RMUTL Engineering Journal

ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2565

ISSN 2465-4248
ISSN(Online) 2697-3839

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา 1
สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และ ทิพยสุคนธ์ บุญญโส

พฤติกรรมรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเป็นเหล็กปลอก 12
รัฐพล เกติยศ เจษฎาพงษ์ หาญสุทธิเวชกุล และ ปรีดา ไชยมหาวัน

การศึกษาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสำหรับเสาสะพานในจังหวัดนครนายก และการทดสอบคุณสมบัติการขัดสีของมอร์ต้าร์ซ่อมแซม และกำลังเสาจำลอง 22
ชนาพันธ์ ถิระโคตร ธนะสิทธิ์ คำริแง พงศภัค กะดี่ทอง และ ศุภชัย สินถาวร

การวิเคราะห์พื้นที่และความสามารถในการจัดการของหุ่นยนต์ขนานส่วนเกิน 4 ขาบนระนาบที่มีข้อต่อแบบหมุน 33
อำนาจ ตงติ๊บ และ ชวลิต คณากรสุขสันต์

ชุดแสดงสถานะ และเก็บข้อมูลการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดกำลัง 50 กิโลโวลต์-แอมป์ 43
ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา ศตวรรษ เมืองชื่น และ ไพฑูรย์ ยศกาศ

การประยุกต์ใช้งานแอปพลิเคชั่นปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งบนคลาวด์ในอาคารอัจฉริยะ 52
ภาณุเดช ทิพย์อักษร อรรถพล วิเวก และ อนุพงศ์ ไพโรจน์

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
เวปไซด์ : 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.กอบวุฒิ	รุจิจนากุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ 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.สุเทพ	บุตรดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วตาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ	นันสะอาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสวรรค์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.วัสสนัย	วรรธนัจฉริยา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ขจรศักดิ์	โสภาจารีย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาต	โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ	โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

กองบรรณาธิการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	ยืนยงกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิจ	เนื่องภิรมย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	จีนะวงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร	พันธุ์ท่าช้าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวโรฒม์	ศิริลักษณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณชาติ	มั่นศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ภาณุ	อุทัยศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายณัฐชาสิทธิ์	ชูเกียรติขจร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายปรัชญ์	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 7 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มิถุนายน 2565 และอยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 บทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ ได้รับการได้ผ่านการประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย คณะทำงานในกองบรรณาธิการจะรักษาคุณภาพของวารสารให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) เป็นที่ยอมรับและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ทางวิศวกรรมที่มีคุณภาพและทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 6 บทความ ประกอบด้วยบทความทางวิชาการในด้านวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า และวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ โดยผู้อ่านสามารถอ่านบทความฉบับปัจจุบันหรือฉบับย้อนหลังแบบออนไลน์ได้ทางเว็บไซต์ https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ

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

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน)
บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

สารบัญ

ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2565

บทความวิชาการ

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา 1

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และ ทิพยสุคนธ์ บุญญโส

พฤติกรรมรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเป็นเหล็กปลอก 12

รัฐพล เกติยศ เจษฎาพงษ์ หาญสุทธิเวชกุล และ ปรีดา ไชยมหาวัน

การศึกษาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสำหรับเสาสะพานในจังหวัดนครนายก และการทดสอบคุณสมบัติการขัดสีของมอร์ต้าร์ซ่อมแซม และกำลังเสาจำลอง 22

ชนาพันธ์ ถิระโคตร ธนะสิทธิ์ คำริแง พงศภัค กะดี่ทอง และ ศุภชัย สินถาวร

การวิเคราะห์พื้นที่และความสามารถในการจัดการของหุ่นยนต์ขนานส่วนเกิน 4 ขาบนระนาบที่มีข้อต่อแบบหมุน 33

อำนาจ ตงติ๊บ และ ชวลิต คณากรสุขสันต์

ชุดแสดงสถานะ และเก็บข้อมูลการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดกำลัง 50 กิโลโวลต์-แอมป์ 43

ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา ศตวรรษ เมืองชื่น และ ไพฑูรย์ ยศกาศ

การประยุกต์ใช้งานแอปพลิเคชั่นปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งบนคลาวด์ในอาคารอัจฉริยะ 52

ภาณุเดช ทิพย์อักษร อรรถพล วิเวก และ อนุพงศ์ ไพโรจน์

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา

Application of Quality Function Deployment Technique for Design and Development of Bamboo Furniture Sofa Set Product

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[1,2*] ชาตรี หอมเขียว[1,2] จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล[1] และทิพยสุคนธ์ บุญญโส[1]

[1] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

[2] หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ

Surasit Rawangwong[1,2 *], Chatree Homkhiew[1,2] Julaluk Rodjananugoon[1] and Thipsukon Boonyaso[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivajaya
2/4 Ratchadamnoennok Road, Boyang Sub-District, Muang District, Songkhla, Thailand, 90000

[2] Materials Processing Technology Research Unit

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

Received: 15 March 2021, Revised: 18 May 2021, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ และเปรียบเทียบความพึงพอใจของลูกค้าเทียบกับผลิตภัณฑ์แบบเดิมโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ วิธีการวิจัยเริ่มด้วยการแปลงความต้องการของลูกค้าเข้าสู่เมทริกซ์ที่หนึ่งของเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ คือเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ ผลการวิเคราะห์บ้านคุณภาพ พบว่าผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ได้รับการออกแบบและพัฒนาตามข้อกำหนดในด้านรูปแบบ คือ สีสัน ขนาดและน้ำหนัก และในส่วนด้านวัสดุ คือ วัสดุในการผลิต ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง และความทนทานของอุปกรณ์จับยึด อีกทั้งในด้านความสะดวก คือ ความสะดวกในการใช้งานและการเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ และในด้านคุณภาพ คือ อายุการใช้งานและคุณภาพประกอบ สุดท้ายในด้านราคาของผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบความพึงพอใจระหว่างผลิตภัณฑ์แบบใหม่กับผลิตภัณฑ์แบบเดิม ผลการวิจัยนี้พบว่าผลิตภัณฑ์แบบใหม่มีค่าความพึงพอใจเพิ่มขึ้นมากกว่าผลิตภัณฑ์แบบเดิมในทุกคุณลักษณะ โดยมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวมของผลิตภัณฑ์แบบใหม่เท่ากับ 4.11 คะแนน และค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวมของผลิตภัณฑ์แบบเดิมมีค่าเท่ากับ 3.36 คะแนน คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงในผลิตภัณฑ์ได้เท่ากับ 22.32 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ บ้านคุณภาพ การออกแบบผลิตภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ โซฟา

Abstract

This research studies the design and development of bamboo furniture in the type of sofa set. The objective is to design and improve the quality of bamboo furniture products and compare customer satisfaction with traditional products by applying quality function deployment technique. The methodology starts with

converting customer needs into the first matrix of quality function deployment technique, namely the product planning matrix or quality house, including quality house analysis results. It was found that the new product was designed and developed to meet the requirements of style, color, size, and weight. The material part is the production material durability of structural materials and durability of the jigs also in terms of convenience is the ease of use and movement of the product, and in terms of quality is the service life and the quality of the assembly. Finally, in terms of the price of the product. Then, the product satisfaction was compared between the old product and the new product. The results of this study revealed the new products showed higher satisfaction values than the traditional products in all characteristics. The mean overall satisfaction of the new product was 4.11 points and the mean overall satisfaction of the old product was 3.36 points, representing a percentage change in the product of 22.32 percent.

Keywords: Quality Function Deployment, House of Quality, Product design, Bamboo furniture, Sofa

1. บทนำ

ไม้ไผ่เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทยมีความหลากหลายทางพันธุกรรม ปัจจุบันมีการพัฒนาการนำไม้ไผ่ไปใช้ประโยชน์กว้างขวางในชีวิตประจำวัน นำไปเป็นไม้ทดแทนไม้จริงในการก่อสร้างบ้านเรือน ทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือนเครื่องใช้ ทำเส้นใย พลังงานทดแทนได้ [1] ไม้ไผ่มีความแข็งแกร่งเหมือนไม้เนื้อแข็งหรืออาจเหนือกว่าไม้บางชนิด โดยเฉพาะเมื่อนำมาแปรรูปเป็นไม้ประสานแล้วจะมีความแข็งแกร่ง นอกจากนี้ไม้ไผ่ยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ไม่บวมหรือหดตัวมากเหมือนไม้เนื้อแข็งทั่วไป จึงเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อีกทั้งมีความสามารถในการสร้างผลผลิตลำใหม่ทดแทนลำเก่าที่ถูกตัดออกได้อย่างต่อเนื่องรวดเร็วและยั่งยืน ทำให้ไม้ไผ่มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้จริงจากป่าธรรมชาติได้ [2]

การดำเนินธุรกิจทั้งการผลิตสินค้าหรือการให้บริการเพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดและเพื่อให้มีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการ ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อการดำเนินธุรกิจ โดยในปัจจุบันสภาวะของการตลาดมีการแข่งขันกันที่สูงมาก เนื่องจากคุณภาพผลิตภัณฑ์สามารถนำมาใช้วัดผลด้านความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อองค์กรได้ ซึ่งการให้ความสำคัญด้านการออกแบบและการผลิต รวมไปถึงการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นของการดำเนินธุรกิจในปัจจุบัน ดังนั้นการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการของลูกค้ามากยิ่งขึ้น จึงเป็นกลยุทธ์หนึ่งในการปรับตัวของธุรกิจในยุคของการแข่งขัน เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD) เป็นเทคนิคหนึ่งสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า โดยการเชื่อมโยงข้อมูลความต้องการของลูกค้า ข้อมูลทางการตลาดและข้อมูลทางเทคนิคของตัวแปรคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการผลิตเข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ตรงตามความต้องการของลูกค้า [3]

เนื่องจากผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ท่านางหอม ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมจากลูกค้าเป็นอย่างมาก จึงได้ลงพื้นที่สำรวจกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ท่านางหอม พบว่าถึงแม้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่จะได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก แต่ก็พบกับปัญหาข้อร้องเรียนของลูกค้าเกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ที่มีแบบเดิม ๆ ดังนั้นทางกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ จึงมีความต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์แบบใหม่ที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้มากขึ้น

จากข้อมูลข้างต้นจึงเป็นที่มาของการวิจัยนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟาโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่และสร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์จากไม้ไผ่ อีกทั้งเพื่อเพิ่มช่องทางการตลาดสำหรับลูกค้ากลุ่มโรงแรม รีสอร์ท และลูกค้าทั่วไปให้มีความกว้างขวางยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD)

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) เป็นเครื่องมือที่สามารถแปลงความต้องการของลูกค้าไปสู่การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบและพัฒนาให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างตรงจุด และยังสามารถทำให้การออกแบบและพัฒนาเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และมีต้นทุนในการดำเนินงานลดลง โดยเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพมีทั้งหมด 4 เฟส ดังนี้ [4] เฟสที่ 1 การวางแผนการผลิต (Product Planning) เป็นการแปลงความต้องการของลูกค้าให้เป็นข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Requirements) เฟสที่ 2 การออกแบบส่วนประกอบย่อย (Part Development) เป็นการถ่ายทอดข้อกำหนดทางเทคนิค ให้อยู่ในรูปของข้อกำหนดทางด้านส่วนประกอบ เฟสที่ 3 การวางแผนกระบวนการ (Process Planning) เป็นการแปลงข้อกำหนดทางด้านส่วนประกอบให้อยู่ในรูปของข้อกำหนดทางด้านกระบวนการผลิต และเฟสที่ 4 การวางแผนการผลิต (Production Planning) เป็นการแปลงข้อกำหนดทางด้านกระบวนการผลิตมาออกแบบและกำหนดวิธีในการควบคุม ในส่วนของงานวิจัยนี้ใช้ในส่วนของเฟส 1 การวางแผนการผลิต (Product Planning) ในส่วนของบ้านคุณภาพ (House of Quality; HOQ) เพื่อให้ได้ข้อกำหนดทางเทคนิค สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ในส่วนของบ้านคุณภาพ (HOQ) เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟาให้ตรงต่อความต้องการของลูกค้ามากที่สุด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยหลัก ๆ 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมข้อมูลก่อนการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) สำรวจความต้องการของลูกค้า โดยใช้วิธีการสำรวจด้วยการสัมภาษณ์ พูดคุยและเก็บแบบสอบถามที่ 1 ซึ่งเป็นแบบสอบถามแบบปลายเปิด ซึ่งการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของลูกค้าได้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 90% ได้เลือกใช้สมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran ซึ่งสอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยของ Sinthavalai, and Ruengrong [5] กล่าวคือ ในการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง พบว่าได้มีการคำนวณจากสมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran และมีการเลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 90% โดยมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ P = 0.30 เป็นค่าที่นิยม Z = 1.65 และ d = 0.1 เป็นค่าที่ได้จากการกำหนดความเชื่อมั่น 90% แสดงดังสมการที่ 1

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

เมื่อ n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

P คือ สัดส่วนของประชากรที่ต้องการสุ่ม

Z คือ ระดับนัยสำคัญทางสถิติ

d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้น

ดังนั้นในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของลูกค้าได้จำนวนขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณได้ 58 ตัวอย่าง แต่ในการเก็บข้อมูลจริงได้เพิ่มจำนวนการเก็บข้อมูลเป็น 105 ตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มระดับความเชื่อมั่นของข้อมูล ซึ่งกลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูลจะประกอบด้วย ลูกค้ากลุ่มโรงแรม รีสอร์ท และลูกค้าที่เป็นผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ จังหวัดสงขลา และจังหวัดใกล้เคียง

2) จัดเรียงถ้อยคำความต้องการของลูกค้าใหม่ โดยนำเสียงของลูกค้ามาจัดเรียงถ้อยคำใหม่ แล้วทำการจัดกลุ่มคุณลักษณะความต้องการของผลิตภัณฑ์ โดยใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) และแผนผังต้นไม้ (Tree Diagram) มาช่วยในการจัดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ปัญหา

3) สร้างแบบสอบถามที่ 2 เพื่อหาระดับความสำคัญปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิตจากแบบสอบถามที่ 2 เพื่อนำไปใช้เป็นค่าความสำคัญ (Important; IMP) ในเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ

ขั้นตอนที่ 2 ประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning) จะเป็นการสร้างบ้านคุณภาพ (House of Quality; HOQ)

แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยเมทริกซ์ย่อย ๆ 6 ส่วน และมีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้ [6-10]

1) ส่วนความต้องการของลูกค้าหรือส่วนที่ 1 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการนำความต้องการของลูกค้าที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมการมาใส่ในเมทริกซ์การวางแผนของบ้านคุณภาพ

2) ส่วนเมทริกซ์การวางแผนหรือส่วนที่ 2 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์รูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ เพื่อกำหนดอัตราการปรับปรุงในผลิตภัณฑ์

3) ส่วนเทคนิคที่ต้องการ หรือส่วนที่ 3 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการระดมสมองของคณะผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิค (Design Attributes) ที่ตอบสนองต่อความต้องการของกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย รวมทั้งกำหนดเป้าหมายทางเทคนิคและค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมายเบื้องต้น เพื่อให้ทราบถึงทิศทางในการปรับปรุง โดยจะเป็นการให้สัญลักษณ์ ดังนี้ ↑ ยิ่งมากยิ่งดี ○ เป้าหมายเหมาะสม และ ↓ ยิ่งน้อยยิ่งดี

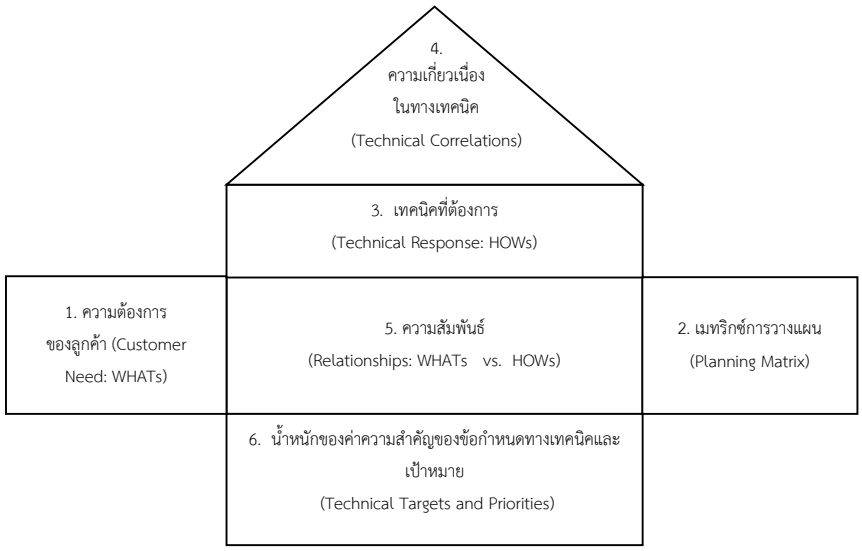
4) ส่วนความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิคหรือส่วนที่ 4 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง เพื่อแสดงถึงความเกี่ยวเนื่องของเทคนิคที่นำมาใช้ในตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ โดยจะเป็นการระบุว่าเทคนิคใดที่มีความเกี่ยวข้องกันบ้างและมีความเกี่ยวข้องกันมากน้อยเพียงใดโดยใช้สัญลักษณ์ “O” หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก “X” หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และ “ช่องว่าง” หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

5) ส่วนความสัมพันธ์หรือส่วนที่ 5 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิคกับความต้องการของลูกค้าในแต่ละคู่ โดยในการให้ค่าคะแนนความสัมพันธ์จะนิยมใช้ตัวเลข 0, 1, 3 และ 9 แทนความสัมพันธ์ คือ ไม่มีความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์น้อย มีความสัมพันธ์ปานกลาง และมีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ

6) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ หรือส่วนที่ 6 บ้านคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการบ่งบอกถึงความสำคัญในปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ทราบว่าความต้องการใดที่ต้องให้ความสำคัญสูงสุด โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และส่วนของค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าให้กับทีมออกแบบ เพื่อกำหนดเป็นแนวทางข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา จากนั้นดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 4 ประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเมทริกซ์การวางแผน[11]

3. ผลการดำเนินงานและอภิปรายผล

3.1 ผลการเตรียมก่อนการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ (QFD)

จากการสำรวจความต้องการลูกค้าด้วยแบบสอบถามที่ 1 จำนวน 105 ท่าน พบว่าการจัดหมวดหมู่ความต้องการโดยใช้แผนผังเชื่อมโยง (Affinity Diagram) สามารถจัดหมวดหมู่ได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ รูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพ และอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 ได้นำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาเป็นแบบสอบถามที่ 2 เพื่อประเมินระดับความสำคัญของแต่ละประเด็น โดยผลการวิเคราะห์พบว่าประเด็นที่ลูกค้าให้ความสำคัญมากที่สุด คือ มีรูปทรงที่หลากหลาย โดยมีค่าเฉลี่ยเรขาคณิตเท่ากับ 3.87

3.2 ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์

เป็นการนำผลข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้มาข้างต้นเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ โดยสามารถอธิบายผลแต่ละส่วนได้ดังนี้

1) ความต้องการของลูกค้า เป็นการนำคุณลักษณะความต้องการทั้ง 5 กลุ่ม มาใส่ทางด้านซ้ายมือของเมทริกซ์ พร้อมกำหนดหมายเลข แสดงดังรูปที่ 3

2) เมทริกซ์การวางแผน เป็นการนำค่า Important (IMP) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตที่ได้จากแบบสอบถามที่ 2 มาใส่ให้ตรงกับความต้องการของลูกค้าแต่ละตัว แสดงดังรูปที่ 3

3) กำหนดความต้องการทางเทคนิค จากการระดมสมองพบว่าข้อกำหนดทางเทคนิคที่สามารถตอบสนองแต่ละความต้องการของลูกค้าให้อยู่ในรูปข้อมูลเชิงเทคนิคมีทั้งหมด 18 ข้อกำหนด แสดงดังรูปที่ 3

4) ความเกี่ยวเนื่องของข้อกำหนดทางเทคนิค กำหนดความสัมพันธ์ของเทคนิคต่าง ๆ ที่นำมาใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า ซึ่งผลการกำหนดความสัมพันธ์ของเทคนิคต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3

5) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ เป็นการเปรียบเทียบแบบและให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้าและข้อกำหนดทางเทคนิคเป็นคู่ ๆ โดยผลจากการให้คะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3

6) ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ (Priority Relationships) ในส่วนนี้ได้ผลแสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 4 โดยสามารถสรุปผลได้ว่าการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา พบว่าคุณลักษณะการออกแบบที่มีคะแนนสูงสุด 11 ข้อ หรือสิ่งที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญสูงสุดตามหลักการแผนภาพพาเรโต (Pareto Diagram) [5] จำนวน 11 ข้อ จากนั้นนำข้อกำหนดทางเทคนิคที่ผ่านการจัดเรียงลำดับแล้ว มาทำการออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟาต่อไป

3.3 การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพพาเรโต ในรูปที่ 4 พบว่าคุณลักษณะการออกแบบที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญสูงสุดมี 11 ข้อ ดังนั้นผู้วิจัยได้นำผลดังกล่าวมาเรียบเรียงใหม่และส่งต่อให้กับทีมออกแบบ เพื่อดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา และทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยรายละเอียดข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์มีรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุในการผลิต ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบโดยใช้วัสดุโครงสร้าง เป็นไม้ไผ่แก่จัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ผ่านการอาบน้ำยาป้องกันแมลง และผึ่งให้แห้ง และใช้วัสดุตกแต่ง เป็นเบาะฟองน้ำหุ้มด้วยผ้ามัดย้อมท้องถิ่น อีกทั้งใช้ไม้ไผ่ผ่าหรือกระจก เป็นวัสดุพื้นโต๊ะ

2) ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบโดยใช้เทคนิคการเข้ามุมไม้ไผ่แบบขัดกลอน เพื่อสร้างความแข็งแรงทนทานของโครงสร้าง

3) อายุการใช้งาน ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานควรมีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี แช่น้ำยากันมอดและผึ่งให้แห้ง

4) ราคาของผลิตภัณฑ์ มีราคา 5,000–10,000 บาทต่อชุด

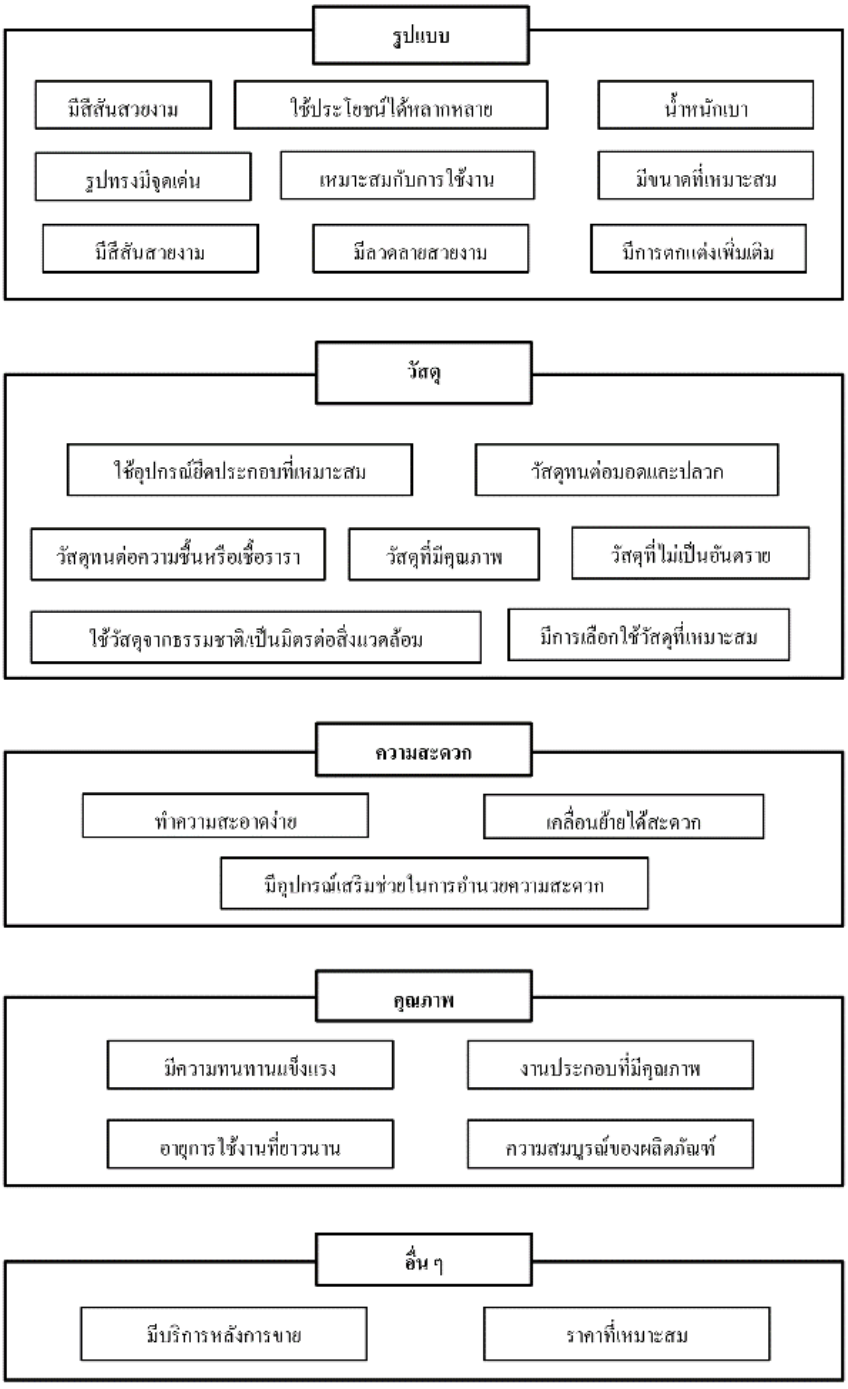
5) สีสันของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบโดยใช้สีเนื้อไม้ไผ่ตามธรรมชาติ และตกแต่งด้วยเบาะผ้า หรือเบาะหนัง

6) น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ได้ทำการปรึกษากับผู้เชี่ยวชาญทางด้านต่าง ๆ รวมไปถึงผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ พบว่ามีน้ำหนักไม่เกิน 50 กิโลกรัมต่อชุด

7) ความสะดวกในการใช้งาน ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบให้มีการใช้งานที่สะดวกและง่ายต่อการเคลื่อนย้าย

8) ขนาด ได้ผลิตภัณฑ์มีพื้นที่ไม่เกิน 3 ตารางเมตร

9) คุณภาพของงานประกอบ ผลิตภัณฑ์ต้องไม่มีจุดบกพร่องในการขึ้นรูปและการประกอบ



รูปที่ 2 แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงของความต้องการลูกค้า

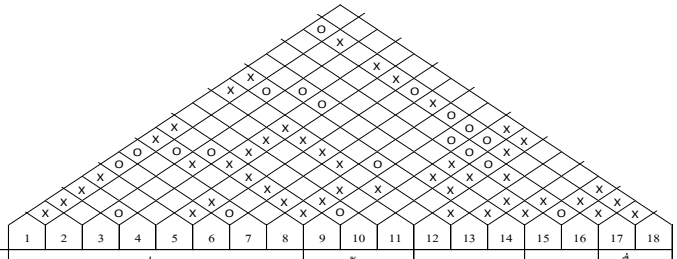
10) การเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สามารถรองรับการปรับเปลี่ยนหรือการเคลื่อนย้ายได้ง่าย

11) ความทนทานของอุปกรณ์จับยึด ผลิตภัณฑ์มีอายุของอุปกรณ์จับยึดไม่น้อยกว่า 5 ปี

จากนั้นทีมออกแบบได้นำข้อกำหนดทางเทคนิคทั้ง 11 ข้อกำหนดไปทำการออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา รวมทั้งได้นำแนวคิดมาจากการนำรูปทรงของสถาปัตยกรรมจีนแบบดั้งเดิม ในย่านเมืองเก่าสงขลามาใช้

สัญลักษณ์ด้านความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค	
สัญลักษณ์	ความหมาย
O	มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก
X	มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย
ช่องว่าง	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

สัญลักษณ์ค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมาย	
สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	ยิ่งมากยิ่งดี
○	เป้าหมายเหมาะสม
↓	ยิ่งน้อยยิ่งดี



ข้อกำหนดทางเทคนิค			รูปแบบ								วัสดุ			ความสะดวก			คุณภาพ		อื่น ๆ	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
			รูปแบบมีความหลากหลาย	การใช้ประโยชน์	น้ำหนัก	ขนาด	สีสัน	ลวดลาย	การตกแต่ง	อุปกรณ์เสริม	วัสดุในการผลิต	ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง	ความทนทานของอุปกรณ์ยึดยึด	การทำความสะอาด	ความสะดวกในการใช้งาน	การเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์	คุณภาพของงานประกอบ	อายุการใช้งาน	ราคาของผลิตภัณฑ์	การบริการหลังการขาย
	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
ความต้องการของผู้บริโภค	No.		↑	↑	↓	○	↑	○	○	○	○	↑	↑	↑	○	○	↓	↑	↓	○
รูปแบบ	มีรูปทรงที่หลากหลาย	A-1	3.87	9	1	3	9					3			3	9	9			9	
	ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย	A-2	3.67	3	9		3				9		3			9	3			3	
	น้ำหนักเบา	A-3	3.63			9	9				1	9	3			9	9				
	รูปทรงมีจุดเด่น	A-4	3.61	3				9	9	9	3	3								3	
	เหมาะสมกับการใช้งาน	A-5	3.46	1	3	3	3				3	9	3			3					
	มีขนาดที่เหมาะสม	A-6	3.45			9	9					3				3	9			3	
	มีสีสันสวยงาม	A-7	3.44					9	3	3		1		3						3	1
	มีลวดลายสวยงาม	A-8	3.41					3	9	3		1		3						3	
	มีการตกแต่งเพิ่มเติม	A-9	3.35	3				9	3	9	3									9	
วัสดุ	ใช้วัสดุจากธรรมชาติ/เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	A-10	3.76			9		3			1	9	3		3				3	3	
	วัสดุที่ไม่เป็นอันตราย	A-11	3.63									9		3		3		1			
	มีการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม	A-12	3.60			3		3				9	9	1				3	9		
	วัสดุที่มีคุณภาพ	A-13	3.38			3		3				9	9	1				3	9	3	3
	ใช้อุปกรณ์ยึดประกอบที่เหมาะสม	A-14	3.26			1					1	3	3	9			3	9	9	1	
	วัสดุทนต่อความชื้นหรือเชื้อรา	A-15	3.00					9				9	9		9				3		1
	วัสดุทนต่อมอดและปลวก	A-16	2.96									9	9				1		3		1
ความสะดวก	เคลื่อนย้ายได้สะดวก	A-17	3.72	3		9	9				1	3	3	3		3	9				
	มีอุปกรณ์เสริมช่วยในการอานวยความสะดวก	A-18	3.52	3		3					9	3				9				3	
	ทาความสะอาดง่าย	A-19	3.40	3		1	3	3	3	1	3	3			9		1				
คุณภาพ	งานประกอบที่มีคุณภาพ	A-20	3.50										9	3				9	9	3	3
	อายุการใช้งานที่ยาวนาน	A-21	3.50		3			3				9	9	9				3	9		3
	มีความทนทานแข็งแรง	A-22	3.48		3							9	9	9				9	9		3
	ความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์	A-23	3.43		1			1	1		1	1		1		1		3	1	3	
อื่น ๆ	ราคาที่เหมาะสม	A-24	3.46	3			3	3	3	9	3	9	1	1				9		9	3	
	มีบริการหลังการขาย	A-25	3.42					3			1		3	3				1	3	3	9	รวม
ค่าน้ำหนักความสาคัญของข้อกาหนดทางเทคนิคสมบูรณ์				112	71.7	191	174	208	108	118	138	426	289	149	101	178	159	172	229	215	92.1	3130.89
ค่าน้ำหนักความสาคัญของข้อกาหนดทางเทคนิคเปรียบเทียบ				3.59	2.29	6.11	5.56	6.64	3.44	3.76	4.40	13.59	9.23	4.75	3.23	5.70	5.08	5.50	7.32	6.87	2.94	100
เป้าหมายทางด้านเทคนิค			มีรูปทรงให้เลือกอย่างน้อย 2 รูปทรง	สามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย	น้ำหนักไม่เกิน 50 กิโลกรัมต่อชุด	พื้นที่ในการวัดตั้งไม่เกิน 3 ตารางเมตร	สีและสีลิตอบไม่หลุดลอกภายใน 2 ปี	มีลวดลายให้เลือกอย่างน้อย 2 ลาย	มีการตกแต่งเพื่อความสวยงาม	มีการสร้างอุปกรณ์เพื่อตั้งหน้าที่ในการใช้งาน	ใช้ไม้เป็นวัสดุโครงสร้างหลัก	อายุของวัสดุโครงสร้างไม่น้อยกว่า 5 ปี	อายุของอุปกรณ์ยึดไม่น้อยกว่า 5 ปี	สามารถทาความสะอาดได้ง่าย	สามารถใช้งาน ได้อย่างสะดวกและไม่เกิดความรู้สึกอึดอัด	สามารถรองรับการปรับเปลี่ยนหรือการเคลื่อนย้ายได้ง่าย	ไม่มีรอยต่างในงานประกอบ	อายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี	มีราคาไม่เกิน 10,000 บาทต่อชุด	มีการรับประกัน 1 ปี หลังการขาย	

รูปที่ 3 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา

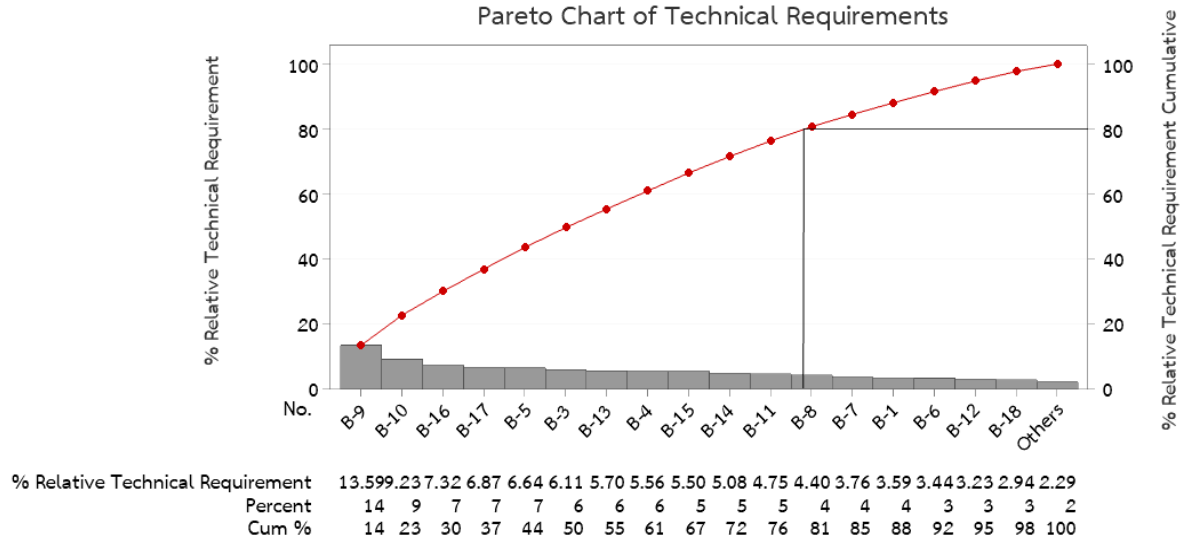
ในการสร้างสรรค์ชิ้นงาน โดยการตัดทอนรูปทรงของอาคารมาใช้ในการออกแบบเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ เสริมด้วยเบาะนั่งและหมอน เพื่อให้ผู้ใช้งานได้รู้สึกนั่งสบายและผ่อนคลาย และหลังจากนั้นกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม่ไผ่ได้ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ประเภทชุดโซฟาพร้อมตกแต่ง แสดงดังรูปที่ 5

3.4 ประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟาแบบใหม่

หลังจากได้ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟาแล้ว จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจในตัวผลิตภัณฑ์ด้วยแบบสอบถามที่ 3 เพื่อให้ลูกค้าประเมินความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่

ตารางที่ 1 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์

No.	Technical Requirements	Absolute Technical Requirement	% Relative Technical Requirement
B-9	วัสดุในการผลิต	425.51	13.59
B-10	ความทนทานของวัสดุโครงสร้าง	289.00	9.23
B-16	อายุการใช้งาน	229.33	7.32
B-17	ราคาของผลิตภัณฑ์	215.15	6.87
B-5	สีสัน	207.82	6.64
B-3	น้ำหนัก	191.19	6.11
B-13	ความสะดวกในการใช้งาน	178.42	5.70
B-4	ขนาด	174.00	5.56
B-15	คุณภาพของงานประกอบ	172.08	5.50
B-14	การเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์	159.18	5.08
B-11	ความทนทานของอุปกรณ์จับยึด	148.84	4.75
B-8	อุปกรณ์เสริม	137.77	4.40
B-7	การตกแต่ง	117.73	3.76
B-1	รูปแบบมีความหลากหลาย	112.48	3.59
B-6	ลวดลาย	107.56	3.44
B-12	การทำความสะอาด	101.04	3.23
B-18	การบริการหลังการขาย	92.14	2.94
B-2	การใช้ประโยชน์	71.65	2.29



รูปที่ 4 การจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา

แบบเดิม แสดงดังรูปที่ 6 (ก) และผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่แบบใหม่ แสดงดังรูปที่ 6 (ข)

จากผลการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟาแบบใหม่มีความแตกต่างกับแบบเดิมในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านวัสดุตกแต่งซึ่งผลิตภัณฑ์แบบใหม่มีการตกแต่งด้วยเบาะฟองน้ำหุ้มด้วยผ้ามัดย้อมท้องถิ่น และใช้กระจกเป็นวัสดุพื้นโต๊ะแทนไม้ไผ่ผ่าอีกทั้งออกแบบรูปทรงของผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะสถาปัตยกรรมจีนแบบดั้งเดิมในย่านเมืองเก่าสงขลา ดังนั้นเมื่อดำเนินการสำรวจความพึงพอใจ พบว่าลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะที่แตกต่างจากแบบเดิมอีกทั้งพบว่ามีค่าความพึงพอใจในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์แบบใหม่ในทุก

(ก) ผลิตภัณฑ์มุมมองด้านซ้าย

(ข) ผลิตภัณฑ์มุมมองด้านหน้า

(ค) ผลิตภัณฑ์มุมมองด้านขวา

(ง) ผลิตภัณฑ์ชุดโซฟาแบบใหม่

รูปที่ 5 ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟาแบบใหม่

(ก) ผลิตภัณฑ์แบบเดิม

(ข) ผลิตภัณฑ์แบบใหม่

รูปที่ 6 ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภท

คุณลักษณะเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวมของผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่เท่ากับ 4.11 คะแนน และค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวมของผลิตภัณฑ์รูปแบบเดิมเท่ากับ 3.36 คะแนน แสดงว่าค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่มีค่าเพิ่มขึ้น 0.75 คะแนน สามารถคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 22.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าได้ดีขึ้น นอกจากผลการวิเคราะห์งานวิจัยแล้วยังพบว่างานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของชาคริต และอรวิกา [12] โดยใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเก้าอี้สำนักงานแบบใหม่ ทั้งนี้พบว่าผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์แบบใหม่มีลักษณะที่ตรงกับความต้องการของลูกค้า และมีผลความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ใหม่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งจากการประยุกต์ใช้เทคนิค

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ พบว่าผลิตภัณฑ์แบบใหม่สามารถตอบโจทย์ความต้องการของลูกค้าได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Achmad และ Taufiq [13] ที่มีการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ (Kasei Engineering) โดยผลการออกแบบผลิตภัณฑ์พบว่าผลิตภัณฑ์รูปใหม่สามารถตอบโจทย์ความต้องการของลูกค้าได้เช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสำหรับออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา ผลจากการวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ จากการสำรวจความต้องการของลูกค้าทำให้ทราบถึงความต้องการที่แท้จริงของลูกค้า หลังจากนั้นนำความต้องการเหล่านั้นมาจัดเรียงถ้อยคำใหม่และจัดกลุ่มคุณลักษณะของความต้องการที่มีความหมายซ้ำซ้อนเข้าด้วยกันแล้วนำความต้องการมาจัดทำเป็นแบบสอบถามเพื่อให้ลูกค้าได้ทำการประเมินความสำคัญ จากนั้นนำความต้องการของลูกค้าเข้าสู่เมทริกซ์เฟสแรกของเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ รวมทั้งสามารถทำให้ทราบถึงจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์แบบเดิมที่ควรนำมาปรับปรุง ผลจากการสำรวจและจัดทำบ้านคุณภาพทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ นำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และขึ้นรูปเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ประเภทชุดโซฟา จากการวิจัยพบว่า ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ที่ได้รับการปรับปรุงสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าซึ่งเป็นกลุ่มผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ และลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์แบบใหม่ในทุกคุณลักษณะ โดยมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวมของผลิตภัณฑ์แบบใหม่เท่ากับ 4.11 คะแนน และค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวมของผลิตภัณฑ์แบบเดิมมีค่าเท่ากับ 3.36 คะแนน คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 22.22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ได้ตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าได้ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ประจำปี 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Phuangchik T. Is Bamboo Amazing Plant. Thai Science and Technology Journal. 2556;21(2): 1-3.Thai.

[2] Royal Forest Department. Knowledge of Bamboo. Technology Transfer and Development Bureau, Forest Research and Development Office, Royal Forest Department. (2541).Thai.

[3] Akao Y. QFD: Past, Present, and Future. In: International Symposium on QFD'97, Linköping, Sweden. (1997).

[4] Satirapinitkul T, Thaveesaengsakulthai D. Application of QFD and TRIZ Technique for Creating Innovations in the Animal Feed Industry. For Quality Production. 2555;(179)19: 24-30.Thai.

[5] Sinthavalai R, 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.

[6] Marakanon L. The Application of Quality Function Deployment and Analytic Hierarchy Process Techniques for Quality Improvement of Agricultural Machinery Parts Logistics. Journal of Industrial Education. 2560;16(3): 21-28.

[7] Homkhiew C, Ratanawilai T, Pochana K. Application of a Quality Function Deployment Technique to Design and Develop Furniture Products. Songklanakarin J. Sci. Technol. 2012;34(6):663-668.

[8] Rawangwong S, Homkhiew C, Boonchouytan W, Chattong J, Tehyo M. Application of Quality Function Deployment in Development of Products Pottery: A Case Study of Pottery Community Enterprise in Nakhon Si Thammarat Province. Princess of Naradhiwas University Journal. 2020;12(1):106-119.Thai.

[9] Pirom T, Rawangwong S, Thongkamkaew A, Hutyee C. Design and Developed Product the Kindergarten Classroom Furniture with Rubber Wood Using Quality Function Development. The Journal of Industrial Technology. 2019;15(3):76-92.Thai.

[10] Sinthavalai R, Boonchu P, Polmai S. An Application of House of Quality (HOQ) in Improving a Package of Medical Equipment. The Journal of KMUTNB. 2016;26(3):437-450. Thai.

[11] Kengpol A. Concurrent Engineering. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok Publisher. (2547).Thai.

[12] Sritong C, Sritong O. Product Development Using Quality Function Deployment (QFD) in Furniture Industry: A case Study of Office Chair Design. Valaya Alongkorn Review (Humanities and Social Science). 2559;(6)2:111-124.Thai.

[13] Shergia A, Immawan T. Design of Innovative Alarm ClockMade From Bamboo With Kansei Engineering Approach. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2015;3:184-188.

พฤติกรรมรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเป็นเหล็กปลอก

Shear Behavior of Reinforced Concrete Beam using Cold-drawn Steel wire Stirrup

รัฐพล เกติยศ[1] เจษฎาพงษ์ หาญสุทธิเวชกุล[1 *] และ ปรีดา ไชยมหาวัน[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
19 หมู่ 2 ตำบลแม่กา อำเภอเมืองพะเยา พะเยา 56000

Rattapon Ketiyot[1], Chetsadaphong Hansudewechakul[1 *] and Preeda Chaimahawan[2]

[1] Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai
99 Sai Khao, Pan, Chiang Rai, Thailand, 57120

[2] Department of Civil Engineering, School of Engineering, University of Phayao
19 Moo 2, Maeka, Muang, Phayao, Thailand, 56000

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: chinapong@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-9635-0100

Received: 9 April 2021, Revised: 18 June 2021, Accepted: 30 June 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 6 ตัวอย่าง โดยใช้วัสดุและรายละเอียดการเสริมทางขวางต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งตามวัสดุของเหล็กเสริมตามขวาง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเหล็กปลอกเดี่ยว ใช้เหล็กเส้นกลมขนาด 6.0 mm. เกรด SR24 ระยะเรียงเท่ากับ 0.125 และ 0.375 m. สำหรับกลุ่มเหล็กปลอกสปริง ใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีต มาตรฐาน มอก. 747-2531 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.3 mm. ระยะเรียงเท่ากับ 0.05 0.075 0.125 และ 0.20 m. สำหรับการทดสอบแบบสถิตใช้วิธีน้ำหนักบรรทุกแบบกระทำ 3 จุด จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยวระยะเรียงเท่ากับ 0.125 m. และ เหล็กปลอกสปริงระยะเรียงเท่ากับ 0.05 และ 0.075 m. มีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พฤติกรรมการวิบัติของทั้ง 3 ตัวอย่างเป็นการวิบัติแบบเหนียว

คำสำคัญ เหล็กปลอกกำลังสูง คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ลวดเหล็กกล้าดึงเย็น

Abstract

This paper presents a shear behavior of six reinforced concrete beam having different of transverse reinforcement detailing and material. The test specimens can be divided into two material groups. For the first one, tie stirrup using SR24 grade round bar with 6.0 mm. in diameter was used as transverse reinforcement with spacing distance as 0.125 and 0.375 m. For the other, spring stirrup using 3.3 mm. in diameter cold drawn steel wire according to TIS 747-2531 with spiral spacing as 0.05 0.075 0.125 and 0.20 m. was applied to transverse reinforcement. All test specimens were carefully tested under static loading according to the third-point load testing. The test results showed that shear capacities of the test specimens with tie stirrup, 0.125 m. spacing distance, and spring stirrup, 0.05 and 0.075 m spacing distances were very similar. Furthermore, the failure mode of the specimens was ductile failure.

Keywords: High-strength Stirrups, Reinforced Concrete Beam, Cold Drawn Steel Wire

1. บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับอาคารพักอาศัยมีมูลค่าการตลาดที่เติบโตเพิ่มมากขึ้น เพื่อตอบสนองการขยายตัวของอุตสาหกรรมก่อสร้างซึ่งมีการแข่งขันค่อนข้างสูง ซึ่งหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการแข่งขัน คือ การลดต้นทุนการผลิตและลดระยะเวลาในการก่อสร้างเพื่อส่งมอบอาคารให้ผู้บริโภคได้รวดเร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ ผู้ประกอบการผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปจึงจำเป็นที่จะต้องลดต้นทุนและระยะเวลาการผลิต โดยที่คุณสมบัติทางวิศวกรรมต้องไม่แตกต่างจากมาตรฐานในการออกแบบได้แก่ ACI 318-19[1] และ ว.ส.ท.1008-38[2]

ระบบโครงสร้างอาคารพักอาศัยขนาดเล็กถึงปานกลางส่วนใหญ่จะใช้ระบบโครงเฟรมต้านทานแรงดัด (Moment Resisting Frame) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ชิ้นส่วนคานและเสา สำหรับโครงสร้างคานซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้นสู่เสา ซึ่งแรงภายในที่วิศวกรจะต้องนำมาใช้ออกแบบได้แก่ แรงดัด และแรงเฉือน ซึ่งเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่ต้านทานแรงภายในดังกล่าว ได้แก่ เหล็กเสริมตามยาว (Longitudinal Reinforcement) และเหล็กเสริมทางขวาง (Transverse Reinforcement) ตามลำดับ

โดยปกติ โครงสร้างคานคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับอาคารพักอาศัย วิศวกรผู้ออกแบบมักจะเลือกใช้เหล็กเส้นกลม เป็นวัสดุที่ใช้ผลิตเหล็กเสริมทางขวางภายในคาน อย่างไรก็ตาม ด้วยเทคโนโลยีและพฤติกรรมผู้บริโภค ทำให้มีการดัดแปลงวัสดุอื่นทดแทนเหล็กเส้นกลม ได้แก่ ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีต (Cold Drawn Steel Wire) ตามมาตรฐาน มอก.747-2531 [3] ซึ่งถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างอยู่แล้ว ได้แก่ ใช้เป็นเหล็กปลอกในกระบวนการผลิตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป หรือใช้เป็นตะแกรงเหล็กในคอนกรีตทับหน้าของระบบพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยที่ลวดรีดเย็นมีกำลังครากและกำลังประลัยสูงกว่าเหล็กเส้นกลม เกรด SR24 (มาตรฐาน มอก.20-2559[4]) แต่ร้อยละการยืดตัว (Elongation) ต่ำกว่า

Li et al.[5] ศึกษาความเค้น-ความเครียดเพื่อนำเหล็กเสริมกำลังสูงมาใช้เป็นเหล็กเสริมทางขวางในโครงสร้างคอนกรีตกำลังสูง Amorn et al.[6] ทดสอบความล้าของเหล็กเสริม WWR (Welded Wire Reinforcement) ที่มีกำลังครากเท่ากับ 520 MPa เพื่อใช้เป็นเหล็กเสริมรับแรงเฉือนสำหรับคานสะพาน (Girder) ผลการทดสอบได้นำเสนอสมการสำหรับการออกแบบโดยใช้ WWR ซึ่งระบุใน AASHTO LRFD Bridge Design[7] การศึกษาด้านลักษณะการวิบัติโดยการใช้เหล็กปลอกกำลังสูงกับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงได้ถูกนำเสนอโดย Lee et al.[8] ในปี 2019 Shin et al.[9] ทดสอบคานคอนกรีตขนาดใหญ่โดยการเสริมเหล็กปลอกกำลังครากสูงโดยแปรผันอัตราส่วนเหล็กปลอก การทดสอบทั้งหมดพบว่าเกิดการครากของเหล็กปลอกทั้งหมดก่อนที่คอนกรีตของคานจะเกิดการวิบัติ เป็นเหตุให้กำลังส่วนเผื่อระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดสอบลดลง สำหรับการศึกษาเพื่อออกแบบเหล็กเสริมกำลังครากสูงเพื่อรับแรงเฉือนและรับแรงบิดสำหรับโครงสร้างคอนกรีตโดย Lee et al.[10] จากการวิเคราะห์พบว่า กำลังครากสำหรับเหล็กรับแรงเฉือนควรจำกัดไม่เกิน 600 MPa

สำหรับการศึกษาการใช้เหล็กกำลังสูงสำหรับโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว ได้แก่ Yan et al. [11], NIST[12], Shi et al.[13], Zheng et al.[14] และ Ding et al.[15] นอกจากนี้ มีการศึกษาอิทธิพลของกำลังอัดคอนกรีตและเหล็กเสริมทางขวางกำลังสูงสำหรับเสาคอนกรีตภายใต้แรงแผ่นดินไหวเทียบเท่าโดย Paultre et al.[16] พบว่าเหล็กกำลังสูงสามารถนำมาใช้เป็นเหล็กปลอกได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีอัตราส่วนเหล็กเสริมลดลงเมื่อใช้เสริมในโครงสร้างคอนกรีตกำลังสูง ในปี 2020 Wang et al.[17] ศึกษาคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ของการใช้เหล็กปลอกกำลังสูง(HSSs) ภายในเสาคอนกรีตกำลังสูง พบว่าค่าความเหนียวถูกปรับปรุงโดยกำลังของเหล็กปลอก

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเหล็กเสริมดังกล่าวมาทำการทดลองเสริมในคานคอนกรีตสำเร็จเพื่อทดสอบความสามารถต้านแรงเฉือน ที่แม้ว่าร้อยละการยืดจะน้อยกว่าแต่กำลังดึงครากที่สูงกว่า และระยะเรียงเหล็กที่ถี่ขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มการโอบรัดคอนกรีตในคาน และป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว สามารถมีส่วนช่วยต้านแรงดัดได้เทียบเท่ากับการใช้เหล็กเส้นกลมเกรด SR24 เป็นเหล็กตามขวางได้หรือไม่ เนื่องจากราคาเหล็กต่ำกว่าเหล็กเส้นกลมอย่างชัดเจน

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ระเบียบวิธีวิจัย

ในการศึกษา ได้สร้างคานคอนกรีตทดสอบขนาด 150 x 300 x 2,500 mm. (ความกว้าง x ความลึก x ความยาว) จำนวน ตัวอย่าง สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างทดสอบจากวัสดุที่ใช้เป็นเหล็กเสริมทางขวางได้ 2 กลุ่มและมีรายละเอียดการเสริมเหล็กทางขวางต่างกัน ดังนี้

- กลุ่มเหล็กปลอกเดี่ยว ใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.00 mm. เกรด SR24 ระยะเรียงเท่ากับ 0.125) และ 0.375 m.
- กลุ่มเหล็กปลอกสปริง ใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.30 mm. มาตรฐาน มอก.747-2531 ระยะเรียงเท่ากับ 0.05 0.075 0.125 และ 0.20 m.

รูปที่ 1 เหล็กปลอกสปริง(ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีต)

2.2 คุณสมบัติวัสดุ

วัสดุที่ใช้ได้แก่ คอนกรีตที่มีกำลังอัด (f_c') เท่ากับ 19.61 MPa ตารางที่ 1 แสดงเหล็กเสริมที่ใช้ติดตั้งภายในตัวอย่างทดสอบ โดยกำหนดให้เหล็กเสริม DB12 มาตรฐาน มอก. 24-2559[18] เป็นเหล็กเสริมทางยาว ในส่วนของเหล็กเสริมทางขวางใช้เหล็ก RB6 และ CDR3.3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

เหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	หน่วยแรงดึงคราก, f_y (MPa)	ค่าความเครียดที่จุดคราก ($\varepsilon x10^{-6}$)
RB6	SR24	445.81	2,122.86
CDR3.3	มอก.747-2531	539.40	2,568.57
DB12	SD40	567.02	2,700.10

2.3 ตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษา ได้ทำการทดสอบคานจำนวน 6 ตัวอย่าง ขนาดเท่ากับ 150 x 300 x 2,500 mm. (กว้าง (b_w) x ลึก (h) x ยาว (L)) ซึ่งมีอัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวด้านบนและด้านล่างเท่ากับ $6.027x10^{-3}$ (2-DB12) และ $12.053x10^{-3}$ (4-DB12) ตามลำดับ ซึ่งกำหนดพฤติกรรมการดัดของตัวอย่างทดสอบให้วิบัติโดยแรงดึงเป็นหลัก นอกจากนี้ ในการศึกษาได้แปรผันวัสดุและรายละเอียดเหล็กเสริมทางขวาง แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มเหล็กปลอกเดี่ยวและกลุ่มเหล็กปลอกสปริง ซึ่งใช้เหล็กปลอกเป็นเหล็กเส้นกลม เกรด SR24 และลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีต ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 2 และ รูปที่ 3 โดยที่ตัวอย่าง M-RB1 กำหนดเป็นตัวอย่างควบคุม ซึ่งพิจารณารายละเอียดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนขั้นต่ำโดยกำหนดระยะเรียงของเหล็กปลอก เท่ากับ 0.50 เท่าของความลึกประสิทธิผล ($d/2$) เป็นไปตามตามมาตรฐาน ACI 318-19 และ ว.ส.ท.1008-38 สำหรับค่ากำลังรับแรงเฉือน (Nominal Shear Strength, V_n) ของหน้าตัดพิจารณาจากมาตรฐาน ACI 318-19 ดังแสดงในสมการ (1-3)

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

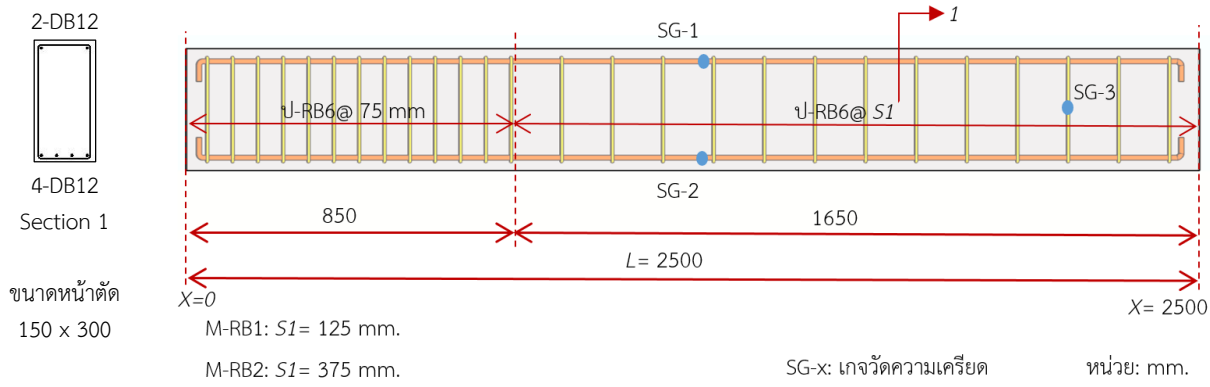
ตัวอย่าง	รายละเอียดเหล็กเสริมทางขวาง ($S1$)	อัตราส่วนเหล็กเสริมทางขวาง ($Av/bS1$) x 10^{-3}	น้ำหนักสูงสุดที่คาดการณ์ , P_{expect} (kN)	ลักษณะการวิบัติ
M-RB1 (ควบคุม)	RB6 @125 mm.	3.018	137.29	แรงดัด
M-RB2	RB6 @375 mm.	1.006	90.10	แรงเฉือน
M-CDR1	CDR3.3 @50 mm.	2.280	137.29	แรงดัด
M-CDR2	CDR3.3 @75 mm.	1.521	137.29	แรงดัด
M-CDR3	CDR3.3 @125 mm.	0.912	127.48	แรงเฉือน
M-CDR4	CDR3.3 @200 mm.	0.570	98.44	แรงเฉือน

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

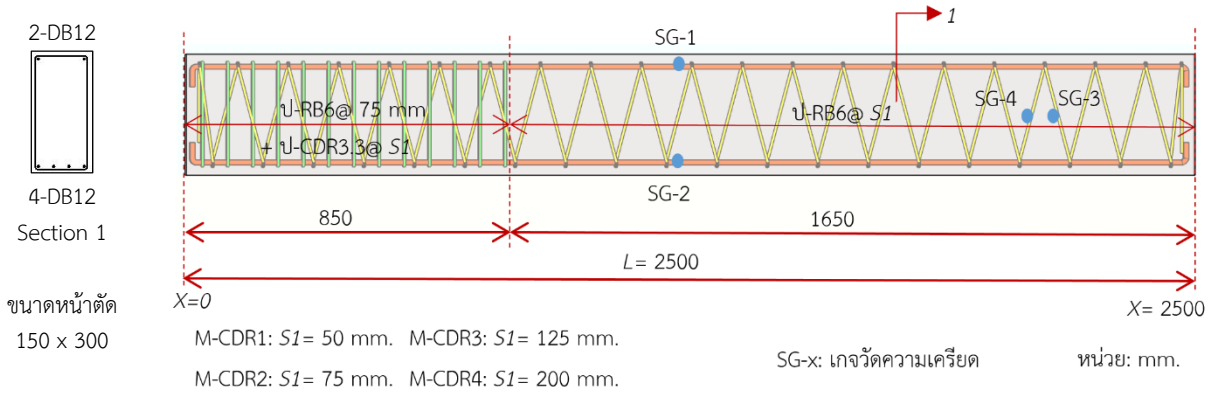
$$V_c = \left[0.17\lambda\sqrt{f_c'} + \frac{N_u}{6A_g}\right] b_w d \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} (\sin\alpha + \cos\alpha) \mathrm{d}}{s} \quad (3)$$

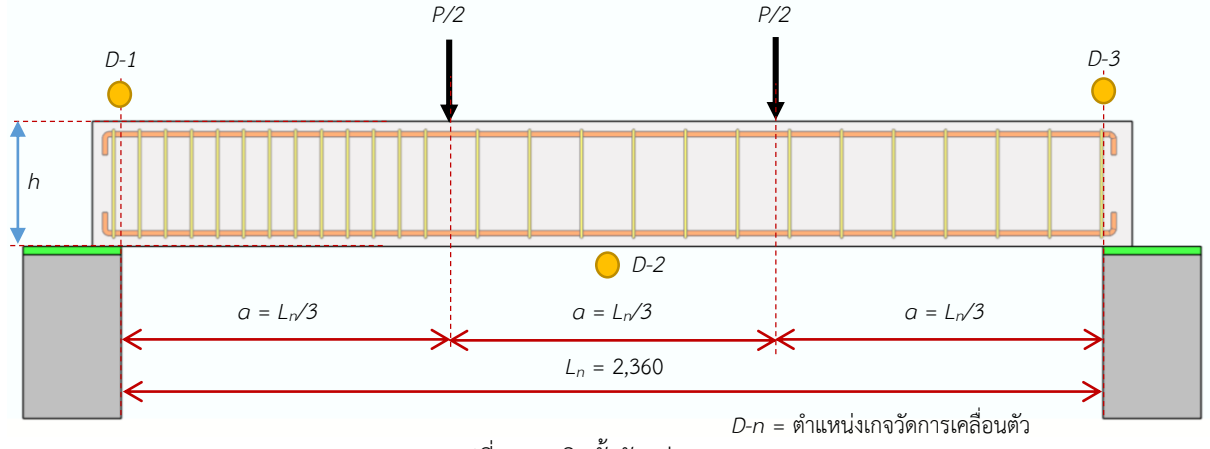
โดยที่ V_n V_c และ V_s เท่ากับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตและกำลังรับแรงเฉือนของปลอก ตามลำดับ สำหรับค่า λ คือเฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ในกรณีที่ใช้คอนกรีตมวลเบา (สำหรับคอนกรีตปกติมีค่าเท่ากับ 1.0) ค่า N_u คือ น้ำหนักบรรทุกในแนวแกนของชิ้นส่วนโครงสร้างคาน ค่า A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง ค่า b_w คือ ความกว้างของคาน ค่า d คือ ค่าความลึกประสิทธิผลของคาน สำหรับค่า A_v คือ พื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมปลอก ค่า f_{yt} คือ ค่ากำลังครากของเหล็กเสริมปลอก ค่า α คือ มุมเอียงของเหล็กเสริมปลอกวัดจากแนวความยาวของคาน และ ค่า $S1$ คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมปลอก



รูปที่ 2 ชุดตัวอย่างทดสอบกลุ่มเหล็กปลอกเดี่ยว



รูปที่ 3 ชุดตัวอย่างทดสอบกลุ่มเหล็กปลอกสปริง



รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการออกแบบกำลัง (Strength Capacity) ของหน้าตัดได้ใช้ มาตรฐาน ACI 318-19 สำหรับพิจารณาน้ำหนักสูงสุดที่คาดการณ์ (P_{expect}) และลักษณะการวิบัติ (Failure Mode) ดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ ได้ติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) เพื่อตรวจสอบค่าความเครียดในตำแหน่งวิกฤต ได้แก่ ตำแหน่ง SG-1 และ SG-2 ติดตั้งที่ระยะกึ่งกลางความยาวคาน ($L/2$) กับผิวเหล็กเสริมทางยาวด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ ในกรณีกลุ่มเหล็กปลอกเดี่ยว ได้ติดตั้งเกจวัดความเครียดที่เหล็กปลอกตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของคาน โดยที่ตำแหน่ง SG-3 ติดตั้งที่ระยะ 2,180 mm.(จาก X=0) สำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่มเหล็กปลอกสปริง ติดตั้งเกจวัดความเครียด SG-3 และ SG-4 ที่เฉลี่ยเท่ากับระยะ 2,180 mm. (จาก X=0)

2.4 การติดตั้งตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

การติดตั้งชุดทดสอบคานคอนกรีตแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 โดยกำหนดให้ลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคานพาดช่วงเดียวแบบง่าย (Simple Span) ระยะพาดเท่ากับ 2,360 mm. สำหรับการทดสอบดำเนินการการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตจนตัวอย่างวิบัติ และทำการเปรียบเทียบการแอ่นตัวขั้นต่ำ (พิจารณาการแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ $L_n/240$) ที่กึ่งกลางความยาวในสภาวะใช้งาน (Serviceability Limitation) จากน้ำหนักบรรทุกตามแรงโน้มถ่วง จากมาตรฐาน ACI 318-19 และ ASCE7-16[19]

การทดสอบใช้วิธีทดสอบน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 3 จุด (Third-point Loading) ตามมาตรฐาน AASHTO T97-18 [20] นอกจากนี้ การทดสอบได้พิจารณาอัตราส่วน a/d เท่ากับ 3.14 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ทำให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในแนวทแยงมุม (Diagonal Tension Failure) [21-22]

รูปที่ 5 การติดตั้งตัวอย่างคานและเครื่องมือทดสอบ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 พฤติกรรมของคานทดสอบ

จากการทดสอบสามารถแบ่งตามวัสดุเหล็กเสริมตามขวางได้ 2 กลุ่ม ได้แก่

3.1.1 กลุ่มเหล็กปลอกเดี่ยว

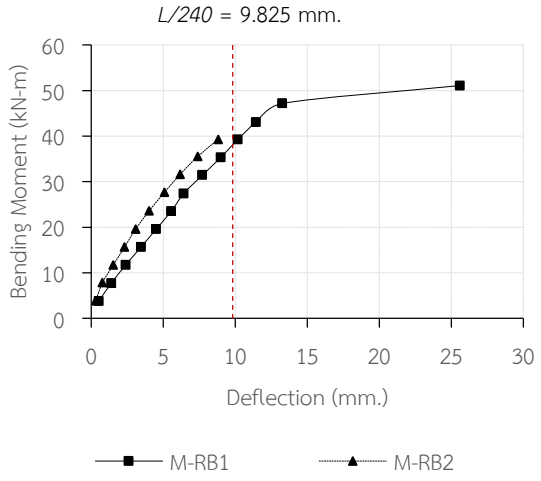
จากการทดสอบตัวอย่างคาน M-RB1 และ M-RB2 พบรอยร้าวแรงดัด (Flexural Crack) กระจายทั่วบริเวณกึ่งกลางคานและรอยร้าวแรงดัดผสมแรงเฉือน (Flexure-shear Crack) บริเวณปลายคานทั้งสองด้าน โดยที่ค่าแรงดัดที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรงดัดแรก (First Flexural crack) ตำแหน่งกึ่งกลางคาน มีค่าเท่ากับ 19.62 และ 11.76 kN-m สำหรับตัวอย่างทดสอบ M-RB1 และ M-RB2 ตามลำดับ ในส่วนของรอยร้าวแรงดัดผสมแรงเฉือน (Flexure-shear Crack) เกิดขึ้น เมื่อค่าแรงดัดเท่ากับ 27.46 และ 15.71 kN-m สำหรับตัวอย่าง M-RB1 และ M-RB2 ตามลำดับ รูปที่ 6 แสดงพฤติกรรมระหว่างค่าแรงดัดและการแอ่นตัว ซึ่งตัวอย่าง M-RB1 แสดงพฤติกรรมการคราก (Plastic Behavior) อย่างชัดเจน โดยมีค่าแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 54.00 kN-m ซึ่งการวิบัติมีสาเหตุมาจากคอนกรีตเกิดการแตกหัก (Rupture) ที่ตำแหน่งรอยร้าวแรงดัดผสมแรงเฉือน ระยะเท่ากับ 1.5d จากปลายคาน ดังแสดงในรูปที่ 8 ในขณะที่ตัวอย่าง M-RB2 เกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด เมื่อแรงดัดเท่ากับ 39.31 kN-m หรือแรงเฉือนเท่ากับ 49.70 kN ซึ่งการวิบัติมีสาเหตุมาจากคอนกรีตเกิดการแตกหัก ที่ระยะเท่ากับ 2.0d จากปลายคาน ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งมีสาเหตุจากกำลังรับแรงเฉือน (Nominal Shear Strength) ของตัวอย่าง M-B2 ต่ำกว่าตัวอย่าง M-B1 เพราะปริมาณของเหล็กเสริมปลอกของตัวอย่าง M-B2

3.1.2 กลุ่มเหล็กปลอกสปริง

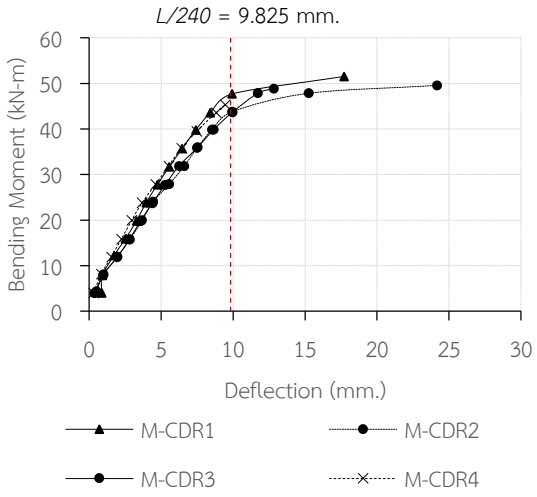
สำหรับตัวอย่างทดสอบคาน M-CDR1 M-CDR2 M-CDR3 และ M-CDR4 พบรอยร้าวแรงดัดเริ่มปรากฏขึ้นที่แรงดัด เท่ากับ 7.93 8.09 11.87 และ 8.15 kN-m ตามลำดับ และปรากฏรอยร้าวแรงดัดผสมแรงเฉือนเมื่อแรงดัดเท่ากับ 27.78 24.04 15.75 และ 15.83 kN-m สำหรับตัวอย่าง M-CDR1 M-CDR2 M-CDR3 และ M-CDR4 ตามลำดับ รูปที่ 7 แสดงพฤติกรรมระหว่างค่าแรงดัดและการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่าง M-CDR1

และ M-CDR2 แสดงพฤติกรรมการคราดอย่างชัดเจน สอดคล้องกับระดับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านล่างที่กึ่งกลางคาน นอกจากนี้ ระดับความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางสำหรับ ตัวอย่าง M-CDR2 พบว่าสูงกว่าระดับความเครียดครากของลวดเหล็กกล้าดึงเย็น ลักษณะการวิบัติแสดงในรูปที่ 10 และ 11 สำหรับตัวอย่าง M-CDR1 และ M-CDR2 ตามลำดับ เกิดขึ้นจากการแตกหัก (Rupture) ของคอนกรีต ที่ตำแหน่งรอยร้าวแรงดัดผสมแรงเฉือน ระยะ 1.0d จากปลายคาน หากสังเกตรอยร้าวดัด รอยร้าวมีระยะห่างที่น้อยกว่าชิ้นทดสอบ M-RB1 ทั้งนี้เนื่องจากมีระยะเรียงที่ถี่กว่า ทำให้มีรอยร้าวมีการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งคาน และความกว้างรอยร้าวมีค่าลดลง ทำให้คานเกิดการคราดและเหล็กเสริมตามยาวสามารถพัฒนาถึงกำลังครากได้อย่างสมบูรณ์เทียบเท่ากับการใช้เหล็กตามขวางด้วยเหล็กเส้นกลม

สำหรับตัวอย่าง M-CDR3 และ M-CDR4 เกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใดทั้งสองตัวอย่าง ซึ่งการวิบัติมีสาเหตุมาจากคอนกรีตเกิดการแตกหัก (Rupture) หรือการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในแนวทแยงมุม (Diagonal Tension Failure) ที่ตำแหน่งรอยร้าวแรงดัดผสมแรงเฉือน ระยะเท่ากับ 1.0d-1.5d จากปลายคาน ซึ่งลักษณะการวิบัติของโครงสร้างเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลัก สอดคล้องกับรูปแบบการวิบัติที่ทำนายไว้ ดังแสดงในรูปที่ 12 และรูปที่ 13 สำหรับตัวอย่าง M-CDR3 และ M-CDR4 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของกลุ่มตัวอย่างเหล็กปลอกเดี่ยว



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของกลุ่มตัวอย่างเหล็กปลอกสปริง

ตารางที่ 3 ค่าความเครียดของเหล็กเสริมที่กำลังสูงสุด

ตัวอย่าง	ค่าความเครียด* $x\ 10^{-6}$				ลักษณะการวิบัติ
	เหล็กเสริมทางยาว		เหล็กเสริมทางขวาง		
	SG-1	SG-2	SG-3	SG-4	
M-RB1	-1,085	2,798	874	-	แรงดัด
M-RB2	-346	2,012	387	-	แรงเฉือน
M-CDR1	-1,125	12,253	1,359	1,255	แรงดัด
M-CDR2	-241	18,573	3,564	1,161	แรงดัด
M-CDR3	-811	2,322	5,262	2,122	แรงเฉือน
M-CDR4	-475	2,301	2,650	-23	แรงเฉือน

*หมายเหตุ: ค่าความเครียด “-” เท่ากับแรงอัด, “+” เท่ากับแรงดึง

ตารางที่ 4 กำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	กำลังสูงสุดจากการทดสอบ			อัตราส่วน $\frac{P_{test}}{P_{exp ect}}$	อัตราส่วน $\frac{P_{test}}{P_{test(M-RB1)}}$
	น้ำหนักกระทำ, P_{test} (kN)	แรงเฉือน, V_{max} (kN)	แรงดัด, M_{test} (kN-m)		
M-RB1	137.40	68.70	54.00	1.00	1.00
M-RB2	99.40	49.70	39.1	1.10	0.72
M-CDR1	137.07	69.54	54.35	1.10	1.00
M-CDR2	124.60	62.30	49.59	0.91	0.91
M-CDR3	123.20	61.60	48.85	0.97	0.90
M-CDR4	114.20	57.10	45.34	1.16	0.83

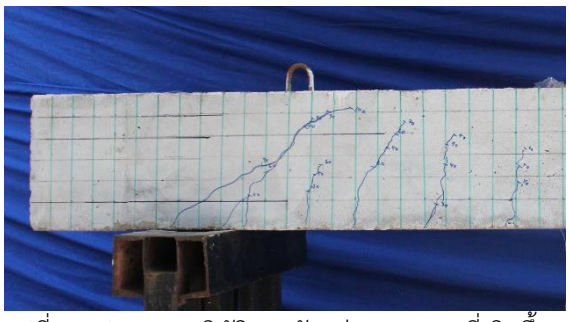
3.1.3 ค่าความเครียดและลักษณะการวิบัติ

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทั้งหมดสอดคล้องกับการวิบัติที่ทำนายไว้ โดยที่ตัวอย่าง M-RB1 M-CDR1 และ M-CDR2 เป็นการวิบัติแบบเหนียว สำหรับคานทดสอบอื่น ๆ มีการวิบัติโดยแรงเฉือน เป็นหลักซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle Failure)

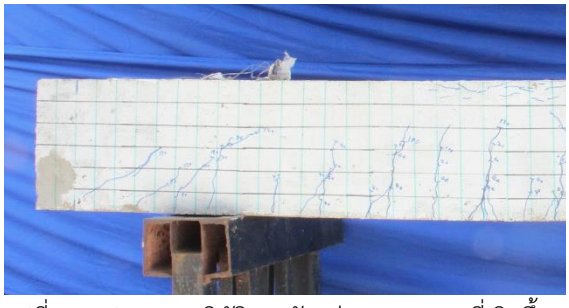
เมื่อพิจารณาค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวดังแสดงในตารางที่ 3 ที่บริเวณกึ่งกลางคานพบว่า ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านล่าง (SG-2) พบว่าค่าความเครียดของเหล็กเสริมในตัวอย่าง M-RB1 M-CDR1 และ M-CDR2 มีค่าสูงกว่าความเครียดที่จุดคราก ซึ่งแสดงให้เห็นการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างสมบูรณ์ ในขณะตัวอย่าง M-RB2 M-CDR3 และ M-CDR4 มีค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวค่าต่ำกว่า สอดคล้องกับลักษณะการวิบัติของโครงสร้างซึ่งเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลักซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle Failure)

นอกจากนี้ ปรากฏระดับความเครียดของเหล็กเสริมทางขวางสูงกว่าจุดครากของลวดเหล็กกล้าดึงเย็น สำหรับตัวอย่างทดสอบ M-CDR2 และ M-CDR3 โดยที่โครงสร้างวิบัติโดยแรงดัดและแรงเฉือน ตามลำดับ

รูปที่ 8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง M-RB1 ที่เกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ



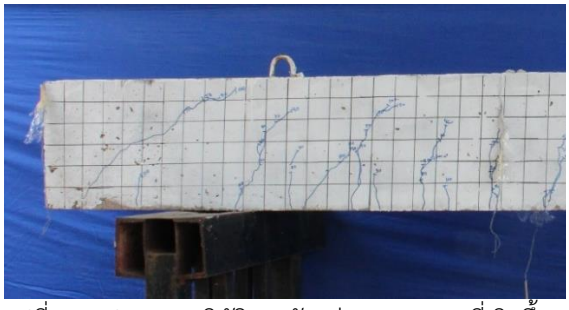
รูปที่ 9 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง M-RB2 ที่เกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ



รูปที่ 10 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง M-CDR1 ที่เกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ

รูปที่ 11 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง M-CDR2 ที่เกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ

รูปที่ 12 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง M-CDR3 ที่เกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ



รูปที่ 13 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง M-CDR4 ที่เกิดขึ้นหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ

3.2 กำลังของตัวอย่างทดสอบ

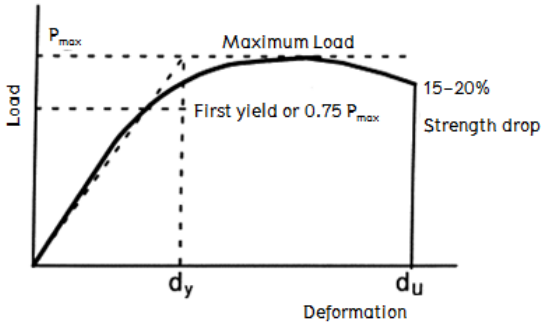
ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 เห็นได้ว่า ตัวอย่างทั้งหมดมีกำลังสูงสุดใกล้เคียงกับกำลังสูงสุดที่คาดการณ์ไว้ (P_{expect}) โดยมีอัตราส่วนระหว่างกำลังสูงสุดจากการทดสอบต่อกำลังที่คาดการณ์ มีค่าเท่ากับ 0.91–1.16 นอกจากนี้หากพิจารณา อัตราส่วนระหว่างกำลังสูงสุดของตัวอย่างคานอื่น ๆ เปรียบเทียบกับคานทดสอบ M-RB1 พบว่า ตัวอย่าง M-CDR1 และ M-CDR2 ซึ่งใช้เหล็กปลอกเป็นลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีต มีอัตราส่วนเทียบเท่ากับกำลังของตัวอย่างทดสอบ M-RB1 ซึ่งมีรายละเอียดเหล็กเสริมตาม ACI 318-19 เท่ากับ 1.00 และ 0.91 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะการวิบัติแบบเหนียวเหมือนกับตัวอย่างควบคุม

3.3 อัตราส่วนความเหนียว (μ)

อัตราส่วนความเหนียว (μ) สามารถคำนวณได้โดยเป็นสัดส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัวหลังจากแรงสูงสุดลดลง (d_u) ร้อยละ 15-20 ต่อระยะเคลื่อนตัวที่จุดคราก (d_y) ดังแสดงในสมการ (4) ถือเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของพฤติกรรมโครงสร้างแบบอินอิลาสติก จากการศึกษาของ PARK[22] ได้เสนอวิธีการการหาค่าระยะเคลื่อนตัวที่จุดคราก ดังแสดงในรูปที่ 14

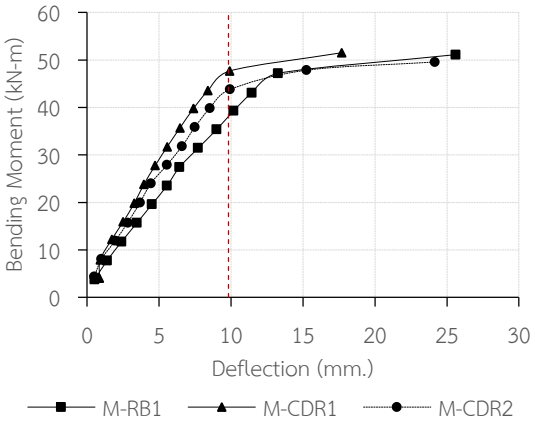
$$\mu = \frac{d_u}{d_y} \quad (4)$$

จากการทดสอบได้คัดเลือกตัวอย่าง M-RB1 M-CDR1 และ M-CDR2 เนื่องจากมีการวิบัติแบบเหนียวและมีค่าการแอ่นตัวมากกว่าค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ สำหรับรูปที่ 15 แสดงเส้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัดและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของตัวอย่างทั้งสาม พบว่า อัตราส่วนความเหนียวของคานทดสอบ M-RB1 M-CDR1 และ M-CDR2 มีค่าเท่ากับ 2.05 2.11 และ 2.42 ดังแสดงในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า การใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีตสามารถนำมาใช้กับโครงสร้าง คสล. รับแรงดัดได้โดยความเหนียวใกล้เคียงกับโครงสร้างคานที่มีรายละเอียดเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ACI 318-19 และ ว.ส.ท.1008-38



L/240 = 9.825 mm.

รูปที่ 14 การคำนวณค่าความเหนียว [22]



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของตัวอย่าง M-RB1 M-CDR1 และM-CDR2

ตารางที่ 5 ค่าความเหนียวของชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	d_y (mm.)	d_u (mm.)	μ
M-RB1	12.50	25.60	2.05
M-CDR1	8.50	17.69	2.11
M-CDR2	10.00	24.18	2.42

4. บทสรุป

บทความนี้ นำเสนอการเปรียบเทียบการใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีตทดแทนเหล็กเส้นกลม เพื่อใช้เป็นเหล็กเสริมทางขวางหรือเหล็กปลอกสำหรับโครงสร้างรับแรงดัดของอาคารพักอาศัย ซึ่งทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบแรงสถิตใช้วิธีน้ำหนักบรรทุกแบบกระทำ 3 จุด (Third-point Testing) ตามมาตรฐาน AASHTO T97-18 จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

- การใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเสริมคอนกรีตเพื่อเป็นเหล็กปลอกสำหรับโครงสร้างรับแรงดัด ควรมีอัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวางสูงกว่า 1.50×10^{-3} (ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 2) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวสามารถนำมาใช้ทดแทนปริมาณเหล็กเส้นกลมสำหรับการจัดระยะเรียงของเหล็กปลอกขั้นต่ำสำหรับคานคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI318-19 และ วสท.1008-38 ได้
- ในกรณี อัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวางมากกว่า 1.50×10^{-3} ระดับความเหนียวและกำลังของคานคอนกรีตที่ใช้ลวดเหล็กกล้าดึงเย็นเป็นเหล็กปลอก มีค่าใกล้เคียงกับคานคอนกรีต ตามมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวางมีผลต่ออัตราส่วนความเหนียวและค่าการเคลื่อนตัวประลัย
- ระดับความเครียดของเหล็กเสริมทางยาว สามารถเพิ่มขึ้นสูงกว่าระดับการครากได้ หากค่าอัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวางสูงกว่า 1.50×10^{-3}

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เม็งรายคอนกรีต จำกัด จังหวัดเชียงราย ที่ได้ให้การสนับสนุน วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] American Concrete Institute. ACI 318-19, Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills: MI; 2019.

[2] The Engineering Institute of Thailand under H.M. the King's Patronage. EIT Standard 1008-38, Building code requirements for reinforced concrete building by strength method. Bangkok: Thailand; 2021.

[3] Thai Industrial Standards Institute. Tis no.747-2531, Cold-drawn steel wire for concrete reinforcement. Bangkok: Thailand; 1988.

[4] Thai Industrial Standards Institute. Tis no.20-2559, Steel bar for reinforced concrete: round bars. Bangkok: Thailand; 2016.

[5] Li B, Park R, Tanaka H. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high- and normal-strength transverse reinforcement J ACI Struct. 2001;98(3):395-406.

[6] Amorn W, Bowers J, Girgis A, Tadros MK. Fatigue of deformed welded-wire reinforcement. J PCI. 2007;52(1):106-20.

[7] American Association of State Highway and Transportation Official. AASHTO LRFD bridge design specification. Washington: DC; 2006.

[8] Lee JY, Lim HS, Kim SE. Evaluation of applicability of high strength stirrup for prestressed concrete members. Int. J Struct Constr Eng 2017;11(6):718-23.

[9] Shin D, Haroon M, Kim C, Lee BS, Lee JY. Shear strength reduction of large-scale reinforced concrete beams with high-strength stirrups. J ACI Struct 2019;116(5):161-72.

[10] Lee JY, Haroon M, Shin DI, Kim SW. Shear and torsional design of reinforced concrete members with high-strength reinforcement. J Struct Eng 2021;147(2): 04020327.

[11] Yan S, Xiao X, Zhang Y, Kan L. Seismic performances of square HSC columns confined with high-strength PC rebar. J Shenyang Jianzhu Univ (Natural Science Edition) 2006;22(1):7-10.

[12] NEHRP Consultant Joint Venture. Use of high-strength reinforcement in earthquake-resistant concrete structures. Gaithersburg, MD: NIST U.S. Dept. of Commerce; 2011. Report No.: GCR 14-917-30.

[13] Shi Q, Yang K, Bai L, Zhang X, Jiang W. Experiments on seismic behavior of high-strength concrete columns confined with high-strength stirrups. J China Civil Eng 2011;44(12):9-17.

[14] Ding HY, Liu Y, Han C, Guo YH. Seismic performance of high-strength short concrete column with high-strength stirrups constraints. J Tran Tianjin U 2017;23:360-69.

[15] Zheng W, Hou C, Chang W. Experimental study on mechanical behavior of circular concrete columns confined by high-strength spiral stirrups. J Build Struct 2018;39(6):21-31.

[16] Paultre P. Influence of concrete strength and transverse reinforcement yield strength on behavior of high-strength concrete columns. J ACI Structural 2001;98(4):490-01.

[17] Wang P, Shi Q, Wang F, Wang Q. Seismic behaviour of concrete columns with high-strength stirrups. J Earthquakes and Structures 2020;18(1):15-25.

[18] Thai Industrial Standards Institute. Tis no.24-2559, Steel bar for reinforced concrete: deformed bars. Bangkok: Thailand; 2016.

[19] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. New York: 2016.

[20] American Association of State Highway and Transportation Official. AASHTO T97-18, Standard Method of Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Washington: DC; 2018.

[21] Park R. Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering 1989;22(3):155-66.

[22] Haddadin MJ, Hong S, Mattock AH. Stirrup effectiveness in reinforced concrete beam with axial force. J Structural Division, ASCE 1971;97(9):2277-98.

[23] Transportation Research Board and National Academes of Sciences, Engineering, and Medicine. Simplified shear design of structural concrete members. Washington, DC: The National Academies Press; 2005. Report No.: 549.

การศึกษาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสำหรับเสาสะพานในจังหวัดนครนายก และการทดสอบคุณสมบัติการขัดสีของมอร์ต้าร์ซ่อมแซม และกำลังเสาจำลอง

A Study of Concrete Deterioration for Bridge Column in Nakhon Nayok Province and the Abrasion Test of Repairing Mortar and Experiment of Column Models

ชนาพันธ์ ถิระโคตร[1] ธนะสิทธิ์ คำริแง[1] พงศภัค กะดี่ทอง[1] และ ศุภชัย สินถาวร[1*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

Chanaphan Tiracort[1], Thanasit Khamringae[1], Pongsapuk Kadeetong[1] and Suppachai Sinthaworn[1*]

[1] Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
63 Moo7 Rangsit-Nakhon Nayok Road, Ongkharak, Nakhon Nayok, Thailand, 21620

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: suppachai@g.swu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-1409-8507

Received: 2 November 2020, Revised: 5 October 2021, Accepted: 11 January 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการเสื่อมสภาพของเสาคอนกรีตในสะพาน และความสามารถในการรับน้ำหนักของ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการบำรุงรักษา โดยจำลองการเสื่อมสภาพของเสาคอนกรีต 2 รูปแบบ คือ 1. การเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบ 2. การเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ โดยใช้เสาตัวอย่างในการทดสอบขนาด 20×20×60 ซม. ซึ่งจะทำการซ่อมแซมเสาที่มีการเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระด้วยการฉาบซ่อมด้วยมอร์ต้าร์ และบ่มด้วยการทาสารละลายโซเดียมซิลิเกต พร้อมกับทดสอบความต้านทานการขัดสีของวัสดุซ่อมแซมด้วยวิธี Rotating-Cutter Method ดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C944 จากผลการทดสอบพบว่า เสาคอนกรีตที่มีการเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบสูญเสียกำลังรับน้ำหนักร้อยละ 4.13 และเสาคอนกรีตที่มีการเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระสูญเสียกำลังรับน้ำหนักร้อยละ 7.67 เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตปกติ ส่วนเสาคอนกรีตเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระหลังการซ่อมแซมสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.34 เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตปกติ สำหรับวัสดุซ่อมพบว่า การบ่มมอร์ต้าร์ด้วยการทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพิ่มความต้านทานต่อการขัดสีร้อยละ 0.3 โดยมวล จากมอร์ต้าร์ปกติ และมีกำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.41

คำสำคัญ คอนกรีตเสริมเหล็ก เสา ซ่อมแซม การกัดกร่อน โซเดียมซิลิเกต การเสื่อมสภาพ

Abstract

This project aimed to study the deterioration of concrete piers in bridge. The residual capacity of reinforced concrete deteriorated columns were studied through two selected deterioration types which are smooth surface deterioration and rough surface deterioration. The tested models of reinforced concrete column were generated as the short column specimen, 20x20x60 cm. The abrasion resistance of repairing mortars and the capacity of columns were experimented by Rotating-Cutter Method which is modified from ASTM C944. The result shows that the capacity of smooth surface deteriorated column decreases by 4.13% whereas that of

rough surface deteriorated column decreases by 7.67%. The rough surface models were repaired by plastering mortar and apply sodium silicate on the surface. After plastering, strength of the repaired columns was increased by 12.34%. In addition, the repairing material shows that plastering mortar with sodium silicate demonstrates higher abrasion resistance 0.3% by weight than normal mortar, and compressive strength increases by 6.41%.
Keywords: Reinforced Concrete, Pier, Repair, Erosion, Sodium Silicate, Deterioration.

1. บทนำ

สะพานข้ามแม่น้ำลำคลอง คือโครงสร้างสำคัญที่เชื่อมต่อระหว่างสองฝั่งที่มีแม่น้ำ ซึ่งจะมีสะพานที่ทำจากไม้ เหล็กรูปพรรณ หรือ คอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับเสาสะพาน ที่มักใช้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาส่วนประกอบสำคัญในการรับแรงอัด เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลานานคอนกรีตเสริมเหล็ก มักจะเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพมีด้วยกันหลายด้าน ได้แก่ ด้านกายภาพ (Physical) ด้านเคมี (Chemical) ด้านกล (Mechanical) ด้านชีวภาพ (Biological) เช่น การกัดกร่อนของสารเคมีหรือน้ำที่มีสภาวะเป็นกรด ความเสียหายที่มาจากความแรงของกระแสน้ำ ฯลฯ และอาจมีปัจจัยเร่งความเสียหาย ในส่วนที่มีน้ำขึ้นน้ำลงเป็นประจำ คอนกรีตจึงอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง อยู่เป็นประจำ ทำให้เร่งการกัดกร่อน อันเนื่องมากจากคลอไรด์ หรือ สารอื่น ๆ ในน้ำ [1]

การสึกกร่อน (Erosion) เป็นความเสียหายที่พบเป็นจำนวนมากสำหรับเสาสะพาน โดยผิวหน้าคอนกรีตซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนไหวของน้ำอาจมีอนุภาคของแข็งแขวนลอยปนอยู่ กลไกที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการกัดกร่อนซีเมนต์เพสต์ที่เชื่อมประสานที่จับยึดมวลรวมบริเวณผิว การกัดกร่อน ในลักษณะดังกล่าวหากเกิดขึ้นติดต่อกันเป็นเวลานานพออาจขยายเป็นความเสียหายรุนแรงได้ [2]

คอนกรีตมักถูกพิจารณาในลักษณะวัสดุสองสถานะ “Two - Phase Material” โดยพิจารณาเฉพาะสองส่วนประกอบหลักคือซีเมนต์เพสต์ที่เชื่อมประสาน และมวลรวมที่เป็นวัสดุแทรกซึ่งยึดโยงเข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายแข็งแรง อย่างไรก็ตาม ส่วนต่อระหว่างผิวมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ ซึ่งไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันกับวัสดุทั้งสอง และเนื่องจากคอนกรีตมีมวลรวมปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมด คือไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 - 60 ทำให้มีบริเวณรอยต่อหรือ Interfacial Transition Zone (ITZ) ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างไปจากบริเวณอื่น ๆ ITZ [1] จัดเป็นจุดอ่อนหนึ่งของคอนกรีต ดังนั้นในการพัฒนาคอนกรีตให้มีความคงทน ต่อการกัดกร่อนจึงควรพัฒนา ITZ ด้วย

สารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งมีสมบัติเป็นด่างสามารถใช้เป็นวัสดุทาผิวหน้าคอนกรีต เพื่อลดปัญหาในด้านการแตกร้าวบนผิวหน้าของคอนกรีต เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยา กับสารประกอบแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (ซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จึงส่งผลทำให้ผิวหน้าคอนกรีต มีความแข็งแรงและมีความทึบน้ำมากขึ้น ทำให้ผิวของคอนกรีตมีความต้านทานการขัดสีและการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากขึ้นด้วย [3]

ดังนั้นการซ่อมแซมเสาสะพานจากปัญหาการสึกกร่อนโดยใช้การฉาบด้วยมอร์ต้าร์และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารเพิ่มความคงทนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการหาแนวทางในการบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาหารูปแบบการเสื่อมสภาพ ของเสาสะพานคอนกรีต โดยการสุ่ม ใน อำเภอองครักษ์ และ อำเภอเมืองจังหวัดนครนายก

2.2 ศึกษาคุณสมบัติการขัดสีของมอร์ต้าร์ที่คาดว่าจะใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม โดยมีการใช้ สารละลายโซเดียมซิลิเกตทาผิวหน้าวัสดุซ่อม

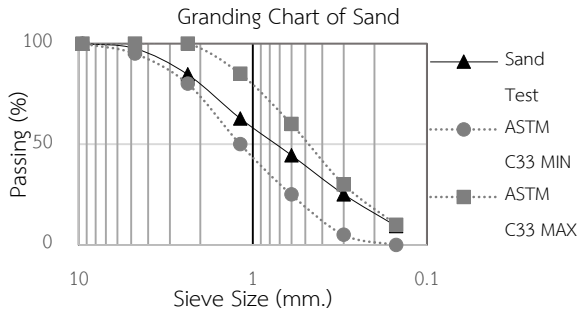
2.2 ศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักของแบบจำลอง เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ใน 3 ลักษณะ คือ 1) มีความเสียหายของผิว 2) ไม่มีความเสียหาย และ 3) มีการซ่อมแซมผิว

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหารูปแบบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากเสาสะพานในจังหวัดนครนายก เมื่อทราบรูปแบบ จะทำการออกแบบส่วนมอร์ต้าร์และสารเคลือบผิวคอนกรีต และ ทำการทดสอบการขัดสี ทดสอบแบบจำลองเสาปกติ เสาที่เสียหาย และเสาที่บำรุงรักษาแล้ว โดยมีรายละเอียดของการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทดสอบกำลังรับน้ำหนักและวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมประกอบด้วย 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 2) ทรายแม่น้ำขนาดตามมาตรฐาน ASTM C33 แสดงขนาดคละดังรูปที่ 1 3) มวลรวมหยาบใช้หินขนาด 3/4” (20 มม.) 4) สารละลายโซเดียมซิลิเกต คุณสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกตแสดงในตารางที่ 1 (5) เหล็กข้ออ้อยขนาด DB12 (SD30) และเหล็กปลอกขนาด RB6 (SR24)



รูปที่ 1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

คุณสมบัติ	ค่าที่ปรากฏ
อัตราส่วนโดยโมล	2.3
Total Alkaline (as % Na_2O)	16.50 $\pm$ 1.0
Silicon Content (as % SIO_2)	35.25 $\pm$ 1.0
Mole Ratio	2.00 - 2.30
Specific Gravity (at 20° C)	1.620 - 1.720

3.2 การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและจำลองการเสื่อมสภาพของเสาคอนกรีตขนาด 20x20 ซม. สูง 60 ซม.เสริมเหล็กยืน 4DB12 และเหล็กปลอก RB6 ระยะเรียง 20 ซม. ทำการบ่มด้วยการหุ้มแผ่นพลาสติกใส จนถึง อายุทดสอบที่ 28 วัน อัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2 ติดตั้งอุปกรณ์มาตรวัดความเครียด และอุปกรณ์วัดระยะขจัด อุปกรณ์วัดแรงเข้ากับตัวอย่างเพื่อใช้ขณะทดสอบ ทั้งนี้จำนวนตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 4 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

วัสดุ	น้ำหนัก (กิโลกรัม/ลบ.ม.)
ซีเมนต์	375
มวลรวมละเอียด	744
มวลรวมหยาบ	1,012
น้ำ	205
รวม	2,337

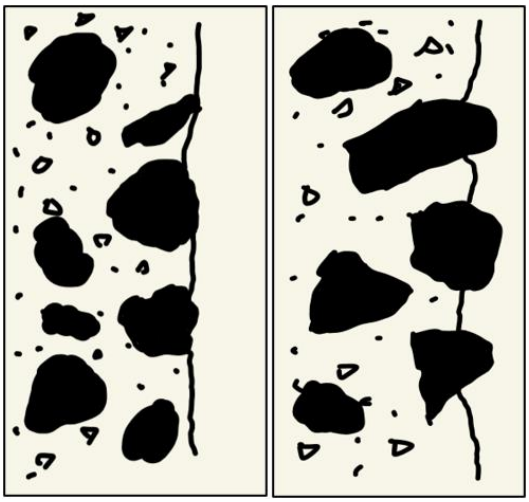
ตารางที่ 3 ประเภทและหมายเลขของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ จำนวน 8 ต้น

หมายเลขตัวอย่าง	รูปแบบการเสื่อมสภาพ	วิธีการซ่อมแซม
C1-N, C2-N	-	-
C1-SSB, C2-SSB	แบบผิวเรียบ	-
C1-RSB, C1-RSB	แบบผิวขรุขระ	-
C1-RSA, C2-RSA	แบบผิวขรุขระ	ฉาบผิวด้วยมอร์ต้าร์ ทาเคลือบด้วยโซเดียวซิลิเกต

ทั้งนี้กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองที่อายุ 28 วัน มีค่าในช่วง 335-340 กก./ซม.^{2} (จากตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานสูง 30 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม.) ขณะที่กำลังของคอนกรีตตามแบบของสะพาน จะเป็นคอนกรีต ค.3 (ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง) กำลังไม่น้อยกว่า 250 กก./ซม.^{2} และจากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าค่าประมาณจากการทดสอบรีบาวด์แฮมเมอร์ ได้ค่าประมาณ 300 กก./ซม.^{2} [4]

การจำลองการเสื่อมสภาพของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งเป็นการจำลองเสาที่เสื่อมสภาพแบบผิวเรียบและผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีขั้นตอนวิธีการทำดังนี้ (1) หล่อคอนกรีตลงในแบบทำการถอดแบบหล่อหลังจากคอนกรีตเริ่มแข็งตัวประมาณ 1 ชั่วโมงครึ่งถึง 2 ชั่วโมง คอนกรีต

จะเริ่มคงรูปร่างได้ (2) ทำการเอามอร์ต้าร์บริเวณผิวออกด้วยการขูดด้วยฟองน้ำ กำหนดความลึกด้วยความกว้างของหน้าตัด แบบผิวเรียบขูดผิวออกด้านละ 0.25 ซม. และแบบผิวขรุขระขูดผิวออกด้านละ 0.5 ซม. จากเดิมหน้าตัดเสาความกว้าง 20 ซม. สำหรับการซ่อมด้วยการฉาบมอร์ต้าร์จะฉาบให้ได้ความหนาด้านละ 0.5 ซม. สำหรับแบบผิวขรุขระขูด เพื่อให้ได้ขนาดเสาเท่าเดิม จากนั้นบ่มรออายุทดสอบที่ 28 วัน



(ก) (ข)

รูปที่ 2 (ก) จำลองการเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบ (ข) จำลองการเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ

การซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ ก่อนการฉาบซ่อมตรวจสอบสภาพเนื้อคอนกรีตและทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อเพิ่มความยึดติดให้กับวัสดุซ่อมแซมปรับสภาพความชื้นด้วยน้ำ เลือกใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 1:1 หลังการฉาบซ่อมแซม 24 ชั่วโมง ทำการบ่มคอนกรีตด้วยการทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตทันที ทาผิวหน้าของเสาจำนวน 3 รอบแต่ละรอบห่างกันเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหลังจากนั้นบ่มในอากาศจนถึงเวลาทดสอบ

การทดสอบความต้านทานการขัดสีและวิธีการซ่อมแซมเสาจากการเสื่อมสภาพ เลือกใช้วิธีการซ่อมแซมเสาด้วยวิธีการฉาบด้วยมอร์ต้าร์ตามอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4 (เก็บตัวอย่างมอร์ต้าขนาด 5x5x5 ซม. ทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ในช่วง 445-452 กก./ซม.^{2}) และนำไปทดสอบความต้านทานการขัดสีเพื่อศึกษาประสิทธิภาพความคงทนของวัสดุที่นำมาใช้ซ่อมแซม โดยดัดแปลงมาจากวิธี Rotating-Cutter Method ตามมาตรฐาน ASTM C944

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการซ่อมแซม

วัสดุ	อัตราส่วนผสม
ซีเมนต์ (Cement)	1
มวลรวมละเอียด (Sand)	2.75
น้ำต่อซีเมนต์ (w/c)	0.485

หล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ซม. จำนวน 6 ตัวอย่าง แบ่งเป็นตัวอย่างมอร์ต้าร์ธรรมดา บ่มน้ำเป็นเวลา 7 วัน จำนวน 3 ตัวอย่าง และตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ซ่อมแซม ด้วยการทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตทันทีหลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง ทาผิวหน้าจำนวน 3 รอบ โดยแต่ละรอบจะห่างกันเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศเป็นเวลา 7 วัน จำนวน 3 ตัวอย่าง ก่อนนำตัวอย่างทั้ง 2 แบบไปทดสอบการขัดสี นำตัวอย่างคอนกรีตใส่อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานกับชุดทดสอบการขัดสี ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นนำมอร์ต้าร์ทั้ง 6 ตัวอย่างนำมาขัดด้วยหัวขัด (Dressing Wheel) โดยมีความเร็วในการขัด 200 รอบต่อนาทีภายใต้แรงกด 197$\pm$ 2 นิวตัน เป็นเวลารอบละ 2 นาที จำนวน 3 ด้านไม่ซ้ำกัน บันทึกค่าการสูญเสียน้ำหนัก เพื่อนำมาเปรียบเทียบความทนทานต่อการขัดสี ระหว่างมอร์ต้าร์ปกติ และมอร์ต้าร์ที่ทาด้วยโซเดียมซิลิเกต

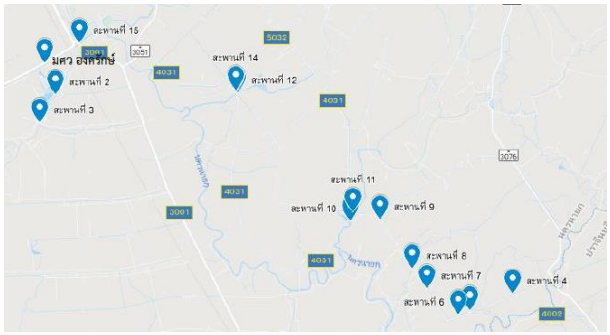
(ก) (ข)

รูปที่ 3 (ก) ขั้นตอนการขัดสี (ข) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการขัดสี

4. บทสรุป

4.1 สาเหตุการเสื่อมสภาพของคอนกรีต

จากการสุ่มสำรวจรูปแบบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากเสาสะพานใน อำเภอองครักษ์ และอำเภอเมือง จังหวัดนครนายก เป็นจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 15 สะพาน ตามตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตำแหน่งสะพานที่ทำการสำรวจ

ทำการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีตรวจพินิจ พบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตแบ่งตามลักษณะการเสื่อมสภาพที่คล้ายกัน แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

4.1.1 การเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบ

พบการเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบของคอนกรีตจากตัวอย่างของเสาสะพานซอยโยธาธิการ (แยก นย.4031 กม. 7 + 400) อธิบายลักษณะเบื้องต้นที่ได้จากการสังเกตเป็นความเสียหายการสึกกร่อนของพื้นผิวคอนกรีต ผิวของคอนกรีตรอบ ๆ ของเสาหายไปแบบเรียบอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งเห็นผิวของมวลรวมหยาบดังแสดงในรูปที่ 5

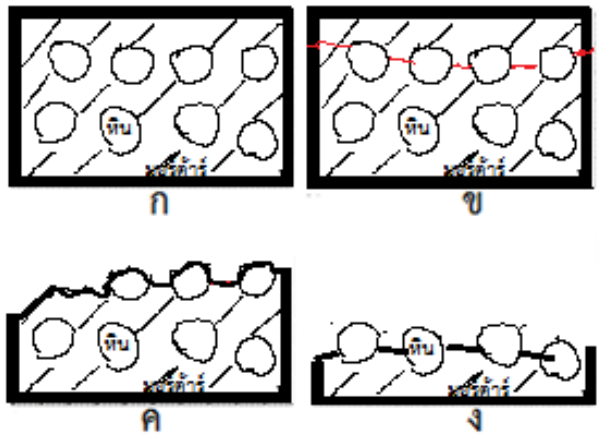
การเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบของคอนกรีตตามลำดับเวลา (แสดงในรูปที่ 6) ของคอนกรีตที่ถูกขัดสีด้วยน้ำที่มีทรายเป็นองค์ประกอบ พื้นผิวคอนกรีตต้องผ่านการขัดสีก่อน จากนั้นจะค่อย ๆ เผยวัสดุประสานและมวลรวมที่อยู่ด้านใน ความรุนแรงของแรงกระแทกนี้สัมพันธ์กับความเร็วการไหลและความดันไฮดรอลิกของน้ำ รวมไปถึงผลกระทบของอนุภาคของแข็ง (เช่น เม็ดทรายที่มีในน้ำ) บนพื้นผิวจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของอินเตอร์เฟสระหว่างองค์ประกอบคอนกรีต จนในที่สุดก็เกิดการกระทำการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวคอนกรีต [5]

รูปที่ 5 ความเสียหายของสะพานซอยโยธาธิการและลักษณะสภาพลำน้ำ (ฤดูแล้ง)

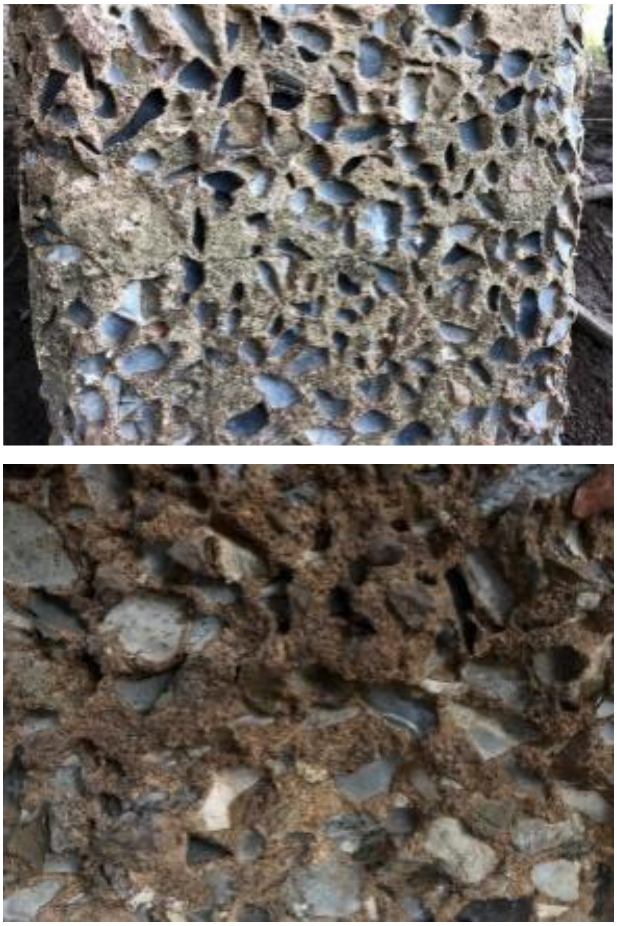
เมื่อนำรูปแบบสภาพความเสียหายของคอนกรีตที่ได้จากการสำรวจมาเปรียบเทียบกับสภาพความเสียหายของคอนกรีตจากงานวิจัยอื่น [5] พบว่าสภาพความเสียหายของคอนกรีตมีลักษณะใกล้เคียงกัน จากสภาพของพื้นผิวคอนกรีตมีการสึกกร่อนแบบผิวเรียบอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งเห็นมวลรวมหยาบ ซึ่งเกิดจากการขัดสีหรือการเลื่อนไปมาของวัตถุและในสภาพแวดล้อมของเสาสะพานที่ตั้งอยู่ในแม่น้ำที่มีกระแสน้ำพัดพาตลอดเวลาจึงทำให้เกิดการพัดพาตะกอนหรือเม็ดทรายกระทบกับพื้นผิวคอนกรีตทำให้เกิดการขัดสี ซึ่งเป็นสาเหตุของการสึกกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตที่พบเจอได้

4.1.2 การเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ

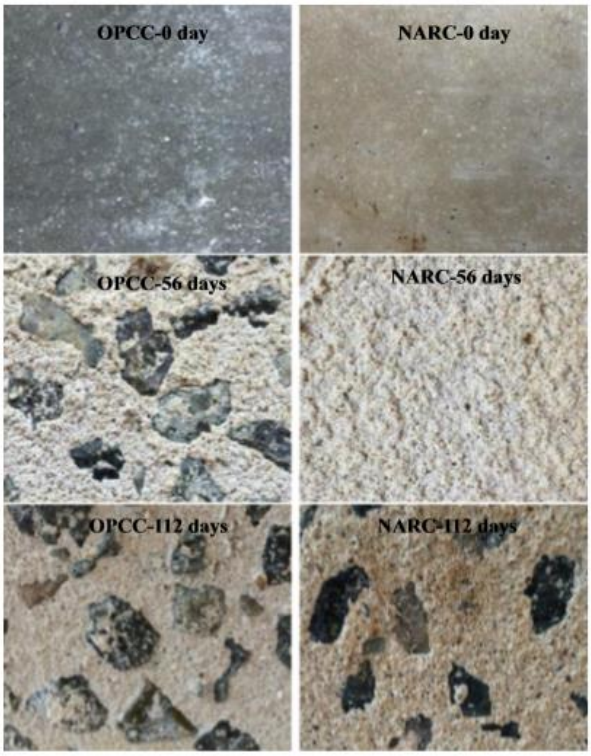
การเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระที่พบเจอตัวอย่างจากเสาสะพาน ให้เป็นการเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระลักษณะความเสียหายที่ได้จากการสังเกต แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ 1) แบบพื้นผิวมอร์ต้าร์หลุดหน้ามวลรวมหยาบ 2) แบบพื้นผิว



รูปที่ 6 ลำดับการสึกกร่อนของพื้นผิวคอนกรีต[5] (ก) ผิวปกติ (ข) พื้นผิวคอนกรีตภายใต้การเสียดสี (ค) การสูญเสียมวลรวมหยาบและมอร์ต้าร์จากพื้นผิวคอนกรีต (ง) การสูญเสียมวลรวมหยาบและมอร์ต้าร์จากพื้นผิวคอนกรีตรุนแรง



รูปที่ 7 การเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ



(ก)

(ข)

รูปที่ 8 (ก) ภาพพื้นผิวของคอนกรีตแนวปะการังเทียมใหม่และ คอนกรีตธรราดา ถูกโจมตีโดยกรดซัลฟิวริกชีวภาพ [6] (ข) การเสื่อมสภาพของพื้นผิวคอนกรีตเป็นผลมาจากความเป็นกรดของน้ำ [7]

มอร์ต้าร์ลึกกว่าระดับมวลรวมหยาบ โดยการเสื่อมสภาพของคอนกรีตของทั้งสอง มีลักษณะคล้ายกัน คือ เป็นการสูญเสียผิวมอร์ต้าร์ ซึ่งต่างกันที่ระดับความลึกของการสูญเสียมอร์ต้าร์(อาจเนื่องด้วยเวลา) แสดงลักษณะการเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ ดังรูปที่ 7

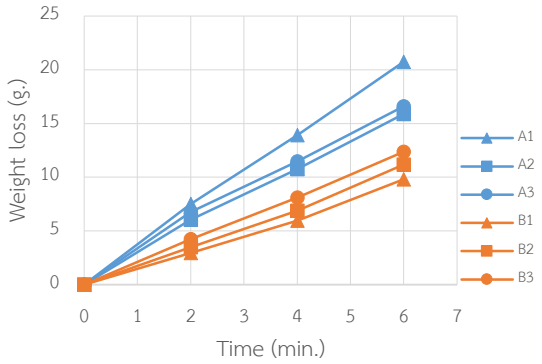
เปรียบเทียบลักษณะของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่ทำการสำรวจกับคอนกรีตจากงานวิจัยของ Yu และคณะ (2017). แสดงดังรูปที่ 8 พื้นผิวของ คอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตแนวปะการังเทียมใหม่ ที่ถูกกัดกร่อนโดยกรดซัลฟิวริกชีวภาพในวันที่ 0, 56 และ 112 จะเห็นได้ว่าหลังจากการโจมตีของกรดซัลฟิวริกชีวภาพเป็นเวลา 56 วันพื้นผิวของ คอนกรีตธรรมดาดูเหมือนจะเป็นสีขาวพร้อมรูพรุน นอกจากนี้เมทริกซ์ของชิ้นงานเริ่มอ่อนตัวลงและมวลรวมหยาบถูกเปิดเผยเนื่องจากการละลายของมอร์ต้าร์ที่ยึด ติดเมทริกซ์ไว้ [6]

จากงานวิจัยของ Yu และคณะ (2017) ลักษณะการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่พบจากการสำรวจ มีลักษณะการเสื่อมสภาพของคอนกรีต คล้ายกับความเสียหายของคอนกรีตที่ระยะเวลา 56 วันและ 112 วัน ของกรดซัลฟิวริกชีวภาพ อาจเป็นข้อสังเกตได้ว่า เสาตอม่อสะพานสัมผัสกับกรดชีวภาพ หรือกรดอื่นในสภาพแวดล้อมได้ดังรูปที่ 8 (ข) ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่พบในการสำรวจ คือรูปแบบพื้นผิวมอร์ต้าร์หลุดหน้ามวลรวมหยาบ และการเสื่อมสภาพแบบพื้นผิวมอร์ต้าร์ลึกกว่าระดับมวลรวมหยาบ ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบมีสาเหตุจากการเสื่อมสภาพจากกรด (ทั้งนี้ได้ทำการวัดความเป็นกรดด่างในบริเวณเสาตอม่อสะพาน พบว่ามีค่าความเป็นกรดอ่อน pH มีค่าระหว่าง 6.15 ถึง 7.85 น้ำในฤดูแล้ง) อาจแตกต่างกันที่ระยะเวลาและความรุนแรงของการกัดกร่อนจากงานวิจัยของก่อนหน้า [6] [7]

4.2 วัสดุสำหรับการซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.2.1 ผลทดสอบการขัดสีของมอร์ต้าร์

การทดสอบความต้านทานการขัดสีของมอร์ต้าร์ แบบไม่ทาสารละลายโซเดียมซิลิเกต (A1-3) และ แบบทาสารละลายโซเดียมซิลิเกต (B1-3) พบว่าเมื่อระยะเวลาการขัดสีมากขึ้น ค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมากขึ้น โดยค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ตัวอย่าง A1-3 ที่ เวลา 6 นาที มีค่า 16-20 กรัม คิดเป็นค่าร้อยละการสูญเสียของเท่ากับ 0.97 0.73 และ 0.78 ตามลำดับ และค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ตัวอย่าง B1-3 ที่เวลา 6 นาที เท่ากัน มีค่า 10-12 กรัม ตามลำดับ คิดเป็นค่าร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 0.46-0.58 จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9 พบว่ามอร์ต้าร์แบบทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีความทนทาน มากกว่า ไม่ทาสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาทดสอบและค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์แบบทาและไม่ทาสารละลายโซเดียมซิลิเกต

4.2.2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

จากผลการทดสอบพบว่าที่มอร์ต้าร์อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.485 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่อายุบ่ม 28 วันของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ไม่ทา และทาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 320 และ 341 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10 จากการทดสอบพบว่าการบ่มมอร์ต้าร์มาตรฐาน ด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตนั้นจะเพิ่มค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ให้มีค่ามากขึ้นร้อยละ 6.41 และ ค่าความต้านทานต่อการขัดสีให้กับผิวของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก เมื่อสังเกตถึงค่ากำลังอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีความสอดคล้องกัน คือ เมื่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มอร์ต้าร์มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีลดลง และยังแสดงให้เห็นว่าการบ่มมอร์ต้าร์ด้วยการทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตช่วยเพิ่มกำลังอัด และความทนทานต่อการขัดสี

4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองเสาสะพาน

4.3.1 เสาตัวอย่างก่อนซ่อมแซม

เมื่อทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยเพิ่มแรงกระทำตามแนวแกน จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติและมีรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้นจนเสาไม่สามารถรับแรงกระทำเพิ่ม

ต่อไปได้ โดยมีเสาดังนี้ เสาคอนกรีตแบบไม่มีการเสื่อมสภาพ (C1-N, C2-N) เสาคอนกรีตเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบ (C1-SSB, C2-SSB) และเสาเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ (C1-RSB, C2-RAB) ดังแสดงในรูปที่ 11-13

เสาคอนกรีตแบบไม่มีการเสื่อมสภาพ ได้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาตัวอย่าง C1-N มีค่าเท่ากับ 82.96 ตัน และเสาตัวอย่าง C2-N มีค่าเท่ากับ 79.97 ตัน ซึ่งได้ค่าประมาณร้อยละ 64 ของสมการกำลังประลัยของเสาตาม ACI-318-19 (127 ตัน) และหากรวมตัวคูณลดกำลังจากลักษณะการรับแรงอัด (0.8) กำลังประลัยที่ยอมให้จะมีค่าประมาณ 100 ตัน ซึ่งค่าที่ทดสอบได้ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของการอัดแน่นของคอนกรีต จากทักษะฝีมือแรงงานที่ไม่ดีนัก อย่างไรก็ตาม ในมุมมองของการเปรียบเทียบกำลังของเสายังสามารถทำได้ เนื่องด้วยทุกเสามีคุณภาพ และควบคุมวิธีการผลิตตัวอย่างที่คุณภาพเท่ากัน

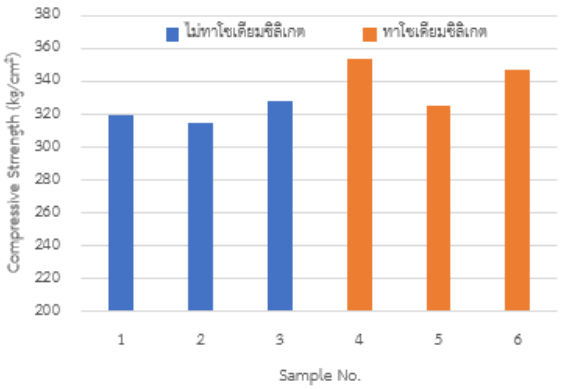
เสาคอนกรีตเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบ ได้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาตัวอย่าง C1-SSB มีค่าเท่ากับ 76.16 ตัน และเสาตัวอย่าง C2-SSB มีค่าเท่ากับ 80.03 ตัน

เสาเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ ได้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาตัวอย่าง C1-RSB มีค่าเท่ากับ 74.03 ตัน และเสาตัวอย่าง C2-RSB มีค่าเท่ากับ 76.40 ตัน

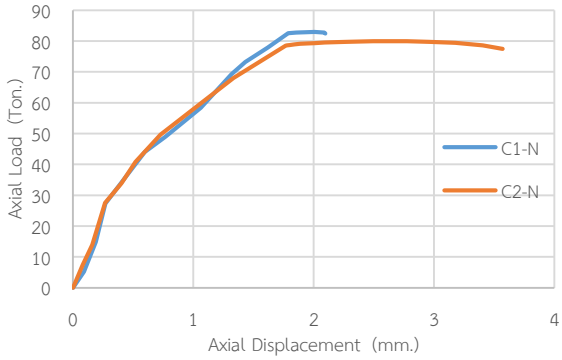
4.3.2 เสาตัวอย่างที่มีการซ่อมแซมผิว

ตัวอย่างเสา C1-RSA และ C2-RSA จำลองการเสียหายที่ผิวแบบขรุขระ เสาทั้งสองก่อนทดสอบ จะถูกซ่อมแซมโดยวิธีการฉาบผิวด้วยมอร์ต้าร์ เมื่อทดสอบเสา C1-RSA สามารถรับน้ำหนักได้ 89.63 ตัน มีค่าการเสียรูปตามแนวแกนเท่ากับ 4.91 มม. เสา C2-RSA สามารถรับน้ำหนักได้ 93.40 ตัน มีค่าการเสียรูปตามแนวแกนเท่ากับ 3.70 มม. ภายใต้การเพิ่มแรงกระทำตามแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 14

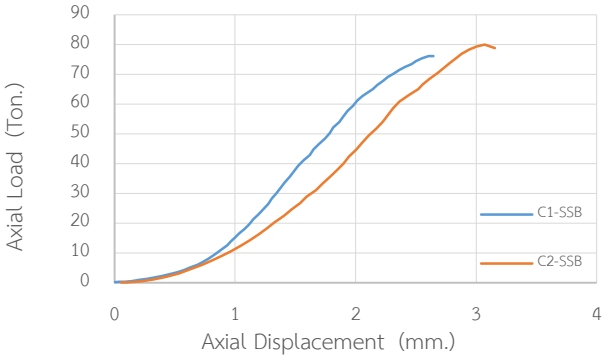
เสาที่ซ่อมผิวแล้ว RSA รับน้ำหนักได้เฉลี่ย 91.5 ตัน จากเสาเสื่อมสภาพเดิมที่ไม่มีการซ่อมผิวรับได้เฉลี่ย 75.2 ตัน ซึ่งแสดงว่าการซ่อมด้วยมอร์ต้าร์ใหม่ และบ่มหรือทาด้วยโซเดียมซิลิเกต ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น 16.3 ตัน แต่ถ้าพิจารณากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ใหม่ที่ทาด้วยโซเดียมซิลิเกตสามารถรับกำลังอัดได้สูงสุดประมาณ 350 กก./ซม.^{2} การซ่อมเสาให้มีขนาดเท่าเดิมจะมีพื้นที่ของมอร์ต้าร์ใหม่ประมาณ 38 ซม.^{2} ซึ่งจะทำให้ได้กำลังอัดเพิ่มเท่าประมาณ 350x38/1000 = 13.3 ตัน ซึ่งน้อยกว่า กำลังรับแรงอัดที่ได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ด้วยการยึดติดจากการฉาบ ไม่อาจทำให้คอนกรีตกลายเป็นเนื้อเดียวเหมือนเสาที่หล่อปกติได้ จึงไม่สามารถรับแรงได้เหมือนการหล่อคอนกรีตตั้งแต่แรก



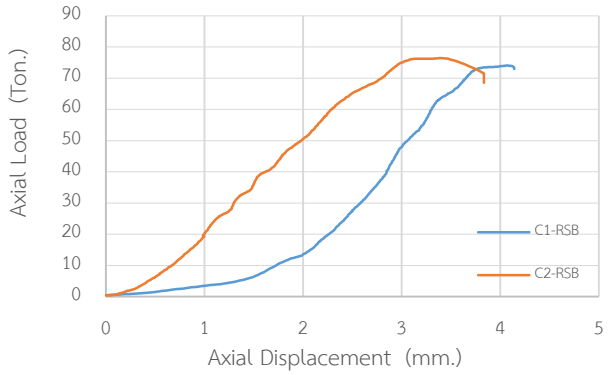
รูปที่ 10 ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของมอร์ต้าร์ โดยการทาและ ไม่ทาผิวด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต



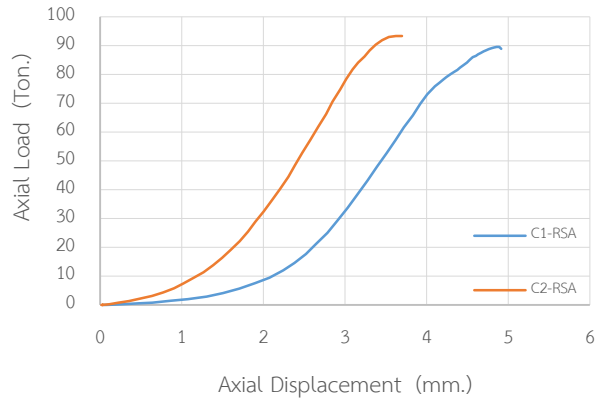
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะที่เปลี่ยนแปลงตามแกนของเสา C1-N, C2-N



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะที่เปลี่ยนแปลงตามแกนของเสา C1-SSB, C2-SSB



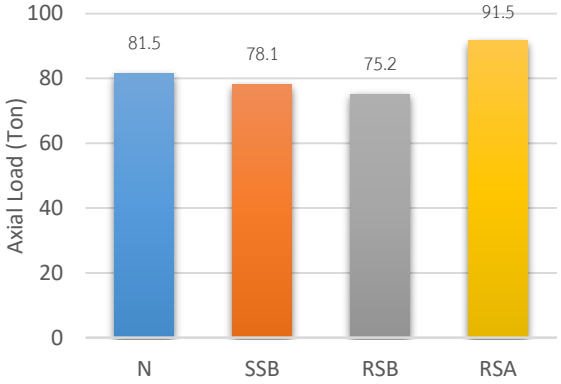
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะที่



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับระยะที่เปลี่ยนแปลงตามแกนของเสา C1-RSA, C2-RSA

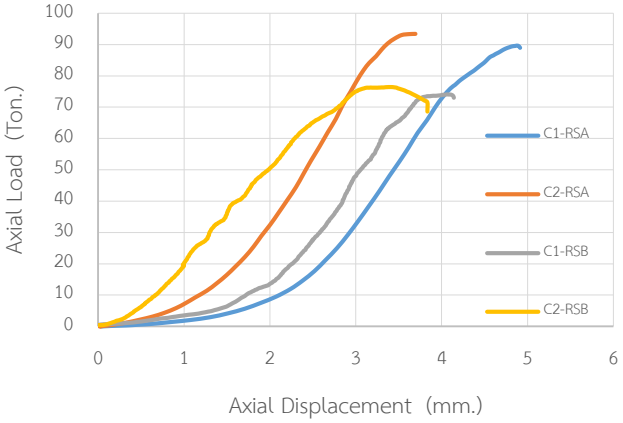
4.3.3 การเปรียบเทียบกำลังของเสาที่สภาวะต่าง ๆ

เมื่อนำค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตที่ปกติ (N) ที่เสื่อมสภาพ (SSB, RSB) และหลังซ่อมแซม (RSA) เปรียบเทียบกัน พบว่ากำลังรับน้ำหนักเฉลี่ยของเสาคอนกรีตจะลดลงจากผิวเรียบ และเป็นแบบผิวขรุขระตามลำดับ เมื่อทำการซ่อมแซมด้วยวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้แล้ว พบว่าก่อนซ่อมแซม มีค่าเท่ากับ 75.2 ตัน และกำลังรับน้ำหนักเฉลี่ยของเสาคอนกรีตแบบผิวขรุขระหลังซ่อมแซม มีค่าเท่ากับ 91.5 ตัน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการซ่อมแซมผิวของเสาคอนกรีตแล้ว ตัวอย่างเสาคอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับเสาปกติ ทั้งนี้อาจเนื่องด้วยกำลังของมอร์ต้าร์ที่นำมาซ่อมแซมมีกำลังมากกว่ากำลังคอนกรีตเดิม ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ค่าเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตก่อนและหลังซ่อมแซม

เมื่อสังเกตในรูปที่ 16 พบว่าเส้นกราฟในช่วงแรกของกำลังรับน้ำหนักและความเครียดมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรงแสดงถึงช่วงอิลาสติกของเสา เมื่อเปรียบเทียบค่าความชันของกราฟในช่วงแรกของเสาก่อนซ่อม และหลังซ่อมแซมจะเห็นว่าเส้นกราฟของตัวอย่างเสาหลังซ่อมแซมมีช่วงของความชันเส้นตรงมากกว่าเสาก่อนการซ่อมแซม เมื่อสังเกตแนวแกนในแกนแนวนอนของกราฟหรือค่าความเครียดจะพบว่าตัวอย่างเสาหลังทำการซ่อมแซมมีแนวโน้มมีค่าความเครียดที่มากกว่าหรือมีการเปลี่ยนรูปของเสามากกว่าแบบเสาตัวอย่างก่อนการซ่อมแซมภายใต้น้ำหนักกดที่เท่ากัน ทั้งนี้รูปแบบการวิวัติของเสา N, SSB, RSB และ RSA แสดงไว้ในรูปที่ 17



รูปที่ 16 ค่าเปรียบเทียบแรงตามแนวแกนกับระยะที่เปลี่ยนแปลงตามแกนของเสาก่อนและหลังการซ่อมแซม

รูปที่ 17 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเสาสถานะต่าง ๆ

5. บทสรุป

จากการดำเนินงานศึกษารูปแบบการเสื่อมสภาพของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก สุ่มตัวอย่างในจังหวัดนครนายกและหาแนวทางบำรุงรักษาได้ข้อสรุปดังนี้

รูปแบบที่พบสำหรับการเสื่อมสภาพพบ 2 รูปแบบ คือ 1) การกร่อนแบบผิวเรียบ ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพจากการขัดสีหรือทางกล 2) การกร่อนแบบผิวขุระ ซึ่งอาจเกิดจากการขัดสีและการเสื่อมสภาพจากสารชีวภาพ หรือกรดในน้ำ

มอร์ต้าร์สำหรับการซ่อมแซมบำรุงรักษา สามารถใช้มอร์ต้าร์มาตรฐานร่วมกับบ่มด้วยการทาโซเดียมซิลิเกตและยังสามารถเพิ่มกำลังอัดและความทนทานต่อการขัดสีเพิ่มขึ้นจากมอร์ต้าร์ปกติ จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.41 และเพิ่มความทนทานต่อการขัดสีให้กับผิวของมอร์ต้าร์มีการสูญเสียน้ำหนักลดลงร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก

การเสื่อมสภาพแบบผิวเรียบ เทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสื่อมสภาพ จากการสูญเสียผิวคอนกรีตทำให้เสียกำลังร้อยละ 4.1 การเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระที่เทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสื่อมสภาพ จากการสูญเสียผิวคอนกรีตทำให้เสียกำลังร้อยละ 7.6

การฉาบซ่อมแซมจากเสาที่มีการเสื่อมสภาพแบบผิวขรุขระ ใช้วัสดุมอร์ต้าร์มาตรฐานและบ่มด้วยการทาสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำให้เสากลับมารับน้ำหนักได้ปกติ ทั้งนี้ในการทดสอบใช้มอร์ต้าร์ซึ่งมีกำลังมากกว่าคอนกรีตเดิม เสาที่ซ่อมบำรุงแล้วมีกำลังรับน้ำหนัก เฉลี่ย 91.5 ตัน ซึ่งมากกว่ากำลังเสาสภาพปกติเดิมถึงร้อยละ 12.34 ทั้งนี้การฉาบไม่อาจให้ผลของกำลังอัดในส่วนที่ฉาบเทียบเท่ากับการหล่อเป็นเนื้อเดียวตั้งแต่แรกได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายจิรวัฒน์ ทรัพย์พิทยากร ในการสนับสนุนอุปกรณ์บางส่วนสำหรับใช้ในการทดสอบ แม้จะเป็นช่วงเวลาวิกฤติจาก Covid-19 และ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย ภายใต้ทุนการทำโครงงาน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Sujjavanich S. Advanced Concrete Technology. Bangkok: Rojchana Printing Limited Partnership; 2017. Thai.

[2] Dechpolmataya S, Sinthaworn S. Deterioration of Concrete Bridges of the Rural Road Department. Annual Concrete Conference 6th ,2010 October 20- 22, Phetburi, Thailand. Thai.

[3] Tuantong T, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C, Songpiriyakij S. Abrasion Resistance and Rapid Chloride Permeability of Concrete Coated with Sodium Silicate Solution. KMUTT Research and Development Journal. 2019;30(1): 55-68. Thai.

[4] Srinakharinwirot university. Development plan for rural road (the 3rd phase). PTE Engineering Co. Ltd. Report number: 1, 2019. Thai.

[5] Liu WY, Yen T, Hsu TH. Abrasion Erosion of Concrete by Water-borne Sand, Cement and Concrete Research. 2006;36: 1814-1820.

[6] Yang Y, Ji T, Lin X, Chen C, & Yang Z. Biogenic sulfuric acid corrosion resistance of new artificial reef concrete. Construction and Building Materials. 2018; 158: 33-41.

[7] Trejo D. Analysis and assessment of microbial biofilm - mediated concrete deterioration. Dissertation, Ph.D.(Departmentof Transportation). United States of America: Graduate school University Transportation Centers; 2008.

การวิเคราะห์พื้นที่และความสามารถในการจัดการของหุ่นยนต์ขนานส่วนเกิน 4 ขาบนระนาบที่มีข้อต่อแบบหมุน

Workspace and Manipulability Analysis of a 4-R̄RR Redundant Planar Parallel Manipulator

อำนาจ ตงติ๊บ[1*] และ ชวลิต คณากรสุขสันต์[2]

[1] ภาควิชา วิศวกรรมการจัดการพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
27 ถนนอินใจมี อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

[2] ภาควิชา เกษตรกลวิธาน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
1 หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Amnad Tongtib[1*] and Chawalit Khanakornsuksan[2]

[1] Department of Energy Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University
27 Injaimee Road, Muang, Uttaradit, Thailand, 53000

[2] Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus1 Moo 6 Kamphaeng Saen, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom, Thailand, 73140

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: amnad.ton@uru.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 084-046-9569

Received: 24 February 2021, Revised: 30 April 2021, Accepted: 10 September 2021

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์ขนานบนระนาบมีความสามารถในการสร้างการเคลื่อนที่เร็วและแม่นยำ แต่ในบางท่าทางภายในพื้นที่ทำงานมีโอกาสเกิดสภาวะเอกฐาน การเพิ่มตัวขับส่วนเกินให้กับโครงสร้างเป็นอีกแนวทางในการออกแบบเพื่อลดสภาวะเอกฐานได้ งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์อัตราส่วนพื้นที่ทำงานและดัชนีความสามารถในการจัดการเคลื่อนที่ (Manipulability Index, MI) ของโครงสร้างหุ่นยนต์ขนานโครงสร้างส่วนเกิน 4 ขาบนระนาบ ซึ่งแต่ละขาถูกขับเคลื่อนด้วยตัวขับที่ถูกติดตั้งบนฐาน และส่งกำลังผ่านก้านแข็งและข้อต่อแบบหมุนไปยังจุดปลายแผ่นเคลื่อนที่ ขอบเขตพื้นที่ทำงานของแต่ละขาถูกสร้างจากความสัมพันธ์ทางจลนศาสตร์ ขอบเขตของทุกขาถูกนำมาพิจารณาหาพื้นที่ทับซ้อนโดยวิธีทางเรขาคณิตเพื่อให้ได้พื้นที่ทำงานของโครงสร้างทั้งหมด จุดภายในพื้นที่ทำงานเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ค่า MI ในกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนพื้นที่และค่า MI ของโครงสร้างขนาน 3-R̄RR และ 4-R̄RR แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างส่วนเกิน 4-R̄RR สามารถเพิ่มค่า MI เฉลี่ยได้ 37 เท่าของโครงสร้าง 3-R̄RR เมื่อกำหนดให้ความยาวขาท่อนล่างและท่อนบนยาว 400 มม. และ 500 มม. ตามลำดับ ในขณะที่ค่าอัตราส่วนพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์กับพื้นที่ทำงานที่ต้องการนั้นลดลง 13.15%

คำสำคัญ หุ่นยนต์ขนาน, โครงสร้างส่วนเกิน, พื้นที่การทำงาน, ดัชนีความสามารถในการจัดการ

Abstract

Planar parallel manipulator has advantages to carry out high speed and accuracy tasks, but singular configurations can occur within a workspace. These singular configurations can be eliminated by adding

redundant actuation. This paper presents an analysis of workspace ratio and Manipulability Index (MI) of a 4-$\bar{R}$RR redundant planar parallel manipulator, which is created by introducing a redundant branch with active actuator to a 3-$\bar{R}$RR. Each branch made up as serial chain connects the moving platform to the fixed base by actuator, two rigid links and 2 passive revolute joints. A geometry method based on the forward kinematics would be appropriate to determine the workspace. Then, 4-$\bar{R}$RR workspace is generated by the intersection of all branched. MI of point in intersection workspace are analyzed. Finally, case study, a comparison of workspace ratio and MI of 3-$\bar{R}$RR and 4-$\bar{R}$RR parallel manipulator shown the 4-$\bar{R}$RR redundant structure can improve the MI to 37 times (for 400 mm and 500 mm of lower and upper link length, respectively) when compared with the 3-$\bar{R}$RR structure while the workspace ratio reduced to 13.15%.

Keywords: Parallel Manipulator, Redundant Mechanism, Workspace, Manipulability Index

1. บทนำ

หุ่นยนต์ขนานเป็นกลไกที่สามารถสร้างการเคลื่อนที่ได้เร็ว แม่นยำ และสามารถรับภาระโหลดได้สูง แต่ในบางท่าทางของหุ่นยนต์สามารถเกิดสภาวะเอกฐาน (Singularity) หากเพิ่มจำนวนตัวขับให้มากกว่าจำนวนองศาอิสระแล้ว โครงสร้างส่วนเกินลักษณะนี้สามารถลดโอกาสการเกิดสภาวะนี้ได้ หากพิจารณารูปแบบการจัดวางตัวขับในโครงสร้างส่วนเกินแล้วสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ [1] แบบแรกเรียกว่าโครงสร้าง Actuation Redundant ตัวอย่างเช่น การเพิ่มตัวขับเชิงเส้นในแต่ละขา ในงานวิจัย [2] และ [3] เป็นโครงสร้างที่ถูกเพิ่มตัวขับแทนที่ข้อต่อ เป็นผลให้โอกาสเกิดสภาวะเอกฐานลดลงในขณะที่พื้นที่การทำงานยังเท่าเดิม ส่วนแบบที่สอง Kinematically Redundant เป็นโครงสร้างที่ถูกเพิ่มชุดขาพร้อมตัวขับ ทำให้ได้ พื้นที่การทำงานที่ใหญ่ขึ้น [4] และยังสามารถเพิ่มระยะการหมุนของแผ่นเคลื่อนที่เพื่อลดการเกิดสภาวะเอกฐานได้เช่นกัน [5]

พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ [6] เป็นอีกคุณสมบัติที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้าง โดยทั่วไปใช้วิธีการทางตัวเลข (Numerical Method) และวิธีทางเรขาคณิต (Geometry Approach) ทั้งสองวิธีนี้มีหลักการที่แตกต่างกันกล่าวคือ วิธีแรกใช้การทดสอบความสอดคล้องเงื่อนไขของแต่ละจุดในพื้นที่ทำงานซึ่งใช้เวลามากพอสมควรในการตรวจให้เสร็จสิ้นทุกจุด ในขณะที่วิธีที่สองนั้นพิจารณาเพียงพื้นที่ส่วนซ้อนทับพื้นที่ที่ทำงานได้ของทุกขา วิธีที่สองนี้จึงใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแบบแรก และวิธีนี้ยังสามารถนำผลมาประเมินขนาดของพื้นที่ทำงานได้สะดวกมายิ่งขึ้นในการเปรียบเทียบพื้นที่ทำงานและตำแหน่งการเกิดสภาวะเอกฐานของหุ่นยนต์ขนานโครงสร้างต่าง ๆ นั้น ส่วนใหญ่ใช้ความสามารถในการจัดการ (Manipulability) ความแม่นยำ (Accuracy) และค่าCondition Number ในการเปรียบเทียบความน่าสนใจของโครงสร้าง [7] โดย Wu และ คณะ [8] นำเสนอการเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของโครงสร้างขนานบนระนาบเพื่อใช้ในการเลือกโครงสร้างที่เหมาะสม และหลังจากนั้นทางทีมวิจัยได้นำเสนอการพิจารณาค่า Condition Number เป็นปัจจัยสำคัญในการหารูปแบบการจัดวางขาและแผ่นเคลื่อนที่ของโครงสร้าง 3-$\bar{R}$RR ที่ต่างกันให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่กำหนด [9] และ [10] นอกจากนี้ค่า Condition Number ยังสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกขนาดขาของโครงสร้างหุ่นยนต์ ขนาน 3-$\bar{R}$RR เพื่อให้ได้ขนาดพื้นที่ทำงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น [10]

การออกแบบหุ่นยนต์ขนานให้สามารถทำงานในพื้นที่ทำงานที่กำหนดไว้มีโอกาสที่จะเกิดสภาวะเอกฐานภายในพื้นที่ทำงานนั้น การปรับเปลี่ยนเป็นโครงสร้างส่วนเกินเป็นอีกแนวทางในการช่วยลดโอกาสเกิดสภาวะเอกฐานได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์หุ่นยนต์ขนานโครงสร้างส่วนเกินโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่ทำงานเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่นี้สามารถชี้ให้เห็นถึงจำนวนการเกิดสภาวะเอกฐานในบริเวณขอบเขตพื้นที่ทำงานที่กำหนดไว้

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

กลไกของหุ่นยนต์ขนาน 4-R̄RR แสดงดังรูปที่ 1(ก) โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้แกนอ้างอิง (X-Y) อยู่ที่จุด O โดยมีแผ่นเคลื่อนที่ (Moving Platform) เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีแกนเคลื่อนที่ (X'-Y') ติดอยู่ที่จุด P โดยปลายแผ่นเคลื่อนที่ถูกเชื่อมโยงไปยังฐานผ่านชุดขา 4 ชุด (i=1,2,3 และ 4) ที่มีลักษณะเป็นแขนกลอนุกรม ขาแต่ละชุดประกอบด้วยท่อนวัตถุแข็งเกร็ง 2 ชิ้น (l_{li} และ l_{ui}) เชื่อมติดกันด้วยข้อต่อแบบหมุน (B_i) ปลายข้างหนึ่งของขาถูกยึดติดเข้ากับฐานด้วยตัวขับแบบหมุน (A_i) ส่วนอีกด้านหนึ่งถูกยึดติดกับปลายแผ่นเคลื่อนที่ด้วยข้อต่อแบบหมุน (C_i) จึงทำให้หุ่นยนต์มี 3 องศาอิสระ คือ แผ่นเคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ตามแกน X' และ Y' และยังหมุนด้วยมุม β หากเปรียบเทียบกับโครงสร้าง 3-R̄RR จะพบว่าโครงสร้าง 3-R̄RR (ดังรูปที่ 1(ข)) มีขาอนุกรม 3 ชุด ในแต่ละชุดใช้ตัวขับ 1 ตัวเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ 3 องศาอิสระ จำนวนตัวขับที่มากขึ้นในโครงสร้าง 4-R̄RR ทำให้โครงสร้างอยู่ในกลุ่มของโครงสร้างส่วนเกิน

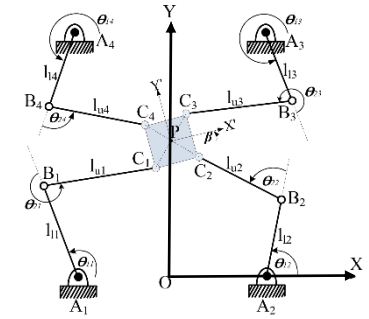
ในการหาความสัมพันธ์เชิงจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ขนาน 4-R̄RR นั้นสามารถหาได้จากการพิจารณาจากผลรวมของเวกเตอร์ลูปของแต่ละชุดขาดังสมการที่ (1)

$$\overline{OP}=\overline{OA_i}+\overline{A_iB_i}+\overline{B_iC_i}+\overline{C_iP} \quad (1)$$

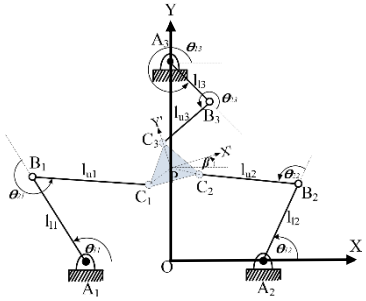
โดย $\overline{OP}$ คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งจุดปลายของแผ่นเคลื่อนที่ $\overline{OA_i}$ คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดติดตั้งของขาแต่ละชุด $\overline{A_iB_i}$ และ $\overline{B_iC_i}$ คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของขาท่อนล่างและท่อนบนของขาแต่ละชุดตามลำดับ และ $\overline{C_iP}$ คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่งของระยะจากจุดปลายของแผ่นเคลื่อนที่ของแต่ละขาไปยังจุดปลายของแผ่นเคลื่อนที่

โดยทั่วไปแล้วจลศาสตร์ของหุ่นยนต์แบ่งเป็น 2 แบบด้วยกันคือ จลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematic) และจลนศาสตร์เชิงคืบหน้า (Forward Kinematic) ในส่วนของจลศาสตร์ผกผันเป็นการหาขนาดของตัวขับโดยกำหนดตำแหน่งและลักษณะการหมุนของแผ่นเคลื่อนที่ จากสมการที่ (1) สามารถเขียนในรูปการหาขนาดตัวขับเป็นดังสมการที่ (2)

$$\overline{A_iC_i}=\overline{OP}-\overline{OA_i}-\overline{C_iP} \quad (2)$$



(ก) ลักษณะกลไกหุ่นยนต์ขนาน 4-R̄RR



(ข) ลักษณะกลไกหุ่นยนต์ขนาน 3-R̄RR

รูปที่ 1 ลักษณะกลไกหุ่นยนต์ขนาน 4-R̄RR และ 3-R̄RR

ซึ่งจุด C_i เป็นจุดปลายของขาแต่ละชุด $\overline{OA_i}$ และ $\overline{C_iP}$ เป็นเวกเตอร์ค่าคงที่ จากนั้นพิจารณาชุดขาอนุกรมซึ่งเป็นแขนกลไก 2 องศาอิสระบนระนาบ ขนาดของตัวขับสามารถหาได้จากสมการที่ (3) และ (4)

$$\theta_{2i}=\tan^{-1}\left(\frac{\pm\sqrt{1-t_i^2}}{t_i}\right) \quad (3)$$

$$\theta_{1i}=\tan^{-1}\left(\frac{C_{yi}}{C_{xi}}\right)-\tan^{-1}\left(\frac{l_{ui}\sin\theta_{2i}}{l_{li}+l_{ui}\cos\theta_{2i}}\right) \quad (4)$$

โดยที่ $t_i=\frac{C_{xi}^2+C_{yi}^2-l_{li}^2-l_{ui}^2}{2l_{li}l_{ui}}$ ดังนั้น ขนาดตัวขับของหุ่นยนต์ขนาน 4-R̄RR สามารถหาได้จากสมการที่ (3) และ (4) สำหรับจลศาสตร์เชิงคืบหน้าเป็นการหาตำแหน่งจุดปลายและลักษณะการหมุนของแผ่นเคลื่อนที่โดยกำหนดขนาดของตัวขับมาให้โดยทั่วไปแล้วการหาคำตอบของจลศาสตร์เชิงคืบหน้ามี 3 รูปแบบ คือ 1) ผลเฉลยรูปแบบปิด (Closed-Form Solution) [12-14] 2) วิธีการทางตัวเลข (Numerical Method) [15] 3) วิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical Approach) [16] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี วิธีการทางตัวเลข ในการหาคำตอบโดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของจลศาสตร์เชิงคืบหน้าของชุดขาอนุกรมคือ

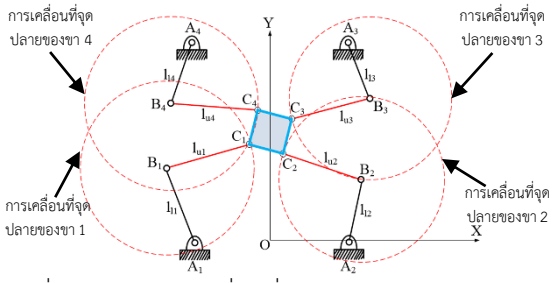
$$C_{xi}=l_{li}\cos\theta_{1i}+l_{ui}\cos(\theta_{1i}+\theta_{2i}) \quad (5)$$

$$C_{yi}=l_{li}\sin\theta_{1i}+l_{ui}\sin(\theta_{1i}+\theta_{2i}) \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) และ (6) เมื่อกำหนดขนาดตัวขับ (θ_{1i}) ลักษณะของก้าน A_iB_i จะถูกระบุตำแหน่งให้ทราบจากนั้นพิจารณาการเคลื่อนที่ของจุด C_i แต่ละขาซึ่งเคลื่อนที่เป็นวงกลมโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด B_i และรัศมียาว l_{ui} คำตอบของจลศาสตร์เชิงคืบหน้าจะเกิดขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างจุดปลายของขาแต่ละชุดสอดคล้องกับขนาดของแผ่นเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2

2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์

พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ (Workspace) คือตำแหน่งและการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ทำได้ ในงานวิจัยนี้วิธีทางเรขาคณิตจะถูกนำมาใช้ในการหาพื้นที่ทำงาน ซึ่งขนาดของพื้นที่ทำงานที่แสดงเป็นขอบจะถูกนำไปในการออกแบบพื้นที่ที่ใช้งาน (Prescribed Workspace) หากวิเคราะห์ในเชิงเรขาคณิตแล้วสามารถหาพื้นที่ทำงานได้โดยพิจารณาส่วนทับซ้อนพื้นที่ทำงานของแต่ละชุดขาซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ 3 ชนิด คือ พื้นที่การทำงานที่ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่คงที่ (Constant Orientation Workspace) พื้นที่การทำงานที่ยื่นไปถึง (Reachable Workspace) และพื้นที่การทำงานที่คล่องแคล่ว (Dexterous Workspace)



รูปที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของจุดปลายของแต่ละชุดขา

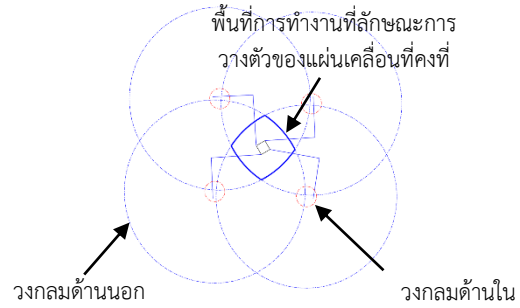
พื้นที่การทำงานที่ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่คงที่ คือ ตำแหน่งที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปถึงได้ในขณะที่การวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่มีค่าคงที่ ในการหาพื้นที่ทำงานของแต่ละชุดขา สมการวงกลมจะถูกนำมาใช้ในการหาพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ โดยแบ่งเป็นพื้นที่วงกลมที่จุดปลายสามารถเคลื่อนที่ไปได้ (วงกลมด้านนอก) และพื้นที่วงกลมที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ (วงกลมด้านใน) สมการของวงกลมทั้งสองถูกหามาจากการพิจารณาสมการที่ (1) ซึ่งแสดงเป็น

$$(x-x_i)^2+(y-y_i)^2=(l_{li}+l_{ui})^2 \quad (7)$$

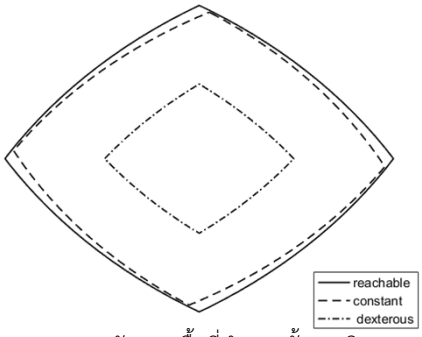
$$(x'-x_i)^2+(y'-y_i)^2=(l_{li}-l_{ui})^2 \quad (8)$$

โดยที่ x_i และ y_i เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่ ผลที่ได้จากสมการที่ (7) และ (8) แสดงลักษณะเป็นวงแหวนของแต่ละขาโดยที่พื้นที่ทำงานที่จุดปลายของแผ่นเคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ คือพื้นที่ระหว่างวงกลมด้านนอกและวงกลมด้านใน รูปที่ 3(ก) แสดงตัวอย่างพื้นที่การทำงานที่ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่คงที่ของแต่ละขาโดยกำหนดความยาวของขาท่อนล่าง (l_{li}) และขาท่อนบน (l_{ui}) มีค่าเป็น 400 มิลลิเมตร และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ และการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่เป็น 30 องศา ซึ่งในวงกลมด้านนอกเป็นพื้นที่ที่จุดปลายของขาสามารถเคลื่อนที่ไปถึงได้ (จากสมการที่ (7)) ในขณะที่ภายในวงกลมที่อยู่ด้านในเป็นพื้นที่ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปถึง (จากสมการที่ (8)) และพื้นที่ทับซ้อนกันของทั้งสี่ขาเป็นบริเวณที่จุดปลายของแผ่นเคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงได้ ถัดมาพื้นที่การทำงานที่ยื่นไปถึงเป็นตำแหน่งที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปถึงได้โดยไม่คำนึงถึงลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่ การหาพื้นที่การทำงานรูปแบบนี้ยังคงใช้สมการวงกลมของแต่ละขาเช่นเดียวกับการหาพื้นที่การทำงานในแบบแรก แต่จุดศูนย์กลางของวงกลมจะถูกกำหนดให้อยู่ที่จุดติดตั้งของแต่ละขา สำหรับวงกลมด้านนอกรัศมีของวงกลมจะพิจารณาจากผลรวมของความยาวของขาท่อนล่างกับขาท่อนบน และระยะจากจุดปลายของปลายแขนอนุกรมถึงจุดกึ่งกลางของแผ่นเคลื่อนที่ (r_p) สำหรับวงกลมด้านในรัศมีของวงกลมจะพิจารณาจากผลต่างของขาท่อนล่างและขาท่อนบน จากนั้นนำผลที่ได้ไปลบกับระยะจากจุดปลายของปลายแขนอนุกรมถึงจุดกึ่งกลางของแผ่นเคลื่อนที่ หากรัศมีที่ได้

มีค่าเป็นลบจะไม่เกิดวงกลมด้านใน ดังนั้น สมการที่ (7) และ (8) สามารถเขียนใหม่เป็น



(ก) พื้นที่การทำงานที่ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่คงที่



(ข) ลักษณะพื้นที่ทำงาน ทั้ง 3 ชนิด

รูปที่ 3 ลักษณะของพื้นที่ทำงานของแต่ละขาและการเปรียบเทียบทั้ง 3 ชนิด

$$x^2+y^2=(l_{li}+l_{ui}+r_p)^2 \quad (9)$$

$$x'^2+y'^2=(l_{li}-l_{ui}-r_p)^2 \quad (10)$$

และสุดท้ายพื้นที่การทำงานที่คล่องแคล่วเป็นตำแหน่งที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึงได้โดยที่แผ่นเคลื่อนที่สามารถวางตัวได้ทุกท่าทาง วิธีการหาพื้นที่การทำงานรูปแบบนี้สามารถใช้วิธีการของพื้นที่การทำงานในแบบที่สอง แต่รัศมีของสมการวงกลมจะแตกต่างกันโดยรัศมีของวงกลมภายนอกจะพิจารณาจากผลรวมของขาท่อนล่างกับขาท่อนบน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปลบกับระยะจากจุดปลายของปลายแขนอนุกรมถึงจุดกึ่งกลางของแผ่นเคลื่อนที่ ในขณะที่รัศมีของวงกลมด้านในพิจารณาจากผลต่างของขาท่อนล่างกับขาท่อนบน และนำค่าที่ได้ไปรวมกับระยะจากจุดปลายของปลายแขนอนุกรมถึงจุดกึ่งกลางของแผ่นเคลื่อนที่ทำให้สมการวงกลมที่ใช้สำหรับการหาพื้นที่การทำงานของรูปแบบนี้เขียนใหม่เป็น

$$x^2+y^2=(l_{li}+l_{ui}-r_p)^2 \quad (11)$$

$$x'^2+y'^2=(l_{li}-l_{ui}+r_p)^2 \quad (12)$$

จากสมการที่ (7) - (12) เห็นได้ว่าความยาวรัศมีวงกลมด้านนอกของพื้นที่การทำงานแบบที่สองมากที่สุด ถัดมาเป็นพื้นที่การทำงานแบบที่หนึ่ง และพื้นที่การทำงานแบบที่สามเล็กที่สุดจึงทำให้ขนาดของพื้นที่การทำงานเรียงลำดับตามความยาวของรัศมีที่กล่าวมา ซึ่งขนาดของพื้นที่การทำงานทั้ง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 3 (ข)

ในการออกแบบขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมอัตราส่วนของพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้และพื้นที่ที่ใช้งานจะถูกนำมาวิเคราะห์ซึ่งคิดได้จากสมการที่ (13)

$$\text{ratio}=\frac{W_R}{W_P} \quad (13)$$

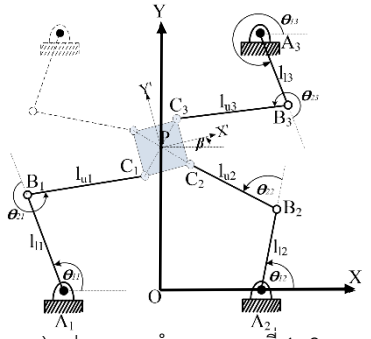
โดยที่ W_P คือขนาดของพื้นที่ที่ใช้งานและ W_R คือ ขนาดของพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้ อัตราส่วนที่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการทำงานของหุ่นยนต์ หากค่าที่ได้น้อยกว่า 1 นั่นคือหุ่นยนต์ที่ออกแบบไม่สามารถนำไปใช้กับงานที่ต้องการได้ ในทางตรงกันข้ามหากค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 1 หุ่นยนต์ที่ออกแบบสามารถนำใช้งานได้ แต่หากอัตราส่วนมีค่ามากจนเกินไปจะทำให้ขนาดกลไกใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการออกแบบหุ่นยนต์ให้เหมาะสมกับงานจึงจำเป็นต้องนำค่าอัตราส่วนมาช่วยในการวิเคราะห์ในแง่มุมของการออกแบบขนาดโครงสร้างให้เหมาะสม

2.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการจัดการของหุ่นยนต์

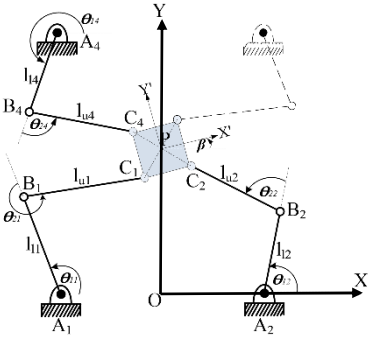
ดัชนีความสามารถในการจัดการ (Manipulability Index, MI) เป็นค่าหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการส่งผ่านความเร็วจากตัวขับไปยังจุดปลายของหุ่นยนต์ [7] ในงานวิจัยนี้ ค่า MI จะถูกนำมาใช้ทดสอบโดยใช้อัตราส่วนของค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) ของเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) คือ

$$MI=\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (14)$$

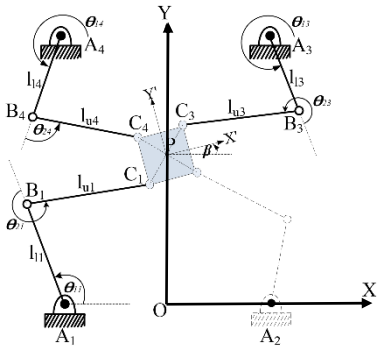
โดยที่ σ_{max} และ σ_{min} คือ ค่าลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์จาโคเบียนที่มากและน้อยที่สุดตามลำดับ MI เป็นตัวเลขที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความเร็วจากตัวขับ



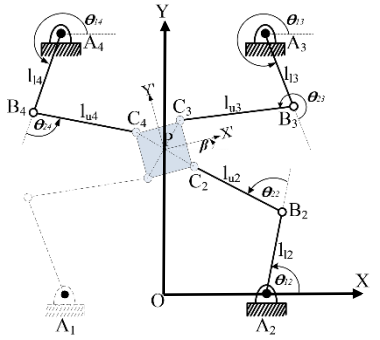
ก) รูปแบบการทำงานของขาที่ 1, 2 และ 3



ข) รูปแบบการทำงานของขาที่ 1, 2 และ 4



ค) รูปแบบการทำงานของขาที่ 1, 3 และ 4



ง) รูปแบบการทำงานของขาที่ 2, 3 และ 4

รูปที่ 4 รูปแบบการทำงานของหุ่นยนต์

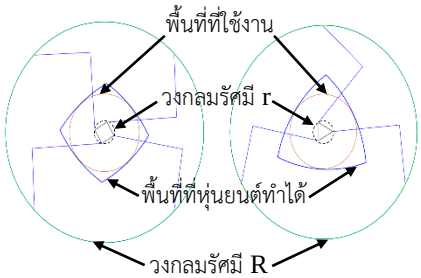
ไปยังจุดปลายของหุ่นยนต์ซึ่งมีค่าระหว่าง [1,∞] โดยค่าที่ดีที่สุดเป็น 1 (Isotropy Pose) และค่าจะแย่ลงเมื่อตัวเลขมีค่ามากขึ้นนั่นคือความคล่องตัวรอบทิศทางในมิติความเร็วจะลดลงซึ่งค่า MI จะพิจารณาจากเมทริกซ์จาโคเบียนดังสมการที่ (15)

$$[J_P]\dot{P}=[J_\theta]\dot{\theta} \qquad (15)$$

โดยที่ $[J]=[J_P]^{-1}[J_\theta]$ โดยมีขนาดมิติเป็น 3×4 ซึ่งไม่เป็นจัตุรัสเนื่องจากกลไกของหุ่นยนต์เป็นโครงสร้างส่วนเกิน และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขนาน 4-$\bar{R}$RR พบว่าเป็นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่บนระนาบ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จึงทำงานได้ด้วยตัวขับ 3 ตัว (ชุดขา 3 ชุด) ทำให้การทำงานของหุ่นยนต์มี 4 รูปแบบที่เป็นไปได้โดยลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์แสดงในรูปที่ 4 นั่นคือในแต่ละจุดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึงเราสามารถพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะสร้างการเคลื่อนที่ได้ 4 รูปแบบซึ่งในแต่ละรูปแบบเกิดจากการพิจารณาขา 3 ชุดโดยในแต่ละชุดมีลักษณะท่าทางต่างกันจึงทำให้ขนาดของเมทริกซ์จาโคเบียนที่นำมาพิจารณาลดลงเป็น 3×3 เป็นเหตุให้โครงสร้างที่นำมาวิเคราะห์มีค่า MI เป็น 4 ค่าที่เป็นไปได้นั่นคือเราสามารถเลือกค่าที่ดีที่สุดจากค่าทั้ง 4 ค่าเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ไปยังจุดต่อไป

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์ 2 ชนิดคือหุ่นยนต์ขนานบนระนาบแบบ 4-$\bar{R}$RR และหุ่นยนต์ขนานบนระนาบแบบ 3-$\bar{R}$RR ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ถูกใช้ทั่วไปโดยการเปรียบเทียบจะใช้ค่าอัตราส่วนในสมการที่ (13) และค่า MI จากสมการที่ (14) มาใช้ในวิเคราะห์โดยที่ ค่า MI ที่นำมาพิจารณาจะถูกนำไปหาค่าเฉลี่ยของทุกจุดที่อยู่ในพื้นที่ที่ใช้งาน ในกรณีศึกษาตัวแปรของหุ่นยนต์ทั้งสองแบบถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน คือ 1) ขนาดความยาวของขาท่อนล่าง 2) ขนาดความยาวของขาท่อนบน 3) ตำแหน่งจุดติดตั้งของขาแต่ละชุดซึ่งจะถูกวางบนวงกลมรัศมี (R) 4) ขนาดของแผ่นเคลื่อนที่ซึ่งพิจารณาบนวงกลมที่มีรัศมี (r) 5) ขนาดของพื้นที่ที่ใช้งานซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมและ 6) ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่ ค่าที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 1 และลักษณะของหุ่นยนต์ที่เปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5

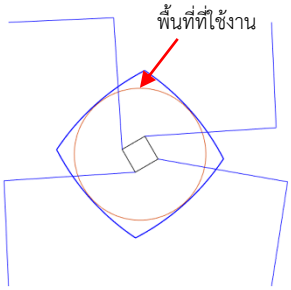


รูปที่ 5 ลักษณะของจุดติดตั้งและขนาดของแผ่นเคลื่อนที่

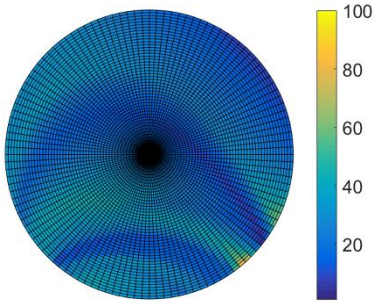
ตารางที่ 1 แสดงขนาดความยาวของตัวแปรของหุ่นยนต์ที่ใช้เปรียบเทียบ

ตัวแปร	ปริมาณ	หน่วย
l_i	400	มิลลิเมตร
l_{ii}	500	มิลลิเมตร
R	707.1	มิลลิเมตร
r	70.71	มิลลิเมตร
W_P	196,250	ตารางมิลลิเมตร
β	30	องศา

รูปที่ 5 แสดงลักษณะของการเปรียบเทียบโครงสร้างของหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-$\bar{R}$RR และ 3-$\bar{R}$RR โดยกำหนดให้พื้นที่ที่ใช้งานมีลักษณะเป็นวงกลมซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้โดยในการวิเคราะห์นี้ใช้พื้นที่การทำงานที่ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่คงที่เป็นตัวอย่างในการคำนวณหาขนาดพื้นที่ด้วยการกำหนดลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่เป็น 30° ผลที่ได้แสดงค่าอัตราส่วนจากสมการที่ (13) ของหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-$\bar{R}$RR มีค่าเป็น 1.202 ในขณะที่โครงสร้างแบบ 3-$\bar{R}$RR มีค่าเป็น 1.384 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างแบบแรกมีค่าอัตราส่วนน้อยกว่า 13.15% เนื่องจากการเพิ่มจำนวนชุดขาให้กับโครงสร้างมีผลทำให้ข้อจำกัดของการหาขนาดพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้ลดลง ดังนั้นหากจำนวนชุดขาของโครงสร้างมีมากขึ้น ขนาดพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้จะมีค่าลดลงเป็นเหตุให้อัตราส่วนลดลงตามไปด้วย สำหรับการวิเคราะห์ค่า MI ของหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-$\bar{R}$RR จะพิจารณาจากจุดที่อยู่ในพื้นที่ที่ใช้งาน ค่า MI ในแต่ละจุดจะมี 4 ค่าที่เกิดขึ้นได้จากรูปแบบการทำงานของหุ่นยนต์ (แสดงในรูปที่ 4) โดยค่าที่ถูกเลือกนำมาใช้งานเป็นค่ามีค่าเข้าใกล้ 1 เนื่องจากเป็น Isotropy pose ผลการเลือกค่า MI ที่ดีที่สุดจากค่าที่เป็นไปได้ในแต่ละจุดแสดงดังรูปที่ 6 หากพิจารณาค่า MI ของหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 3-$\bar{R}$RR โดยเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-$\bar{R}$RR ที่อยู่ในพื้นที่ที่ใช้งานจะพบว่าค่า MI ที่นำมาคำนวณจะมีเพียงค่าเดียวซึ่งทำให้ค่าที่ได้แย่กว่าหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-$\bar{R}$RR โดยผลที่ได้จากโครงสร้างทั้งสองแบบแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า MI ในแต่ละจุดของหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-$\bar{R}$RR มีค่าที่ดีกว่า หุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 3-$\bar{R}$RR โดยพิจารณาจากสีโดยภาพรวมของพื้นที่ที่ใช้งานที่ได้จากหุ่นยนต์ขนานแบบ 3-$\bar{R}$RR มีค่าน้อยลง (รูปที่ 7(ข)) แต่เมื่อเพิ่มชุดขาเข้าไปทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นโครงสร้างส่วนเกินที่มีชุดขา 4 แบบสำหรับพิจารณาเลือกค่าที่ดีที่สุดจึงทำให้บริเวณที่มีค่าที่ด้อยนั้นดีขึ้นและเมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของ MI ทุกจุดที่อยู่ในพื้นที่ที่ใช้งานของโครงสร้าง 3-$\bar{R}$RR พบว่ามีค่าเป็น 952.84 แต่เมื่อเพิ่มชุดขาเข้าไป ค่าเฉลี่ยของ MI มีค่าดีขึ้นเป็น 24.30 นั่นแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มชุดขาให้กับโครงสร้างที่มีอยู่จะทำให้ค่าเฉลี่ยของ MI ดีขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งค่าที่ใช้เปรียบเทียบของหุ่นยนต์ทั้งสองแบบแสดงในตารางที่ 2

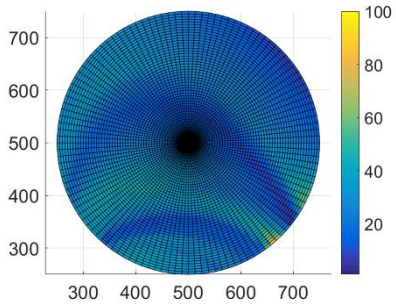


(ก) แสดงพื้นที่ที่ใช้งาน

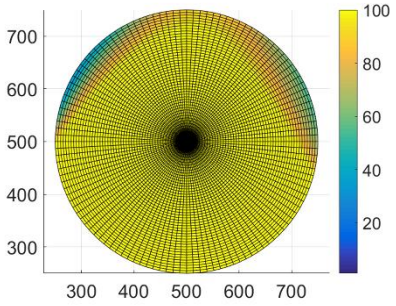


(ข) ดัชนีความสามารถในการจัดการที่อยู่ในพื้นที่ที่ใช้งาน

รูปที่ 6 ลักษณะของพื้นที่ที่ใช้งานและดัชนีความสามารถในการจัดการ



(ก) หุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-R̄RR



(ข) หุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 3-R̄RR

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบดัชนีความสามารถในการจัดการ

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า MI และอัตราส่วนของพื้นที่หุ่นยนต์ทำได้ต่อพื้นที่ใช้งานของหุ่นยนต์สองรูปแบบ

รูปแบบของโครงสร้างหุ่นยนต์	**อัตราส่วนของพื้นที่หุ่นยนต์ทำได้ต่อพื้นที่ใช้งาน**	**ค่าเฉลี่ย MI ที่อยู่ในพื้นที่ที่ใช้งาน**
หุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-R̄RR	1.202	24.30
หุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 3-R̄RR	1.384	952.84

4. บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากลไกของหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-R̄RR ซึ่งเป็นโครงสร้างส่วนเกินโดยนำเสนอการวิเคราะห์จลนศาสตร์ พื้นที่การทำงานและความสามารถในการจัดการของหุ่นยนต์ ในส่วนของจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แบ่งเป็นจลนศาสตร์ผกผันซึ่งหาได้ง่ายโดยพิจารณาจากจลนศาสตร์ของแต่ละขาซึ่งเป็นแขนกลอนุกรม 2 องศาอิสระและจลนศาสตร์เชิงคืบหน้าซึ่งหาได้จากวิธีทางเรขาคณิตซึ่งจะแสดงคำตอบเมื่อตำแหน่งจุดปลายของแต่ละขาเหมาะสมกับขนาดของแผ่นเคลื่อนที่ สำหรับการวิเคราะห์พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ วิธีทางเรขาคณิตถูกนำมาใช้ในการหาพื้นที่การทำงาน 3 ชนิด คือ พื้นที่การทำงานที่ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่คงที่ พื้นที่การทำงานที่ยื่นไปถึง และพื้นที่การทำงานที่คล่องแคล่ว โดยพื้นที่ที่จุดปลายของหุ่นยนต์ทำงานได้เกิดจากการนำพื้นที่ของขาแต่ละชุดมาทับซ้อนกัน ในกรณีศึกษาผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงขนาดพื้นที่การทำงานใหญ่ที่สุด คือ พื้นที่การทำงานที่ยื่นไปถึง รองลงมาเป็นพื้นที่การทำงานที่ลักษณะการวางตัวของแผ่นเคลื่อนที่คงที่ และพื้นที่การทำงานที่คล่องแคล่วมีขนาดเล็กที่สุด ในการวิเคราะห์ความสามารถในการจัดการของหุ่นยนต์ MI ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาโดยแสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความเร็วของตัวขับไปยังจุดปลายของหุ่นยนต์ ค่าที่ได้ในแต่ละจุดจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยในพื้นที่ที่ใช้งาน ซึ่งได้กำหนดให้อยู่ภายในพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้และเมื่อนำค่าที่ได้จากหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-R̄RR ไปเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 3-R̄RR ที่ไม่เป็นโครงสร้างกลุ่มโครงสร้างส่วนเกิน พบว่าอัตราส่วนของพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้และพื้นที่ที่ใช้งานของหุ่นยนต์ขนานบนระนาบ 4-R̄RR มีค่าที่ด้อยกว่าโครงสร้างแบบ 3-R̄RR แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในแง่ของการส่งผ่านความเร็วเฉลี่ยที่อยู่ในพื้นที่ที่ใช้งานดีขึ้นเมื่อเพิ่มชุดขาเข้าไปโดยเพิ่มขึ้น 37 เท่า เนื่องจากการเพิ่มชุดขาเข้ามาทำให้เกิดทางเลือกในการพิจารณาความสามารถในการจัดการโดยงานวิจัยที่นำเสนอนี้แสดงให้เห็น 4 รูปแบบ ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างให้มี ความสามารถในการจัดการโดยการเพิ่มจำนวนชุดขาต้องคำนึงถึงขนาดของพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ที่จะลดลงเนื่องจากจำนวนขาที่เพิ่มขึ้น

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยมีแนวคิดในการหาขนาดขาท่อนล่าง และท่อนบนให้เหมาะสมกับอัตราส่วนของพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำได้และพื้นที่ที่ใช้งานโดยใช้ดัชนีที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เช่น MI ความแม่นยำ ความแข็ง คุณสมบัติทางพลศาสตร์รวมไปถึงสภาวะเอกฐานมาใช้เป็นเป้าหมายในการออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ ศูนย์พัฒนานวัตกรรมงานวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้และสาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และทรัพยากรในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Iman E, Juan AC, Roger B. A Family of Kinematically Redundant Planar Parallel Manipulators. Journal of Mechanical Design. 2008; 130(6): 062306-1 - 062306-8. Available from: 10.1115/1.2900723.

[2] Iman E, Juan AC, Roger B. 3-PRRR redundant planar parallel manipulator: Inverse displacement, workspace and singularity analyses. Mechanism and Machine Theory. 2007; 42(8): 1007-1016. Available from:10.1016/j.mechmachtheory.2006.07.006.

[3] Varalakshmi KV,Srinivas J. Optimized Configurations of Kinematically Redundant Planar Parallel Manipulator following a Desired Trajectory. Procedia Technology. 2014; 14: 133–140.

[4] Gosselin C, Laliberte T, Veillette A. Singularity-Free Kinematically Redundant Planar Parallel Mechanisms with Unlimited Rotational Capability. IEEE Transactions on Robotics. 2015; 31(2): 457-467.

[5] Wang J, Wu J, Li T, Liu X. Workspace and singularity analysis of a 3-DOF planar parallel manipulator with actuation redundancy. Robotica. 2009; 27(1): 51-57.

[6] Merlet JP. Workspace in Parallel Robot (Solid mechanics and its application). New York: Springer-Verlag; 2006. P. 213–257.

[7] Merlet JP. Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots. ASME. Journal of Mechanical Design 2005; 128(1): 199-206.

[8] Wu J, Wang J, Wang L, You Z. Performance comparison of three planar 3-DOF parallel manipulator with 4-RRR, 3-RRR and 2-RRR structure. Mechatronics. 2010; 20(4): 510-517.

[9] Wu X, Xie Z, Asboll K, Bai S. A parametric model of 3- PPR planar parallel manipulators for optimum shape design of platforms. Mechanism and Machine Theory. 2017; 20 (6): 139-153.

[10] Abhilash P, Chandrashekhar A. Analysis of Performance Indices of Planar Parallel Manipulators. Indian Journal of Science and Technology. 2018; 11(23). 1-6.

[11] Hamdoun O, Bakkali LE, Baghli FZ. Analysis and Optimum Kinematic Design of a Parallel Robot. In: the 10th International Conference Interdisciplinarity in Engineering; 2016: Tirgu Mures, Romania.

[12] Liu K, Fitzgerald JM, Lewis F. Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator. IEEE Transaction, Electronics. 1993. 40(2): 283-293.

[13] Ji P, Wu H. A closed-form forward kinematics solution for 6-6 Stewart platform manipulator. IEEE Transaction, Robotics and Automations. 2001; 17(4):522-526.

[14] Xiguang H, Guangpin H. Closed-form direct position analysis of the general Stewart-Gough manipulator robot. In: the International Conference on Mechatronic and Automation; 2009 August 9-12; Changchun, China. P. 1327-1331.

[15] Chifu Y, Huang Q, Ogbobe PO, Han J. Forward kinematic analysis of parallel robot using global newton-raphson method. In: the Second International Conference on Intelligent Computation Tchnology and Automation; 2009 October 10-11; Changsha, Hunan, China, 10-11 October, p.407-410.

[16] Tongtib A, Puangmali P, Wongratanaphisan T. Kinematic analysis of a 3-P$\overline{RR}$S parallel robot. In: the 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering; 2016 December 13-16; Chiang Mai, Thailand.

ชุดแสดงสถานะ และเก็บข้อมูลการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดกำลัง 50 กิโลโวลต์-แอมป์

Status Monitoring Set and Data Logger for 50 kVA 3-Phase Distribution Transformer

ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา[1*] ศตวรรษ เมืองชื่น[2] และไพทูรย์ ยศกาศ[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย
199 หมู่ 6 ตำบลป่าอ้อดอนชัย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย 57000
[2] หน่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย
199 หมู่ 6 ตำบลป่าอ้อดอนชัย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย 57000
Dumrongsak Wongta[1 *], Satawat Muangchuen [2] and Paitoon Yodkad [2]
[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College
199 Moo 6, Muang, Chiang Rai, Thailand, 57000
[2] Research Unit, Faculty of Engineering, Chiangrai College
199 Moo 6, Muang, Chiang Rai, Thailand, 57000
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: Dumrongsak.wongta@crc.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-4172-7780

Received: 19 May 2021, Revised: 29 September 2021, Accepted: 21 December 2021

บทคัดย่อ

ชุดแสดงสถานะและเก็บข้อมูลการใช้งานหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า ได้ติดตั้งกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดพิกัด 50 กิโลโวลต์-แอมป์ ในการติดตั้งใช้เซนเซอร์กระแส และเซนเซอร์แรงดันวัดค่าส่งให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลและบันทึกผล เพื่อศึกษาการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่การจ่ายกำลังไฟฟ้า จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด กำหนดไม่เกิน 80% ของพิกัดหม้อแปลง และแสดงสถานะโหลดเฟส A, B และ C แสดงผลสถานะเป็นสีแสงหลอดไฟตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ หลอดไฟเขียว (ปกติ), หลอดไฟเหลือง (เตือน), หลอดไฟแดง (เกินพิกัด) ผลการทดลองพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ศึกษาจ่ายกำลังไฟฟ้าช่วงสูงสุดที่ 65% และหม้อแปลงยังเหลือกำลังไฟฟ้าที่รองรับการจ่ายโหลดอีก 15% และสถานะโหลดที่ใช้งานแต่ละเฟส หลอดแสดงผลออกมาได้ค่าเป็นค่าสมดุลของโหลดตรงตามข้อมูลที่บันทึกได้

คำสำคัญ แสดงสถานะ บันทึกข้อมูล หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

Abstract

A set of status monitoring and data logger for the use of distribution transformers was installed on a 3-phase transformer rated at 50 kVA. In the installation, current sensors and voltage sensors were used to measure values and send to the microcontroller board for processing and recording in the data logger. The purpose of this paper, in addition to studying the use of transformer in distribution of power to a load rated at no more than 80% of the transformer rating, is to implement a display for phase A, B and C load states. The status display used color lamps according to the specified conditions: green lamp (normal), yellow lamp (warning)

and red lamp (overload). The results showed that the studied transformer provided a maximum power of 65% and the transformer still had 15% of the power to support the load. Moreover, for each phase of the operating load conditions, the lamps can display load balance values according to recorded data in the data logger.
Keywords: Status Monitoring, Distribution Transformer, Data Logger

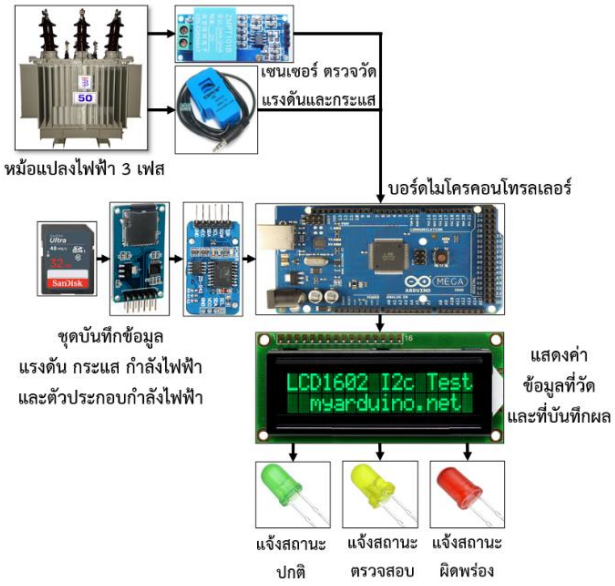
1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 1 เฟส และ 3 เฟส เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าลดหรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้ในการส่ง จ่าย กำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ในการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งจำเป็นต้องเพิ่มระดับแรงดันให้เป็นไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นกำลังไฟฟ้าถูกส่งไปที่สถานีไฟฟ้าระบบจำหน่าย เพื่อจะเข้าผ่านอุปกรณ์ตัดต่อของระบบไฟฟ้า แล้วใช้หม้อแปลงระบบจำหน่ายลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้ลดลงในระดับการใช้งาน เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังพื้นที่ใช้ไฟในแต่ละพื้นที่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีหน้าที่ผู้รับผิดชอบ ติดตั้ง ตรวจสอบ และบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการใช้ไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ [1] ถ้าหากมีการขยายตัวของการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หม้อแปลงไฟฟ้าก็จะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามโหลดการใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง และในบางช่วงเวลาโหลดผู้ใช้ไฟมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือพร้อม ๆ กัน เกินพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้ความสามารถในการจ่ายโหลดลดลง จะมีกระแสไหลในสายนิวทรัล ซึ่งจะทำให้แรงดันตกและมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายนิวทรัลประสิทธิภาพของระบบจะลดลง [2] เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดันเบี่ยงเบนมากเกินไป เฟสที่มีโหลดต่อในวงจรมากแรงดันจะต่ำ ส่วนเฟสที่มีโหลดต่อน้อยแรงดันจะสูง ความสามารถในการจ่ายโหลดของระบบลดลง ไม่สามารถจ่ายได้ตามพิกัด เพราะถูกจำกัดด้วยเฟสที่มีโหลดสูงสุด และหากว่ากรณีที่ระบบไม่สมดุลและสายนิวทรัลขาด จะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีขนาด 400 โวลท์ แรงดันตกคร่อมโหลดบางตัวอาจสูงกว่าปกติ ดังนั้นพนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงต้องมีการตรวจเช็ค บันทึกข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าประจำทุกวัน 1-2 ครั้งต่อวัน ในช่วงเวลาระหว่างนั้นก็อาจจะเกิดเหตุการณ์ที่หม้อแปลงจ่ายโหลดเกินพิกัด ส่งผลให้ไม่ครอบคลุมการตรวจสอบการใช้งานหม้อแปลงได้ทั้งหมด อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูล (Data Logger) ค่าสัญญาณชนิดต่าง ๆ ไว้ [3] โดยมีอุปกรณ์เก็บข้อมูลสำหรับเก็บค่าที่วัดได้ของสัญญาณตามช่วงเวลาการบันทึกที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ ซึ่งก็คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก และมีความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน จึงสามารถใช้คอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถบันทึกค่า และแสดงผลตามที่เรากำหนดเองได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถวัดและบันทึกค่าพารามิเตอร์ข้อมูลทางไฟฟ้า ได้แก่แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง มาบันทึกค่าไว้ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้าย้อนหลังได้ อีกทั้งยังแจ้งสถานะให้ทราบถึงค่าความสมดุลของโหลดไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า พร้อมกับแจ้งสถานะให้ตรวจสอบว่าได้เกิดเหตุการณ์การใช้กำลังไฟฟ้าเกินพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า ตามที่กำหนดเงื่อนไขสถานะไว้หรือไม่

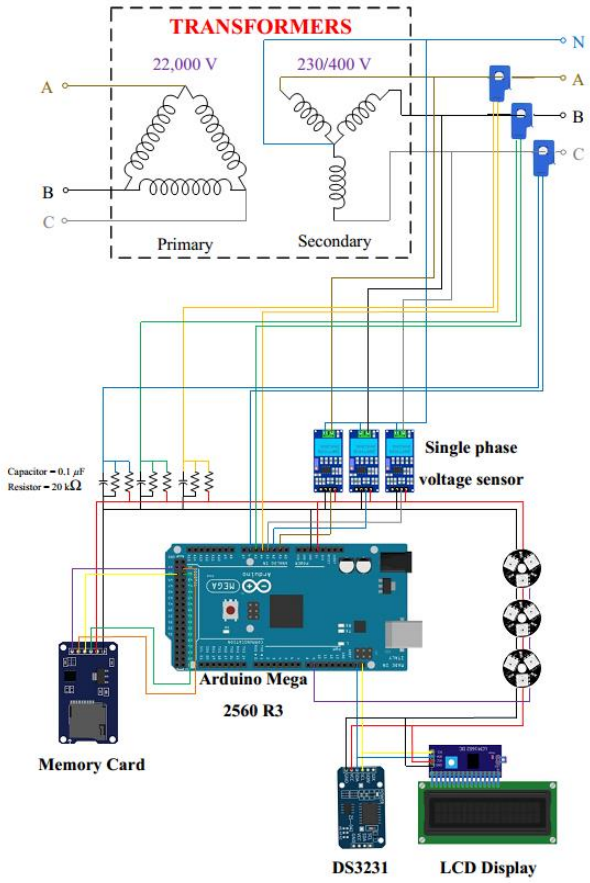
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบชุดแสดงสถานะ และเก็บข้อมูล

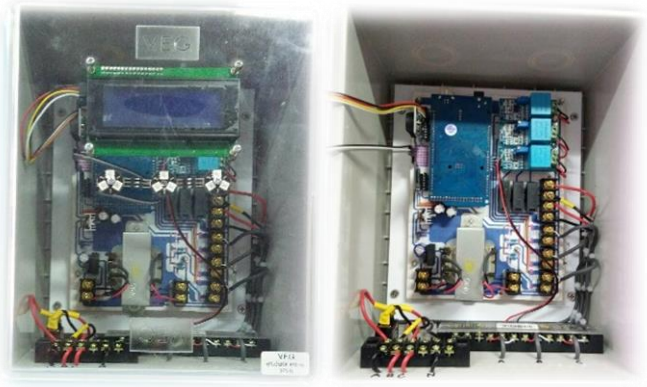
การสร้างชุดแสดงสถานะ [4] และเก็บข้อมูลการใช้หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า เป็นการใช้การทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560 R3) จะทำหน้าที่ในการประมวลผลจากเซ็นเซอร์แรงดันและกระแสทำหน้าที่วัดค่าและนำสัญญาณส่งต่อให้แสดงผลข้อมูลที่จอแสดงผล (LCD Display) และบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำ (Memory Card) และสามารถแสดงสถานะจากการวัดค่าได้ทันที โดยส่วนประกอบที่ออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การออกแบบโครงสร้างการทำงาน และส่วนประกอบของอุปกรณ์ในแต่ละส่วน



รูปที่ 2 การต่อวงจรของอุปกรณ์แต่ละส่วนเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



ก) ด้านหน้าตู้ ข) ด้านในตู้

รูปที่ 3 การประกอบอุปกรณ์เข้าในตู้ชุดแสดงสถานะ

ทำการประกอบชุดแสดงสถานะ และเก็บข้อมูลการใช้งานหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า และต่อวงจรด้วยสายพอร์ตของแต่ละส่วนมาที่โมดูลบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบในกล่องที่กันแดดและฝนได้ หน้ากล่องได้เลือกเป็นแบบโปร่งแสงเพื่อให้สามารถแสดงสถานะของหม้อแปลงได้พร้อมกับยึดน็อตขันให้แน่น แสดงดังรูปที่ 2 และ3

ก่อนที่จะทำการติดตั้งใช้งานจริง จำเป็นต้องทดสอบและปรับค่าในการวัดการเก็บข้อมูลของชุดแสดงสถานะให้มีค่าที่เชื่อถือได้ โดยการสอบเทียบอุปกรณ์ชุดแสดงสถานะเทียบกับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานหรือเครื่องวัดได้ใบรับรองค่าการวัดที่ได้มาตรฐานมาแล้ว [12] ในการสอบเทียบได้ติดตั้งชุดแสดงสถานะเข้ากับตู้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส (Main Distribution Board : MDB) ของอาคารเฉลิมพระเกียรติ วิทยาลัยเชียงราย โดยใช้ค่าแสดงผลของตู้ MDB เป็นค่ามาตรฐาน เปรียบเทียบค่าที่วัดได้ของชุดแสดงสถานะ ทำการวัดและปรับตั้งค่าจากนั้นจึงทำการสอบเทียบ ดังรูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยที่บันทึกผลการสอบเทียบแสดงดังตารางที่ 1

ค่าเกณฑ์การยอมรับแรงดันไฟฟ้ากำหนดที่ ± 5 โวลต์ จากผลการสอบเทียบได้ค่าคลาดเคลื่อนมากสุดที่ 1.10 โวลต์และเกณฑ์การยอมรับกระแสไฟฟ้ากำหนดที่ ± 3 แอมแปร์จากผลการสอบเทียบได้ค่าคลาดเคลื่อนมากสุดที่ 0.51แอมแปร์สำหรับเกณฑ์การยอมรับค่ากำลังไฟฟ้าต่อเฟสกำหนดที่ ± 5 % หรือไม่เกิน 600 วัตต์ ผลการสอบเทียบได้ค่าคลาดเคลื่อนมากสุดไม่ถึง 3 % โดยรวมถือว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับการใช้งาน จึงนำไปติดตั้ง ณ จุดที่ศึกษา

ก) เครื่องมือวัดมาตรฐาน ข) การติดตั้งทดสอบเทียบค่า

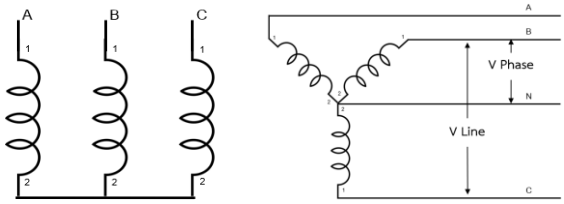
รูปที่ 4 การสอบเทียบชุดแสดงสถานะ กับตู้ระบบไฟฟ้า MDB

ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบการวัดค่าไฟฟ้าชุดแสดงสถานะ

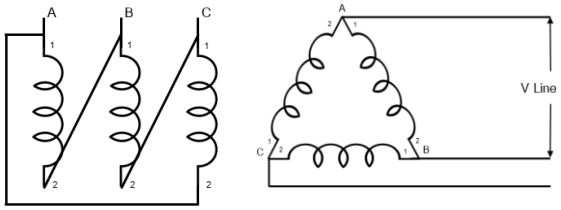
ค่าเฉลี่ยทางไฟฟ้า	ระบบไฟฟ้า MDB	ชุดแสดงสถานะ	ค่าคลาดเคลื่อน	
			±	%
แรงดันเฟส A (โวลต์)	230.55	230.05	0.50	0.22
แรงดันเฟส B (โวลต์)	231.14	230.43	0.71	0.31
แรงดันเฟส C (โวลต์)	231.35	230.25	1.10	0.48
กระแสเฟส A (แอมแปร์)	62.24	61.73	0.51	0.82
กระแสเฟส B (แอมแปร์)	54.01	53.56	0.45	0.83
กระแสเฟส C (แอมแปร์)	59.65	59.25	0.40	0.67
กำลังไฟฟ้าเฟส A (วัตต์)	12770.99	12496.87	274.13	2.15
กำลังไฟฟ้าเฟส B (วัตต์)	11110.65	10860.81	249.83	2.25
กำลังไฟฟ้าเฟส C (วัตต์)	12282.02	12005.24	276.79	2.25
ค่าตัวประกอบกำลัง	0.89	0.88	0.01	1.12

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 3 เฟส

หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เป็นหม้อแปลงที่มีจำนวนขดลวดแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส มีจำนวนสามชุด [5] โดยมีวิธีที่สามารถเข้าขดลวดของหม้อแปลงทั้งสามชุดของด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็น 2 แบบ คือ แบบวายหรือสตาร์ (Wye or Star connection) และแบบเดลต้า (Delta connection)



ก) การต่อขดลวดแบบวายหรือสตาร์



ข) การต่อขดลวดแบบเดลต้า

รูปที่ 5 การต่อขดลวดหม้อแปลง แบบวาย แบบเดลต้า

หม้อแปลงไฟฟ้ามีพิกัดกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power : S) ซึ่งจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active Power : P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power : Q) ได้ด้วยสมการดังนี้

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L^* \quad (1)$$

$$S_{3\phi} = P + jQ \quad (2)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L Cos\theta \quad (3)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L Sin\theta \quad (4)$$

$S_{3\phi}$ = กำลังไฟฟ้าปรากฏสามเฟส หน่วย โวลต์แอมป์ (VA)

$P_{3\phi}$ = กำลังไฟฟ้าจริงสามเฟส หน่วย วัตต์ (W)

$Q_{3\phi}$ = กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามเฟส หน่วย วาร์ (Var)

$Cos\theta$ = ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

2.3 การกำหนดเงื่อนไขการแสดงสถานะของข้อมูลที่บันทึก

หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส ณ บ้านสะบู ตำบลเหมืองหม้อ อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ ต่อขดลวดแบบ เดลตา-สตาร์ มีพิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏสามเฟสขนาด $S_{3\phi} = 50kVA$ แรงดันไฟฟ้า $22kV / 400-230V$ และค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 0.85 Lagging ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงจะต้องไม่เกิน 80% ของพิกัดหม้อแปลง [6] หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้านี้จะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกิน $S_{3\phi} = \left(50\times10^3\right)\times\left(0.8\right) = 40kVA$ ส่วนโหลดรวมไฟฟ้าทั้งสามเฟสนั้นจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกระแสไฟฟ้า โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{3\phi} = \left(40\times10^3\right)\times\left(0.85\right) = 34kW$$

$$I_L = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3}V_L I_L Cos\theta}$$

$$I_L = \frac{34\times10^3}{\sqrt{3}\times400\times0.85} = 57.74A$$

จะทำการติดตั้งที่เสาไฟฟ้าต้นที่หม้อแปลงจำหน่ายติดตั้งอยู่ แล้วจะใช้ชุดเซ็นเซอร์กระแสและแรงดันไฟฟ้าคล้องสายไฟฟ้าไว้ ชุดแสดงสถานะทำการวัดค่าและบันทึกค่าพร้อมกับให้แสดงผลออกมาตามเงื่อนไขการแสดงผลในสถานะสีเขียว สีเหลือง สีแดง ของหลอดไฟแต่ละเฟสได้ [7-8] โดยสามารถวิเคราะห์ความหมายของสีสถานะของหลอดไฟ ดังนี้

ตารางที่ 2 หลอดไฟแสดงผลสถานะการใช้งานหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

เปอร์เซ็นต์ (%) การใช้งานหม้อแปลง	ไม่เกิน 80%	80-90 %	90-100 %
กำลังไฟฟ้า $P_{3\phi}$ (กิโลวัตต์: kW)	0-34 kW	34-38.3 kW	38.3-42.5 kW
กระแสไฟฟ้า I_L (แอมแปร์: A)	34-38.3 kW	57.74-65.04 A	เหลือง
สถานะสีเขียว	ตลอดเวลา	-	-
สถานะสีเหลือง	-	ครบ 3 ครั้ง	ครบ 6 ครั้ง
สถานะสีแดง	-	-	ครบ 3 ครั้ง

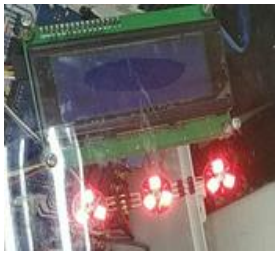
2.1 การติดตั้งชุดแสดงสถานะ และเก็บข้อมูล

ในการศึกษาทดสอบ ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์นี้ไว้ที่หมู่บ้านสะบู ตำบลเหมืองหม้อ อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 กิโลโวลต์-แอมป์ ติดตั้งเซนเซอร์แรงดันและเซนเซอร์กระแส คล้องสายวัดค่าที่สายไฟฟ้าใต้หม้อแปลงไฟฟ้าด้านแรงต่ำ เฟส A, B และ C ติดตั้งให้ชุดแสดงสถานะทำการเก็บข้อมูล เป็นเวลา 3 วัน เริ่มเก็บข้อมูลที่บันทึกตั้งแต่วันที่ 21 สิงหาคม 2563 ถึง วันที่ 23 สิงหาคม 2563 โดยกำหนดให้เครื่องมีการบันทึกข้อมูลทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า ทุก ๆ 5 นาที และเงื่อนไขที่นับจำนวนเหตุการณ์จะ

รีเซ็ตใน 24 ชั่วโมง แสดงรูปการทำงานของชุดแสดงสถานะและบันทึกค่าดังรูปที่ 8 และข้อมูลจากผลการบันทึกค่าที่ติดตั้ง แสดงดังตาราง 3-5

ก) สีเขียว คือ ปกติสถานะโหลดใช้งาน ไม่เกิน 80 % ของพิกัดการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า

ข) สีเหลือง คือ สถานะโหลดใช้งาน 80-90 % ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า ให้ตรวจสอบ เฝ้าติดตามวางแผนจ่ายโหลด



ค) สีแดง คือ สถานะโหลดใช้งาน 90-100 % เกินพิกัดใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า ให้ทำการเพิ่มพิกัดหรือเปลี่ยนหม้อแปลง

รูปที่ 6 การแสดงผลของหลอดไฟแสดงสถานะในแต่ละสี

รูปที่ 7 การติดตั้งชุดแสดงสถานะที่หม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 8 การแสดงสถานะกำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของเฟส A, B และ C ที่จุดทดสอบ และเก็บข้อมูล

ตารางที่ 3 ข้อมูลหม้อแปลง วันที่ 21 สิงหาคม 2563

แรงดันไฟฟ้า (V)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	235.23	231.6	231.33
ค่าสูงสุด	249.6	247.91	243.62
ค่าเฉลี่ย	241.61	239.51	237.26
กระแสไฟฟ้า (A)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	5.13	5.14	5.05
ค่าสูงสุด	37.76	36.02	34.46
ค่าเฉลี่ย	14.39	11.42	14.72
กำลังไฟฟ้า (W)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	919.07	1139.61	530.46
ค่าสูงสุด	8233.62	8618.54	8126.95
ค่าเฉลี่ย	2994.41	2574.27	2509.11

ตารางที่ 4 ข้อมูลหม้อแปลง วันที่ 22 สิงหาคม 2563

แรงดันไฟฟ้า (V)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	234.18	231.24	233.19
ค่าสูงสุด	246.59	245.64	245.35
ค่าเฉลี่ย	240.70	239.64	239.04
กระแสไฟฟ้า (A)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	5.05	5.12	5.48
ค่าสูงสุด	37.13	37.28	39.93
ค่าเฉลี่ย	13.38	12.05	19.12
กำลังไฟฟ้า (W)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	1029.61	839.14	561.96
ค่าสูงสุด	7243.99	8920.68	9515.52
ค่าเฉลี่ย	2796.66	2821.88	4025.64

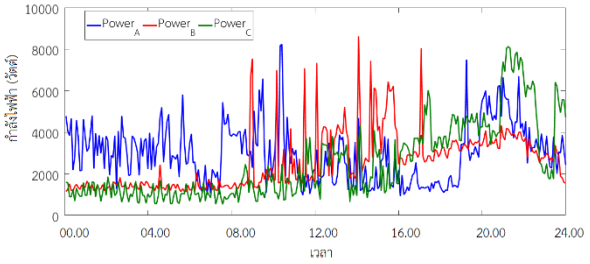
ตารางที่ 5 ข้อมูลหม้อแปลง วันที่ 23 สิงหาคม 2563

แรงดันไฟฟ้า (V)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	234.98	233.98	204.67
ค่าสูงสุด	255.62	246.21	243.78
ค่าเฉลี่ย	242.67	240.36	235.89
กระแสไฟฟ้า (A)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	5.03	5.07	5.44
ค่าสูงสุด	46.32	40.17	32.73
ค่าเฉลี่ย	14.97	11.87	16.92
กำลังไฟฟ้า (W)			
ลำดับเฟส	A	B	C
ค่าต่ำสุด	888.32	873.39	630.61
ค่าสูงสุด	10582.53	9641.42	6274.44
ค่าเฉลี่ย	3280.91	2762.41	3052.92

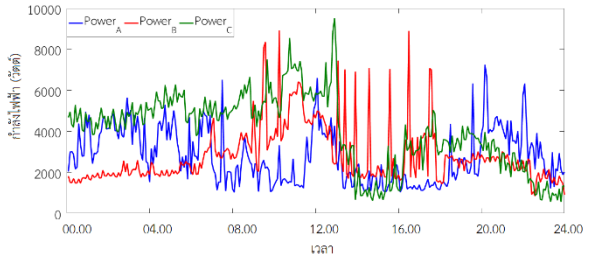
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากผลการทดลองจะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดในแต่ละเฟส [9-11] แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่บันทึกได้ในแต่ละวัน ดังรูปที่ 9-11

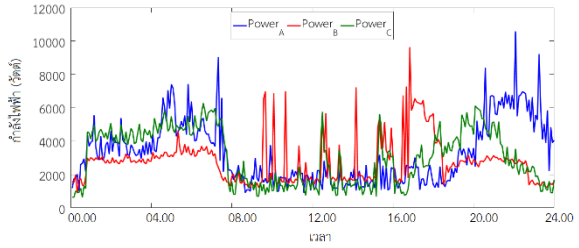
จากการบันทึกผลข้อมูลการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดในแต่ละวัน จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเฟส A และ C จะจ่ายโหลดมากน้อยสลับกันไปมา แต่กำลังไฟฟ้าเฟส B มีการจ่ายโหลดในแต่ละวันที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยโหลดจะใช้กำลังไฟฟ้ามากในช่วงเวลาประมาณ 08.00-19.00 น. ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้านี้ การจ่ายกำลังไฟฟ้าเฟส B ถือว่ามีความเสถียรดีกว่า เฟส A และ C สำหรับการวิเคราะห์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเกินพิกัด โดยคิดเป็นกำลังไฟฟ้าจริงคิดที่ 80% ของพิกัดหม้อแปลง 3 เฟส คือ 34 กิโลวัตต์ หรือ 34,000 วัตต์ หากคิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริง 1 เฟส คือ 11,333 วัตต์ จะเห็นว่ามีการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เฟส A เท่ากับ 10,583 วัตต์ ค่ากำลังไฟฟ้ายังไม่เกินพิกัดใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า และหากใช้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมาคิดจะมีการใช้งานอยู่ที่ไม่เกิน 30%



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าแต่ละเฟส วันที่ 21 สิงหาคม 2563



รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าแต่ละเฟส วันที่ 22 สิงหาคม 2563

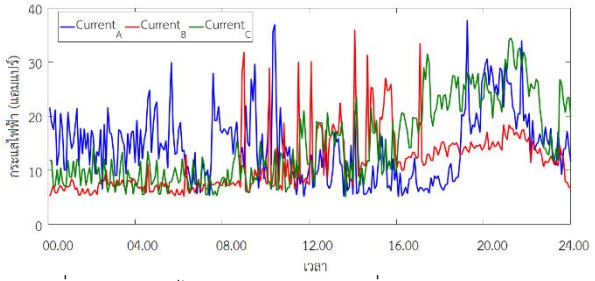


รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าแต่ละเฟส วันที่ 23 สิงหาคม 2563

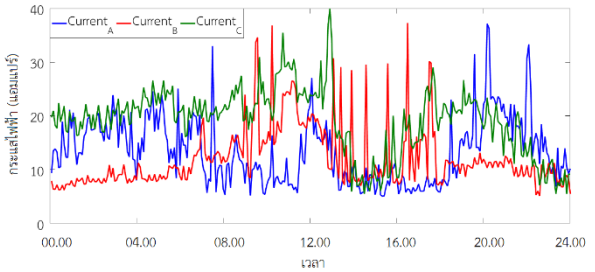
ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกได้ในแต่ละวัน ดังรูปที่ 12-14

จากการบันทึกผลข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่เฟส A จะมีค่ากระแสที่ใช้งานมากสุด 3-4 ครั้งต่อวัน ที่เวลา 8.00 น. และ หลัง 20.00 น. ส่วนเฟส B มีค่ากระแสที่ใช้งานมากสุด7-8 ครั้งต่อวัน อยู่ในช่วงเวลา8.00-19.00 น. และเฟส C ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานมีค่าที่มากน้อยในแต่ละวันไม่เหมือนกัน โดยส่วนใหญ่จะใช้งานมากที่เวลา 16.00 - 24.00 น.

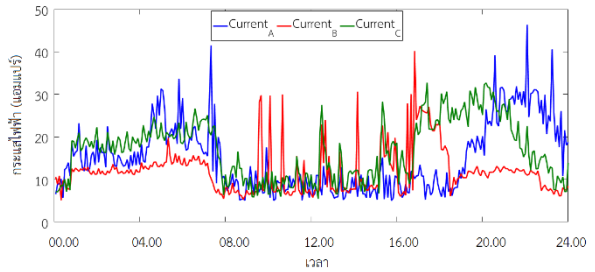
สำหรับการวิเคราะห์พิกัดกระแสใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ 80 % คือ 57.74 แอมแปร์ จะเห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เฟส A เท่ากับ 46.32 แอมแปร์ ค่ากระแสไฟฟ้ายังไม่เกินพิกัดใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าใช้อยู่ที่ไม่เกิน 65% ของพิกัดกระแสใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 12 กระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส วันที่ 21 สิงหาคม 2563



รูปที่ 13 กระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส วันที่ 22 สิงหาคม 2563



รูปที่ 14 กระแสไฟฟ้าแต่ละเฟส วันที่ 23 สิงหาคม 2563

4. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอ ชุดแสดงสถานะ และเก็บข้อมูลการใช้งานหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า โดยกำหนดการแจ้งเตือนสถานะ ของเฟส A B และ C ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า พิกัดกระแสไฟฟ้าใช้งานไม่เกิน 80% และกำหนดเหตุการณ์ที่เกินค่าพิกัดใช้งานเป็นจำนวนครั้งด้วยหลอดไฟ โดยสถานะหลอดไฟแสดงสถานะเป็นสีเขียว แสดงว่าหม้อแปลงทำงานปกติดีใช้งานไม่เกินพิกัดที่กำหนด สถานะหลอดไฟเป็นสีเหลืองแสดงว่ามีการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเกินพิกัด และเกินจำนวนครั้งขั้นต่ำที่กำหนดไว้ ให้สามารถประเมินกำลังหม้อแปลงไฟฟ้าในอนาคตได้ และสถานะหลอดไฟเป็นสีแดงกำหนดให้เป็นค่าที่เกินพิกัดใช้งานให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดนั้นไม่เพียงพอที่รองรับโหลด นอกจากแสดงสถานะแล้วยังสามารถบันทึกข้อมูล ในทุก ๆ 5 นาที ได้แก่ แรงดันกระแส กำลังไฟฟ้า และค่าตัวประกอบกำลัง ให้สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังได้

จากการทดลองติดตั้งที่บ้านสะบู ตำบลเหมืองหม้อ อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 กิโลโวลต์-แอมป์ กำหนดค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ 80% แบบ 3 เฟส คือ 34 กิโลวัตต์ และพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ 80% คือ 57.74 แอมแปร์ พบว่าโหลดใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากหม้อแปลงจำหน่ายแบบระบบ 3 เฟส ใช้ไม่เกิน 28 กิโลวัตต์ หรือ 65% และใช้กระแสไฟฟ้าไม่เกิน 47 แอมแปร์ หรือ 65% จากการศึกษาและติดตั้งจึงพบว่าหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้านี้ ยังเหลือกำลังไฟฟ้าที่รองรับการจ่ายโหลดอีก 15% คือ กำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ได้อีก 6 กิโลวัตต์ และกระแสไฟฟ้าได้อีก 10.74 แอมแปร์

ชุดแสดงสถานะที่นำเสนอนี้ นอกจากจะแสดงค่าสถานะการจ่ายกระแส และกำลังไฟฟ้าให้โหลดแล้ว สามารถนำไปวัดและบันทึกข้อมูลระบบไฟฟ้าในอาคารได้ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้โหลด ตรวจสอบความเสถียรภาพทางไฟฟ้าของโหลดในแต่ละเฟสได้ เพื่อประมาณกำลังไฟฟ้าหรือวางแผนปรับปรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าในอนาคตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเชียงราย ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดแพร่ ที่ให้ข้อมูลและเอื้อเฟื้อให้ดำเนินการให้ติดตั้ง ณ สถานที่ศึกษา รวมถึงสนับสนุนรถกระเช้าช่วยให้ความสะดวกแก่การดำเนินงานการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Organization System Division Policy and Strategy Department Strategy. Provincial Electricity Authority Service Quality Standard, B.E. 2563 (2020); 1-147. Thai.

[2] Provincial Electricity Authority. B.E. 2559 (2016). Provincial Electricity Authority Regulation on Grid Connection Requirements. Bangkok: PEA; 2016. Thai.

[3] Sriprasarn S, Leelachindakrairerk M. Detection system for the transformer of the Provincial Electricity Authority. Engineering Journal, Kasetsart University. 2010; 23 (73): 23-32. Thai.

[4] Rattanalertnusorn S. Computer Programming With C Language. 3rd ed. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan); 2014. Thai.

[5] Hinkerd C. Fundamental of Transformer. 3rd ed. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan); 2009. Thai.

[6] Chaidee E. Power System. Bangkok: Se-education Public Company Limited; 2014. Thai.

[7] Kositpol T, Ragryeong A. Operating instructions and preventive maintenance of oil-immersed distribution transformers. B.Eng thesis. Burapha University; 2017. Thai.

[8] Jakovic T, Murat I, Klaric F, Keitoue S. Transformer fleet monitoring. Science Direct. Procedia Engineering 2017; 202: 20-8.

[9] Rusov V, Zhivodernikov S. Transformer condition monitoring. In: IEEE Power and Transmission, editor. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis; 2008 April 21-24; Beijing. China; 2008. p. 1012-4.

[10] Pablo AD, Ferguson W, Mudryk A, Golovan D. On-line condition monitoring of power transformers. In: IEEE Power and Transmission, editor. Electrical Insulation Conference; 2011 June 5-8; Annapolis, Maryland. USA;2011. p. 285-8

[11] Mackenzie EA, Crossey J, Pablo AD, Ferguson W. On-line monitoring and diagnostics for power transformers. In: IEEE International Symposium, Electrical Insulation Conference; 2010 June 6-9; San Diego. USA; 2010. p.150-8

[12] Hedtthng P. The development of electrical calibration instrument manual for technician of industrial service department instrument calibration center in technology promotion association (Thailand – Japan). M. Eng thesis. Srinakharinwirot University; 2004. Thai.

การประยุกต์ใช้งานแอปพลิเคชั่นปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งบนคลาวด์ในอาคารอัจฉริยะ

A Cloud-Based AIoT Application in Smart Building

ภาณุเดช ทิพย์อักษร* อรรถพล วิเวก และอนุพงศ์ ไพโรจน์
สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
Panudech Tipaksorn* Atthaphon Wiwek and Anupong Pairote
Department of Technical Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajama ngala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300
*ผู้รับผิดชอบบทความ: panudech@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444 ต่อ 2132

Received: 12 April 2021, Revised: 25 May 2021, Accepted: 14 September 2021

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เสนอการออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับตรวจจับบุคคลในอาคารอัจฉริยะ การตรวจจับบุคคลที่อยู่ในอาคารส่วนใหญ่จะใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว ส่วนการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต้องอาศัยระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่มีความเสถียรภาพสูง ทางผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดการพัฒนาแพลตฟอร์มที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมด้านอาคารอัจฉริยะ เพื่อลดปัญหาการติดต่อสื่อสารระหว่างเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยสร้างแอปพลิเคชันที่มีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สั่งงานผ่านระบบประมวลผลภาพ ระบบสั่งงานควบคุม และระบบแสดงผลข้อมูลสถิติ ซึ่งทำงานอยู่บนระบบคลาวด์ส่วนตัว โดยใช้กล้องวงจรปิดในการตรวจจับหาบุคคลที่อยู่ภายในอาคารแต่ละโซนด้วยวิธีการประมวลผลภาพจากโมเดลทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อทำการวิเคราะห์และสั่งควบคุมการเปิดปิดระบบส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ และประตูเข้าออกอาคารแบบอัตโนมัติ อีกทั้งยังมีระบบแจ้งเตือนความปลอดภัย ในกรณีที่ตรวจเจอบุคคลนอกช่วงเวลาที่กำหนดผ่านทาง LINE Notify และได้ออกแบบระบบให้รองรับการเพิ่มชุดควบคุมในแต่ละโซนในอนาคตได้ จากการทดลองพบว่าสามารถลดชั่วโมงการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารได้ 31.47 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ปัญญาประดิษฐ์ อาคารอัจฉริยะ คลาวด์ส่วนตัว

Abstract

This research article presents a design and implementation of an Internet of Things (IoT) application for detecting people in smart buildings. Most occupancy detection systems use motion sensors to detect people indoor and often requires a highly stable internet connection to ensure reliable communication between devices. To lessen network-related issues, we propose a cloud-based platform that is suitable for the smart building environment. An IoT application that consists of image processing system, control system, and statistics display system is developed and deployed on an on-premise cloud. The images captured from surveillance cameras are processed by artificial intelligence with Intel's pre-trained model in order to detect people in each zone of the building. Based on the detection results, the control system automatically adjusts lighting and air conditioning in rooms to preserve energy, as well as opens or closes building gates. The application also sends out safety

alert in case detection occurs outside of the specified time via LINE Notify. In addition, the platform is designed to scale to support more zones in the future. The experiment results showed that our system was able to reduce overall energy usage hours of the building by 31.47 percent.

Keywords: Internet of Things, Artificial Intelligence, Smart Building, On-Premise Cloud

1. บทนำ

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of things : IoT) ในปัจจุบันเป็นเรื่องที่ใกล้ตัวเราเป็นอย่างมาก อุปกรณ์พกพาต่าง ๆ อุปกรณ์ภายในบ้าน หรืออุปกรณ์ภายในสำนักงานก็สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและสามารถสั่งงานผ่านผู้ใช้งานหรือจากอุปกรณ์ด้วยกันเอง นอกจากนั้นระหว่างการใช้งานมีการเก็บข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ประมวลผลในภายหลังได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่นการควบคุมอุณหภูมิภายในบ้าน การเปิดปิดไฟ ไปจนถึงการสั่งให้เครื่องทำกาแฟให้เริ่มทำงาน แต่อย่างไรก็ตามยังมีเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่จำเป็นจะต้องถูกพัฒนาไปพร้อมเทคโนโลยี IoT เช่น ระบบตรวจจับต่าง ๆ (Sensors) รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ และระบบที่ฝังตัวอยู่ในคอมพิวเตอร์ เพื่อให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น [1-2]

ปัญญาประดิษฐ์ของสรรพสิ่ง (Artificial intelligence of things : AIoT) คือการรวมกันของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์กับโครงสร้างพื้นฐานอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อให้การดำเนินงาน IoT มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยปรับปรุงการโต้ตอบระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักร และเมื่อมีการปรับปรุงกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยนั้น จะเสริมประสิทธิภาพการทำงานให้กับอุปกรณ์ Smart Device ต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อกับ AI บนคลาวด์ให้ดียิ่งขึ้นมาก [3-4]

แนวคิดในการทำอาคารอัจฉริยะ (Smart Buildings) คือแนวคิดที่เน้นการนำอุปกรณ์ทางด้าน IoT เข้ามาใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ที่อยู่ภายในสำนักงาน เพื่อความสะดวกสบายให้กับผู้ใช้ภายในอาคาร ซึ่งเป็นแนวคิดที่มีมานานหลายปีแล้ว แต่ยังไม่ค่อยเห็นเป็นรูปเป็นร่างเนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสารในสมัยก่อนนั้นไม่ได้มีความรวดเร็ว และยังไม่สามารถรองรับอุปกรณ์ได้มากนัก แต่ในปัจจุบันที่เทคโนโลยีทางการสื่อสารพัฒนารุดหน้าไปมาก เราสามารถรับส่งข้อมูลในปริมาณมากได้ในเวลาที่น้อยลง ทำให้เทคโนโลยีด้านอาคารอัจฉริยะมีการใช้งานมากขึ้น [5-7] ส่วนประโยชน์ที่จะได้รับจากระบบอาคารอัจฉริยะได้แก่

1) มีระบบเปิด/ปิดอาคารอัตโนมัติตามเวลาที่กำหนด

2) สามารถติดตามความเคลื่อนไหวได้จากกล้องวงจรปิด

3) สามารถตรวจปริมาณการใช้ไฟฟ้า

4) สามารถควบคุมการอุปกรณ์ผ่านทางสมาร์ทโฟน

4) มีระบบแจ้งเตือนเรื่องความปลอดภัย

5) ประหยัดต้นทุนในเรื่องของทรัพยากรบุคคลที่ต้องนำมาใช้ดูแลอาคาร

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยส่วนใหญ่แล้วจะสนใจเรื่องของการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้อุปกรณ์นั้น ๆ สามารถสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้อย่างทันท่วงทีและเชื่อมต่อกับเครือข่ายอยู่ตลอดเวลา เพราะถ้าหากการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายหลักมีปัญหาอาจจะทำให้ข้อมูลบางส่วนสูญหายหรือเกิดความไม่ต่อเนื่อง และอาจนำไปสู่ปัญหาในกระบวนการประมวลผลข้อมูลได้ [7-8]

การสร้างกลไกในการรวบรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลพื้นฐานเหล่านั้นมาประมวลผลได้อย่างครบถ้วนมากที่สุด ซึ่งหากขาดข้อมูลไปบางส่วนก็อาจมีผลทำให้การตัดสินใจผิดพลาด [9]

การสร้างตัวกลางโดยใช้ระบบคลาวด์มาช่วยในการรวมข้อมูลและประมวลผล เพื่อช่วยให้การจัดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่มีจำนวนมากและยากต่อการจัดเก็บทำได้สะดวกมากขึ้นน [10-13]

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วยประเภทการใช้งานของการประมวลผลบนคลาวด์ การประมวลผลภาพด้วยชุดเครื่องมือ OpenVINO และเทคนิคการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์ผ่านทางโปรโตคอล MQTT โดยจะกล่าวรายละเอียดตามหัวข้อดังนี้

2.1.1 การประมวลผลบนคลาวด์ (Cloud Computing)

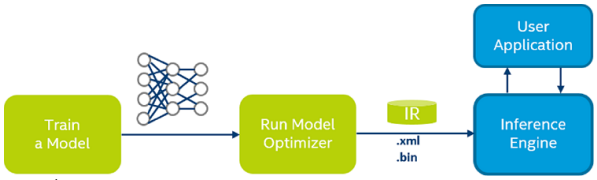
เป็นการประมวลผลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ที่พร้อมให้บริการกับผู้ใช้งาน เมื่อไรก็ตามที่มีความต้องการใช้ โดยไม่ยึดติดกับสถานที่ อุปกรณ์ และไม่มีข้อจำกัดเรื่องปริมาณและเวลา [14]

สามารถจำแนกตามการใช้งานได้ 3 ประเภท SaaS (Software as a Service) เป็นรูปแบบการให้บริการใช้ซอฟต์แวร์หรือแอพพลิเคชัน ผู้ใช้สามารถใช้บริการได้โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งซอฟต์แวร์ PaaS (Platform as a Service) เป็นรูปแบบการให้บริการแพลตฟอร์ม สำหรับนักพัฒนาในการพัฒนาโปรแกรม IaaS (Infrastructure as a Service) เป็นรูปแบบการให้บริการโครงสร้างพื้นฐาน การประมวลผล Storage และ Network

2.1.2 การประมวลผลภาพด้วยชุดเครื่องมือ OpenVINO

ชุดเครื่องมือ OpenVINO (Open Visual Inference and Neural Network Optimization) [15] เป็นชุดเครื่องมือสำเร็จรูปในการเขียนโปรแกรมที่มุ่งเน้นไปที่การแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์ (Real Time Computer Vision) ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัทอินเทล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ทำงานเกี่ยวกับการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ การอนุมานเครือข่ายประสาท และการปรับใช้การเรียนรู้อย่างล้ำลึก โดยนำปัญญาด้านการมองเห็นมาไว้ในแอพพลิเคชั่นและสามารถทำงานบนระบบคลาวด์ได้

OpenVINO รองรับการทำงานด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Python และ Java ซึ่งมีไลบารีที่สามารถทำงานข้ามแพลตฟอร์มและสามารถแสดงผลได้หลากหลายระบบปฏิบัติการ การทำงานของชุดเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 1

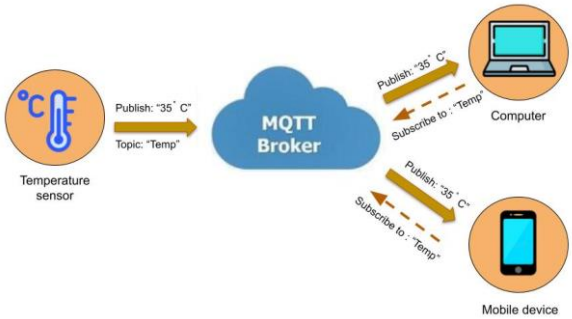


รูปที่ 1 ลักษณะการทำงานของไลบารีฟังก์ชัน OpenVINO

2.1.3 โปรโตคอล MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) เป็นโปรโตคอลในการรับส่งข่าวสารหรือข้อความที่ออกแบบมาสำหรับการสื่อสารเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์ในลักษณะ M2M (Machine to Machine) โดยเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง [16]

หลักการทำงานของ MQTT มีส่วนประกอบ 3 อย่างคือ ผู้ส่ง (Publish), ผู้รับ (Subscribe) และตัวกลาง (MQTT Broker) โดยที่ผู้ส่งหรือผู้รับจะใช้อุปกรณ์ประเภทใดก็ได้



รูปที่ 2 หลักการทำงานของโปรโตคอล MQTT

ผู้ส่งมีหน้าที่ส่งข้อมูลหรือข้อความไปยังตัวกลาง MQTT Broker โดยสิ่งที่ส่งจะประกอบไปด้วยหัวข้อ (Topic) และข้อความ (Message) ผู้รับมีหน้าที่เชื่อมต่อกับตัวกลางและติดตามหัวข้อให้ตรงกับผู้ส่ง ตัวกลางมีหน้าที่รับข้อความจากผู้ส่งและกระจาย (Broadcast) ให้กับผู้ติดตามที่มีหัวข้อตรงกับผู้ส่งเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 ระบบคลาวด์ส่วนตัว

ทางผู้วิจัยได้นำเสนอแพลตฟอร์มที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมด้านอาคารอัจฉริยะ เพื่อลดปริมาณข้อมูลบนเครือข่ายที่ผ่านเข้าออกจากเกตเวย์ของหน่วยงาน โดยสร้างแอปพลิเคชั่นที่มีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ทำงานร่วมกับอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งประมวลผลอยู่บนระบบคลาวด์ส่วนตัวแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดประมวลผลที่แตกต่างกัน 4 งานด้วยกันคือ

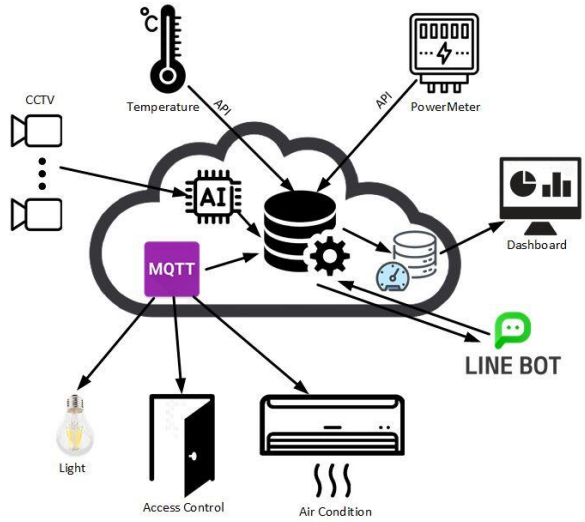
1) ระบบประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดด้วย AI
2) ระบบฐานข้อมูลกลาง
3) ระบบสั่งงานควบคุมผ่านโปรโตคอล MQTT
4) ระบบแสดงผลข้อมูลสถิติด้วย Dashboard

เหตุผลหลักว่าทำไมการเลือกใช้งานระบบคลาวด์ส่วนตัวถึงได้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมด้านอาคารอัจฉริยะประเด็นแรกเพื่อควบคุมต้นทุนและลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นของหน่วยงานเรื่องค่าเช่าบริการและการดูแลระบบ อีกทั้งยัง

เป็นการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรทางไอทีที่หน่วยงานได้ลงทุนไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ประเด็นที่สองเพื่อลดปัญหาการเชื่อมต่อและลดระยะเวลาการตอบสนอง (Latency) เมื่อเทียบกับการใช้ระบบคลาวด์ของผู้ให้บริการภายนอก โดยที่ความเร็วของระบบอินทราเน็ตภายในหน่วยงานมีอัตราส่งข้อมูล (Bandwidth) สูงกว่าและเพียงพอ อีกทั้งยังสามารถรองรับการเพิ่มกล้องวงจรปิดแบบไอพี ชุดควบคุมการเปิดปิด และอุปกรณ์เซนเซอร์ต่าง ๆ ได้ในอนาคต

ประเด็นสุดท้ายเรื่องความปลอดภัยของข้อมูลในหน่วยงาน เนื่องจากต้องมีการสตรีมข้อมูลจากกล้องวงจรปิดอยู่ตลอดเวลาไปยังระบบประมวลผลภาพบนคลาวด์ของผู้ให้บริการภายนอก ทำให้เกิดความกังวลและสงสัยต่อข้อมูลส่วนตัวและความลับของหน่วยงานที่อาจจะหลุดออกไป



รูปที่ 3 แพลตฟอร์มของระบบ Smart Building

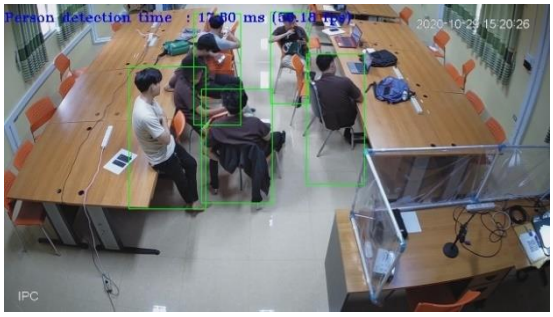
คอมพิวเตอร์เสมือนได้ถูกติดตั้งบนฮาร์ดแวร์ของเครื่อง Nutanix บน Hypervisor HAV ซึ่งเป็นเครื่องคลัสเตอร์ที่มีการทำงานแบบ Hyper Converged Infrastructure (HCI) และได้ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Ubuntu Linux แต่ละเครื่องได้ติดตั้งการ์ดเน็ตเวิร์กแบบบริดจ์ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายภายในมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลได้ไม่ต่ำกว่า 10 Gbps และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์กล้องต่าง ๆ ด้วยความเร็ว 1 Gbps ส่วนรายละเอียดสภาพแวดล้อมทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ติดตั้ง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องคอมพิวเตอร์เสมือนและซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งอยู่บนระบบคลาวด์

ประเภทการประมวลผล	ซอฟต์แวร์ที่ติดตั้ง	แกนกลาง หน่วยความจำ อาร์ดดิสก์
ระบบประมวลผลกล้องวงจรปิดด้วย AI	Python OpenVINO	8 Core 16 GB 100GB
ระบบฐานข้อมูลกลาง	MySQL PHP Python	4 Core 8 GB 100 GB
ระบบสั่งงานควบคุมผ่านโปรโตคอล MQTT	Mosquitto	4 Core 8 GB 100 GB
ระบบแสดงผลข้อมูลสถิติด้วย Dashboard	Grafana	4 Core 2 GB 100 GB

2.2.2 ระบบประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดด้วย AI

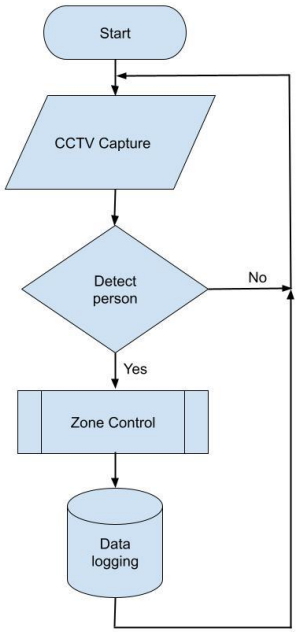
ระบบนี้เป็นส่วนสำคัญที่สุดของการทำงานบนแพลตฟอร์ม เพราะระบบในส่วนอื่นจะถูกสั่งเปิดหรือปิดการทำงานได้ก็ต่อเมื่อต้องได้รับการยืนยันว่ามีบุคคลอยู่ในพื้นที่นั้นจริง วิธีการประมวลผลภาพร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ใช้มาเพื่อแก้ปัญหาของเซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวแบบ PIR (Motion Sensor Detector) ที่ไม่สามารถตรวจจับบุคคลถ้าไม่มีการขยับร่างกาย และในกรณีที่อุณหภูมิของร่างกายต่ำลงก็ไม่สามารถตรวจจับความร้อนจากร่างกายได้เช่นกัน สำหรับเซ็นเซอร์แบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic Sensor) ก็ยากต่อการกำหนดระยะตรวจสอบและการกำหนดพื้นที่



รูปที่ 4 ตัวอย่างรูปภาพที่ถูก Capture จากกล้องวงจรปิด

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งส่วนพื้นที่ภายในอาคารออกเป็น 7 โซน และแต่ละโซนได้ติดตั้งกล้องวงจรปิดไว้จุดละ 1 ตัว ตัวอย่างภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิด แสดงดังรูปที่ 4 ในการติดตั้งวงจรปิดต้องจัดวางมุมกล้องในแต่ละโซนไม่ให้ทับซ้อนกัน เพราะจะเกิดความผิดพลาดในการสั่งงานลำดับต่อไป โดยภาพที่สตรีมจากกล้องวงจรปิดมีความละเอียดภาพที่ 1920 x 1080 pixel ที่อัตรา 24 เฟรมต่อวินาที แต่ในการประมวลผลจะทำการปรับขนาดภาพเป็น 1280 x 720 pixel และใช้ชุดเครื่องมือ OpenVINO เพื่อตรวจนับบุคคลที่อยู่ในภาพด้วย

การทำงานของระบบนี้จะทำการจับภาพ (Capture) จากกล้องวงจรปิดทุกตัวผ่านโปรโตคอล RTSP มาประมวลผลบนระบบคลาวด์ โดยการประมวลผลภาพนี้ได้ใช้ (Deep Learning) ที่มีการเรียนรู้จากโมเดลสำเร็จรูปในการจดจำลักษณะรูปร่างของตัวบุคคลด้วย (R-CNN) เมื่อระบบรับภาพจากกล้องวงจรปิดเข้ามาและทำการประมวลผลตรวจจับและนับจำนวนบุคคลที่อยู่ในภาพ (Object Detection) เพื่อส่งต่อไปยังระบบควบคุมการทำงานแสงสว่าง ระบบควบคุมเครื่องปรับอากาศ และระบบแจ้งเตือนความปลอดภัย นอกจากนั้นจะเก็บสถิติบุคคลตามช่วงเวลาไว้ในระบบฐานข้อมูลกลางและสามารถนำไปแสดงผลยังระบบแสดงข้อมูลสถิติด้วย Dashboard ต่อไป แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผังงานของระบบประมวลผลกล้องวงจรปิดด้วย AI

การทำงานในระบบนี้ยังเกี่ยวข้องกับระบบเฝ้าระวังรักษาความปลอดภัยในอาคารด้วย ถ้าระบบสามารถตรวจจับเจอบุคคลนอกช่วงเวลาที่กำหนดของหน่วยงาน ระบบจะแจ้งเตือนและส่งภาพที่ตรวจจับได้ไปยังระบบ LINE Notify ที่ได้จัดทำไว้สำหรับกลุ่มที่ดูแลรักษาความปลอดภัยของหน่วยงาน ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7

รูปที่ 6 ภาพการตรวจจับบุคคลนอกเวลา

รูปที่ 7 ภาพแจ้งเตือนบนระบบ LINE Notify การตรวจจับบุคคลนอกเวลา

นอกจากนี้เมื่อระบบมีการแจ้งเตือนแล้ว ยังมีการจัดเก็บสถิติจำนวนบุคคลที่สามารถตรวจพบและบันทึกเป็นสถิติของอาคารแต่ละชั้นโดยแยกข้อมูลจาก Token ที่ได้ลงทะเบียนไว้ และแยกเป็นโซนต่าง ๆ ไว้ในระบบฐานข้อมูล ดังรูปที่ 8

token	zone1	zone2	zone3	zone4	zone5	zone6	zone7	stamp
zp20200002	0	0	0	0	0	0	0	2020-10-29 10:55:01
zp20200003	0	1	2	0	0	0	0	2020-10-29 10:55:01
zp20200005	0	0	0	1	2	0	1	2020-10-29 10:55:01
zp20200001	0	1	1	3	1	3	1	2020-10-29 11:00:01
zp20200002	0	0	0	0	0	0	0	2020-10-29 11:00:01
zp20200003	1	1	2	0	0	0	0	2020-10-29 11:00:01
zp20200005	0	0	0	0	2	0	0	2020-10-29 11:00:01
zp20200001	1	1	0	3	1	4	0	2020-10-29 11:05:01
zp20200002	0	0	0	0	0	0	0	2020-10-29 11:05:01
zp20200003	1	0	2	0	0	0	0	2020-10-29 11:05:01
zp20200005	0	0	0	1	1	0	1	2020-10-29 11:05:01
zp20200001	0	1	1	3	1	3	2	2020-10-29 11:10:01
zp20200002	0	0	0	0	0	0	0	2020-10-29 11:10:01
zp20200003	1	1	2	0	0	0	0	2020-10-29 11:10:01
zp20200005	0	0	0	0	2	0	0	2020-10-29 11:10:01
zp20200001	0	1	1	3	1	5	3	2020-10-29 11:15:01
zp20200002	0	0	0	0	0	0	0	2020-10-29 11:15:01
zp20200003	1	1	2	0	0	0	0	2020-10-29 11:15:01
zp20200005	0	0	0	0	2	0	0	2020-10-29 11:15:01
zp20200001	1	1	1	3	1	5	2	2020-10-29 11:20:01
zp20200002	0	0	0	0	0	0	0	2020-10-29 11:20:01
zp20200003	1	1	2	0	0	0	0	2020-10-29 11:20:01
zp20200005	1	0	1	1	1	0	1	2020-10-29 11:20:01
zp20200001	1	2	1	4	1	4	2	2020-10-29 11:25:01
zp20200002	0	0	0	0	0	0	0	2020-10-29 11:25:01

รูปที่ 8 ตารางการจัดเก็บสถิติข้อมูลจำนวนบุคคลที่ตรวจพบในแต่ละอาคาร ชั้น และโซนต่าง ๆ

เมื่อบันทึกสถิติจำนวนบุคคลที่ตรวจพบแล้วหากเป็นช่วงเวลาการทำงานของหน่วยงานระบบจะส่งข้อมูลไปยังระบบควบคุมการทำงานของระบบแสงสว่างและระบบควบคุมเครื่องปรับอากาศโดยมีหลักการทำงานดังนี้

2.2.3 การสั่งงานระบบแสงสว่าง

การทำงานของระบบนี้มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน การปิดเปิดแสงสว่างจะถูกสั่งงานจากระบบฐานข้อมูลกลางโดยตรง โดยมีซอฟต์แวร์ที่ทำงานเป็น Engine Trigger ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อมูลในตารางที่เก็บจำนวนคนในแต่ละโซน ซึ่งในระบบฐานข้อมูลกลางโปรแกรมสามารถกำหนดได้ว่าจะให้โซนใดอยู่เป็นกลุ่มเดียวกัน ห้องเดียวกัน หรือชั้นเดียวกัน การกำหนดแบบนี้เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมและสั่งงาน

ในการสั่งงานเปิดระบบแสงสว่าง สามารถแยกการเปิดระบบแสงสว่างได้สองแบบ ในกรณีแรกถ้าระบบแสงสว่างภายในโซนหรือในกลุ่มนั้นปิดอยู่ทั้งหมดแล้วโปรแกรมตรวจจับเจอบุคคลเข้ามาในโซน ระบบแสงสว่างจะทำการสั่งงานเปิดไฟที่อยู่ในห้องหรือในกลุ่มเดียวกันทั้งหมด ในกรณีที่สองถ้าภายให้ห้องนั้นมีการเปิดระบบแสงสว่างในบางโซนอยู่ก่อนแล้ว ระบบก็จะสั่งงานเปิดระบบแสงสว่างเฉพาะตรงโซนที่ตรวจพบบุคคล โดยจะไม่เปิดระบบแสงสว่างในโซนอื่น

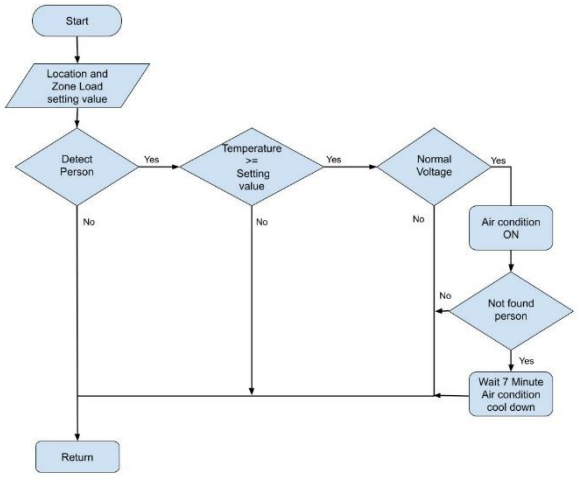
การสั่งงานปิดระบบส่องสว่างโปรแกรมจะทำการตรวจนับบุคคลแยกแต่ละโซน เมื่อไม่พบบุคคลที่อยู่ในโซนนั้นระบบจะยังไม่สั่งปิดระบบแสงสว่างในทันที โดยจะหน่วงเวลาไปอย่างน้อย 3 นาทีก่อนที่จะสั่งปิดระบบแสงสว่างเฉพาะในโซนนั้น แต่ถ้าในระหว่างรอเวลาสั่งปิดแล้วตรวจพบว่ามีบุคคลอยู่ภายในโซน ระบบก็จะยกเลิกการสั่งปิดและเริ่มขั้นตอนการนับบุคคลภายในโซนใหม่อีกครั้ง วิธีการนี้ช่วยให้ระบบส่องสว่างทำงานเป็นมิตรกับผู้ใช้ภายในอาคารได้ดีขึ้น เพราะในบางกรณีบุคคลมีการเคลื่อนที่เดินไปมาระหว่างโซนระบบควบคุมแสงสว่างจะลดจำนวนการเปิดปิดที่มีความถี่มากจนเกินไป

ในการควบคุมการเปิดปิดระบบแสงสว่างโปรแกรมที่อยู่ในระบบฐานข้อมูลกลางจะสื่อสารกับระบบสั่งงานควบคุมผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยังชุดบอร์ด NodeMCU รุ่น WeMos D1 Mini ที่ได้ต่ออินเตอร์เฟสกับชุดโซลิดสเตตรีเลย์ที่ใช้ในการควบคุมการเปิดปิดระบบแสงสว่างในแต่ละโซน

แต่ในบางกรณีที่โปรแกรมระบบประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดด้วย AI มีความผิดพลาดและตรวจจับวัตถุอื่น ๆ เป็นบุคคลก็จะทำให้ระบบสั่งเปิดระบบแสงสว่างในบางครั้ง

2.2.4 การสั่งงานระบบเครื่องปรับอากาศ

ในการสั่งงานควบคุมเครื่องปรับอากาศนั้นระบบจะทำการวิเคราะห์ตรวจสอบเงื่อนไขตามผังงานในรูปที่ 9



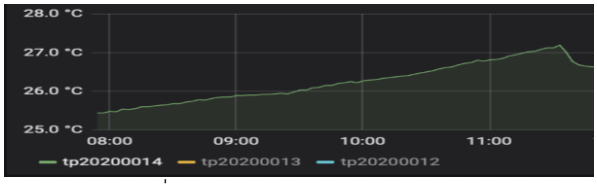
รูปที่ 9 ผังงานการทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศ

จากผังงาน ระบบการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการตรวจสอบค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการกำหนดการเปิดปิดของระบบเครื่องปรับอากาศ ซึ่งเก็บไว้ในฐานข้อมูลกลาง โดยค่าอุณหภูมินี้จะเป็นตัวกำหนดให้ระบบเครื่องปรับอากาศจะเริ่มต้นทำงานและหยุดการทำงานที่อุณหภูมิเท่าใด ซึ่งในบทความวิจัยนี้ได้กำหนดไว้ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส โดยก่อนที่จะมีการสั่งงานเปิดปิดเครื่องปรับอากาศ จะต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขอื่นประกอบไปด้วยเช่น จำนวนบุคคลและอุณหภูมิในแต่ละโซน รวมทั้งระดับแรงดันไฟฟ้าปัจจุบัน

โดยมีหลักการทำงานเมื่อระบบตรวจจับพบเจอบุคคลเข้ามาในพื้นที่ ระบบจะทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในบริเวณนั้นกับค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่กำหนดไว้ในฐานข้อมูล ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนดและระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ ระบบจะทำการเปิดระบบเครื่องปรับอากาศ แต่ถ้าระบบตรวจจับไม่พบบุคคลใช้งานในบริเวณนั้น ระบบควบคุมเครื่องปรับอากาศจะสั่งปิดการทำงานแบบ Cool Down โดยรอเวลาการทำงานของของตัวคอมเพรสเซอร์แอร์ต่อไปอีก 7 นาที ซึ่งวิธีการนี้เป็นการยืดอายุการใช้งานของคอมเพรสเซอร์แอร์และลดการสูญเสียในการซ่อมบำรุงลงได้

รูปที่ 10 กราฟจำนวนบุคคลโซน 5

รูปที่ 11 กราฟการทำงานของแอร์โซน 5



รูปที่ 12 กราฟอุณหภูมิภายในโซน 5

จากรูปที่ 10 แสดงการตรวจสอบจำนวนบุคคลที่เข้ามาอยู่ในบริเวณโซน 5 จะเห็นได้ว่าเครื่องปรับอากาศยังคงไม่ทำงานดูได้จากกราฟในรูปที่ 11 เป็นการแสดงการทำงานของเครื่องปรับอากาศจะเห็นได้ว่าตั้งแต่เวลา 8.00 น. จนถึงเวลา 11.30 น. ระบบควบคุมเครื่องปรับอากาศในโซน 5 ยังไม่เปิดการทำงานเนื่องจากค่าอุณหภูมิยังต่ำกว่าของค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่กำหนดไว้ แต่หลังจากนั้นเวลาประมาณ 11.32 น ค่าอุณหภูมิในโซน 5 เกินกว่าค่าที่กำหนดจึงสั่งเปิดระบบเครื่องปรับอากาศ ถ้าสังเกตจากกราฟรูปที่ 12 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิในโซน 5 เริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากระบบเครื่องปรับอากาศเริ่มทำงาน

2.2.5 การสั่งงานระบบประตูเข้าอาคาร

ระบบความคุมประตูเข้าอาคารสามารถตั้งค่าเวลาในการเปิดปิดแบบอัตโนมัติจากซอฟต์แวร์ได้โดยตรง สามารถตั้งค่าในการเปิดปิดในแต่ละวันได้อย่างอิสระ แต่ในบางกรณีที่ต้องการเปิดปิดประตูนอกช่วงเวลาที่กำหนด ก็สามารถสั่งผ่านทางโปรแกรม LINE ได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 13

รูปที่ 13 โปรแกรม LINE ควบคุมการเปิดปิดประตู

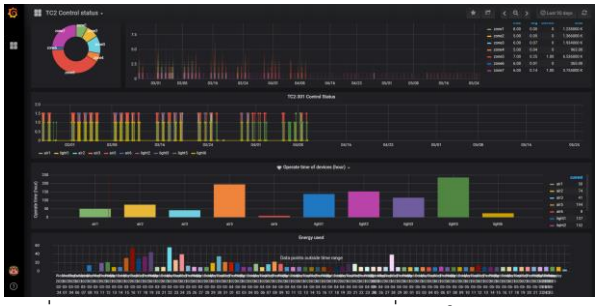
ในกรณีที่ยังมีบุคคลอยู่ภายในอาคาร ระบบจะไม่สามารถสั่งงานปิดประตูเข้าออกอาคารได้เลย โดยจะมีข้อความแจ้งเตือนผ่านทางโปรแกรม LINE ให้กับกลุ่มเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยหรือเจ้าของอาคาร เพื่อส่งเจ้าหน้าที่เข้าไปตรวจสอบป้องกันไม่ให้ใครถูกกักขังภายในอาคาร

2.2.6 ระบบแสดงผลข้อมูลสถิติด้วย Dashboard

ในระบบนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้โอเพ่นซอร์ส Grafana ที่เป็น Dashboard Tools รองรับได้หลากหลายแพลตฟอร์ม และหลายเว็บแอปพลิเคชัน การแสดงภาพเชิงโต้ตอบ มีแผนภูมิกราฟและการแจ้งเตือนสำหรับเว็บ สามารถดึงข้อมูลออกมาได้ในระดับ Realtime และสามารถดึงข้อมูลมาจาก Data Source ที่เป็นที่นิยมได้อย่างหลากหลาย แสดงดังรูปที่ 14 และ 15

รูปที่ 14 Dashboard แสดงสถิติค่าการใช้พลังงาน

หลักการทำงานของระบบนี้โปรแกรมจะทำการดึงข้อมูลในระบบฐานข้อมูลกลางเพื่อมาแสดงผลในหน้าเว็บ ซึ่งเก็บข้อมูลสถิติของทุกระบบเช่น อัตราการใช้พลังงาน อุณหภูมิ ความชื้น จำนวนคนในแต่ละโซน รูปภาพที่ใช้ในการประมวลผล ข้อมูลการเปิดปิดอุปกรณ์ ซึ่งสามารถกำหนดเงื่อนไขขอดูข้อมูลย้อนหลังได้ทุกช่วงเวลา และสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบหาข้อบกพร่องของระบบอาคารอัจฉริยะในภายหลังได้



รูปที่ 15 Dashboard แสดงประวัติการสั่งงานในระบบต่าง ๆ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ทางผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่า หลังจากที่มีการใช้งานระบบอาคารอัจฉริยะอย่างเต็มรูปแบบแล้วนั้น จะสามารถลดชั่วโมงการใช้พลังงานลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ทางผู้วิจัยทำเก็บค่าหน่วยการใช้พลังงานแต่ละวัน โดยได้ติดตั้งวัตต์มิเตอร์ไว้กับตู้เมนเบรคเกอร์แบบสามเฟสที่สามารถบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานในฐานข้อมูลได้โดยตรงและสามารถเรียกดูย้อนหลังได้ทุกช่วงเวลา

ตารางที่ 2 ผลการทดลองวัดการใช้หน่วยพลังงานแต่ละวัน

วัน	ใช้งานปกติ (หน่วย)	อาคารอัจฉริยะ (หน่วย)	ลดลง (หน่วย)
จันทร์	72	55	17
อังคาร	52	27	25
พุธ	75	49	26
พฤหัสบดี	23	29	-6
ศุกร์	29	15	14
รวม	251	175	76

ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างสัปดาห์ที่มีการใช้งานแบบปกติกับใช้ระบบอาคารอัจฉริยะซึ่งได้ผลตามตารางที่ 2 โดยใช้ระยะเวลาในการทดลองอย่างละหนึ่งสัปดาห์

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าเมื่อมีการใช้งานระบบอาคารอัจฉริยะทำให้ลดค่าการใช้พลังงานลงอย่างมีนัยสำคัญ จากการใช้พลังงานรวม 251 หน่วยต่อสัปดาห์ เหลือเพียง 175 หน่วยต่อสัปดาห์ ลดการใช้พลังงานลงได้ถึง 76 หน่วยต่อสัปดาห์ หรือลดลงร้อยละ 30.27 เปอร์เซ็นต์

สำหรับค่าการใช้พลังงานของวันพฤหัสบดีที่มีค่าแตกต่างจากวันอื่น สาเหตุเนื่องมาจากในสัปดาห์ที่มีการใช้ระบบอาคารอัจฉริยะ มีการใช้งานห้องนอกตารางเวลาการใช้งานประจำวัน ทำให้มีชั่วโมงการใช้งานและการใช้พลังงานที่มากกว่าสัปดาห์ที่ใช้งานระบบปกติ

4. บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแพลตฟอร์มที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมด้านอาคารอัจฉริยะ โดยให้ระบบต่าง ๆทำงานอยู่บนระบบคลาวด์ส่วนตัว เพื่อจำกัดปริมาณข้อมูลที่เข้าออกจากเกตเวย์ของหน่วยงาน แบ่งประเภทงานได้แก่ ระบบประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดด้วย AI ระบบ

ฐานข้อมูลกลาง ระบบสั่งงานควบคุมผ่านโปรโตคอล MQTT และระบบแสดงผลข้อมูลสถิติด้วย Dashboard ที่ทำงานรวมกับอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สั่งควบคุมการเปิดปิดระบบส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ และประตูเข้าออกอาคารแบบอัตโนมัติ อีกทั้งยังมีระบบแจ้งเตือนความปลอดภัย ในกรณีที่ตรวจเจอบุคคลภายนอกช่วงเวลาที่กำหนดผ่านทาง LINE Notify และได้ออกแบบระบบให้รองรับการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์หรือกำหนดโซนใหม่ภายในอาคารได้อย่างสะดวก สำหรับการติดตั้งกล้องวงจรปิดแบบไอพีเชื่อมต่อผ่านสายสัญญาณ UTP CAT6 มีความละเอียดขั้นต่ำที่ 720P และรองรับโปรโตคอล RTSP ส่วนระยะห่างระหว่างกล้องที่เหมาะสมที่สุด 4 เมตร และควรมีการปรับมุมกล้องให้ภาพทับซ้อนกันน้อยที่สุด สรุปผลจากการทดลองพบว่าระบบแพลตฟอร์มอาคารอัจฉริยะสามารถประหยัดการใช้พลังงานของอาคารได้จริง และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี โดยได้รับทุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ในโครงการพัฒนาระบบบริหารจัดการพื้นที่เชิงกายภาพ สำหรับการให้บริการนักศึกษา บุคลากร ของมหาวิทยาลัยผ่านเครือข่ายกล้องวงจรปิดแบบอัจฉริยะ (RMUTL Smart CCTV) และทางผู้วิจัยขอขอบคุณความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดลองจากสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ และหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรม วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ในการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Buyya R, Dastjerdi AV. Internet of things : an overview. In: Buyya R, Dastjerdi AV, editors. Internet of things principles and paradigms. Morgan Kaufmann; 2016. p.3-23.

[2] Gupta A, Johari R. IOT based electrical device surveillance and control system. 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU), Ghaziabad, India, 2019:1-5.

[3] Zhang X, Hu M, Xia J, Wei T, Chen M, Hu S. Efficient federated learning for cloud- based AioT applications. in IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020:1.

[4] Pham HT, Nguyen MA, Sun CC. AIoT solution survey and comparison in machine learning on low- cost microcontroller. 2019 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Taipei, Taiwan, 2019:1-2.

[5] Liu X, Yu XL, Fei T. Research on building data acquisition methods in smart city. 2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), Vientiane, Laos, 2020:144-7.

[6] aws.amazon.com [Internet]. AWS: AWS IoT. Available from: https://aws.amazon.com/th/iot/solutions/ connected-home/ [Accessed 15th March 2021].

[7] U-Aroon P. Design and implementation of data gathering for smart building on IoT platform. Veridian E Journal Science and Technology, 2018; 5(3):53-63.Thai.

[8] Krylovskiy A. Internet of Things gateways meet linux containers: performance evaluation and discussion. 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Milan, Italy, 2015:222-7.

[9] Rajaram K, Susanth G. Emulation of IoT gateway for connecting sensor nodes in heterogenous networks. 2017 International Conference on Computer, Communication and Signal Processing (ICCCSP), Chennai, 2017:1-5.

[10] Malche T, Maheshwary P. Internet of Things (IoT) for building smart home system. 2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), Palladam, India, 2017:65-70.

[11] Emeakaroha VC, Cafferkey N, Healy P, Morrison JP. A cloud-based IoT data gathering and processing platform. 2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud, Rome, Italy, 2015:50-7.

[12] Garg H, Dave M. Securing IoT Devices and Securely Connecting the Dots Using REST API and Middleware. 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU), Ghaziabad, India, 2019:1-6.

[13] Tipauksorn P, Inkong-ngarm A. OpenVINO Public Domain Population Counting Using Image Processing by OpenVINO Toolkit. The Conference of Industrial Engineering Network 2021 (IE Network 2021); 2021 May 5-7; Rajamangala University of Technology Srivijaya. Songkhla: 2021. p.378-384.

[14] Kale S. Cloud computing – types of cloud. Esdsblog: Available from: https://www.esds.co.in/blog/cloud-computing-types-cloud/#sthash.iEOFhBel.dpbs [Accessed 24 May 2021].

[15] Openvino Documentation. Documentation: Converting and Preparing Models. Model Optimizer Developer Guide. Available from: https://docs.openvinotoolkit.org/latest/openvino_docs_MO_DG_Deep_Learning_Model_Optimizer_DevGuide.html [Accessed 24 May 2021].

[16] Python Point. MQTT Beginners Guide. Available from: https://medium.com/python-point/mqtt-basics-with-python-examples-7c758e605d4 [Accessed 24 May 2021].

RMUTL Engineering Journal

Faculty of Engineering

Rajamangala University of technology Lanna

วารสารวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา