคุมหลักที่อยู่บริเวณเหมืองผาแดง จากนั้นจะทำการตั้งเป้าสะท้อนที่จุดทดสอบ ทำการวัดความสูงของกล้องประมวลผลรวมและเป้าสะท้อน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลค่ามุมและระยะทางแล้วนำข้อมูลมาคำนวณค่าพิกัดเพื่อที่จะนำข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวมกับค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม โดยตั้งสมมุติฐานให้ค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวมมีความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่มีความน่าเชื่อถือ โดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Means Square Error) หรือเขียนย่อว่า RMSE ในแนวราบและแนวดิ่ง ดังสมการที่ (3) และ (4) เมื่อผลของการทดสอบเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ โดยค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวราบต้องไม่เกิน 3 เซนติเมตรและค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวดิ่งต้องไม่เกิน 5 เซนติเมตร

สมการที่ (3) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวราบ

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{\sum(N_t - N_s)^2 + \sum(E_t - E_s)^2}{n}} \quad (3)$$

เมื่อ $RMSE_H$ คือ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวราบ

N_t, N_s คือ ค่าพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้ของกล้องประมวลผลรวมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

E_t, E_s คือ ค่าพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตกของกล้องประมวลผลรวมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

n คือ จำนวนหมุดทดสอบ

สมการที่ (4) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวดิ่ง

$$RMSE_V = \sqrt{\frac{\sum(Z_t - Z_s)^2}{n}} \quad (4)$$

เมื่อ $RMSE_V$ คือ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวดิ่ง

Z_t, Z_s คือ ค่าพิกัดทางดิ่งของกล้องประมวลผลรวมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

2.3 การเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

1. การเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง ในการทดสอบหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองจะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทำการรับสัญญาณด้วยวิธีสถิตอย่างเร็ว (Rapid Static Survey) โดยอาศัยข้อมูลจากจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแม่สอดมาร่วมประมวลผลเป็นสถานีฐาน จากนั้นจะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรับสัญญาณดาวเทียมที่จุดทดสอบทั้ง 12 จุด แต่ละจุดจะใช้เวลา

ในการรับสัญญาณ 1 ชั่วโมง โดยรับสัญญาณดาวเทียม Epoch ละ 1 วินาที ในการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่จุดทดสอบจะต้องระมัดระวังไม่ให้ตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมคลาดเคลื่อนจากจุดศูนย์กลางของจุดทดสอบ และอ่านค่าความสูงของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมในระดับมิลลิเมตร และควรใช้ขาตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ทำด้วยไม้ที่มีน้ำหนักมากเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากแรงลม โดยทำการบันทึกหมายเลขของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ความสูงของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม เวลาที่เริ่มและสิ้นสุดการรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อใช้ในเป็นข้อมูลในการประมวลผล ทำการรับสัญญาณดาวเทียมเดือนละ 1 ครั้งเป็นเวลา 12 เดือนเพื่อนำข้อมูลค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลมาวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง

2.การประมวลผลจะใช้สัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแม่สอดเป็นสถานีอ้างอิงค่าพิกัด มาประมวลผลร่วมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่รังวัดได้จากจุดทดสอบการเคลื่อนตัว กำหนดให้ใช้ทรงรีอ้างอิง WGS84 ทำการแปลงค่าระบบพิกัดเป็นระบบ UTM Zone 47 N ใช้แบบจำลองความสูงยีออยด์ EGM 2008 โดยใช้การปรับแก้แบบลีสท์สแควร์ (Least Square Adjustment) ผ่านซอฟแวร์ที่ชื่อว่า Justin กำหนดค่า RMSE ของพิกัดที่ประมวลผลทางราบและทางดิ่งไม่ให้เกิน 2 เซนติเมตรและ 5 เซนติเมตรตามลำดับ ในกรณีที่ค่า RMSE ของพิกัดไม่ผ่านตามที่กำหนดจะใช้เทคนิคการตัดสัญญาณดาวเทียมที่มีคุณภาพต่ำออกแล้วทำการประมวลผลใหม่

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุด

การทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในการเป็นสถานีฐานในงานวิจัยนี้ได้ผลดังตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุดแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบและแนวดิ่ง และระยะห่างของเส้นฐานจากจุดทดสอบถึงสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแต่ละสถานีและผลจากการใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้งหมดมาประมวลผลร่วมกัน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุด

สถานี	เส้นฐาน (KM)	$error_H$ (M)	$error_V$ (M)
แม่สอด	11.110	0.007	0.009
บ้านตาก	61.632	0.037	-0.368
อุ้มผาง	74.331	0.031	-0.144
สามสถานีร่วม	-	0.025	-0.108

จากตารางที่ 1 แสดงผลการนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มาเป็นสถานีฐานสำหรับการทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดที่หมุดทดสอบน้อยที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.007 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง 0.009 เมตร อันดับสองคือการนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้งหมดมาประมวลผลร่วมกัน มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.025 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง -0.108 เมตร สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่มีความคลาดเคลื่อนอันดับสามคือสถานีอำเภออุ้มผาง มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.031 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง -0.144 เมตร สถานีที่มีความคลาดเคลื่อนอันดับสี่คือสถานีอำเภอบ้านตาก มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.037 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง -0.368 เมตร สังเกตุได้ว่าระยะของเส้นฐานมีความสอดคล้องกับความถูกต้องของตำแหน่งค่าพิกัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoenkalunyuta T, et al. [11]

3.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมกับกล้องประมวลผลรวมเพื่อหาความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม โดยแสดงค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดในแนวราบและแนวดิ่งดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

Point	$RMSE_H$	$RMSE_V$
1	0.014	0.037
2	0.016	0.036
3	0.018	0.037
4	0.019	0.031
5	0.017	0.034
6	0.016	0.031
7	0.017	0.024
8	0.015	0.030
9	0.020	0.024
10	0.019	0.028
11	0.014	0.036
12	0.018	0.023
$\bar{X}$	0.017	0.031

