



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

RMUTL Engineering Journal

RMUTL. Eng. J.

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2
กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

ISSN 2465-4248

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี RMUTL Engineering Journal

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ศीलศิริ	สง่าจิต	ผู้ปฏิบัติหน้าที่ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์	อรุณานนท์	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจการนักศึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	หาญวงษา	รองอธิการบดีฝ่ายกิจการพิเศษ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา	รองอธิการบดีฝ่ายนโยบายและพัฒนาระบบ
นางสาวสุรีย์พร	ใหญ่สง่า	รองอธิการบดีฝ่ายบริหารและสวัสดิการ
ดร.สุรพล	ใจวงศ์ษา	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกรียงไกร	ธารพรศรี	ผู้ช่วยอธิการบดี
ดร.ปิยะมาส	ตันท์เจริญรัตน์	ผู้ช่วยอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พัชรพาดา	โชติเสถียรกุล	คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ถาวร	ผื่นชมภู	คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์
ดร.กิจจา	ไชยหนู	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ยรรยง	เฉลิมแสน	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ	วงษ์พานิช	ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ	โสทธิกุล	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกษ	โตไพบูลย์	ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ
นายอนันท์	ทับเกิด	ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
ดร.ภาสวรรณ	วัชรดำรงศักดิ์	รักษาราชการแทน ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
นายภฤศพงศ์	เพชรบุล	ผู้อำนวยการสถาบันถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน

กองบรรณาธิการ

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์มน	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ดนัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ	รุจิณากุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Associate Professor Mark	Adom-Asamoah	Kwame Nkrumah University of Science & Technology
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วตาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิสันย์	วรรณจรรย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ขจรศักดิ์	โสภณารีย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห์	มหาวิทยาลัยมหิดล



รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชินแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ	บุตรดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสุวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	เย็นยงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์	อินผาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลินประทุม	ปัญญาปิง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ	อินต๊ะวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	กาฬสินธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลทรัพย์	ผ่องศรีสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.พองจันทร์	จิราลิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.บุปผเวช	พันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.ภาณุ	อุทัยศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นายณัฐชาสิทธิ์	ชูเกียรติขจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นายปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นายวิชาญ	จันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวปริศนา	กุลนลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
Mr. Russell James Pierce		มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
Miss Kalil Zender		มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ฝ่ายประสานงานและเผยแพร่

นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวพิชญา	ศรีพรหมมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นายครรชิต	เงินคำคง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาววัลลภา	วงศ์ชายะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

จดหมายจากบรรณาธิการ

สวัสดีครับนิสิต นักศึกษา คณาจารย์ และนักวิจัยที่มีความสนใจในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์หรือ RMUTL Engineering Journal วารสารฉบับนี้เป็นวารสารฉบับปีที่ 3 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2561 ซึ่งได้ถูกจัดทำขึ้นด้วยกระบวนการที่มีคุณภาพตามมาตรฐานสากล โดยยังคงมีวัตถุประสงค์เช่นเดิม คือ เพื่อเป็นการแบ่งปันพื้นที่สำหรับการเผยแพร่ผลงานวิจัยให้กับประชาคมวิจัยของประเทศไทย ทั้งที่เป็นบทความวิจัยและบทความปริทัศน์ที่ได้นำเสนอการสร้างสรรค์ความรู้ใหม่ การสร้างสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมจากนักวิจัยในสาขาต่างๆ ของกลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ฉบับนี้ ประกอบด้วยบทความวิจัย จำนวน 7 บทความ ซึ่งประกอบด้วยบทความในสาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ จำนวน 1 บทความ ซึ่งได้กล่าวถึง การแยกแร่เหล็กออกจากถ้ำลอยและถ้ำกันเตาโดยใช้แม่เหล็กนีโอไดเมียม สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 1 บทความ ซึ่งได้กล่าวถึง การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดลูกบอลพลาสติกเด็กเล่น และในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร จำนวน 5 บทความ ซึ่งได้กล่าวถึง การพัฒนาแว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับนักเรียนผู้มีความบกพร่องทางการมองเห็น การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแถบความถี่กว้างสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินภายในอาคาร การออกแบบบราโดมแบนด์กว้างสำหรับสายอากาศอาร์เรย์สำหรับการแพร่ภาพโทรทัศน์ระบบดิจิทัล การประเมินเทคนิคสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีเพื่อการวินิจฉัยกระดูกข้อมือ และการจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมในระบบจำหน่ายปฏิกิริยาโดยใช้รูปแบบโพลี ซึ่งในรายละเอียดและเนื้อหาของแต่ละบทความนั้นถือได้ว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ที่สนใจที่จะนำไปต่อยอด หรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อให้กับสังคมและชุมชนหรือในภาคอุตสาหกรรมของประเทศ

ผมในฐานะตัวแทนของกองบรรณาธิการวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จึงขออนุญาตถือโอกาสนี้เพื่อเป็นการแสดงความขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อนักวิจัยที่สนใจส่งบทความเพื่อการตีพิมพ์ กรรมการผู้ประเมินบทความ กองบรรณาธิการ ผู้บริหารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และผู้สนับสนุนทุกๆ ท่าน ที่มีส่วนร่วมในการควบคุมคุณภาพและพัฒนาวารสารฉบับนี้ให้สามารถก้าวเดินเข้ามาสู่ปีที่ 3 ฉบับที่ 6 ซึ่งในปีนี้เป็นปีที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะเนื่องจากอยู่ในช่วงของการยกระดับคุณภาพของวารสารเพื่อเข้ารับการประเมินคุณภาพจากศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย ผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จะเป็นประโยชน์และมีโอกาสรับใช้ประชาคมวิจัยของประเทศอย่างต่อเนื่องและสืบไป



รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน
บรรณาธิการ



สารบัญ

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2561

บทความวิจัย	
การแยกแร่เหล็กออกจากถ้ำลอยและถ้ำกันเตาโดยใช้แม่เหล็กนีโอไดเมียม	1
กฤษณะ แปงหลวง ภูมิรินทร์ เพชรวงษ์ พองจันทร์ จิราลิต วิริยะ ทองสุก และศิวโรจน์ ศิริลักษณ์	
การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดลูกบอลพลาสติกเด็กเล่น	8
กรวัฒน์ วุฒิกิจ สุรสิทธิ์ เทียงจันทา และศรายุทธ ก่ามะโน	
การพัฒนาแว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับนักเรียนผู้มีความบกพร่องทางการมองเห็น	15
ยุพดี หัตถสิน ญัฐวัฒน์ พยาราชภูร์ ชาญณรงค์ ธรรมเสนา และเขมะชาติ วิภาตะวนิช	
การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแถบความถี่กว้างสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินภายในอาคาร	26
ศุภกิต แก้วดวงตา นฤตม บางแก้ว ระพี วรรณเลิศ และชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์	
การออกแบบบราโดมแบนด์กว้างสำหรับสายอากาศอาร์เรย์สำหรับการแพร่ภาพโทรทัศน์ระบบดิจิทัล	32
ลธิชัย เต๋นตรี และบัญชา เหลือแดง	
การประเมินเทคนิคสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีเพื่อการวินิจฉัยกระดูกยางค์	38
ธีรวุฒิ โรจนอัมพวัน พรชัย พฤกษ์ภัทรานนท์ สวัสดิ์ ดันตานุช นที อินา และจงวัฒน์ ชีวกุล	
การจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมในระบบจำหน่ายปฐมภูมิโดยใช้รูปแบบโหลด	46
ณัฐพล ชูสกุล พงษ์ศักดิ์ ทามแก้ว กฤติเดช บัวใหญ่ และกานต์ เกิดชื่น	

การแยกแร่เหล็กออกจากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาโดยใช้แม่เหล็กนีโอไดเมียม REMOVAL OF IRON IMPURITIES FROM FLY AND BOTTOM ASH BY NEODYMIUM MAGNET

นายกฤษณะ แปงหลวง¹ นายภูมินทร์ เพชรวงษ์¹ นางสาวฟองจันทร์ จิราสิต² นายวิริยะ ทองสุก¹
และนายศิวัธน์ ศิริลักษณ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Mr. Kritshna Pangluang¹, Mr. Poomin Petwong¹, Miss Fongjan Jirasit², Mr. Viriyah Thongsook¹
and Mr. Siwarote Siriluck^{1*}

¹Mining Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
128 Huaykaew, Muang, Chiangmai, 50300, Thailand

²Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
128 Huaykaew, Muang, Chiangmai, 50300, Thailand

*ผู้รับผิดชอบบทความ: siwarote@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444 ต่อ 1236

บทคัดย่อ

เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจากการวิเคราะห์โดย XRF พบว่ามี %Fe ประมาณ 10% การแยกมลทินเหล็กออกจากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาโดยใช้แม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียมในกระบวนการแบบเปียก พบว่า ลดมลทินเหล็กในตัวอย่างเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเหลือ 6.02% Fe ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก 3573 เกาส์ และ 5.23% Fe ที่ความเข้มข้นแม่เหล็ก 3705 เกาส์ ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การเก็บกู้เหล็กจากตัวอย่างพบว่า เก็บได้ 90% และ 79% ในตัวอย่างเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา ตามลำดับ

คำสำคัญ เถ้าถ่านหิน เถ้าลอย เถ้าก้นเตา แร่เหล็ก แม่เหล็ก

Abstract

In this research, fly and bottom ash samples from Mae Moh power plant, Lampang, Thailand were reported by XRF. The %Fe element in samples was nearly 10%. The neodymium permanent magnet was used to remove iron impurities in wet process. The results showed reduction in fly and bottom ash to 6.02%Fe at magnetic flux density (B) = 3573 G and 5.23%Fe at B = 3705 G, respectively. The maximum %Fe recoveries were 90% and 79% in fly ash and bottom ash, respectively.

Keywords: Coal ash, Fly ash, Bottom ash, Ferrous, Magnet

1. บทนำและความเป็นมาของปัญหา

ส่วนของเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ มักจะถูกนำไปฝังกลบ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม [1] อีกทั้งการฝังกลบก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น [2]

ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ปริมาณเหล็กในเถ้าลอยและเถ้าก้นเตามีสัดส่วนสูงขึ้นในแหล่งที่ขุดขึ้นมาใช้ในปัจจุบัน ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ที่นำไปเป็นส่วนผสม ทำให้เกิดมีสีแดงของสนิมเหล็กเมื่อผ่านกระบวนการออกซิไดซ์จากธรรมชาติ

การกำจัดแร่เหล็กออกจากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจะเป็นการช่วยแก้ปัญหาข้างต้น เพราะจะทำให้ เถ้าลอยและเถ้าก้นเตามีความต้องการในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ต่อไป และคุณภาพของวัสดุผสมปูนซีเมนต์จะไม่มีสีแดง ซึ่งเป็นสิ่งพึงประสงค์ในงาน อีกทั้งเมื่อปริมาณของมลทินเหล็กลดลงจะทำให้ สัดส่วนของซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ และอลูมินาเพิ่มขึ้นในตัวอย่างอีกด้วย [3]

กระบวนการแยกแร่ด้วยแม่เหล็กถาวรชนิดนีโอไดเมียมในขนาดห้องปฏิบัติการ จึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพ

ของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา เพื่อให้ได้เถ้าที่มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้สมทำอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ได้

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เหล็ก (Iron)

เหล็กมีความสำคัญมากในการใช้งานในปัจจุบันที่หลากหลาย แต่ทว่าการเกิดสนิมเหล็ก(เหล็กออกไซด์)ก็สามารถเกิดได้เองตามธรรมชาติ เมื่อเหล็กรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศขึ้น คุณสมบัติของเหล็กที่พบ คือ มีลักษณะสมบัติดูดแม่เหล็กอีกด้วย [4]

2.2 แร่เหล็กแมกนีไทต์ (Magnetite)

รูปผลึกแบบไอโซเมตริก แบบออกตะฮีดรอนเหมือนสปิเนล ปกติเป็นเม็ดเกาะแน่นเนื้อละเอียด หรือหยาบสีดำแบบเหล็ก สีมงละเอียดสีดำ วาวแบบโลหะ เนื้อเปราะ ร่วน รอยแตกไม่เรียบ ความแข็ง 6 ถ.พ. 5.18 แม่เหล็กดูดติดดีมาก และตัวแร่เป็นแม่เหล็กด้วย มี Fe=72.4% และ O=27.6% อาจมีแมกนีเซียมและแมงกานีสปนเล็กน้อยมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก สามารถทดสอบกับแม่เหล็กได้ทันที [4]

2.3 เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) (รูปที่ 1) เกิดจากการเผาถ่านเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหิน จะถูกพัดออกมาตามลมร้อน เพื่อออกไปสู่ปล่องควันจากนั้นตัวดักจับ (Electrostatic precipitator) จะทำการรวบรวมเถ้าถ่านหิน เพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในกรณีที่เถ้าถ่านหินหลอมเหลว และบางส่วนจับกัน เป็นก้อน หรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมาก และตกลงสู่ก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา หรือเถ้าหนัก (Bottom ash) (รูปที่ 2) การผลิตกระแสไฟฟ้า ที่โรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหิน ประกอบด้วยเถ้าถ่านหินประมาณ 20% [5]



รูปที่ 1 เถ้าลอย (Fly Ash)



รูปที่ 2 เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

2.4 คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน

ถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ ที่สมบูรณ์กว่า จึงมีทรงกลมและผิวเรียบ เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูเล็กๆ ที่ผิว ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ อยู่ที่ 2.0-2.2

2.5 การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X ray Fluorescence Spectroscopy)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ เมื่อได้รับพลังงานเข้าไป [6]

เนื่องจากการทดลองในงานนี้เป็นตัวอย่างของแข็ง และมีขนาดของวัสดุละเอียดเล็กกว่า 250 ไมครอน การเตรียมตัวอย่าง จะทำการ นำแร่ที่ผ่านกระบวนการแยกแม่เหล็กแบบเปียก แล้วนำมาทำการอบให้แห้งด้วยเตาอบไฟฟ้าที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งตัวอย่างด้วยวิธี Riffling sampling ประมาณ 10 กรัม แล้วนำมาบรรจุในภาชนะทรงกระบอกที่ก้นเป็นฟิล์มใสเฉพาะ ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นที่ยิงรังสีเอกซ์ โดยพื้นที่ยังมีบริเวณไม่มาก เมื่อบรรจุตัวอย่างลงไปแล้วจะทำการกดพื้นที่จากอีกด้านด้วยกระบอกอัดพื้นเรียบซึ่งจะทำให้ตัวอย่างแบนราบสมบูรณ์แบบ จากนั้นใช้เครื่อง XRF ที่ได้ทำเทียบมาตรฐานแล้วดำเนินการ ตรวจสอบ ปริมาณธาตุในตัวอย่าง

2.6 แม่เหล็กแรงสูงนีโอไดเมียม

แม่เหล็กนีโอไดเมียมรู้จักกันในชื่อ Rare earth magnet เกิดขึ้นจากธาตุนีโอไดเมียม (Neodymium) ซึ่งเป็นธาตุที่หายาก ธาตุนี้พบได้ในสินแร่ ตรีโกฐ ฟอสเฟต ซึ่งสกัดออกมาแล้ว ได้ปริมาณของธาตุนีโอไดเมียมไม่มากนัก นีโอไดเมียมจึงจัดเป็นธาตุหายาก ด้านวิศวกรรม ธาตุนีโอไดเมียมถูกนำมาผลิตแม่เหล็กแรงสูงแบบถาวร (รูปที่ 3) [7]



รูปที่ 3 แม่เหล็กนีโอไดเมียม (Neodymium)

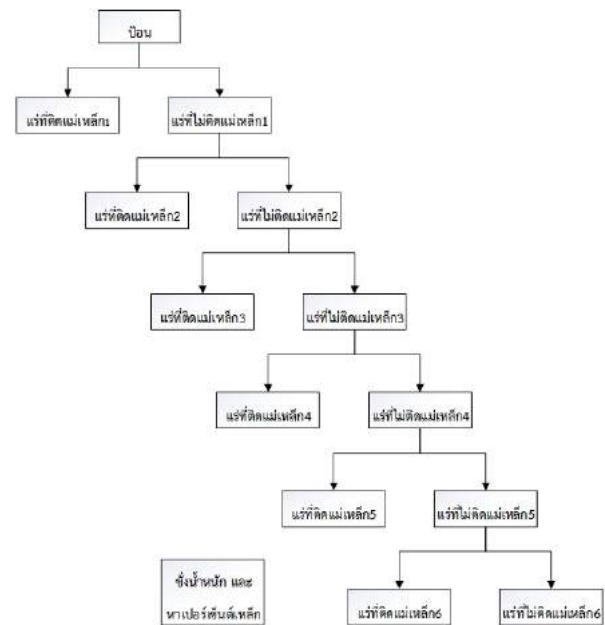
3. วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการแต่งเถาลอย และเถากันเตา โดยใช้แม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียม (Neodymium) ในขนาดห้องปฏิบัติการนี้ใช้ เถากันเตาและเถาลอย ที่มีค่าอยู่ช่วงขนาดคือ -250 Mesh +Pan[8] โดยใช้ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรจำนวน 6 ค่า ในหน่วย เกาส์ (Gauss) คือ 654.35, 1108.08, 1530.07, 2444.35, 3598.70 และ 3705.6 เกาส์ ตามลำดับ

3.1 ขั้นตอนการแต่งแร่เหล็กออกจากตัวอย่าง

นำตัวอย่างมาทำการชักตัวอย่างด้วย Riffle sampling technique [9] และนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของธาตุด้วย X-ray fluorescence (XRF) จากนั้นทำการเคลือบแม่เหล็กถาวรด้วยวัสดุพลาสติกประเภท Polyethylene ซึ่งความหนาของชั้นมากจะทำให้ตัวอย่างมีระยะห่าง (gap) มากจากพื้นผิวของแม่เหล็ก จากนั้น ทำการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กแต่ละอัน ให้ได้ 6 ระดับความเข้มข้นแม่เหล็ก โดยค่าต่ำสุดถึงสูงสุดที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 654.35 - 3705.6 เกาส์

นำเถาลอยลิกไนต์ ประมาณ 250 กรัม มาผสมน้ำประมาณ 1 ลิตร จากนั้นใช้เครื่องกวน ให้เข้ากันระหว่างน้ำกับเถาลอยลิกไนต์ และนำแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่ต่ำที่สุดมาดูดเอาเหล็กออก จนกระทั่งเหล็กในตัวอย่างไม่ติดแม่เหล็ก จากนั้นจึงเปลี่ยนเอาแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กมากขึ้นมาดูดแม่เหล็กออก ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ ครบทั้ง 6 ระดับความเข้มข้น จนกระทั่งเถาลอยตัวอย่างถูกแม่เหล็กความเข้มข้นสูง ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กที่ 3705.6 เกาส์ จนมลทินเหล็กไม่ติดแม่เหล็ก จึงหยุดทำการทดลอง ดังแสดงในแผนผังการทดลองดังรูปที่ 4

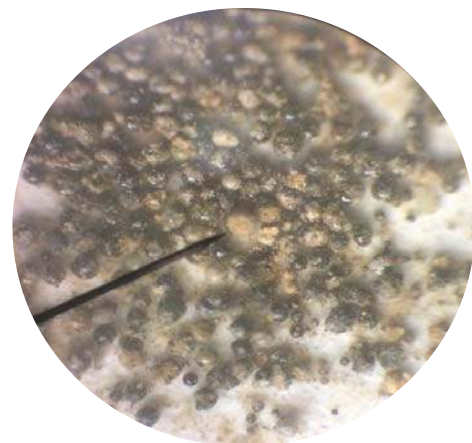


รูปที่ 4 แผนผังแสดงการแยกแร่เหล็กออกจากตัวอย่างเถาลอย ด้วยแม่เหล็กถาวร

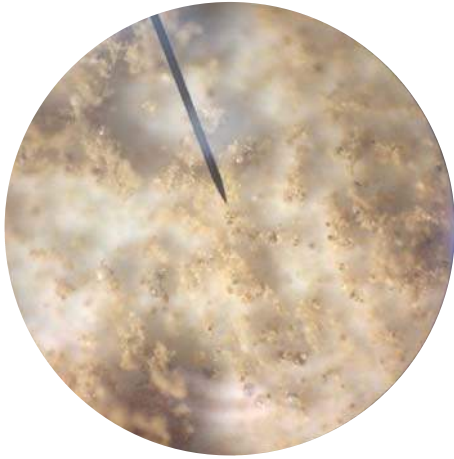
จากนั้นทำความสะอาดภาชนะและเครื่องมือ จากนั้นเปลี่ยนตัวอย่างเถาลอยเป็นเถากันเตา แล้วทำการทดลองในรูปแบบเดิมซ้ำ

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ติดแม่เหล็กและตัวอย่างที่ไม่ติดแม่เหล็ก

นำแร่ส่วนที่ติดแม่เหล็ก และส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก ไปกรองโดยใช้ กระดาษกรองร่วมกับ เครื่องดูดสุญญากาศ แล้วนำไปอบภายในตู้อบแร่ที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำแร่แห้งแล้วไปชั่งน้ำหนัก และทำการบันทึกผลตัวอย่างที่ไม่ติดแม่เหล็ก ส่งวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 8



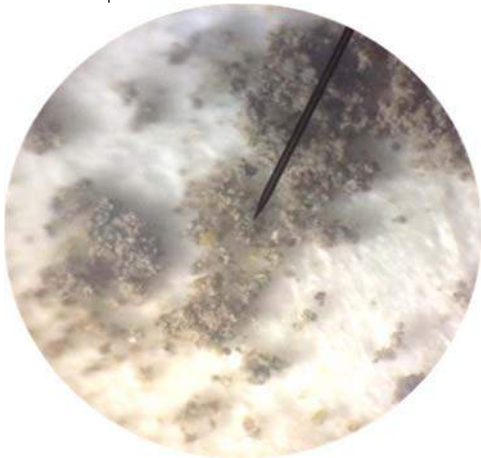
รูปที่ 5 เถาลอยก่อนการทำการทดลอง ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ 6 เถ้าลอยที่แยกได้ หลังจากการใช้แม่เหล็กนีโอไดเมียม ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ 3705.6 เกาส์ในการดูด ที่กำลังขยาย 40X



รูปที่ 7 เถ้าก้นเตา ก่อนการทำการทดลอง ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ 8 เถ้าก้นเตาที่แยกได้ หลังการใช้แม่เหล็กนีโอไดเมียม ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ 3705.6 เกาส์ ในการดูดที่ กำลังขยาย 40X

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุของเถ้าลอย และเถ้าก้นเตา ก่อนการแต่งแร่

ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง XRF ของตัวอย่าง องค์ประกอบของเถ้าลอย และเถ้าก้นเตา ซึ่งจะใช้เพื่อเป็น แร่ ป้อนในการแต่งแร่ด้วยวิธีการแต่งโดยใช้แม่เหล็กถาวร ดังแสดงในตารางที่ 1 จากข้อมูลพบว่า เป็นเถ้าชนิดที่มีอุณหภูมิสูง แต่มีแคลเซียมสูง และมีเหล็กในปริมาณใกล้เคียงเท่ากับ 10%

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ธาตุก่อนทำการทดลองของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

ธาตุ	Fly ash, %	Bottom ash, %
Ca	20.03	15.13
Fe	9.11	8.40
Si	5.28	5.61
Al	2.32	2.26

4.2 การแยกเหล็กออกจาก เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาในสนามแม่เหล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน

การทดลองการแยกเหล็กในตัวอย่างเถ้าลอย ด้วยแม่เหล็กถาวร ซึ่งใช้ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ต่างกัน 6 ระดับ จะได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง %Fe กับความเข้มข้นแม่เหล็กในตัวอย่างเถ้าลอย ดังรูปที่ 9 พบว่า เมื่อใช้สนามแม่เหล็กขนาดมากขึ้น จะสามารถดูดตัวอย่างที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบได้ แม้จะมีเหล็กเป็นส่วนประกอบเพียง 11.219 %

ตัวอย่างของส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็กที่มี %Fe น้อยที่สุดพบว่า มีค่าลดลงจาก 9.11% เหลือเพียง 5.323%

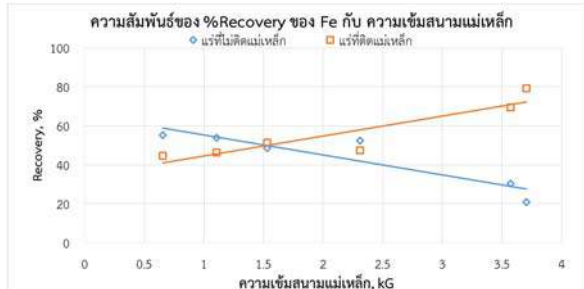
การเก็บกู้เหล็กออกจากตัวอย่างเถ้าลอยที่มากที่สุดพบว่า สามารถเก็บได้ถึง 79.150 % ดังรูปที่ 10 แต่จะทำให้ น้ำหนักของเถ้าลอยหรือส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก มีค่าน้อยลงด้วย จากตารางที่ 2 เถ้าลอยที่จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการผสมคอนกรีตจะมีเพียงเล็กน้อย ในส่วนนี้ต้องมีการศึกษาต่อไปถึง สัดส่วนของเหล็กที่ยอมรับได้ในคอนกรีต เพื่อให้ได้น้ำหนักเถ้าลอยที่ใช้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ %Fe และ %การเก็บกู้เหล็ก ของตัวอย่างถ้ำลอย ในส่วนไม่ติดแม่เหล็ก และส่วนที่ติดแม่เหล็ก

แม่เหล็ก (G)	ไม่ติดแม่เหล็ก		ติดแม่เหล็ก	
	%Fe	%Recovery	%Fe	%Recovery
654.53	6.240	55.303	21.189	44.697
1108.08	6.370	53.768	18.264	46.232
1530.07	6.440	48.523	14.975	51.477
2308.05	7.330	52.606	12.488	47.394
3573.90	5.428	30.368	12.949	69.632
3705.60	5.323	20.850	11.219	79.150



รูปที่ 9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของ %Fe กับ ความเข้มข้นแม่เหล็กของตัวอย่างของแม่เหล็ก คือ ถ้ำลอยลึกไนต์



รูปที่ 10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของ %Recovery ของ Fe กับ ความเข้มข้นแม่เหล็กของตัวอย่างของแม่เหล็ก คือ ถ้ำลอยลึกไนต์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง %Fe กับความเข้มข้นแม่เหล็กในตัวอย่างถ้ำลอยลึกไนต์ ดังรูปที่ 11 พบว่า เมื่อใช้สนามแม่เหล็กขนาดมากขึ้น จะสามารถดูดตัวอย่างที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบได้ แม้จะมีเหล็กเป็นส่วนประกอบเพียง 8.711 %

ตัวอย่างของส่วนที่ติดแม่เหล็ก %Fe น้อยที่สุด พบว่ามีผลผลิตจาก 8.40% เหลือเพียง 6.02%

การเก็บกู้เหล็กออกจากตัวอย่างถ้ำลอยลึกไนต์มากที่สุดพบที่สามารถเก็บได้ถึง 90.142 % ดังรูปที่ 12 แต่จะทำให้ น้ำหนักของถ้ำลอยลึกไนต์ หรือส่วนที่ติดแม่เหล็ก มีค่าน้อยลงด้วย จากตารางที่ 3 ถ้ำลอยลึกไนต์จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการผสม

คอนกรีตจะได้เพียงเล็กน้อย ในส่วนนี้ต้องมีการศึกษาต่อไปถึงสัดส่วนของเหล็กที่ยอมรับได้ในคอนกรีต เพื่อที่จะให้ได้น้ำหนักถ้ำลอยลึกไนต์ที่ใช้อย่างเหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ %Fe และ %การเก็บกู้เหล็ก ของตัวอย่างถ้ำลอยลึกไนต์ ในส่วนไม่ติดแม่เหล็ก และส่วนที่ติดแม่เหล็ก

แม่เหล็ก (G)	ไม่ติดแม่เหล็ก		ติดแม่เหล็ก	
	%Fe	%Recovery	%Fe	%Recovery
654.53	7.460	59.582	10.150	40.418
1108.08	7.090	44.093	9.723	55.907
1530.07	7.330	32.935	8.971	67.065
2308.05	6.290	24.573	9.356	75.427
3573.90	6.020	16.721	9.061	83.279
3705.60	6.080	9.858	8.711	90.142



รูปที่ 11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของ %Fe กับความเข้มข้นแม่เหล็กของแม่เหล็กของแม่เหล็ก คือ ถ้ำลอยลึกไนต์



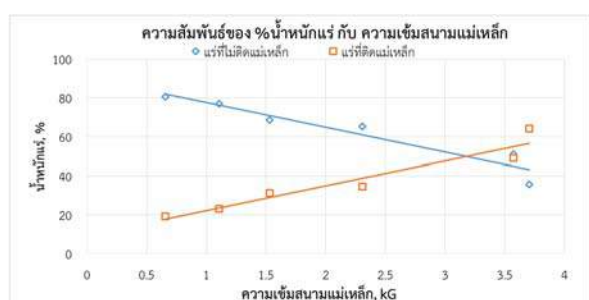
รูปที่ 12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของ %Recovery ของ Fe กับ ความเข้มข้นแม่เหล็กของแม่เหล็กของแม่เหล็ก คือ ถ้ำลอยลึกไนต์

ผลการแต่งถ้ำลอยลึกไนต์และถ้ำลอยลึกไนต์ ดังแสดงตารางที่ 4 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %น้ำหนักแม่เหล็กกับความเข้มข้นแม่เหล็ก ของถ้ำลอยลึกไนต์และถ้ำลอยลึกไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 13-14

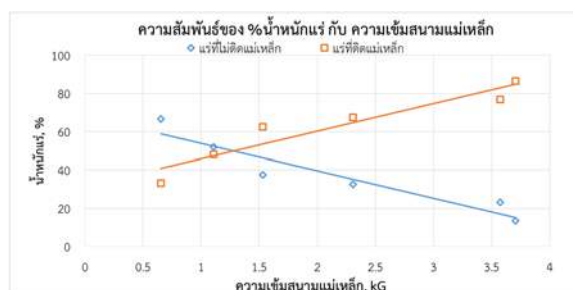
เมื่อใช้ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่มากขึ้น จะพบว่า น้ำหนักของถ้ำลอยลึกไนต์ และน้ำหนักของถ้ำลอยลึกไนต์ จะน้อยลงจนกระทั่งพบว่า ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก 3705.60 G จะเหลือผลิตภัณฑ์ถ้ำลอยลึกไนต์และถ้ำลอยลึกไนต์ เพียง 35.7 %Wt และ 13.55 %Wt ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลของสัดส่วนเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก(%Wt) จากการแต่งเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยด้วยแม่เหล็กนีโอไดเมียม

ชนิดของเถ้า แม่เหล็ก	เถ้าลอย (%)		เถ้าก้นเตา (%)	
	ไม่ติดแม่เหล็ก	ติดแม่เหล็ก	ไม่ติดแม่เหล็ก	ติดแม่เหล็ก
654.35 (G)	80.78	19.22	66.73	33.27
1108.08 (G)	76.93	23.07	51.96	48.04
1530.07 (G)	68.67	31.33	37.54	62.46
2308.05 (G)	65.41	34.59	32.64	67.36
3573.90 (G)	50.99	49.01	23.21	76.79
3705.60 (G)	35.70	64.30	13.55	86.45



รูปที่ 13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของ %น้ำหนักแร่ กับความเข้มข้นแม่เหล็กของเถ้าลอย



รูปที่ 14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของ %น้ำหนักแร่ กับความเข้มข้นแม่เหล็กของเถ้าก้นเตา

เมื่อพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับราคาของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา เพื่อใช้ในงานผสมคอนกรีต ตลอดจนถึงมาตรฐานของคอนกรีตแต่ละชนิดที่ยินยอมให้ %Fe มีในส่วนผสม สามารถใช้เป็นตัวบอกได้ว่า ควรจะใช้ปริมาณความเข้มข้นแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับการได้มาของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม อีกข้อคือ การนำส่วนที่แต่งแร่เหล็กออกที่มีปริมาณ %Fe น้อยมาก อาจนำเป็นส่วนที่เก็บกักไว้เพื่อการผสม (Blending) กับเถ้าถ่านหินซึ่งมี %Fe สูง เพื่อเป็นการควบคุมเกรดของผลิตภัณฑ์ก่อนส่งเข้ากระบวนการผสมคอนกรีต เพื่อประโยชน์ด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรแร่และการควบคุมคุณภาพอีกด้วย

5. สรุปผลการทดลอง

การทดลองการแยกเหล็กด้วยแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียมจากตัวอย่างเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา ขนาดที่ -250 Mesh +Pan ที่ระดับความเข้มข้นแม่เหล็ก 6 ระดับ พบว่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่มากขึ้น มีผลต่อการเพิ่มปริมาณหัวแร่เหล็กที่เก็บได้ และสามารถเก็บหัวแร่เหล็กที่ปริมาณของ %Fe น้อยลงในตัวอย่างได้ผล

การแยกเหล็กออกจากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา เป็นทางเลือกที่มีประโยชน์อย่างหนึ่งเพราะไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก หรือควรพิจารณาใช้เพื่อเป็นวิธีกำจัดเหล็กในเถ้าก่อนใช้แม่เหล็กไฟฟ้าแยก หรือใช้วิธีอื่นต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนด้านต่างๆ ในการดำเนินโครงการ และให้กำลังใจจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีตามที่มุ่งหวังไว้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. (2017). การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. [online] Available at: http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_suc_ash.html [Accessed 27 Jul. 2017].
- [2] Wang S, Wu H. Environmental- benign utilisation of fly ash as low- cost adsorbents. Journal of hazardous materials. 2006 Aug 25;136(3):482-501.
- [3] การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย. การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์. [Online]. Available from: <http://maemoh.egat.com/index.php/89-sarat/89-sarat1> [Accessed 27 July 2017].
- [4] Elementalmatterinfo. Elementalmatterinfo. [Online]. Available from: <http://www.elementalmatter.info/iron-properties.htm> [Accessed 27 July 2017]
- [5] บริษัท ทอรัส พอซโซลานซ์. เถ้าลอย / ผลิตภัณฑ์มวลผสม. [Online]. Available from: <http://www.tauruspozzolan.com/product-flyash.php> [Accessed 27 July 2017].
- [6] บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์. [Online]. Available from: <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm> [Accessed 27 July 2017].



- [7] ศิวโรดม์ ศิริลักษณ์. แม่เหล็กนีโอไดเมียมกับวิศวกรรม
การแต่งแร่. เชียงใหม่ : สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ; 2554.
- [8] R. Bhima Rao, P. Chattopadhyay and G.N. Banerjee.
Removal of iron from fly ash for ceramic and
refractory applications. : Council of Scientific and
Industrial Research. Bhubaneswar:India; 1999.
- [9] นิคม โชติกานท์. แต่งแร่ MINERAL PROCESSING.
เชียงใหม่ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่;
2540.

การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดลูกบอลพลาสติกเด็กเล่น

Design and Invention of Cleaning Machine for Children Plastic Balls

กรวัฒน์ วุฒิกิจ^{1*} สุรสิทธิ์ เทียงจันทา¹ และศรายุทธ กำมะโน²¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Korrawat Wuttikid^{1*}, Surasit Thiangchanta¹ and Katayut Kamano²¹Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 HuayKaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

²Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 HuayKaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

*ผู้รับผิดชอบบทความ: korrawat_wuttikid@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0882681326

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและประดิษฐ์เครื่องทำความสะอาดลูกบอลพลาสติกเด็กเพื่อลดปัญหาการทำความสะอาดที่ล่าช้าจากแรงงานคน การทำงานของเครื่องจะใช้เกลียวลำเลียงลูกบอลซึ่งใบพัดของเกลียวลำเลียงมีลักษณะเป็นขนแปรงพลาสติก เมื่อเกลียวหมุนสามารถลำเลียงลูกบอลพร้อมทั้งทำความสะอาดโดยการขัดจากขนแปรง เกลียวลำเลียงถูกจุ่มลงไปในเอทานอลโดยทำมุมกับแนวตั้ง 45 องศา เกลียวลำเลียงถูกออกแบบให้มีระยะพิทช์ 0.10 เมตรเพื่อให้ลูกบอลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.075 เมตรสามารถเคลื่อนที่ในเกลียวได้ มุมเกลียวที่ใช้คือ 30 องศา จำนวนใบพัดมีทั้งหมด 5 ใบพัด โดยใบพัดที่จุ่มในเอทานอลมี 3 ใบพัด ต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนเกลียวคือมอเตอร์ซึ่งถูกคำนวณแรงแรงบิดเท่ากับ 1 แรงม้า นอกจากนั้นยังถูกควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ตั้งแต่ 70 ถึง 120 รอบต่อนาที ผลการทดสอบพบว่าเครื่องทำความสะอาดลูกบอลพลาสติกเด็กมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดลูกบอลประมาณ 95% และมีศักยภาพการทำความสะอาดลูกบอลสูงสุดที่ความเร็วรอบการหมุนแปรงเกลียว 90 รอบต่อนาทีซึ่งเร็วกว่าการทำความสะอาดด้วยแรงงานคนประมาณ 4 เท่าและสามารถลดแรงงานคนเหลือแค่เพียงหนึ่งคนในการควบคุมเครื่อง

คำสำคัญ เครื่องทำความสะอาด ลูกบอลพลาสติกเด็กเล่น แปรงเกลียวลำเลียง

Abstract

This research was design and invention of cleaning machine for children plastic ball to mitigate the issue of slowly cleaning the balls from labors. The principle of this cleaning machine was conveying the ball by screw conveyer that has the screw blade as plastic brush. While the screw conveyer rotates, the screw plastic brush can convey and simultaneously brush the balls. The screw conveyer was dipped into ethanol and sloped with vertical of 45 degree. The screw pitch was 0.10 m that is enough for conveying the balls with diameter of 0.075 m. The blade angle was 30 degree. The screw conveyer comprised of 5 screw blades and 3 screw blades were dipped into ethanol. The power source for screw conveyer was designed to use 1 hp motor. Moreover, the rotational speed can be adjusted by inverter in the range of 70 to 120 rpm. The results show that the efficiency of children ball cleaning machine were around 95%. The cleaning rate of this machine was 181 balls per minutes (10,860 balls per hour) at the rotational speed of 90 rpm. This rate was higher than the labor rates for 4 times. It can also reduce the number of labors to be 1 person to control machine.

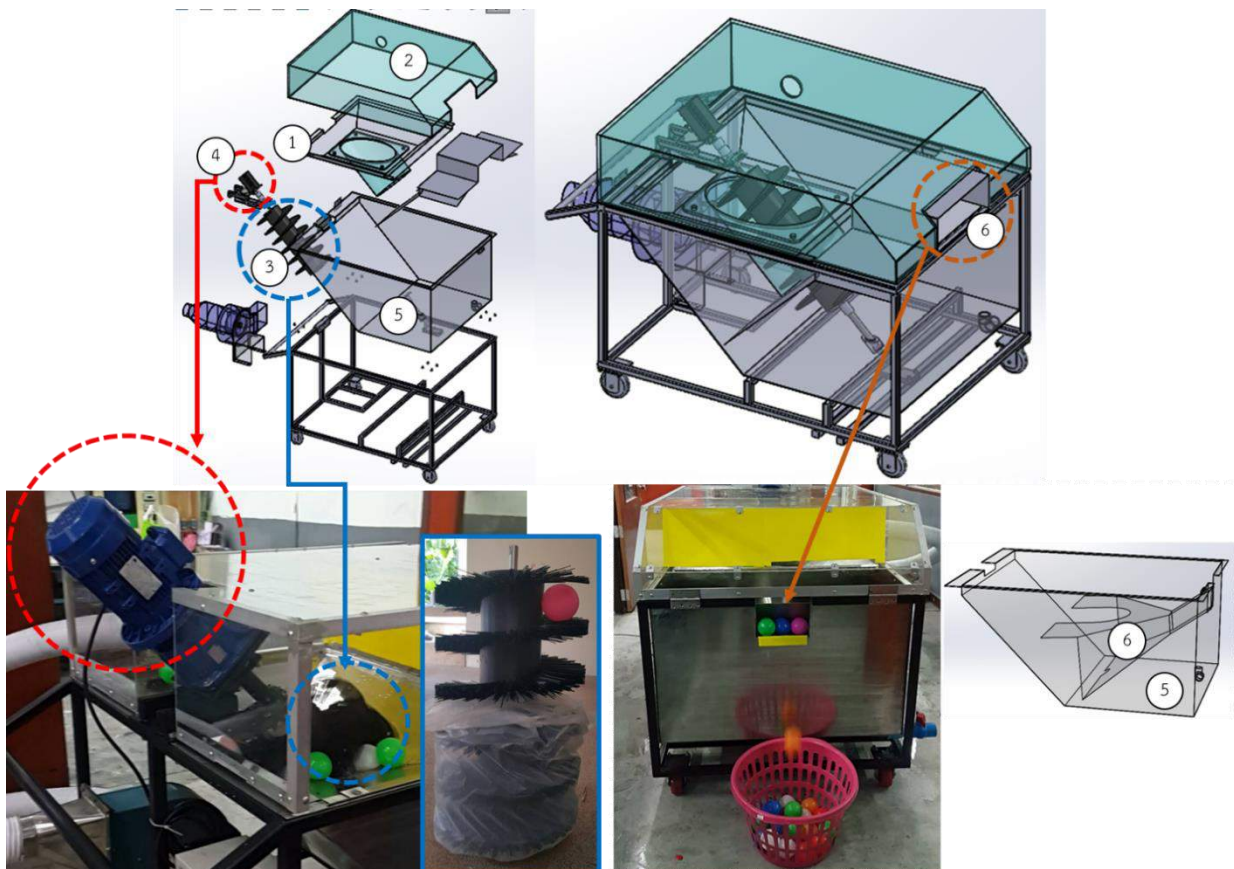
Keywords: cleaning machine, children plastic balls and brush crew conveyer

1. บทนำ

ปัจจุบันสถานบริการเครื่องเล่นหรือสวนสนุกสำหรับเด็กเล็กได้เปิดให้บริการในหลายสถานที่ทั่วประเทศ เช่นในห้างสรรพสินค้า หรือสวนสนุก บอลพลาสติกเด็กเล่นเป็นอุปกรณ์เด็กเล่นประเภทหนึ่งที่เด็กนิยมเล่นกันมาก โดยบอลพลาสติกเหล่านี้จะถูกบรรจุอยู่ในอ่างลูกบอลไม่ต่ำกว่าสามพันลูกในแต่ละที่ ลักษณะการใช้งานลูกบอลเหล่านี้มีหลายแบบ เช่น สรูลูกบอลสำหรับเด็กวิ่งเล่นด้านใน การโยนลูกบอลใส่เป้า และการเป่าลูกบอล เป็นต้น หลังจากการใช้งานเสร็จลูกบอลเหล่านี้มักจะสกปรก หรือมีโอกาสติดเชื้อโรคจากเด็กที่ป่วย ดังนั้นแต่ละสถานบริการจึงจำเป็นต้องทำความสะอาดลูกบอลทุกลูกตลอดเวลา อย่างไรก็ตามการทำความสะอาดลูกบอลเป็นจำนวนมากจะต้องใช้เวลานานเนื่องจากต้องใช้แรงงานคนเพื่อทำความสะอาดลูกบอลแต่ละลูก ในบางครั้งอาจใช้เวลาทำความสะอาดตลอดทั้งวันสำหรับสถานบริการที่

มีลูกบอลจำนวนมากๆ ทำให้ต้องปิดบริการและทำให้สูญเสียรายได้ บางสถานบริการเลือกที่จะขยายช่วงเวลาการทำความสะอาดในแต่ละรอบให้นานขึ้นเพื่อลดการสูญเสียรายได้ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อผู้รับบริการ

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะประดิษฐ์เครื่องทำความสะอาดลูกบอลที่สามารถเพิ่มอัตราการทำความสะอาดลูกบอลพลาสติกเด็กเล่นเมื่อเทียบกับการทำความสะอาดโดยใช้แรงงานคน นอกจากนั้นเครื่องนี้ยังถูกออกแบบให้สามารถทำความสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ การลำเลียงลูกบอลในเครื่องทำความสะอาดจะประยุกต์เทคนิคการลำเลียงวัสดุแข็งโดยใช้เกลียวลำเลียง [1] ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายในการลำเลียงชีวมวล [2,3] พืชผลทางการเกษตรและอาหาร [4] เป็นต้น เนื่องจากสามารถขนถ่ายวัสดุแข็งได้ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องทำความสะอาดบอลพลาสติกเด็กเล่น

2. หลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงาน

เครื่องทำความสะอาดลูกบอลพลาสติกเด็กเล่นได้ถูกออกแบบดังรูปที่ 1 ลูกบอลจะถูกเทลงด้านบนของเครื่องทำความสะอาดลูกบอลบริเวณถาดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีความลาดเอียงคล้ายกรวย ซึ่งจะทำให้ลูกบอลที่เทลงไปไหลเข้าสู่บริเวณกลางแผ่น (หมายเลข 1) โดยตรงกลางถาดถูกเจาะรูเพื่อติดตั้งกระบอกสำหรับเกลียวลำเลียง บริเวณด้านบนถาดสี่เหลี่ยมจะมีฝาปิด (หมายเลข 2) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ลูกบอลกระเด็นออกจากเครื่องทำความสะอาดลูกบอลที่ถูกเทจะไหลเข้าสู่กระบอกเกลียวลำเลียง เกลียวลำเลียงถูกติดตั้งในกระบอกเกลียวดังแสดงในหมายเลข 3 ซึ่งถูกออกแบบให้มีใบพัดเป็นขนแปรงพลาสติก เกลียวลำเลียงถูกติดตั้งให้ทำมุมกับแนวดิ่ง 45 องศา เมื่อแปรงเกลียวหมุน ลูกบอลจะถูกลำเลียงผ่านช่องว่างระหว่างใบพัดเกลียว (ช่องว่างที่อยู่ระหว่างระยะพิทช์ของใบพัด) ระยะพิทช์ของเกลียวถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าลูกบอลเล็กน้อยเพื่อให้สามารถลำเลียงลูกบอลสะดวก ใบพัดเกลียวมีทั้งหมด 5 ใบ โดยใบพัด 3 ใบสุดท้ายจะจมในน้ำยาทำความสะอาดที่ถูกบรรจุไว้ในถังดังแสดงในหมายเลข 5 ลูกบอลจะถูกลำเลียงไปในน้ำยาทำความสะอาดและทำการขัดลูกบอลเด็กไปพร้อมกัน นอกจากนั้นความเร็วในการหมุนของแปรงเกลียวยังสัมพันธ์กับอัตราการทำความสะอาดลูกบอล ต้นกำลังสำหรับหมุนแปรงเกลียวได้ใช้มอเตอร์เกียร์ (หมายเลข 4) ที่มีกำลังขับ 1 แรงม้า พร้อมชุดทดรอบเพื่อให้ความเร็วรอบไม่เกิน 150 รอบต่อนาที นอกจากนั้นยังใช้ชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อช่วยในการปรับความเร็วรอบได้ตามต้องการในช่วงความเร็วรอบ 50 – 150 รอบต่อนาที ลูกบอลเด็กจะถูกลำเลียงออกจากปลายกระบอกเกลียวและจะลอยขึ้นโดยแรงดันน้ำให้ลอยอยู่ด้านบนผิวน้ำ ในขณะที่ลูกบอลลอยตัวขึ้นมาสู่ผิวน้ำจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายในช่องส่งลูกบอลที่มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมรูเล็กดังหมายเลข 6 เพื่อบังคับให้ลูกบอลเด็กออกมาที่ช่องทางออกเพียงทางเดียว

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในขณะที่แปรงเกลียวหมุนจะทำหน้าที่ในการลำเลียงลูกบอลลงในน้ำเพื่อทำความสะอาด โดยการออกแบบระยะต่างๆ และติดตั้งตำแหน่งของแปรงเกลียวแสดงดังรูปที่ 2 แปรงเกลียวถูกออกแบบให้ทำมุมกับแนวดิ่ง 45° เพื่อให้ลูกบอลเด็กที่ถูกลำเลียงออกจากปลายกระบอกเกลียวลอยขึ้นในแนวดิ่งโดยไม่มีสิ่งกีดขวาง นอกจากนั้นยังลดแรงกดของใบพัดแปรงเกลียวที่กระทำต่อลูกบอลเมื่อเทียบกับการติดตั้งแปรงเกลียวโดยไม่มีมุมเอียง การหาขนาดเพลานกกลางของแปรงเกลียว (D) สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [1]

$$D = X \cos \theta \quad (1)$$

$$X = \frac{W}{\cos(90-2\theta)}$$

ระยะที่ถูกกำหนดคือช่องว่างระหว่างใบพัดของแปรงเกลียว (W) ซึ่งจะต้องมากกว่ารัศมีลูกบอล ในการลำเลียงลูกบอลลงในน้ำ ลูกบอลจะได้รับแรงกดจากใบพัดของแปรงเกลียว (F) ดังรูปที่ 3 ซึ่งสามารถสมดุลแรงได้ดังสมการต่อไปนี้ [5]

$$F = \frac{(F_p + F_b - F_{mg})}{\sin \phi} \quad (2)$$

เมื่อ F_p คือ แรงเนื่องจากความดันของของไหลที่กระทำต่อลูกบอล

F_b คือ แรงลอยตัวของลูกบอล

N คือ แรงปฏิกิริยาที่ผนังกระบอกเกลียวกระทำต่อลูกบอล

F_{mg} คือ มวลของลูกบอล

แรงที่เนื่องจากความดันของของไหลที่กระทำต่อลูกบอล (F_p) สามารถหาได้โดย [6]

$$F_p = P A_b = n_b \rho g H A_b \quad (3)$$

เมื่อ n_b คือ จำนวนลูกบอลที่จมในน้ำทั้งหมด

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

H คือ ความลึกที่ลูกบอลจมลงในของไหล

A_b คือ พื้นที่ผิวรับแรงดันของลูกบอล

แรงลอยตัว (F_b) สามารถหาได้จาก

$$F_b = n_b \rho V_{ball} \quad (4)$$

เมื่อ V_{ball} คือ ปริมาตรของลูกบอล

แรงเนื่องจากมวลของลูกบอลหาได้จาก

$$F_{mg} = n_b m g \quad (5)$$

เมื่อ m คือ มวลของลูกบอล

แรงจากใบพัดแปรงเกลียวที่กระทำต่อลูกบอลที่คำนวณได้ยังถูกใช้ในการหาค่ากำลังมอเตอร์ดังสมการต่อไปนี้ [5]

$$P = \frac{2n\pi N_t Fr}{60} \quad (6)$$

เมื่อ n คือ จำนวนลูกบอลทั้งหมดที่จมอยู่ในน้ำ

N_t คือ ความเร็วรอบการหมุนของแปรงเกลียว (rpm)

r คือ ระยะห่างระหว่างแรงดึงดูดถึงแกนเพล

การออกแบบความเร็วรอบแปรปรวนเกลียว (N_t) สามารถหาได้ดังนี้

$$N_t (\text{rpm}) = \frac{C \times 60 N_{\text{ball}}}{n} \quad (7)$$

เมื่อ C คือ เปอร์เซนต์ของจำนวนลูกบอลในหนึ่งรอบเกลียว

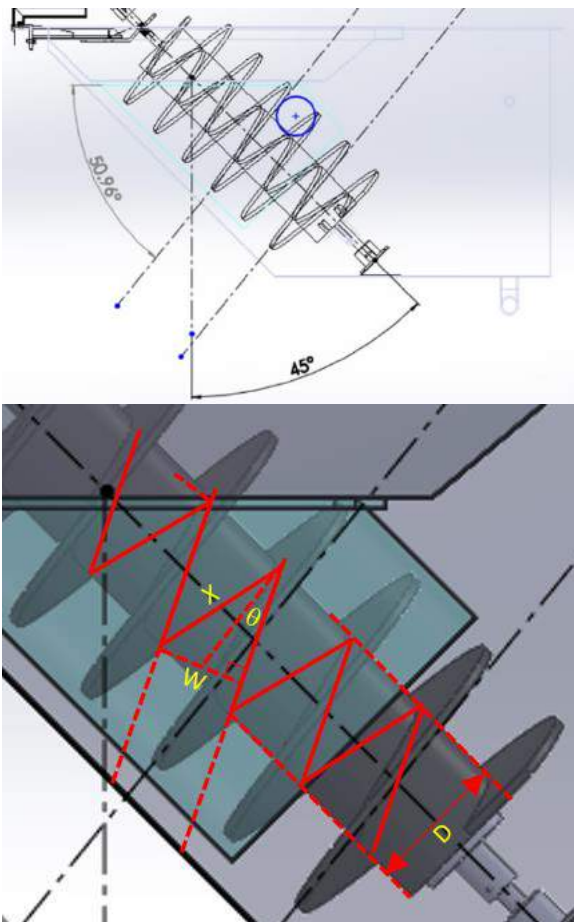
N_{ball} คือ อัตราการทำความสะอาดลูกบอลที่ต้องการ

(ลูกต่อวินาที)

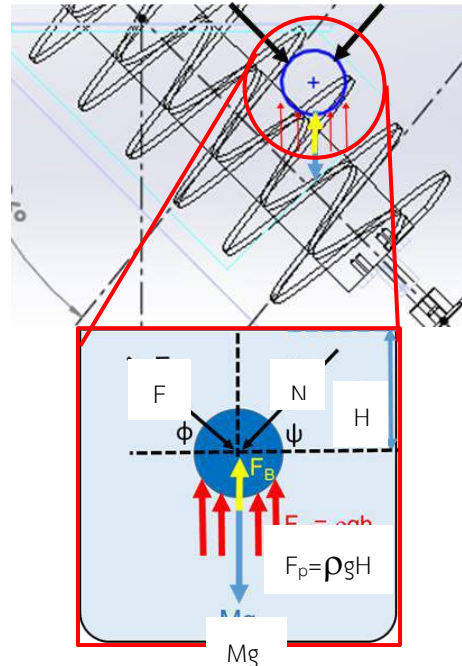
n_v คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรช่องว่างในหนึ่งรอบเกลียวต่อปริมาตรลูกบอล (V_{ball}) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ [1]

$$n_v = \frac{(DWD_b + D_b^2 W) \sin \theta}{V_{\text{ball}} \sin(\theta + 90)} \quad (8)$$

เมื่อ D_b คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลูกบอลเด็ก



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งแปรงเกลียว (บน) และขนาดขนาดแปรงเกลียว (ล่าง)



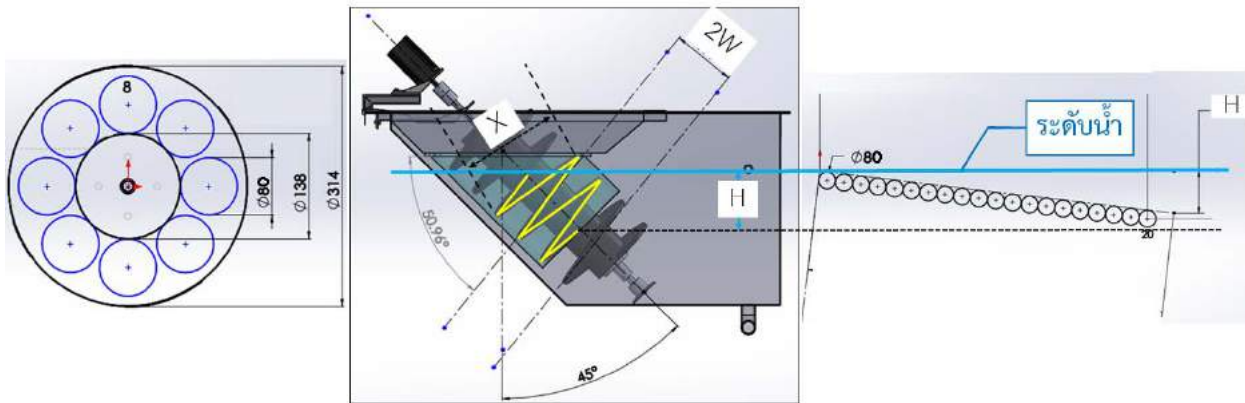
รูปที่ 3 แสดงทิศทางของแรงต่างๆที่กระทำต่อลูกบอลในขณะที่กำลังเคลื่อนผ่านแปรงเกลียว

3. ผลการวิจัย

3.1. การออกแบบ

แปรงเกลียวคือส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของระบบทำความสะอาดลูกบอล ใบพัดของแปรงเกลียวมีลักษณะเป็นขนแปรงครอบเพลากลม แปรงเกลียวทำหน้าที่สำคัญในการทำความสะอาดลูกบอลโดยการหมุนเพื่อลำเลียงลูกบอลเด็กลงในน้ำพร้อมทั้งขัดทำความสะอาดลูกบอลไปพร้อมกัน การหาขนาดเพลากลางของแปรงเกลียว (D) สามารถหาได้จาก (1) โดยระยะที่ถูกกำหนดคือช่องว่างระหว่างใบพัดของแปรงเกลียว (W) ซึ่งจะต้องมากกว่ารัศมีลูกบอล ในการวิจัยนี้ได้กำหนดขนาดช่องว่างระหว่างใบพัดของแปรงเกลียวเท่ากับ 0.1 m นอกจากนั้นมุมในพัด (θ) ได้กำหนดให้เท่ากับ 30° จะหาขนาดเพลากลางของแปรงเกลียวได้ 100 mm ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เพลากลาง 138 mm เนื่องจากมีขายตามท้องตลาด

การเลือกขนาดมอเตอร์เพื่อใช้เป็นต้นกำลังการหมุนของแปรงเกลียวสามารถหาได้จากสมการ (3) โดยแรงที่กระทำต่อใบพัดแปรงเกลียว (F) แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งแรงนี้สามารถหาได้จากสมการ (2) ในกรณีที่ลูกบอลถูกลำเลียงเข้าไปเต็มช่องว่างใบพัดของแปรงเกลียวพบว่าช่องว่างของแปรงเกลียวหนึ่งรอบจะบรรจุลูกบอลได้มากที่สุดประมาณ 8 ลูกดังรูปที่ 4 (ซ้าย) และจากรูปที่ 4 (กลาง) พบว่าแปรงเกลียวที่จมน้ำมีทั้งหมด 3 เกลียว และเมื่อคลี่รูปออกมาจะพบว่าแต่ละลูกจะอยู่ในระดับความลึกที่ต่างกันดังรูปที่ 4 (ขวา) ซึ่งความลึกของลูกบอลแต่ละลูกจะส่งผลต่อแรงดันน้ำที่กระทำต่อลูกบอล (F_p)



รูปที่ 4 จำนวนลูกบอลที่บรรจุในหนึ่งรอบแปรงเกลียว (ซ้าย) เกลียวของแปรงเกลียวที่จมน้ำ (กลาง) และความลึกของลูกบอลแต่ละลูกที่จมน้ำ

แรงเนื่องจากความดันของของไหลที่กระทำต่อลูกบอล (F_p) สามารถหาโดยแทนค่า จำนวนลูกบอลที่จมน้ำทั้งหมด 24 ลูกที่ความลึกเฉลี่ย 180 mm และพื้นที่ผิวของลูกบอลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 80 mm ลงใน (3) จะได้แรงเนื่องจากความดันของของไหลที่กระทำต่อลูกบอลเท่ากับ 220 N เมื่อแทนค่าปริมาตรของลูกบอลลงใน (4) จะได้แรงลอยตัว (F_b) เท่ากับ 5.28 N และเมื่อแทนค่ามวลของลูกบอลเท่ากับ 0.011 g ใน (5) จะสามารถหาแรงเนื่องจากมวลของลูกบอล (F_{mg}) ได้เท่ากับ 2.58 N

จากนั้นแทนค่าแรงเนื่องจากความดันของไหล แรงลอยตัว และแรงเนื่องจากมวลของลูกบอล ลงใน (2) เพื่อหาแรงที่กระทำต่อใบพัดแปรงเกลียว (F) จะได้เท่ากับ 290 N แรงรวมนี้ถูกแทนใน (6) เพื่อหากำลังมอเตอร์สำหรับขับแปรงเกลียว (P) จะได้เท่ากับ 4.55 N ซึ่งค่าความเร็วรอบแปรงเกลียว (N_r) สามารถหาได้จากการแทนค่า 3 ค่า คือ 1. เปอร์เซนต์ของจำนวนลูกบอลในหนึ่งรอบเกลียว (25%) 2. อัตราการทำความสะอาดลูกบอลที่ต้องการ (60 ลูกต่อนาที) และ 3. อัตราส่วนระหว่างปริมาตรช่องว่างใน (1/8) จะได้ความเร็วรอบแปรงเกลียวเท่ากับ 75 rpm แทนค่า N_r ลงใน (6) จะหากำลังมอเตอร์สำหรับขับแปรงเกลียวได้เท่ากับ 0.45 Hp ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 Hp เพื่อเผื่อความปลอดภัย

3.2. การทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพและศักยภาพการทำงานสูงสุดของเครื่องทำความสะอาดบอลเด็ก ได้ทำการทดสอบหาอัตราการทำความสะอาดบอลเด็กที่ความเร็วรอบ

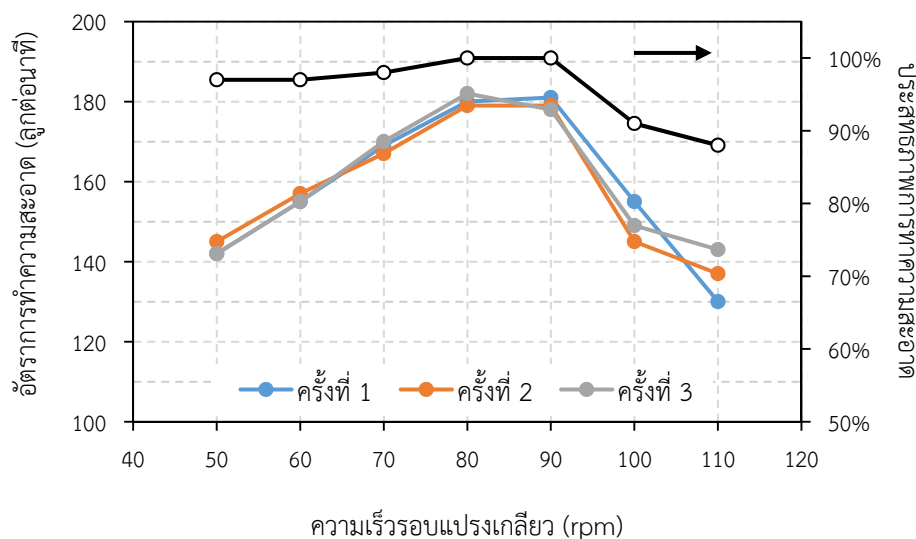
แปรงเกลียวต่างกัน 6 ค่าคือ 50 70 80 90 100 และ 110 rpm โดยแต่ละความเร็วรอบได้ทำการทดสอบ 3 ครั้ง

ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดลูกบอลทำได้โดยการใช้หมึกแบบลบได้ระบายลงบนลูกบอล ลูกบอลดังแสดงในรูปที่ 5 โดยประสิทธิภาพการทำความสะอาดลูกบอลสามารถหาได้จากจำนวนลูกบอลที่ไม่มีคราบหมึกติดอยู่หลังจากทำความสะอาดเทียบกับจำนวนลูกบอลทั้งหมด ผลการหาประสิทธิภาพการทำความสะอาดลูกบอลแสดงในรูปที่ 6 (แนวนอน) ประสิทธิภาพการทำความสะอาดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 95% ที่ความเร็วรอบการหมุนของแปรงเกลียวเท่ากับ 80 rpm และ 90 rpm เครื่องทำความสะอาดลูกบอลเด็กมีประสิทธิภาพการทำงาน 100% แต่ที่ความเร็วรอบการหมุนของแปรงเกลียวต่ำกว่าหรือมากกว่า 80 rpm และ 90 rpm ประสิทธิภาพการทำความสะอาดมีค่าน้อยกว่า 100% เนื่องจากมีลูกบอลติดค้างในเครื่องทำความสะอาดจึงไม่สามารถตรวจวัดได้

อย่างไรก็ตามในการทดสอบครั้งนี้ยังไม่ได้สร้างสิ่งสกปรกที่เป็นเชื้อโรคดังที่ได้สันนิษฐานไว้เบื้องต้น เนื่องจากยังไม่เคยมีสถานประกอบการสวนสนุกใดได้ตรวจสอบหรือตรวจวัดปริมาณเชื้อโรคที่ติดอยู่กับลูกบอลอย่างจริงจัง แต่งานวิจัยนี้ได้ใช้สารทำความสะอาดเป็นแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลซึ่งเป็นสารมาตรฐานในการทำความสะอาดร่างกายเบื้องต้นที่ใช้อย่างแพร่หลายในโรงพยาบาล ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อโรคจะทำการทดสอบต่อไปในงานวิจัยครั้งต่อไป



รูปที่ 5 การจำลองสร้างสิ่งสกปรกลงบนลูกบอลโดยใช้การระบายจากหมักแบบบลัด



รูปที่ 6 อัตราการทำความสะอาดลูกบอลเทียบกับความเร็วรอบการหมุนแปรปรวน (แกนซ้าย) และประสิทธิภาพการทำความสะอาด

ผลการหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำความสะอาดลูกบอลเด็กแสดงในรูปที่ 6 (แกนซ้าย) พบว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนของแปรปรวนเพิ่มขึ้นจาก 50 60 70 80 และ 90 rpm อัตราการทำความสะอาดลูกบอลเด็กเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 142 155 169 180 และ 181 ลูกต่อนาที ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยังหมายถึงการเร่งให้ลูกบอลถูกลำเลียงได้เร็วขึ้นแต่เมื่อความเร็วรอบการหมุนของแปรปรวนเพิ่มขึ้นเป็น 100 และ 110 อัตราการทำความสะอาดลูกบอลเด็กเฉลี่ยมีค่าลดลงเหลือ 155 และ 130 ลูกต่อนาที ตามลำดับ การลดลงของอัตราการทำความสะอาดลูกบอลเมื่อความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้นมีสองปัจจัย คือ

1. เมื่อลูกบอลเคลื่อนที่มายังปากกระบอกแปรปรวนจะเกิดการกระเด็นของลูกบอลออกจากแปรปรวน เนื่องจากแรงดึงดูดของขนแปรงที่กระทบกับลูกบอลตอนเริ่มต้น แรงดึงดูดดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้น
2. การเพิ่มความเร็วยังทำให้แรงเสียดทานระหว่างขนแปรงกับลูกบอลมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงสู่ศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้น (ปรากฏการณ์นี้จะคล้ายกับกรณีรถไถล) ทำให้ลูกบอลเด็กติดขนแปรงและหมุนไปด้วยกันในขณะที่แปรปรวนหมุนเป็นอุปสรรคต่อการลำเลียงลูกบอลต่อไป และเป็นสาเหตุของการติดของลูกบอลเด็กภายในเครื่องทำความสะอาด

4. สรุป

ระบบทำความสะอาดลูกบอลมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แปร่งเกลียวซึ่งทำหน้าที่สำคัญในการลำเลียงลูกบอลไปยังน้ำที่อยู่ในถังบรรจุน้ำยาทำความสะอาด ในขณะที่แปร่งเกลียวหมุนจะขัดทำความสะอาดลูกบอลไปพร้อมกัน แปร่งเกลียวถูกออกแบบให้มีขนาดแปร่งเป็นเกลียวรอบๆ แกนเพลลาขนาด 138 mm ช่องว่างระหว่างแปร่งเกลียวมีขนาดใหญ่กว่าลูกบอลเล็กน้อย (100 mm) เพื่อให้บอลสามารถเคลื่อนที่ในแปร่งเกลียวได้ มอเตอร์ขนาด 1 Hp ถูกออกแบบและเลือกเพื่อเป็นต้นกำลังสำหรับหมุนแปร่งเกลียว โดยมอเตอร์ดังกล่าวสามารถปรับความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์

ในการทดสอบหาประสิทธิภาพและศักยภาพการทำงานของเครื่องทำความสะอาดลูกบอลเด็ก ความเร็วรอบแปร่งเกลียวถูกเปลี่ยนแปลง 5 ค่า (50-110 rpm) โดยความเร็วรอบทั้ง 5 ค่านี้ครอบคลุมกับความเร็วยุทธที่ได้จากการออกแบบ (75 rpm) ผลการทดสอบเพื่อประสิทธิภาพและหาศักยภาพการทำความสะอาดลูกบอลพบว่า บอลเด็กที่ถูกสร้างสิ่งสกปรกโดยใช้หมึกแบบลบได้ระบายจนทั่วจะถูกใส่เข้าไปในเครื่องทำความสะอาด จำนวนลูกบอลหลังจากถูกทำความสะอาดแล้วไม่มีคราบหมึกเหลืออยู่จะถูกเทียบกับจำนวนลูกบอลทั้งหมดที่ใส่เข้าไปเพื่อหาประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของเครื่องทำความสะอาดนี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 95% นอกจากนั้นที่ความเร็วรอบการหมุน 80 และ 90 rpm ประสิทธิภาพการทำความสะอาดมีค่า 100% ค่าศักยภาพการทำความสะอาดลูกบอลสูงสุดอยู่ที่ความเร็วรอบการหมุนแปร่งเกลียว 90 rpm ซึ่งสามารถทำความสะอาดลูกบอลได้ 181 ลูกต่อนาทีหรือ 10,860 ลูกต่อชั่วโมงซึ่งเร็วกว่าการทำความสะอาดด้วยแรงงานคนประมาณ 4 เท่าและสามารถลดแรงงานคนเหลือแค่เพียงหนึ่งคนในการควบคุมเครื่อง ซึ่งจากเดิมใช้แรงงานประมาณ 4 ถึง 5 คน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณแหล่งทุนที่ให้การสนับสนุนงบประมาณงานวิจัยจาก โครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย เครือข่าย ภาคเหนือ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Advances in Food Extrusion Technology | Taylor & Francis Group [Internet]. [cited 2018 Jun 9].

- [2] Kaplan O, Celik C. An experimental research on woodchip drying using a screw conveyor dryer. Fuel. 2018 Mar 1;215:468–73.
- [3] Nachenius RW, van de Wardt TA, Ronsse F, Prins W. Residence time distributions of coarse biomass particles in a screw conveyor reactor. Fuel Process Technol. 2015 Feb 1;130:87–95.
- [4] Mondal D, Nabendu Ghosh. Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition. Mater Today Proc. 2018 Jan 1;5(1, Part 1):1286–91.
- [5] Hibbeler RC. Engineering Mechanics: Statics. 5 edition. Macmillan Pub Co; 1989.
- [6] Handbook of Fluid Dynamics, Second Edition [Internet]. CRC Press. 2016 [cited 2018 Jun 9].

การพัฒนาแว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับนักเรียนผู้มีความบกพร่องทางการมองเห็น

Development of an Obstacle-warning Glasses for the Visually Impaired Student

ยุพดี หัตถสิน^{1*}, ณัฐวัฒน์ พยาราช¹, ชาญณรงค์ ธรรมเสนา¹ และเขมะพัฑฒ วิภาตะวานิช²

¹ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตบางเขน กทม.

Upady Hatthasin^{1*}, Nattawat Payarach¹, Chanarong Tamasena and Kemathat Vibhatavanij²

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

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

²Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

*ผู้รับผิดชอบบทความ: UHT@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444 ต่อ 2132

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สามารถช่วยส่งเสริมด้านการปรับปรุงคุณภาพชีวิตสำหรับผู้บกพร่องทางการมองเห็น โดยแจ้งเตือนเป็นเสียงพูดได้ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นงานที่มุ่งพัฒนาปรับปรุงอัลกอริทึมด้านประมวลผลเสียงให้เข้าใกล้ real time มีการทดสอบความแม่นยำการวัดระยะทางที่สัมพันธ์กับมุมด้านหน้าของ ultrasonic sensor และการสะท้อนคลื่น ultrasonic ที่ไปตกกระทบกับวัตถุ 5 ชนิด คือ ฟองน้ำ กระดาษ ไม้ เหล็ก และขวดน้ำพลาสติก ผลทดสอบมี 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งจะทดสอบวัดระยะทางกับ 5 วัตถุ ผลลัพธ์ คือ เฉพาะฟองน้ำที่ไม่ตอบสนองต่อ ultrasonic ส่วน 4 วัตถุที่เหลือจะสะท้อนคลื่นกลับ ซึ่งผลความแม่นยำระยะทางสะท้อนคลื่นจากแต่ละวัตถุ ทำให้ต้องคำนึงถึงกลไกการออกแบบระบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้สวมใส่แว่น ผลทดสอบที่สองเป็นแบบสอบถามการทดสอบที่ถูกประเมินจากคนสายตาปกติและผู้บกพร่องทางการมองเห็น แบบสอบถามมี 6 ประเด็นในด้านความปลอดภัย ด้านการออกแบบฮาร์ดแวร์ ด้านความแม่นยำการวัดระยะทาง ด้านแจ้งเตือนด้วยเสียงเร็วขึ้น ด้านราคา และด้านสะดวกคล่องตัวการประเมิน ซึ่งผลลัพธ์การประเมินอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

คำสำคัญ การวัดระยะทาง ระบบเสียง ผู้บกพร่องทางการมองเห็น แว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวาง

Abstract

This research can help improve the quality of life for the visually impaired people based on the voice speaking in Thai and English. It improves on the algorithm, which reduces the delay on audio processing, making it more real-time. The accuracy of measured distance associated with angles in front of ultrasonic sensor was tested. For safety of a glasses wearer, it examined the amount of Ultrasonic wave reflection on five different materials: sponges, glass, wood, metal, and plastic water bottle. Test results consisted of two parts. First part was for those five materials. Only sponges absorbed the ultrasonic wave, while other materials reflected it back. Reflecting results of precise distance from waves of each materials were diagnosed in order to improve on mechanisms to position equipment and system design to ensure safety for blindness. Second part was satisfaction questionnaires to be assessed by the normal vision people and the visually impaired. The questionnaires were designed on six aspects: safety, hardware design, measured distance accuracy, faster warning sound, the cost, and the convenience and versatility of wearing glasses. The assessment of all aspects yield good results.

Keywords: Distance measurement, sound system, the visually impaired people, obstacle-warning glasses

1. บทนำ

ผู้บกพร่องทางการมองเห็นหรือคนตาบอดเป็นผู้ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน[1] จะไม่สามารถรับรู้เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบตัวได้อย่างแม่นยำ ไม่สามารถใช้สายตาในการทำกิจกรรมต่าง ๆ จำเป็นต้องใช้ประสาทสัมผัสส่วนอื่นมาช่วยในการเรียนรู้ เช่น การคลำสัมผัส การดมกลิ่น การชิมรสชาติ เป็นต้น และยังต้องอาศัยปัจจัยอีกหลายประการ เช่น ทักษะการทำความเข้าใจกับสภาพแวดล้อม การเคลื่อนไหวไปในสถานที่ต่าง ๆ ที่ยังไม่เคยไปมาก่อนและเคยไปแล้ว

บ่อยครั้งที่ผู้บกพร่องทางการมองเห็นต้องเดินทางโดยใช้ไม้เท้านำทางหรือใช้วิธีพิเศษอื่น ๆ ซึ่งงานวิจัยสิ่งประดิษฐ์ไม้เท้าพูดได้สำหรับผู้บกพร่องทางสายตา[2]นั้น แม้จะพอช่วยให้รับรู้ถึงสิ่งกีดขวางบริเวณปลายเท้าได้ แต่การเดินทางโดยอาศัยสิ่งประดิษฐ์นี้ไว้ว่าจะปลอดภัยเสมอไป เพราะยังไม่สามารถป้องกันอุบัติเหตุได้รอบด้านโดยเฉพาะบริเวณช่วงศีรษะจรดเอว ที่มักเกิดอุบัติเหตุได้บ่อย โดยบริเวณศีรษะมักไปกระทบกับป้ายแจ้งเตือนต่าง ๆ ที่ติดตั้งระดับสายตาของคนปกติ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้มีการทำวิจัยแว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวาง[3]ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการเดินทาง เพื่อให้เกิดความปลอดภัย อีกทั้งเพื่อส่งเสริมคุณภาพชีวิตให้แก่ผู้บกพร่องทางการมองเห็น โดยนำแนวคิดการสร้างอุปกรณ์ช่วยอำนวยความสะดวกในการเดินทางเพื่อให้สามารถแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางที่อยู่บริเวณระดับศีรษะจนถึงระดับเอว โดยบอกเป็นระยะทางระหว่างตัวแว่นตากับวัตถุที่กำลังจะถูกกระทบ ด้วยเสียงแจ้งเตือนได้หลายรูปแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกได้ตามความเหมาะสม มีการดักจับสิ่งกีดขวางที่อยู่เบื้องหน้า สนับสนุนการหาค่าความเอียงเพื่อที่จะดักจับการก้ม/เงยของศีรษะมาช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะมุมมองของผู้ใช้ มีแจ้งเตือน 4 รูปแบบคือ 1) สั่นเตือน 2) เสียงบี๊บ 3) เสียงบี๊บเตือนพร้อมสั่นเตือน และ 4) เสียงพูด ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องด้านการทำงาน คือ การบอกระยะทางที่ผิดพลาดโดยเสียงแจ้งเตือนมีความล่าช้ากว่าระยะทางจริงที่วัดได้

ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยด้านการทดสอบระบบตรวจจับ[4] โดยคำนึงถึงการแก้ปัญหาทั้งด้านส่งเสริมคุณภาพชีวิต ด้านความแม่นยำ ด้านความปลอดภัย และด้านความคล่องตัวขณะใช้งาน มีการทดสอบความแม่นยำระยะทางเพื่อวัดระยะทางได้ถูกต้อง อีกทั้งยังมีการวิจัยพัฒนาระบบเสียง[5]ให้ดียิ่งขึ้น เพื่อทำให้ระบบการวัดระยะทางเป็นการแสดงผลแบบเสมือนจริง ทำให้เกิดการทำงานต่อเนื่องและทันทีทันใดให้ได้มากที่สุด ในส่วนงานวิจัยที่กำลังนำเสนอนี้มีการพัฒนาเพิ่มเติมโดยประยุกต์ใช้ตัวประมวลผลแบบใหม่

เพื่อให้มีน้ำหนักที่เบากว่า กระชับคล่องตัวมากขึ้นขณะสวมใส่ โดยใช้วัสดุผลิตในประเทศที่ช่วยให้ต้นทุนวัสดุเหลือเพียง 1,200 บาท และยังเพิ่มโหมดเสียงพูดแจ้งเตือนให้เป็นภาษาอังกฤษ เพื่อช่วยพัฒนาส่งเสริมคุณภาพชีวิตให้ประเทศก้าวสู่ความสมดุลและยั่งยืน ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาคนและสังคมไทยสู่สังคมคุณภาพ ให้สามารถปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดังนั้น ผู้บกพร่องทางการมองเห็นจึงควรได้รับการสนับสนุนให้สามารถช่วยเหลือตัวเองได้ในสังคมคุณภาพ

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 สังเคราะห์กรอบแนวคิด

การที่จะอาศัยส่วนฮาร์ดแวร์ให้ทำงานได้นั้น จำเป็นต้องสร้างกรอบความคิดก่อนนำมาสังเคราะห์จริง โดยแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งบรรยายแต่ละบล็อกได้ดังนี้

- บล็อก clip-on with the left / right ultrasonic sensor ทั้งข้างซ้ายและข้างขวา มีหน้าที่ตรวจจับสิ่งกีดขวางซึ่งใช้ 2 ชุด เพื่อป้องกันการผิดพลาด และเพิ่มตัว clip-on เพื่อแก้ปัญหาใบหน้าผู้ใส่แว่นมีขนาดเล็ก ใหญ่

- บล็อก accelerometer sensor มีหน้าที่ตรวจวัดการก้ม/เงยของศีรษะ เมื่อผู้ใช้สวมใส่แว่นแล้ว จะทำการตรวจจับแกน X, Y และ Z แล้วส่งค่าของแกนเป็นสัญญาณไฟไปยัง microcontroller board ที่พร้อมรับอินพุตจาก left / right ultrasonic sensors ให้เปรียบเทียบผลได้ 3 กรณี คือ 1) หน้าตรง 2) ก้มหน้า และ 3) เงยหน้า

- บล็อก microcontroller board ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณอินพุตจากบล็อก ultrasonic sensor และบล็อก Accelerometer sensor แล้วส่งสัญญาณให้อุปกรณ์เอาต์พุต คือ บล็อก vibration motor บล็อก buzzer และบล็อก embedded MP3 module เพื่อให้ผู้บกพร่องทางการมองเห็นได้รับรู้เมื่อมีสิ่งกีดขวาง

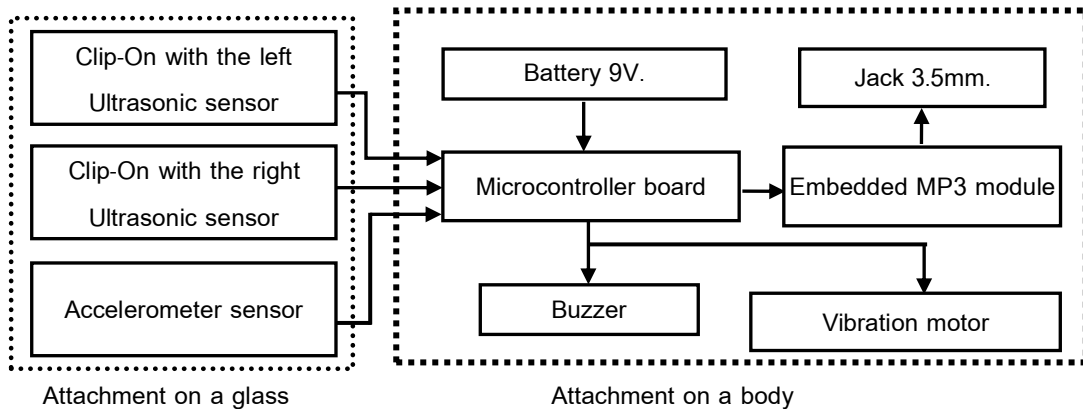
- บล็อก buzzer มีหน้าที่แปลงสัญญาณไฟที่ส่งจากบล็อก microcontroller board ให้เป็นเสียงบี๊บ

- บล็อก vibration motor มีหน้าที่แปลงสัญญาณไฟให้เป็นการสั่นเตือนเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวาง

- บล็อก embedded MP3 module ทำหน้าที่อ่านไฟล์ MP3 ที่บันทึกอยู่ในหน่วยความจำ แล้วจากนั้นก็ส่งสัญญาณเสียงไปยังบล็อก Jack 3.5 mm

- บล็อก Jack 3.5 mm เป็นชนิด stereo และเป็นตัวเชื่อมต่อกับหูฟังในการส่งเสียงบี๊บ และ / หรือ พูดเตือนว่ามีสิ่งกีดขวางเป็นระยะทางกี่เมตร และวัตถุนั้นอยู่ตำแหน่งข้างหน้า ล่าง บน ของผู้บกพร่องทางการมองเห็น

- บล็อก Battery 9V มีหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้อุปกรณ์ทุกตัวในระบบ ซึ่ง battery มีขนาด 9V (Volts)



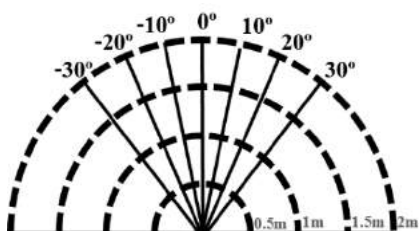
รูปที่ 1 ส่วนประกอบแนวคิดของระบบโดยใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

2.2 คำเนิการสร้างสนามทดสอบ

เนื่องจากการหาความแม่นยำ ต้องอาศัยระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้มาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาผลลัพธ์ระยะทางของระบบที่มี ultrasonic sensor เป็นส่วนประกอบทำงานอยู่ภายใน จึงมีการสร้างสนามทดสอบโดยแสดงแบบร่างได้ดังรูปที่ 2 ที่มีอักษรบอกระยะทางช่วง ช่วงละ 50 cm เป็นลำดับจนถึง 2 m และบอกระยะรัศมีด้านซ้ายมือ (ให้เป็นค่าลบ) หรือ ขวามือ (ให้เป็นค่าบวก) สำหรับการวัด ด้านหน้าตรงให้เป็น 0 องศา และเมื่อนำแบบร่างมาสร้างเป็นสนามทดสอบจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3

2.3 ออกแบบ clip-on เพื่อติดตั้ง ultrasonic sensor

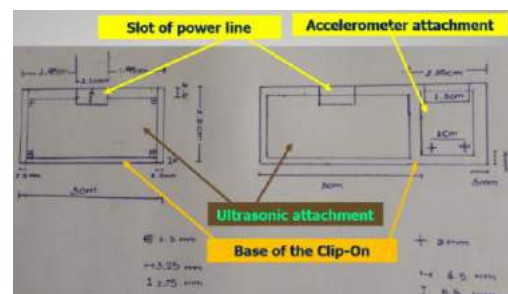
เพื่อให้เกิดความสะดวกและความคล่องตัวสำหรับผู้สวมใส่แว่นตาที่อาจมีรูปร่างใบหน้าใหญ่ เล็ก อ้วน ผอม แตกต่างกันไป ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดของแว่นตามีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามรูปพรรณสัณฐานของผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงมีการออกแบบ clip-on เพื่อหนีบขอบบนของตัวแว่นตา ซึ่งรูปที่ 4 แสดงแบบร่างของคู่ clip-on สำหรับหนีบขอบบนของตัวแว่นตา โดยแผ่น clip-on จะประกอบด้วย ultrasonic sensor และ accelerometer sensor มีการใช้อะคริลิกใสหนา 2 mm ที่มีน้ำหนักเบาเป็นพื้นฐานสำหรับยึดอุปกรณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการวางตำแหน่งที่ไม่แนบชิดติดดวงตา และให้ยิงคลื่น ultrasonic ออกด้านนอกตัวแว่นเพื่อเกิด ความปลอดภัยแก่ดวงตาและระบบประสาทข้างเคียงของมนุษย์



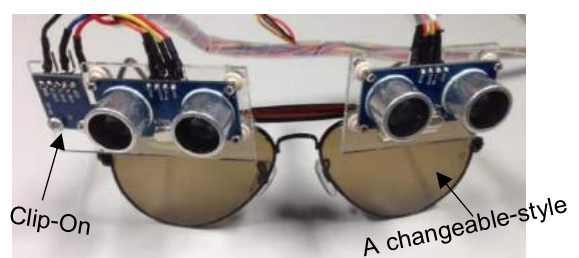
รูปที่ 2 แผนผังของสนามทดสอบเพื่อวัดระยะทาง



รูปที่ 3 การสร้างสนามทดสอบจริง



รูปที่ 4 แบบร่างตัว clip-on สำหรับยึดกับขอบแว่นตา



รูปที่ 5 ตัว clip-on ทั้ง 2 ข้างเพื่อยึดเข้ากับขอบแว่นตา

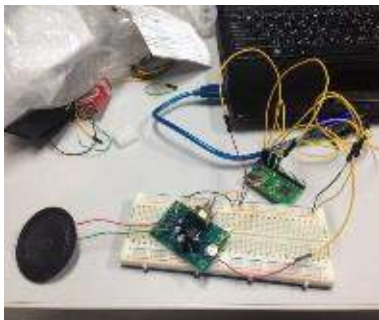
2.4 ดำเนินการด้านฮาร์ดแวร์

เริ่มจากทดสอบการทำงานของระบบของอุปกรณ์ทั้งหมดบนแผ่น breadboard ให้ใช้งานได้ก่อนที่จะนำไปประกอบจริง จากนั้นจึงทำการเจาะกล่องด้วยสว่าน ดังในรูปที่ 6 (a และ b) จากนั้นนำอุปกรณ์ประกอบลงกล่องแล้วทำการเชื่อมต่อ ultrasonic sensor กับ accelerometer sensor เข้าด้วยกัน จนเป็นอุปกรณ์ระบบที่ถูกบัดกรีและบรรจุลงในตัวกล่องดังแสดงในรูปที่ 7 (a และ b) ส่วนรูปที่ 8 เป็นภาพรวมการเชื่อมต่ออุปกรณ์จริงของระบบ โดยเริ่มจากการต่อแบตเตอรี่เข้ากับขา raw ของ Arduino pro-mini เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนไฟ 9V ให้เหลือ 5V เนื่องจาก Arduino pro-mini และ accelerometer GY-61 ไม่สามารถรับไฟเกิน 5V ได้ ดังนั้นจึงต้องแทนการใช้ไฟ 5V จากขา VCC ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟไปเลี้ยงอุปกรณ์ทุกตัวในระบบ

ทั้งนี้อินพุตของระบบจะเริ่มจากขา trig และขา echo ของ ultrasonic sensor ทั้งสองต่อเข้ากับขา D9-D12 ซึ่งเป็นอินพุตของ Arduino pro-mini โดยทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับระยะของสิ่งกีดขวาง ขา X, Y และ Z ของ accelerometer sensor ที่ต่ออยู่กับขา A0, A1 และ A2

ตามลำดับ อันเป็นขาอินพุตนาฬิกาของ Arduino pro-mini เพื่อประมวลผลการกัม เยของศีรษะโดยแรกสุดจะกำหนด default ค่า 0 ของทั้ง 3 แกนไว้ที่ศีรษะตรง เมื่อมีการกัม เย ศีรษะเกิดขึ้นบนแกนใด ๆ แล้ว accelerometer sensor จะส่งค่าผลต่างของแกนนั้น ๆ ไปที่ Arduino pro-mini เพื่อเปรียบเทียบกับค่าตรวจเจอผลสะท้อนกลับ ของ ultrasonic sensor แล้วได้ผลเปรียบเทียบก่อนส่ง ค้นหาไฟล์เพื่อแจ้งเตือนว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านล่าง/บน/หน้าเป็นระยะทางนั้น ๆ (เมตร) ส่วนขาบวกของ vibration motor กับ buzzer จะต่อเข้ากับขา D7 และ D8 เพื่อเป็นเอาต์พุตของ Arduino pro-mini ที่จะส่งกระแสไฟให้แก่ อุปกรณ์แจ้งเตือนทั้งสอง มีสวิตช์ต่อเข้ากับขา D6 เป็นอินพุต โดยสวิตช์จะต่อกับตัวต้านทาน pull-down เพื่อให้ได้ลอจิกที่แน่นอน

ส่วน embedded MP3 module จะสื่อสารกับ Arduino pro-mini ผ่านทางขา D3-D4 ซึ่งเป็นขา Rx และ Tx ที่สื่อสารแบบอนุกรมที่ได้กำหนดขึ้นมาใหม่และมีขา busy เป็นขาบอกสถานะของโมดูลเสียงว่าพร้อมเล่นไฟล์เสียงหรือไม่ ที่ต่อเข้ากับขา D5 ส่วนขา PH_R กับ PH_L เป็นเอาต์พุตเสียงต่อกับแจ็ค 3.5 mm สำหรับเสียบหูฟัง เพื่อส่งเสียงแจ้งเตือน

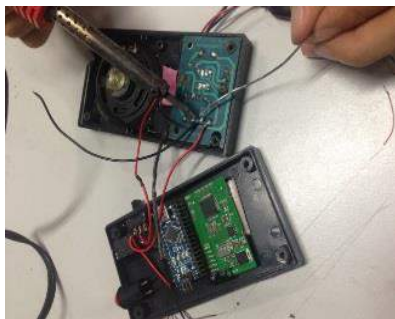


(a) testing with all devices on breadboard



(b) drilling with drill box

รูปที่ 6 ดำเนินการทางฮาร์ดแวร์

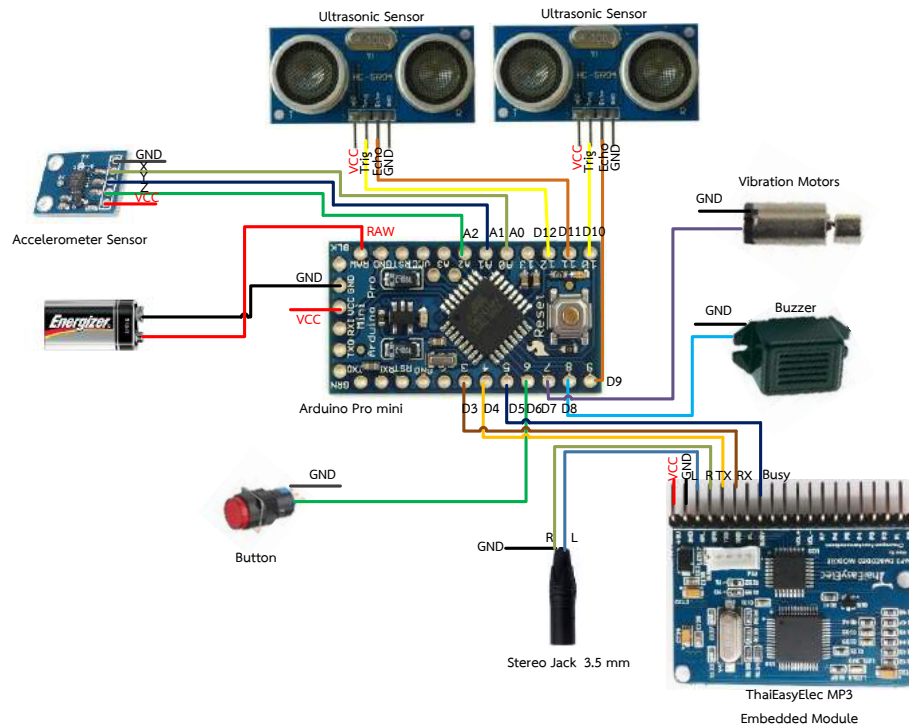


(a) connecting devices



(b) completed welding

รูปที่ 7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์

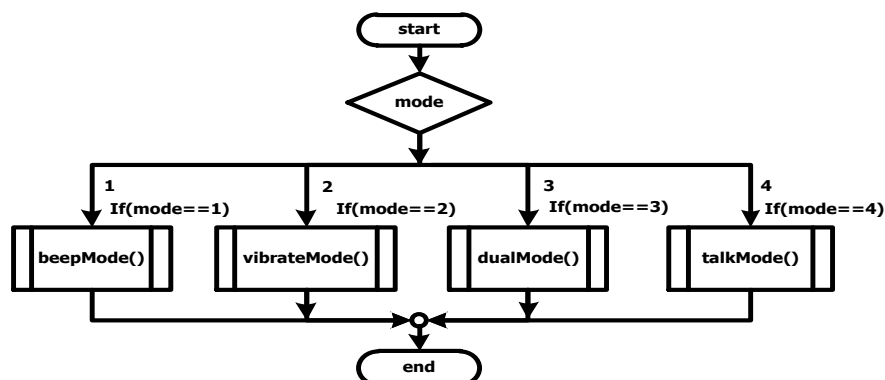


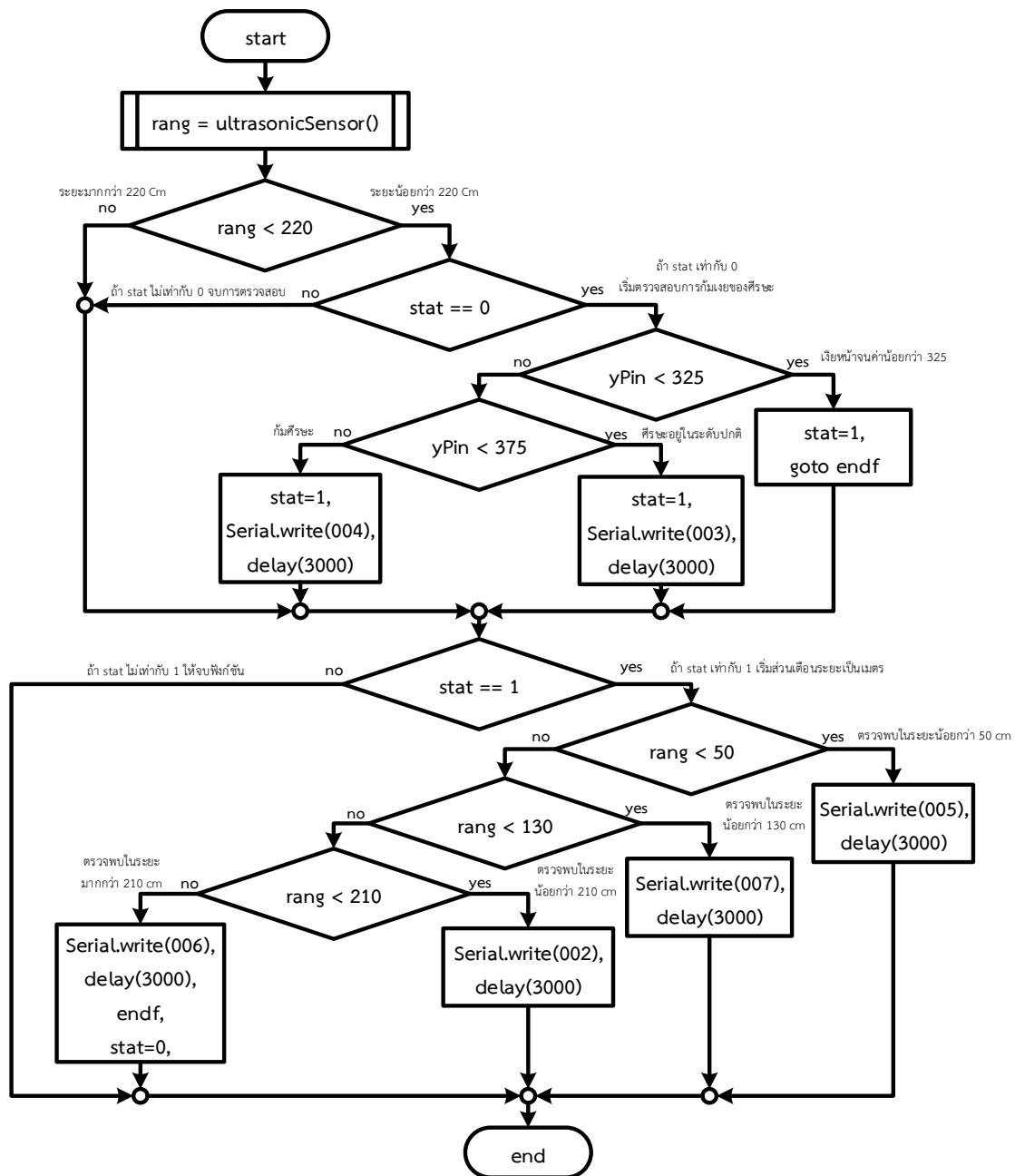
รูปที่ 8 ภาพรวมของการเชื่อมต่ออุปกรณ์

2.5 ดำเนินการด้านซอฟต์แวร์

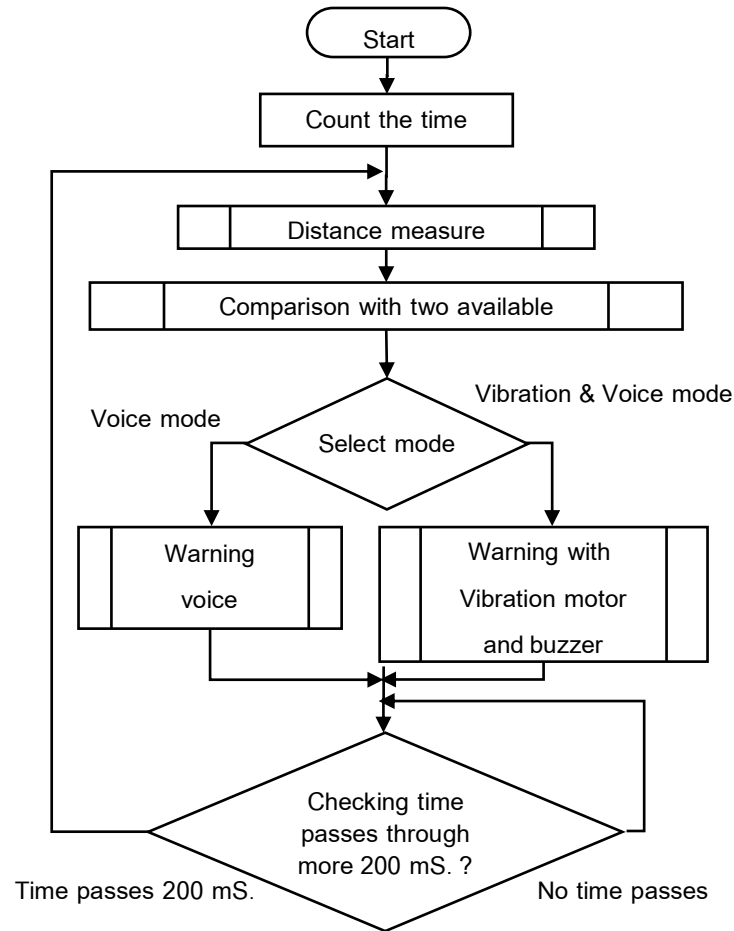
เริ่มจากโฟลว์ชาร์ตหลักที่เขียนด้วยภาษาซี โดยใช้ฟังก์ชัน `gen.Mode()` ทำหน้าที่รับนับเลขตั้งแต่ 1 ถึง 4 ที่เกิดจากการกดสวิตช์ โดยค่าในตัวแปร `mode` จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกดสวิตช์และปล่อยสวิตช์เพื่อป้องกันการ debounce แล้วส่งค่าในตัวแปร `mode` ไปยังฟังก์ชัน `select.Mode()` ดังในรูปที่ 9 ซึ่งฟังก์ชันนี้ จะทำหน้าที่ไปตามค่าตัวเลขในตัวแปร `mode` ที่จะถูกเลือกของ 4 mode ตัวแปร คือ `beep.Mode()` `vibrate.Mode()` `dual.Mode()` และ `talk.Mode()` โดยผ่านเงื่อนไขแบบ switch - case เพื่อไปทำงานในฟังก์ชันหรือตามหมายเลขในตัวแปร `mode` ที่เลือกไว้ จากฟังก์ชัน `select.Mode()` (ขอยกเป็นกรณีตัวอย่าง) เมื่อเลือก `talk.Mode()` แสดงได้ในรูปที่ 10 ซึ่งฟังก์ชันนี้มี

การเตือนเป็นเสียงพูดโดยจะตรวจสอบ ระยะทางของสิ่งกีดขวาง (ฟังก์ชันอื่นก็เช่นกัน) โดยใช้ฟังก์ชัน `ultrasonic.sensor` แล้วเก็บค่าไว้นในตัวแปร `rang` ถ้าเงื่อนไขค่าของ `yPin` มีค่าน้อยกว่าที่กำหนดจะไม่มีการเตือน ถ้ามองไปข้างหน้าในระดับสายตาตามที่กำหนดไว้ของเงื่อนไขจะมีเสียงแจ้งเตือนว่า “มีสิ่งกีดขวางอยู่ข้างหน้า” และถ้าก้มหน้าจนค่าของ `yPin` มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จะมีเสียงแจ้งเตือนว่า “มีสิ่งกีดขวางอยู่ข้างล่าง” ซึ่งขบวนการนี้เป็นการแยกแยะว่าวัตถุอยู่ในระดับสายตาหรือต่ำกว่า แล้วจึงมีเสียงเตือนว่า วัตถุนั้นอยู่ห่างกี่เมตร โดยเริ่มแจ้งเตือนตั้งแต่ 2 m แล้วก็ 1 m ตามลำดับ จนถึงระยะต่ำกว่า 0.5 m แล้วค่อยแจ้งเตือนว่า “จะชนแล้ว” หากผู้ใส่แว่นหลบจากวัตถุ ฟันแล้วก็จะแจ้งเตือนว่า “ฟันแล้ว”

รูปที่ 9 ผังงานของฟังก์ชัน `select.Mode()`



รูปที่ 10 ผลงานของฟังก์ชัน talk.Mode ()



รูปที่ 11 กระบวนการของระบบ

โดยเสียงแจ้งเตือนเหล่านี้จะถูกเข้ารหัสแบบ MP3 เก็บไว้ใน SD card แล้ว Arduino nano จะเลือกใช้ฟังก์ชัน serial.write() เพื่อส่งงานไปยังอุปกรณ์ embedded MP3 module ให้เลือกไฟล์ที่ตรงกับการทำงาน ณ ปัจจุบัน นำมาถอดรหัสเป็นเสียงพูด

ส่วนการแก้ปัญหาด้านเสียงพูดเตือนที่ล่าช้านั้นทำได้โดยเปลี่ยนจาก Arduino nano มาประยุกต์ใช้คำสั่ง delay สำหรับของ Arduino pro-mini เข้ามาช่วยแทน โดยจากที่มีการทำงานแบบ Sequence อันต้องรอคำสั่งก่อนหน้านั้นให้ประมวลผลให้เสร็จไปก่อนแล้ว ถึงจะมาเริ่มทำคำสั่งใหม่ไปตามลำดับขั้นตอน ซึ่งจะทำให้เกิดความหน่วงล่าช้าของโปรแกรมขึ้นได้ การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยใช้หลักการของ multithreading เข้ามาช่วยและถึงแม้หลักการการทำงานแบบ multithreading ใน Arduino pro-mini นั้นไม่สามารถใช้ threading ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประยุกต์ใช้คำสั่ง millis() เข้ามาช่วยแทนในการเขียนโปรแกรม ซึ่งทำให้เหมือน Arduino ทำงานหลาย ๆ อย่างได้พร้อมกัน เพราะคำสั่ง millis() ก็คือการกำหนดค่าเวลาของ Arduino นั่นเอง

การทำงานของระบบที่ปรับปรุงแก้ไขขึ้นใหม่นี้จะแสดงให้เห็นเฉพาะส่วนที่เริ่มต้นจากการเริ่มนับเวลาในหนึ่งรอบกำหนด คือ 1 - 200 mS (milli - Seconds) ซึ่งจะเริ่มการทำงานในตอนแรกที่ ultrasonic sensor ทั้งสองวัดระยะทางแล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ทั้งสองค่าตรวจสอบและตัดสินใจว่าจะให้ทำงานต่อไปหรือไม่ หากผลเปรียบเทียบไม่ผ่านก็ให้โปรรับอีก 200 mS แต่ถ้าผลเปรียบเทียบค่าผ่านแล้ว ก็จะเข้าสู่การเลือกโหมด ซึ่งประกอบด้วย 2 โหมดระบบการทำงานที่สร้างขึ้นใหม่แสดงได้ดังในรูปที่ 11

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการทดลองวัดระยะทางด้วย ultrasonic sensor

มีการคำนวณหาระยะทางของสิ่งกีดขวางที่อยู่ข้างหน้า ultrasonic sensor โดยภาคส่งจะส่งคลื่นออกไป ณ เวลา T_1 เมื่อคลื่นตกกระทบวัตถุ แล้วสะท้อนกลับมา ภาครับก็จะได้รับคลื่นนั้น ณ เวลา T_2 ซึ่งจะได้ผลต่างของเวลาเป็น $(T_2 - T_1)$ หรือ ΔT แล้วสามารถนำมาคำนวณหาระยะทางที่วัดได้ (distance₁) จากนั้นนำไปหาร 2 และเปลี่ยนหน่วยเป็น

cm (เซนติเมตร) จากการหารด้วยความเร็วเสียงต่อเซนติเมตร คือ 29.4 μ S/cm ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังในสมการที่ (1) และการหาเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังในสมการที่ (2)

$$\text{Distance}_1 = (\Delta T / 2) / 29.4 \quad (1)$$

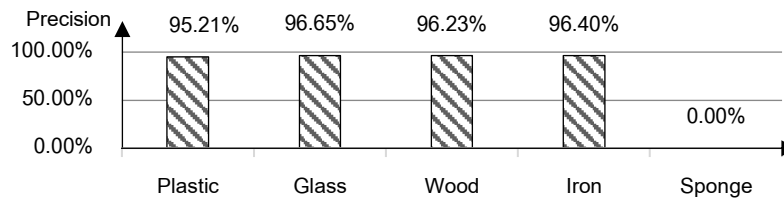
$$\text{ค่าความแม่นยำ} = 100\% - \left| \frac{(\text{Distance}_1 - \text{Distance}_2)}{\text{Distance}_2} \right| \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ ΔT คือ ผลต่างของเวลา $T_2 - T_1$

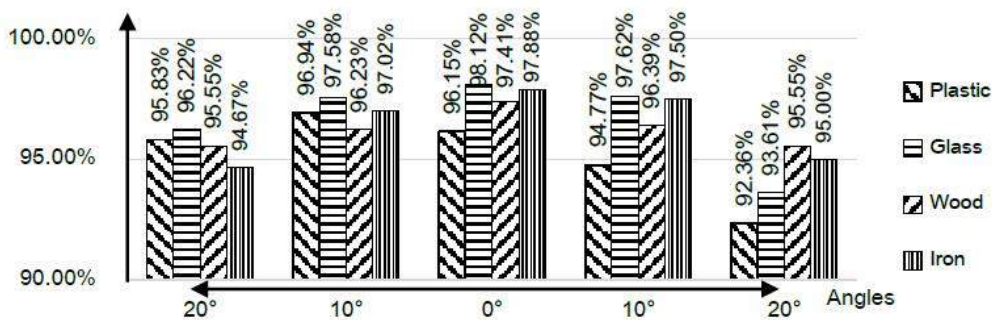
Distance_1 คือ ระยะทางที่วัดได้ หน่วยเป็น cm.

Distance_2 คือ ระยะทางจริง หน่วยเป็น cm.

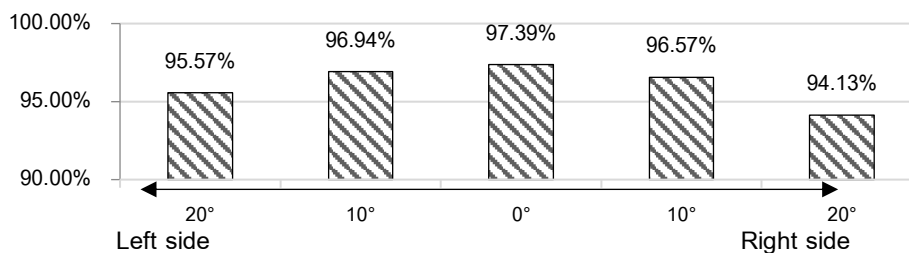
ซึ่งผลการทดลองจากพื้นฐานการใช้สมการดังกล่าวกับการใช้สนามทดสอบถูกนำมาพล็อตเป็นกราฟดังในรูปที่ 12 ถึง 15 ตามลำดับ



รูปที่ 12 ความแม่นยำเฉลี่ยของคลื่นสะท้อนจากทุกมุมสำหรับวัตถุทั้ง 5 ชนิด



รูปที่ 13 ค่าความแม่นยำของการวัดระยะทางในแต่ละองศาของวัตถุ 4 ชนิด



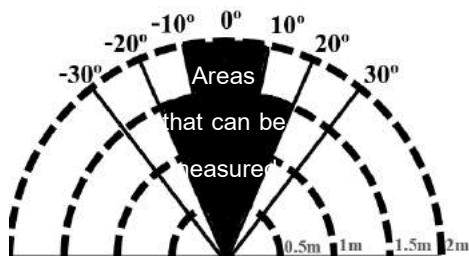
รูปที่ 14 การวัดระยะทางที่แม่นยำโดยใช้ค่าเฉลี่ยของวัตถุ 4 ชนิด

3.2 อภิปรายผลการวัดระยะทางด้วย ultrasonic sensor

การทดสอบเพื่อวัดระยะทางด้วย ultrasonic sensor ในระบบพิสูจน์การสะท้อนของวัตถุที่ถูกนำมาวางกีดขวาง จากการสร้างสนามทดสอบ เพื่อหาระยะทางและหาระยะการทำงานจากระบบโดยใช้วัตถุ 5 ชนิด เป็นตัวแทนสิ่งกีดขวางที่รองรับการตกกระทบคลื่น คือ 1) ฟองน้ำ 2) กระดาษ 3) ไม้ 4) เหล็ก และ 5) ขวดน้ำพลาสติก

โดยผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของการสะท้อนคลื่นจากทุกองศาสำหรับทั้ง 5 วัตถุที่แสดงในรูปที่ 12 นั้นมีผลลัพธ์

ชี้ให้เห็นว่า เฉพาะฟองน้ำเท่านั้นที่ไม่มีการตอบสนองใด ๆ ต่อการทำงานของระบบ ในขณะที่ 4 ชนิดของวัตถุที่เหลือจะมีผลตอบสนองต่อระบบ โดยผลค่าความแม่นยำด้านการวัดระยะทางในแต่ละองศาของวัตถุ 4 ชนิดดังถูกอ้างถึงในรูปที่ 13 ส่วนผลค่าความแม่นยำระยะทางโดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยของวัตถุทั้ง 4 ชนิดนี้ถูกอ้างถึงในรูปที่ 14 และส่วนบริเวณย่านที่สามารถวัดได้ของระบบที่มี ultrasonic sensor จากทั้งสอง clip-on ถูกอ้างถึงในรูปที่ 15 ซึ่งมีรัศมีแผ่ระยะห่างผลได้เฉพาะส่วนที่แรงเสียดทานเท่านั้น



รูปที่ 15 พื้นที่ที่วัดได้ของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกจากคู่มือของ clip-on

3.3 ผลการทดลองจากผู้ใช้งาน

มีการทดลองกับผู้ใช้งาน 40 คนโดยแบ่งเป็นกลุ่มผู้สายตาสั้น 30 คนที่ใช้ผ้าปิดตา และกลุ่มผู้บกพร่องทางการมองเห็น 10 คน ซึ่งรูปที่ 16 แสดงตำแหน่งการสวมใส่อุปกรณ์ และการทดสอบเดินตรงเข้าไปหาสิ่งกีดขวางขณะปิดตาของผู้มีตาสั้นที่ได้ประเมินการใช้งานโดยใช้แบบสอบถาม ส่วนผู้บกพร่องทางการมองเห็นก็ใช้การทดลองเช่นเดียวกัน โดยรูปที่ 17 เป็นบรรยากาศโดยรวมระหว่างทดสอบกับผู้บกพร่องทางการมองเห็น อีกทั้งมีผลการวัดความแม่นยำดังแสดงในตารางที่ 1 ถึง 2 และกราฟในรูปที่ 18

3.4 อภิปรายผลการทดลองจากผู้ใช้งาน

ผลการประเมินสามารถให้ผลลัพธ์งานวิจัยเพิ่มเติมนี้ (Current) เทียบกับงานวิจัยเดิม (Past [2]) ทางด้านผลความแม่นยำเมื่อวัดในระยะทางที่ต่างกันตั้งแต่ 3 m จนถึง 1 m โดยถูกอ้างอิงในตารางที่ 1 สามารถให้ความแม่นยำได้สูงถึง 96.67% ที่ระยะ 3 m. ในขณะที่ผลประเมินด้านความสะดวกคล้องตัวกรณีสวมใส่แว่นตาที่มี clip-on กับไม่มี clip-on ที่ถูกอ้างอิงในตารางที่ 2 เมื่อเทียบกับงานวิจัยเดิม จะเห็นได้ว่ามีความคล้องตัวได้สูงกว่า

จากผลประเมินแบบสอบถามเปรียบเทียบโดยภาพรวมจากทั้งผู้สายตาสั้นและผู้บกพร่องทางการมองเห็นที่แสดงเป็นกราฟแท่ง ดังรูปที่ 18 ใน 6 ประเด็นของด้านความปลอดภัยขณะใช้งานได้ 91.94% และ 89.58% ด้านความพึงพอใจการออกแบบได้ 85.55% และ 77.90% ด้านความแม่นยำในการวัดระยะทางได้ 93.61% และ 85.41% ด้านความสามารถแจ้งเตือนด้วยเสียงพูดเร็วขึ้นทันเหตุการณ์ได้ 94.16% และ 87.50% ความสะดวกใช้งานกระชับสะดวกคล้องตัวกรณีสวมใส่แว่นตาได้ 89.38% และ 79.68% รวมถึงด้านความสมเหตุสมผลของราคาต้นทุน 91.66% และ 87.50% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีตามลำดับ



Front



Lateral



Attached waist



Press a button



Walk test

รูปที่ 16 ตำแหน่งการสวมใส่แว่นตาและการทดสอบอุปกรณ์



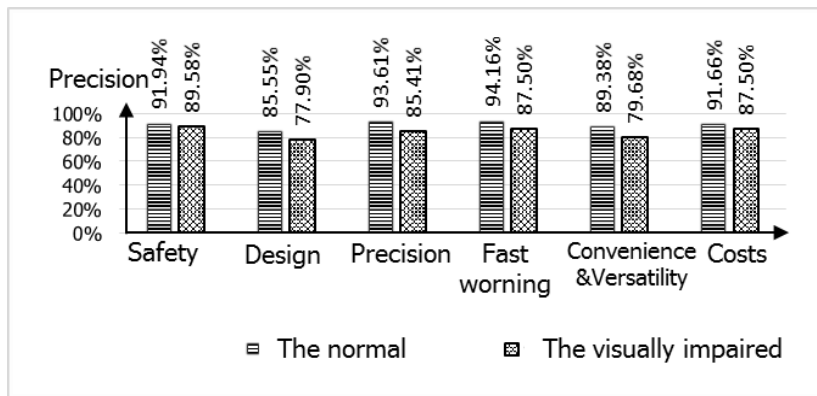
รูปที่ 17 บรรยากาศการทดสอบกับนักเรียนผู้มีความบกพร่องทางการมองเห็น

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การวัดความแม่นยำในรูปแบบที่ต่างกันโดยสิ้นเชิง

Vision of test subjects	Distant of 1 m		Distant of 2 m		Distant of 3 m	
	Past [2]	Current	Past [2]	Current	Past [2]	Current
Normal	-	91.67 %	-	92.50%	85.00%	96.67%
Visually impaired	-	81.25 %	-	87.50%	93.05%	93.75%

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การประเมินเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายได้ง่าย

Vision of test subjects	Convenience and versatility of wearing glasses	
	Past research without the clip-on	Current research with the clip-on
Normal	87.50%	89.38%
Visually impaired	90.27%	79.68%



รูปที่ 18 ผลการประเมินทั้งหมดจากผู้มีสายตาปกติและผู้มีความบกพร่องทางการมองเห็น

3.5 ผลงานงานวิจัยที่ทำได้

ผลงานงานวิจัยที่ทำได้มีอยู่ 8 ประเด็นดังนี้

- 1) พัฒนาแว่นตาแจ้งเตือนเมื่อมีสิ่งกีดขวางในระดับสายตา จรระดับเอว ระยะ 3 m มีระยะห่างผลที่ 2 m มีความคลาดเคลื่อนการวัดระยะทางไม่เกิน ± 10 cm
- 2) ใช้ ultrasonic sensor ตรวจจับ 2 ชุดที่ทำงานร่วมกัน เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวัดระยะทาง แต่ไม่สามารถเพิ่มรัศมีในการวัดได้
- 3) มีเสียง 5 โหมด คือ เสียงบีบเตือน สั่นเตือน เสียงบีบเตือนพร้อมสั่นเตือน เสียงพูดภาษาไทย เสียงพูดภาษาอังกฤษ
- 4) มีการแจ้งเตือนตามระยะใกล้ หรือไกลได้ โดยใช้ระยะเป็นตัวกำหนดจังหวะ ซึ่งในโหมดเสียงบีบเตือนพร้อมสั่นนั้น มีจังหวะความถี่ในการแจ้งเตือนที่ไวที่สุดคือ 200 ms และจังหวะในการแจ้งเตือนที่นานที่สุดประมาณ 1S

5) ในโหมดเสียงพูด สามารถถูกเลือกให้แจ้งเตือนเป็นเสียงภาษาไทยหรืออังกฤษได้ ซึ่งจะเริ่มแจ้งเตือนระยะทางที่ 2 m 1 m และ 50 cm ตามลำดับ

6) ในโหมดเสียงพูด จะแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางที่อยู่ต่ำกว่า / เหนือกว่าศีรษะได้ แต่ต้องเงยหรือก้มหน้าเพื่อสำรวจวัตถุ เพราะรัศมีในการค้นหาของ ultrasonic sensor กว้างไม่พอ อันเป็นขีดจำกัดของบริษัทผู้ผลิต

7) ได้พิสูจน์ให้ทราบว่าวัสดุพองน้ำไม่สามารถตอบสนองหรือสะท้อนคลื่น ultrasonic ที่ส่งออกทุกๆ องศาของระบบ แว่นตาแจ้งเตือน โดยมีการทดสอบวัดความแม่นยำแล้วนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการวัดความแม่นยำของกระจก ไม้เหล็ก และขวดน้ำพลาสติก ตามลำดับ

8) ได้แนวทางส่งเสริมคุณภาพชีวิตผู้บกพร่องทางการมองเห็นให้พึ่งพาตนเองได้ สอดคล้องกับคติพจน์ “อยู่อย่างมีประโยชน์และไม่เป็นภาระต่อสังคม”



4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแว่นตาแจ้งเตือนเพื่อช่วยผู้บกพร่องทางการมองเห็นโดยแจ้งเตือนเป็นเสียงพูดได้ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ มีการใช้ ultrasonic sensor เป็นตัวตรวจจับสิ่งกีดขวาง มีการทดสอบความแม่นยำระยะทางสะท้อนคลื่นจาก 5 วัตถุ มีการทดสอบใช้งานจากอาสาสมัครทั้งคนสายตาปกติและผู้บกพร่องทางการมองเห็น มีแบบสอบถาม 6 ด้าน ซึ่งผลลัพธ์การประเมินอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ศิริพร วงศ์จุฬโรจน์ และคณะ จากโรงเรียนสอนคนตาบอดภาคเหนือในพระราชนิอุปถัมภ์ จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ และขอขอบคุณโครงการ HRS2015 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่ให้ทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] พรพรรณ ชินณพงษ์. 2553. ทักษะชีวิตของผู้บกพร่องทางสายตาต่อการเข้าถึงสภาพแวดล้อม. วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม / การผังเมือง 7(2): 141-157.
- [2] ยุพดี หัตถสิน ญัฐพงศ์ ชุ่มแสง และศุภชัย ยิ่งแก้ว. 2557. แว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้บกพร่องทางสายตา. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ EENET 2014, กระบี่, 4 หน้า.
- [3] ยุพดี หัตถสิน ญัฐวัฒน์ พยาราชกูร์ ชาญณรงค์ ธรรมเสนา และสิริพงษ์ มาทาเม. 2558. การทดสอบระบบตรวจจับเพื่อความปลอดภัยสำหรับผู้บกพร่องทางสายตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้บกพร่องทางสายตา. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ EENET 2015, ชลบุรี, หน้า 85-88.
- [4] ยุพดี หัตถสิน ญัฐวัฒน์ พยาราชกูร์ และชาญณรงค์ ธรรมเสนา. 2558. พัฒนาระบบเสียงและการทดสอบระบบตรวจจับวัตถุในโครงการแว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้บกพร่องทางสายตา. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ NCCIT 2015, กรุงเทพฯ., หน้า 553-558
- [5] สิทธิชัย จันทิมพะ และมนู กวางแก้ว. 2553. ไม่เท่าพูดได้สำหรับผู้มีความบกพร่องทางสายตา. วารสารการไฟฟ้าและระบบควบคุม 9(52): 35-36.

การออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแถบความถี่กว้างสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินภายในอาคาร

Design of Broadband Patch Dipole Antenna for Indoor Digital Terrestrial Television Reception

ศุภกิต แก้วดวงตา^{1*}, นฤดม บางแก้ว¹, ระพี วรรณเลิศ¹ และชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

² ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Supakit Kawdungta^{1*}, Naruedom Bangkaew¹, Rapee Wunnaleart¹ and
Chuwong Phongcharoenpanich²

¹ Department of Electronic and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai

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

² Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

No.1, Chalong Krung Road, Ladkrabang Sub-district, Ladkrabang district, Bangkok 10520

*ผู้รับผิดชอบบทความ: supakitting@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0865659485

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบแผ่นที่มีแถบความถี่กว้างเพื่อใช้สำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ระบบดิจิทัลภาคพื้นดินเพื่อใช้ภายในอาคาร ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ 470-790 MHz ตามข้อกำหนดของประเทศไทย โดยได้ทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศ 2 แบบ ที่มีขนาดโดยรวมแตกต่างกัน ซึ่งสายอากาศทั้งสองแบบมีโครงสร้างเป็นไดโพลแบบแผ่นที่คั่นกลางด้วยช่องว่างและวางตัวอยู่บนวัสดุฐานรอง จากการออกแบบพบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เข้าใกล้ $75\ \Omega$ มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบทิศทางด้วยโพลาริเซชันแนวนอนและมีอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi จากการสร้างและทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบพบว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เข้าใกล้ $75\ \Omega$ มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 470-790 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบทิศทางด้วยโพลาริเซชันแนวนอนและมีอัตราขยายมากกว่า 2 dBi ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการออกแบบ จากนั้นได้ทดสอบใช้สายอากาศทั้งสองแบบกับเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินภายในอาคาร พบว่าสามารถนำใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ สายอากาศไดโพลแบบแผ่น สายอากาศแถบความถี่กว้าง โทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน

Abstract

This paper presents the design of broadband patch dipole antenna for indoor digital terrestrial television. The proposed antenna can be operated in the frequency of 470-790 MHz according to the requirements of Thailand. Two types of the proposed antenna have been presented that has different total sizes. The patch dipole antenna on the dielectric substrate is separated between two arms by small gap. From the simulated results, the proposed antenna has an input impedance of $75\ \Omega$, $|S_{11}|$ of less than -10 dB, omni-directional pattern, horizontal polarization and 2 dBi gain. The proposed antenna is fabricated and measured. Good agreement is

obtained, compared with the simulated results. Therefore, both prototype antennas can be employed for the digital terrestrial television and can be efficiently operated in the indoor environment.

Keywords: Broadband patch dipole antenna, Digital terrestrial television, Patch dipole antenna.

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการริเริ่มแพร่สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน ทั้งนี้เพื่อการพัฒนาด้านคุณภาพการรับชมทั้งภาพและเสียงที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น มีจำนวนช่องสำหรับการเลือกรับชมได้มากขึ้น และสามารถจัดสรรคลื่นความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ ได้มีการปรับเปลี่ยนช่วงความถี่ในการแพร่กระจายสัญญาณไปด้วยเพื่อให้เกิดการซ้อนทับกันกับการแพร่สัญญาณโทรทัศน์อนาล็อกเดิมซึ่งแพร่กระจายสัญญาณอยู่ในช่วงความถี่ 47 - 68 MHz และ 174 - 230 MHz โดยการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินนี้ได้มีการกำหนดให้ใช้ช่วงสัญญาณความถี่ที่ 470 - 582 MHz และ 582 - 790 MHz ตามข้อกำหนดของประเทศไทย โดยใช้มาตรฐานการแพร่สัญญาณของ Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2) [1]

จากที่กล่าวมาสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีการใช้งานช่วงความถี่ที่แตกต่างกันไปฉะนั้นจึงเป็นผลให้อุปกรณ์การรับชมโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินต้องมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะต้องมีการเพิ่มกล่องรับสัญญาณดิจิทัล (Set Top Box) สำหรับกรณีที่เครื่องรับโทรทัศน์อนาล็อกเดิมหรือหากเป็นเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลอยู่แล้วก็ไม่จำเป็นต้องใช้กล่องรับสัญญาณดังกล่าว อย่างไรก็ตามสิ่งหนึ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปคือ สายอากาศ ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่เป็นปัจจัยหลักในการรับชมสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน จึงเป็นสาเหตุให้มีการคิดค้นพัฒนาและออกแบบสายอากาศสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินออกมาอย่างแพร่หลายทั้งในรูปแบบของงานวิจัยและการพัฒนาเพื่อการค้า โดยแต่ละแบบนั้นต่างก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันออกไปดังจะกล่าวต่อไป เริ่มจากสายอากาศยี่ห้อที่นิยมใช้ในการรับสัญญาณโทรทัศน์อนาล็อกเดิมมาตั้งแต่ในอดีต ซึ่งในปัจจุบันก็ยังคังนิยมใช้กันอยู่เนื่องจากมีอัตราการขยายสูงและมีช่วงความถี่ที่กว้างจึงได้มีการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของตัวสายอากาศให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ของโทรทัศน์ดิจิทัลดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [2] แต่สายอากาศชนิดนี้มีข้อเสียคือขนาดค่อนข้างใหญ่และยากต่อการติดตั้งใช้งานโดยเฉพาะภายในอาคาร

จากข้อเสียของสายอากาศยี่ห้อที่ได้อีกกล่าวมาข้างต้นจึงได้มีการคิดค้นพัฒนาสายอากาศที่มีลักษณะเป็นแผ่นและ

สายอากาศที่สร้างมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) ที่มักเรียกกันว่าสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาเหมาะกับการติดตั้งใช้งานในอาคารหรือแม้กระทั่งการออกแบบให้ซ่อนอยู่ภายในเครื่องใช้ไฟฟ้าก็สามารถทำได้ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [3] - [6] ในปี ค.ศ. 2007 Y.-W. Chi และคณะได้มีการนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบวางตัวอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 และมีลักษณะการป้อนสัญญาณแบบช่องว่างรูปทรงขั้นก้าว (Step-Shape Feed Gap) จากผลการออกแบบสายอากาศดังกล่าวสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 470 - 806 MHz และมีขนาดความกว้างเท่ากับ 20 mm ความยาวเท่ากับ 227 mm และความหนาเท่ากับ 0.4 mm ซึ่งถือได้ว่ามีขนาดเล็ก กะทัดรัดเป็นอย่างมาก และเหมาะสมกับการติดตั้งใช้งานภายในอาคารและภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [3] ถัดมาเป็นการนำเสนอการออกแบบสายอากาศไดโพลแถบความถี่กว้างและมีขนาดเล็กกะทัดรัดด้วยซึ่งนำเสนอโดย H.-D. Chen โดยในการออกแบบนั้นได้ใช้เทคนิคการขดลวดในแนวตั้งบนลายทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์ร่วมกับแกนโมโนโพลช่วยที่เชื่อมต่อกับระนาบกราวด์และป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปทำให้สายอากาศนี้มีขนาดเล็กและสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 470 - 862 MHz และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบทิศทางด้วยอัตราการขยายเฉลี่ยประมาณ 2 dBi และมีขนาดความกว้างเท่ากับ 48 mm ความยาวเท่ากับ 114 mm และความหนาเท่ากับ 1.6 mm ซึ่งถือได้ว่ามีขนาดเล็กเช่นกันดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [4] ทั้งนี้อีกหนึ่งเทคนิคที่ถูกนำเสนอในการออกแบบสำหรับสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์คือ การป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) และใช้ตัวแพร่กระจายคลื่นแบบหลายบ่วง (Multiple Loop) บนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ความหนา 1.6 mm โดยสามารถใช้งานได้ครอบคลุมช่วงความถี่ 430 - 1180 MHz ด้วยอัตราการขยายประมาณ 1.78 ถึง 2.83 dBi ตลอดย่านความถี่ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [5] และอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไดโพลที่วางอยู่บนวัสดุฐานรองได้ถูกนำเสนอในเอกสารอ้างอิงที่ [6] คือการใช้สตริปทรงตัวแอลและสตริปเชื่อมต่อ ทำให้ได้สายอากาศที่มีรูปร่างกะทัดรัดและมีช่วงความถี่กว้าง

จากที่กล่าวมาก่อนหน้านี้นั้นเป็นสายอากาศที่มีรูปร่างกะทัดรัดและมีช่วงความถี่กว้าง แต่เนื่องจากในปัจจุบัน

เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและสามารถพกพาได้ จึงได้มีการพัฒนาการออกแบบสายอากาศต่าง ๆ ในลักษณะที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่สามารถพกพาได้ ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [7]-[8] และยังมีการพัฒนาให้สามารถรองรับการใช้งานในช่วงความถี่อื่นได้พร้อมกันอีกด้วย ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [9] ซึ่งสายอากาศที่ออกแบบสามารถรองรับการใช้งานในระบบโทรทัศนดิจิทัลภาคพื้นดิน ระบบแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) และระบบรับส่งสัญญาณในหลายช่องทาง (Multiple Input Multiple Output : MIMO) อย่างไรก็ตามเนื่องจากการแพร่กระจายของสัญญาณในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันเนื่องจากสภาพแวดล้อมและสิ่งกีดขวางต่างๆ ทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้นั้นต่ำมากและมีสัญญาณรบกวนสูงโดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่อยู่ภายในอาคารดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [10] จึงได้มีการเพิ่มวงจรขยายสัญญาณเข้ากับสายอากาศเพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [11] จากที่ได้กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่ามีการพัฒนาสายอากาศสำหรับเครื่องรับโทรทัศนดิจิทัลภาคพื้นดินมาในหลากหลายรูปแบบซึ่งต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งในบทความนี้ก็เป็นอีกบทความหนึ่งที่จะนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบ การสร้างและการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องรับโทรทัศนดิจิทัลภาคพื้นดินเพื่อใช้งานภายในอาคารที่มีลักษณะโครงสร้างกะทัดรัด น้ำหนักเบา สามารถติดตั้งภายในอาคารได้อย่างสะดวกไม่ว่าจะเป็นรูปแบบตั้งโต๊ะหรือติดกับฝาผนัง อีกทั้งสายอากาศที่นำเสนอขึ้นจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทาง (Omni-Directional Pattern) ด้วยอัตราขยายเท่ากับ 2 dBi เพื่อที่จะสามารถรับสัญญาณที่เข้ามาได้ในทุกทิศทางและมีโพลาไรเซชันแนวนอน (Horizontal Polarization) ที่เป็นแนวเดียวกับโพลาไรเซชันที่ส่งมาจากเครื่องส่งสัญญาณ

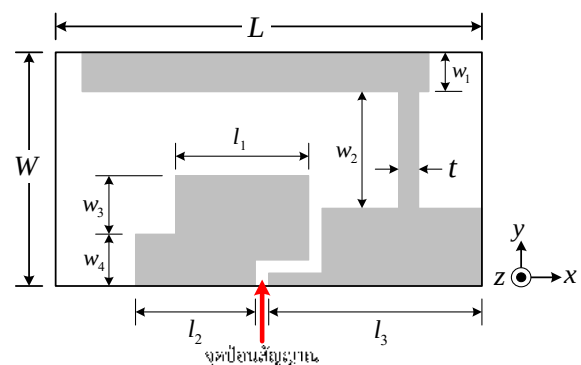
โดยในบทความนี้จะกล่าวแยกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ หัวข้อที่สองจะกล่าวถึงโครงสร้างและผลการจำลองสายอากาศไดโพลแบบแผ่นที่มีแถบความถี่กว้าง ในส่วนของผลการสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อที่สาม และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงสรุปผลของการออกแบบและการทดสอบ

2. โครงสร้างของสายอากาศและการออกแบบ

การออกแบบสายอากาศภายในอาคารสำหรับเครื่องรับโทรทัศนดิจิทัลภาคพื้นดินในบทความนี้จะออกแบบด้วยการใช้โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบแผ่นซึ่งด้วยโครงสร้างลักษณะดังกล่าวจะสามารถตอบสนองย่านความถี่ที่กว้างและการออกแบบในบทความนี้จะนำเสนอสายอากาศไดโพลแบบแผ่นสองแบบที่มีลักษณะการป้อนสัญญาณและขนาดโดยรวม

แตกต่างกันซึ่งแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าสายอากาศไดโพลแบบแผ่นมีลักษณะโครงสร้างที่มีแผ่นตัวนำสองแผ่นที่แตกต่างกันวางห่างกันด้วยระยะห่างที่เหมาะสมและแผ่นตัวนำทั้งสองจะวางตัวอยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งด้านล่างของวัสดุฐานรองนั้นจะไม่มีแผ่นตัวนำใดๆ อยู่

จากสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบบที่หนึ่งซึ่งแสดงในรูปที่ 1 จะมีลักษณะโดยรวมเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแผ่นตัวนำสองแผ่นที่มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่แตกต่างกันวางตัวอยู่บนวัสดุฐานรองแบบไม่สมมาตรด้วยระยะห่างที่เหมาะสมเท่ากับ 3 mm ซึ่งส่วนของระนาบกราวด์จะอยู่ทางซีกขวาและแผ่นตัวนำอยู่ทางซีกซ้าย จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศดังกล่าวทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 1



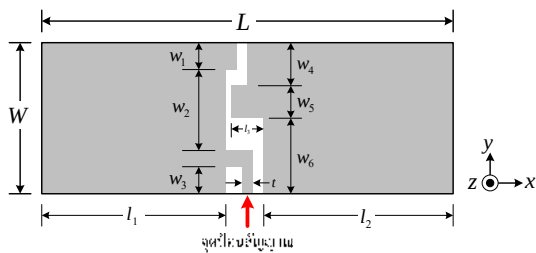
รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นสำหรับเครื่องรับโทรทัศนดิจิทัลภาคพื้นดินแบบที่หนึ่ง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบบที่หนึ่ง

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (mm)
W	150	w_4	49
L	300	l_1	75
w_1	22	l_2	91
w_2	83	l_3	146
w_3	45	t	10

จากสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบบที่สองซึ่งแสดงในรูปที่ 2 จะมีลักษณะโดยรวมเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเช่นกันและมีแผ่นตัวนำสองแผ่นที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางตัวอยู่บนวัสดุฐานรองแบบสมมาตรด้วยระยะห่างที่เหมาะสม ซึ่งส่วนของระนาบกราวด์จะอยู่ทางซีกขวาและแผ่นตัวนำอยู่ทางซีกซ้าย จากการใช้โปรแกรมจำลองเพื่อวิเคราะห์

คุณสมบัติของสายอากาศดังกล่าวทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินแบบที่สอง

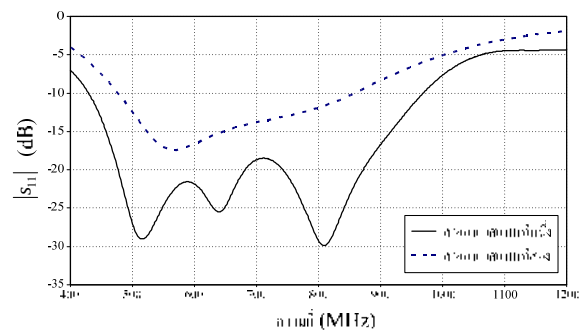
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแบบที่สอง

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (mm)	พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (mm)
W	50	w_5	10
L	250	w_6	25
w_1	9	l_1	126
w_2	26	l_2	122
w_3	10	l_3	11
w_4	15	t	1

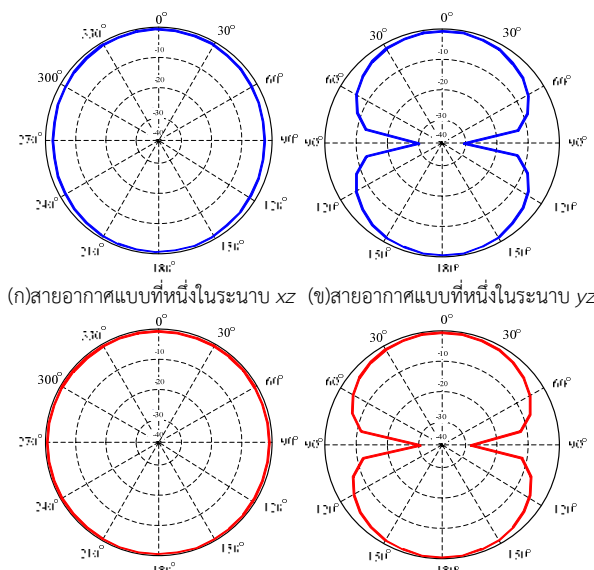
จากผลการออกแบบสายอากาศทั้งสองแบบโดยมุ่งเน้นให้คุณสมบัติของสายอากาศทั้งสองให้สามารถทำงานในช่วงความถี่ 470-790 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบทิศทาง (Omni-direction Pattern) ตลอดช่วงความถี่ใช้งานทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศทั้งสองแบบที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ด้วยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ทำให้สายอากาศที่ทำการออกแบบมีคุณสมบัติดังแสดงในรูปที่ 3 ถึง 4 ตามลำดับ

จากการออกแบบสายอากาศทั้งสองแบบพบว่าสายอากาศแบบที่หนึ่งสามารถทำงานในช่วงความถี่ 440-980 MHz เนื่องจากมีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ครอบคลุมในช่วงความถี่ 470-790 MHz และสายอากาศแบบที่สองสามารถทำงานในช่วงความถี่ 465-935 MHz และมีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ครอบคลุมในช่วงความถี่ 470-790 MHz เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากสายอากาศทั้งสองแบบนี้มีโครงสร้างเป็นแผ่นแบนกว้างจึงทำให้สามารถทำงานครอบคลุมช่วงความถี่ที่ค่อนข้างกว้างได้ดีและเห็นได้ว่าสายอากาศทั้งสองแบบนี้สามารถที่จะใช้งานกับระบบเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินได้แต่สายอากาศแบบที่

สองนั้นจะมีช่วงกว้างความถี่น้อยกว่าแบบที่หนึ่งและมีขนาดโดยรวมเล็กกว่า จากรูปที่ 4 แสดงถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และ yz ของสายอากาศทั้งสองแบบพบว่าสามารถแพร่กระจายคลื่นออกมาแบบกึ่งรอบทิศทางทั้งสองแบบเนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบสายอากาศไดโพลและมีลักษณะคล้ายกันในช่วงความถี่ใช้งานเพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จึงแสดงเฉพาะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองแบบที่ความถี่ 600 MHz เท่านั้น ส่วนอัตราขยายของสายอากาศทั้งสองแบบพบว่ามีค่ามากกว่า 2 dBi ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน



รูปที่ 3 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นทั้งสองแบบ



(ก)สายอากาศแบบที่หนึ่งในระนาบ xz (ข)สายอากาศแบบที่หนึ่งในระนาบ yz

(ค)สายอากาศแบบที่สองในระนาบ xz (ง)สายอากาศแบบที่สองในระนาบ yz

รูปที่ 4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นทั้งสองแบบที่ความถี่ 600 MHz

3. การสร้างและผลการทดสอบ

จากผลการจำลองที่ได้ในหัวข้อที่สองได้นำมาทำการสร้างสายอากาศต้นแบบทั้งสองแบบโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองชนิดเอฟอาร์-4 (FR-4) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 และมีความหนา 1.6 mm โดยรูปของสายอากาศ

ต้นแบบทั้งสองได้แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งได้ออกแบบเพื่อใส่กับตัวครอบสายอากาศสองแบบคือ สายอากาศต้นแบบแบบที่หนึ่ง ถูกออกแบบเพื่อใส่กับตัวครอบสายอากาศสำหรับติดตั้งและสายอากาศต้นแบบแบบที่สองถูกออกแบบเพื่อใส่กับตัวครอบสายอากาศแบบตั้งโต๊ะเพื่อความสะดวกในการใช้งานจริงของสายอากาศดังกล่าว



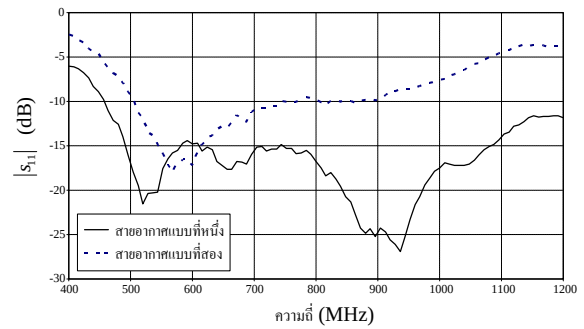
(ก) สายอากาศแบบที่หนึ่ง



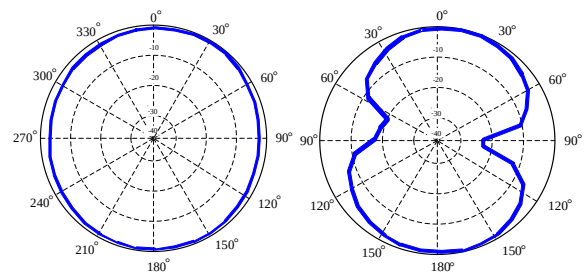
(ข) สายอากาศแบบที่สอง

รูปที่ 5 ต้นแบบของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน

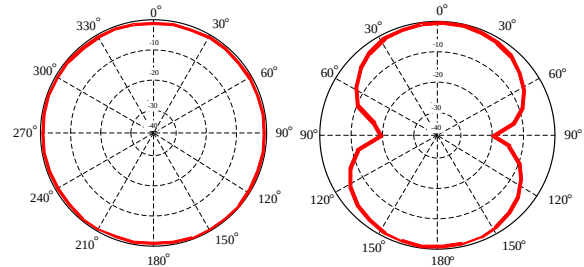
จากนั้นได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รูปที่ 6 แสดงถึงผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบแบบที่หนึ่งและแบบที่สอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างจากผลการจำลองเล็กน้อยแต่ยังคงครอบคลุมช่วงความถี่ 470-790 MHz โดยสายอากาศแบบที่หนึ่งมีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 460-1500 MHz และสายอากาศแบบที่สองมีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ 510-740 MHz อีกทั้งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบทั้งสองมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบกึ่งรอบทิศทางสอดคล้องกับผลการจำลองในหัวข้อก่อน และเพื่อแสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบทั้งสองสามารถใช้งานกับระบบเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงได้นำสายอากาศต้นแบบมาทดสอบในการใช้งานจริงและแสดงผลการรับความแรงของสัญญาณในแต่ละช่องของสัญญาณโทรทัศน์ดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่าสายอากาศต้นแบบทั้งสองสามารถรับความแรงของสัญญาณได้มากกว่า 75% ในทุกช่องสัญญาณโทรทัศน์



รูปที่ 6 ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นทั้งสองแบบ

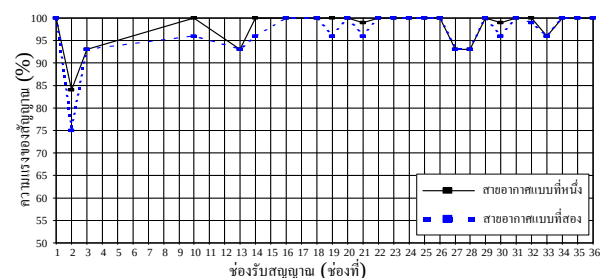


(ก) สายอากาศแบบที่หนึ่งในระนาบ xz (ข) สายอากาศแบบที่หนึ่งในระนาบ yz



(ค) สายอากาศแบบที่สองในระนาบ xz (ง) สายอากาศแบบที่สองในระนาบ yz

รูปที่ 7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแผ่นทั้งสองแบบที่ความถี่ 600 MHz



รูปที่ 8 การทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบทั้งสองแบบในระบบเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดิน



4. สรุป

จากผลการออกแบบและการสร้างสายอากาศไดโพลแบบแผ่นแถบความถี่กว้างสำหรับเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินแบบที่หนึ่งและแบบที่สองพบว่าสายอากาศทั้งสองเหมาะสำหรับการใช้งานภายในอาคาร สายอากาศแบบที่หนึ่งมีลักษณะโครงสร้างตัวครอบสายอากาศเป็นแบบติดผนัง ส่วนสายอากาศแบบที่สองมีลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเป็นแบบตั้งโต๊ะ ซึ่งสายอากาศแบบที่หนึ่งสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 440-980 MHz และสายอากาศแบบที่สองสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 465-935 MHz สายอากาศทั้งสองแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบกึ่งรอบทิศทางและมีอัตราขยายมากกว่า 2 dBi ตลอดย่านความถี่ใช้งาน อีกทั้งยังใช้งานกับระบบเครื่องรับโทรทัศน์ดิจิทัลภาคพื้นดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] กสทช. ผว.102-2555, “แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล,” สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.), 2555.
- [2] Agubor C. K. and Onwumere C., Optimal Design and Fabrication of a Wideband Antenna for Terrestrial DTV Reception, International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS), April 2016, vol. 2, no. 4, pp. 412 – 418.
- [3] Chi Y.-W., Wong K.-L., and Su S.-W., Broadband Printed Dipole Antenna With a Step-Shaped Feed Gap for DTV Signal Reception, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, November 2007, vol. 55, no. 11, pp. 3353 – 3356.
- [4] Chen H.-D., Compact Broadband Microstrip-Line-Fed Sleeve Monopole Antenna for DTV Application and Ground Plane Effect, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, August 2008, vol. 7, pp. 497 – 500.
- [5] Chen O. T.-C. and Tsai C.-Y., CPW-Fed Wideband Printed Dipole Antenna for Digital TV Applications, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, December 2011, vol. 59, no. 12, pp. 4826 - 4830.
- [6] Wang C.-J. and Lee Y.-L., A Compact Dipole Antenna for DTV Applications by Utilizing L-Shaped Stub and Coupling Strip, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, December 2014, vol. 62, no. 12, pp. 6515 – 6519.
- [7] Yu Y.-S., Seo D.-H., Jeon S.-G., and Choi J.-H., Design of an Internal DTV antenna for portable multimedia player, Asia-Pacific Microwave Conference, December 2006.
- [8] Geng J., Jin R., Wang W., He W., Ding M., Wu Q., Rui X., Yang G. and Fang Z., A New Quasi-omnidirectional Vertical Polarization Antenna With Low Profile and High Gain for DTV On Vehicle, IET Microwaves Antennas & Propagation, August 2007, vol. 1, no. 4.
- [9] Kulkarni A. N. and Sharma S. K., Frequency Reconfigurable Microstrip Loop Antenna Covering LTE Bands With MIMO Implementation and Wideband Microstrip Slot Antenna all for Portable Wireless DTV Media Player, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, February 2013, vol. 61, no. 2, pp. 964 – 968.
- [10] Eilers C. G. and Sgrignoli G., An Analysis of DTV Propagation Into and Within a Room in a Domestic Environment, IEEE Transactions on Broadcasting, March 2002, vol. 48, no. 1, pp. 1-9.
- [11] Wetmore R. E. and Schnelle D., The Performance of Antenna Amplifiers Used for Terrestrial DTV Reception, IEEE Transactions on Broadcasting, June 2004, vol. 50, no. 2, pp. 200 – 206.

การออกแบบราโดมแบนด์กว้างสำหรับสายอากาศอาร์เรย์สำหรับการแพร่ภาพโทรทัศน์ระบบดิจิทัล

Design of Wideband Radome for Antenna Array for Digital TV Broadcasting

สิทธิชัย เเด่นตรี^{1*} และบัญชา เหลือแดง²

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาชื่น 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

²ภาควิชาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 96 หมู่ 3 ถนน พุทธมณฑล สาย 5 ตำบล ศาลายา อำเภอ พุทธมณฑล จังหวัด นครปฐม 73170

Sitthichai Dentrei^{1*} and Bancha Luadang²

¹Department of Electronics Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

²Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

96 Moo 3 Thanon Phutthamonthon Sai 5 Salaya Phutthamonthon Nakhon Pathom 73170

*ผู้รับผิดชอบบทความ: sitthichai.d@kmutnb.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 6330

บทคัดย่อ

การพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อออกแบบราโดม (Radome) ของการประยุกต์ใช้งานแบนด์กว้าง (Wideband) ของสายอากาศอาร์เรย์โทรทัศน์ระบบดิจิทัล (Digital TV Antenna) ที่ใช้สำหรับการส่งออกอากาศ วัสดุที่ออกแบบด้วยรูปทรงเรขาคณิตได้รับการเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้สมรรถนะการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม แนวทางการออกแบบราโดมสำหรับสายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัลอาร์เรย์แบนด์กว้างสำหรับการออกอากาศถูกนำเสนอ โดยมีกำลังการแพร่กระจายมากกว่า 90% ตลอดย่านความถี่ใช้งาน 510 ถึง 790 MHz และสายอากาศมีอัตราขยายเมื่อมีราโดมเท่ากับ 8.741 ถึง 11.65 dBi โดยข้อมูลที่น่าเสนอมีความสำคัญสำหรับสายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัลที่จะมีการพัฒนาในอนาคต

คำสำคัญ ราโดม สายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัล การส่งออกอากาศ

Abstract

Considerations of electromagnetic properties for radome design of wideband applications of digital TV antenna array for broadcasting. Geometrically-designed materials are appropriately chosen for optimal wave propagation performance. The radome design guidelines for wideband digital television broadcasting was presented. Radiated power is spread over 90% throughout the frequency range 510 to 790 MHz and the antenna gain when the radome is equal to 8.741 to 11.65 dBi. The information presented is important for digital television antennas to be developed in the future.

Keywords: Radome, DTV antenna, broadcasting

1. บทนำ

ราโดมออกแบบเพื่อปกป้องระบบการสื่อสารภายนอกอาคารทั้งการติดตั้งภาคพื้นดินและบนพาหนะเคลื่อนที่ตลอดจนการติดตั้งร่วมกับสายอากาศเรดาร์บนอากาศยานซึ่งต้องเป็นโครงสร้างที่ทนทานต่อสภาวะอากาศ [1] คุณสมบัติพื้นฐานของราโดมคือการสร้างฝากรอบป้องกัน

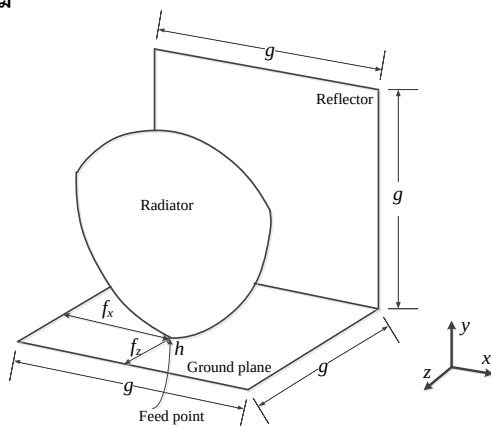
ระหว่างสายอากาศและสิ่งแวดล้อมโดยที่มีผลกระทบน้อยที่สุดต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมนั้นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่มีผลต่อราโดม โดยที่ราโดมจะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอยู่กับการจับคู่ระหว่างคุณลักษณะของสายอากาศและส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้กับช่วงความถี่วิทยุ [2]

โดยที่ราโดมสามารถแบ่งหลายประเภทคือ ราโดมชั้นเดียวหรือราโดมที่มีความหนาน้อยกว่า 0.1 ของความยาวคลื่น ราโดมครึ่งความยาวคลื่น ราโดม A แชนวิช ราโดม B แชนวิช ราโดม C แชนวิช และราโดมอื่น ๆ [3] วัสดุที่ใช้ทำราโดมจะมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความหนาของราโดมมีผลกระทบโดยตรงจากการดูดซึมและการสะท้อนของการแพร่กระจายคลื่นที่ตัวสายอากาศ ปัจจัยเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ ซึ่งในปัจจุบันมีหลายประเภทของวัสดุที่ใช้ทำราโดม ยกตัวอย่างเช่นพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRPs) แก้วเสริมพลาสติก (GRPs) โพรพิลีน (PP) เทอร์โมพลาสติก (ABS), ASA, Polystyrene, UPVC และโพลีคาร์บอเนต เป็นต้น

ประเทศไทยได้เลือกใช้ในการรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล แบบ DVB-T2 ซึ่งพัฒนาจาก DVB-T ตามประเทศในแถบยุโรป โดยมีคณะกรรมการกิจการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือ กสทช. เป็นผู้จัดทำมาตรฐานการรับส่งทางสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล และได้กำหนดให้มีมาตรฐาน กสทช. มส. 4002-2555 ซึ่งเป็นมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล

ในเอกสารฉบับนี้ขอเสนอราโดมชั้นเดียวหรือราโดมที่มีความหนาน้อยกว่า 0.1 ของความยาวคลื่นเพื่อกำหนดการแพร่กระจายและอัตราขยายที่ดีที่สุด โดยที่สายอากาศที่นำเสนอมีกำลังงานแพร่กระจายมากกว่า 90% ตามย่านความถี่ปฏิบัติการที่มีค่าอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุด 8.741 ถึง 11.65 dBi ตามลำดับ

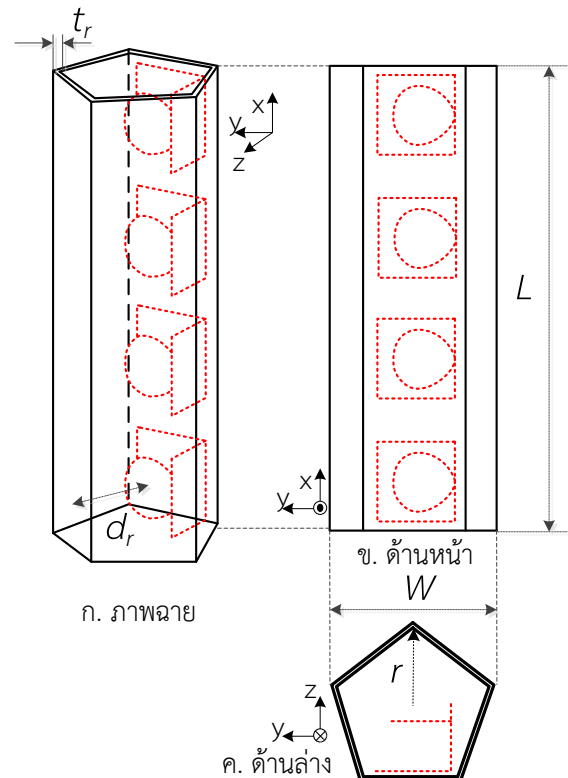
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 1 สายอากาศส่งโทรทัศน์ดิจิทัล

สายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัลในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นจาก [4] โดยรูปที่ 1 แสดงสายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และวัสดุราโดมเลือกใช้ Preperm L270 [5] มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.7 ตลอดย่านความถี่ 300 MHz ถึง

1000 MHz มีค่าการสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับ 0.0006 [6] รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งสายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัลกับราโดมครอบคลุมโครงสร้างสายอากาศทั้งหมด ตรงกลางของด้านหน้าเป็นรูปทรงจั่วและมีขอบลาดที่ทั้งสองด้านเพื่อลดแรงกระแทกจากลม ขณะที่ด้านหลังจะแบนราบเพื่อยึดติดกับฐานยึด โดยที่งานวิจัยนี้อ้างอิงกำลังส่งสัญญาณแบบจำลองตามมาตรฐาน MIL-R-7705B สำหรับราโดมแบนด์กว้างประเภท V



รูปที่ 2 การติดตั้งสายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัลกับราโดม

ซึ่งจะให้กำลังการแพร่กระจายด้านเอพอดที่มากกว่า 70% และกำลังส่งเฉลี่ยมากกว่า 80% [3] อย่างไรก็ตามเป้าหมายของการศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้กำลังการแพร่กระจายสูงสุดที่มากกว่า 90% ตามความถี่ในการใช้งานที่ 510-790 MHz นอกจากนี้ผลการจำลองจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาของราโดม (t_r) และระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) จะได้รับการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

โครงสร้างของราโดมที่ได้ออกแบบเป็นโครงสร้างทรงกระบอกห้าเหลี่ยมเพื่อให้ระนาบกราวด์ของสายอากาศติดอยู่ด้านหนึ่งของโครงสร้างห้าเหลี่ยมและมุมหน้าของสายอากาศมีลำคลื่นพุ่งออกไปทางมุมสามเหลี่ยมของโครงสร้างห้าเหลี่ยมเพื่อให้มีผลดีต่อคลื่นที่ออกจากสายอากาศ ถ้าปรับเปลี่ยนโครงสร้างของราโดม เช่น มุมหน้าของสายอากาศมีโครงสร้างราโดมที่แบนราบ อาจจะทำให้

คลื่นที่ออกจากสายอากาศมากระทบราโดมมีความกว้าง
ลำคลื่นครึ่งกำลังกว้างขึ้น ส่งผลให้อัตราขยายน้อยลงได้

2.1 ความหนาวัสดุราโดม (t_r)

ความยาวคลื่นของวัสดุราโดม (λ_r) จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่
ไดอิเล็กตริก ซึ่งความยาวคลื่นของวัสดุราโดมจะสั้นกว่าความ
ยาวคลื่นในอวกาศว่าง โดยที่ราโดมชั้นเดียวที่ค่าคงที่
ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.7 [7] ดังนั้น

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_h} = \frac{3 \times 10^8}{790 \times 10^6} = 380 \text{ mm} \quad (1)$$

และ

$$\lambda_r = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{380}{\sqrt{2.7}} = 231 \text{ mm} \quad (2)$$

เมื่อ f_h คือความถี่ด้านสูง 790 MHz

c_0 คือความเร็วแสง 3×10^8

λ_0 คือความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

λ_r คือความยาวคลื่นในวัสดุราโดม

จะได้

$$\frac{0.05\lambda_r}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{11.55}{\sqrt{\epsilon_r}}, t_r < \frac{11.55}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

เมื่อ t_r คือความหนาของราโดม

ดังนั้นจากการคำนวณความหนาที่เหมาะสมของวัสดุราโดม
 $t_r = 7 \text{ mm}$ โดยที่ข้อเท็จจริงที่ว่าถ้าความหนาวัสดุราโดม
บางเกินไปจะส่งผลให้ราโดมมีความแข็งแรงน้อยลง ถ้า
หนาเกินไปก็ส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นและต้นทุนที่สูงขึ้น จาก
การศึกษาพบว่าราโดมมีผลต่อ $|S_{11}|$ น้อยมาก ดังนั้นจึงได้มี
การวิเคราะห์กำลังการแผ่กระจายและอัตราขยายจาก
สายอากาศเพื่อหาความหนาและระยะห่างของราโดมที่ดีที่สุด

2.2 ระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแผ่กระจายคลื่น (d_r)

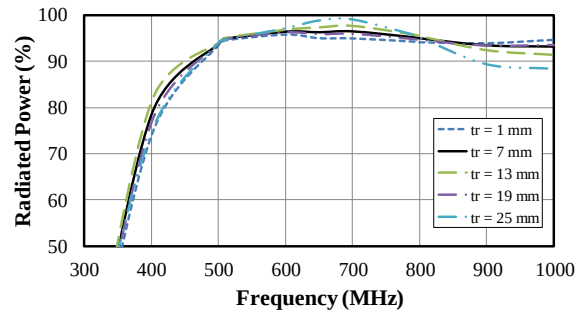
ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างราโดมกับตัวแผ่กระจาย
คลื่น (d_r) หมายถึงระยะทางที่ก่อให้เกิดคลื่นสะท้อนต่ำสุด
หรือระยะของคลื่นสะท้อนที่อยู่ในเฟสเดียวกับคลื่นที่ส่ง
ดังนั้นระยะห่างเริ่มต้นเท่ากับ

$$d_r < \frac{\lambda_0}{4} = \frac{380}{4} = 95 \text{ mm} \quad (4)$$

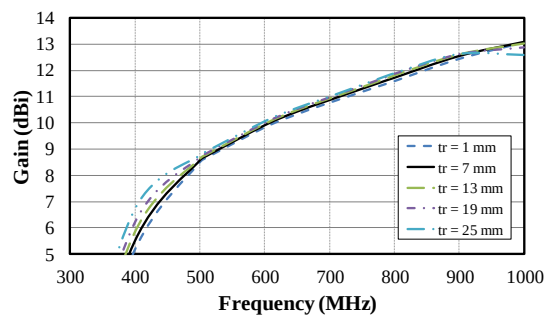
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

พารามิเตอร์เริ่มต้นของวัสดุราโดมถูกกำหนดด้วย
 $L = 950 \text{ mm}$ $W = 322 \text{ mm}$ $r = 150 \text{ mm}$ $t_r = 7 \text{ mm}$ และ
 $d_r = 102 \text{ mm}$ เพื่อกำหนดความหนาของวัสดุราโดม
ที่เหมาะสม ดังนั้นความแตกต่างของ t_r จะศึกษาผลของขนาด
ความหนา 1 7 13 19 และ 25 mm ที่แตกต่างกันไปตาม
โครงสร้างราโดมที่แสดงในรูปที่ 2

3.1 ความหนาวัสดุราโดม



รูปที่ 3 การจำลองกำลังการแผ่กระจายของการเปลี่ยน
ความหนาวัสดุราโดม (t_r)



รูปที่ 4 การจำลองอัตราขยายของการเปลี่ยน
ความหนาวัสดุราโดม (t_r)

รูปที่ 3 และตารางที่ 2 แสดงผลของพลังงานการ
แผ่กระจายของสายอากาศ พบว่าเมื่อความหนาของวัสดุ
ราโดมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กำลังการแผ่กระจายของช่วง
ความถี่ที่ใช้งาน 510 ถึง 790 MHz เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัย
สำคัญ และในช่วงความถี่ขอบสูงที่ใช้งานได้ของสายอากาศลดลง
ดังนั้น $t_r = 7 \text{ mm}$ ซึ่งมีกำลังการแผ่กระจายมากกว่า 90%
ของกำลังการแผ่กระจายที่จ่ายให้สายอากาศ และมีค่าเปลี่ยนแปลง
น้อยตลอดช่วงความถี่ใช้งาน เมื่อเทียบกับ
 $t_r = 7 13 19$ และ 25 mm ดังนั้น $t_r = 7 \text{ mm}$ ได้รับการ
คัดเลือกเนื่องจากน้ำหนักโดยรวมและเพียงพอที่จะป้องกัน
ความเสียหายจากสิ่งแวดล้อม ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่าง
ราโดมและตัวแผ่กระจายคลื่น (d_r) จะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

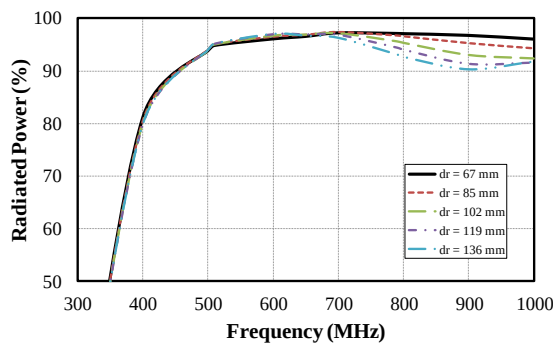
รูปที่ 4 แสดงผลของอัตราขยาย พบว่าความหนาวัสดุ
ราโดมเพิ่มขึ้นทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีผลเห็นได้ชัด
ที่ความถี่ต่ำของสายอากาศ ซึ่งการเพิ่มความหนาทำให้เพิ่ม
น้ำหนักของสายอากาศ ดังนั้น $t_r = 7 \text{ mm}$ จึงเหมาะสมกับ
การออกแบบใช้งาน โดยความหนาวัสดุราโดมที่เพิ่มขึ้นทำให้
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบลง ส่งผลให้อัตราขยายที่
เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง $t_r = 7 \text{ mm}$ มีความหนาที่จะป้องกัน
ความเสียหายเมื่อนำไปติดตั้งใช้งานบนเสาส่งสัญญาณ เช่น
ความเสียหายจาก ฝน ลม นก เป็นต้น และยังคงไม่มีผลต่อ
สัญญาณที่ส่งออกของสายอากาศ



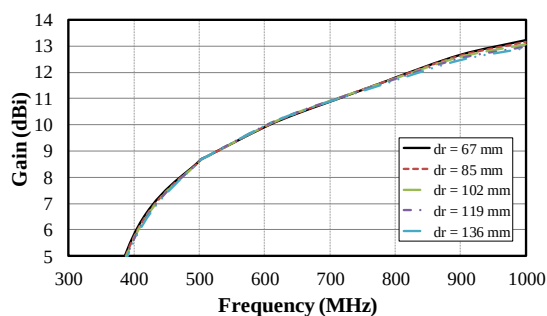
ตารางที่ 1 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศสำหรับการเปลี่ยนความหนาวัสดุราโดมที่ให้งานการแพร่กระจายมากกว่า 90% ของกำลังงานรวมที่จ่ายให้สายอากาศ ตลอดย่านความถี่ใช้งาน 510 ถึง 790 MHz

ความหนาวัสดุราโดม (t_r) mm	อัตราขยาย (dBi)		
	510 MHz	650 MHz	790 MHz
1	8.667	10.33	11.51
7	8.734	10.49	11.64
13	8.788	10.49	11.71
19	8.836	10.53	11.77
25	8.908	10.57	11.81

3.2 ระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 5 การจำลองกำลังการแพร่กระจายของการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r)



รูปที่ 6 การจำลองอัตราขยายของการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r)

เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) มีค่าแตกต่างกันคือ 67 85 102 119 และ 136 mm กำลังการแพร่กระจายที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5 และตารางที่ 2 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่าง ราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้งานการแพร่กระจายลดลง จะเห็นผลชัดเจนที่ขอบความถี่ด้านสูง ในขณะที่ $d_r = 67$ mm สร้างกำลังการแพร่กระจายที่มี

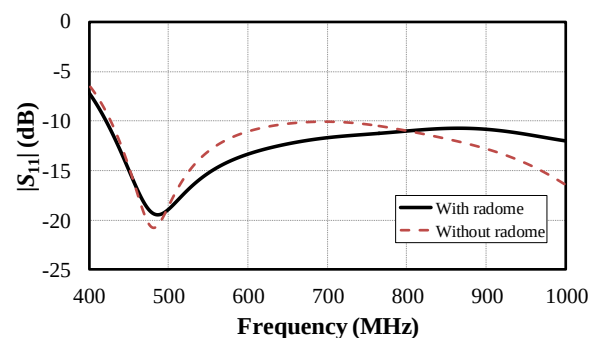
เสถียรภาพมากที่สุดในช่วงความถี่ 510 ถึง 970 MHz เทียบกับ $d_r = 85$ 102 119 และ 136 mm ดังนั้นจึงเลือก $d_r = 67$ mm สำหรับการศึกษา

รูปที่ 6 แสดงผลของอัตราขยาย พบว่าระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) เพิ่มขึ้นทำให้อัตราขยายลดลงเล็กน้อย มีผลเห็นได้ชัดที่ความถี่สูงของสายอากาศ โดยที่จากการคำนวณได้ $d_r = 95$ mm นั้นคำนวณมาจากความถี่เดียว จึงนำมาจำลองเพื่อหา d_r ที่ได้ผลอัตราขยายที่ดีที่สุดตลอดย่าน ดังนั้น $d_r = 67$ mm จึงเหมาะสมกับการออกแบบใช้งาน

ตารางที่ 2 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศสำหรับการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) ที่ให้งานการแพร่กระจายมากกว่า 90% ของกำลังงานรวมที่จ่ายให้สายอากาศ ตลอดย่านความถี่ใช้งาน 510 ถึง 790 MHz

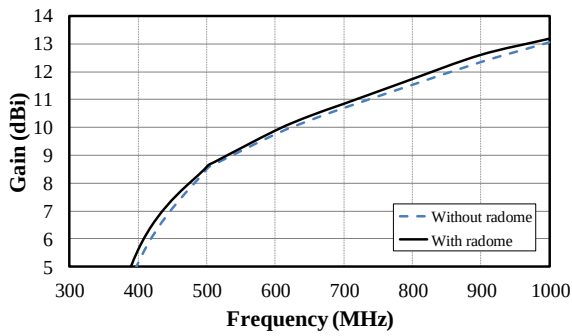
ความหนาวัสดุราโดม (d_r) mm	อัตราขยาย (dBi)		
	510 MHz	650 MHz	790 MHz
67	8.773	10.43	11.70
85	8.762	10.45	11.70
102	8.763	10.47	11.68
119	8.774	10.48	11.66
136	8.773	10.47	11.61

3.3 สายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ



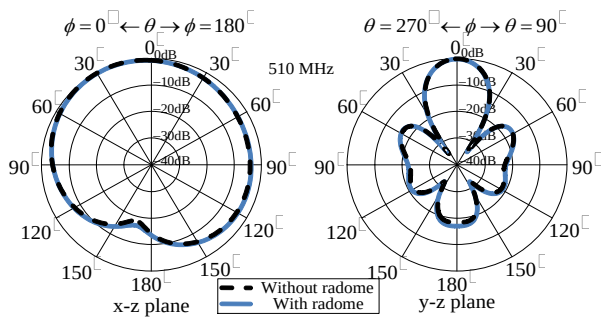
รูปที่ 7 $|S_{11}|$ ของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ

รูปที่ 7 แสดง $|S_{11}|$ ของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ พบว่าสายอากาศมี $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ความถี่ 420 ถึง 1000 MHz ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน 510 ถึง 790 MHz ซึ่งสายอากาศมีแบนด์วิดท์มากกว่า 80% แบนด์วิดท์ สามารถใช้สำหรับการรับส่งทางสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิตอลของประเทศไทย

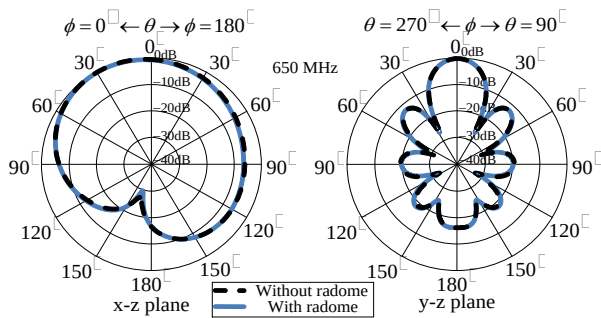


รูปที่ 8 อัตราขยายของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ

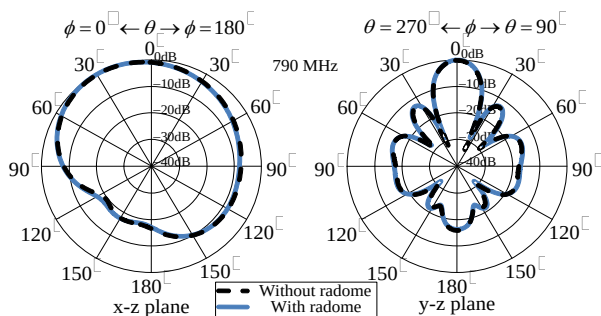
รูปที่ 8 แสดงผลของอัตราขยาย พบว่าสายอากาศมีอัตราขยายเมื่อมีราโดมและไม่มีราโดมมีค่าเท่ากับ 8.741 ถึง 11.65 dBi และ 8.622 ถึง 11.45 dBi ซึ่งราโดมช่วยเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศได้เล็กน้อย



ก. 510 MHz



ข. 650 MHz



ค. 790 MHz

รูปที่ 9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ

รูปที่ 9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมกับราโดม ที่ความถี่ 510 650 และ 790 MHz พบว่าเมื่อมีราโดมทำให้ลำคลื่นหลักขยับไป 1 องศาตลอดย่านความถี่ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่

4. บทสรุป

สายอากาศที่ได้รับการออกแบบร่วมกับโครงสร้างและวัสดุราโดมอย่างเหมาะสมจะให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นที่ดีที่สุดพร้อมด้วยการปกป้องตัวสายอากาศจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะยืดอายุการใช้งานของสายอากาศและส่วนประกอบต่าง ๆ ในบทความนี้สายอากาศที่นำเสนอสร้างกำลังการแพร่กระจาย $\geq 90\%$ ตลอดความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 510 MHz ถึง 790 MHz ซึ่งไม่มีผลต่อแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์อัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดของสายอากาศรวมกับราโดมมีค่าเท่ากับ 8.741 ถึง 11.65 dBi ตามลำดับ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Audone, A. Delogu, and P. Moriondo, "Radome Design and Measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 37, no. 2, June 1988.
- [2] J. Moreno, M. Fernandez, A. Somolinos, L. Lozano, F. Catedra, and I. Gonzalez, "Analysis and Design of Antenna Radomes," Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013), Tel Aviv, Israel, 21-23 Oct. 2013.
- [3] U.S. Department of Defense. "MIL-R-7705B: General specification for radomes," U.S. Government Printing Office, Jan. 1975.
- [4] S. Dentre, C. Phongcharoenpanich, and K. Kaemarungsi, "Scutcheon Antenna for UWB-GPR Applications," Proceedings of the 2012 Thailand-Japan Microwave, Bangkok, 4 pages, Aug. 2012.
- [5] PREPERM L270 Premix OY. Available from: <https://www.plastle.com/raw-materials-catalog/PREPERM-L270> [Accessed 30th April 2018].
- [6] D. V. Rosato, N. R. Schott, and M. G. Rosato. Plastics engineering manufacturing and data handbook/Plastics Institute of America. 2001 ed., Boston: Kluwer Academic Publishers. 2001



- [7] Y. M. Pei, A. M. Zeng, L. C. Zhou, R. B. Zhang, and K. X. Xu, "Electromagnetic optimal design for dual- band radome wall with alternating layers of staggered composite and kagome lattice structure," Progress In Electromagnetics Research, vol.122, 2012. pp.437–452

การประเมินเทคนิคสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีเพื่อการวินิจฉัยกระดูกยางค์

Evaluate of correlation coefficient technique for automated stitching appendicular skeleton x-ray image

ธีรวุฒิ โรจนอัมพวัน^{1*}, พรชัย พุกษ์ภัทรานนท์¹, สวัสดิ์ ตันทนุช¹, นที อินา² และจงวัฒน์ ชิวกุล²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

² ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Thirawut Rojchanaumpawan^{1*}, Pornchai Phukpattaranont¹, Sawit Tanthanuch¹, Natee Ena² and Jongwat Chewakun²

¹ Biomedical Engineering Program, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Kho Hong, Hat Yai, Songkla, Thailand, 90112

² Department of Radiology, Faculty of Medicine, Prince of Songkla University

Kho Hong, Hat Yai, Songkla, Thailand, 90112

*ผู้พิมพ์ประสานงาน : snow_tk@icloud.com เบอร์โทรศัพท์ 093-5766562

บทคัดย่อ

บทความชิ้นนี้กล่าวถึงอัลกอริทึมการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีเพื่อการวินิจฉัยกระดูกยางค์โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มาช่วยระบุตำแหน่งในการเชื่อมต่อ ซึ่งใช้ภาพถ่ายทางรังสีที่ได้มาจากการถ่ายภาพหุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสี และใช้เทคนิคเพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผลภาพโดยการกรองสัญญาณและลดขนาดภาพ ประกอบกับการใช้เทคนิคในการสร้างกรอบสี่เหลี่ยมหรือหน้าต่างล้อมรอบพิกเซลของภาพ เพื่อระบุตำแหน่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แทนการเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทุก ๆ พิกเซลในภาพ ซึ่งผลจากการทดสอบค่าความถูกต้องในการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีกระดูกยางค์ส่วนบนและกระดูกยางค์ส่วนล่างพบว่าสูงถึง 97.60 เปอร์เซ็นต์และ 98.22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คำสำคัญ เชื่อมต่อภาพ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 2 มิติ เทคนิคหน้าต่าง

Abstract

This article presents the X-ray image stitching algorithm for appendicular skeleton diagnosis based on correlation coefficients. The X-ray images samples were obtained from phantom models. The proposed technique decreased processing time by filtering and reducing image size, in contrast to the old technique which used all pixel points for finding correlation coefficient. Moreover, the proposed method reduced processing time by creating rectangular frames around connected points to identify the image reference for finding correlation coefficient. The accuracy results of the correlation between radiography of upper limb and lower scapula were 97.60 and 98.22 percent.

Keywords: stitching images, 2 dimensional correlation coefficient, window technique

1. บทนำ

ภาพถ่ายทางรังสีถือเป็นภาพถ่ายทางการแพทย์ที่ถูกเลือกใช้ในการคัดกรองผู้ป่วยที่มีความผิดปกติของกระดูกในลำดับแรก จากข้อมูลสถิติของกรมกิจการผู้สูงอายุในปี 2559 พบว่ามีผู้สูงอายุมากถึง 16,981,509 คน ซึ่งคิดเป็น 14.764 เปอร์เซ็นต์ของประชากรทั้งหมดในประเทศ [1] และผู้สูงอายุเหล่านี้มีโอกาสเป็นโรคที่เกี่ยวข้องกับกระดูก เช่น กระดูกพรุน กระดูกคด กระดูกหัก ซึ่งเมื่อได้รับการตรวจ มีความจำเป็นต้องใช้ภาพถ่ายทางรังสีเพื่อยืนยันความผิดปกติเหล่านี้ แต่ภาพถ่ายทางรังสีในปัจจุบันมีขนาดใหญ่สุดที่ 43.18 เซนติเมตร ทำให้การถ่ายภาพทางรังสีในบางส่วนของกระดูกจำเป็นต้องใช้การถ่ายภาพถึงสองครั้งขึ้นไปเช่น กระดูกสันหลังหรือ กระดูกข้อมือ และนำภาพเหล่านั้นมาเชื่อมต่อกันเพื่อดูความผิดปกติ ดังนั้นการนำภาพถ่ายทางรังสีมาเชื่อมกันในตำแหน่งที่ไม่ถูกต้องจะส่งผลต่อการวินิจฉัยที่ไม่ถูกต้องและส่งผลเสียต่อตัวผู้ป่วย งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีเพื่อการวินิจฉัยกระดูกข้อมือขึ้นมา เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างและพัฒนาแบบจำลองการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีในกระดูกที่สามารถใช้งานได้จริงในโรงพยาบาล และเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีส่วนอื่น ๆ ต่อไป โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบตามจำนวนข้อมือของร่างกายคือ 1 กระดูกข้อมือส่วนล่าง (lower extremities) และ 2 กระดูกข้อมือส่วนบน (upper extremities)

ในปัจจุบันมีการพัฒนางานวิจัยที่ช่วยในการเชื่อมต่อภาพโดยใช้เทคนิคหลายหลายรูปแบบ [2-5] เช่น เทคนิคของ Harris corner detection, Feature detection, SIFT (scale invariant feature transform), SURF (speed up robust feature), Edge detection และ correlation coefficient ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ เหมาะสำหรับการต่อภาพเชิงปริทัศน์ (panorama) ดังนั้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับภาพถ่ายทางรังสีซึ่งมีการแปลกปน จึงส่งผลให้เกิดความผิดพลาดและความคลาดเคลื่อนสูง งานวิจัยนี้ใช้ภาพถ่ายทางรังสีซึ่งมีการปรากฏการณ์แอโนดฮิลล์เอฟเฟกต์เกิดขึ้นบนภาพที่นำมาใช้ทดลอง จึงทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยดังกล่าวและยังมีโอกาสที่จะพัฒนางานวิจัยไปประยุกต์ใช้กับภาพชนิดอื่นได้อีกด้วย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 หลักการเกิดและการได้มาซึ่งภาพถ่ายทางรังสี

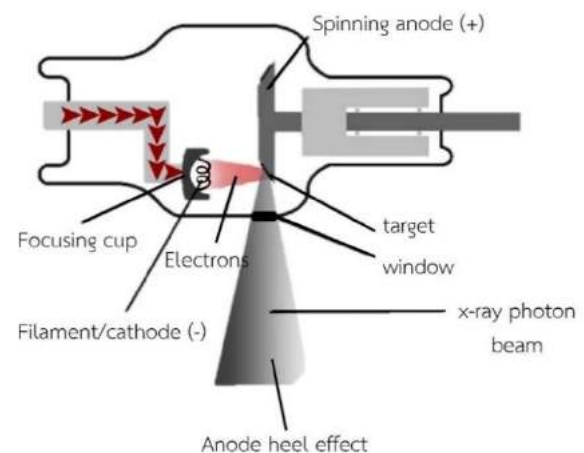
ภาพถ่ายทางรังสีเกิดจากการฉายรังสีเอกซ์ลงบนวัตถุที่มีความสามารถในการดูดซับรังสีที่แตกต่างกัน [6] วัตถุที่มีความหนาแน่นมากเช่น กระดูก จะดูดซับรังสีได้มากทำให้รังสีทะลุได้น้อยจึงเกิดภาพที่มีโทนสีขาว ส่วนวัตถุที่มีความหนาแน่น

น้อยเช่น เนื้อเยื่อ จะดูดซับปริมาณรังสีได้น้อยจึงเกิดเป็นภาพโทนสีดำ

การถ่ายภาพทางรังสีจะต้องมีการจัดทำของผู้ป่วยให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ภาพถ่ายทางรังสีที่ได้มีความคมชัด ไม่เบลอ หรือเกิดเงาจนทำให้ภาพที่ได้มีลักษณะผิดเพี้ยน การจัดทำที่ต่างกันจะทำให้วัตถุเดียวกันมีมุมมองภาพที่ต่างกัน เช่น การจัดทำภาพถ่ายทางรังสี anterior posterior leg (AP leg) จะได้ภาพในมุมมองจากด้านหน้าขาไปยังข้างหลัง (น่อง) แต่หากจัดทำภาพถ่ายทางรังสี posterior anterior leg (PA leg) จะได้ภาพถ่ายทางรังสีในมุมมองจากด้านหลัง (น่อง) มายังหน้าขา เป็นต้น

2.2 แอโนดฮิลล์เอฟเฟกต์ (anode heel effect)

แอโนดฮิลล์เอฟเฟกต์เป็นปรากฏการณ์ที่อธิบายถึงการแผ่รังสีเอกซ์จากหลอดเอกซเรย์ออกมาในลักษณะเชิงมุม ดังแสดงในรูปที่ 1 อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาจากขั้วลบ (cathode) ไปตกกระทบบนแผ่นโลหะเป้าหมายที่ขั้วบวก (anode) และสะท้อนรังสีเอกซ์ออกมาในลักษณะของความเข้มที่ไม่เท่ากัน โดยจะมีความเข้มของรังสีมากเมื่ออยู่ใกล้ขั้วลบ (cathode) และจะมีความเข้มของรังสีน้อยลงเมื่ออยู่ใกล้ขั้วบวก (anode) ผลกระทบจากการที่มีลักษณะความเข้มของรังสีที่ปล่อยออกมาอย่างไม่สม่ำเสมอทำให้ข้อมูลภาพมีความเข้มของระดับสัญญาณไม่เท่ากัน เกิดเป็นสัญญาณแปลกปนที่เกิดขึ้นกับภาพถ่ายทางรังสี



รูปที่ 1 การทำงานของหลอดเอกซเรย์

ที่มา : <https://radiopaedia.org/articles/anode-heel-effect>

2.3 การกรองสัญญาณภาพ

การกรองสัญญาณภาพเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับระดับสัญญาณให้มีความเรียบเนียนมากยิ่งขึ้นโดยกระทำในลักษณะ 2 มิติ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้วิธีการกรองที่เรียกว่า การกรองแบบค่าเฉลี่ย (average filter) เข้ามากระทำกับ

ภาพถ่ายทางรังสีโดยผลจากการกรองสัญญาณด้วยวิธีนี้จะให้ผล ลัพธ์ทางเวลาที่รวดเร็วและการบิดเบือนข้อมูลภาพที่น้อย โดยรูปแบบการกรองสัญญาณภาพด้วยวิธีค่าเฉลี่ย F สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$F = \frac{1}{N} \sum_{p,q} A(p,q)B(x-p+1,y-q+1) \quad (1)$$

เมื่อ A คือ กรอบที่ใช้กำหนดขนาดของตัวกรอง
B คือ กรอบที่ใช้กำหนดขนาดของภาพ
p คือ ตำแหน่งในแนวคอลัมน์ของตัวกรอง
q คือ ตำแหน่งในแนวแถวของตัวกรอง
x คือ ตำแหน่งในแนวคอลัมน์ของภาพ
y คือ ตำแหน่งในแนวแถวของภาพ
N คือ จำนวนพิกเซลทั้งหมดของภาพ

2.4 การลดขนาดภาพ

ภาพถ่ายทางรังสีมีขนาดภาพที่ใหญ่ การประมวลผลภาพที่มีขนาดใหญ่หรือมีจำนวนข้อมูลเยอะจะส่งผลต่อจำนวนครั้งและเวลาในการคำนวณ วิธีการลดจำนวนครั้งในการคำนวณที่ง่ายที่สุดคือ การลดขนาดภาพให้เล็กลงโดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกวิธี การประมาณค่าในช่วง (interpolation) [7-8] เข้ามาช่วยในการลดขนาดภาพ โดยการปรับปรุงข้อมูลภาพสามารถทำได้ 2 ลักษณะคือ

- (1) การประมาณค่าในช่วง แบบเพิ่มจำนวน เช่น ข้อมูลพิกเซลที่ 1 มีค่าเท่ากับ 10 และข้อมูลในพิกเซลที่ 3 มีค่าเท่ากับ 30 ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าพิกเซลที่ 2 ได้เท่ากับ 20
- (2) การประมาณค่าในช่วง แบบลดจำนวน เช่น ข้อมูลพิกเซลที่ 1 มีค่าเท่ากับ 10 และข้อมูลในพิกเซลที่ 2 มีค่าเท่ากับ 20 ดังนั้นเมื่อนำพิกเซลทั้งสองมารวมกัน จะได้ข้อมูลในพิกเซลเท่ากับ 15

2.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร [9] ซึ่งในที่นี้คือความสัมพันธ์ของพิกเซล โดยระดับความสัมพันธ์จะเป็นแบบเชิงเส้นมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งหมายความว่าหากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็น -1 ตัวแปรทั้งสองจะมีความสัมพันธ์แบบตรงกันข้าม แต่หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเป็น 1 ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบตามกัน และหากมีค่าเป็น 0 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กันเลย และในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ชนิดเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient : P) มาเป็นสมการในการหาความสัมพันธ์ระหว่างภาพถ่ายทางรังสีทั้งสองภาพ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$P = \frac{\sum_{x,y} (A_{x,y} - \bar{A})(B_{x,y} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_{x,y} (A_{x,y} - \bar{A})^2)(\sum_{x,y} (B_{x,y} - \bar{B})^2)}} \quad (2)$$

เมื่อ A_{xy} คือ ค่าของตัวแปร A (ส่วนของภาพถ่ายทางรังสีภาพที่ 1) ในลำดับที่ x และ y
 B_{xy} คือ ค่าของตัวแปร B (ส่วนของภาพถ่ายทางรังสีภาพที่ 2) ในลำดับที่ x และ y
 $\bar{A}$ คือ ค่าเฉลี่ย 2 มิติของตัวแปร A
 $\bar{B}$ คือ ค่าเฉลี่ย 2 มิติของตัวแปร B
x คือ ตำแหน่งในแนวคอลัมน์ของภาพ
y คือ ตำแหน่งในแนวแถวของภาพ

2.6 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสี ใช้ภาพที่ถ่ายโดยเครื่องเอกซเรย์ Samsung XGEO GC80 series ซึ่งเป็นเครื่องเอกซเรย์ชนิด DR (digital radiography) โดยภาพทั้ง 2 รูปแบบจะถูกเก็บเป็นไฟล์ดิจิทัลทางการแพทย์ (digital image and communication in medicine) หรือ ไดคอมไฟล์ (DICOM) จากนั้นจะนำมาเข้าสู่กระบวนการปรับแต่งภาพ และประมวลผลการเชื่อมต่อภาพต่อไปตามลำดับ

โดยรูปแบบที่ใช้ในการกำหนดฟังก์ชันการถ่ายภาพทางรังสีในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบคือ

- (1) รูปแบบการถ่ายภาพทางรังสีกระดูกต้นขา มุมมองจากข้างหน้าไปข้างหลัง (thigh AP) โดยใช้แผ่นรับภาพขนาด 17x14 นิ้ว ระดับพลังงาน 72 kVp, 125 mA, 10 mAs และมีหุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสีส่วนสะโพกและขา (phantom hip/leg) เป็นตัวแบบในการถ่ายภาพทางรังสี
- (2) รูปแบบการถ่ายภาพทางรังสีกระดูกต้นแขน มุมมองจากข้างหน้าไปข้างหลัง (humerus AP) โดยใช้แผ่นรับภาพขนาด 17x14 นิ้ว ระดับพลังงาน 65 kVp, 100 mA, 6 mAs และมีหุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสีส่วนอกและแขน (phantom chest/arm) เป็นตัวแบบในการถ่ายภาพทางรังสี

2.6.1 การเก็บข้อมูลภาพ

ทำการเก็บภาพ 2 รูปแบบตามจำนวนชนิดกระดูกยางค์คือ

- (1) ภาพที่ได้จากการถ่ายภาพทางรังสีกระดูกยางค์ส่วนล่าง (สะโพกไปจนถึงขา) ซึ่งจะกระทำการถ่ายภาพทางรังสี 2 ภาพ โดยภาพแรกเกิดจากการถ่ายหุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสีกระดูกส่วนสะโพกไปจนถึงหัวเข่า และภาพที่สองครอบคลุมบริเวณหัวเข่าไปจนถึงหน้าแข้ง ซึ่งทั้งสองภาพจะมีส่วนของภาพบริเวณหัวเข่าที่ซ้อนกัน (overlap)

(2) ภาพที่ได้จากการถ่ายภาพทางรังสีกระดูกยางค์ส่วนบน (หัวไหล่ไปจนถึงมือ) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการถ่ายภาพทางรังสีรูปแบบที่ 1 คือมีการถ่ายภาพทางรังสี 2 ภาพ ภาพแรกเกิดจากการถ่ายภาพหุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสีครอบคลุมบริเวณบริเวณหัวไหล่ไปจนถึงข้อศอก และภาพที่สองครอบคลุมบริเวณข้อศอกไปจนถึงฝ่ามือ และภาพทั้งสองจะมีส่วนของภาพบริเวณข้อศอกที่ซ้อนกัน ส่วนที่ซ้อนกันของภาพทั้งในรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 นั้นถูกควบคุมขณะถ่ายภาพให้มีส่วนที่ซ้อนกันเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของขนาดภาพ ซึ่งจะมีความสำคัญอย่างมากในการเชื่อมต่อภาพเข้าด้วยกัน

2.6.2 การกรองสัญญาณภาพ

ภาพถ่ายทางรังสีทุกภาพจะถูกกรองสัญญาณภาพด้วยตัวกรองค่าเฉลี่ยแบบ 2 มิติ ก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปเสมอ เพื่อให้การประมวลผลมีความง่ายและรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งการกรองสัญญาณภาพจะทำให้เสียข้อมูลหรือมีการผิดเพี้ยนของภาพเล็กน้อย แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

2.6.3 การปรับขนาดภาพ

ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางรังสีจะใช้แผ่นรับภาพ wireless portable detector (S4335-W) ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องเอกซเรย์ ซึ่งมีขนาดของบริเวณการรับภาพอยู่ที่ 426 มิลลิเมตร x 345 มิลลิเมตร และให้ความละเอียดของการแสดงผลในเมทริกซ์ภาพเท่ากับ 3,040 แถวและ 2,466 คอลัมน์ แต่ในการแสดงผลที่ความละเอียดนี้จะทำให้สัดส่วนของอวัยวะที่สนใจในภาพถ่ายรังสีมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดภาพ ดังนั้นในบางครั้งนักรังสีจำเป็นต้องมีการตัด (crop) ภาพถ่ายทางรังสีเฉพาะในส่วนของอวัยวะที่สนใจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนเมทริกซ์ภาพทั้งในแนวแถวและแนวคอลัมน์ จึงต้องมีการปรับขนาดภาพที่ต้องการเชื่อมต่อให้มีจำนวนแถวและจำนวนคอลัมน์เท่ากันก่อนที่จะนำมาเชื่อมต่อภาพ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการปรับขนาดของภาพถ่ายทางรังสีในหลายขนาดเพื่อทดสอบว่าจะส่งผลต่อความถูกต้องในการเชื่อมต่อภาพและผลกระทบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นอย่างไร

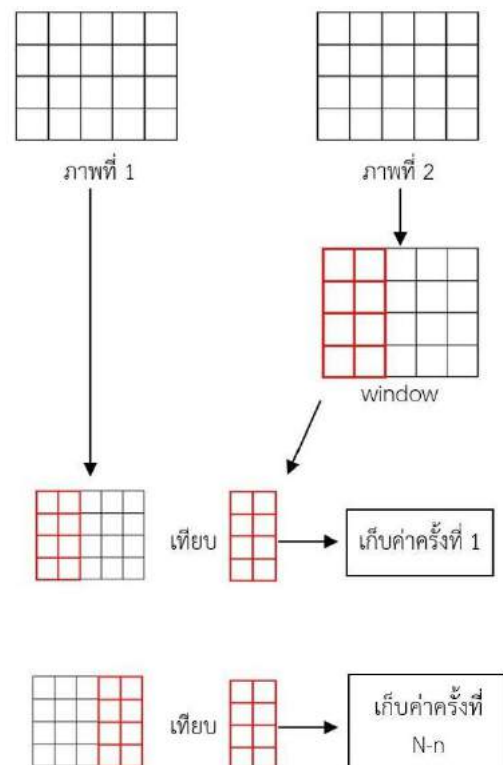
2.6.4 การระบุบริเวณที่ใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การเชื่อมต่อภาพมีลักษณะคล้ายกับการเอาภาพมาชนกันและมีบางส่วนซ้อนทับกันอยู่ บริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันนี้จะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และเนื่องจากการชนกันของภาพเกิดจากการนำส่วนท้ายของภาพที่ 1 มาต่อกับส่วนต้นของภาพที่ 2 จึงสามารถใช้เทคนิคการสร้างหน้าต่าง (window) หรือกรอบสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อคลุมเฉพาะบริเวณที่ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้ ซึ่งในการทดลองมีภาพขนาด M แถว N คอลัมน์จะสร้างหน้าต่างที่มีขนาด M แถว n คอลัมน์ มาคลุมบริเวณส่วนต้น

ของภาพที่ 2 เพื่อสร้างเป็นหน้าต่าง (โดย n จะต้องมีความไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ของ N) และใช้หน้าต่างนี้เทียบกับภาพที่ 1 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยเทียบตามลำดับเริ่มจากคอลัมน์ที่ 1 ของภาพที่ 1 จนไปสิ้นสุดที่คอลัมน์ N-n

2.6.5 การเชื่อมต่อภาพ

นำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการเทียบภาพที่ 1 และภาพที่ 2 ด้วยเทคนิคการสร้างหน้าต่างมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดว่าอยู่ในตำแหน่งคอลัมน์ที่เท่าไร และใช้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเชื่อมต่อภาพทั้งสองเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2 เทคนิคการเทียบกลุ่มพิกเซลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยวิธีการสร้างหน้าต่าง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การเก็บข้อมูลภาพ

ภาพที่เก็บได้จากการถ่ายภาพเอกซเรย์หุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสีมี 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3 ภาพถ่ายภาพทางรังสีหุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสีส่วนสะโพกและขา โดยภาพทั้งสองมีขนาด 2995 แถว 2435 คอลัมน์ และรูปที่ 4 ภาพถ่ายภาพทางรังสีหุ่นจำลองมนุษย์สำหรับสาธิตฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสีส่วนอกและแขน โดยภาพถ่ายทางรังสีส่วนอกมีขนาด 2867 แถว 2435 คอลัมน์ ภาพถ่ายภาพทางรังสีส่วนแขนมีขนาด 2995 แถว 2435 คอลัมน์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ภาพถ่ายทางรังสีของหุ่นจำลองสาธิตสำหรับฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสี (ก) ส่วนสะโพก (ข) ส่วนขา



(ก)

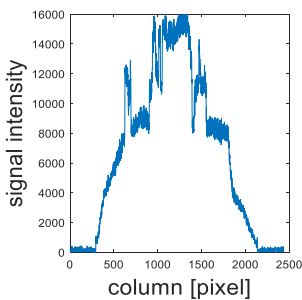


(ข)

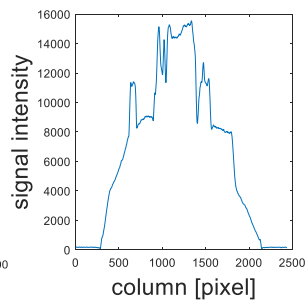
รูปที่ 4 ภาพถ่ายทางรังสีของหุ่นจำลองสาธิตสำหรับฝึกปฏิบัติการถ่ายภาพรังสี (ก) ส่วนอก (ข) ส่วนแขน

3.2 การกรองสัญญาณ

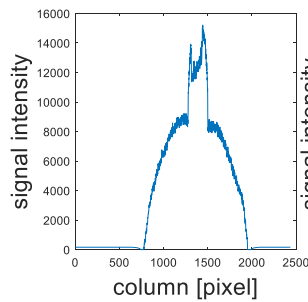
ผลที่ได้จากการกรองสัญญาณภาพทำให้สัญญาณภาพมีความเรียบเนียนและสม่ำเสมอมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 เปรียบเทียบผลลัพธ์การกรองสัญญาณภาพของภาพถ่ายทางรังสีกระดูกยาวครึ่งส่วนล่างกับภาพต้นฉบับ และรูปที่ 6 เปรียบเทียบผลลัพธ์การกรองสัญญาณภาพของภาพถ่ายทางรังสีกระดูกยาวครึ่งบนกับภาพต้นฉบับ โดยในภาพต้นฉบับและภาพที่ผ่านการกรองสัญญาณของทั้งสองรูปเป็นการพล็อตสัญญาณภาพที่ตำแหน่งเดียวกันในตำแหน่งแถวที่ 1,200 ของทุกคอลัมน์



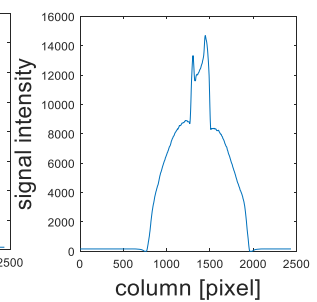
(ก)



(ข)

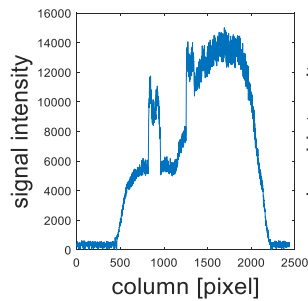


(ค)

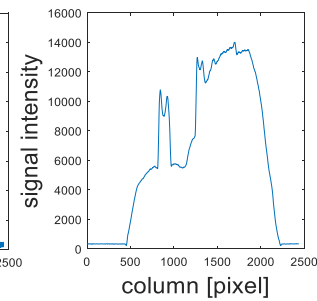


(ง)

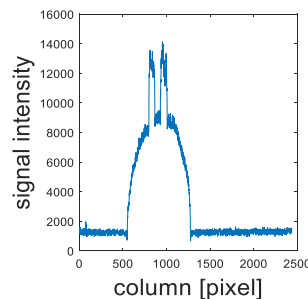
รูปที่ 5 (ก) และ (ข) สัญญาณภาพส่วนสะโพกก่อนการกรองและหลังการกรองตามลำดับ (ค) และ (ง) สัญญาณภาพส่วนต้นขาก่อนการกรองและหลังการกรองตามลำดับ



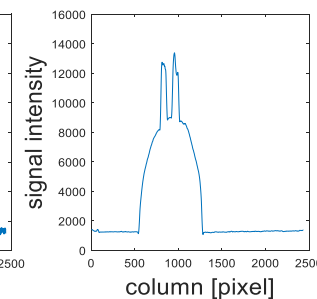
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6 (ก) และ (ข) สัญญาณภาพส่วนอกก่อนการกรองและหลังการกรองตามลำดับ (ค) และ (ง) สัญญาณภาพส่วนต้นแขนก่อนการกรองและหลังการกรองตามลำดับ

3.3 การลดขนาดภาพ

การลดขนาดภาพให้เล็กลงส่งผลโดยตรงต่อจำนวนครั้งในการคำนวณ โดยในขั้นตอนนี้จะทำการลดขนาดเมทริกซ์ภาพในแนวแถวและในแนวคอลัมน์ของทั้ง 2 รูปแบบคือ 1 ถ่ายภาพทางรังสีกระดูกยาวครึ่งส่วนล่าง และ 2 ถ่ายภาพทางรังสีกระดูกยาวครึ่งบน ให้เล็กลงมาที่ 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของภาพตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 1 ข้อมูลภาพที่ถูกลดขนาดเทียบตามอัตราส่วนของขนาดภาพจริง



ตารางที่ 1 ข้อมูลภาพในแนวแถวและแนวคอลัมน์ที่ถูกลดขนาดของภาพถ่ายทางรังสีกระดูกยางค์ส่วนล่างและส่วนบน

อัตราส่วนภาพ 1 (เปอร์เซ็นต์)	กระดูกยางค์ส่วนล่าง	
	สะโพก	ขา
100	2995x2435	2995x2435
50	1498x1218	1498x1218
25	749x609	749x609
อัตราส่วนภาพ 2 (เปอร์เซ็นต์)	กระดูกยางค์ส่วนบน	
	อก	แขน
100	2867x2435	2995x2435
50	1434x1218	1498x1218
25	717x609	749x609

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ทำการเก็บค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทั้งหมด 2 ชุดโดยใช้เทคนิคการสร้างหน้าต่างดังรูปที่ 2 ซึ่งในภาพแต่ละชุดจะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขนาดหน้าต่างต่อความถูกต้องในการเชื่อมต่อภาพ โดยมีการกำหนดขนาดหน้าต่างให้มีความกว้างของคอลัมน์ (n) ที่ 20, 10 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของขนาดภาพที่นำมาเปรียบเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยชุดที่ 1 เก็บค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบภาพถ่ายทางรังสีกระดูกยางค์ส่วนล่าง 2 ภาพคือ ภาพส่วนสะโพกและภาพส่วนขา ที่ถูกลดขนาดตามข้อมูลในตารางที่ 1 ส่วนชุดที่ 2 เป็นเก็บค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบภาพถ่ายทางรังสีกระดูกยางค์ส่วนบน 2 ภาพคือ ภาพส่วนอกและภาพส่วนแขน ที่ถูกลดขนาดตามข้อมูลในตารางที่ 1

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในแต่ละชุดข้อมูลย่อยจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเหมือนกันของภาพ จึงใช้ประโยชน์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดนี้มาเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเชื่อมต่อภาพ โดยตารางที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่วัดได้จากการเปรียบเทียบภาพในแต่ละชุดข้อมูลย่อย พร้อมทั้งวัดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (mean square error) ในตำแหน่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงที่สุด เพื่อยืนยันความถูกต้องในการเชื่อมต่อภาพ

โดยทั่วไปการเชื่อมต่อภาพทางรังสีจะยอมให้มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์เทียบกับขนาดแผ่นรับภาพ และในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้แผ่นรับภาพที่มีขนาด 17x14 นิ้ว จึงหมายความว่าสามารถมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่ยอมรับได้ไม่เกิน 0.8636 จากข้อมูลในตารางที่ 2 จะพบว่าในแต่ละชุดข้อมูลภาพที่ 1 และชุดข้อมูลภาพที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันมากทั้งที่มีการปรับ

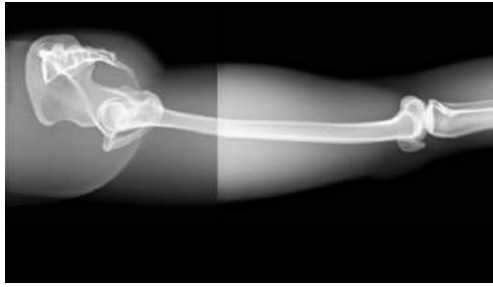
ลดขนาดภาพให้เล็กลง อีกทั้งยังมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ เพื่อประสิทธิภาพในผลของการเชื่อมต่อและลดระยะเวลาในการประมวลผลข้อมูลของอัลกอริทึม ผู้วิจัยจึงเลือกการปรับลดขนาดภาพให้เหลือ 25 เปอร์เซ็นต์ และขนาดหน้าต่างเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ของขนาดภาพ ทั้งในการเชื่อมต่อกระดูกยางค์ส่วนล่างและกระดูกยางค์ส่วนบน

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่วัดได้ในแต่ละชุดข้อมูลย่อยและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง

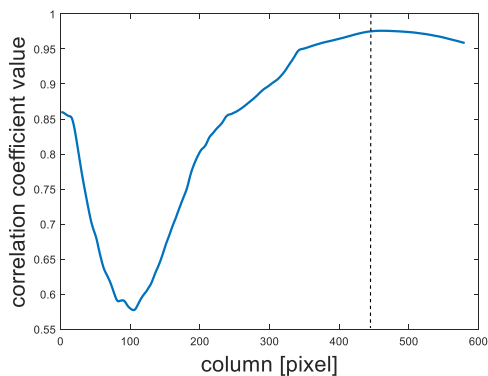
ภาพชุดที่ 1			
อัตราส่วนภาพ 1 (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนหน้าต่าง (เปอร์เซ็นต์)	correlation coefficient	mean square error
100	20	0.9782	0.6331
	10	0.9773	0.2448
	5	0.9762	0.2223
50	20	0.9781	0.4578
	10	0.9773	0.4179
	5	0.9762	0.4053
25	20	0.9781	0.8374
	10	0.9772	0.7875
	5	0.9760	0.7087
ภาพชุดที่ 2			
อัตราส่วนภาพ 2 (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนหน้าต่าง (เปอร์เซ็นต์)	correlation coefficient	mean square error
100	20	0.9846	0.0837
	10	0.9831	0.0842
	5	0.9820	0.0844
50	20	0.9845	0.1656
	10	0.9831	0.1732
	5	0.9819	0.1735
25	20	0.9850	0.3413
	10	0.9835	0.3481
	5	0.9822	0.3503

3.4 ผลจากการเชื่อมต่อภาพ

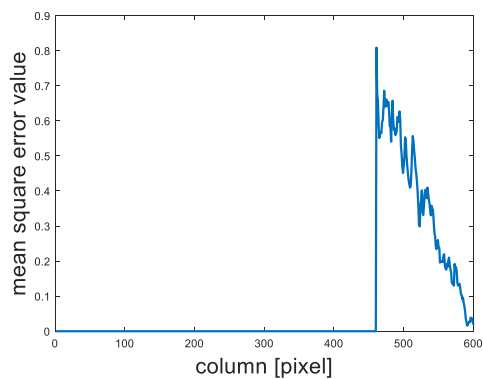
ผลจากการเชื่อมต่อภาพโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดที่วัดได้จากการเปรียบเทียบภาพสองภาพที่ถูกปรับลดขนาดให้เหลือ 25 เปอร์เซ็นต์ของขนาดภาพเดิม



(ก)



(ข)



(ค)

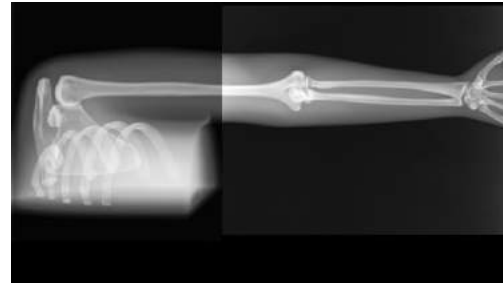
รูปที่ 7

(ก) ผลการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีกระดูกกรยางค์ส่วนล่าง

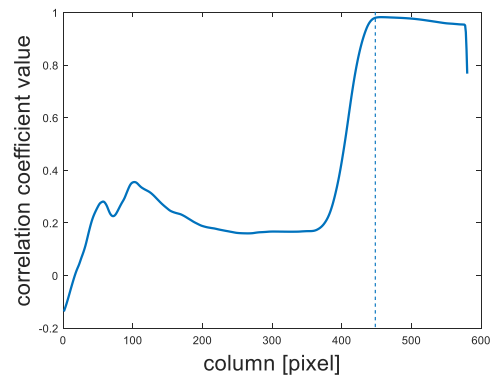
(ข) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

(ค) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง

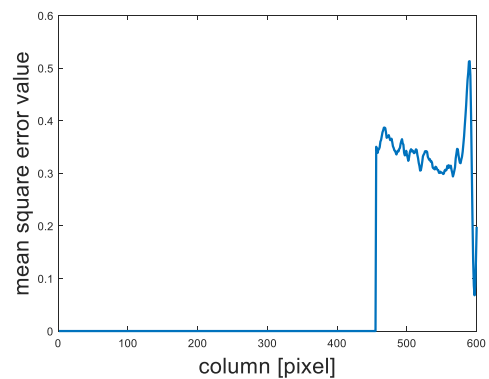
รูปที่ 7 กรณีที่ 1 เป็นผลจากการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีส่วนสะโพกและขา มีลักษณะการเชื่อมต่อภาพในตำแหน่งที่ไม่ทำให้รูปร่างไม่ผิดเพี้ยนเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดที่วัดได้คือ 0.9760 ซึ่งอยู่ในตำแหน่งคอลัมน์ที่ 454 (เส้นประ) และมีความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 0.7087 ในตำแหน่งเดียวกัน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8

(ก) ผลการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีกระดูกกรยางค์ส่วนบน

(ข) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

(ค) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง

กรณีที่ 2 เป็นผลจากการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีส่วนอกและแขนดังแสดงในรูปที่ 8 มีลักษณะการเชื่อมต่อภาพในตำแหน่งที่ไม่ได้ทำให้รูปร่างผิดเพี้ยนเช่นเดียวกับภาพถ่ายทางรังสีส่วนสะโพกและขา โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดที่วัดได้อยู่ในตำแหน่งคอลัมน์ที่ 451 มีค่าเท่ากับ 0.9822 (เส้นประ) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่วัดได้คือ 0.3503



4. บทสรุป

บทความชิ้นนี้นำเสนออัลกอริทึมการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีเพื่อการวินิจฉัยกระดูกข้อมือ โดยใช้เทคนิคของการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างภาพ 2 ภาพที่ผ่านขั้นตอนการกรองสัญญาณและปรับขนาดของภาพเพื่อจัดองค์ประกอบและพารามิเตอร์ของภาพให้เหมาะสมก่อนการเชื่อมต่อ จากนั้นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงที่สุดซึ่งได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มพิกเซลของภาพ 2 ภาพ มาเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเชื่อมต่อภาพ ซึ่งในกระบวนการกรองสัญญาณและลดขนาดภาพจะส่งผลโดยตรงต่อจำนวนครั้งในการคำนวณและเวลาในการประมวลผลภาพ โดยจากการทดลองในภาพถ่ายทางรังสีกระดูกข้อมือส่วนล่างและกระดูกข้อมือส่วนบนพบว่าผลการลดขนาดภาพมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยมาก จึงควรเลือกใช้การลดขนาดของภาพให้เหลือ 25 เปอร์เซ็นต์ของขนาดภาพจริง จะทำให้ได้จำนวนครั้งในการคำนวณน้อยที่สุดโดยไม่ทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองเกิน 0.8636 ทั้งกรณีภาพถ่ายทางรังสีกระดูกข้อมือส่วนล่างและกระดูกข้อมือส่วนบน นอกจากนี้ผลลัพธ์จากการประมวลผลโดยใช้ขนาดภาพที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของขนาดภาพจริงประกอบกับเทคนิคการสร้างหน้าต่างทำให้ได้ค่าความถูกต้องในการเชื่อมต่อภาพถ่ายทางรังสีของกระดูกข้อมือส่วนล่างและกระดูกข้อมือส่วนบนเท่ากับ 97.60 เปอร์เซ็นต์และ 98.22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และแม้ว่าจะมีผลกระทบที่ทำให้ภาพมีระดับสัญญาณไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์แอนดฮิลล์เอฟเฟกต์ก็ยังสามารถวัดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองได้น้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดคือเท่ากับ 0.7087 ในกรณีภาพถ่ายทางรังสีกระดูกข้อมือส่วนล่างและ 0.3503 ในกรณีกระดูกข้อมือส่วนบน

5. อ้างอิง

- [1] ข้อมูลสถิติจำนวนผู้สูงอายุประเทศไทยประจำปี 2559. Available from: <http://www.dop.go.th/th/Know/1/51> [Accessed 20th November 2017].
- [2] Fan Y, Yan H, Zhen ZD, Ang Y. Improvement of automated image stitching system for dr x-ray images. Comput Biol Med. 2016;71: 108-14.
- [3] Patil VP, Gohaatre UB. Performance comparison of image stitching methods under different illumination conditions. Int J Eng Technol Sci Res. 2017;4(9):249-59.
- [4] Rankov V, Locke RJ, Edens RJ, Barber PR, Vojnovic B. An algorithm for image stitching and blending. In: Conchello JA, Cogswell CJ, Wilson T, editors. Three- dimensional and multidimensional microscopy: Image acquisition and processing 12; 2005 Mar, p. 190-99.
- [5] Paudel K. Stitching of x-ray image. thesis. Uppsala university; 2012.
- [6] Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt JR EM, Boone JM. X- ray production x- ray tubes and x- ray generators. In: Mitchell CW, editor. The essential physics of medical imaging. China: Lippincott Williams & Wilkins;2012: p. 171-206.
- [7] Sreegadha GS. Image Interpolation Based On Multi Scale Gradients. In: procedia. comput. sci. j. 2016; 85:713-24.
- [8] Fadnavis S. Image interpolation techniques in digital image processing: an overview. Int J Eng Res App. 2014;4(10):70-3.
- [9] Bracewell RB. Two-dimensional convolution. In: Oppenheim AV, editor. Two-dimensional imaging. New Jersey: Prentice-Hall;1995. p. 179-87.

การจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมในระบบจำหน่ายปฐมภูมิโดยใช้รูปแบบโหลด

Optimal Capacitor Placement in Primary Distribution System Using Load Profile Consideration

ณัฐพล ชูสกุล พงษ์ศักดิ์ ทามแก้ว กฤติเดช บัวใหญ่ และกานต์ เกิดชื่น*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Nataphon Choosakun, Pongsak Tamkeaw, Krittidet Buayai and Kaan Kerdchuen*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture

Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kaan.kerdchuen@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 081-7003242

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมในระบบจำหน่ายปฐมภูมิ โดยพิจารณาจากรูปแบบโหลด ในการพิจารณาจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหลายวัตถุประสงค์ที่เรียกว่าวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) ในฟังก์ชันเป้าหมายเดียวประกอบด้วยสองวัตถุประสงค์ คือพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบ และการเบี่ยงเบนของแรงดันของโหลดบัส โหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในบทความนี้จะพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ คือ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม และโหลดแบบที่พักอาศัย โดยทำการทดลองในระบบ 33 บัสแบบเรเดียล ที่พิจารณาโหลดแบบสูงสุด โหลดรายวันเฉลี่ย โหลดรายวันที่แบ่งเป็นสามช่วง และโหลดรายวัน ผลการทดสอบพบว่าวิธีการพิจารณาแบบโหลดรายวันเฉลี่ยสามารถหาค่าตัวเก็บประจุที่ประนีประนอมระหว่างพลังงานไฟฟ้าสูญเสียกับคุณภาพแรงดันไฟฟ้าได้ดีที่สุด

คำสำคัญ การจัดวางตัวเก็บประจุ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าปฐมภูมิ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมหลายวัตถุประสงค์

Abstract

This paper proposes the optimal capacitor placement in primary distribution power systems using multi-objective optimization called Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II. The energy loss and average voltage deviation are included in the objective function. The load of distribution power systems are considered in three different settings: department store, factory and residential area, all installed in a 33-bus test system. These three load profiles are considered at peak load, average load, daily load divided in three durations, and real daily load. The results show that the compromise between system energy loss and voltage profile can be reached in average load.

Keywords: capacitor placement, primary distribution power systems, multi-objective optimization

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้ามีพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายมีเพิ่มมากขึ้นและทำให้คุณภาพของแรงดันไฟฟ้าลดลง ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ถูกติดตั้งเพื่อทำให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีคุณภาพระดับแรงดันดีขึ้น แต่เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลต่อพลังงานสูญเสียในระบบระบบไฟฟ้าและโหลดของการใช้พลังงานไฟฟ้ายังมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการใช้งาน

ดังนั้นการพิจารณาเกี่ยวกับการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมควรจะพิจารณาทั้งแรงดันไฟฟ้า และพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยคำนึงถึงโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปพร้อมๆกัน

ในหลายบทความ มีการศึกษาเกี่ยวกับการจัดวางตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ใน [1] มีการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยจะเป็นการพิจารณาที่โหลดคงที่ ใน [2] นำ RCGA



มาใช้ในการหาขนาดตัวเก็บประจุที่โดยพิจารณาโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา ทำให้ตัวเก็บประจุมีความเหมาะสมมากกว่าที่เป็นแบบโหลดคงที่ ใน [3] ได้นำโหลดโปรไฟล์มาใช้ในการพิจารณาการหาขนาดและตำแหน่งของตัวเก็บประจุ โดยใช้วิธีการวนซ้ำ อย่างไรก็ตามใน[1-3]เป็นการพิจารณาหาขนาดและตำแหน่งของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเป็นลักษณะของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว ใน [4] ได้นำเสนอวิธีการโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมวัตถุประสงค์หลายอย่าง NSGA-II ในการหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุ แต่โหลดที่ใช้ในการพิจารณาใช้เพียงแคeloadสูงสุดเพียงอย่างเดียว ใน [5] ได้นำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาใช้ในการหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยจะพิจารณาทั้งแรงดันไฟฟ้าและพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่าย แต่จะมีเฉพาะการพิจารณาโหลดที่รายวันที่แบ่งเป็นสามช่วง โดยในวิธี NSGA-II นี้ได้มีการนำเสนอครั้งแรกใน [6] ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการแก้ปัญหาได้อย่างดี

บทความนี้จึงนำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งและหาขนาดของตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยนำโหลดหลายรูปแบบมาพิจารณา โหลดแต่ละรูปแบบจะพิจารณาในลักษณะโหลดที่แตกต่างกันคือ โหลดสูง โหลดรายวันเฉลี่ย โหลดตามช่วงเวลา และโหลดรายวัน โดยนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งตัวเก็บประจุที่จะถูกนำมาติดตั้งเป็นแบบคงที่และแบบสวิตช์ โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมวัตถุประสงค์หลายอย่าง ที่พิจารณาทั้งพลังงานสูญเสียและคุณภาพแรงดันไปพร้อมๆกัน

2. กำหนดปัญหาและฟังก์ชันเป้าหมาย

2.1 กำหนดปัญหา

ในบทความนี้จะนำเสนอการจัดวางตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับระบบจำหน่าย โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ การติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว และ 2 ตัว โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบ 1 ตัวจะพิจารณาทั้งหมด 6 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาโหลดสูงสุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 2 พิจารณาโหลดรายวันเฉลี่ย โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 3 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 4 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบสวิตช์

กรณีที่ 5 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 6 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบสวิตช์

ในส่วนของการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัวจะพิจารณาทั้งหมด 6 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาโหลดสูงสุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 เป็นแบบคงที่ทั้ง 2 ตัว

กรณีที่ 2 พิจารณาโหลดรายวันเฉลี่ย โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 เป็นแบบคงที่ทั้ง 2 ตัว

กรณีที่ 3 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 เป็นแบบคงที่ทั้ง 2 ตัว

กรณีที่ 4 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 แบบคงที่ และตัวที่ 2 แบบสวิตช์

กรณีที่ 5 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 แบบคงที่

กรณีที่ 6 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 แบบคงที่ ตัวที่ 2 แบบสวิตช์

โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว และ 2 ตัว จะมีเงื่อนไขในการกำหนดขนาดของตัวเก็บประจุโดยขนาดของตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้มี 4 ขนาด คือ 0.3 0.6 0.9 1.2 เมกะวาร์ โดยอ้างอิงจากขนาดตัวเก็บประจุของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังสมการที่ (1)

$$F(x,u) = [f_1(x,u), f_2(x,u)] \quad (1)$$

เมื่อ $F(x,u)$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย X คือ สถานะของระบบจำหน่าย เช่น โหลดของระบบไฟฟ้า u คือ ตัวแปรแทนตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ F_1 คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบ F_2 คือ แรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสเฉลี่ย

2.2 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)

สำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิมีฟังก์ชันเป้าหมาย คือ 1.) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุด และ 2.) แรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสน้อยที่สุด

2.2.1.) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุด (Minimize the system energy loss: E_{loss})

$$\text{Min } f_1(x,u) = 24P_L \quad (2)$$

$$\text{Min } f_1(x,u) = \sum_{h=1}^H \sum_{b=1}^B \Delta P_h^{(b)}(x,u) \Delta t_h \quad (3)$$

เมื่อ P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในระบบจำหน่าย (กิโลวัตต์) $\Delta P_h^{(b)}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในแต่ละสาขา $b=1,...,B$ ที่ช่วงเวลา $h=1,...,H$

2.2.2.) แรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสน้อยที่สุด (Minimize the average load voltage deviation:LVD)

$$\text{Min } f_2(x, u) = \sum_{i=2}^N \left(\frac{V^{(ref)} - V^{(i)}}{V^{(ref)}} \right) \quad (4)$$

$$\text{Min } f_2(x, u) = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \sum_{i=2}^N \left(\frac{V^{(ref)} - V_h^{(i)}(x, u)}{V^{(ref)}} \right) \quad (5)$$

เมื่อ $V^{(ref)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง(ปกติเป็น 1 pu.) $V^{(i)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส $i=2,...,N$ (ยกเว้นบัสอ้างอิง) $V_h^{(i)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส $i=2,...,N$ (ยกเว้นบัสอ้างอิง) ที่ช่วงเวลา $h=1,...,H$

สำหรับการหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวในกรณี 1 และ 2 หาได้ในสมการที่ (2) และในกรณีที่ 3-6 หาได้ในสมการที่ (3) ส่วนในการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว จะหาค่าที่ดีที่สุดในการกรณีที่ 1 และ 2 ได้จากสมการที่ (2) และกรณีที่ 3-6 หาได้จากสมการที่ (3) และการหาค่าแรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสน้อยที่สุดสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวในกรณีที่ 1 และ 2 แสดงในสมการที่ (4) และในกรณีที่ 3-6 ดังแสดงในสมการที่ (5) ในการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว ในกรณีที่ 1 และ 2 หาได้จากสมการ (4) และในกรณีที่ 3-6 หาได้จากสมการที่ (5)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทความวิจัยนี้จะเป็นการหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพิจารณาหาตำแหน่งเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ เมื่อพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ จะมีวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1. การนำเข้าโหลด

ในบทความนี้จะนำโหลดมาพิจารณา 3 รูปแบบ คือ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า[7] โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม[7] และโหลดแบบที่พักอาศัย โดยโหลดที่พิกัดนำข้อมูลมาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สถานี NRC02VB-01 นครราชสีมา 03 ฟีดเดอร์ 02 ซับ 01 [8] โหลดทั้ง 3 รูปแบบจะทำการหาโหลดสูงสุด โหลดรายวันเฉลี่ย และโหลดตามช่วงเวลาซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา คือ โหลดสูงสุด โหลดปานกลาง และโหลดต่ำสุด และโหลดรายวัน

โหลดแบบห้างสรรพสินค้า ได้จากการจำลอง[7] โดยจะกำหนดค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่า 0.85 โดยโหลดรายวัน ดังรูปที่ 1 จะมีโหลดสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลา 16:00 น. มีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.987 และ 0.612 pu. โหลดรายวันเฉลี่ยมี กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.565 และ 0.350 pu. โหลดตามช่วงเวลา 3 ช่วงเวลา โหลดสูงสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.955 และ 0.592 pu. และมีเวลา 10 ชั่วโมง โหลดปานกลางมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.615 และ 0.381 pu. และมีเวลา 4 ชั่วโมง โหลดต่ำสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.156 และ 0.096 pu. และมีเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 1 โหลดแบบห้างสรรพสินค้า



รูปที่ 2 โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

โหลดแบบอุตสาหกรรม ได้จากการจำลอง[8] จะถูกกำหนดค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่า 0.85 โดยโหลดรายวัน ดังรูปที่ 2 โหลดสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลา 00:00 น. มีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.987 และ 0.612 pu. โหลดรายวันเฉลี่ยมี กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.767 และ 0.475pu. โหลดตามช่วงเวลา 3 ช่วงเวลา โหลดสูงสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.942 และ 0.583 pu. และมีเวลา 9 ชั่วโมง โหลดปานกลางมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.766 และ 0.475 pu. และมีเวลา 6 ชั่วโมง โหลดต่ำสุดมีกำลังไฟฟ้าจริง

และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.592 และ 0.367 pu. และมีเวลา 9 ชั่วโมง

โหลดที่พิกอศัย [8] เนื่องจากเป็นโหลดที่ได้จากการใช้งานจริง ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไม่เท่ากัน เพื่อจัดทำกราฟช่วงเวลาโหลด จะนำกำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ [8] มาหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ จากสมการที่ (6) และจะแสดงกราฟช่วงเวลาโหลดในรูปที่ 3

$$S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 \quad (6)$$

เมื่อ S_i คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ช่วงเวลา i (pu.) P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ช่วงเวลา i (pu.) และ Q_i คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ช่วงเวลา i (pu.)

โหลดแบบที่พิกอศัย [8] โหลดสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลา 20:00 น. มีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.952 และ 0.656 pu. ตามลำดับ โหลดรายวันเฉลี่ยมีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.770 และ 0.346 pu. ตามลำดับ โหลดตามช่วงเวลา 3 ช่วงเวลา โหลดสูงสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.925 0.523 pu. ตามลำดับ และมีเวลา 3 ชั่วโมง โหลดปานกลางมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.823 0.373 pu. ตามลำดับ และมีเวลา 10 ชั่วโมง โหลดต่ำสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ คือ 0.679 0.275 pu. ตามลำดับ และมีเวลา 11 ชั่วโมง



รูปที่ 3 กราฟช่วงเวลาโหลดของสถานี NRC02VB-01 นครราชสีมา

3.2 กำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย

ในการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุนั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.2

3.3 รั้นโหลดโพล์

ในบทความนี้จะนำข้อมูลโหลดแบบทางสรรพสินค้า โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม และโหลดแบบที่พักอาศัย จะนำเข้าโหลดแต่ละรูปแบบเป็นค่าต่อหน่วย (Per Unit) แล้วนำมาคูณกับค่าโหลดดีมานต์ของระบบจำหน่าย 33 บัสแบบเรเดียล [9] มี Base kV = 12.66 kV และ Base MVA = 10 MVA กำลังไฟฟ้ารวมของโหลดคือ 3.72 MW และ 2.3 MVar ตามลำดับ โดยมีบัสที่ 1 เป็นบัสอ้างอิง มีโหลดบัสตั้งแต่บัสที่ 2-33

3.4 การหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุด้วยวิธีการ NSGA-II

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการค้นหาเซตคำตอบภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุด หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละฟังก์ชันพร้อมๆ

ในงานวิจัยนี้จะใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ NSGA-II ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด รายงานการใช้ครั้งแรกโดย [6] แสดงให้เห็นว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ อัลกอริทึมนี้โดดเด่นด้วยวิธีการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำได้อย่างรวดเร็ว ส่วนขั้นตอนและรายละเอียดการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อจัดวางตัวเก็บประจุนี้เป็นดังใน [4]

3.5 การเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการฟัซซี่ [4]

ในบทความนี้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเชิงเส้นอย่างง่ายได้รับการพิจารณาสำหรับแต่ละฟังก์ชันเป้าหมาย ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมีดังสมการที่(7)

$$\mu_{f_i}(z) = \begin{cases} 1 & f_i(z) \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(z)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} < f_i(z) < f_i^{\max} \\ 0 & f_i(z) \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

ฟังก์ชันสมาชิก $\mu_{f_i}(z)$ จะมีค่า 0 ถึง 1 เมื่อ $\mu_{f_i}(z) = 0$ หมายถึงความไม่เข้ากันของชุดคำตอบ ขณะที่ $\mu_{f_i}(z) = 1$ หมายถึง ความเข้ากันได้แบบเต็มรูปแบบ

คำตอบที่ประนีประนอมสามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบผสม สำหรับแต่ละคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ k ฟังก์ชันสมาชิกแบบผสม หาได้จากสมการที่ (8)

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k} \quad (8)$$

เมื่อ M คือ จำนวนของลำดับที่ไม่ถูกรอรับ N_{obj} คือ จำนวนฟังก์ชันเป้าหมาย

ฟังก์ชัน $\mu_{f_i}(z)$ ถือเป็นฟังก์ชันสมาชิกคำตอบไม่ถูกรอรับในฟังก์ชันเซต จุดที่มีสมาชิกคำตอบมากที่สุดในฟังก์ชันเซต คือ คำตอบประนีประนอมดีที่สุด

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุจะถูกนำเสนอ ในโหลดทั้ง 3 รูปแบบ โดยโหลดแต่ละรูปแบบจะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ ทั้งแบบ 1 และ 2 ตัว โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุทั้ง 6 กรณี ดังที่กล่าวมาในขั้นตอนที่ 2.1 แล้วหากรณีที่ดีที่สุด ที่ลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบ และแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนเล็กน้อยที่สุด

4.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับโหลดแบบห้างสรรพสินค้า

โดยในกรณีฐาน (Base Case) คือกรณีที่ไม่มีติดตั้งตัวเก็บประจุ จะมีพลังงานสูญเสียในระบบเป็น 1.1784 เมกะวัตต์ชั่วโมง และค่าความเบี่ยงเบนของแรงดัน LVD เฉลี่ย เป็น 0.0403 pu.

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว สำหรับ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง	ขนาดตัว เก็บประจุ (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน				1.1784	0.0403
1	F1&F2	10	1.2	3.7124	0.0424
2	F1&F2	7	1.2	1.1597	0.0107
3	F1&F2	7	1.2	1.6822	0.0221
4	F1&F2	10	ตารางที่ 7	1.8117	0.0162
5	F1&F2	7	1.2	1.7011	0.0233
6	F1&F2	10	ตารางที่ 8	1.7755	0.0203

จากตารางที่ 1 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือ การพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 7 ขนาดตัวเก็บประจุ 1.2 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าลดลง 1.59% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 73.45% เมื่อเทียบกับกรณีฐานสำหรับขนาดของตัวเก็บประจุในกรณีที่ 4 และ 6 จะมีค่าดังตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว สำหรับ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง ที่ 1	ขนาดตัว เก็บประจุ 1 (MVar)	ตำแหน่ง ที่ 2	ขนาดตัว เก็บประจุ 2 (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน						1.1784	0.0403
1	F1&F2	30	0.2	14	0.6	3.5950	0.0279
2	F1&F2	29	0.9	14	0.6	1.5715	0.0037
3	F1&F2	14	0.6	30	0.6	1.8424	0.0156
4	F1&F2	10	0.6	7	ตารางที่ 9	1.8462	0.0129
5	F1&F2	14	0.6	30	0.6	1.8605	0.0178
6	F1&F2	17	0.3	30	ตารางที่ 10	1.7181	0.0177

จากตารางที่ 2 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือการพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ที่บัส 29 ขนาดตัวเก็บประจุ 0.9 เมกะวาร์ และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ที่บัส 14 ขนาด 0.6 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 33.36% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 90.82% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน โดยขนาดตัวเก็บประจุในตำแหน่งติดตั้งที่ 2 ในกรณีที่ 4 และ 6 จะแสดงในตารางที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

4.2 การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับโหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

ในกรณีฐาน (Base Case) คือกรณีที่ไม่มีติดตั้งตัวเก็บประจุ จะมีพลังงานสูญเสียในระบบเป็น 2.2772 เมกะวัตต์ชั่วโมง และค่าความเบี่ยงเบนของแรงดัน LVD เฉลี่ย เป็น 0.0534 pu

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว สำหรับ โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง	ขนาดตัว เก็บประจุ (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน				2.2772	0.0534
1	F1&F2	10	1.2	3.7124	0.0424
2	F1&F2	7	1.2	1.9802	0.0268
3	F1&F2	7	1.2	2.0755	0.0287
4	F1&F2	10	ตารางที่ 7	2.2483	0.0227
5	F1&F2	7	1.2	2.0830	0.0292
6	F1&F2	10	ตารางที่ 8	2.3202	0.0271

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณา f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือการพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 7 ขนาดตัวเก็บประจุ



1.2 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าลดลง 13.04% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 49.81% เมื่อเทียบกับกรณีฐานสำหรับขนาดของตัวเก็บประจุในกรณี 4 และ 6 จะแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว สำหรับโหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

กรณี	ฟังก์ชันเป้าหมาย	ตำแหน่งที่ 1	ขนาดตัวเก็บประจุ 1 (MVar)	ตำแหน่งที่ 2	ขนาดตัวเก็บประจุ 2 (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน						2.2772	0.0534
1	F1&F2	30	0.2	14	0.6	3.5950	0.0279
2	F1&F2	15	0.6	30	0.9	2.284	0.0135
3	F1&F2	29	1.2	14	0.6	2.6303	0.0125
4	F1&F2	30	0.9	14	ตารางที่ 9	2.5103	0.0129
5	F1&F2	14	0.6	29	1.2	2.6372	0.0129
6	F1&F2	15	0.6	30	ตารางที่ 10	2.3622	0.0161

จากตารางที่ 4 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือ พิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ที่ บัส 15 ขนาดตัวเก็บประจุ 0.6 เมกะวาร์ และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ที่บัส 30 ขนาด 0.9 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.30% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 74.72% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน โดยตัวเก็บประจุขนาดที่ 2 ในกรณีที่ 4 และ 6 จะแสดงในตารางที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

4.3 การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับโหลดแบบที่พักอาศัย

โดยในกรณีฐาน (Base Case) คือกรณีที่ไม่มีติดตั้งตัวเก็บประจุ จะมีพลังงานสูญเสียในระบบเป็น 2.0611 เมกะวัตต์ ชั่วโมง และค่าความเบี่ยงเบนของแรงดัน LVD เฉลี่ยเป็น 0.0463 pu.

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว สำหรับโหลดแบบที่พักอาศัย

กรณี	ฟังก์ชันเป้าหมาย	ตำแหน่ง	ขนาดตัวเก็บประจุ (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน				2.0611	0.0463
1	F1&F2	10	1.2	3.4811	0.0371
2	F1&F2	7	1.2	2.0660	0.0228
3	F1&F2	9	1.2	2.3634	0.0238
4	F1&F2	10	ตารางที่ 7	2.2528	0.0245
5	F1&F2	7	1.2	2.0533	0.0239
6	F1&F2	10	ตารางที่ 8	2.2280	0.0227

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณา f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือ พิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 30 ขนาดตัวเก็บประจุ 1.2 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าลดลง 2.67% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 50.76% เมื่อเทียบกับกรณีฐานสำหรับตัวเก็บประจุในกรณีที่ 4 ดูได้จากตารางที่ 7 และตัวเก็บประจุในกรณีที่ 6 ดูได้จากตารางที่ 8

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว สำหรับโหลดแบบที่พักอาศัย

กรณี	ฟังก์ชันเป้าหมาย	ตำแหน่งที่ 1	ขนาดตัวเก็บประจุ 1 (MVar)	ตำแหน่งที่ 2	ขนาดตัวเก็บประจุ 2 (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
Base Case						2.0611	0.0463
1	F1&F2	15	0.6	30	1.2	3.4757	0.0233
2	F1&F2	29	0.9	14	0.6	2.4274	0.0115
3	F1&F2	14	0.6	30	0.9	2.4865	0.0154
4	F1&F2	29	0.9	14	ตารางที่ 9	2.6036	0.0116
5	F1&F2	14	0.6	29	0.9	2.4713	0.0126
6	F1&F2	14	0.6	30.0	ตารางที่ 10	2.3278	0.0146

จากตารางที่ 6 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือ พิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ที่ บัส 29 ขนาดตัวเก็บประจุ 0.9 เมกะวาร์ และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ที่บัส 14 ขนาด 0.6 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 17.77% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 75.16% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน โดยตัวเก็บประจุขนาดที่ 2 ในกรณีที่ 4 จะแสดงในตารางที่ 9 และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 6 จะแสดงในตารางที่ 10

จากการทดลอง การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิ แบบติดตั้ง 1 ตัว และ 2 ตัว โดยพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ คือ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม และโหลดแบบที่พักอาศัย พบว่า การพิจารณาลักษณะของโหลดรายวันเฉลี่ย จะให้ค่าพลังงานสูญเสียรวมในระบบและแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนเฉลี่ยดีที่สุดในทุกรูปแบบโหลด

ตารางที่ 7 ขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 4 โหลด รายวัน ที่แบ่งเป็น 3 ช่วง ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงาน อุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย
โหลด	MVar		
สูงสุด	1.2	1.2	1.2
ปานกลาง	1.2	1.2	0.9
ต่ำสุด	0.3	0.9	0.9

จากตารางที่ 7 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 4 คือแบ่งโหลดออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิตช์ ขนาดของตัวเก็บประจุจะมี 3 ค่า คือขนาดของตัวเก็บประจุ เมื่อโหลดสูงสุด จะเปลี่ยนแปลงเมื่อถึงโหลดปานกลาง และจะเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดต่ำสุดโดยที่ตำแหน่งของตัวเก็บประจุจะคงที่อยู่ที่ตำแหน่งเดิม

ตารางที่ 8 ขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 6 โหลด รายวัน ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพ สินค้า	โรงงาน อุตสาหกรรม	ที่พัก อาศัย	รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพ สินค้า	โรงงาน อุตสาหกรรม	ที่พัก อาศัย
เวลา	Mvar			เวลา	Mvar		
1:00	0.3	0.9	1.2	13:00	0.9	0.6	0.9
2:00	1.2	0.6	0.9	14:00	0.9	0.9	0.9
3:00	1.2	0.9	0.9	15:00	0.9	1.2	1.2
4:00	0.3	1.2	1.2	16:00	0.9	0.6	1.2
5:00	0.6	0.9	0.9	17:00	1.2	0.9	0.9
6:00	1.2	0.6	0.9	18:00	0.6	1.2	0.9
7:00	1.2	0.6	0.9	19:00	0.9	0.9	0.6
8:00	0.6	1.2	1.2	20:00	0.3	1.2	1.2
9:00	0.9	0.9	1.2	21:00	0.9	0.9	1.2
10:00	0.9	0.6	0.6	22:00	1.2	1.2	0.9
11:00	0.9	0.9	0.9	23:00	0.3	1.2	0.9

จากตารางที่ 8 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 6 คือโหลดรายวัน ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิตช์ ขนาดของตัวเก็บประจุจะมี 24 ค่า คือขนาดของตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงเป็นรายชั่วโมง จนครบ 1 วัน

ตารางที่ 9 ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 4 โหลด รายวัน ที่แบ่งเป็น 3 ช่วง ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงาน อุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย
โหลด	MVar		
สูงสุด	0.9	1.2	1.2
ปานกลาง	0.9	1.2	0.9
ต่ำสุด	0.3	0.3	0.3

จากตารางที่ 9 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 4 คือแบ่งโหลดออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิตช์ โดยตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 1 จะคงไว้เช่นเดิม ส่วนตำแหน่งของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 จะคงไว้และเปลี่ยนแปลงขนาดไปตามโหลดที่ถูกแบ่งไว้เป็น 3 ช่วง

ตารางที่ 10 ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 6 โหลด รายวัน ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพ สินค้า	โรงงาน อุตสาหกรรม	ที่พัก อาศัย	รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพ สินค้า	โรงงาน อุตสาหกรรม	ที่พัก อาศัย
เวลา	Mvar			เวลา	Mvar		
0:00	0.6	0.9	0.6	12:00	0.9	0.9	0.3
1:00	0.6	0.9	0.6	13:00	0.6	0.9	0.6
2:00	1.2	0.6	0.9	14:00	1.2	0.9	0.9
3:00	0.6	0.9	0.9	15:00	0.3	1.2	0.9
4:00	0.3	1.2	0.9	16:00	0.6	0.6	0.3
5:00	0.9	0.6	0.6	17:00	0.9	0.3	0.6
6:00	1.2	0.3	0.9	18:00	0.9	0.6	0.9
7:00	1.2	1.2	0.6	19:00	0.6	1.2	1.2
8:00	0.3	0.6	0.6	20:00	0.6	1.2	0.6
9:00	0.9	0.6	0.6	21:00	1.2	0.6	0.3
10:00	0.9	0.9	0.9	22:00	1.2	0.9	0.6
11:00	0.9	0.9	0.9	23:00	0.3	1.2	0.6

จากตารางที่ 10 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 6 คือโหลดรายวัน โดยตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 1 จะคงไว้เช่นเดิม ส่วนตำแหน่งของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 จะคงไว้และขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิตช์ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

5. สรุป

บทความนี้ได้พิจารณาการติดตั้งตัวเก็บประจุที่คำนึงถึงทั้งพลังงานสูญเสียรวมในระบบและคุณภาพระดับแรงดัน โดยพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ โดยการทดลองติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว และ 2 ตัว โดยที่ชนิดของตัวเก็บประจุเป็นแบบคงที่ และสวิตช์ โดยการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้งชนิดของตัวเก็บประจุและสวิตช์ สามารถแก้ปัญหาเพื่อหาตำแหน่งและค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมระหว่างพลังงานสูญเสียรวมในระบบและคุณภาพระดับแรงดันได้ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุที่พิจารณาที่โหลดรายวันเฉลี่ย จะให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบและแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนดีที่สุด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M Mozaffarilegha et al, "Capacitor Placement in Radial Distribution System For Improve Network Efficiency Using Artificial Bee Colony," Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 3, Issue 6, Nov- Dec 2013, pp.228.233.
- [2] R. A. hHooshmand and M. Ataei, "Optimal Capacitor Placement in Actual Configuration And Operational Conditions of Distribution Systems Using RCGA," Journal of Electrical Engineering, Vol. 58, No. 4, 2007, 189-199
- [3] ธนาพัฒน์ พูนคล้าย ยุทธนา คงจีน กานนท์ เกิดชื่น และกฤติเดช บัวใหญ่ "การหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยมีค่าโหลดบัสเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา" ESTATON2017. 21 กรกฎาคม 2560
- [4] K. Buayai, C. Lekdee, P. Inrawong, and K. Kerdchuen, "Practical Capacitor Placement for Power Loss Reduction and Voltage Improving by NSGA- II," 13th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016
- [5] กฤติเดช บัวใหญ่ มงคล ตรีกิจจานนท์ ประเสริฐ เผื่อนหมื่นไวย กิตติวุฒิ จินนະบุตร และ กานนท์ เกิดชื่น "การจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมโดยใช้ NSPSO"การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON37) พ.ศ.2557
- [6] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, " A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Trans., Evol. Comput. 6 (2) (2002) 182–197.
- [7] ชำนาญ ห่อเกียรติ "ระบบไฟฟ้ากำลัง" มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2552
- [8] ข้อมูลโหลดจากระบบจำหน่ายสถานีนครราชสีมา 03 ฟีดเดอร์ 02 ซับ 01 สถานะวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ.2560, แผนกควบคุมศูนย์สั่งการ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา
- [9] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989.

คำแนะนำในการเขียนบทความ

วัตถุประสงค์ของวารสาร

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นวารสารทางวิชาการจัดพิมพ์ฉบับแรกในเดือนมกราคม พ.ศ.2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ทางที่น่าสนใจด้าน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ และมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ โดยสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องได้แก่ วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ วิศวกรรมระบบควบคุม วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกลวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของบทความ

บทความวิจัย (research articles) เป็นรายการวิจัย หรือ รายงานทางวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งสร้างความก้าวหน้าวิชาการ โดยบทความดังกล่าวจะต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสือ

บทความปริทัศน์ (review articles) เป็นบทความที่รวบรวมความรู้เชิงวิชาการเรื่องใดเรื่องหนึ่งจากวารสารหรือหนังสือ โดยมีการวิเคราะห์และวิจารณ์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเชิงลึกอย่างแท้จริง

การส่งบทความ

นักวิจัยและผู้สนใจตีพิมพ์บทความในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา สามารถจัดส่งบทความโดยมีรายการดังต่อไปนี้ คือ (1) ต้นฉบับบทความที่เป็นข้อมูลของโปรแกรม Microsoft word และ Adobe Acrobat จำนวนอย่างละ 1 ชุด (2) จัดหมายนำส่งที่เป็นข้อมูลของโปรแกรม Adobe Acrobat จำนวน 1 ชุด โดยสามารถจัดส่งได้ทั้งทางอีเมล EngineeringJournal@mutl.ac.th และทางไปรษณีย์

ที่อยู่และสถานที่จัดส่งจดหมาย

“กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา”

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัด
เชียงใหม่ เบอร์โทรศัพท์ 053921444 ต่อ1236

กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (รายหกเดือน)

กรณีที่บทความได้รับการตีพิมพ์ กองบรรณาธิการจะแจ้งรายละเอียดที่ต้องแก้ไขครั้งสุดท้ายให้ผู้เขียนบทความทราบ หลังจากที่ยื่นได้พัฒนาบทความฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนบทความจะต้องส่งเอกสารดังนี้ คือ 1) ต้นฉบับบทความที่เป็นข้อมูลของโปรแกรม Microsoft word และ Adobe Acrobat จำนวนอย่างละ 1 ชุด โดยสามารถจัดส่งได้ทั้งทางอีเมล และทางไปรษณีย์ตามที่อยู่ที่กล่าวไว้ในข้างต้น

โครงสร้างของบทความ

1. บทนำ
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย
3. ผลการวิจัยและอภิปราย
4. สรุป
5. กิตติกรรมประกาศ
6. เอกสารอ้างอิง

การเตรียมบทความ

1. การพิมพ์บทความใช้แบบอักษร TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษรเท่ากับ 14 ใช้กระดาษขนาด A4 ซึ่งมีความกว้าง x ยาว เท่ากับ 21.2x29.7 ซม. พิมพ์ด้านเดียว โดยระยะห่างระหว่างบรรทัดเท่ากับหนึ่งช่อง และพิมพ์ห่างระยะห่างจากขอบกระดาษเท่ากับ 2.5 ซม. ริมขอบกระดาษด้านบน 2.5 ซม. ริมขอบกระดาษด้านล่าง 2.0 ซม. ริมขอบกระดาษด้านซ้าย 2.5 ซม. ริมขอบกระดาษด้านขวา 2.0 ซม.

2. ทุกด้านข้างของกระดาษ ส่วนตัวเลขหน้ากำหนดให้อยู่ด้านล่างขวา จำนวนหน้าของบทความทั้งหมดไม่ควรเกิน 8 หน้ากระดาษขนาด A4

3. ภาพประกอบทุกภาพและตารางควรมีการอ้างอิงในบทความ รูปภาพที่เป็นดิจิทัลควรเลือกใช้รูปแบบ eps tiff หรือ jpg และมีความละเอียดของภาพไม่น้อยกว่า 300 dpi

4. ตัวเลขที่ใช้เป็นเลขอารบิกเท่านั้น

5. ตารางที่ใช้ต้องมีหัวข้อและเชิงอรรถเพื่อบรรยายคำย่อ สัญลักษณ์ หรือเครื่องหมายที่ใช้

6. หน่วยที่ใช้ควรใช้ระบบหน่วย International System Units หรือ SI โดยในบทความต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ

7. คำภาษาไทยให้ใช้ตัวสะกดตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน

8. ศัพท์ภาษาอังกฤษให้แปลเป็นภาษาไทย ให้ใช้คำที่ราชบัณฑิตยสถานบัญญัติได้กำหนดไว้ให้ ในกรณีที่ไม่มียังไม่ถูกกำหนด ให้เขียนภาษาอังกฤษในวงเล็บด้านหลังเฉพาะครั้งแรกเท่านั้น

9. การย่อคำและการกำหนดสัญลักษณ์ให้ใช้เฉพาะคำย่อมาตรฐานโดยควรกำหนดคำเติมก่อนครั้งแรกและอ้างอิงคำย่อไว้ท้าย

ส่วนประกอบของบทความ

1. ชื่อเรื่องที่ใช้ควรกระชับและชัดเจนแต่ครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมด และไม่ควรรวมตัวอักษรย่อ

2. บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ จะต้องแสดงรายละเอียดและระบุ ชื่อเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการวิจัย ผลการวิจัย สรุปผล โดยความยาวของบทคัดย่อไม่ควรเกิน 250 คำ และมีคำสำคัญประมาณ 3-5 คำ ส่วนการค้นในบทคัดย่อภาษาไทย ให้ใช้ เว้นวรรค และเรียงตามตัวอักษร ส่วนการค้นคำสำคัญให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คำสำคัญภาษาอังกฤษต้องให้ความหมายเหมือนคำสำคัญภาษาไทย และมีจำนวนเท่ากับคำสำคัญภาษาไทย

3. เนื้อเรื่องของบทความจะประกอบไปด้วย บทนำ ทฤษฎี และวิธีการวิจัย ผลการวิจัยและอภิปราย บทสรุป กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิง

3.1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย สมมติฐาน ซึ่งเชื่อมโยงกับผลการวิจัย

3.2 ทฤษฎีและวิธีการวิจัย จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดของวัสดุและวิธีการที่ใช้ในการศึกษา โดยรายละเอียดที่แสดง สามารถนำไปทดลองทำซ้ำได้

3.3 ผลการศึกษาจะต้องแสดงเป็นหมวดหมู่และสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของบทความซึ่งผลการศึกษาสามารถแสดงในรูปแบบตารางและรูปภาพได้ แต่ต้องไม่ซ้ำกับเนื้อหาที่เขียนในส่วนนี้ ส่วนตำแหน่งการวางรูปภาพจะต้องอยู่หลังจากคำแนะนำในบทความ และไม่จำเป็นต้องแสดงทันทีทันใดหลังจากแนะนำหรือบรรยายบทความ ผู้เขียนอาจวางรูปใกล้กับรูปอื่นโดยจัดให้อยู่บริเวณด้านบนสุดหรือล่างสุดของบทความ โดยในแต่ละช่วงของผลการวิจัย ผู้เขียนสามารถเขียนบทวิจารณ์ และวิจารณ์ได้ทุกส่วนประกอบของบทความและผลของการวิจารณ์จะต้องแสดงองค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับผลประโยชน์ที่ได้รับ รวมทั้งรายละเอียดของปัญหาและอุปสรรคต่างๆ

3.5 สรุป เป็นการกล่าวถึงผลโดยย่อและข้อสรุปจากบทวิจารณ์

3.6 กิตติกรรมประกาศ เป็นส่วนที่กล่าวคำขอบคุณถึงองค์กร หรือบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนต่อผู้เขียน

3.7 เอกสารอ้างอิง ซึ่งการเขียนเอกสารอ้างอิงสามารถแสดงในลำดับถัดไป โดยใช้รูปแบบการอ้างอิงแบบ

การพิจารณากลับกรอง

บทความวิจัยและบทความปริทัศน์จะได้รับการกลับกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขานั้นๆ อย่างน้อย 2 ท่าน โดยใช้เวลาประมาณ 4-8 สัปดาห์ ในกรณีที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำให้แก้ไข ผู้เขียนต้องพิจารณาแก้ไขหรือชี้แจงเพิ่มเติมให้ผู้ทรงคุณวุฒิทราบ เมื่อผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนมีความเห็นตรงกัน และบทความได้แก้ไขเรียบร้อยแล้ว จึงสามารถดำเนินการขั้นตอนการตีพิมพ์บทความในวารสารได้

สำเนาพิมพ์

ผู้เขียนบทความวิจัยและบทความปริทัศน์จะได้รับวารสาร 1 ฉบับ และสำเนาพิมพ์ (Reprint) เรื่องละ 5 ชุด โดยหากผู้เขียนต้องการจำนวนมากกว่านี้จะต้องแจ้งให้ทราบเมื่อส่งบทความฉบับแก้ไขครั้งสุดท้ายและต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมตามอัตราที่กำหนดโดยสำนักพิมพ์

ตัวอย่างการอ้างอิงบทความจากวารสาร

- [1] Pennington, D.S., Nash, D.F.T., and Ling, M.L. (1997). Horizontally mounted bender element for measuring anisotropic shear moduli in triaxial clay specimens, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 24(2), pp. 133 – 144.
- [2] ภราดร กาญจนสุธรรม นิพนธ์ ตั้งธรรม และ เรืองโรจน์ โตกฤษณะ (2557). การประมาณผลผลิตต่อไร่ของข้าวนาปรังด้วยข้อมูลดาวเทียม SMMS โดยใช้ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) : กรณีศึกษาอำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(1), หน้า 55 – 66.

ตัวอย่างการอ้างอิงหนังสือ

- [1] Schofield, A.N. and Wroth, C.P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London
- [2] Cook, R. D., Malkus, D. S. and Plesha, M. E. (2001). *Concept and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd edition, John Wiley, New York.
- [3] ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2547). *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม*, พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

ตัวอย่างการอ้างอิงบทความจากเอกสารประกอบการประชุม

- [1] Armstrong, D. B., Fogarty, G. J., & Dingsdag, D. (2007) Scales measuring characteristics of small business information systems. In W-G. Tan (Ed.), *Proceedings of Research, Relevance and Rigour: Coming of age: 18th Australasian Conference on Information Systems*, Toowoomba, Australia, pp 163 – 171.

ตัวอย่างการอ้างอิงบทความจากเอกสารประกอบการประชุมฉบับอิเล็กทรอนิกส์

- [1] Fan, W., Gordon, M.D. and Pathak, R. (2000). Personalization of search engine services for effective retrieval and knowledge management, *Proceedings of the twenty-first international conference on information systems*, pp. 20 – 34. Available from: ACM Portal: ACM Digital Library. [24 /6/2004].

ตัวอย่างการอ้างอิงวิทยานิพนธ์จากฐานข้อมูล

- [1] Ignatov, I. (2013). *Eastward voyages and the late medieval European worldview* (Master dissertation), University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, URL: <http://hdl.handle.net/10092/9187>

ตัวอย่างการอ้างอิงวิทยานิพนธ์ที่จัดพิมพ์

- [1] Considine, M. (1986). *Australian insurance politics in the 1970s: Two case studies* (Doctoral dissertation), University of Melbourne, Melbourne, Australia.

ตัวอย่างการอ้างอิงรายงานและมาตรฐาน

- [1] American Concrete Institute (2001). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing (ACI T1.1-01)*
- [2] จุฬารพร โชติช่วงนิรันดร์, นลินี ตันธวนิตย์ และ ปันตดา เพ็ชรสิงห์ (2529). *รายงานการวิจัยเรื่องประวัติศาสตร์หมู่บ้านควม่วง, โครงการวิจัยระบบการทาฟาร์ม มหำวิทยาลัยขอนแก่น*, หน้า 54 – 57.
- [3] กรมโยธาธิการและผังเมือง (2554). *มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อดำเนินงานการสันสะเทือนของแผ่นดินไหว* (มยพ.1301-54)

ตัวอย่างการอ้างอิงเว็บไซต์

- [1] U.S. Geological Survey (2012). *National Water Information System data available on the World Wide Web (USGS Water Data for the Nation)*, URL: <http://waterdata.usgs.gov/nwis>, access on 11/06/2012.
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand (2004). *Statistic Data*, URL: <http://www.dede.go.th>, access on 24/04/2010.
- [3] สำนักงานราชบัณฑิตยสภา (2550). *ชื่อฮาดู [ระบบออนไลน์]*, แหล่งที่มา: <http://www.royin.go.th> , สืบค้นวันที่ 24/04/2010.



จดหมายนำส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เรียน หัวหน้ากองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ข้าพเจ้ามีความประสงค์ขอเสนอบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และขอรับรองว่าบทความนี้เป็นบทความต้นฉบับ ไม่มีส่วนลอกเลียนผลงานของผู้ใดและผลงานนี้ไม่ได้ส่งตีพิมพ์ผลงานในวารสารฉบับอื่นเว้นแต่ได้รับการปฏิเสธมาก่อน ข้าพเจ้าขอรับรองว่าข้าพเจ้ามีส่วนร่วมในการศึกษาและได้เห็นข้อมูลทั้งหมดในบทความอย่างครบถ้วนรวมทั้งได้ตรวจสอบข้อมูลความถูกต้องของเนื้อหาเป็นอย่างดีแล้ว

ประเภทบทความ ○ บทความวิจัย ○ บทความปริทัศน์

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ชื่อผู้เขียนที่ให้ติดต่อกับบทความ.....

สถานที่ติดต่อ

.....

.....

โทรศัพท์E-Mail.....