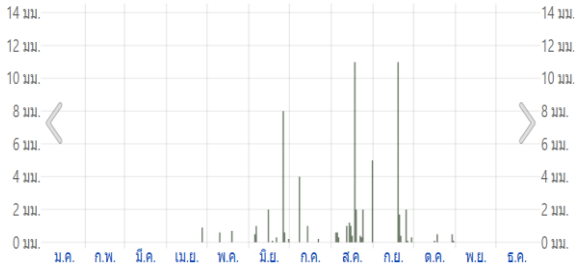
จากตารางที่ 2 พบว่าค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมมีค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 เมตร ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางดิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 0.031 เมตร โดยค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบน้อยสุดเท่ากับ 0.014 เมตรสูงสุดเท่ากับ 0.020 เมตร และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางดิ่งน้อยสุดเท่ากับ 0.023 เมตรสูงสุดเท่ากับ 0.037เมตร

3.3 ผลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

ผลการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองจะนำค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวของจุดทดสอบทั้ง 12 จุดมาทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งโดยให้ค่าพิกัดของการทดสอบครั้งที่ 1 เป็นข้อมูลอ้างอิงการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง จากนั้นจะใช้ค่าพิกัดของการทดสอบครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 12 เป็นตัวเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวตามลำดับ ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 3 ประกอบด้วยค่าทิศทางการเคลื่อนตัวในแนวแกนพิกัดสามมิติและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากจุดทดสอบค่าพิกัดของการทดสอบ

ตารางที่ 3 ผลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

Point	N (M)	E (M)	Z (M)	SD
1	-0.0002	-0.0007	0.0007	0.0001
2	0.0004	0.0001	0.0009	0.0005
3	-0.0003	0.0002	0.0002	0.0001
4	0.0005	0.0001	0.0005	0.0004
5	-0.0004	0.0004	0.0023	0.0008
6	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005
7	-0.0005	-0.0002	0.0006	0.0001
8	-0.0005	-0.0002	0.0006	0.0001
9	0.0008	0.0010	-0.0001	0.0006
10	0.0008	0.0010	-0.0001	0.0006
11	0.0003	0.0010	-0.0005	0.0003
12	0.0015	-0.0001	0.0004	0.0006
$\bar{X}$	0.0002	0.0003	0.0005	0.0004



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำฝนจากสถานีกรมอุตุนิยมวิทยาสถานีแม่สอด

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลค่าพิกัดที่ได้แต่ละจุดทดสอบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ±0.0004 เมตร แสดงให้เห็นว่าข้อมูลค่าพิกัดของจุดทดสอบที่นำมาวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองมีข้อมูลที่เกาะกลุ่มกันดี โดยมีการเคลื่อนตัวของค่าพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้, ค่าพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตก และการเคลื่อนตัวทางดิ่งมากที่สุดเท่ากับ 0.0015 เมตร 0.0010 เมตร และ 0.0023 เมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าพิกัดแต่ละตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก อาจเป็นเพราะในช่วงที่ทำการเก็บข้อมูลมีปริมาณน้ำฝนที่น้อยดังรูปที่ 4 โดยเดือนสิงหาคมและเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 มีปริมาณน้ำฝนสูงสุดอยู่ที่ 11 มิลลิเมตร ทำให้ผนังเหมืองบริเวณที่ทดสอบไม่มีการพังทลายจากปริมาณน้ำฝน

4. บทสรุป

จากการทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร (CORS) ที่เหมาะสมกับการนำมาเป็นสถานีฐาน (Base Station) สำหรับหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง พบว่าสถานีแม่สอด มีความเหมาะสมที่สุดเพราะมีระยะทางที่ใกล้กับเหมืองผาแดงและมีผลของการทดสอบความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งน้อยที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบและทางดิ่งเท่ากับ 0.007 เมตรและ 0.009 เมตรตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรหลายสถานีที่อยู่ไกลจากพื้นที่ เมื่อนำสถานีแม่สอดมาเป็นสถานีฐานสำหรับการทดสอบความถูกต้องของการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียมโดยเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม (Total Station) พบว่าการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียมมีความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งเท่ากับ ± 0.020 เมตรและ ± 0.040 เมตร ตามลำดับ ผลของการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงพบว่ามีการเคลื่อนตัวของค่าพิกัดทางแนวเหนือใต้ ค่าพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตก และการเคลื่อนตัวทางดิ่งมากที่สุดเท่ากับ 0.0015 เมตร 0.0010 เมตร และ 0.0023 เมตร ตามลำดับ โดยรวมแล้วมีการเคลื่อนตัวในแนวราบไม่เกิน 0.002 เมตร และแนวดิ่งไม่เกิน 0.003 เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเคลื่อนตัวที่น้อยมากไม่ส่งผลต่อสเถียรภาพของผนังเหมืองผาแดง ดังนั้นการนำข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาทำการรังวัดหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงสามารถทำได้โดยที่มีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของค่าพิกัดเมื่อเทียบกับกับกล้องประมวลผลรวมแล้วไม่เกิน 0.003 เมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีถ้าขาดการสนับสนุนจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอขอบคุณสำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 4 จังหวัดตาก ที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกและช่วยประสานงานพื้นที่ดำเนินงานวิจัย ขอบคุณนักศึกษาและอาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลและสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Thammanu S, Han H, Ekanayake EM, Jung Y, Chung J. The Impact on Ecosystem Services and the Satisfaction Therewith of Community Forest Management in Northern Thailand. Sustainability. 2021; 13(23):13474.

[2] The Information Technology Foundation under the Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn. The Information Technology Foundation under the Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn. learning promotion project for the conservation and restoration of the environment due to the Royal Initiative Tak Province Available from: https://www.princess-it.org/th/ [Accessed 18th September 2019].

[3] Du Q, Li G, Zhou Y, Chai M, Chen D, Qi S, Wu G. Deformation monitoring in an alpine mining area in the Tianshan Mountains based on SBAS-InSAR technology. Advances in Materials Science and Engineering. 2021; 17(1):1-5.

[4] Ren H, Zhao Y, Xiao W, Hu Z. A review of UAV monitoring in mining areas: Current status and future perspectives. International Journal of Coal Science & Technology. 2019; 6:320-33.

[5] Vrublova D, Kapica R, Gibesova B, Mudruňka J, Struś A. Application of GNSS technology in surface mining. Geodesy and cartography. 2016; 42(4):122-8.

[6] Brown N, Kaloustian S, Roeckle M. Monitoring of open pit mines using combined GNSS satellite receivers and robotic total stations. InSlope Stability 2007: Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering 2007;pp. 417-429.

[7] Boonprakob T, Dumrongchai P. The Study of Effects on Positioning Accuracy Using Real Time Kinematic Satellite Survey in Mae Moh Open-Pit Coal Mine. Engineering Journal Chiang Mai University. 2020; 27(2):78–90. Thai.

[8] Keawaram B, Dumrongchai P. Accuracy Assessment of Survey Methods for Volume Determination of Overburden and Coal Excavations in Large Open Pit Mines. Engng.jCMU. 2019;26(1):59–79. Thai.

[9] Department of Lands. RTK GNSS Network. Bangkok; 2019. Thai.

[10] Hull WV. Geometric geodetic accuracy standards and specifications for using GPS relative positioning techniques. National Geodetic Survey, NOAA; 1989.

[11] Charoenkalunyuta T, Satirapod C, Lee HK, Choi YS. Performance of network-based RTK GPS in low-latitude region: A case study in Thailand. Engineering Journal. 2012;16(5):95–103. Thai.

[12] Jing-Xiang G, Hong H. Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring. Procedia Earth and Planetary Science. 2009; 1(1):1081-8.

[13] Tumsri N, Saetern W, Sanitpod S. Movement Monitoring of the Phadaeng Mine Walls by Survey Methods by using the Base Station Data from the Department of Lands and Survey Methods with the Total Stations[dissertation]. Rajamangala University of Technology Lanna Tak; 2019.Thai.

ระบบจำลองควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลผ่าน SMS

Remote water supply control simulation system via SMS

ชัยวัฒน์ สากุล[1*] และสุรินทร์ กาญจนะ[1]

สาขาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

179 ม.3 ต.ไม้ฝาด อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

Chaiwat Sakul and Surin Kanjana

Department of Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya Trang Campus

179 Moo3 Mai Fad Sub-district, Sikao District, Trang 92150

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: chaiwat.s@rmutsv.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-6390-5156

Received: 26 January 2023, Revised: 14 June 2023, Accepted: 16 June 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบจำลองการควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลสั่งงานผ่าน SMS เหมาะสำหรับงานประปาระยะไกล เพื่อช่วยสนับสนุนการพัฒนาระบบประปาสมัยใหม่ให้มีประสิทธิภาพ และไม่เสียเวลาในการ ปิด-เปิด ระบบส่งจ่ายน้ำแต่ละครั้ง โดยใช้เทคโนโลยี Arduino, Module Sim 900 และ PLC มาประยุกต์ใช้ในการ ปิด-เปิด น้ำประปาระยะไกล เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของระบบส่งน้ำ ให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำการออกแบบเป็นชุดจำลอง โดยการออกแบบการทำงานจะมี 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่เป็นภาครับ SMS ติดตั้งอยู่บ่อประปาหลัก และส่วนที่เป็นภาคส่ง SMS ติดตั้งอยู่บ่อพักน้ำ เมื่อภาครับ SMS ได้รับข้อความ “L” จากภาคส่ง SMS ระบบส่งน้ำของบ่อประปาหลักก็จะส่งจ่ายน้ำให้บ่อพักน้ำ และเมื่อภาครับ SMS ได้รับข้อความ “H” จากภาคส่ง SMS ระบบส่งน้ำบ่อประปาหลักจะหยุดส่งจ่ายน้ำให้บ่อพักน้ำทันที ซึ่งจากการออกแบบจะใช้เวลาในการส่งข้อความ “L” ประมาณ 7.55 วินาที เมื่อบ่อพักน้ำมีระดับน้ำต่ำ และการส่งข้อความ “H” ประมาณ 7.35 วินาที เมื่อบ่อพักน้ำมีระดับน้ำสูง และบ่อประปาหลักก็จะใช้เวลาในการเปิดระบบประมาณ 3.79 วินาที และปิดระบบประมาณ 3.68 วินาที เมื่อได้รับข้อความ SMS

คำสำคัญ SMS PLC ระบบควบคุม น้ำประปาระยะไกล

Abstract

This article presents to build remote water supply control simulation system via SMS suitable for water supply work remotely to help support the development of a modern water supply system to be effective and to speed up opening and closing of water supply system each time. The system adopted Arduino technology, Module Sim 900 and PLC to apply in the off-open water supply remote. In order to control the work of the water supply system to be effective, it is designed as a replica by design. There are 2 main sections: the first part is the SMS receiver in the main water supply, and the second part is sending SMS in the reservoir. When receiving an SMS message "L" the main water supply will open water to the reservoir and when receiving an SMS message "H" water supply system will stop open water immediately. From the design, it takes time to send "L" about 7.55 seconds when the pond has low water level and sending "H" about 7.35 seconds when the reservoir water level is high and the main plumbing will take about 3.79 seconds to open the system and takes about 3.68 seconds off when receiving an SMS message.

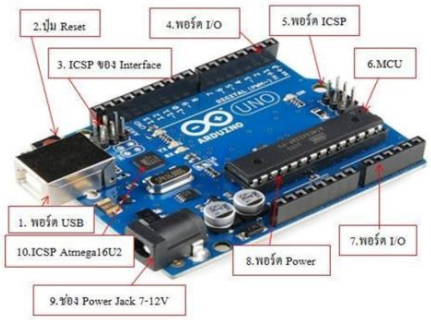
Keywords: SMS, PLC, Control system, Remote water supply

1. บทนำ

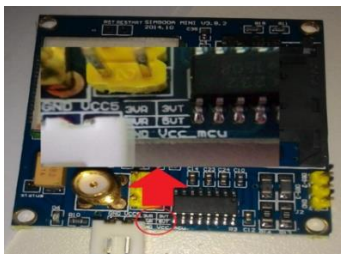
ปัจจุบันการนำเทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้บริการส่งสัญญาณ Short Message Service (SMS) ได้มีการพัฒนาใช้ในชีวิตประจำวันอย่างมากมาย ซึ่งข้อดีของการใช้งานบริการส่งข่าวสารสั้นหรือ SMS นั้น สัญญาณจะมีความเชื่อถือสูงเนื่องจากข้อมูลที่ถูกส่งออกไปจะไม่สูญหายจนกว่าจะถึงปลายทางในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ความสามารถในการคลอบคลุมพื้นที่บริการได้กว้างซึ่งสามารถทำงานได้ทุกพื้นที่ที่มีโครงข่ายของระบบที่ใช้บริการอยู่ และค่าใช้จ่ายค่อนข้างถูก มีการลงทุนน้อยและค่าบริการไม่แพง เช่น การประยุกต์ใช้ในการป้องกันการโจรกรรมทรัพย์สินภายในบ้านหรือการใช้เปิด/ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน [1] เป็นต้น จากหลักการของการส่งสัญญาณแบบ SMS สามารถนำมาประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการจัดการน้ำและการเกษตรได้ โดยที่น้ำเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิด สามารถนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภครวมถึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย [2–4] เช่น ใช้สำหรับการดื่มกิน การประกอบอาหาร ชำระร่างกาย ใช้ในการเพาะปลูก เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ ใช้เป็นแหล่งพลังงาน ใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นต้น ปัจจุบันการผลิตน้ำมาทำเป็นน้ำประปาเพื่อใช้ในชุมชนได้มีการผลิตอย่างแพร่หลาย โดยข้อดีของการใช้ระบบน้ำประปาหมู่บ้านจะทำให้ลดปัญหาในการขาดแคลนน้ำมาใช้ในชุมชนหรือหมู่บ้าน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวางระบบน้ำประปาใช้ในอาคารบ้านเรือนเพื่อสะดวกในการใช้งานและง่ายต่อการบำรุงรักษาระบบท่อประปา ในการดำเนินการระบบน้ำประปาหมู่บ้านเพื่อใช้ในชุมชนมีความจำเป็นจะต้องมีบ่อพักน้ำก่อนที่จะจ่ายน้ำออกไปตามอาคารบ้านเรือน โดยที่บ่อพักน้ำต้องได้รับน้ำจากบ่อประปาหลัก ที่ผ่านการบำบัดและกรองน้ำให้น้ำมีความสะอาดและมีคุณภาพที่ดี การส่งน้ำระหว่างบ่อประปาหลักกับบ่อพักน้ำจะใช้แรงงานคนในการเปิด-ปิดวาล์วน้ำโดยทุกๆ พื้นที่บ่อประปาหลักกับบ่อพักน้ำจะอยู่ห่างไกลกันหลายกิโลเมตร จึงสร้างความลำบากให้กับเจ้าหน้าที่ในการปิด-เปิด วาล์วน้ำเพราะเวลาปล่อยน้ำเข้าในระบบเจ้าหน้าที่จะต้องคอยตรวจเช็คตลอดเวลาว่าน้ำเต็มหรือไม่ ในการปล่อยน้ำแต่ละครั้งจะใช้เวลานานเป็นชั่วโมงทำให้เสียเวลามากในการรอจากปัญหาข้างต้นผู้วิจัยเห็นถึงความสำคัญในการส่งน้ำทางไกล จึงนำเทคโนโลยี Arduino UNO R3 และเทคโนโลยี PLC (Program Logic Controller) มาประยุกต์ใช้ในการจ่ายน้ำระหว่างบ่อประปาหลักกับบ่อพักน้ำ โดยได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างการจ่ายน้ำจากบ่อประปาหลักไปยังบ่อพักน้ำ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยี Arduino UNO R3 และเทคโนโลยี PLC (Program Logic Controller) มาอำนวยความสะดวกแก่เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบน้ำประปา และเพิ่มคุณภาพในระบบประปาชุมชน ระบบจำลองควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลสั่งงานผ่าน SMS [5-6] ที่นำเสนอในบทความนี้เป็นระบบที่สนับสนุนระบบประปาสมัยใหม่ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในชุมชนต่อไป

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินวิจัย

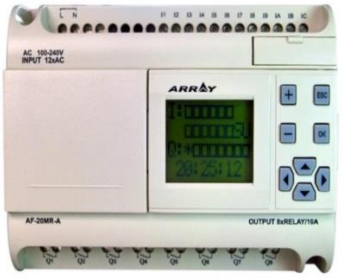
ระบบจำลองควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลผ่าน SMS ประกอบด้วยส่วนของฮาร์แวร์และส่วนของซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการส่งน้ำทางไกลสั่งการทำงานผ่าน SMS ซึ่งจะใช้ควบคุมโซลินอยด์วาลว์ ปั๊มน้ำ และ Flow switch ในส่วนของการควบคุมการทำงานระบบส่งน้ำจะใช้ PLC เป็นตัวควบคุมโดยใช้โปรแกรม Quick II และใช้บอร์ด Arduino Uno R3 ในการรับส่ง SMS โดยที่การทำงานของโปรแกรมควบคุมการส่ง SMS จะมีการทำงานโดยระบบจะรับค่าระดับน้ำมาประมวลผลแล้วทำการส่งข้อความ นั่นคือเมื่อระบบทำการประมวลผลรับค่าระดับน้ำว่ามีระดับน้ำที่ต่ำ ระบบจะส่ง SMS เป็นอักษรตัว L ไปยังภาครับ SMS และในกรณีที่ระบบประมวลผลรับค่าระดับน้ำที่สูง ระบบก็จะส่ง SMS เป็นอักษรตัว H ไปยังภาครับ SMS สำหรับโปรแกรมการควบคุมการรับ SMS จะมีการทำงานโดยระบบจะรับค่าข้อความ SMS จากตัวส่ง SMS นำมาประมวลผลและส่งต่อให้ PLC สั่งการทำงานของระบบ เมื่อระบบประมวลผลได้ว่าข้อความที่ได้รับคือตัวอักษร “L” PLC ก็จะสั่งเปิดระบบ และเมื่อระบบประมวลผลได้ว่าข้อความที่ได้รับคือตัวอักษร “H” PLC ก็จะสั่งปิดระบบ ระบบที่นำเสนอจะช่วยลดระยะเวลาในการปิด-เปิดน้ำ และช่วยอำนวยความสะดวกให้แก่เจ้าหน้าที่ผู้ใช้งาน รูปที่ 1 จะแสดงรูปแบบและส่วนประกอบต่าง ๆ ของบอร์ด Arduino รูปที่ 2 แสดง Modul SIM 900 และรูปที่ 3 แสดง PLC ARRY รุ่น AF-20MR-A ตามลำดับ



รูปที่ 1 บอร์ด Arduino



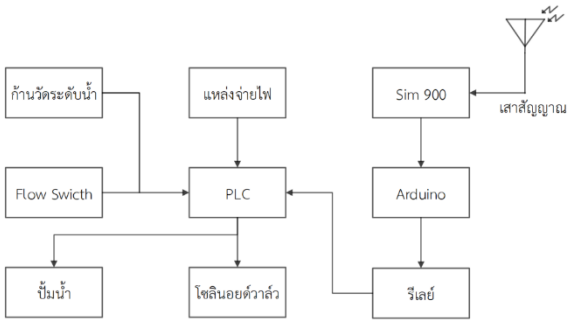
รูปที่ 2 Modul SIM 900



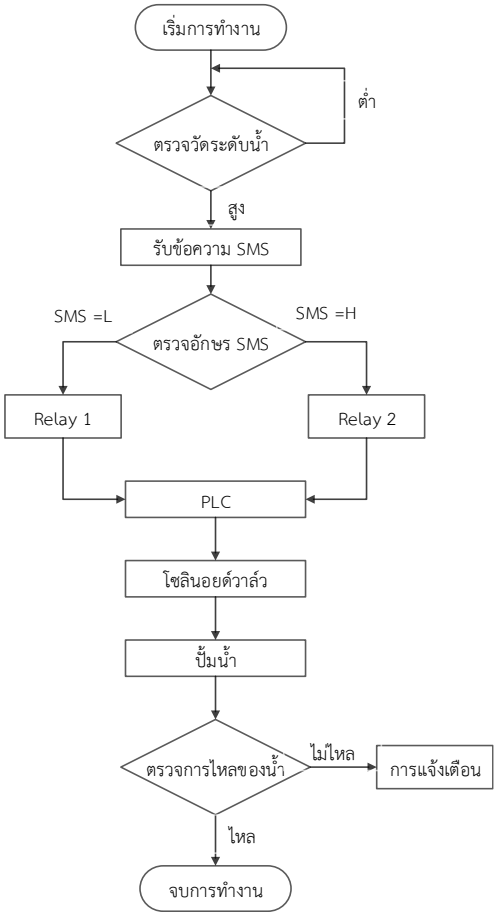
รูปที่ 3 PLC ARRY รุ่น AF-20MR-A

2.1 การทำงานภาครับ SMS ของระบบ

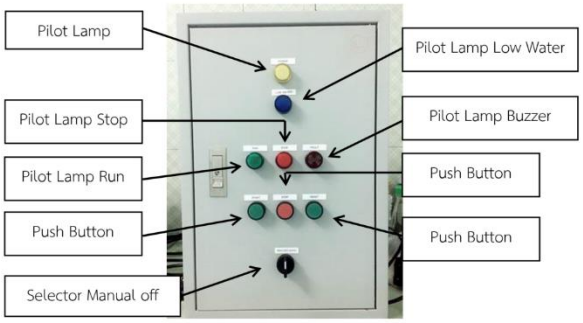
รูปที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของภาครับ SMS โดยที่บอร์ด Arduino Uno R3 จะรับค่าจาก Module SIM 900 โดยจะมี Flow Switch ทำงานร่วมกับก้านวัดระดับน้ำซึ่งมีหน้าที่ในการวัดระดับน้ำที่ต้องการ ในขณะเดียวกันระบบจะสั่งงานให้ Module Relay ให้จ่ายไฟควบคุมไปยังอินพุทของ PLC เพื่อประมวลผลสั่งงานให้ปั๊มและโซลินอยด์วาล์ว เพื่อจ่ายน้ำไปยังบ่อพักน้ำของหมู่บ้าน เช่น กรณี Module Sim 900 ได้รับข้อความ SMS=L อุปกรณ์ PLC ก็จะสั่งให้ปั๊มและโซลินอยด์วาล์วเปิด และในทางกลับกัน กรณี Module Sim 900 ได้รับข้อความ SMS=H อุปกรณ์ PLC ก็จะสั่งให้ปั๊มและโซลินอยด์วาล์วปิด โดยมีการทำงานตามโฟล์ชาร์ตในรูปที่ 5 สำหรับตู้ควบคุมภาครับ SMS แสดงได้ดังรูปที่ 6



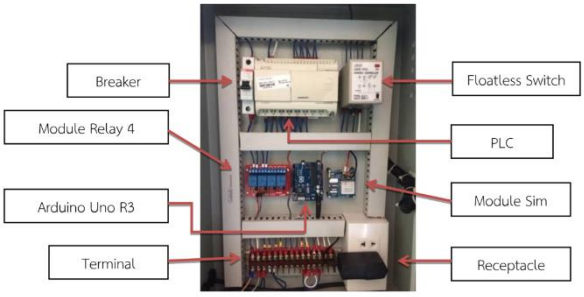
รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานภาครับ SMS



รูปที่ 5 แผนผังการทำงานภาครับ SMS



(ก) การจัดวางอุปกรณ์หน้าตู้ควบคุมภาครับ SMS



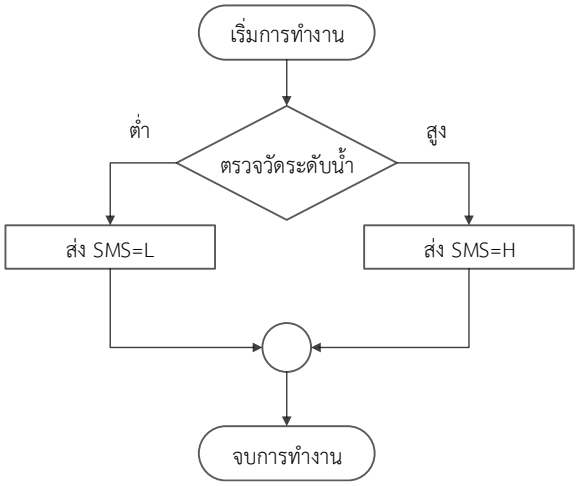
(ข) การจัดวางอุปกรณ์หน้าตู้ควบคุมภาครับ SMS

รูปที่ 6 ตู้ควบคุมภาครับ SMS

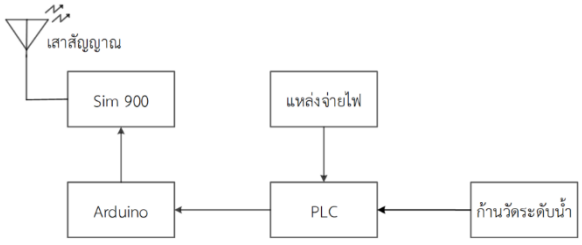
รูปที่ 6 (ก) จะประกอบด้วย Pilot Lamp Power ทำหน้าที่ แสดงสถานะไฟฟ้าจ่ายให้กับระบบมีค่า 220 VAC, Pilot Lamp Low Water ทำหน้าที่แสดงสถานะบ่อประปาหลักมีระดับน้ำต่ำ, Pilot Lamp Run ทำหน้าที่แสดงสถานะขณะระบบทำงาน, Pilot Lamp Stop ทำหน้าที่ แสดงสถานะขณะระบบหยุดทำงาน, Pilot Lamp Buzzer Aram ทำหน้าที่แสดงสถานะขณะระบบทำงานผิดพลาด, Push Button Start ปุ่มกดเริ่มการส่งน้ำในโหมดการทำงานแบบ Manual, Push Button Stop ปุ่มกดหยุดการส่งน้ำในโหมดการทำงานแบบ Manual, Push Button Reset ปุ่มกดรีเซ็ตเมื่อมีการทำงานผิดพลาดและ Selector Manual off Auto เลือกโหมดการทำงานระหว่าง Auto และ Manual

รูปที่ 6 (ข) จะประกอบด้วย Breaker ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดไฟฟ้าของระบบและตัดระบบไฟเมื่อเกิดการช็อตของอุปกรณ์ในตู้, Floatless Switch ทำหน้าที่ ตรวจเช็คระดับน้ำของบ่อประปาหลักโดยใช้ก้านอิเล็กโทรดจุ่มลงในน้ำ, Module Sim 900 ทำหน้าที่รับ SMS และส่งข้อมูลไปยัง Arduino Uno R3, Arduino Uno R3 ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลจาก Module Sim 900 และส่งเอาท์พุตไปสั่งให้ Module Relay 4 Channel ทำงาน, Module Relay 4 Channel ทำหน้าที่ตัดต่อไฟอินพุตของ PLC โดยที่ Arduino Uno R3 จะเป็นตัวควบคุม Module Relay 4 Channel, Terminal เป็นอุปกรณ์พักสายเพื่อต่อไปยังอุปกรณ์อื่นหรือรับมาจากอุปกรณ์อื่น Receptacle ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับเป็นที่รองรับการเสียบของหัวเสียบ Adapter ของ Arduino Uno R3 และ PLC ทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งควบคุมอุปกรณ์ส่งน้ำ

2.2 การทำงานภาคส่ง SMS ของระบบ



รูปที่ 7 โฟล์ชาร์ตการทำงานภาคส่ง SMS

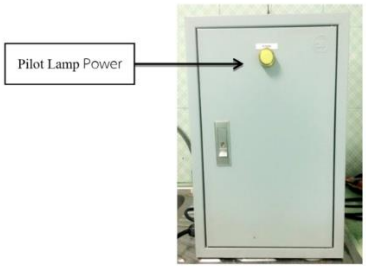


รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมการทำงานภาคส่ง SMS

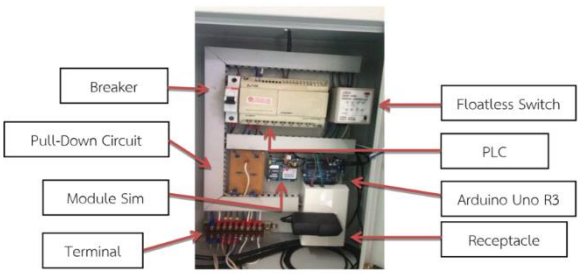
การทำงานของภาคส่ง SMS ของระบบควบคุมการเช็คระดับน้ำจากบ่อพักน้ำ โดยรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จะแสดงบล็อกไดอะแกรมและแผนผังการทำงานของภาคส่ง SMS ซึ่งจะทำการตรวจเช็คระดับน้ำแล้วทำการส่ง SMS ไปยังภาครับ SMS เพื่อให้บ่อประปาหลักส่งน้ำมาให้บ่อพักน้ำ อุปกรณ์ใน

ตู้ควบคุมประกอบด้วย PLC, บอร์ด Arduino Uno R3, Module Sim 900, Floatless Switch และ Pilot Lamp โดยที่ Floatless Switch จะส่งข้อมูลค่าระดับน้ำให้กับ PLC เพื่อทำการประมวลผลและส่งต่อไปยัง Arduino Uno R3 ประมวลผลสั่งให้ Module Sim 900 ส่งข้อความ SMS เช่น เมื่อ Floatless Switch ส่งค่าแสดงบ่อพักน้ำมีระดับน้ำต่ำ Module Sim 900 จะส่ง SMS=L และเมื่อ Floatless Switch ส่งแสดงค่าบ่อพักน้ำมีระดับน้ำสูง Module Sim 900 จะส่ง SMS=H

รูปที่ 9 (ก) แสดง Pilot Lamp Power ทำหน้าที่แสดงสถานะของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบมีค่า 220 VAC และในรูปที่ 9 (ข) จะเป็นการวางอุปกรณ์ภายในตู้ประกอบด้วย Breaker ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์เปิด-ปิดไฟฟ้าของระบบและตัดระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดการช็อตของอุปกรณ์ในตู้ Floatless Switch ทำหน้าที่ตรวจเช็คระดับน้ำของบ่อพักน้ำโดยใช้ก้านอิเล็กโทรดจุ่มลงในน้ำ Arduino Uno R3 ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลจาก PLC และส่งเอาท์พุตไปสั่งให้ Module Sim 900 ส่ง SMS, PLC ทำหน้าที่ประมวลผลระดับน้ำและส่งเอาท์พุตไปยัง Arduino Uno R3 และ Pull-Down Circuit ทำหน้าที่ให้สภาวะของอินพุต Aduino เป็น “0” และเมื่อได้รับคำสั่งจาก PLC จะทำให้สภาวะของอินพุต Aduino มีค่าเป็น “1”



(ก) การจัดวางอุปกรณ์หน้าตู้ควบคุมภาคส่ง SMS

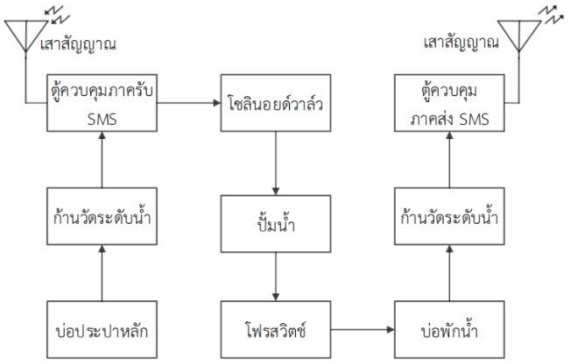


(ข) การจัดวางอุปกรณ์หน้าตู้ควบคุมภาคส่ง SMS

รูปที่ 9 ตู้ควบคุมภาคส่ง SMS

2.3 การออกแบบและติดตั้งระบบการส่งน้ำ

การออกแบบการทำงาน กำหนดให้ตู้ควบคุมภาครับ SMS เป็นตู้ที่ควบคุมอุปกรณ์ทางด้านบ่อหลัก โดยจะควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาวล์ปั๊มน้ำและ Floatless Switch ในการส่งน้ำให้กับบ่อพักน้ำเมื่อได้รับคำสั่งจากตู้ควบคุมภาคส่ง SMS ที่อยู่ทางด้านบ่อพักน้ำ และจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 10 แสดงการทำงานของระบบควบคุมการส่งน้ำทางไกลสั่งงานผ่าน SMS โดยจะเริ่มจากการวัดน้ำบ่อพักน้ำ เมื่อบ่อพักน้ำมีระดับน้ำต่ำตู้ควบคุมภาคส่ง SMS จะส่ง SMS=L ให้กับตู้ควบคุมภาครับ ตู้ควบคุมคุมภาครับก็จะวัดน้ำบ่อประปาหลัก ถ้าหากบ่อประปาหลักมีน้ำเต็มก็จะสั่งเปิดระบบส่งน้ำ แต่ถ้าหากบ่อประปาหลักมีระดับน้ำต่ำก็จะไม่สั่งเปิดระบบจนกว่าบ่อประปาหลักมีน้ำเต็ม และเมื่อบ่อพักน้ำมีระดับน้ำเต็มแล้วตู้ควบคุมภาคส่ง SMS จะส่ง SMS=H ให้กับตู้ควบคุมภาครับ ตู้ควบคุมภาครับก็จะหยุดจ่ายน้ำทันที การจำลองการทำงานของระบบควบคุมการส่งน้ำประปาทางไกลผ่าน SMS แสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ระบบควบคุมการส่งน้ำทางไกลผ่าน SMS

รูปที่ 11 ระบบจำลองการส่งน้ำประปาทางไกลผ่าน SMS

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การทดสอบการทำงานเพื่อหาขีดความสามารถที่ดีที่สุดของระบบต่าง ๆ ประกอบไปด้วย ผลการทดสอบภาคส่ง SMS ตามระดับน้ำบ่อพักน้ำ ผลการทดสอบภาครับ SMS เปิด-ปิด ระบบส่งน้ำประปาหลัก ผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาเปิด-ปิดระบบส่งน้ำ เมื่อได้รับ SMS ผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาการส่ง SMS ตามระดับน้ำ และผลลักษณะไฟโชว์สถานะการทำงาน และ Alarm

3.1 การทดสอบภาคส่ง SMS ตามระดับน้ำบ่อพัก

การทดสอบระบบการส่ง SMS เมื่อระดับน้ำต่ำ SMS จะทำการส่งเป็นตัวอักษร “L” และเมื่อมีระดับน้ำเต็ม SMS จะทำการส่งเป็นตัวอักษร “H” โดยการทดสอบส่ง SMS อย่างละ 10 ครั้ง สลับกัน แสดงดังตารางที่ 1

3.2 การทดสอบภาครับ SMS เปิด-ปิด ระบบส่งน้ำหลัก

การทดสอบระบบการรับ SMS เมื่อตู้รับ SMS ได้รับข้อความที่เป็นตัวอักษร “L” ก็จะทำการเปิดระบบส่งน้ำ และเมื่อตู้รับ SMS ได้รับข้อความที่เป็นตัวอักษร “H” ก็จะทำการปิดระบบส่งน้ำ โดยการทดสอบรับ SMS อย่างละ 10 ครั้ง สลับกัน แสดงดังตารางที่ 2

3.3 การทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาเปิด-ปิดระบบส่งน้ำเมื่อได้รับ SMS

การทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาเปิด-ปิดระบบส่งน้ำ เมื่อได้รับข้อความ SMS ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งของการส่งข้อความ สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยโดยใช้สูตร $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$ โดยที่ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยระยะเวลา $\sum x$ ผลบวกของข้อมูลทุกค่า และ n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด ทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาเปิดระบบเมื่อได้รับข้อความ SMS=L โดยมีค่าเฉลี่ยระยะเวลาเปิดระบบมีค่าเท่ากับ 3.79 วินาทีแสดงดังตารางที่ 3 และทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาปิดระบบเมื่อได้รับข้อความ SMS=H โดยมีค่าเฉลี่ยระยะเวลาปิดระบบมีค่าเท่ากับ 3.68 วินาทีแสดงดังตารางที่ 4 ตามลำดับ

3.4 การทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาการส่ง SMS ตามระดับน้ำ

การทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาการส่ง SMS ตามระดับน้ำเมื่อได้รับข้อความ SMS ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง ของการส่งข้อความ สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยโดยใช้สูตร $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$ โดยที่ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยระยะเวลา $\sum x$ ผลบวกของข้อมูลทุกค่า และ n คือ จำนวนข้อมูลทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาการส่งข้อความ SMS=L เมื่อมีระดับน้ำต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยระยะเวลาส่งข้อความมีค่าเท่ากับ 7.55 วินาที และทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาการส่งข้อความ SMS=H เมื่อมีระดับน้ำสูงโดยมีค่าเฉลี่ยระยะเวลาส่งข้อความมีค่าเท่ากับ 7.35 วินาทีแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 1 ผลการทำงานของระบบส่ง SMS

จำนวนการส่ง SMS	ระดับน้ำ	ข้อความที่ได้รับ	ผลการทดสอบ
1	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
2	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
3	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
4	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
5	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
6	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
7	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
8	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
9	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
10	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
11	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
12	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
13	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
14	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
15	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
16	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
17	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
18	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ
19	ต่ำ	L	ได้ผลตามที่ต้องการ
20	สูง	H	ได้ผลตามที่ต้องการ

ตารางที่ 2 ผลการทำงานของระบบรับ SMS

จำนวนการส่ง SMS	ข้อความที่ได้รับ	ผลการทำงาน	ผลการทดสอบ
1	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
2	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
3	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
4	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
5	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
6	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
7	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
8	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
9	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
10	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
11	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
12	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
13	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
14	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
15	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
16	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
17	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
18	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
19	L	เปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ
20	H	ปิดระบบส่งน้ำ	ได้ผลตามที่ต้องการ

ตารางที่ 3 ระยะเวลาเปิดระบบเมื่อได้รับข้อความ SMS

จำนวนการส่ง SMS	ข้อความที่ได้รับ	ผลการทำงาน	ระยะเวลาเปิดระบบ (วินาที)
1	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.74
2	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.63
3	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.53
4	L	เปิดระบบส่งน้ำ	4.23
5	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.56
6	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.77
7	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.65
8	L	เปิดระบบส่งน้ำ	4.31
9	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.64
10	L	เปิดระบบส่งน้ำ	3.87
ค่าเฉลี่ย SMS=L			3.79

ตารางที่ 4 ระยะเวลาปิดระบบเมื่อได้รับข้อความ SMS

จำนวนการส่ง SMS	ข้อความที่ได้รับ	ผลการทำงาน	ระยะเวลาเปิดระบบ (วินาที)
1	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.70
2	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.89
3	H	ปิดระบบส่งน้ำ	4.19
4	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.99
5	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.86
6	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.53
7	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.12
8	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.34
9	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.30
10	H	ปิดระบบส่งน้ำ	3.96
ค่าเฉลี่ย SMS=H			3.68

ตารางที่ 5 ระยะเวลาส่งข้อความเมื่อระดับน้ำต่ำ/สูง

จำนวนการส่ง SMS	ระดับน้ำต่ำ (SMS=L)	ระยะเวลาการส่ง (วินาที)	ระดับน้ำสูง (SMS=H)	ระยะเวลาการส่ง (วินาที)
1	L	7.56	H	7.12
2	L	7.34	H	7.36
3	L	7.09	H	7.99
4	L	7.68	H	7.83
5	L	7.90	H	7.11
6	L	7.77	H	7.62
7	L	7.86	H	7.02
8	L	7.33	H	7.06
9	L	7.45	H	7.17
10	L	7.62	H	7.25
เฉลี่ย	L	7.55	H	7.35

4. สรุป

ระบบจำลองควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลสั่งงานผ่าน SMS เป็นระบบที่ช่วยสนับสนุนการพัฒนาระบบประปาสมัยใหม่ให้มีประสิทธิภาพโดยการนำเทคโนโลยี PLC และการใช้งาน Module Sim 900 ทำงานร่วมกับ Arduino Uno R3 เพื่อให้สามารถสั่งงานระบบส่งน้ำจากบ่อประปาหลักไปยังบ่อพักน้ำด้วยข้อความ SMS เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานระบบประปาชุมชน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายสุขแก้ว เนื้อนุ้ย นายศักดิ์ชัย กังแฮและนายเทวราช ฟุกล่อย นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง ในการดำเนินการกระบวนการวิจัยการสร้างระบบจำลองควบคุมการส่งน้ำประปาระยะไกลสั่งงานผ่าน SMS

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Bonnok S, Raksakul C, Srithankaew S. The system turns on and off the lights by SMS. [dissertation]. Suranaree University of Technology; 2008. Thai.

[2] Chansungnoen T, Pantong P, Chatkoh T, Ritthison W. Development of a short-textaAlarm water level meter for small reservoirs with ultrasonic sensors. Journal of Vongchavalitkul University, 2020; 33(2) : 71-77. Thai.

[3] Chanma P. Rayal irrgation department water resources development and management mobilisation. The National Defence College of Thailand Journal. 2020: 113-124. Thai.

[4] Scola LA, Takahashi RH, Cerqueira SA. Multipurpose water reservoir management: an evolutionary multiobjective optimization approach. Mathematical Problems in Engineering. 2014; 1.2014.

[5] Sally H, Lévite H, Cour J. Local water management of small reservoirs: lessons from two case studies in Burkina Faso. Water Alternatives. 2011; 4(3).

[6] Tanadumrong P, Suethakorn A, Mitatha S, Vongchumyen C. SMS Information Display Board 2010 International Scence, Social-Science, Engineering and Energry conference (I-SEEC 2010). 2010: 186-189.

[7] Siang BK, Ramli AB, Prakash V, Mohamed SB. SMS gateway interface remote monitoring and controlling via GSM SMS. In 4th National Conference of Telecommunication Technology, 2003. NCTT 2003 Proceedings. 2003; pp. 84- 87.

RMUTL Engineering Journal

Faculty of Engineering

Rajamangala University of technology Lanna

วารสารวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา