



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

RMUTL Engineering Journal

RMUTL. Eng. J.

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1
มกราคม - มิถุนายน 2559

ISSN 2465-4248

RMUTL. Eng. J.

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2559



วารสารวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

RMUTL Engineering Journal

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.นำยุทธ	สงค์ธนาพิทักษ์
Professor Kiyoshi	Yoshikawa
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สนิท	พิพิธสมบัติ
ดร.ภาสวรรณ	วัชรดำรงศักดิ์
ดร.กิจจา	ไชยหนู
ดร.กัญญณัช	ศิริธัญญา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชนิตา	โชติเสถียรกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ถาวร	ผั่นชมภู
ดร.ยรรยง	เฉลิมแสน
นายภคพงศ์	เพชรบุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ	โสทธิกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	เย็นยงกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมโภชน์	กุลศิริศรีตระกูล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นทีชัย	ผัสดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรีดิเรก	มณีวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ
นายสาคร	ปันตา
นายศรีธร	อุปคำ
ดร. บุปผเวช	พันธุ์ศรี

กองบรรณาธิการ

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สักรกมล	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.दनัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเอเซีย
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.วัสสนัย	วรรณัจฉริยา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ขจรศักดิ์	โสภากาจารย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วดาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ	บุตรดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสุวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภาพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุเทน	คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประชา	ยีนยงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กลิ่นประทุม	ปัญญาปิง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นเรศ	อินตะวงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิวัตร	มูลป่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฤชดา	ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย	กาฬสินธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิต	แก้วดวงตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร. พองจันทร์	จิราสิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร. ภาคภูมิ	จารุภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร. บุปผเวช	พันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ฝ่ายประสานงานและเผยแพร่

นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

จดหมายจากประธานคณะกรรมการที่ปรึกษา

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีได้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมองค์ความรู้และเผยแพร่ผลงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนางานวิจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ทั้งในระดับภูมิภาคและระดับประเทศสำหรับวิศวกร และนักวิจัย ทั้งภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรม โดยเน้นการประยุกต์ใช้องค์ความรู้ทางวิศวกรรมในการวิจัยเกี่ยวกับประเด็นหลัก ได้แก่ อาหารและน้ำ พลังงาน วัสดุขั้นสูง และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในฉบับปฐมฤกษ์นี้ประกอบด้วยบทความที่น่าสนใจด้วยกันหลายบทความ ทั้งบทความรับเชิญ บทความวิชาการและบทความปริทัศน์ที่ผ่านการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในแต่ละสาขาวิชา ในฐานะประธานที่ปรึกษาจึงขอแนะนำวารสารวิศวกรรมศาสตร์เพื่อใช้ในการเผยแพร่ผลงานวิจัยให้กับผู้ที่สนใจ และขอเชิญชวนทุกท่านร่วมกันส่งบทความมายังกองบรรณาธิการเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ดังกล่าว



รองศาสตราจารย์ ดร.น่ายุทธ สงค์ธนาพิทักษ์

ประธานคณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จดหมายจากประธานคณะกรรมการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ฉบับที่ ๑ ปีที่ ๑ เป็นวารสารฉบับแรก ในปี พ.ศ. ๒๕๕๙ ที่รวบรวมผลงานวิจัยและผลงานวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในแต่ละสาขามารวมไว้ด้วยกัน ทางคณะกรรมการเล็งเห็นว่าการจัดทำวารสารทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จะเป็นประโยชน์ในการสร้างฐานข้อมูลความรู้ให้กับผู้ที่สนใจเพื่อต่อยอดงานวิจัยเชิงบูรณาการที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนาและสร้างนวัตกรรมและองค์ความรู้ใหม่ๆ

ข้าพเจ้าขอแนะนำวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เพื่อเป็นอีกช่องทางหนึ่งในการเผยแพร่งานวิจัยสำหรับผู้สนใจ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า บทความวิชาการในวารสารนี้จะถูกอ้างอิงและนำไปใช้เพื่อพัฒนางานวิจัยที่มีคุณภาพ ซึ่งเป็นเป้าประสงค์หลักในการพัฒนาคุณภาพทางด้านวิชาการ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คณะกรรมการที่ปรึกษา ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เขียน ผู้พิจารณาบทความ และผู้อ่านทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในการจัดทำวารสารด้วยดีตลอดมา

ในศุภฤกษ์ดิถีขึ้นปีใหม่ ขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลาย จงดลบันดาลให้ทุกท่านประสบแต่ความสุขด้วยจตุรพิธพรชัย



ดร.กিজา ไชยทนต์

ประธานคณะกรรมการ

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



จดหมายจากบรรณาธิการ

ในนามของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ข้าพเจ้ามีความยินดีที่จะแนะนำ วารสาร วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หรือ RMUTL Engineering Journal (RMUTL Eng. J.) ให้ประชาคมวิจัย ของประเทศไทยได้รู้จัก เพื่อให้ นักวิจัยที่มีความสนใจใช้พื้นที่ของวารสารนี้ในการแบ่งปันองค์ความรู้เพื่อการตีพิมพ์ผลงานวิจัยที่ดี มี คุณภาพในศาสตร์ด้านวิศวกรรมต่างๆ กองบรรณาธิการรู้สึกดีใจและภูมิใจเป็นอย่างยิ่งที่ได้เห็นวารสารวิศวกรรมศาสตร์ฉบับปฐมฤกษ์ ได้ถูกตีพิมพ์และปรากฏสู่สายตา นักวิจัยของประเทศไทยหลังจากที่ทีมงานได้ทำงานหนักอย่างต่อเนื่อง

ในฉบับนี้ ได้นำเสนอเนื้อหาสาระของบทความทางด้านวิศวกรรมที่น่าสนใจ จำนวน ๑๐ บทความ โดยมีรายละเอียด ครอบคลุมหัวข้องานวิจัยในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ไฟฟ้าสื่อสาร อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติ วิศวกรรมโยธาและ สิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเครื่องกลและพลังงาน โดยเนื้อหาเริ่มต้นที่บทความรับเชิญจำนวน ๒ บทความ ซึ่งได้กล่าวถึงสายอากาศเครื่อง อ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียานความถี่ต่ำสำหรับงานระบบสายพานลำเลียง และการย้ายตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของโครงสร้างคาน-เสา คอนกรีตเฟรมภายในโดยการเสริมเหล็กแนวยาวระดับกลาง บทความวิชาการจำนวน ๖ บทความ ได้กล่าวถึงการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านในรถสามล้อ กระบวนการควบคุมพลังงานไฟฟ้าด้วยซูเปอร์คาปาซิเตอร์ระหว่างคอนเวอร์เตอร์และโหลด การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์ การใช้สาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เตาถ่านชีวภาพ กระบวนการนั่งและอบแห้ง ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับคลื่นอินฟราเรด ส่วนสุดท้ายเป็นบทความปริทัศน์จำนวน ๒ บทความที่ได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้าง เครื่องบดถั่วเหลืองโดยใช้พีแอลซี และการทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าของหน่วยวัดคุมระยะไกลสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า อัตโนมัติ ซึ่งทั้งหมดได้ถูกนำเสนอในวารสารฉบับนี้

ในนามกองบรรณาธิการ ขอใช้โอกาสนี้ขอบคุณนักวิจัยที่ได้กรุณาเขียนบทความรับเชิญ และส่งบทความต้นฉบับเพื่อ ตีพิมพ์ลงในวารสารฉบับนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการประเมินบทความ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้ให้คำแนะนำพร้อมกับให้ข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อให้บทความต้นฉบับมีความสมบูรณ์และทำให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์มีคุณภาพสูงสุด หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสาร วิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ จะสร้างคุณประโยชน์ต่อวงการวิชาการและมีส่วนร่วมในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจให้กับ ประเทศไทยต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำนาน
บรรณาธิการ



สารบัญ

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2559

บทความวิจัย

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบสายพานลำเลียง
ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และรัศมีทัต แผนสมบูรณ์ 1

การย้ายตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของโครงสร้างคาน – เสาคอนกรีตเฟรมภายในโดยการเสริมเหล็กแนวยาวระดับกลาง
ชยานนท์ ทรราชวิทยุญญ์ รัฐพล เกติยศ และปิยะพงษ์ วงศ์เมธา 9

บทความวิจัย

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับจักรยานสามล้อไฟฟ้า
เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์ และยุทธนา กันทะพะเยา 17

การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งเก็บพลังงาน
พิสิทธิ์ วิสุทธิเมธีกร และวิบูลย์ ชื่นแขก 23

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระภายใต้การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง
นิลวรรณ ไชยหนู รมไทรม มุกเมืองทอง วรุฒ ชมเจริญ และอนุพันธ์ วรรณภีระ 32

ผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
กันยพร ไชยวงศ์ ณัฐพล วิชาญ อาริยะ แสนทวีสุข จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล
และธัญศิรินทร์ จันทร์หอม 37

กระบวนการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางอกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับคลื่นอินฟราเรด
นพพร พัชรประกิตติ พงศธร จันทรแก้ว และวัชรพงษ์ มโหรี 43

ประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบ
ผลิตก๊าซชีวภาพ
ครรชิต เงินคำคง นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์ สิทธิศักดิ์ แก้วหนัก ภฤณฉัตร เมืองใจ นิตยา ตันติวา
นันท์นภัส มโนนนท์ และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์ 51

บทความปริทัศน์

การประยุกต์ใช้ฟัลลัสในการควบคุมเครื่องบดถั่วเหลืองให้ทำงานโดยอัตโนมัติ
น้ามนต์ โชติวิตรุต ประพันธ์ วัฒนาศิริโชติ และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ 59

การทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าของหน่วยวัดคุมระยะไกลสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ
เจษฎา ชัดทองงาม 65

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบสายพานลำเลียง Low-Frequency RFID Reader Antenna for Conveyor Belt Applications

ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และรัศมีทัต แผนสมบุรณ์ *

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kpchuwon@kmitl.ac.th โทรศัพท์ 02-329-8321

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศบ่วงกันหอยสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบสายพานลำเลียง โครงสร้างของสายอากาศบ่วงกันหอยสามารถกระจายสนามแม่เหล็กในองค์ประกอบทิศทางหลัก (องค์ประกอบทิศทาง H_x , H_y และ H_z) และเพิ่มระยะทางในการติดต่อสื่อสารในทิศทางหลัก สำหรับสายอากาศที่นำเสนอมีขนาดโดยรวม คือ 55×60 เซนติเมตร สร้างด้วยลวดทองแดงเบอร์ 24 และมีการป้อนสัญญาณด้วยคอนเน็คเตอร์ชนิด BNC ในการวิเคราะห์การกระจายสนามแม่เหล็กและสมรรถนะการติดต่อสื่อสารในแต่ละองค์ประกอบทิศทางหลักได้วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Numerical electromagnetics code (NEC) นอกจากนี้ได้สร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านกับแท็ก ผลการทดสอบพบว่า สายอากาศบ่วงกันหอยมีระยะในการติดต่อสื่อสารสูงสุด 40 เซนติเมตรในทุกทิศทางหลัก (ทิศทางในแนวแกน x , y และ z) โดยมีเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวเท่ากับ 76.34% ในแนวแกน x 98.96% ในแนวแกน y และ 67.56% ในแนวแกน z ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบการประยุกต์ใช้กับระบบสายพานลำเลียงพบว่า สายอากาศมีระยะทางในการติดต่อสื่อสารสูงสุดในแนวแกน x ที่ระยะ 25 เซนติเมตร ในแนวแกน y ที่ระยะ 40 เซนติเมตร และในแนวแกน z ที่ระยะ 40 เซนติเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวเท่ากับ 42.50% 100% และ 95% ในแนวแกน x , y และ z ตามลำดับ

คำสำคัญ อาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำ อาร์เอฟไอดีสนามระยะใกล้ สายอากาศบ่วงกันหอย

Abstract

This paper presents the spiral loop antenna for low-frequency RFID for conveyor belt applications. The structure of proposed antenna can generate the magnetic field distribution of in each principal component (H_x , H_y , and H_z -component) to enhance the communication distance in all principal directions. The overall size of proposed antenna is 55×60 cm. The antenna was fabricated with 24 AWG copper wire and fed by BNC-connector. The numerical electromagnetics code (NEC) is employed to analyze the magnetic field distribution and communication performance in each principal component. The antenna prototype was fabricated to confirm the communication performance between reader and tag. From measured results, the spiral antenna has the maximum reading range of 40 cm in all principal directions (x -, y -, and z -direction). The percentage of surface equal to 76.34% in x -direction, 98.96% in y -direction, and 67.56% in z -direction, respectively. For the measured results with conveyor belt applications, it is found that the maximum reading range are 25 cm in x -direction and 40 cm in y - and z -directions. The percentage of surface equal to 42.50%, 100%, and 95% in x -, y -, and z -directions, respectively.

Keywords: Low-Frequency RFID, Near-Field RFID, Spiral loop antenna

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบระบุลักษณะอัตโนมัติ (Auto-ID : automatic identification) มีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันเนื่องจากระบบนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายด้านเช่น โลจิสติกส์ระบบคลังสินค้าร้านค้าปลีกและโรงงานอุตสาหกรรมโดยมีวัตถุประสงค์ในการระบุลักษณะของมนุษย์สัตว์สินค้าและวัตถุดิบในกระบวนการผลิตซึ่งระบบในการระบุลักษณะอัตโนมัติได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำธุรกิจโดยเฉพาะเนื่องจากมี

ความสามารถในการบันทึกข้อมูลที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการระบุลักษณะแทนที่จะเป็นการจดบันทึกด้วยมนุษย์ซึ่งมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ในปัจจุบันระบบที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับการระบุลักษณะ คือระบบอาร์เอฟไอดี ในการติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีจะต้องมีส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล และแท็ก ระบบดังกล่าวมีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย และใช้หลักการการกระจายย้อนกลับแบบพาสซีฟในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลกับ

แท็ก [1-3] ข้อดีของระบบอาร์เอฟไอดี คือ สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้หลายตัวพร้อมกันในการอ่านครั้งเดียวสามารถอ่านข้อมูลได้แม้อยู่ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี อ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว มีความทนทานต่อความเปียกชื้น แร้งสนั่นสะเทือน และการกระแทกกระทึก [3]

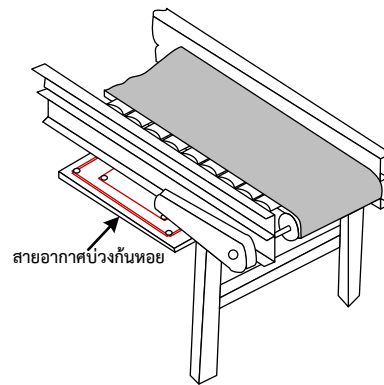
โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้กันในระบบอาร์เอฟไอดีสามารถแบ่งออกเป็น 4 ย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ต่ำ (LF-RFID : 125 kHz และ 134 kHz) ย่านความถี่สูง (HF-RFID : 13.56 MHz) ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF-RFID : 860-960 MHz) และย่านความถี่ไมโครเวฟ (2.4 GHz และ 5.2 GHz) [4-5] ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงมีระยะในการติดต่อสื่อสารใกล้ (ประมาณ 50 เซนติเมตร) ซึ่งใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเหนี่ยวนำในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก [6-7] เทคนิคดังกล่าวมีข้อดี คือ สามารถใช้งานร่วมกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือของเหลว ในขณะที่ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟและย่านความถี่ไมโครเวฟมีระยะในการติดต่อสื่อสารระยะไกล (ประมาณ 1 เมตรถึง 9 เมตร) โดยความถี่ทั้งสองใช้เทคนิคการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก แต่การติดต่อสื่อสารด้วยเทคนิคนี้ จะได้รับผลกระทบมากเมื่อนำไปใช้งานร่วมกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือของเหลว [8]

สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำที่ใช้เทคนิคการเชื่อมต่อเชิงเหนี่ยวนำในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก ได้นำเอาจุดเด่นในเรื่องของความสามารถในการใช้งานร่วมกับวัสดุที่เป็นของเหลว น้ำ หรือโลหะ มาประยุกต์ใช้งานกับระบบลงทะเบียนทางปศุสัตว์ [9-11] หรือระบบสายพานลำเลียงที่จะต้องการระบุลักษณะสิ่งของที่ไหลผ่านสายพานลำเลียงประเภทวัสดุที่เป็นโลหะของเหลว หรือน้ำ นอกจากนี้อุปกรณ์ที่สำคัญที่จะทำให้ระบบอาร์เอฟไอดีสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ สายอากาศ

สำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลในย่านความถี่ต่ำที่ได้รับความนิยมมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง คือ สายอากาศบ่วง เนื่องจาก ค่าอัตราขยายและอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสามารถแปลงกลับให้ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ 50 โอห์มหรือ 75 โอห์มได้ โดยง่ายสายอากาศแบบบ่วงที่ใช้กันในปัจจุบันจะมีรูปร่างหลายรูปแบบเช่นแบบวงกลมแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน [12] ซึ่งแต่ละรูปแบบจะให้อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายกำลังงานมากน้อยแตกต่างกันไปสายอากาศแบบบ่วงลักษณะนี้ใช้งานกับแท็กได้ในบางลักษณะการจัดวางถ้าแท็กไม่ได้วางตัวในแนวขนานกับระนาบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะใช้งานไม่ได้หรือใช้งานไม่ได้เลยดังนั้นการออกแบบสายอากาศ

สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากในการทำให้เครื่องอ่านข้อมูลและแท็กติดต่อกันได้ทุกลักษณะ บทความนี้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำสำหรับประยุกต์ใช้กับระบบสายพานลำเลียง โดยสายอากาศที่ถูกนำเสนอมีการทำงานในย่านความถี่ 125 kHz โดยมีเป้าหมายในการออกแบบ คือ สายอากาศสามารถปรับปรุงสมรรถนะของการกระจายสนามแม่เหล็กในทิศทางองค์ประกอบหลัก (องค์ประกอบทิศทาง H_x H_y และ H_z) ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กในแนวนอนต่างๆและช่วยเพิ่มระยะทางในการติดต่อสื่อสารให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับสายอากาศที่ถูกนำเสนอ คือ สายอากาศบ่วงกันหอย สายอากาศถูกสร้างขึ้นด้วยลวดทองแดงเบอร์ 24 (รัศมีของเส้นลวดเท่ากับ 0.255 มิลลิเมตร) และได้รับการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก เพื่อยืนยันสมรรถนะของสายอากาศ โดยสายอากาศบ่วงกันหอยที่นำเสนอได้ถูกติดตั้งไว้ที่ระบบสายพานลำเลียง แสดงดังรูปที่ 1

สำหรับบทความนี้ได้มีการนำเสนอหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้ ในหัวข้อที่ 2 ได้นำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างสายอากาศ หัวข้อที่ 3 นำเสนอผลการจำลองสมรรถนะของสายอากาศ หัวข้อที่ 4 ได้นำเสนอผลการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ และผลสรุปได้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5



รูปที่ 1 การติดตั้งสายอากาศสำหรับระบบสายพานลำเลียง

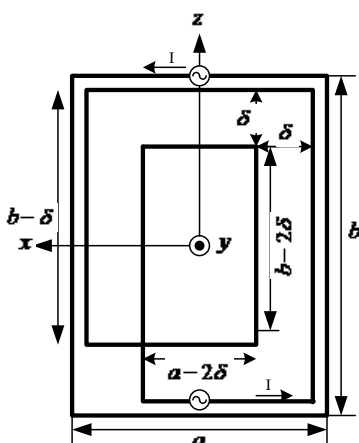
2. โครงสร้างสายอากาศ

ในหัวขื่อนำเสนอโครงสร้างสายอากาศที่ถูกออกแบบสำหรับติดตั้งในระบบสายพานลำเลียงเพื่อใช้ในการติดตามพัสดุสินค้า ที่มีการเคลื่อนที่ผ่านสายพานลำเลียงโดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ คือ สายอากาศจะต้องมีการทำงานในย่านความถี่ 125 kHz สายอากาศสามารถกระจายสนามแม่เหล็กได้สม่ำเสมอในทุกองค์ประกอบทิศทางหลัก (องค์ประกอบทิศทาง H_x H_y และ H_z) ซึ่งจะช่วยให้สายอากาศมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท็กในทิศทางต่างๆและช่วยเพิ่มระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศกับแท็ก

2.1 โครงสร้างสายอากาศบ่วงกันหอย

สำหรับสายอากาศที่ถูกนำเสนอในบทความนี้ คือ สายอากาศบ่วงกันหอยโดยโครงสร้างสายอากาศบ่วงกันหอย ได้พัฒนามาจากสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจาก โครงสร้างของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมมีข้อจำกัดในเรื่องการกระจายสนามแม่เหล็ก ซึ่งการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีการกระจายสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งบริเวณของสายอากาศ และสามารถติดต่อสื่อสารกับแท่งได้เฉพาะทิศทางของแท่งวางตัวขนาน (ทิศทางแนวแกน y) กับสายอากาศเท่านั้น ส่งผลให้เมื่อนำสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสายพาลาเลียงนั้น สมรรถนะในการติดต่อสื่อสารกับแท่งด้อยลง ด้วยเหตุนี้ สายอากาศบ่วงกันหอยจึงได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว สายอากาศบ่วงกันหอยมีความน่าสนใจ เนื่องจากสายอากาศสามารถกระจายสนามแม่เหล็กได้สม่ำเสมอในทุกองค์ประกอบทิศทางหลัก ซึ่งช่วยให้สายอากาศมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งในแนวแกนต่างๆ (ทิศทางแนวแกน x , y และ z) ได้ดีขึ้นและช่วยเพิ่มระยะทางในการติดต่อสื่อสารให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

สำหรับสายอากาศบ่วงกันหอยนั้น ถูกสร้างด้วยลวดทองแดงเบอร์ 24 (เส้นลวดทองแดงมีรัศมีเท่ากับ 0.255 มิลลิเมตร) สายอากาศมีขนาดโดยรวม เท่ากับ 50.5×60 เซนติเมตร โดยได้แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ของสายอากาศดังรูปที่ 2 สำหรับพารามิเตอร์ของสายอากาศบ่วงกันหอยที่ถูกนำเสนอ ประกอบด้วย ความกว้างของสายอากาศ (a) เท่ากับ 50.5 เซนติเมตร ความยาวของสายอากาศ (b) เท่ากับ 60 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างบ่วง (δ) เท่ากับ 10 เซนติเมตร

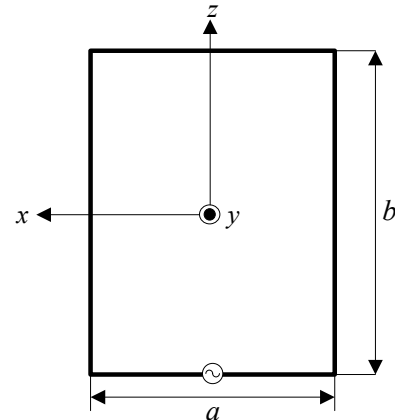


รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศบ่วงกันหอย

นอกจากนี้ในหัวข้อที่ 2.2 ได้นำเสนอโครงสร้างสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งโครงสร้างสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะถูกนำไปใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของ

สายอากาศ เพื่อใช้ในการยืนยันประสิทธิภาพของสายอากาศที่นำเสนอ

2.2 โครงสร้างสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 3 โครงสร้างสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

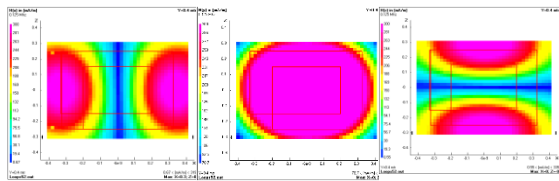
สำหรับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าถูกออกแบบด้วยลวดทองแดงเบอร์ 24 และมีขนาดโดยรวมของสายอากาศเท่ากับ 50.5×60 เซนติเมตร โดยสายอากาศมีความกว้าง (a) เท่ากับ 50.5 เซนติเมตร และความยาว (b) เท่ากับ 60 เซนติเมตร สำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและโครงสร้างของสายอากาศได้แสดงในรูปที่ 3

3. ผลการจำลอง

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอ ในการจำลองคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีความถี่จะอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า (numerical electromagnetic code) หรือ 4nec2 [13] ช่วยในการจำลองโครงสร้างและคุณลักษณะของสายอากาศ นอกจากนี้ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศบ่วงกันหอยที่นำเสนอกับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

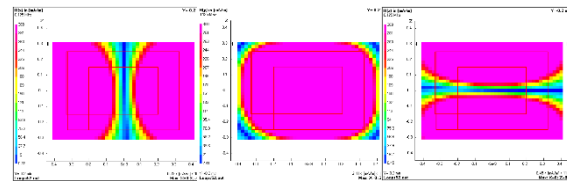
3.1 ผลการจำลองการกระจายสนามแม่เหล็ก

ในการจำลองการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศนั้น สายอากาศจะถูกกำหนดให้มีแหล่งจ่ายกระแส (I) เท่ากับ 1 แอมแปร์โดยสายอากาศจะถูกวางอยู่ในระนาบ xz จากนั้นทำการจำลองให้มีระยะห่างในแนวแกน y เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ($-40 \leq y \leq 40$ เซนติเมตร) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อการกระจายสนามแม่เหล็ก โดยบริเวณที่มีการกระจายสนามแม่เหล็กเป็นสีชมพูแสดงถึงบริเวณที่มีการกระจายสนามแม่เหล็กที่แรง ในขณะที่บริเวณที่มีการกระจายสนามแม่เหล็กเป็นสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่มีการกระจายสนามแม่เหล็กที่อ่อน ซึ่งผลการจำลองการกระจายสนามแม่เหล็กได้ถูกแสดงในรูปที่ 4-7



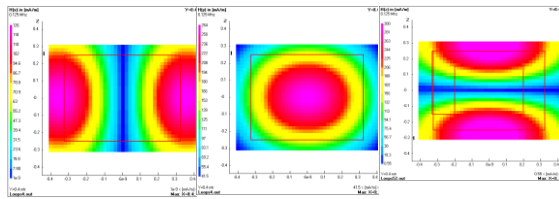
องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ก) สายอากาศบ่วงก้นหอย



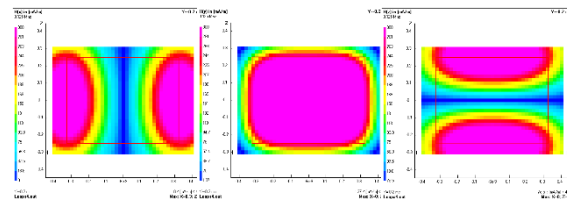
องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ก) สายอากาศบ่วงก้นหอย



องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ข) สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

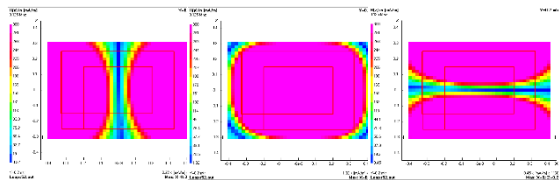


องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ข) สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

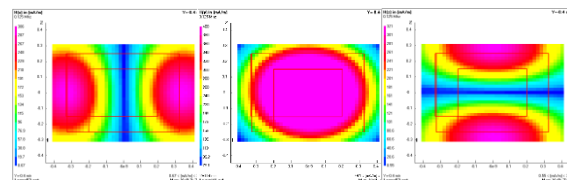
รูปที่ 4 ผลการจำลองการกระจายสนามแม่เหล็กในระนาบ xz
เมื่อ y เท่ากับ 40 เซนติเมตร

รูปที่ 6 ผลการจำลองการกระจายสนามแม่เหล็กในระนาบ xz
เมื่อ y เท่ากับ -20 เซนติเมตร



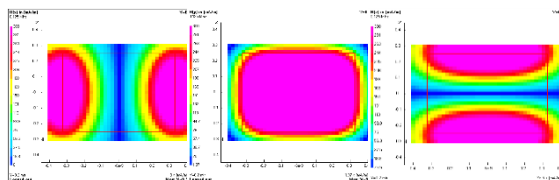
องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ก) สายอากาศบ่วงก้นหอย



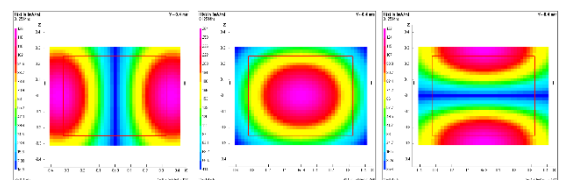
องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ก) สายอากาศบ่วงก้นหอย



องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ข) สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า



องค์ประกอบ
ทิศทาง H_x องค์ประกอบ
ทิศทาง H_y องค์ประกอบ
ทิศทาง H_z

(ข) สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

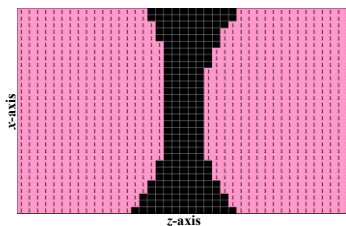
รูปที่ 5 ผลการจำลองการกระจายสนามแม่เหล็กในระนาบ xz
เมื่อ y เท่ากับ 20 เซนติเมตร

รูปที่ 7 ผลการจำลองการกระจายสนามแม่เหล็กในระนาบ xz
เมื่อ y เท่ากับ -40 เซนติเมตร

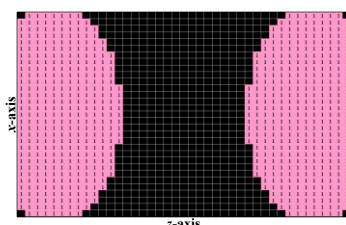
จากผลการจำลองการเปรียบเทียบการกระจายสนามแม่เหล็ก พบว่าสายอากาศบ่วงกันหอยสามารถกระจายสนามแม่เหล็กได้แรงและสม่ำเสมอในแต่ละองค์ประกอบทิศทางหลักได้ดีกว่าสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อระยะห่างในแนวแกน y อยู่ในช่วง $-20 \leq y \leq 20$ เซนติเมตร

3.2 ผลการจำลองสมรรถนะการติดต่อสื่อสาร

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศที่ถูกนำเสนอในองค์ประกอบทิศทางหลัก H_x , H_y และ H_z ในการจำลองได้สมมติให้แท็กมีความเข้มสนามแม่เหล็ก (H_t) เท่ากับ 175 มิลลิแอมแปร์ต่อเมตร สำหรับแท็กการ์ด ISO อาร์เอฟไอดีความถี่ต่ำในการจำลองได้กำหนดให้ ถ้าสายอากาศสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ จะให้ค่าเป็น 1 หรือบริเวณที่แสดงเป็นแถบสีเข้มในทางตรงกันข้าม ถ้าสายอากาศไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ จะมีค่าเป็น 0 หรือบริเวณสีขาว โดยผลการจำลองสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศได้ถูกแสดงในรูปที่ 8-10 จากนั้นทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การจำลองสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศกับแท็กที่วางในแนวแกนต่างๆ พบว่า สายอากาศบ่วงกันหอยที่ถูกนำเสนอมีเปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสาร เท่ากับ 67.29% ในแนวแกน x 100% ในแนวแกน y และ 67.56% ในแนวแกน z ตามลำดับ ในขณะที่สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีเปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสาร เท่ากับ 26.30% ในแนวแกน x 100% ในแนวแกน y และ 29.39% ในแนวแกน z ตามลำดับจากข้อมูลดังกล่าวพบว่าสายอากาศบ่วงกันหอยที่ถูกนำเสนอมีสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารได้ดีกว่าสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

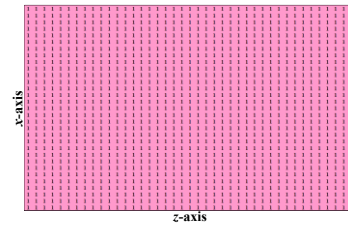


สายอากาศบ่วงกันหอย

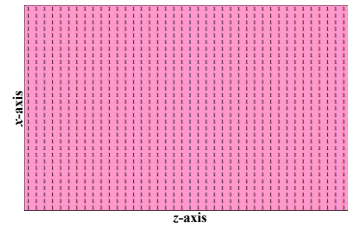


สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยม

รูปที่ 8 ผลเปรียบเทียบการจำลองสมรรถนะการติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กถูกวางในแนวแกน x

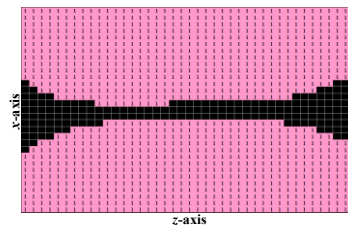


สายอากาศบ่วงกันหอย

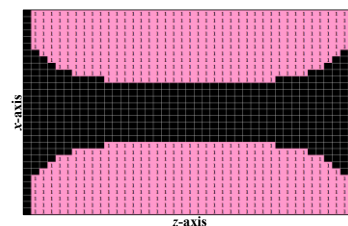


สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยม

รูปที่ 9 ผลเปรียบเทียบการจำลองสมรรถนะการติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กถูกวางในแนวแกน y



สายอากาศบ่วงกันหอย



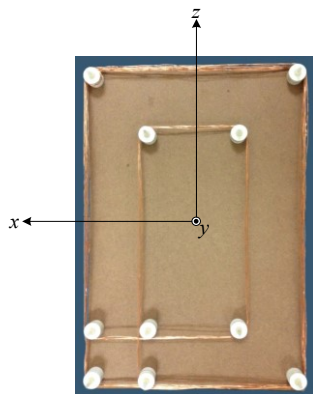
สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 10 ผลเปรียบเทียบการจำลองสมรรถนะการติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กถูกวางในแนวแกน z

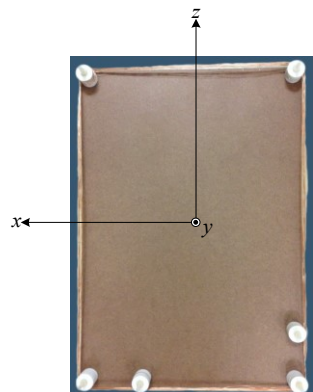
4. ผลการทดสอบและอภิปราย

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศบ่วงกันหอยกับแท็กโดยสายอากาศต้นแบบถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบ และเพื่อใช้ในการยืนยันถึงสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศกับแท็ก นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้ากับแท็กด้วยเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของสายอากาศ โดย

ภาพถ่ายของสายอากาศต้นแบบถูกแสดงในรูปที่ 11 สายอากาศถูกสร้างขึ้นด้วยเส้นลวดทองแดงเบอร์ 24 และป้อนสัญญาณด้วยหัวเชื่อมต่อชนิด BNC ซึ่งในการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศได้ทำการทดสอบสมรรถนะสายอากาศในขณะที่ยังไม่ได้ติดตั้งสายอากาศเข้ากับระบบสายพานลำเลียง และขณะที่สายอากาศได้ถูกนำไปติดตั้งเข้ากับระบบสายพานลำเลียง



(ก) สายอากาศบ่วงกันหอย

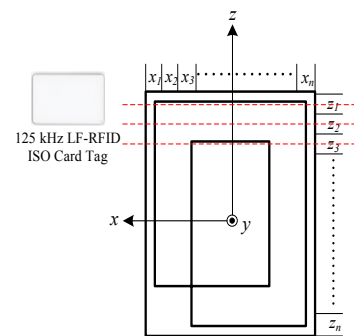


(ข) สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 11 ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ

4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศ

ในการทดสอบสายอากาศต้นแบบได้ถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำความถี่ 125 kHz สำหรับแท็กที่ใช้ในการทดสอบเป็นของ แท็ก ISO Card อาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำทำงานที่ความถี่ 125 kHz ขนาดของแท็ก 5.5×8.5 เซนติเมตร ในการพิจารณาหาค่าเปอร์เซ็นต์การติดต่อสื่อสารเชิงพื้นที่นั้น สายอากาศจะถูกวางตัวในระนาบ $x \times z$ ซึ่งพื้นที่ที่ใช้ในการพิจารณาจะมีขนาดความกว้าง 50.5 เซนติเมตร ด้านยาว 60 เซนติเมตร ในการทดสอบแท็กจะเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นตรง (แนวแกน x) ดังรูปที่ 12 และแท็กจะถูกหมุนไปในแต่ละทิศทางหลักนอกจากนี้แท็กมีการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศกับแท็กเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากระยะห่าง 5 เซนติเมตร ไปจนถึง 40 เซนติเมตร



รูปที่ 12 การแบ่งระยะตามแนว x และ y เพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสาร

จากรูปที่ 12 สามารถแบ่งพื้นที่ตารางสี่เหลี่ยมโดยแต่ละช่องมีขนาด 5.5×8.5 เซนติเมตร (ขนาดเท่ากับขนาดของแท็กการ์ด ISO) ในการพิจารณากำหนดให้การติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศต้นแบบกับแท็กสามารถติดต่อสื่อสารสำเร็จจะแสดงผลเป็นแถบสีเข้มหรือเลข 1 และถ้าสายอากาศต้นแบบไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้จะแสดงผลเป็นสีขาวหรือเลข 0 ซึ่งมีการบันทึกข้อมูลดังรูปที่ 13 จากนั้นทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศต้นแบบ [14] (ในบริเวณกรอบสี่ด้านซึ่งมีขนาดเท่ากับพื้นที่ของสายอากาศต้นแบบ) เมื่อแท็กมีการวางตัวในแนวแกนหลักและมีระยะต่างๆ ดังตารางที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
4	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
6	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
7	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
8	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
9	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
10	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	12	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
13	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
14	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	14	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
15	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	15	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
16	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	16	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
17	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	17	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
18	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	19	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ทิศทางแนวนอน x

ทิศทางแนวนอน y

ทิศทางแนวฉาก z

สายอากาศบ่วงก้นหอย

[illegible]

สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

รูปที่ 13 ผลการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของ
สายอากาศต้นแบบ เมื่อ y มีระยะห่าง 5 เซนติเมตร



ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศบ่วงที่ถูกนำเสนอเปรียบเทียบกับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อแท่งวางในแนวแกนต่างๆ ในระยะต่างๆ

ระยะห่าง (เซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์สมรรถนะในการติดต่อสื่อสาร (%) ในแนวแกนหลักที่ระยะห่างต่างๆ					
	บ่วงกันหอย			บ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า		
	x	y	z	x	y	z
5	85.71	100.00	78.57	85.71	100.00	64.29
10	85.71	100.00	80.95	85.71	95.24	61.90
15	85.71	100.00	80.95	85.71	95.24	69.05
20	85.71	97.62	77.38	85.71	95.24	61.90
25	85.71	98.81	73.81	78.57	97.62	52.38
30	76.19	100.00	65.48	65.48	95.24	40.48
35	57.14	97.62	53.57	53.57	95.24	25.00
40	48.81	97.62	29.76	27.38	86.00	0.00
เปอร์เซ็นต์ เชิงพื้นผิว (%)	76.34	98.96	67.56	70.98	94.94	46.88

จากตารางที่ 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศบ่วงกันหอยที่ถูกนำเสนอในแนวแกน x y และ z เท่ากับ 76.34% 98.96% และ 67.56% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าสายอากาศบ่วงกันหอยมีสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารได้ดีกว่าสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าในทุกแนวแกน ดังนั้นสายอากาศบ่วงกันหอยที่ถูกนำเสนอสามารถกระจายสนามแม่เหล็กได้สม่ำเสมอในทุกองค์ประกอบทิศทางหลัก (องค์ประกอบทิศทาง H_x H_y และ H_z) และมีสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารที่มีประสิทธิภาพในทุกทิศทางหลัก (ทิศทางในแนวแกน x y และ z) ซึ่งเป็นตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศ

4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสารของสายอากาศบ่วงกันหอยเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสายพานลำเลียง

จากผลการทดสอบสมรรถนะการติดต่อสื่อสารในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าสายอากาศบ่วงกันหอยมีสมรรถนะการติดต่อสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นในหัวนี้จึงได้นำเสนอเฉพาะผลการทดสอบของสายอากาศบ่วงกันหอย ซึ่งในการทดสอบสมรรถนะสายอากาศเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับสายพานลำเลียง สายอากาศจะถูกติดตั้งไว้ด้านล่างของระบบสายพานลำเลียง (ได้แสดงการติดตั้งสายอากาศในรูปที่ 1) และแท่งจะถูกติดตั้งเข้าพัสดุที่เคลื่อนที่มาบนสายพานลำเลียงโดยการติดตั้งแท่งไปในแต่ละทิศทางหลักนอกจานี้ มีการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศกับแท่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากระยะห่าง 5 เซนติเมตร ไปจนถึง 40

เซนติเมตร เช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.1 จากนั้นได้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวที่สายอากาศสามารถติดต่อสื่อสารกับแท่งในแต่ละทิศทาง ซึ่งผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสายพานลำเลียงแสดง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศบ่วงกันหอยเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสายพานลำเลียง

ระยะห่าง (เซนติเมตร)	เปอร์เซ็นต์สมรรถนะในการติดต่อสื่อสาร(%)ในทิศทาง แนวแกนหลักที่ระยะห่างต่างๆ		
	x	y	z
5	80.00	100.00	100.00
10	80.00	100.00	100.00
15	80.00	100.00	100.00
20	60.00	100.00	100.00
25	40.00	100.00	100.00
30	0.00	100.00	100.00
35	0.00	100.00	100.00
40	0.00	100.00	60.00
เปอร์เซ็นต์ เชิงพื้นผิว (%)	42.50	100.00	95.00

จากผลการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศที่ถูกนำเสนอเมื่อนำไปใช้กับระบบสายพานลำเลียงพบว่าสายอากาศมีเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวในทิศทางแนวแกน x เท่ากับ 42.50% ในทิศทางแนวแกน y เท่ากับ 100% และในทิศทางแนวแกน z เท่ากับ 95% ตามลำดับ

5. สรุป

สำหรับสายอากาศบ่วงกันหอยที่ถูกนำเสนอสามารถกระจายสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอในทุกทิศทางองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้สายอากาศมีสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารที่มีประสิทธิภาพเมื่อแท่งถูกวางในทิศทางหลักต่างๆ และมีระยะในการติดต่อสื่อสารที่ไกลขึ้น สำหรับผลการทดสอบและผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศ พบว่ามีผลที่สอดคล้องกัน สำหรับผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศกับแท่ง ISO Card ในทิศทางแนวแกน x เท่ากับ 76.34% ทิศทางแนวแกน y เท่ากับ 98.96% และทิศทางแนวแกน z เท่ากับ 67.56% ตามลำดับ โดยมีระยะในการติดต่อสื่อสารสูงสุดที่ 40 เซนติเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวกับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าสายอากาศบ่วงกันหอยมีสมรรถนะในการติดต่อสื่อสารที่มีประสิทธิภาพกว่าสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าในทุกทิศทางแนวแกนหลัก นอกจากนั้นได้ทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศบ่วงกันหอยเมื่อ



นำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสายพานลำเลียง จากการทดสอบพบว่า เปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศบ่งกันหอยในทิศทางแนวแกน x เท่ากับ 42.50% ทิศทางแนวแกน y เท่ากับ 100% และ ทิศทางแนวแกน z เท่ากับ 95.00% ตามลำดับ ดังนั้นเสาอากาศบ่งกันหอยสามารถนำมาใช้กับระบบสายพานลำเลียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Finkenzeller K. (2003). *RFID Handbook*, John Wiley&Son, New York.
- [2] Paret D. (2005). *RFID and Contactless Smart Card Applications*, John Wiley&Sons, New York.
- [3] AN678 RFID Coil Design, *Statistic Data*, URL:<http://www.microchip.com>, access on 11/10/2015
- [4] มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์เรื่องเครื่องวิทยุคมนาคมประเภท Radio Frequency Identification: RFID (กทข. มท. 1010 – 2550)
- [5] Cooney, E.M. (2006). *The complete review of radio frequency identification*, THOMSON DELMAR LEARNING.
- [6] Cole, P.,Ranasinghe, D. and Jamali, B. (2003). Coupling Relations in RFID Systems II: Practical Performance Measurements, *White paper*, October 2003, pp.1-33.
- [7] RFID Coupling Techniques, *Statistic Data*, URL:<http://www.radio-electronics.com>, access on 11/10/2015
- [8] Nikitin, P.V., Rao, K. V. S.and Lazar, S. (2007). An overview of near field UHF RFID, in *Proceedings of the IEEE International Conference on RFID 2007*, Grapevine, Tex, USA, March 2007, pp. 166–174.
- [9] วิวัฒน์ ขวนะนิกุล อรรถณพ สุริยสมบุรณ์ มนกันต์ อินทรกำแหง และวุฒิชัย กลมเกลียว (2551), รูปแบบการจัดการฟาร์มอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี RFID, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [10] ดนัย ต.รุ่งเรือง ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ไพโรจน์ วุ่นชุม และคณะ (2549), การออกแบบสายอากาศRFID สำหรับระบบลงทะเบียนสัตว์, รายงานการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [11] ดนัย ต.รุ่งเรือง ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ศุภกิต แก้วดวงตา และคณะ (2551), การเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศRFID สำหรับระบบลงทะเบียนสัตว์, รายงานการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [12] Balanis, C. A. (1997). *Antenna theory: analysis and design*, John Wiley & Sons, New York.
- [13] NEC2 Software, *Statistic Data*, URL: <http://4nec2.software.informer.com>
- [14] Kawdungta, S., Phongcharoenpanich, C. and Torrungrueng, D. (2010). Design of a Novel Dual-Loop Gate Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) Systems at Low FrequencyBand, *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 12, pp. 1-14.

การย้ายตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของโครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเฟรมภายในโดยการเสริมเหล็กแนวยาวระดับกลาง

Plastic Hinge Relocation of Interior Beam-column Concrete Frames using Longitudinal Intermediate Bars

ชยานนท์ หารัชชภิญโญ¹ รัฐพล เกติยศ^{2*} และปิยะพงษ์ วงศ์เมธา¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เขตพื้นที่เชียงราย

*ผู้รับผิดชอบบทความ: rattapon.ste7@rmutl.ac.th โทรศัพท์ 053-723977-8

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของส่วนย่อยเฟรมคาน-เสาแบบเทในที่ภายในอาคารภายใต้แรงกระทำแบบสลับทิศทาง จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยแปรผันรายละเอียดของเหล็กเสริมภายในจุดต่อ ได้แก่ ตัวอย่าง M1 ซึ่งออกแบบให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน ACI352R-02 และตัวอย่าง M2 เป็นจุดต่อที่มีรายละเอียดเหล็กเสริมเหมือนกับตัวอย่าง M1 และเพิ่มเหล็กเสริมแนวยาวระดับกลางภายในบริเวณจุดต่อต่อเนื่องจนถึงบริเวณปลายคาน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของเหล็กเสริมระดับกลางที่เพิ่มเติมเข้าไบนั้นทำให้คุณสมบัติด้านการรับแรงแผ่นดินไหวดีขึ้นอย่างชัดเจนทั้งในด้านกำลัง รูปแบบการวิบัติที่เหนียว พฤติกรรมการสลายพลังงานที่สูงขึ้น และการเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็งช้าลง

คำสำคัญ จุดต่อคาน-เสาภายใน จุดหมุนพลาสติก เหล็กเสริมระดับกลาง แรงวงจรรี

Abstract

This paper presents experimental results aimed at studying the behavior of two interior monolithic concrete beam-column sub assemblage frames having different reinforcement details under cyclic loading. The first specimen M1, the joint was seismically detailed according to ACI352R-02 and used as a reference. The M2 specimen was identical to the specimen M1 with additional longitudinal intermediate bars embedded in joint area and two beam edges. From the test results, the longitudinal intermediate bars significantly improved the cyclic behaviors i.e. higher capacity, ductile failure mode, more energy dissipation and decrease of stiffness degradation.

Keywords: Interior sub assemblage frame, Plastic hinge, Intermediate bar, Cyclic load.

1. บทนำ

การใช้โครงสร้างระบบ คาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมกันมากในอาคารขนาดเล็ก-กลาง เนื่องจากเป็นระบบโครงสร้างที่ให้อิสระทางสถาปัตยกรรมและสอดคล้องกับทักษะของแรงงานส่วนใหญ่ในประเทศไทย สำหรับโครงสร้างระบบคาน-เสาที่มีเป้าหมายเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว คุณสมบัติที่สำคัญ คือ ความสามารถในการถ่ายแรงที่ดีและมีเสถียรภาพทั้งในด้านกำลังและการเสียรูปภายใต้การสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว จากเหตุผลดังกล่าว จุดมุ่งหมายในการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวจำเป็นต้องออกแบบพฤติกรรมของโครงสร้างเป็น “เสาแข็ง-คานอ่อน” คือให้กำลังในการรับแรงของเสามีค่ามากกว่าคาน อย่างไรก็ตามบริเวณจุดต่อมักเป็นจุดที่ถูกกละเลย ซึ่งจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมาพบว่าจุดที่เกิดความเสียหายมากที่สุดเป็นบริเวณจุดต่อคาน-เสาของอาคาร ซึ่ง โครงสร้างที่ดีในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวนั้นบริเวณจุดต่อจะต้องยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic) เมื่อต้องรับ

แรงจากแผ่นดินไหว อีกทั้งกำลังของคานต้องมีค่าน้อยกว่าเสา ซึ่งทำให้จุดหมุนแบบพลาสติก (plastic hinge) เกิดขึ้นในคานบริเวณตำแหน่งหน้าคาน-เสา โดยที่จุดหมุนแบบพลาสติกที่เกิดขึ้นจะดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว ซึ่ง Hollings[1-2]เป็นผู้นำเสนอหลักการนี้และได้พัฒนาเป็นวิธีการออกแบบเรียกว่า capacity design หรือเสาแข็ง-คานอ่อน ซึ่งถูกระบุใน ACI 318-14[3] และ ACI 352R-02[4] และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301-54[5] ในประเทศไทย ในขณะที่โครงสร้างรับแรงกระทำด้านข้างหรือแรงแผ่นดินไหว จุดหมุนแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งหน้าเสา-ปลายคาน ด้วยสาเหตุที่รอยร้าวและการครากของเหล็กเสริมตามยาวเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับจุดต่อและเสานี้ ส่งผลให้จุดต่อเกิดความเสียหายและกำลังของโครงสร้างลดลงได้จนนำไปสู่การสูญเสียพฤติกรรมแบบเหนียวของโครงสร้าง จากเหตุผลดังกล่าว เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายของโครงสร้างบริเวณจุดต่อและเสา ได้มี

การศึกษารายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อที่จะย้ายจุดหมุนพลาสติกให้เกิดห่างออกจากจุดต่อคาน-เสาโดย Bahjat และ James[6] พบว่าการใช้เหล็กเสริมระดับกลางบริเวณจุดต่อที่มีความยาวจากหน้าเสาออกมา 1.5 เท่าของความลึกคาน ทำให้จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นนั้นย้ายไปเกิดที่บริเวณคานซึ่งห่างจากหน้าเสา เป็นผลทำให้ค่ากำลัง (strength) และการเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรง (stiffness degradation) ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเสริมเหล็กปกติ

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบรวมถึงการเปรียบเทียบพฤติกรรมโครงสร้างและคุณสมบัติด้านการรับแรงสลับทิศของโครงสร้าง ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสากลางในอาคาร (interior joint) จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่าง M1 ซึ่งออกแบบตามมาตรฐาน ACI352R-02 และตัวอย่าง M2 ที่มีการเสริมเหล็กเสริมแนวยาวระดับกลางเพิ่มเติมบริเวณจุดต่อคาน-เสาและปลายคานซึ่งมีเป้าหมายเพื่อย้ายจุดหมุนพลาสติกให้ห่างออกจากจุดต่อ โดยรายละเอียดตำแหน่งของเหล็กเสริมระดับกลางใช้แนวคิดการเสริมเหล็กของ Bahjat และ James ทั้งสองตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบสลับทิศตามข้อแนะนำของ ACI T1.1-01 [7]

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

การศึกษา ได้จำลองพฤติกรรมของจุดต่อภายในอาคารเมื่อรับแรงกระทำด้านข้างออกมาเป็นส่วนเฟรมย่อย โดยระยะความยาวของคานเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวช่วงพาด และความสูงของเสาเท่ากับครึ่งหนึ่งของความสูงระหว่างชั้น โดยตัวอย่างทดสอบถูกจำลองให้มีขนาดเท่ากับ 2/3 เท่าของขนาดจริงสำหรับอาคารขนาดปานกลางโดยประมาณ ประกอบด้วยจำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 ตัวอย่างทดสอบ M1

ชิ้นส่วนของโครงสร้างถูกออกแบบและมีรายละเอียดการเสริมเหล็กภายในจุดต่อตาม ACI318-14 และ ACI352R-02 ขนาด มิติและรายละเอียดของเหล็กเสริมได้แสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 3 อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาวด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดคานเท่ากับ 0.0116(4-DB12) และ 0.0086(3-DB12) ตามลำดับ สำหรับหน้าตัดเสามีอัตราส่วนเหล็กเสริมเท่ากับ 0.0118(10-DB12)

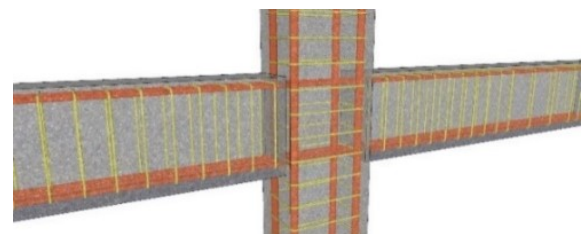
2.1.2 ตัวอย่างทดสอบ M2

ตัวอย่างนี้รายละเอียด มิติ ขนาดและการเสริมเหล็กของชิ้นส่วนคาน เสา และจุดต่อจะเหมือนกับตัวอย่าง M1 ยกเว้นภายในจุดต่อและปลายคานที่ต่อกับเสา ได้เพิ่มเหล็กเสริม DB10 จำนวน 4 เส้น ใช้เป็นเหล็กเสริมระดับกลาง มีแนวการเสริมผ่านจุดต่อผ่านไปทั้งคานคอนกรีต ซึ่งมีระยะฝังภายในคาน

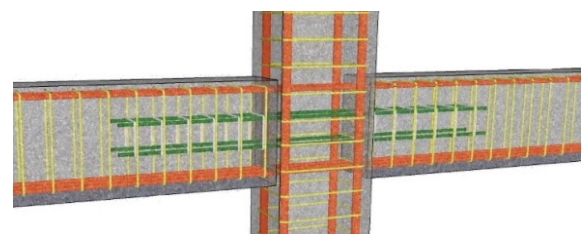
คอนกรีตทั้งสองด้าน ด้านละ 45 ซม. (1.5d, 1.5 เท่าของความลึกประสิทธิภาพของคาน) ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 4

2.2 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบและการควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

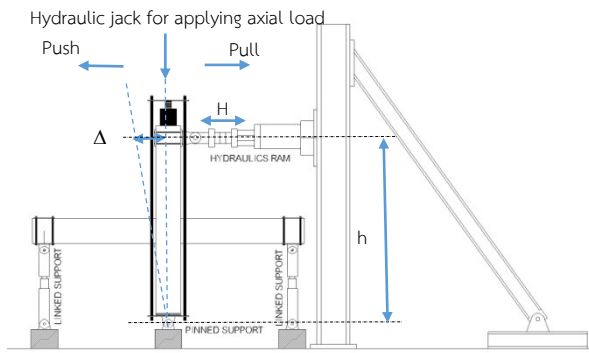
การติดตั้งของชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 โดยกำหนดให้ปลายคานทั้ง 2 ด้านมีสภาวะยึดรั้งแบบหมุนอิสระ และเคลื่อนที่ได้ 1 มิติ (linked support) ที่ตำแหน่งฐานเสา ด้านล่างกำหนดให้มีสภาวะยึดรั้งแบบหมุนอิสระ (pinned support) ส่วนที่ปลายเสาด้านบนถูกปล่อยให้เคลื่อนที่โดยอิสระ (free-end) และจำลองน้ำหนักกระทำในแนวราบแบบสลับทิศที่ตำแหน่งปลายเสาด้านบนในการทดสอบได้กำหนดแรงในแนวแกนให้กระทำกับเสาตลอดการทดสอบ เท่ากับ ร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัดเสา ($0.14_f'_c$) สำหรับการควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Drift Ratio) ได้กำหนดการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ด้านบนของเสาที่มีลักษณะกึ่งสถิตแบบสลับทิศ ตามข้อกำหนดวิธีการทดสอบของ ACI T1.1-01 ซึ่งในแต่ละระดับการเคลื่อนตัวจะทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 รอบจึงเพิ่มระดับการเคลื่อนตัวในระดับต่อไปจนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดการวิบัติหรือค่าระยะโยกระหว่างชั้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.0 ระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Δ/h) ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 1 รายละเอียดเหล็กเสริมภายในจุดต่อของตัวอย่างทดสอบ M1



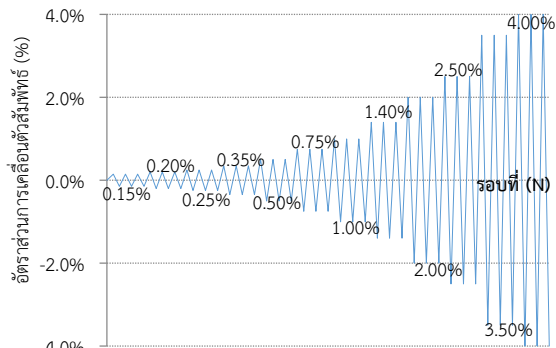
รูปที่ 2 รายละเอียดเหล็กเสริมภายในจุดต่อของตัวอย่างทดสอบ M2



รูปที่ 5 รูปแบบการติดตั้งการทดสอบ



รูปที่ 6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 7 การควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

ทั้งสองตัวอย่างใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากับ 44.03 MPa และกำลังของเหล็กเสริมได้แสดงในตารางที่ 1

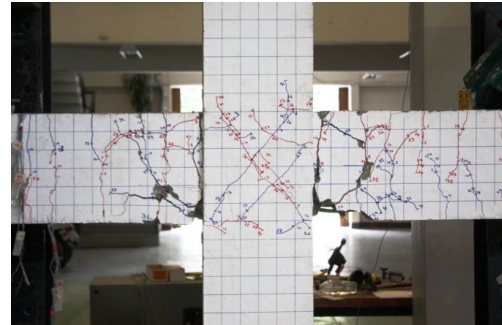
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

Rebar	Yield Strength (MPa)
RB6	372
DB10	557
DB12	426

3.2 พฤติกรรมการวิบัติ

3.2.1 ตัวอย่างทดสอบ M1

ตัวอย่างเริ่มเกิดรอยร้าวในแนวตั้งช่วงของการทดสอบที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ ในการเคลื่อนที่รอบที่ 3 ซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นรอยเนื่องจากแรงดัด (flexural crack) โดยรอยร้าวเกิดขึ้นที่หน้าเสาและท้องคานโดยมีความยาวประมาณ 15 เซนติเมตร และเมื่อเพิ่มระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นส่งผลให้เกิดรอยร้าวแนวตั้งเพิ่มมากขึ้นบริเวณคานและหน้าเสาทั้งสองส่วนของท้องคานและหลังคาน จนตัวอย่างมีช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ เริ่มปรากฏรอยร้าวในแนวทแยง (diagonal crack) บริเวณจุดต่อคาน-เสา จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ส่งผลให้รอยร้าวเกิดกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นโดยเกิดเพิ่มขึ้นทั้งรอยร้าวแนวตั้งบริเวณคานและรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อคาน-เสา และในช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ รอยร้าวบริเวณหน้าเสาเปิดออกอย่างชัดเจน รวมถึงยังเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการอัดแตก (crushing) และที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ ตัวอย่างเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงโดยคอนกรีตบริเวณหน้าเสาหลุดออกจนเห็นเหล็กเสริมภายในและเหล็กเสริมตามยาวของคานบริเวณหน้าเสาเกิดการโก่งตัวให้เห็นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 8

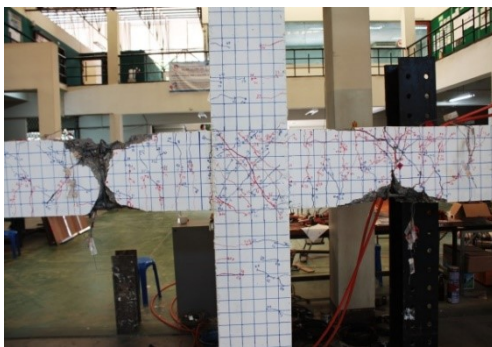


รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติชุดตัวอย่าง M1 หลังการทดสอบ

3.2.2 ตัวอย่างทดสอบ M2

รอยร้าวแรกของตัวอย่างนี้เกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.15\%$ ในการเคลื่อนที่รอบแรก เกิดเนื่องจากแรงดัดตำแหน่งที่เกิดรอยร้าวในแนวตั้งนี้เกิดห่างจากหน้าเสาเท่ากับระยะความลึกประสิทธิภาพของคาน และเมื่อตัวอย่างมีระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นส่งผลให้เกิดรอยร้าวในแนวตั้งกระจายตัวทั้งท้องคานและหลังคานรวมถึงหน้าเสา และที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ เริ่มเกิดรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อคาน-เสา และเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดรอยร้าวในแนวตั้งบริเวณคานและรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณจุดต่อเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่เสารอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.40\%$ โดยรอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้เป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด

และเกิดรอยร้าวกระจายเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 2.50\%$ เกิดการเปิดออกของรอยร้าวอย่างชัดเจนบริเวณท้องคานที่ระยะห่างจากหน้าเสา 1.5 เท่าของความลึกประสิทธิภาพของคานและที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 3.50\%$ เกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการอัดแตกอย่างรุนแรงบริเวณเดียวกับที่เริ่มเกิดการเปิดออกของรอยร้าวก่อนหน้าและคานอีกด้านเกิดการเปิดออกของรอยร้าวร่วมกับการหลุดร่อนของคอนกรีต และที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 4.00\%$ ตัวอย่างเกิดการเสียหายอย่างรุนแรงของคานทั้งสองด้านโดยเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตจนเห็นเหล็กเสริมภายในอย่างชัดเจนรวมทั้งเกิดการโก่งของเหล็กเสริม โดยรูปแบบการเสียหายนี้ส่งผลให้เกิดจุดหมุนพลาสติกอย่างสมบูรณ์ที่คานดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความเสียหายของตัวอย่าง M2 หลังการทดสอบ

3.3 พฤติกรรมของเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิส (hysteresis)

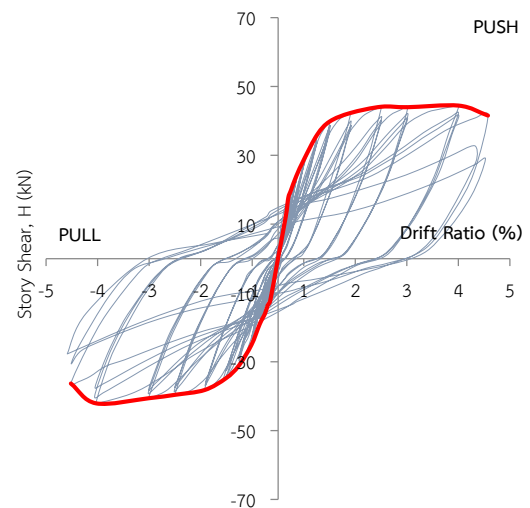
3.3.1 ตัวอย่างทดสอบ M1

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าขึ้นทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ถึงช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.50\%$ การวนรอบซ้ำแสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานตกลงเพียงเล็กน้อย นับตั้งแต่อัตราส่วนการโยกตัวสัมพัทธ์ $\pm 1.0\%$ เป็นต้นมา เส้นโค้ง hysteresis มีกำลังต้านทานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยมีลักษณะพื้นที่ภายในขยายใหญ่ขึ้นแสดงให้ เห็นว่าการสลายพลังงานของรอยร้าวที่ปรากฏขึ้นในคานที่ดีเมื่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นพฤติกรรมของพื้นที่ในวงรอบของเส้นโค้ง hysteresis มีขนาดเพิ่มขึ้น แสดงถึงการครากของเหล็กนอนในคาน รอยร้าวต่าง ๆ ในคานช่วยกันสลายพลังงานได้ดีและเหล็กปลอกสามารถป้องกันการบิดแบบเฉือนทั้งในจุดต่อและคานได้ดี จึงทำให้กำลังต้านทานของขึ้นทดสอบ M1 นั้นยังไม่ตกลง แต่เมื่อทดสอบจนถึงการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ $\pm 4.0\%$ ในรอบซ้ำนั้นพบว่า กำลังต้านทานลดลงเหลือเพียง 79% จึงถือว่าขึ้นทดสอบเกิดการวิบัติเรียบร้อยแล้ว

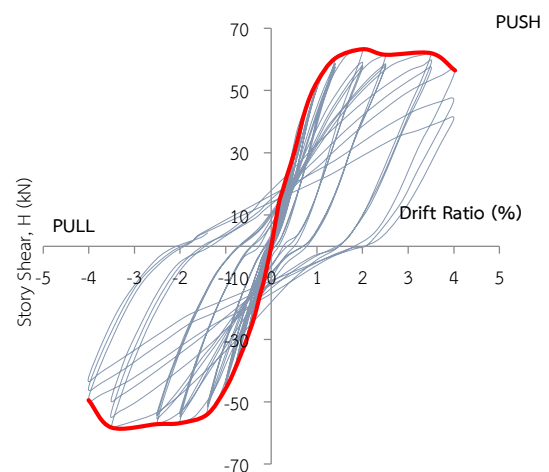
3.3.2 ตัวอย่างทดสอบ M2

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง M2 ในรูปที่ 11 จะเห็นว่าขึ้นทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ถึงช่วงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm$

1.00% การวนรอบซ้ำแสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานตกลงเพียงเล็กน้อย นับตั้งแต่อัตราส่วนการโยกตัวสัมพัทธ์ $\pm 1.4\%$ เป็นต้นมา เส้นโค้ง Hysteresis มีกำลังต้านทานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เท่ากับ 2.00% จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างนี้มีกำลังสูงสุดมากกว่า 60 kN ซึ่งมากกว่าตัวอย่าง M1 ถึง 42% แต่จะเห็นว่าเมื่อตัวอย่างกำลังสูงสุดแล้วกำลังลดลงเพียง 12% ที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 4.00% และพิจารณาถึงเส้นโค้ง hysteresis พบว่าตัวอย่างนี้ยังคงมีความสามารถในการสลายพลังงานเนื่องจากพื้นที่ภายในเส้นโค้ง hysteresis กว้างออกไม่สับและเส้นโค้ง hysteresis ยังถู้ออกจากจุดศูนย์กลางจึงไม่เกิดพฤติกรรมที่ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงศูนย์ (pinching) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 10 พฤติกรรม hysteresis ชุดทดสอบ M1

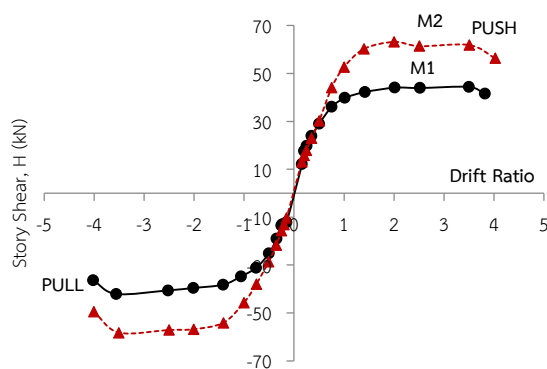


รูปที่ 11 พฤติกรรม hysteresis ชุดทดสอบ M2



3.4 กำลังสูงสุด (strength)

จากการทดสอบพบว่า กำลังสูงสุดของตัวอย่าง M2 มีค่าสูงกว่าตัวอย่าง M1 เนื่องจากที่ปลายคานหน้าเสาได้เสริมเหล็กเสริมระดับกลาง ระยะฝังภายในคานแต่ละด้านเท่ากับ 1.5d (45 ซม.) ทำให้จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง M2 ถูกย้ายออกมาจากปลายคานหน้าเสา ระยะระหว่าง 1.0d-1.5d ซึ่งเป็นการลดระยะแขนของแรงดัดภายนอกจากหน้าตัดที่เกิดการวิบัติในคานทั้ง 2 ด้านกับตำแหน่งของแรงกระทำ ทำให้การเกิดแรงดัดในระดับที่จะทำความเสียหายกับคานคอนกรีตต้องใช้แรงกระทำที่เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 12 และตารางที่ 2 แสดงกำลังสูงสุดของตัวอย่าง M1 และ M2



รูปที่ 12 เส้นโค้งรอบนอก (backbone curve)

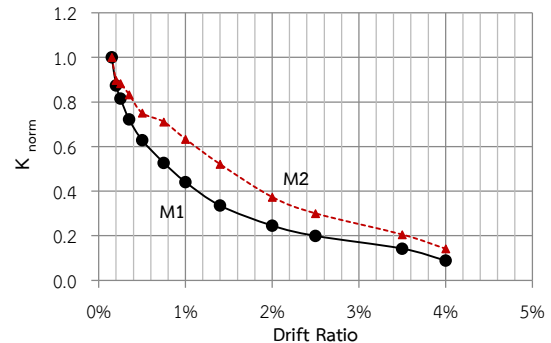
ตารางที่ 2 กำลังสูงสุดและอัตราเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งกำลังสูงสุด

Specimen	Push		Pull	
	Strength (kN)	Drift Ratio (%)	Strength (kN)	Drift Ratio (%)
M1	44.43	3.50	42.08	3.50
M2	63.23	2.00	58.22	3.50

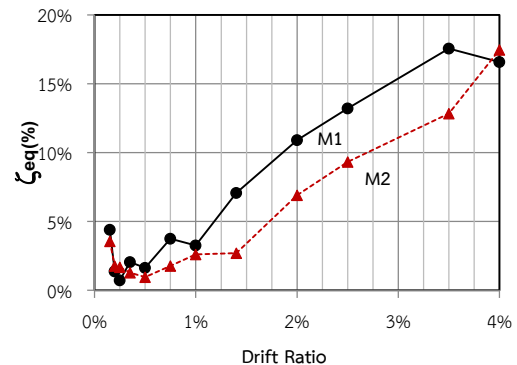
3.5 การเสื่อมถอยของความแข็งแรง

ค่าความแข็งแรง (stiffness) ดังแสดงในรูปที่ 13 โครงสร้างจะเสื่อมลงเมื่อให้ภาระโยกสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเสียหายเกิดขึ้นและค่อยๆ สะสมมากขึ้น การคำนวณค่าความแข็งแรงโดยวิธี secant (secant stiffness, K_{sec}) ได้มาจากรอบสุดท้ายของภาระโยกตัวสัมพัทธ์ในแต่ละระดับ (รอบที่ 3) โดยได้พิจารณาอัตราส่วนความแข็งแรงเปรียบเทียบ (normalized stiffness, K_{norm}) จากการเทียบค่ากับค่า secant stiffness ในรอบสุดท้ายของภาระโยกสัมพัทธ์ในระดับแรกคือ 0.15% ซึ่งถือเป็นค่าความแข็งแรงเริ่มต้น (initial secant stiffness) จากการทดสอบพบว่า การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง M2 มี

การเสื่อมถอยอยู่ในระดับที่ดีกว่าตัวอย่าง M1 ที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์เท่ากับ $\pm 4.0\%$ ค่าความแข็งแรงจะเหลือเท่ากับร้อยละ 8.90 และ 14.10 สำหรับตัวอย่าง M1 และ M2 ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรงกับอัตราส่วนเคลื่อนตัวสัมพัทธ์



รูปที่ 14 อัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (ζ_{eq}) กับอัตราส่วนเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

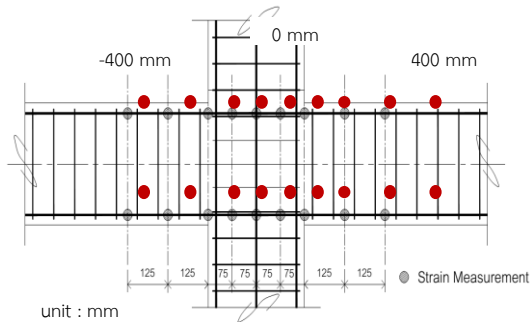
3.6 การสลายพลังงาน

การศึกษานี้สำหรับการประเมินการสลายพลังงานได้ใช้การศึกษาของ Chopra[8] ซึ่งค่าอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (ζ_{eq}) จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ hysteresis จากการทดสอบพบว่า เมื่อระยะเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้น การดูดซับพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดการเสียหายเกิดสะสมมากขึ้น ในรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่า ความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบโดยแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของตัวอย่างทั้งสองเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้นโดยพบว่าตัวอย่าง M1 สามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าเมื่อระยะเคลื่อนที่มากขึ้นแต่หากมองในภาพรวมแล้วทั้งสองตัวอย่างสามารถดูดซับพลังงานได้ดี

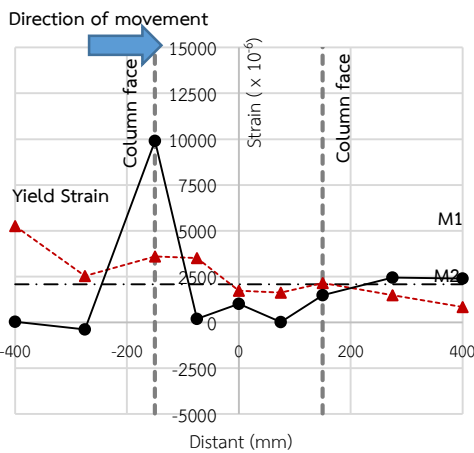
3.7 การกระจายค่าความเครียดภายในคานคอนกรีต

ในการทดสอบได้ติดตั้งชุดวัดความเครียด (strain gauge) กระจายบนเหล็กเสริมตามยาวของคานทั้ง 2 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 15 ในบทความนี้จะนำเสนอเฉพาะพฤติกรรม

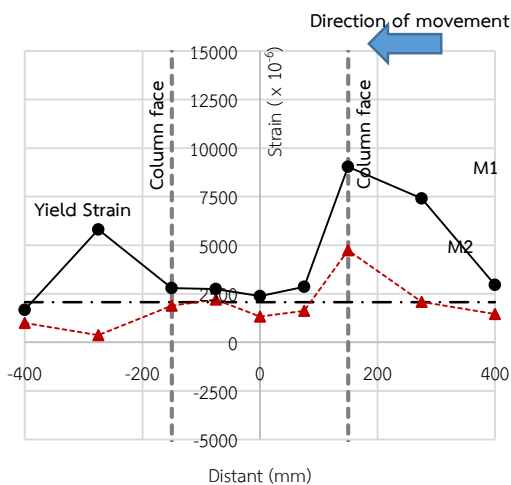
ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านบนของคานระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 15 ตำแหน่งการติดตั้ง strain Gauge



รูปที่ 16 ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านบนของคาน ที่อัตราส่วนเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ เท่ากับ +2.50%



รูปที่ 17 ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านบนของคาน ที่อัตราส่วนเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ เท่ากับ -2.50%

จากรูปที่ 16 และ 17 แสดงพฤติกรรมความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านบนของคานที่อัตราส่วนเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ เท่ากับ $\pm 2.50\%$ จะเห็นได้ว่าที่ปลายคานทั้งสองด้านค่าความเครียดของตัวอย่าง M1 สูงกว่าตัวอย่าง M2 อย่างชัดเจน

4. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบโครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายในอาคารที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กตามข้อแนะนำของ ACI318 และ ACI352R (ชุดตัวอย่าง M1) และจุดที่มีรายละเอียดเหล็กเสริมเหมือนกันแต่เพิ่มเหล็กเสริมตามยาวระดับกลางฝังเข้าไปในคานทั้งสองด้าน ด้านละ 1.50 เท่าของความลึกประสิทธิภาพคาน (d) (ชุดตัวอย่าง M2) ทดสอบภายใต้แรงวิ้งจรตามมาตรฐาน ACI T1.1-01 ในการทดสอบชุดตัวอย่าง M1 และ M2 ซึ่งอัตราส่วนการโยกตัวสูงสุดในการทดสอบเท่ากับ 4.00% จากการทดสอบพบว่า

- ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของตัวอย่าง M1 เกิดขึ้นที่หน้าตัดคานตำแหน่งจุดต่อหน้าคานเสา แต่ในตัวอย่าง M2 จุดหมุนพลาสติก เกิดขึ้นที่หน้าตัดคานระยะห่างจากเสาประมาณ 1.0-1.5 เท่าของความลึกประสิทธิภาพคาน (d)
- พฤติกรรม hysteresis ไม่ปรากฏ pinching ขึ้นในระหว่างการทดสอบ แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการสลายพลังงานของจุดต่อเป็นอย่างดี
- กำลังสูงสุดของตัวอย่าง M2 มากกว่าตัวอย่าง M1 โดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 40 ของกำลังสูงสุดของตัวอย่าง M1
- อัตราส่วนความเสื่อมถอยของความแข็งแรงในชุดตัวอย่าง M1 มีการเสื่อมถอยมากกว่าชุดตัวอย่าง M2 ที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์เท่ากับ $\pm 4.0\%$ ค่าความแข็งแรงจะเหลือเท่ากับร้อยละ 8.90 และ 14.10 สำหรับตัวอย่าง M1 และ M2 ตามลำดับ
- การสลายพลังงานของชุดตัวอย่าง M1 มีการสลายพลังงานดีกว่าชุดตัวอย่าง M2
- ค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวด้านบนของคานในตัวอย่าง M1 มีค่าสูงกว่าตัวอย่าง M2 อย่างชัดเจน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการวิจัย ทุน สกว.-อุตสาหกรรม ประจำปี 2555 และบริษัท พิบูลย์คอนกรีต จำกัด



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hollings, J.P. (1968). Reinforced Concrete Seismic Design, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 2(3), pp. 217-250.
- [2] Hollings, J.P. (1968). A reinforced concrete building in Wellington, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 2(4), pp. 420-442.
- [3] American Concrete Institute (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*.
- [4] American Concrete Institute (2002). *Recommendations for Design of Beam-Column Connection in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352R-02)*.
- [5] กรมโยธาธิการและผังเมือง (2554). *มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301-54)*
- [6] Bahjat, A.F and James, K.W. (1987). Study of moving beam plastic hinging zones for earthquake-resistant design of R/C building, *ACI Structural journal*, Jan-Feb 1987, pp.31-39
- [7] American Concrete Institute (2001). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing (ACI T1.1-01)*.
- [8] Chopra, A. K., (2011). *Dynamic of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering*, International edition, Prentice Hall, New Jersey.



การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับจักรยานสามล้อไฟฟ้า

Brushless DC Motor Controlled with Microcontroller for Electric Tricycle

เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์* และยุทธนา กันทะพะเยา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
7/1 ถนนพหลโยธิน 1 ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ. นนทบุรี

*ผู้รับผิดชอบบทความ: chalernpol.r@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยนำไปใช้กับจักรยานสามล้อไฟฟ้า เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านไม่ต้องบำรุงรักษาเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม ระบบควบคุมที่นำเสนอใช้หลักการแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งข้อมูลตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์มาจากตัวตรวจจับฮอลล์ที่มีมุมต่างกัน 120 องศา โดยการหมุน 1 รอบ ใช้การอ้างอิง 6 ขั้น เพื่อยืนยันระบบการควบคุมที่นำเสนอ ได้ทดสอบควบคุมความเร็วของจักรยานสามล้อไฟฟ้าบรรทุกน้ำหนัก 80 กิโลกรัม

คำสำคัญ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน จักรยานสามล้อไฟฟ้า ตัวตรวจจับฮอลล์

Abstract

This paper presents a brushless DC motor controlled. The microcontroller is used to control the system operation apply to an electric tricycle. Since, a brushless DC motor is a maintenance free which it is compared to a classical DC motor. A trapezoid method apply to the control system is proposed. The rotor magnet position information, it is performed by a hall sensor with a difference of 120° , and 1 cycle there are 6 step reference. To confirm the proposed control system, it is tested to control speed of the electric tricycle at a 80 kg laden.

Keywords: brushless DC motor, electrical tricycle, hall sensor

1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งหรือการเดินทางอย่างแพร่หลาย เช่น รถไฟฟ้า รถยนต์ และรถจักรยานไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากต้องการลดการใช้น้ำมันซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการสร้างปัญหาจากด้านสิ่งแวดล้อมรวมถึงราคาที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จึงทำให้รถที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้น [1] แต่การใช้รถไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนหลักคือมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งแบบดั้งเดิมนั้น จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current motor) โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีอาร์เมเจอร์เป็นตัวหมุน (rotor) และสนามแม่เหล็กเป็นตัวอยู่กับที่ (stator) ซึ่งจะอาศัยแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ ทำหน้าที่เป็นขบวนการคอมมิวเตชันทางกล (commutation mechanical) มอเตอร์แบบนี้จะมีข้อเสียเนื่องจากการเสียดสีทำให้เกิดความร้อน การสึกหรอ และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference) [1-2] แต่ปัจจุบันนิยมนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless dc motor) ซึ่งอาร์เมเจอร์จะเป็นตัวอยู่กับที่ และสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวหมุนและใช้ตัวตรวจจับ (sensor) เพื่อตรวจจับตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์และใช้อินเวอร์เตอร์

สำหรับขบวนการคอมมิวเตชันทางระบบอิเล็กทรอนิกส์ (commutation electronically) การตรวจจับตำแหน่งของตัวหมุนตลอดเวลาใช้ตัวตรวจจับฮอลล์ (hall sensor) สามตัว โดยติดตั้งไว้บริเวณใกล้กับตัวหมุน ซึ่งตัวตรวจจับฮอลล์จะอาศัยหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กจากตัวหมุนที่มาปะทะกับตัวตรวจจับฮอลล์ตลอดเวลา

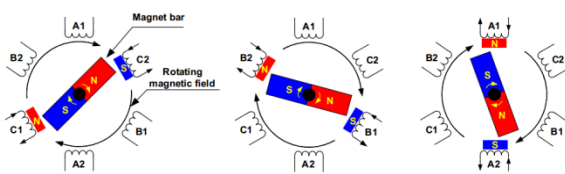
โดยลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาแปรงถ่าน (maintenance free) และซีคอมมิวเตเตอร์ และยังมีข้อดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม ในเรื่องของคุณสมบัติแรงบิดกับความเร็ว มีการตอบสนองทางพลวัตเร็ว และประสิทธิภาพการทำงานสูง ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน มาประยุกต์ใช้กับจักรยานสามล้อไฟฟ้า โดยมีการติดตั้งมอเตอร์แทนชุดล้อหน้าเดิมของจักรยานสามล้อเพื่อจะได้ติดตั้งง่าย และมีคันเร่งสำหรับควบคุมความเร็วของจักรยานไฟฟ้า

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

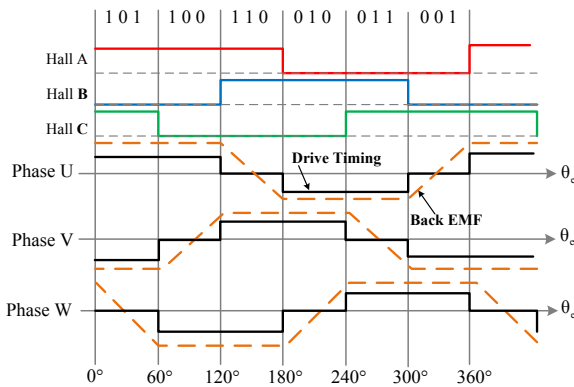
ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจะมี ส่วนของสายไฟที่ใช้ในการควบคุม 5 เส้น โดยแบ่งออกเป็น 2 เส้นสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และส่วนที่เหลืออีก 3 เส้นเป็นสายสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์ และสายไฟในส่วน ของตัวมอเตอร์อีก 3 เส้น ซึ่งจะมีการทำงานดังต่อไปนี้

2.1 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

การทำงานของมอเตอร์จะอาศัยพื้นฐานของแรงดูด (attraction) และแรงผลัก (repulsion) ระหว่างขั้วแม่เหล็กที่ อาศัยหลักการเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งโรตอร์ที่มี ตัวหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรดังรูปที่ 1 โดยมีขั้นตอนการเริ่มหมุน เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดชุดที่หนึ่งของขดลวดชุดที่สเตเตอร์ ทั้งสาม และสร้างขั้วแม่เหล็กนั้นเป็นแรงดูดให้สนามแม่เหล็ก ครอบรอบของขั้วที่ต่างกัน โรตอร์จะเคลื่อนที่ไปถ้ากระแสเลื่อน ไปที่ขดลวดชุดที่ติดกัน เกิดลำดับการเปลี่ยนแปลงแต่ละชุด ขดลวดทำให้โรตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก หมุน [3]



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของมอเตอร์



รูปที่ 2 แผนภาพการคอมมิวเตชัน

โดยการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรง ถ่านจะอาศัยการทำงานครึ่งละสองเฟส ผลลัพธ์คือจะทำให้ เกิดแรงบิดมาก ด้วยเหตุที่เฟสที่สามหยุดทำงานซึ่งเป็นข้อดี ของระบบขับเคลื่อนทางกลที่ต้องการแรงบิดมาก สำหรับการ ควบคุมการทำงานแบบสองเฟสจะใช้หลักการนำพลังงาน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับตำแหน่งของตัวโรตอร์ โดยใช้ ตัวตรวจจับสัญญาณด้วยตัวตรวจจับฮอลล์ทั้งสามตำแหน่งที่ ติดตั้งที่สเตเตอร์ โดยสัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งจะถูก

นำมาสร้างตัวเลขสามหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 60 องศา ทางไฟฟ้า โดยสัญญาณจากตัวตรวจจับฮอลล์นี้จะถูกนำไป กำหนดจังหวะเวลาการขับ (drive timing) ของสวิตช์กำลัง และขณะมอเตอร์หมุนจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back electromotive forces) [4] โดยสัญญาณแสดงในรูปที่ 2

2.2 แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในตัวแปรเฟส จะได้สมการของชุดขดลวดสามเฟสในตัวแปร เฟสซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + (L-M) \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ

$V_{an} V_{bn} V_{cn}$ คือ แรงดันเฟสของสเตเตอร์

$i_{an} i_{bn} i_{cn}$ คือ กระแสเฟสของเฟสของสเตเตอร์

$e_{an} e_{bn} e_{cn}$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

R คือ ความต้านทานสเตเตอร์

L คือ ความเหนี่ยวนำ

M คือ ความเหนี่ยวนำร่วม

ซึ่งค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับหาได้จาก

$$e_k = \omega_m f_k(\theta_r) \quad (2)$$

เมื่อ k คือ a b และ c โดยฟังก์ชันของ $f_a f_b$ และ f_c จะมีรูปร่างเหมือนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับดังรูปที่ 2 ซึ่ง จะมีค่าขนาด ± 1 และ θ_r เป็นตำแหน่งตัวตรวจจับฮอลล์สาม ตัวที่วางห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า

ซึ่งแบบจำลองทางพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ไร้แปรงถ่าน จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนทางกลและส่วน ทางไฟฟ้า โดยส่วนแรกเป็นการหาค่าแรงบิดสนามแม่เหล็กที่ ได้จากส่วนทางไฟฟ้างดสมการที่ 3

$$T_e = \sum_k k_t i_k f_k(\theta_r) \quad (3)$$

ส่วนสมการที่ 4 เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ทางกลของ มอเตอร์ โดยจะมีความสัมพันธ์กับทางไฟฟ้าในส่วนความเร็ว และตำแหน่งโรตอร์ดังสมการที่ 5

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (4)$$



$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{P}{2} \omega_m \quad (5)$$

เมื่อ T_e = แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
 T_L = แรงบิดโหลด
 ω_m = ความเร็วการเคลื่อนที่ของมอเตอร์
 J = แรงเฉื่อยโรเตอร์
 B = ค่าคงที่การหน่วง
 kt = ค่าคงที่แรงบิด
 P = จำนวนขั้ว
 θ_r = องศาทางไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ของสมการทั้งหมดของระบบในรูปปริภูมิสถานะ

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_s} [v_{an} - e_a - Ri_a] \quad (6)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_s} [v_{bn} - e_b - Ri_b] \quad (7)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_s} [v_{cn} - e_c - Ri_c] \quad (8)$$

เมื่อ $L_s = L-M$ การแปลงลาปลาซของสมการที่ 6 7 และ 8

$$I_a = \frac{1}{L_s s + R} [v_{an} - e_a] \quad (9)$$

$$I_b = \frac{1}{L_s s + R} [v_{bn} - e_b] \quad (10)$$

$$I_c = \frac{1}{L_s s + R} [v_{cn} - e_c] \quad (11)$$

และการแปลงลาปลาซของสมการที่ 4

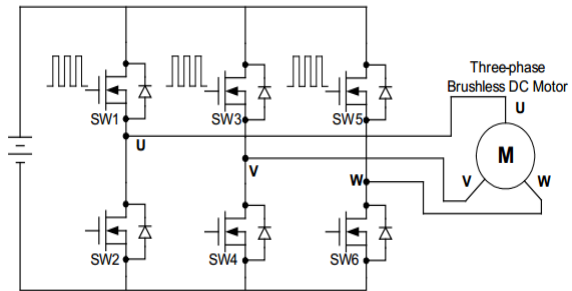
$$T_e - T_L = (Js+B)\omega_m \quad (12)$$

เมื่อความเร็วของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\omega_m = \frac{1}{(Js+B)} (T_e - T_L) \quad (13)$$

2.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้คอมมิวนิเตอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมการสับเปลี่ยนทิศทางกระแสสำหรับกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง จะใช้โครงสร้างบริดจ์สามเฟสแสดงดังรูปที่ 3 สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จะควบคุมด้วยสวิตช์ตัวบนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยใช้การควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์บิตวึม (PWM) ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตสัญญาณแรงดันโดยปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง วิธีการนี้ทำได้ง่ายและสามารถจำกัดค่ากระแสเริ่มหมุน เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิด หลักการทำงานที่อธิบายข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 เป็นการแสดงค่าองศา ตำแหน่งของตัวตรวจจับฮอลล์ และการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ [4-5]



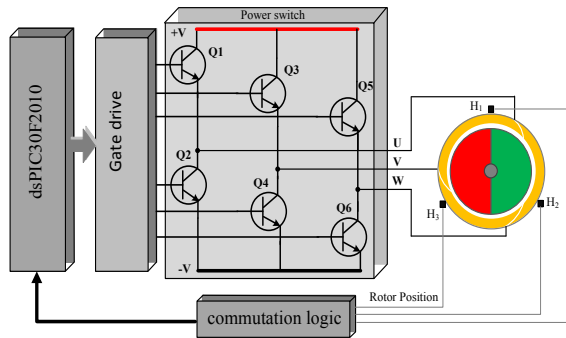
รูปที่ 3 บริดจ์สามเฟส

ตารางที่ 1 ลำดับคอมมิวนิเตอร์สำหรับการหมุน

Electrical angle	Hall sensor			Phase current			Switch closed	
	H1	H2	H3	Ia	Ib	Ic		
0°-60°	1	0	1	+	-	off	sw1	sw4
60°-120°	1	0	0	+	off	-	sw1	sw6
120°-180°	1	1	0	off	+	-	sw3	sw6
180°-240°	0	1	0	-	+	off	sw3	sw2
240°-300°	0	1	1	-	off	+	sw5	sw2
300°-360°	0	0	1	off	-	+	sw5	sw4

3. การออกแบบระบบควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมนั้นแยกออกเป็นสองส่วนคือส่วนงานทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยวงจรขับเคลื่อน สวิตช์กำลัง และระบบควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 แสดงไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไตอะแกรมการทำงานของวงจรควบคุม

3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ซึ่งสามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต ซึ่งมีความเร็วเพียงพอสำหรับการออกแบบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากมีความสามารถหลักคือ มีโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดธ์ 6 ช่องอิสระหรือ 3 คู่ เป็นคอมพริเมนตารี และมีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต [5] เป็นต้น

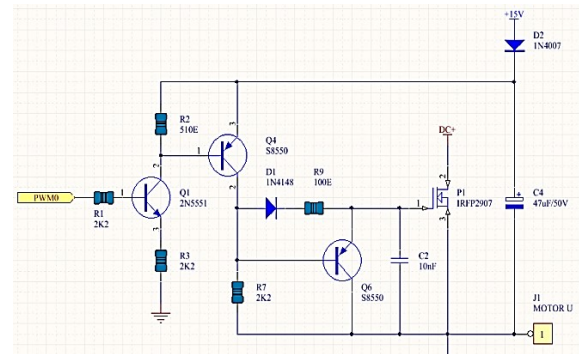
3.2 วงจรขับและวงจรภาคกำลัง

ในส่วนของวงจรขับ (gate drive) นี้ได้ถูกนำมาใช้เพื่อขับขาเกตของทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) ไอจีบีที (IGBT) หรือมอสเฟต (MOSFET) เพื่อการทำงานของสวิทช์กำลังเหล่านี้ โดยอาศัยการทำให้มอสเฟตนำกระแสและหยุดนำกระแสอย่างรวดเร็วทำได้โดยใช้ทรานซิสเตอร์คู่คอมพลีเมนต์ (complement) ต่อร่วมกันแบบวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (common collector) ทำหน้าที่ใส่ประจุและดึงประจุออกจากเกตของมอสเฟตเพื่อกระตุ้นให้การสะสมประจุและการคายประจุของเกตในมอสเฟตวงจรภาคกำลัง ส่วนวงจรภาคกำลังชนิด 3 เฟส แบบบริดจ์ ดังรูปที่ 5

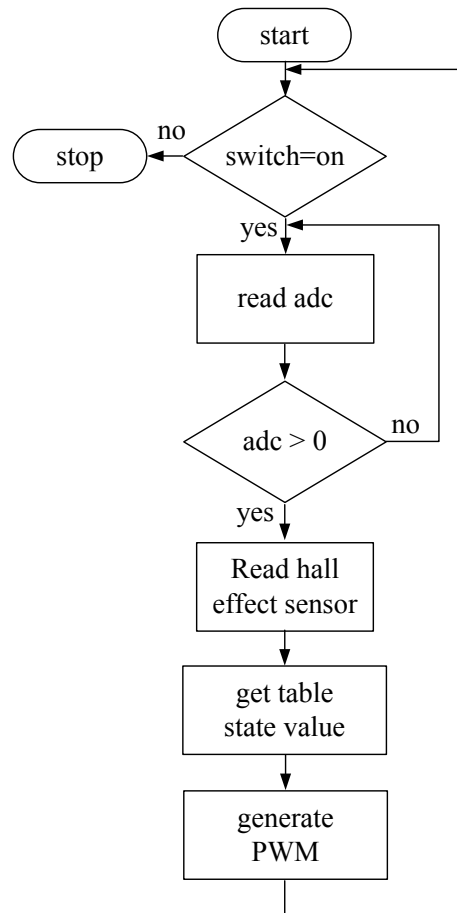
3.3 ขั้นตอนควบคุมการทำงาน

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยตัวตรวจจับฮอลล์จะตรวจจับตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ป้อนกลับมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ออกคำสั่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้หลักการรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal method) ที่มีมุมต่างกัน 120 องศา โดยการทำงาน 1 รอบใช้การอ้างอิง 6 ขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 1 (0° - 360°) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์วิดธ์ สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรบริดจ์สามเฟส เพื่อจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยตัวตรวจจับฮอลล์จะส่งสัญญาณ

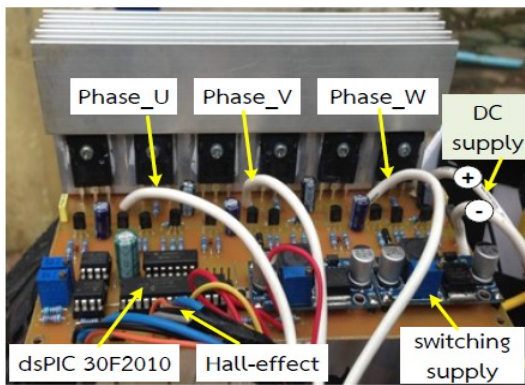
เข้ามาที่พอร์ต RB3 RB4 และ RB5 เพื่อกำหนดลำดับการทำงานของสวิทช์กำลัง ทั้ง 6 ตัว (SW_1 - SW_6) เมื่อกำหนดให้ความถี่การสวิทช์เท่ากับ 50 kHz โดยสัญญาณควบคุมของวงจรจากโมดูลพัลส์วิดธ์เอ็มของไมโครคอนโทรลเลอร์จะต่อกับวงจรขับเกตเพื่อควบคุมการทำงานของสวิทช์กำลัง แสดงดังรูปที่ 5 สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจะมีลำดับขั้นตอนการควบคุมการทำงานดังรูปที่ 6 และจากไดอะแกรมการทำงานของวงจรควบคุมได้นำมาทดสอบกับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ดังรูปที่ 7 เป็นแผงวงจรควบคุมต้นแบบที่นำเสนอ



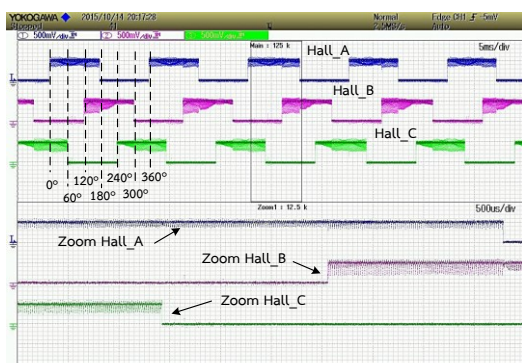
รูปที่ 5 วงจรขับเกตและมอสเฟตกำลัง



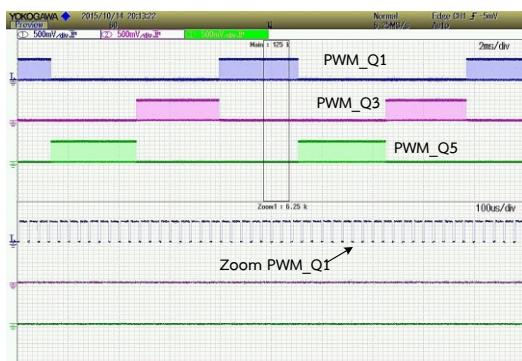
รูปที่ 6 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 7 แผงวงจรควบคุมต้นแบบที่นำเสนอ



รูปที่ 8 สัญญาณตัวตรวจจับฮอลล์



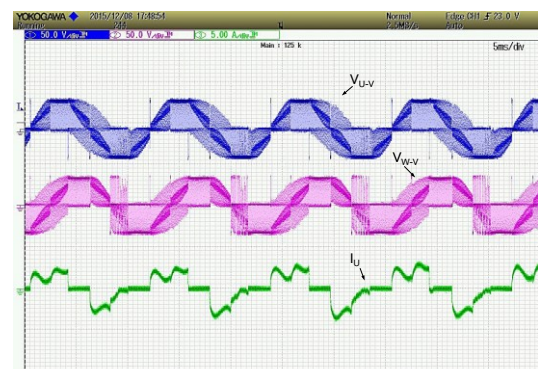
รูปที่ 9 เปรียบเทียบสัญญาณ PWM

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

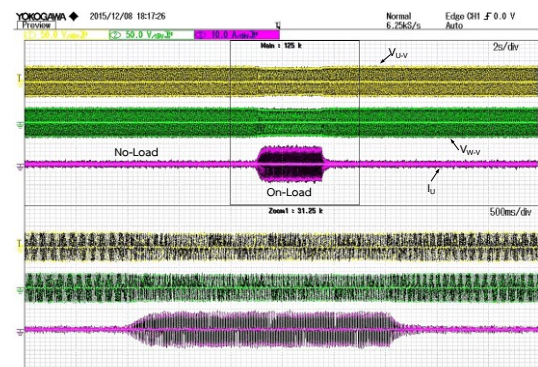
ในบทความนี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์ และติดตั้งแทนชุดมอเตอร์เดิมของจักรยานขนาด 20 นิ้ว ใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 12 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จำนวน 3 ลูกต่ออนุกรม โดยเลือกสวิตช์กำลังเบอร์ IRFP2907 ซึ่งให้เหมาะสมกับการใช้งานจากชุดวงจรต้นแบบในรูปที่ 7 ได้ทำการวัดสัญญาณการทำงานของตัวตรวจจับฮอลล์ดังรูปที่ 8 เพื่อดูลักษณะการทำงานเป็นไปตามหลักการของการตรวจสอบตำแหน่งโรเตอร์ ส่วนรูปที่ 9 แสดงสัญญาณพีดีบีเอ็มที่ควบคุมสวิตช์ด้านบน (Q1 Q3 และ Q5) ส่วนรูปที่ 10 แสดงลักษณะของแรงดันที่เฟส U-V

และ V-W และกระแสไหลผ่านเฟส U ในขณะที่ทำการทดสอบขณะมีโหลด ส่วนในรูปที่ 11 ทำการทดสอบโดยการเพิ่มและลดโหลดแบบทันทีทันใดโดยใช้วิธีการกดเบรคเป็นการแทนการเพิ่มโหลด และปล่อยเบรคเป็นการแทนการลดโหลด

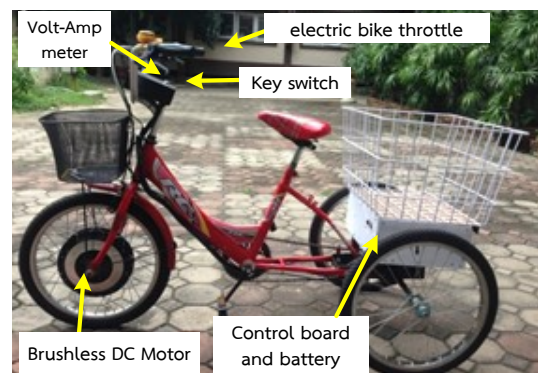
จากการทดสอบขับจักรยานสามล้อไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 11 ผลที่ได้จากการทดสอบความเร็วสูงสุดของจักรยานสามล้อไฟฟ้าที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม จักรยานสามล้อไฟฟ้าสามารถทำความเร็วสูงสุดเฉลี่ยได้ 21.9 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยเมื่อประจุแบตเตอรี่เต็ม และทดสอบการวิ่งให้จนกว่าแบตเตอรี่หมดจักรยานสามล้อไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ย 22.1 กิโลเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 10 แรงดัน และกระแสที่มอเตอร์



รูปที่ 11 การเพิ่มและลดโหลดแบบขึ้น



รูปที่ 12 จักรยานสามล้อไฟฟ้า



5. สรุป

จากผลการทดสอบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ที่ใช้ขับเคลื่อนรถจักรยานสามล้อไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมความเร็วรถจักรยานได้ตามต้องการ บนเงื่อนไขการทดสอบที่มีน้ำหนักบรรทุกทุก 80 กิโลกรัม จักรยานสามล้อไฟฟ้าวิ่งได้ความเร็วเฉลี่ย 21.9 กิโลเมตร/ชั่วโมง และแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดแห้งขนาด 12 โวลต์ 12 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จำนวน 3 ลูก ต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่ 36 โวลต์ โดยระยะเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ให้เต็ม ประมาณ 5 ชั่วโมงในการอัดประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง จักรยานสามล้อไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ย 22.1 กิโลเมตร โดยการพัฒนาต่อไปจะเพิ่มฟังก์ชันให้มีการกลับทางหมุนเพื่อให้สามารถถอยหลังได้ และระบบตัดสัญญาณในขณะต้องการหยุดจากการเบรคจักรยาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chan, T.F, Yan, L.T. and Fang, S.Y. (2002). In-wheel permanent-magnet brushless dc motor drive for an electric bicycle, *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 17, no. 2, June 2002, pp. 229 – 233.
- [2] Kahveci, H., Okumus, H.I. and Ekici, M. (2014). Improved brushless DC motor speed controller with digital signal processor, *IET Journals & Magazines*, vol. 50, no. 12, June 2014, pp. 864 – 866.
- [3] Xia, C.L. (2012). *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*, John Wiley & Sons, Singapore.
- [4] Liu, D. (2008). *Brushless DC motors made easy*, freescale, 2008.
- [5] Souza, S.D. (2004). *Sensored BLDC motor control using dsPIC30F2010*, Microchip Technology, 2004.

การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งเก็บพลังงาน

Design of an AC/DC Converter with using Supercapacitors as Energy Storage

พิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร^{1*} และวิบูลย์ ชื่นแขก²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุมและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*ผู้รับผิดชอบบทความ: pisit@mut.ac.th โทรศัพท์ 02-988-3666

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูงที่มีการใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งเก็บพลังงาน ระบบที่นำเสนอประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบซุกและมิงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางต่อระหว่างเอาต์พุตของระบบและซูเปอร์คาปาซิเตอร์เพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าระหว่างเอาต์พุตระบบและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ในโหมดปกติโหลดได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟสลับโดยผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงถูกควบคุมให้ชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ สำหรับสถานะที่แหล่งจ่ายไฟสลับเกิดขัดข้อง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางจะถูกควบคุมให้ส่งผ่านพลังงานจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไปที่โหลด เพื่อตรวจสอบหลักการ ระบบที่นำเสนอได้ทดสอบระบบต้นแบบที่แรงดันเอาต์พุตวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงมีค่าเท่ากับ 48 V ที่กำลังเอาต์พุต 250 W และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดแรงดัน 25 V ความจุ 10 F ถูกใช้เป็นแหล่งเก็บพลังงาน จากผลการทดสอบค่าตัวประกอบกำลังด้านอินพุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงมีค่าประมาณ 0.99 และเวลาในการจ่ายพลังงานสำรองเท่ากับ 7 วินาทีที่โหลดด้านออกเท่ากับ 100 W

คำสำคัญ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงแบบสองทิศทาง

Abstract

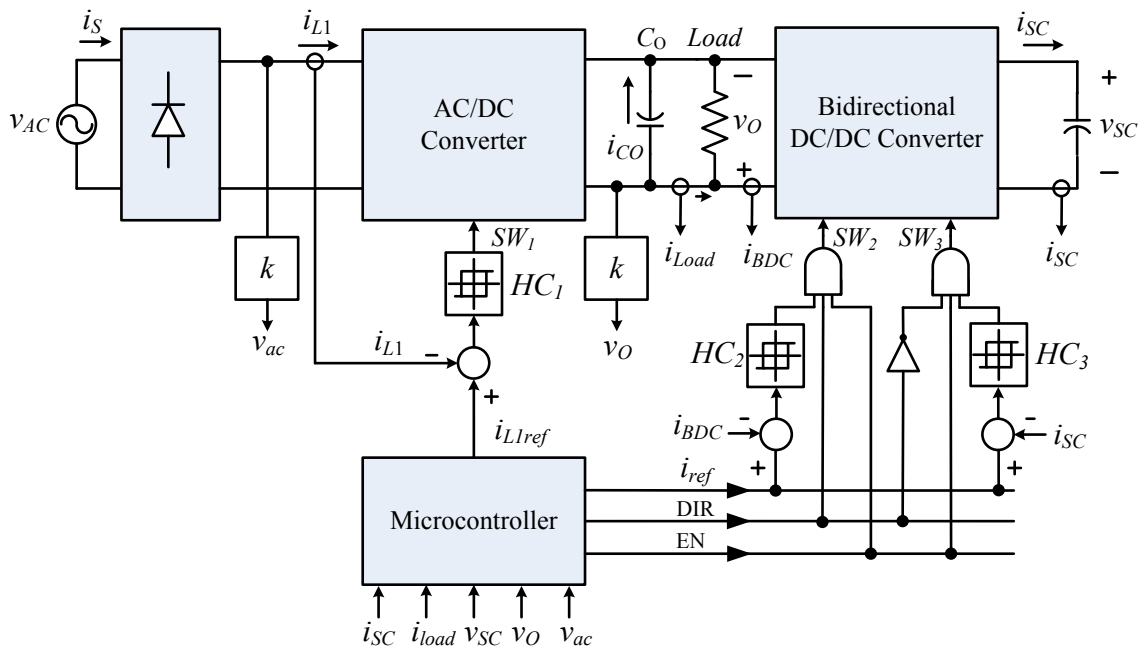
This paper presents a design of a high power factor AC/DC converter with using supercapacitors as energy storage. The proposed system consists of a cuk topology based AC/DC power converter and a bidirectional DC/DC converter which is connected between the AC/DC converter and supercapacitors for transferring electrical energy between the system output and supercapacitors. In normal mode, load is energized by the AC line via the AC/DC converter and the DC/DC converter is controlled to charge supercapacitors. In the case of the AC line faults, the bidirectional DC/DC converter is controlled to transfer energy from supercapacitors to load. To verify the proposed system concept, the AC/DC converter and the bidirectional DC/DC converter were built and 25V/10F supercapacitors are used as energy storage. The output voltage of the AC/DC converter is 48 V at 250 W output power. From the experimental results, the input power factor of the AC/DC converter is about 0.99 and the backup time is 7s for 100 W of output power.

Keywords: Supercapacitors, AC/DC converter, Bidirectional DC/DC converter

1. บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้งานอุปกรณ์ควบคุมและระบบเครื่องมือวัดกันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิต ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มักจะทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟตรงที่มาจากแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิง ด้วยเหตุผลที่แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแหล่งจ่ายไฟตรงแบบเชิงเส้นและยังสามารถทำงานที่แรงดันอินพุตในย่านกว้าง อย่างไรก็ตามอาจเกิดกรณีที่แรงดันไฟสลับมีค่าลดลงต่ำเกินกว่าที่แหล่งจ่ายไฟ

แบบสวิตซ์ซิงจะทำงานได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ในระบบควบคุมและเครื่องมือวัดได้ วิธีแก้ปัญหาคือทำโดยออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิงที่สามารถทำงานในย่านแรงดันอินพุตที่กว้างขึ้น [1] และถึงแม้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิงจะสามารถทำงานในย่านแรงดันอินพุตที่กว้างแต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาในกรณีแรงดันไฟสลับหายไปได้อีกแนวทางหนึ่งของการแก้ปัญหาหนึ่งคือการใช้แหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่อง [2] (Uninterruptible- Power Supply: UPS) ซึ่งนิยมใช้กันอย่าง



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบที่นำเสนอ

กว้างขวางในระบบสื่อสารและคอมพิวเตอร์โดยภายในแหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่องนี้จะมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานสำรองและพลังงานสำรองในแบตเตอรี่จะถูกจ่ายไปยังโหลดเมื่อแหล่งจ่ายไฟสลับเกิดขัดข้อง โครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่องจะมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบทบทวนแรงดันเพื่อเพิ่มขนาดแรงดันให้สูงขึ้นใช้เป็นอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้โหลด อย่างไรก็ตามโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟแบบต่อเนื่องดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับโหลดกรณีที่ต้องการแรงดันไฟตรงในการทำงาน เพราะท้ายที่สุดก็ต้องมีวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงที่มีขนาดแรงดันต่ำเหมาะสมกับโหลดด้วย ซึ่งทำให้เกิดกำลังสูญเสียในภาคต่างๆของวงจรแปลงผันไฟฟ้าที่มีในระบบ

ปัจจุบันมีการนำซูเปอร์คาปาซิเตอร์มาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะใช้เก็บพลังงานสำรองเนื่องจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ [3] ได้แก่ มีความหนาแน่นกำลังสูงกว่า, อายุใช้งานยาวนานกว่า, ไม่มีการบำรุงรักษาและง่ายในการชาร์จประจุ เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่มีความหนาแน่นของพลังงานมากกว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ทำให้การนำซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่เหมาะกับระบบไฟฟ้าสำรองที่ต้องมีระยะเวลาสำรองนาน ๆ

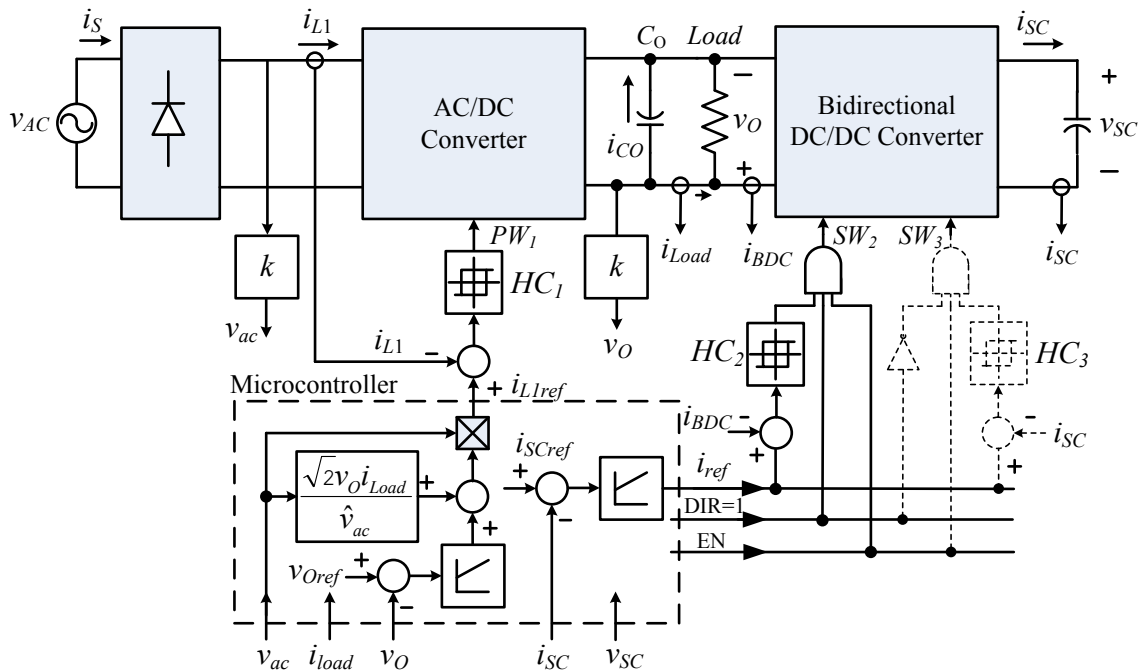
ดังนั้นในที่นี้จึงนำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่มีการเก็บพลังงานสำรองโดยใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ซึ่งมีการนำเสนอรายละเอียดในส่วน

ต่างๆ ระบบที่นำเสนอในภาพรวมและวงจรภาคกำลัง, รายละเอียดตัวควบคุมระบบ, ผลการทดสอบและบทสรุป

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1. โครงสร้างระบบ

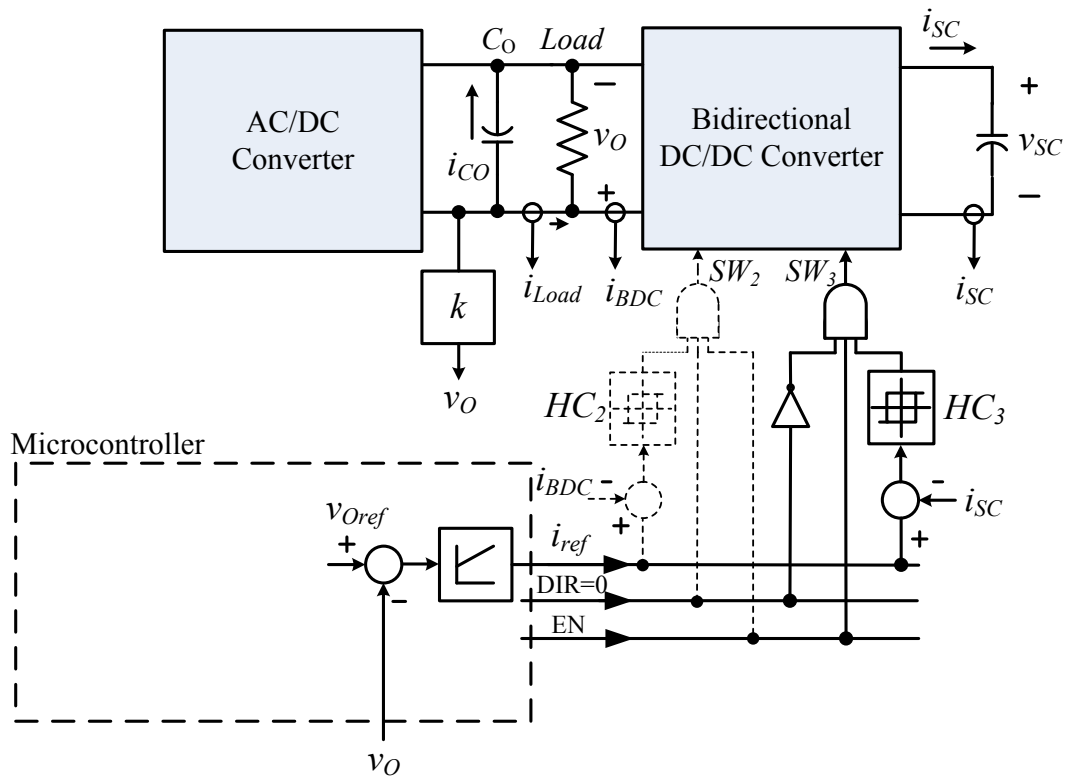
ระบบที่นำเสนอมีโครงสร้างดังรูปที่ 1 โดยภาคกำลังประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC/DC Converter) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC/DC Converter) โดยด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะต่อกับโหลดของระบบและต่อเข้ากับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางที่อีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในส่วนของการควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม การทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 2 สภาวะคือ โมดปกติและโมดจ่ายพลังงานสำรองให้โหลด โมดปกติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงถูกควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 48V เพื่อจ่ายโหลดและชาร์จประจุซูเปอร์คาปาซิเตอร์โดยใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง การควบคุมกระแสในวงจรแปลงผันกำลังทั้งหมด จะใช้ตัวควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส ค่าคำสั่งกระแสได้จากการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ การทำงานของระบบในโมดปกติเป็นสภาวะ



รูปที่ 2 ไดอะแกรมระบบเมื่อทำงานในโหมดปกติมีแหล่งจ่ายไฟสลับเป็นแหล่งพลังงาน

ที่แหล่งจ่ายไฟสลับทำงานได้ปกติซึ่งกรณีนี้ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะถูกควบคุมให้จ่ายพลังงานให้โหลดและชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ไดอะแกรมการทำงานในโหมดนี้แสดงดังรูปที่ 2 การควบคุมวงจรแปลงผันทั้งสองจะแยกจากกันอย่างอิสระ โดยมีลู่วัดควบคุมการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ด้วยการควบคุมค่ากระแสที่ไหลผ่านให้มีค่าคงที่และแรงดันต้องไม่เกินค่าพิคกิ้งของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ค่าสั่งกระแสซูเปอร์คาปาซิเตอร์ i_{SCref} ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 A และการชาร์จจะสิ้นสุดเมื่อแรงดันที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่าพิคกิ้งแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ประมาณ 1-2 V เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ซึ่งเป็นเหตุให้อายุการใช้งานสั้น การควบคุมกระแสชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมกระแสจะถูกใช้เป็นคำสั่งกระแส i_{ref} ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางด้านที่ต่อกับโหลดของระบบ ซึ่งคำสั่งกระแสนี้จะถูกจำกัดไม่ให้เกิน 0.5 A นั่นคือกำลังไฟฟ้าจากบัสไฟตรงที่จะมาชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะต้องมีค่าไม่เกิน 24 W (คำนวณจาก $0.5 \text{ A} \times 48 \text{ V}$) ส่วนวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงก็จะใช้วิธีการควบคุมลูบนอกที่เป็นแรงดันเอาต์พุตและลูบในมีการควบคุมกระแสด้านอินพุตของวงจร สำหรับคำสั่งกระแสที่เป็นเอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดันจะถูกนำมาคูณด้วยสัญญาณขนาดหนึ่ง

หน่วยของแรงดันไฟสลับที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อนำไปควบคุมให้กระแสด้านอินพุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีมูฟเฟสตรงกับแรงดันไฟสลับทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของวงจรมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง นอกจากนั้นยังมีส่วนของการตรวจวัดกระแสโหลด เพื่อนำมาคำนวณค่าขนาดกระแสด้านอินพุตที่ต้องการของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟตรงตามหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า หรือในมุมมองของทฤษฎีระบบควบคุมคือการควบคุมแบบป้อนไปหน้า (feedforward control) รูปที่ 3 เป็นไดอะแกรมระบบที่ทำงานในโหมดจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลดซึ่งระบบจะทำงานในโหมดนี้เมื่อแรงดันไฟสลับเกิดขัดข้องหรือเกิดแรงดันตกจนไม่สามารถจ่ายพลังงานได้ จึงไม่มีการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแต่จะมีเฉพาะส่วนการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายพลังงานให้โหลดโดยซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันของระบบ โหมดจ่ายพลังงานสำรองนี้สัญญาณ DIR ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ '1' เพื่อควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงส่งผ่านพลังงานให้โหลด จากไดอะแกรมในรูปที่ 3 สัญญาณเอาต์พุตตัวควบคุมแรงดันที่โหลดถูกใช้เป็นคำสั่งกระแสของตัวควบคุมกระแส HC_3 เพื่อควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงด้านที่ต่อกับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ส่วนรายละเอียดของวงจรภาคกำลังจะได้อธิบายดังในหัวข้อที่ 2.2



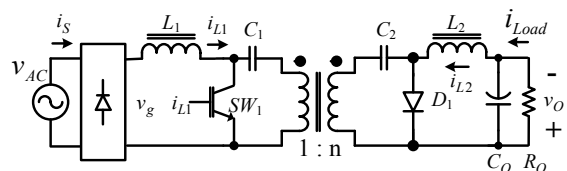
รูปที่ 3 โดอะแกรมระบบเมื่อทำงานในโหมดการจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลด

2.2. วงจรภาคกำลัง

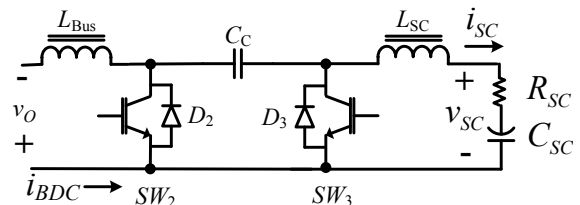
วงจรภาคกำลังของระบบประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบซิงโครไนซ์ที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตและเอาต์พุตด้วยหม้อแปลงความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งหลักการทำงานและการออกแบบเพื่อเลือกค่าอุปกรณ์ของวงจรมีการนำเสนอในงานวิจัย [4] ส่วนวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางในที่นี้เลือกวงจรซิงโครไนซ์แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีการนำเสนอในงานวิจัย [5] โดยวงจรนี้จะมีโหมดการทำงานสองโหมดคือ โหมดการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ด้วยพลังงานจากบัสไฟตรง ซึ่งลักษณะวงจรแสดงดังในรูปที่ 6 สวิตช์กำลัง SW_3 จะถูกควบคุมส่วนสวิตช์กำลัง SW_2 จะถูกสั่งงานให้หยุดนำกระแสตลอดเวลาและไดโอด D_2 ก็จะไม่นำกระแสด้วยซึ่งเทียบได้กับวงจรแปลงผันกำลังชนิดซิงโครไนซ์แบบพื้นฐาน โหมดนี้แรงดันอินพุตคือบัสไฟตรงที่เป็นเอาต์พุตของระบบที่มีโหลดต่ออยู่และเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางก็คือซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ต้องการชาร์จนั่นเอง

สำหรับการทำอีกโหมดหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางก็คือโหมดการจ่ายพลังงานสำรองดังแสดงในรูปที่ 7 โหมดนี้จะมีการควบคุมสวิตช์กำลัง SW_2 ซึ่งจะสลับกันนำกระแสกับไดโอด D_3 ส่วนสวิตช์กำลัง SW_3 จะถูกสั่งงานให้หยุดนำกระแสตลอดเวลาและไดโอด D_2 ก็จะไม่นำกระแสเช่นกัน นั่นคือเทียบเท่ากับวงจร

แปลงผันชนิดซิงโครไนซ์พื้นฐานแรงดันอินพุตของวงจรก็คือแรงดันที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ส่วนเอาต์พุตก็คือแรงดันที่โหลด ดังนั้นการควบคุมสวิตช์กำลัง SW_3 จะเป็นการควบคุมกำลังงานจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่จ่ายให้กับโหลด โดยโหมดนี้จะมีรูปนอกระบบเป็นการควบคุมแรงดันอินพุตให้มีความเท่ากับ 48 V



รูปที่ 4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

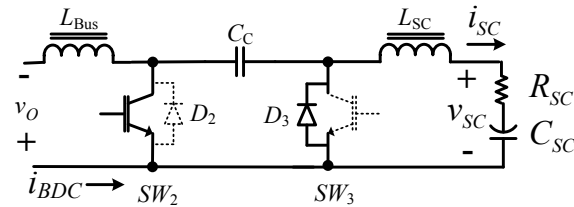


รูปที่ 5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงสองทิศทางแบบซิงโครไนซ์

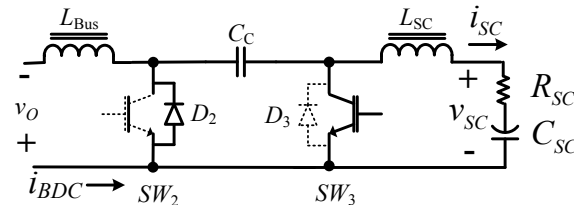
เนื่องจากว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางทำงานในสองโหมดที่ต่างกันดังนั้นจึงเลือกโหมดใดโหมดหนึ่งของการทำงานมาใช้เป็นเงื่อนไขในการ



ออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_{SC} และ L_{Bus} ในที่นี้คำนึงถึงกรณีโหมดจ่ายพลังงานสำรองในซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ไปให้โหลดเป็นหลักเพราะมีการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น



รูปที่ 6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงขณะทำงานในโหมดการชาร์จประจุซูปเปอร์คาปาซิเตอร์



รูปที่ 7 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงขณะทำงานในโหมดการจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลด

เนื่องจากวงจรแปลงผันแบบซุกจะทำงานแบบทบทวนแรงดันและขณะที่ทำงานค่าแรงดันของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นค่าแรงดันอินพุตของวงจรในโหมดจ่ายพลังงานสำรองนี้จึงใช้ค่าแรงดันที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ที่เป็นค่าระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดมาใช้ออกแบบซึ่งมีเท่ากับ 15 V สำหรับสมการที่ใช้ออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสองจะได้จากสมการของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงชนิดซุกแบบพื้นฐานดังสมการที่ (1) - (3)

$$D = \frac{v_O}{v_O + v_{SC}} \quad (1)$$

$$L_{Bus} = \frac{v_{SC} \times D}{f_{SW} \times \Delta I_{BDC}} \quad (2)$$

$$L_{SC} = \frac{v_{SC} \times D}{f_{SW} \times \Delta I_{SC}} \quad (3)$$

เมื่อ

V_O คือ ค่าแรงดันเอาต์พุต (V)

v_{SC} คือ ค่าแรงดันที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (V)

f_{SW} คือ ความถี่ในการสวิตช์ (Hz)

ΔI_{BDC} คือ ค่าrippleกระแสที่โหลด (A)

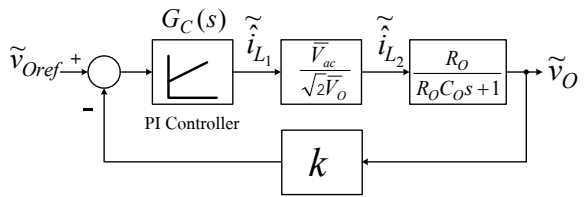
ΔI_{SC} คือ ค่าrippleกระแสที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ (A)

3. การควบคุมและการตรวจจับแรงดันไฟสลับ

ในส่วนของตัวควบคุมระบบทั้งหมดจะทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งควบคุมทั้งในส่วนของการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางถึงแม้ตัวประมวลผลที่ใช้จะมีความสามารถในการทำงานและประมวลผลด้วยความเร็วสูงก็ตาม เพื่อให้ง่ายในการสร้างและทดสอบแนวคิดในเบื้องต้นการควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันทั้งสองวงจรจึงเลือกใช้วงจรแบบแอนะล็อกแทน

3.1. การควบคุมแรงดันเอาต์พุตโมดปกติ

ในส่วนของการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงรูปการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่โหลดอาจเขียนเป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 8 โดยตัวแปรต่างๆคือ



รูปที่ 8 รูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่โหลดในโหมดปกติ

k คือ อัตราการลดทอนแรงดันเอาต์พุต (1/12)

$G_C(s)$ คือ ตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

$\hat{i}_{L1}$ คือ ค่ายอดของคำสั่งกระแสตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุตวงจร

$\hat{i}_{L2}$ คือ ค่ายอดของคำสั่งกระแสตัวเหนี่ยวนำด้านเอาต์พุตวงจร

$\tilde{v}_{Oref}$ คือ ค่าคำสั่งแรงดันเอาต์พุต

$\tilde{v}_O$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุต

$\bar{V}_O$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตวงจรที่สภาวะคงตัว (48 V)

$\bar{V}_{ac}$ คือ แรงดันเรียงกระแสที่อินพุตที่สภาวะคงตัว (220 V)

และเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแรงดันเอาต์พุตจากรูปที่ 8 ได้ดังสมการที่ (4)



$$\frac{\tilde{v}_O(s)}{\tilde{v}_{Oref}(s)} = \frac{G_C \cdot G_P}{1 + k \cdot G_C \cdot G_P} \quad (4)$$

โดย $G_C(s)$ เป็นตัวควบคุมชนิดพีโอดังในสมการที่ (5)

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (5)$$

จากการออกแบบในโดเมนความถี่ได้คุณสมบัติส่วนควบคุมแรงดันเอาต์พุตโมดปกติดังในตารางที่ 1 โดยอัตราการสุมของตัวควบคุมพีโอบนไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าเท่ากับ 200 μ s

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์รูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตโมดปกติ

พารามิเตอร์	
ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีโอ	$K_P = 3.6$ $K_I = 123.7$
อัตราขยายส่วนตรวจจับแรงดันเอาต์พุต	1/12
ค่ามุมเฟสของระบบที่ชดเชยแล้ว	70°
ค่าความถี่ตัดข้ามของระบบที่ชดเชยแล้ว	15 Hz

3.2. การควบคุมการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์

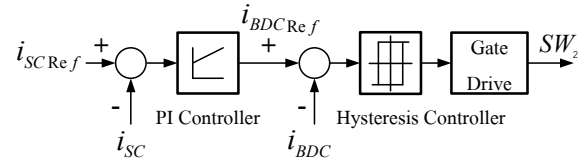
จากหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทางขณะทำงานเพื่อชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะเขียนสมการได้ดังสมการที่ (6)

$$v_O \cdot i_{BDC} = v_{SC} \cdot i_{SC} \quad (6)$$

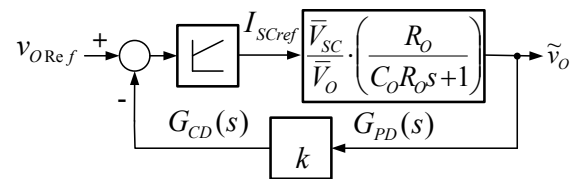
ในการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะควบคุมกระแสชาร์จให้มีค่าคงที่ซึ่งทำให้ค่าแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ v_{SC} ค่อยๆเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นและการชาร์จจะยุติลงเมื่อแรงดันตกคร่อมซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าตามต้องการแต่ต่ำกว่าค่าพิกัดที่ระบุในคู่มือของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ จากวงจรที่นำเสนอจะมีรูปการควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำทางด้านบัสไฟตรง i_{BDC} ดังนั้นจากสมการที่ (6) หากกำหนดกระแสชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็น i_{SCRef} จะได้คำสั่งกระแสตัวเหนี่ยวนำบัสไฟตรง i_{ref} ดังสมการที่ (7)

$$i_{ref} = \frac{v_{SC}}{v_O} \cdot i_{SCRef} \quad (7)$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ (7) ไม่ได้พิจารณาค่ากำลังสูญเสียในวงจร ดังนั้นเพื่อให้เกิดกระแสชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ตามค่าคำสั่ง i_{SCRef} จึงใช้ตัวควบคุมแบบพีโอมาเป็นตัวควบคุมลูบนอกเพื่อให้ค่าผิดพลาดเป็นศูนย์ที่สภาวะคงตัวแทนการคำนวณคำสั่งกระแสด้วยสมการที่ (7) โดยไดอะแกรมการควบคุมกระแสชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์แสดงดังรูปที่ 9 และหากสมมุติว่าควบคุมกระแสได้ผลดีจนคำสั่งกระแส i_{ref} และค่ากระแส i_{BDC} มีค่าเท่ากันตั้งนั้นตอนเริ่มต้นกระแสที่ผ่านซูเปอร์คาปาซิเตอร์ i_{SC} มีค่าเป็นศูนย์และคำสั่งกระแส i_{ref} จะมีค่าเท่ากับค่ากระแส i_{SCRef} คุณด้วยอัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมแบบพีโอ ถ้าหากค่าอัตราขยายเทอมสัดส่วนมีค่าสูงเกินไปจะทำให้คำสั่งกระแส i_{ref} มีค่าสูงในตอนเริ่มต้นของการชาร์จ ดังนั้นจึงกำหนดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีโอในเทอมสัดส่วนสำหรับการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์นี้มีค่าเพียง 0.05 และมีอัตราขยายเทอมอินทิกรัล 0.0122 ด้วยอัตราสุม 200 μ s



รูปที่ 9 รูปการควบคุมกระแสชาร์จประจุซูเปอร์คาปาซิเตอร์



รูปที่ 10 รูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโหมดจ่ายพลังงานสำรองให้กับโหลด

เมื่อ

$\bar{v}_{SC}$ คือค่าแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่จุดทำงานโดยในที่นี้กำหนดเป็น 20 V

$\bar{v}_O$ คือค่าแรงดันเอาต์พุตที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 48 V

R_O คือค่าโหลดที่พิกัด



C_O คือค่าตัวเก็บประจุที่ขนานกับโหลดเพื่อกรองแรงดัน
 G_{PD} คือตัวควบคุมแรงดันในโหมดจ่ายพลังงานสำรอง

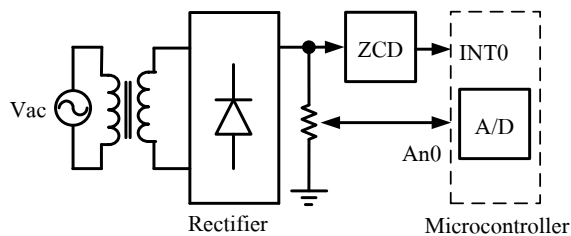
การออกแบบตัวควบคุมแรงดันในโหมดนี้เลือกความถี่ตัดข้ามเท่ากับ 50 Hz และค่ามุมเฟสเท่ากับ 70 องศา

3.3. การควบคุมแรงดันเอาต์พุตโหมดการจ่ายพลังงานสำรอง การควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโหมดจ่ายพลังงานสำรอง เป็นการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง อาศัยหลักการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโหมดจ่ายพลังงานสำรองได้ดังรูปที่ 10 โดยเอาต์พุตตัวควบคุมแรงดันในโหมดนี้จะเป็นค่าคำสั่งกระแส i_{SCref} และฟังก์ชันถ่ายโอนระบบควบคุมปิดแสดงดังสมการที่ (8)

$$\frac{\tilde{v}_O(s)}{\tilde{v}_{Oref}(s)} = \frac{G_{CD} \cdot G_{PD}}{1 + k \cdot G_{CD} \cdot G_{PD}} \quad (8)$$

3.4. การตรวจจับแรงดันไฟสลับ

รูปที่ 11 เป็นส่วนตรวจจับแรงดันชั่วขณะและจุดผ่านศูนย์ของแหล่งจ่ายไฟสลับ ZCD โดยส่วนของ ZCD จะให้สัญญาณเพื่ออินเทอร์รัพท์ไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกๆ 10 ms ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการอ่านค่าแรงดันไฟสลับมาตรวจสอบว่ามีความผิดปกติหรือไม่เพื่อใช้ตัดสินใจในการเปลี่ยนโหมดการทำงานของระบบ โดยงานวิจัยนี้อาศัยสิ่งที่มีอยู่แล้วในส่วนควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงนั้นคือการตรวจจับจุดผ่านศูนย์ของแรงดันไฟสลับด้านอินพุตวงจรและให้มีการอ่านค่าชั่วขณะของแรงดันอินพุต ถ้าแรงดันมีค่าต่ำกว่า 20% ของค่าปกติ (220 Vrms) จะถือว่าเกิดการหายไปของแรงดันไฟสลับ



รูปที่ 11 ส่วนตรวจจับแรงดันไฟสลับ

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบแนวคิดที่เสนอทำโดยสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทั้งสองวงจรและมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 และเขียนโปรแกรมควบคุมระบบ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

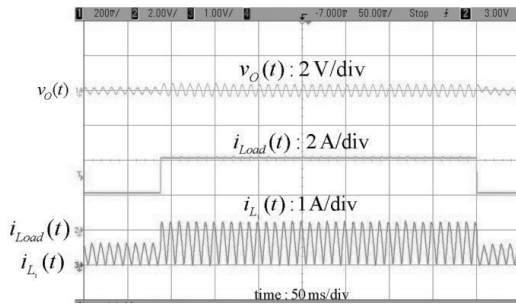
แรงดันไฟสลับด้านอินพุต	220 Vrms, 50 Hz
แรงดันเอาต์พุต	48 V
ค่าพิกัดกำลังของวงจร	250 W
ค่าตัวเก็บประจุที่เอาต์พุต (C_O)	23,600 μF
ค่าตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันชนิดซุก C_1, C_2	0.68 μF
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุต L_1	5 mH
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านเอาต์พุต L_2	1 mH

ตารางที่ 3 คุณสมบัติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสองทิศทาง

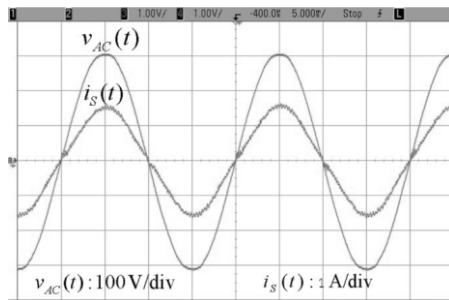
ความจุซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (100 F อนุกรมกัน 10 ตัว)	10 F
พิกัดแรงดันของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	25 V
ค่าพิกัดกำลังของวงจร	200 W
ค่าตัวเก็บประจุในวงจรแปลงผันชนิดซุก C_C	2.2 μF
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านที่ต่อกับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ L_{SC}	0.626 mH
ค่าตัวเหนี่ยวนำด้านที่ต่อกับ บัสไฟตรง L_{Bus}	1.56 mH

4.1 การทดสอบระบบโมดปกติ

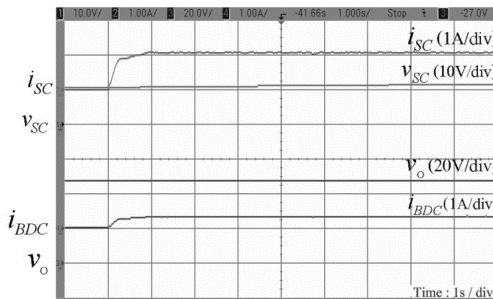
การทดสอบในโหมดนี้จะดูการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยจากรูปที่ 12 เป็นผลทดสอบเมื่อเปลี่ยนโหลด 100W เป็น 200W เพื่อดูผลตอบสนองการควบคุมแรงดันเอาต์พุต โดยการวัดแรงดันเอาต์พุตนั้นจะปรับออสซิลโลสโคปในโหมดเอซิปป์ลิงเพื่อดูเฉพาะค่ารีเบิ้ลแรงดันเท่านั้น จากผลการทดสอบพบว่าภาระเพิ่มของแรงดันมีค่าเล็กน้อยแม้มีการเปลี่ยนโหลดแบบทันทีก็ตาม ซึ่งเป็นผลจากการควบคุมแบบป้อนไปหน้าในรูปควบคุมแรงดันเอาต์พุต รูปที่ 13 เป็นแรงดันไฟสลับและกระแสด้านอินพุตของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่สถานะคงตัวเพื่อให้เห็นว่ามีความถี่ที่ใกล้เคียงหนึ่งโดยสังเกตจากรูปคลื่นกระแสที่มีเฟสตามรูปคลื่นแรงดันไฟสลับและอ่านค่าจากเครื่องมือวัดได้ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 ที่พิกัดโหลด



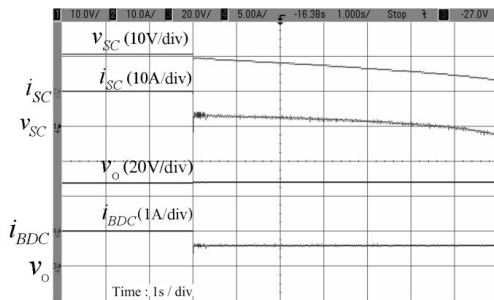
รูปที่ 12 ผลตอบสนองการควบคุมแรงดันเอาต์พุตในโหมดปกติ เมื่อมีการเปลี่ยนโหลดแบบทันที



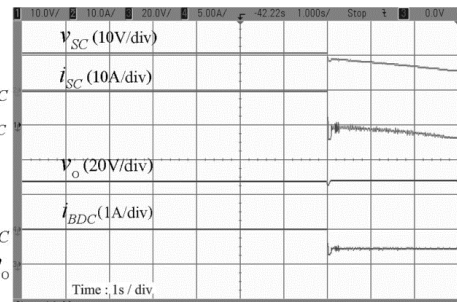
รูปที่ 13 แรงดันและกระแสด้านอินพุตวงจรแปลงผันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นกระแสตรง



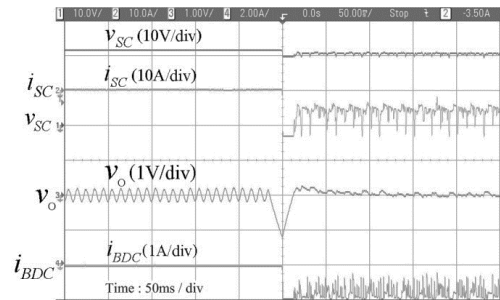
รูปที่ 14 แรงดันและกระแสที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์และแรงดันเอาต์พุตที่โหลดขณะเริ่มมีการชาร์จประจุ



รูปที่ 15 แรงดันและกระแสที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์และแรงดันที่โหลดขณะจ่ายพลังงานสำรองให้โหลด 100W



รูปที่ 16 แรงดันและกระแสที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์และแรงดันที่โหลดขณะจ่ายพลังงานสำรองให้โหลด 135W



รูปที่ 17 ภาพขยายเมื่อระบบเปลี่ยนไปทำงานโหมดจ่ายพลังงานสำรองขณะมีโหลด 100W โดยการวัดแรงดันเอาต์พุตในแบบเอซึคป์ลิ่งเพื่อสังเกตการกระเพื่อม

ส่วนการชาร์จซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะชาร์จทันทีถ้าระบบทำงานในโหมดปกติและแรงดันที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่าพิกัดแรงดัน จากรูปที่ 14 ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์จะถูกชาร์จด้วยกระแสคงที่ประมาณ 1 A โดยการเข้าสู่สภาวะคงตัวของกระแสหลังเริ่มชาร์จประจุอยู่ที่ประมาณ 1 วินาทีโดยเหตุผลที่ให้ทำงานช้าเพราะแรงดันซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและค่ากระแสชาร์จก็มีค่าต่ำสำหรับการบันทึกผลการชาร์จบนจอภาพของออสซิลโลสโคปนั้นไม่สามารถทำได้ใช้เวลานานกว่า 80ms

4.2 การทดสอบระบบโหมดจ่ายพลังงานสำรอง

โมดนี้จะทดสอบโดยจำลองสถานการณ์ให้แรงดันไฟสลับหายไปแล้วระบบจะเริ่มทำงานในโหมดจ่ายพลังงานสำรองแล้ววัดแรงดัน, กระแสที่ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์, แรงดันที่โหลดและกระแสที่จ่ายออกจากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่โหลดขนาด 100W และ 135W ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าที่โหลด 100W ระยะเวลาจ่ายพลังงานที่สำรองประมาณ 7 วินาทีโดยที่แรงดันโหลดมีค่าคงที่ 48V กรณีโหลด 135W เวลาสำรองพลังงานมีค่าเพียง 3 วินาที และในรูปที่ 17 เป็นภาพขยายเพื่อดูแรงดันเอาต์พุตขณะเปลี่ยนโหมดการทำงานที่โหลด 100W ซึ่ง



พบว่าแรงดันลดลงประมาณ 1.2V และใช้เวลาประมาณ 30 ms ในการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดัน 48V

5. สรุป

ผลการทดสอบระบบที่สร้างขึ้นกรณีโหมดปกติวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีทั้งในสภาวะที่มีการเปลี่ยนโหลดแบบทันทีและที่สภาวะคงตัว โดยมีค่าตัวประกอบกำลังที่โหลดเต็มพิกัดเท่ากับ 0.99 ส่วนโมดจ่ายพลังงานสำรองจะมีระยะเวลาในการจ่ายพลังงานสำรองที่น้อยไปซึ่งอาจเกิดจากแรงดันที่ชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ลดลงจนอาจมีค่าต่ำกว่าที่วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจะสามารถทบทระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้ แต่ก็อาจแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มค่าความจุหรือแรงดันพิกัดของชูปเปอร์คาปาซิเตอร์ให้สูงขึ้น สำหรับแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนโหมดการทำงานจากแหล่งจ่ายไฟสลับมาใช้ชูปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งพลังงานพบว่าเกิดแรงดันฟุ้งต่ำเพียง 1.2V และกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวด้วยเวลา 30ms ซึ่งเร็วพอกับการใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง สำหรับการเปรียบเทียบความคุ้มค่ากับการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดใหม่ ๆ การใช้งานชูปเปอร์คาปาซิเตอร์มีข้อได้เปรียบเรื่องของอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและวิธีการชาร์จที่ง่ายกว่า

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang L.S., Liang T.J. and Chen, J.F. (2007). Analysis and Design of a Single-Phase Buck-Boost Power Factor-Correction Circuit for Universal Input Voltage, *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society 2007*, Taipei, Taiwan.
- [2] Talapko, D. (2012). Telecom Datacenter Power Infrastructure Availability Comparison of DC and AC UPS, *The 34th IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC) 2012*, Scottsdale, AS, USA.
- [3] Gualous, H., Louahlia, H. and Gallay, R. (2011). Supercapacitor Characterization and Thermal Modelling with Reversible and Irreversible Heat Effect, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.26, no.11, November 2011, pp. 3402-3409.
- [4] Spiazzi, G. and Mattavelli, P. (1994). Design Criteria for Power Factor Preregulators Based

on Sepic and Cuk Converters in Continuous Conduction Mode. *The IEEE Industry Applications Society Annual Meeting 1994*.

- [5] Aboulnaga, A.A. and Emadi, A. (2004). Performance Evaluation of the Isolated Bidirectional Cuk Converter with Integrated Magnetics, *The IEEE Annual Conference in Power Electronics Specialists Conference 2004*, Aachen, Germany.

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระภายใต้การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง

The Potential of Methane Production of the Dwarf Napier under Alkaline Pretreatment

นิลวรรณ ไชยหนู^{1*} ร่มไทร มุกเมืองทอง² วรุตม์ ชมเจริญ² และอนุพันธ์ วรณภีระ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

128 ถนนห้วยแก้ว ต.ช้างเผือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

*ผู้รับผิดชอบบทความ : ninlawan_ch@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ ทั้งหญ้าสดและหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง เพื่อให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกในอนาคต โดยการปรับสภาพเบื้องต้นใช้สารละลายด่าง 2 ชนิด คือ สารละลายโซดาไฟและน้ำปูนขาวความเข้มข้น 1 %w/v ด้วยเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ทุกการทดลองกระทำที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ พบว่า หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 0.181 และ 0.273 m³/kgVS_{add} ตามลำดับ เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเข้มข้น 1%w/v นาน 1 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นถึง 30% สำหรับการปรับสภาพด้วยน้ำปูนขาวให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองหญ้าสด

คำสำคัญ ก๊าซมีเทน การผลิตก๊าซชีวภาพ ศักยภาพการย่อยสลาย หญ้าเนเปียร์แคระ

Abstract

This research focused on the potential of methane production of the dwarf napier; both fresh grass and pretreated grass with an alkaline solution in order to demonstrate the potential of using as an alternative energy plants in the future. Sodium hydroxide and calcium hydroxide of 1%w/v were used as an alkaline pretreatment to soak grass at 1 and 2 hr. All experiments were done at room temperature and atmospheric pressure. The result found that fresh grass had the potential to produce methane at 0.181 and 0.273 m³/kgVS_{add} of a 1%w/v sodium hydroxide pretreatment at 1 hr and 2 hr, respectively. A performance increased up to 30% of a 1% w/v sodium hydroxide pretreatment. As for the calcium hydroxide pretreatment, the yield gas was similar with fresh grass experiment.

Keywords: Methane Gas, Biogas Production, Biochemical Methane Potential, Dwarf Napier

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกเกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน การนำชีวมวลภายในท้องถิ่นมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ถือเป็นการตั้งศักยภาพที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรม มีชีวมวลอยู่มากมายหลายชนิดที่สามารถนำมาทำเป็นพลังงานทดแทนได้ โดยพลังงานทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานเพื่อป้อนเข้าสู่โครงข่ายผลิตพลังงาน (smart grid energy) ในประเทศไทยคือ พลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพ [1-2]

นอกจากการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์แล้ว พืชตระกูลหญ้าถือว่าเป็นศักยภาพในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหญ้าและพื้นที่ทุ่งหญ้าสาธารณะสำหรับพืชอาหารสัตว์ประมาณ 3.4 ล้านไร่ กระจายตามภูมิภาคของประเทศ [3]

และมีปริมาณผลผลิตหญ้าอาหารสัตว์ที่เหลือเพิ่มมากขึ้นทุกปีราว 7,353 ตัน [4] จากการสำรวจ พบพืชวงศ์หญ้าจำนวน 133 สกุล 501 ชนิด แต่ที่มีความสำคัญในด้านอาหารสัตว์อยู่ประมาณ 30 ชนิด หญ้าพื้นเมืองแม้ว่าจะปรับตัวได้ดี แต่มีข้อจำกัดในด้านศักยภาพคือทำให้ผลผลิตที่ค่อนข้างต่ำ และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นอาหารสัตว์ค่อนข้างสั้น เพราะมีการออกดอกและสะสมเยื่อใยเร็ว ทำให้คุณค่าทางอาหารลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับหญ้าที่นำมาจากต่างประเทศเพื่อปลูกเป็นอาหารสัตว์โดยตรง [3] ซึ่งปัจจุบันมีประมาณ 7 ชนิด ที่กรมปศุสัตว์แนะนำให้เกษตรกรปลูกคือ แพงโกเลา กินนีสีม่วง เนเปียร์ รูซี อะตราดัม พลัคทูลัม และไรต์ โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์ที่ให้ผลผลิตต่อไร่สูงที่สุด การนำหญ้าที่มีปริมาณสารอาหารสูงเหล่านี้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น มีข้อดีหลายประการคือหญ้าเป็นพืชที่



เจริญเติบโตง่าย ไม่ต้องการดูแลมากทำให้ต้นทุนในการเพาะปลูกนั้นต่ำ อีกทั้งยังให้ผลผลิตสูง สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลายครั้งต่อปี นอกจากนี้ ผลผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าบางชนิดเช่น หญ้าหมักจากทุ่งหญ้าสาธารณะยังให้ค่าพลังงานสุทธิเทียบเท่าปาล์มน้ำมัน [5] เมื่อประเมินศักยภาพก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ ฟางข้าว ต้นและเหง้ามันสำปะหลัง และหญ้าเนเปียร์เพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับชุมชนขนาด 1 MW มีต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ จากฟางข้าว ต้นและเหง้ามันสำปะหลัง และหญ้าเนเปียร์ เท่ากับ 4.43 3.87 และ 1.38 บาทต่อกิโลวัตต์ ใช้พื้นที่เพาะปลูกสำหรับการผลิตไฟฟ้า 21,417 71,993 และ 940 ไร่ ตามลำดับ [2]

แม้ว่าการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าหญ้าเนเปียร์มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ซึ่งมักพบในสายพันธุ์ลูกผสมที่ให้ผลผลิตต่อไร่สูงที่สุดเช่น เนเปียร์ปากช่อง 1 แต่ในประเทศไทยยังพบการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากเนเปียร์สายพันธุ์เดิมๆ น้อยมาก ซึ่งนิยมปลูกกัน 3 สายพันธุ์ คือ หญ้าเนเปียร์ธรรมดา หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าเนเปียร์แคระ โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์แคระ (*P. purpureum* cv. Mott) จัดเป็นพืชพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์หนึ่งที่กรมปศุสัตว์ส่งเสริมเป็นที่นิยมปลูกกันอย่างกว้างขวาง ให้ผลผลิตสูงราวๆ 3.0-4.0 ตันน้ำหนักแห้งต่อไร่ต่อปี ปลูกง่าย ขึ้นได้ในดินหลายชนิด เจริญเติบโตเร็ว และมีคุณค่ามีคุณค่าทางอาหารสัตว์อยู่ในเกณฑ์สูง อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่รีดนมได้ด้วยสารประกอบคาร์บอน สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และเพื่อช่วยให้การผลิตก๊าซชีวภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้นนั้น ควรทำการปรับปรุงสภาพวัตถุดิบเบื้องต้นก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเสริมให้หญ้าซึ่งเป็นวัสดุหลักในเซลล์ูโลสเหมาะสมเป็นสารตั้งต้นง่ายต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนกลายเป็นก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น [6] โดยวิธีการสภาพเบื้องต้นมีหลายวิธีได้แก่ การปรับปรุงสภาพด้วยสารเคมี (กรด-ด่าง) การปรับปรุงสภาพทางชีวภาพ การปรับปรุงสภาพทางความร้อน หรือการปรับปรุงสภาพร่วม เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้น คณะวิจัยจึงมีความสนใจศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการนำหญ้าเนเปียร์แคระมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของหญ้าและใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกในอนาคต โดยในงานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นศึกษาผลที่เกิดขึ้นของการปรับปรุงสภาพวัตถุดิบเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือน้ำปูนขาว (Ca(OH)_2) และ สารละลายโซดาไฟ (NaOH) ที่เวลาต่างๆ เทียบกับหญ้าสด

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ที่สภาวะบรรยากาศอุณหภูมิ 27 °C ความดัน 1 atm เพื่อศึกษาหาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทน (biochemical methane potential; BMP) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่างๆ

2.1 วัตถุดิบและการเตรียม

หญ้าเนเปียร์แคระที่ใช้มีอายุราว 2 เดือน ภายหลังการเก็บเกี่ยวจากทุ่งหญ้าจะถูกนำมาบดลดขนาดประมาณ 2 mm และเตรียมหญ้าบดไว้ 15 g สำหรับใช้แต่ละการทดลอง ในการทดลองหญ้าสดจะถูกเก็บไว้ในตู้แช่ 4 °C ทันที ส่วนการทดลองที่ใช้หญ้าที่ผ่านการปรับสภาพ ภายหลังการบดจะนำมาแช่น้ำปูนขาวและสารละลายโซดาไฟ ที่ความเข้มข้น 1%w/v เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการล้างด้วยน้ำสะอาด ก่อนเก็บไว้ในตู้แช่ และน้ำเชื้อจุลินทรีย์ใช้น้ำเสียมูลสุกรจากฟาร์มสุกรขุน โดยหญ้าและน้ำเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์แคระและน้ำเชื้อจุลินทรีย์ที่เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์

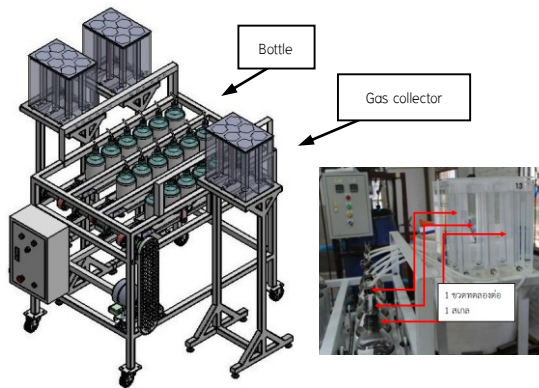
Parameters	Milled fresh grass (mg/kg)	Inoculum (mg/l)
Total solids (TS)	230,708	61,132
Volatile solids (VS)	215,044	40,905
C:N ratio	59.1:1	6.05:1

2.2 BMP test

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 1 ใช้ขวดทดลองขนาด 1000 ml สามารถทำได้พร้อมกัน 18 ขวด แท่นวางขวดเขย่าซ้าย-ขวาที่ความเร็ว 100 rpm การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดใช้หลักการแทนที่น้ำ ก่อนเริ่มทดลองทำการไล่ก๊าซออกซิเจน (O_2) ด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) บริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 10 L/min นาน 30 s ในทุกๆการทดลองจะเติมน้ำเชื้อจุลินทรีย์ในปริมาณ 240 ml หญ้าที่เตรียมไว้ 15 g คิดเป็นสัดส่วนหญ้าต่อน้ำเชื้อ 1:3 (ในสัดส่วน VS) และเติมน้ำกลั่นเพิ่มจนได้ระดับที่ 800 ml ทำการทดลองละ 3 ข้างและหยุดการทดลองเมื่อปริมาณก๊าซสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่

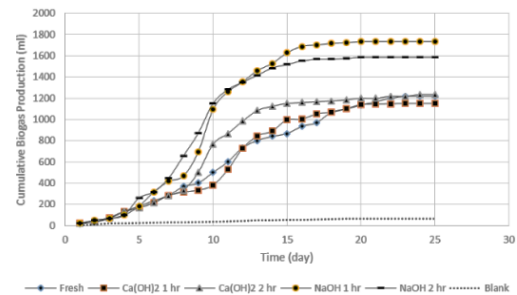
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการทดลองหาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่างๆ สภาวะละ 3 ชั่วโมง ค่าที่บันทึกได้มาเฉลี่ยแสดงข้อมูลดังรูปที่ 2-3 และตารางที่ 2

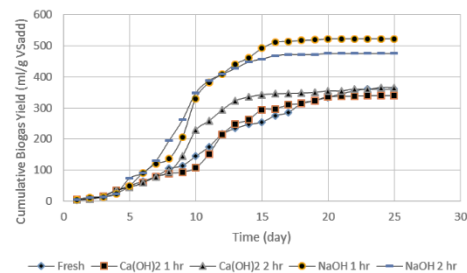


รูปที่ 1 ชุดทดสอบก๊าซชีวภาพ

พบว่า หญ้าที่ถูกปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเป็นเวลา 1 hr สามารถผลิตก๊าซได้มากที่สุดคิดเป็น $0.522 \text{ m}^3 \text{Biogas/kgVS}_{\text{add}}$ และ $0.273 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kgVS}_{\text{add}}$ รองลงมาคือ หญ้าที่ถูกปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟ เป็นเวลา 2 hr คิดเป็น $0.475 \text{ m}^3 \text{Biogas/kgVS}_{\text{add}}$ และ $0.245 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kgVS}_{\text{add}}$ ซึ่งการทดลองทั้ง 2 สภาวะนี้ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนหญ้าที่ถูกปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการแช่น้ำปูนขาวเป็นเวลาทั้ง 1 และ 2 hr มีค่าการผลิตก๊าซที่ใกล้เคียงกันกับการทดลองการผลิตก๊าซจากหญ้าสดคือ $0.355 \text{ m}^3 \text{Biogas/kgVS}_{\text{add}}$ และ $0.180 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kgVS}_{\text{add}}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่างๆ จะสามารถทำให้โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสอ่อนแอลง ซึ่งทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen ให้เกิดเป็นก๊าซชีวภาพได้ง่ายและมากขึ้น [6,8] ส่วนสาเหตุที่น้ำปูนขาวเพิ่มความสามารถในการผลิตก๊าซได้น้อยกว่าเพราะอาจเกิดการก่อตัวระหว่าง Ca^{2+} กับลิกนินของพืชที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น ลิกนินจึงสลายพันธะได้ลดลงทำให้จุลินทรีย์กลุ่ม methanogen ทำงานยากขึ้น ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจึงลดลงตาม [9] สำหรับสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงการทดลองเฉลี่ยอยู่ที่ $51.18\% \text{CH}_4$



รูปที่ 2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ในแต่ละสภาวะ



รูปที่ 3 ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่างๆ

และจากกราฟแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 25 วัน (รูปที่ 2) พบว่า หญ้าสดมีอัตราการผลิตก๊าซช้าที่สุดซึ่งดูได้จากเส้นกราฟที่ยังเพิ่มระดับขึ้นไปซึ่งหมายถึงยังเกิดก๊าซอยู่ แล้วจึงเริ่มคงที่ในวันที่ 22 ของการทดลอง ส่วนหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำปูนขาวปริมาณก๊าซสะสมเริ่มคงที่ในวันที่ 20 ทั้ง 2 สภาวะ และสำหรับหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซดาไฟจะใช้เวลาในการย่อยสลายน้อยที่สุดซึ่งเห็นได้จากปริมาณก๊าซที่เริ่มคงที่ในวันที่ 16 ของการทดลอง โดยค่าเหล่านี้บ่งบอกถึงระยะเวลาในการหมักย่อยสลายอินทรีย์หรือระยะเวลาที่กักเก็บ (hydraulic retention time ; HRT) ซึ่งส่งผลต่อการนำไปใช้ออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กงานจริงเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมและคุ้มค่าต่อการลงทุน จากงานวิจัยที่ผ่านมาค่า methane yield ของหญ้าแต่ละสายพันธุ์ที่การผลิตก๊าซชีวภาพแบบเชิงเตียดังข้อมูลในตารางที่ 3 พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง $0.110 - 0.242 \text{ m}^3/\text{kgVS}_{\text{add}}$ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนี้ถือว่าได้ค่าผลผลิตที่มากกว่าหญ้าสายพันธุ์อื่นๆ สำหรับหญ้าเนเปียร์แคระที่ถูกปรับสภาพก่อนด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟทั้ง 2 สภาวะ



ตารางที่ 2 ปริมาณของ %CH₄, Biogas yield และ Methane yield

Case	Average %CH ₄	Biogas yield (m ³ /kgVS _{add})	Methane yield (m ³ /kgVS _{add})
Fresh	50.3	0.360	0.181
Ca(OH) ₂ 1 %(w/v), 1 h	51.8	0.340	0.176
Ca(OH) ₂ 1 %(w/v), 2 h	49.8	0.366	0.182
NaOH 1 %(w/v), 1 h	52.4	0.522	0.273
NaOH 1 %(w/v), 2 h	51.6	0.475	0.245

ตารางที่ 3 ตัวอย่าง methane yield ของหญ้าแต่ละสายพันธุ์ที่การผลิตก๊าซชีวภาพแบบเชิงเดี่ยว

Ref	Grass type	Methane yield (m ³ /kgVS _{add})
[8]	เนเปียร์	0.158
[10]	เนเปียร์ปากช่อง 1	0.242
[11]	เนเปียร์ยักษ์	0.110
	กินนีสีม่วง	0.170

4. สรุป

หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 0.181 m³/kgVS_{add} เมื่อไม่ผ่านการปรับสภาพ และได้ 0.273 m³/kgVS_{add} เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยการแ่สสารละลายโซดาไฟเข้มข้น 1%w/v นาน 1 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นถึง 30% และมีค่าใกล้เคียงกับหญ้าสายพันธุ์อื่นๆ เช่น เนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ถูกส่งเสริมให้ใช้เป็นพืชพลังงาน ดังนั้นจึงถือได้ว่า หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระนี้มีศักยภาพที่จะสามารถใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกหนึ่งได้

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอขอบคุณกรมปศุสัตว์ จังหวัดเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์ให้หญ้าเนเปียร์แคระ และสุสานดีฟาร์ม อำเภอแม่อน จังหวัดเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์ให้น้ำเสียมูลสุกร สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุน Hands-on Researcher (Large) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2557

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปรีพัฒน์ จิรัชัยชนะ และ สุภาวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ (2555). ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วย Biogas จากขยะ กรณีศึกษาตลาดไท, *วารสารวิจัยพลังงาน*, ฉบับที่ 2555/1, หน้า 73 – 83.
- [2] น้ำเพชร พันธุ์พิพัฒน์ และ สุภาวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ (2555). ศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยไบโอแก๊สที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13*, จังหวัดเชียงใหม่
- [3] Nanakorn W. and Norsangsri, M. (2001). Species enumeration of Thai Gramineae, *Queen Sirikit Botanic Garden*, Chiang Mai, Thailand.
- [4] กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ กรมปศุสัตว์ (2552). *สรุปผลการผลิตและการใช้หญ้าแห้ง ปีงบประมาณ พ.ศ. 2548-2552*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.dld.go.th/nutrition/data_stat/data_stat.htm เข้าดูเมื่อวันที่ 21/01/2556.
- [5] Beatrice, M. S., Jerry, D.M. and Catherine, M.O. (2009). What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2349-2360.
- [6] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. and Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production; review, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 42, pp. 35-53.
- [7] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2554). *BMP*. เอกสารการวิเคราะห์หาค่า BMP.
- [8] Rekha, B. N. and Aniruddha, B. P. (2013). Performance enhancement of batch anaerobic digestion of napier grass by alkali pre-treatment, *International Journal of ChemTech Research*, vol. 5, pp. 558-564.



- [9] Emiliano, B., Anders, P. J. and Irini, A. (2010). Comparative study of mechanical, hydro-thermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production, *Bioresource Technology*, vol. 22, pp. 8713-8717.
- [10] Janejadkarn, A. and Chavalrit, O. (2014). Biogas production from Napier grass (Pakchong1) (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum americanum*), *Advanced Materials Research*, Vol. 856, pp. 327-332.
- [11] ณัฐกาญจน์ ชราพก (2555). การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทาง

การเกษตร

Effect of Inlet Air Flow on Thermal Efficiency of Bio-Char Stove from Agricultural Waste

กันยาพร ไชยวงศ์^{1*} ณัฐพล วิชาญ¹ อาริยะ แสนทวีสุข¹ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล² และธัญศิรินทร์ จันทร์หอม³

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นาน

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดาก

³ สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาวิชาการการเกษตร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*ผู้รับผิดชอบบทความ: drccrmutl@gmail.com โทรศัพท์ 054-711601

บทคัดย่อ

เตาถ่านชีวภาพในระดับครัวเรือนเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีถ่านชีวภาพที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้เกิดการถ่ายทอดและนำผลงานไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริงในชุมชน การศึกษาถึงประสิทธิภาพของเตาที่ออกแบบโดยทดสอบเปรียบเทียบผลการใช้งานเตา ที่มีการบังคับการป้อนอากาศเข้าสู่เตาเทียบกับการปล่อยให้มีการไหลของอากาศเข้าสู่เตาโดยธรรมชาติ กับวัตถุประสงค์ทดสอบที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด กะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน เป็นเป้าหมายหลักของการศึกษาในงานนี้ การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนด้วยวิธีการต้มเดือดเป็นวิธีการที่ถุกนำมาใช้ทดสอบเตาถ่านชีวภาพ ซึ่งทำการออกแบบในรูปแบบ Rocket Stove หรือเป็นเตารูปทรงกระบอก 2 ชั้นที่มีแกนกลางของตัวเตาใช้สำหรับการเผาไหม้ และมีการส่งผ่านความร้อนให้กับบริเวณของการควบคุมสภาวะอากาศเพื่อให้เกิดการย่อยสลายเชิงความร้อนของชีวมวลที่บรรจุอยู่บริเวณเปลือกเตา ผลการศึกษพบว่าการใช้งานเตาในรูปแบบการบังคับการป้อนอากาศเข้าสู่เตาจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาที่ปล่อยให้มีการไหลเวียนอากาศเข้าสู่เตาแบบธรรมชาติ ซึ่งจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยร้อยละ 16.58 และ 14.51 ตามลำดับ ทั้งนี้การใช้งานเตาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพด้วยกะลากาแฟจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า ชังข้าวโพด และเมล็ดมะไฟจีน คือ ร้อยละ 20.93 18.39 และ 10.42 ตามลำดับ และหากพิจารณาผลด้านสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาถ่านที่ออกแบบจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านชีวภาพจากการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ และถ่านชีวภาพที่ได้จากการใช้งานเตาแบบบังคับการป้อนของอากาศจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าการปล่อยให้มีการไหลเวียนของอากาศแบบธรรมชาติ ซึ่งจะให้ค่าความร้อนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพ เท่ากับ 4,206.43 และ 3,347.02 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้ถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จาก กะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน โดยให้ค่า 6,939.07 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ทั้งนี้หากทำการเปรียบเทียบผลการใช้งานเตาที่ทำการออกแบบกับเตาถ่านชีวภาพที่เคยมีการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า เตาถ่านชีวภาพที่ออกแบบให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนค่อนข้างสูง โดยจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 16.51 และ 14.51 เมื่อมีการป้อนและไม่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา ทั้งนี้เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดจากการใช้วัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดในการผลิต

คำสำคัญ เตาถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ทดสอบแบบต้มเดือด

Abstract

The biochar stove for a household is one of biochar technology that is research and development for transfer technology to using in the community based. Thermal efficiency study of the bio-char stove by comparison testing between using the stove under fan force condition and natural force together with biochar production from agricultural waste as corncob, parchment coffee and wampee seed are targeted in this work. Thermal efficiency via Water Boiling Testing (WBT) is using for testing bio-stove that is designed in the type of Rocket Stove or double layer of the cylinder. In the center of the stove used for combustion and heat source of the control zone to degradation a biomass that contain inside the shell of the stove. The results show that average thermal efficiency of the stove under fan force condition is higher than that natural force of 16.58% and 14.51% respectively. The biochar production of parchment coffee via biochar stove shown to higher thermal efficiency than corncob and wampee seed as 20.93%, 18.39% and 10.42% respectively. The property of biochar that produce by the stove in term of heating value are lower the bio-char from laboratory and in the condition of fan force could produce the higher



heating value of biochar than that of the natural force of 4,206.43 kJ/kg and 3,347.02 kJ/kg respectively. The heating value of biochar from corncob is higher than parchment coffee and wampee seed of 6,939.07 kJ/kg. The comparison of thermal efficiency between biochar stove on this work with the result from another research found that this biochar stove give the relatively high thermal efficiency, thermal efficiency of the stove as 16.51% and 14.51% in the condition of fan force and natural force on the average of 3 types of agricultural waste on the production.

Keywords: Bio-char stove, Bio-char, Thermal efficiency, Agricultural waste, Water Boiling Testing

1. บทนำ

การพัฒนาเทคโนโลยีถ่านชีวภาพมีการศึกษาในวงกว้าง โดยมีการส่งเสริมการผลิตในหลายรูปแบบ ได้แก่ การผลิตในครัวเรือน การผลิตเพื่อชุมชนในระดับกลาง รวมถึงการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เตาเผาถ่านชีวภาพจะถูกออกแบบให้สามารถผลิตถ่านชีวภาพในสภาวะการเกิดไพโรไลซิส(pyrolysis) ซึ่งถือเป็นกระบวนการทางด้านเคมีความร้อนที่นิยมใช้ในการเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุโดยความร้อน ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก ประมาณ 400 - 600°C ภายใต้สภาวะการทำงานที่ปราศจากอากาศ หรือออกซิเจน ด้วยกระบวนการดังกล่าวจะทำให้สามารถผลิตเชื้อเพลิงพลังงานใน 3 กลุ่ม ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ หรือไบโอออย แก๊ส ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบแก๊สเชื้อเพลิงรวมทั้งถ่านชีวภาพที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานในรูปแบบเชื้อเพลิงแข็ง ได้เช่นกัน โดยทั่วไปไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast Pyrolysis) มีลักษณะความแตกต่างตามอัตราการให้ความร้อน และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ [1] ในการผลิตถ่านชีวภาพส่วนใหญ่มักนิยมใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า หรือการควบคุมอัตราการให้ความร้อนอย่างช้าๆ (น้อยกว่า 50°C/min) และจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ในรูปแบบเชื้อเพลิงแข็ง หรือถ่านชีวภาพ (ประมาณ 30-35%) [2] เตาถ่านชีวภาพที่ใช้ในการส่งเสริมการผลิตถ่านชีวภาพส่วนใหญ่ เป็นรูปแบบเตาถ่านอย่างง่าย ที่มีลักษณะของการให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้โดยตรง ทั้งในรูปแบบเตาที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากทางด้านบนลงด้านล่าง (downdrafts) และเตาที่มีการจุดติดเชื้อเพลิงจากทางด้านล่างขึ้นด้านบน(updrafts) ปัจจุบันการส่งเสริมการใช้เตาถ่านชีวภาพระดับครัวเรือนพบได้มากในเขตประเทศกำลังพัฒนาที่ยังมีการใช้ฟืน หรือสิ่งของเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงหลัก เช่น ในการศึกษาของ Torres-Rojas et al.[3] ได้ทำการศึกษถึงการปรับปรุงเตาถ่านชีวภาพ เพื่อใช้งานทดแทนเตาหุงต้มในครัวเรือน สำหรับใช้จริงในกลุ่มตัวอย่างจำนวน 50 ครัวเรือน ในประเทศเคนยา ผลการศึกษพบว่าเตามีประสิทธิภาพสูง ลดปริมาณการใช้ฟืน และเศษไม้ ได้ถึง 27% เมื่อเทียบกับเตาหุงต้มปกติ สามารถใช้ร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่นๆ และสามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ประมาณ 0.46 Mg ha⁻¹ต่อปี และถ่านชีวภาพดังกล่าว

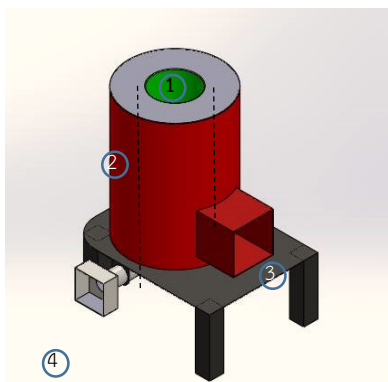
สามารถนำมาใช้ช่วยในการปรับปรุงดินทางการเกษตรทำให้มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกมากขึ้น การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ และความสามารถในการใช้งานเตาถ่านชีวภาพแต่ละประเภทโดยพิจารณาตามค่าการทดสอบต่างๆ เช่น Water Boiling Test (WBT), Controlled Cooking Test (CCT), Kitchen Performance Test (KPT) รวมไปถึงค่า Combustion Efficiency ผลการทดสอบสามารถนำมาปรับปรุงลักษณะของเตาถ่านชีวภาพ ดังในการศึกษาของ Kumar et al. [4] ได้สรุปรวบรวมงานวิจัยที่ทำการออกแบบ พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเตาเผาชีวมวลในระดับครัวเรือน และได้แบ่งประเภทของเตาชีวมวลตามลักษณะพื้นฐานของตัวเตา เช่น วัสดุในการจัดสร้าง รูปแบบของการป้อนอากาศเข้าภายในเตา รวมถึงการแยกชนิดของเตาตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง

เพื่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเตาถ่านชีวภาพอย่างต่อเนื่อง และมีความเหมาะสมต่อการปรับใช้กับพื้นที่การวิจัยในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบและจัดสร้าง เตาถ่านชีวภาพในระดับครัวเรือน ที่สามารถใช้งานในการหุงต้มควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพ โดยทำการศึกษเปรียบเทียบผลด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพขณะที่มีการใช้งานในสภาพการป้อน และไม่ป้อนอากาศผ่านช่องเผาไหม้นอกจากนั้นจะทำการศึกษาถึงผลการเปลี่ยนวัตถุดิบ รวมถึงผลที่เกิดกับคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ร่วมด้วย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินงานวิจัย

เตาถ่านชีวภาพที่เลือกใช้ในการศึกษา และออกแบบในงานวิจัยนี้มีรูปแบบ และลักษณะเตา แบบ Rocket Stove [5] ซึ่งนอกจากจะเป็นเตาที่สามารถให้ความร้อนในการหุงต้มปกติแล้ว ยังสามารถใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพร่วมด้วย และเตาลักษณะดังกล่าวจะช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ลดการปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ และฝุ่นได้ มากกว่าเตาประเภทอื่นๆ เพราะสามารถควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ และสามารถนำแก๊สที่เกิดระหว่างปฏิกิริยาไพโรไลซิสของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมในช่องการเผาไหม้(บริเวณแกนกลางเตา) จึงเป็นส่วนสำคัญของการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาที่ทำการออกแบบ แสดงลักษณะของเตาที่ได้ทำการออกแบบดังรูปที่ 1 แสดงถึงเตาทดสอบในรูปแบบ Rocket Stove ซึ่งมีลักษณะเตารูปทรงกระบอก 2 ชั้น บริเวณ

แกนกลางของเตาเชื่อมติดกับช่องป้อนอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้ และให้ความร้อนกับตัวเตา บริเวณเปลือกเตาใช้สำหรับบรรจุชีวมวลเพื่อใช้ผลิตถ่านชีวภาพ บริเวณดังกล่าวจะถูกควบคุมให้อยู่ในสภาวะปราศจากอากาศ และทำให้เกิดการย่อยสลายเชิงความร้อน หรือเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับจากผนังของบริเวณเผาไหม้ ขณะได้รับความร้อนสารระเหย (volatile matter) ที่ได้จากการย่อยสลายเชิงความร้อนถูกระบายออกผ่านท่อเพื่อดักจับด้วยน้ำทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบน้ำส้มควันไม้ สำหรับถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกนำมาใช้ภายหลังการได้รับความร้อน และเกิดการย่อยสลายเชิงความร้อนอย่างสมบูรณ์



① บริเวณช่องเผาไหม้ ② บริเวณผลิตถ่านชีวภาพ
③ ช่องเติมเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ ④ ช่องป้อนอากาศ

รูปที่ 1 เตาทดสอบแบบ Rocket stove

2.1 การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ภายหลังการออกแบบและจัดสร้างเตาทดสอบ แบบ Rocket Stove ได้ดำเนินการทดสอบเตาถ่านชีวภาพด้วยมาตรฐานการทดสอบเตา โดยวิธีการทดสอบ แบบ Water Boiling Test (WBT) กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด เพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) ของเตาใน 3 รูปแบบ ได้แก่ เตาที่มีระบบการไหลเวียนธรรมชาติ (Natural Draft) และ เตาที่มีการควบคุมการป้อนอากาศ (fan force) ซึ่งมีขั้นตอนของการทดสอบที่สำคัญดังนี้

การทดสอบแบบวิธีการต้มเดือด (water boiling test, WBT) เป็นการทดสอบที่วัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทำน้ำให้เดือด (water boiling test, WBT) [4] ตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งเป็นการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการออกแบบเตาโดยพิจารณาจากความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำ และการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้วิธีการทดสอบวิธีการนี้คือ เป็นวิธีการที่ง่าย สามารถเปรียบเทียบค่าการทดสอบระหว่างเตาในลักษณะต่างๆ รวมถึงใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงเตาขณะพัฒนา และลด

ข้อผิดพลาดในการจัดสร้าง วิธีการทดสอบตามมาตรฐานด้วยวิธีการต้มเดือดซึ่งใช้ในการศึกษานี้จะดำเนินการทดสอบตามขั้นตอน ในทุกการทดสอบ โดยจะทำการศึกษาและทดสอบผลที่เกี่ยวข้องจากการป้อน และไม่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา รวมถึงการเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ ได้แก่ ชังข้าวโพด กะลาเผา และเมล็ดมะไฟจีน ทั้งนี้ขั้นตอนในการทดสอบดำเนินการตามลำดับดังนี้

- 1) เติมน้ำลงในภาชนะ ซึ่งเป็นหม้อสแตนเลสแบบมีฝาปิดที่มีช่องสำหรับติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ ปริมาณ 3,000 กรัม
- 2) ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ให้สูงจากก้นภาชนะประมาณ 5 เซนติเมตรเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนการทดสอบชังข้าวโพดสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเป็นกอง กองละ 1 กิโลกรัม ขณะให้ความร้อนค่อยๆ ป้อนชังข้าวโพดที่ละกอง บริเวณช่องป้อนเชื้อเพลิงพร้อมบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิงตลอดการทดสอบ
- 3) บรรจุวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ต้องการทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพ จำนวน 2 กิโลกรัม ได้แก่ ชังข้าวโพด กะลาเผา และเมล็ดมะไฟจีน ในบริเวณเปลือกเตา (ตามรูปที่ 1 คือบริเวณเตาหมายเลข ②) จากนั้นทำการปิดฝาเตาให้สนิท
- 4) นำชังข้าวโพดบรรจุบริเวณตรงกลางของเตา พร้อมจุดเตาเมื่อหัวเผาสามารถทำงานได้ให้ติดเตาทิ้งไว้ 5 นาที นำภาชนะที่เตรียมไว้แล้ววางบนเตาและบันทึกอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของน้ำทุกๆ 1 นาทีตั้งแต่ น้ำอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจนอุณหภูมิของน้ำมีค่าประมาณ 95 องศาเซลเซียสจากนั้นทำการบันทึกเวลาขณะนั้นแล้วทำการเติมน้ำต่อไปอีก 5 นาทีจึงทำการดับเตาพร้อมกับหยุดเวลาและอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ
- 5) ชั่งน้ำหนักของน้ำในภาชนะที่เหลือเชื้อเพลิงที่ใช้ถ่านชีวภาพที่ได้ค่าที่ได้ทั้งหมดถูกนำไปใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 1

$$\eta_{th} = \frac{(C_{p,water} \times W_{water} \times \Delta T) + (h_{fg,vapour} \times W_{vapour})}{\dot{m}_{fuel} \times LHV_{fuel} \times \Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ

- η_{th} = Thermal efficiency, %
 W_{water} = น้ำหนักน้ำที่ใช้ทดสอบ, g
 W_{vapour} = น้ำหนักไอน้ำที่ระเหย, g
 ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำที่ได้จากการทดสอบ, °C



$h_{fg, vapour}$ = Latent Heat of Vaporizer, 2260, J/g
 $C_{p, water}$ = Specific Heat of Water, 4.178 J/g °C
 $\dot{m}_{fuel}$ = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้, g
 LHV_{fuel} = Lower Heating Value of fuel, J/g
 Δt = เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่น้ำในช่วง 40 - 95 °C

2.2. การทดสอบคุณสมบัติถ่านชีวภาพ

ภายหลังการทดสอบการผลิต ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จะได้รับการทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน เพื่อให้ทราบถึงผลของอากาศป้อน ต่อการผลิตถ่านชีวภาพชนิดต่างๆ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ตามมาตรฐาน ASTM D 240 โดยการทดสอบค่าความร้อนจากตัวอย่างเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ทำการเผาไหม้ตัวอย่างสมบูรณ์ในตัว Bomb ที่มีออกซิเจนอยู่ในปริมาณเกินพอ และให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านฟิวส์ไปสัมผัสตัวอย่างเชื้อเพลิง เมื่อเกิดการเผาไหม้จนหมดจะสามารถนำผลการเปลี่ยนอุณหภูมิ มาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนในหน่วย แคลอรีต่อกรัม [6]

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพเตาถ่านชีวภาพในรูปแบบ Rocket Stove ในการใช้งานเตาและผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ช้างข้าวโพด กะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน กับเตาที่มีระบบการไหลเวียนธรรมชาติ (natural draft) และ เตาที่มีการควบคุมการป้อนอากาศ (fan force) ซึ่งให้ผลการศึกษาดังนี้

3.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การทดสอบเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของอากาศป้อน ต่อการผลิตถ่านชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ช้างข้าวโพด กะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน โดยอาศัยเตาประเภท Rocket Stove ที่มีรูปแบบการควบคุมอากาศโดยธรรมชาติ (natural draft) และมีการป้อนของอากาศ (fan forced) ได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบเต็มเต็ดดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการป้อนอากาศเข้าสู่ตัวเตา จะใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่ต่ำกว่าการปล่อยให้มีการไหลอากาศป้อนโดยวิธีการธรรมชาติ และมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยของการใช้เตาแบบสูงกว่า ทั้งนี้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จะมีค่าแตกต่างกัน หากใช้เตาในการผลิตถ่านชีวภาพกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่างชนิดกัน ซึ่งพบว่าในกรณีใช้ กะลากาแฟ เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า เมล็ดมะไฟจีน และช้างข้าวโพด

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทดสอบกับการผลิตถ่านชีวภาพชนิดต่างๆ

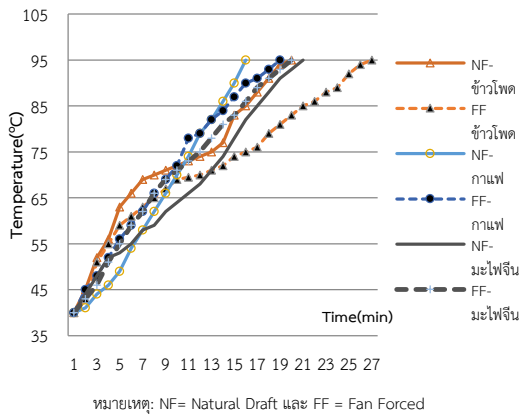
ทดสอบ ชนิดวัตถุดิบ	อุณหภูมิ น้ำ		เวลา ณ. 95°C (นาท.)	น้ำหนัก เชื้อเพลิงที่ ใช้ (กรัม)	η_{th} %
	ก่อน ต้ม	หลัง ต้ม			
เตาที่มีระบบการไหลเวียนอากาศโดยธรรมชาติ(Natural Draft)					
ซังข้าวโพด	35	100	19	2100	7.88
กะลากาแฟ	40	100	15	900	19.41
เมล็ดมะไฟจีน	40	99	21	1000	16.23
เตาที่มีการป้อนอากาศ (Fan Forced)					
ซังข้าวโพด	40	99	26	1500	10.42
กะลากาแฟ	31	97	18	800	20.93
เมล็ดมะไฟจีน	40	100	19	900	18.39

ทั้งนี้เป็เพราะความละเอียดของกะลากาแฟ และลักษณะทางกายภาพที่มีลักษณะคล้ายถ่านมีความร้อน ซึ่งหากบรรจุลงบริเวณเปลือกเตาจึงคล้ายถ่านที่หุ้มเตา ที่สามารถลดการสูญเสียความร้อนรอบเตาได้มากกว่าเตาที่บรรจุ เมล็ดมะไฟจีน และช้างข้าวโพด และหากพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะให้ความร้อนจะสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบเตาในสองลักษณะได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละการทดสอบมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ชนิดของการใช้งานเตา ที่มีการควบคุมการไหลของอากาศแบบไหลเวียนของธรรมชาติ หรือแบบควบคุม ซึ่งผลการศึกษาพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำในกรณีที่ใช้เตาในแบบการไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติจะให้ค่าสูงกว่าการควบคุมการไหลของอากาศ แต่มีช่วงของการรักษาช่วงอุณหภูมิให้กับน้ำที่สั้นกว่า และใช้เชื้อเพลิงในขณะทำการเผาไหม้ในปริมาณที่มากกว่าซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้เตาแบบไม่มีการบังคับการป้อนของอากาศ หรือการให้มีการไหลเวียนแบบธรรมชาติ มีสัดส่วนการป้อนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในปฏิกิริยาเผาไหม้เหมาะสมน้อยกว่าการใช้เตาแบบบังคับการป้อนอากาศ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง ที่จะทำให้เกิดเป็นความร้อนและแสง ทั้งนี้หากมีการป้อนอากาศอย่างเหมาะสม หรือมากเกินไปจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และได้ความร้อนในปริมาณสมดุลเทียบเท่ากับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้

3.2 การผลิตถ่านชีวภาพ และคุณสมบัติถ่านชีวภาพ

การศึกษากการผลิตถ่านชีวภาพควบคู่กับการทดสอบประสิทธิภาพเตา ทำให้ทราบว่าเตาที่ทำการออกแบบสามารถผลิตถ่านชีวภาพ ควบคู่ไปกับการให้ความร้อน ซึ่งคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้จากการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรแตกต่างกันจะให้ผลที่แตกต่างกัน ดังผลการทดสอบค่าความ

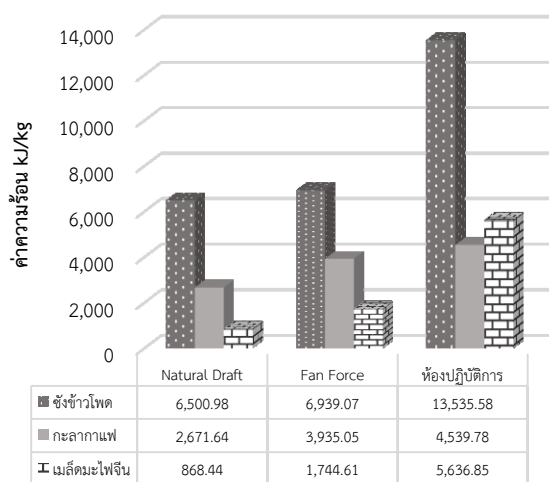
ร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบทั้ง 3 โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (bomb calorimeter) ทดสอบและศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพที่ได้แสดงลักษณะของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 3 และผลการทดสอบแสดงค่าดังรูปที่ 4



รูปที่ 2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 3 ถ่านชีวภาพที่ได้จากการ ชั่งข้าวโพด เมล็ดมะไฟจีน และกะลากาแฟ

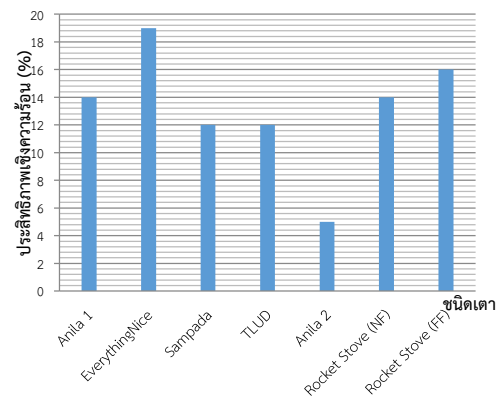


รูปที่ 4 ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

จากรูปที่ 4 พบว่าค่าความร้อนที่ได้จากถ่านชีวภาพซึ่งได้จากวัสดุต่างชนิดกันให้ค่าความร้อนที่แตกต่างกัน โดยถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาทดสอบจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการมีการควบคุมการเปลี่ยนสถานะของชีวมวลที่สมบูรณ์ และทั่วถึงกว่า อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าหากพิจารณาเฉพาะสมบัติด้านค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาแบบไหลเวียนอากาศแบบธรรมชาติ จะให้ถ่านที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านชีวภาพที่มีการป้อนอากาศ ในทุกวัสดุทดสอบ และถ่านชีวภาพจากชั่งข้าวโพดให้ค่าความร้อนมากกว่าถ่านชีวภาพจากกะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน

3.3 การเปรียบเทียบลักษณะเตาจากผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาเตาถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดสอบตาม หากทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้โดยอาศัยค่าเฉลี่ยจากการใช้งานเตากับวัสดุทั้ง 3 ชนิด กับผลการทดสอบกับเตาประเภทอื่นๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทำการสรุปผลการศึกษาโดย Carter and Shackle, [7] ทำให้ได้ข้อมูลของการเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพที่ทำการออกแบบ กับที่เคยพัฒนาแล้วก่อนหน้านี้ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการทดสอบเตา (Carter and Shackle, 2011)

จากการทดสอบด้วยวิธีการแบบ WBT พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทดสอบที่มีการไหลแบบธรรมชาติ และการบังคับการป้อนอากาศ เทียบกับเตาชนิดอื่นๆ [7] พบว่าเตาชนิดดังกล่าวมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนค่อนข้างสูง โดยพิจารณาค่าประสิทธิภาพเตาตามการใช้งานโดยเฉลี่ยกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทุกชนิด ข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าทางเลือกพัฒนาเตาถ่านชีวภาพจากรูปแบบเตา ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของเตาในรูปแบบเตาทรงกระบอกสองชั้น ที่สามารถใช้ในการเผาไหม้สำหรับให้



ความร้อนจากบริเวณส่วนกลาง และการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้การย่อยสลายเชิงความร้อนโดยปราศจากอากาศ บริเวณเปลือกเตาที่นั่นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาได้เพิ่มมากขึ้น

4. สรุป

ผลการเปรียบเทียบการใช้งานเตาที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่เตาแบบธรรมชาติ และแบบบังคับ ของเตาถ่านชีวภาพในรูปแบบ Rocket Stove ที่ทำการออกแบบพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่มีการป้อนอากาศแบบบังคับ หรือ Fan Force จะให้ค่าความร้อนสูงกว่าการให้อากาศไหลเวียนเข้าสู่เตาโดยธรรมชาติ ในช่วงร้อยละ 7.26 – 24.38 ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ป้อน ทั้งนี้การใช้งานเตากับการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกะลาเผาจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าการใช้ซังข้าวโพด และเมล็ดมะไฟจีน ผลทางด้านคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากการใช้งานเตาแบบมีบังคับการป้อนอากาศจะให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพสูงกว่าแบบไหลเวียนอากาศโดยธรรมชาติ ซึ่งถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดให้ค่าความร้อนสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากชีวมวลชนิดอื่น ด้วยค่าความร้อน 6,939.07 กิโลจูลต่อกิโลกรัมกรัม นอกจากนี้หากนำผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบเตาที่ทำการออกแบบด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนมาทำการเปรียบเทียบกับเตาถ่านชีวภาพในลักษณะใกล้เคียงกันซึ่งทำการศึกษามาแล้วก่อนหน้านี้ จะพบว่าเตาถ่านชีวภาพที่ทำการออกแบบให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนค่อนข้างสูงทั้งในกรณีใช้งานแบบมีการป้อน และไม่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สวทช.ภาคเหนือ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ผู้สนับสนุนโครงการวิจัย ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นานาให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์สถานที่ และบุคลากร ในการศึกษาโครงการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaiwong, K., Kiatsirirot, T., Vorayos, N. and Thararax, C. (2013). Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis. *Biomass and bioenergy*, vol. 56, 2013, pp.600 – 606.
- [2] Maschio, G., Koufopoulos, C. and Lucchesi, A. (1992). Pyrolysis, a promising route for

biomass utilization. *Bioresource Technology*, vol. 42, 1992, pp.219–231.

- [3] Torres-Rojas, D., Lehmann, J., Hobbs, P., Joseph, S. and Neufeldt, H. (2011). Biomass availability. Energy consumption and biochar production in rural households of Western Kenya. *biomass and bioenergy*, vol. 35, 2011, pp.3537 – 3546.
- [4] Kumar, M., Kumar, S., and Tyagi, S.K., (2013). Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, 2013, pp.265-285.
- [5] MacCarty, N., Still, D. and Ogle, D., (2010). Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development*, vol, 14, 2010, pp.161-171.
- [6] โปรดปราน สิริวิศิษฐ์, ณัฐพล ช่างการ และ ศรัณย์ ชโนวิทย์ (2554). การปรับปรุงคุณภาพของผสมชีวมวลและถ่านหินด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ, *การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21*. อำเภอหาดใหญ่. จังหวัดสงขลา
- [7] Carter, K and Shackle, S. (2011). *Biochar Stoves: an innovation studies perspective*, UK Biochar Research Center (UKBRC), School of Geo- Science, University of Edinburgh.



กระบวนการนึ่งและอบแห้งข้าวฮางอกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับคลื่นอินฟราเรด

A Parboiled GABA Rice (Khaohang) and Drying Process with Solar Energy and Infrared Electromagnetic Wave

นพพร พัชรประกิต* พงศธร จันทรแก้ว และวัชรพงษ์ มโนรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอบ้าน จังหวัดเชียงราย 57120

*ผู้รับผิดชอบบทความ: pnopporn@rmutl.ac.th โทรศัพท์ 053-729600-5

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกระบวนการนึ่งข้าวฮางอกด้วยระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ร่วมกับหม้อนึ่งเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม LPG และกระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นข้าวฮางอกโดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดแทนกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมที่ใช้การตากแดดตามธรรมชาติ ซึ่งช่วยลดปัญหา ความเสียหายของผลิตภัณฑ์จาก สภาพอากาศ ฝนตก ไม่มีแสงแดด และลดความสกปรกจากฝุ่นละออง ในกระบวนการนึ่งได้นำระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์มาอุ่นน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 70 องศาเซลเซียสก่อนเข้าสู่หม้อนึ่งเพื่อลดการใช้พลังงานจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า และได้พัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับคลื่นอินฟราเรด ผลการทดสอบและการเปรียบเทียบระยะเวลา การใช้พลังงานเทียบกับระบบดั้งเดิม พบว่า ในการนึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเชื้อเพลิงได้ และในการอบแห้งวิธีต่างๆ ปรากฏว่าการตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลา 8 ชั่วโมง 20 นาที อบแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลา 7 ชั่วโมง และอบแห้งด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดใช้เวลา 4 ชั่วโมง 40 นาที โดยความชื้นเริ่มต้น 65% และความชื้นสุดท้าย 14%

คำสำคัญ ข้าวฮางอก การนึ่ง อบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ คลื่นอินฟราเรด

Abstract

This paper proposes a parboiled rice and drying in order to reduction of humidity rice Khaohang gok by using a solar energy dryer combine with infrared electromagnetic wave to reduce moisture. The advantage of this method is to reduce the product loss from weather story, rain and dust. The solar hot water is used to pre-heat water temperature to 70°C before parboiled process. The duration of drying process to reduce moisture of rice from 65% to 14% is compared. The dryer with conventional naturally drying with solar takes 8.33 hours and solar dryer oven takes 7 hours, and drying with solar energy oven with infrared take only 4.66 hours. The economic analysis of proposed method is presented.

Keywords: Parboiled GaBA Rice (Khaohang), Steaming, Drying, Solar Energy, Infrared wave

1. บทนำ

ข้าวฮางอกเป็นข้าวที่เพาะจากข้าวเปลือก เป็นภูมิปัญญาชาวภูไท [1-2] ซึ่งข้อดี คือ มีสารอาหาร วิตามิน แร่ธาตุ ไฟเบอร์ และกลิ่นหอม จากเปลือกมาเคลือบที่เมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น จึงทำให้ข้าวฮางมีสารอาหารมากกว่าข้าวกล้องงอกและข้าวฮาง และมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าธัญพืชทั้งหลาย ช่วยให้สุขภาพแข็งแรงและสมดุล เพิ่มภูมิต้านทาน ช่วยป้องกันเชื้อโรคหรือโรคที่ไม่ได้เกิดจากเชื้อโรคได้ [3] ในกระบวนการผลิตข้าวฮางอกประกอบด้วยกระบวนการนึ่งและอบแห้ง [4-5] ซึ่งโดยปกติจะใช้เชื้อเพลิง LPG เป็นหลักในการนึ่ง [6] ซึ่งจะทำให้เกิดความสิ้นเปลือง จึงได้มีการระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิน้ำก่อนให้ความร้อนเป็นไอน้ำสำหรับนึ่ง ทำให้ประหยัดการใช้ก๊าซหุงต้ม ได้

[7] กระบวนการต่อไปเป็นการอบแห้งซึ่งนิยมใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งมีข้อเสีย อาทิ สภาพอากาศ ฝุ่นละออง แมลง เชื้อรา และมีความไม่แน่นอนของแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะฤดูฝน [8] จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีหลายรูปแบบเพื่อลดความชื้นก่อนจะนำไปสีเพื่อแปรรูปผลิตภัณฑ์ อาทิ ตู้อบแสงอาทิตย์ [9] ฮีทปั๊ม [10] ไมโครเวฟและหลอดรังสีอินฟราเรด [11-12] เป็นพลังงานอีกรูปแบบที่นิยมมาใช้เนื่องจากง่ายและมีการแผ่รังสีใกล้เคียงแสงอาทิตย์ ดังนั้นในบทความนี้จึงมีแนวคิดนำข้อดีของเทคโนโลยีแต่ละแบบผสมผสานกัน [13-16] โดยใช้ระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ช่วยลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิง และการใช้ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรดในกระบวนการอบ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตข้าวฮางอก มีข้อแตกต่างจากข้าวฮาง ตรงที่มีการบ่มให้เกิดรากก่อนนำไปนึ่ง ขั้นตอนการทำ ดังแสดงในรูปที่ 5 มีขั้นตอนหลัก ดังรูปที่ 1 คือ นำข้าวเปลือกมาแช่น้ำ การบ่มให้รากงอก การนึ่งให้สุก การตากแดด หรือผึ่งลมให้แห้ง การสีเป็นข้าวกล้อง และแยกสิ่งเจือปนและเก็บในภาชนะที่แห้งสนิท หรือบรรจุในถุงสุญญากาศ

ในกระบวนการผลิตข้าวฮางอกนี้จะมีการใช้พลังงานอยู่ 2 ส่วน คือ กระบวนการนึ่ง และอบแห้ง โดยปกติจะใช้เชื้อเพลิงหรือฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการนึ่ง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน จึงได้นำเทคโนโลยีแผงน้ำร้อนแสงอาทิตย์มาช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อลดการใช้พลังงานเดิม และใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการระเหยน้ำให้เป็นไอน้ำ ในการอบแห้งจะใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง และในกรณีที่แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ จะใช้หลอดอินฟราเรดเป็นพลังงานเสริม ซึ่งทั้งการนึ่งและอบ จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อน แบบนำความร้อน (Conduction) และ การพาความร้อน (Convection) ผสมผสานกัน



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตข้าวฮางอก

2.2 กระบวนการนึ่ง (steaming)

คือ วิธีการทำอาหารให้สุกด้วยการใช้ความร้อนจากไอน้ำร้อน ที่ได้จากการต้มต้มน้ำเดือด การนึ่งโดยทั่วไปจะทำให้ความดันบรรยากาศปกติ ที่อ้อมตัวด้วยไอน้ำ อุณหภูมิอยู่ ระหว่าง 100 -105 องศาเซลเซียส ความร้อนจากไอน้ำจะถูกถ่ายเทไปยังผิวหน้าของอาหาร ด้วยการพาความร้อน และเข้าสู่ภายในชิ้นอาหารด้วยการนำความร้อน ความร้อนจากการนึ่งเป็น

ความร้อนที่อ้อมตัวด้วยน้ำ (moist heat) และทำให้อาหารสุกเปรียบเทียบกับ การต้ม อาหารที่ทำให้สุกด้วยการนึ่งไม่ได้แช่อยู่ในน้ำ ทำให้ลดการสูญเสียสารอาหารต่างๆ เช่น วิตามินที่ละลายได้ในน้ำ และสลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน เป็นต้น เปรียบเทียบกับการทอด การนึ่งไม่จำเป็นต้องใช้น้ำมันเป็นตัวกลาง ทำให้อาหารมีพลังงานต่ำกว่าอาหารทอด อาหารนึ่งจึงเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ ในการนึ่งจะต้องใช้พลังงาน 2 ส่วน คือ ความร้อนสัมผัสในการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ (1) และสามารถหาล้างวัดได้ เมื่อทราบเวลาที่ต้องการต้ม น้ำ ดังสมการที่ (2) ในการแปลงค่าปริมาณน้ำให้เป็นมวล จะใช้สมการที่ (3) ในการคำนวณ

$$Q [kJ] = mc\Delta T \quad [kg][kJ/kg^\circ C][^\circ C] \quad (1)$$

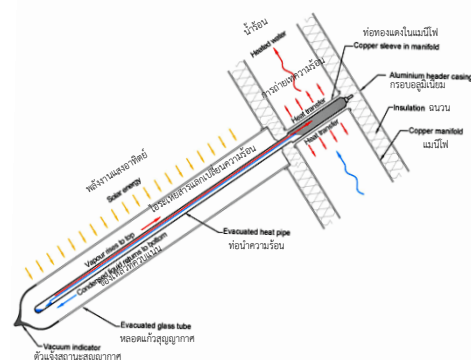
$$P [kW] = Q/t = mc\Delta T/t \quad [kJ]/[sec] \quad (2)$$

$$m = \rho V [kg/m^3][m^3] \quad (3)$$

เมื่อ

- Q ปริมาณความร้อน หน่วย KJ
- m มวลน้ำ หน่วย kg
- c ความจุความร้อนจำเพาะน้ำ = 4.187 kJ/kg °C
- ΔT ผลต่างอุณหภูมิ °C
- t เวลาที่ใช้ในการต้ม (วินาที)
- ρ ความหนาแน่นของน้ำ 1000 kg/m³
- η คือ ประสิทธิภาพของฮีตเตอร์ = 0.85

เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานในการให้ความร้อนจากแหล่งอื่น ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ น้ำก่อนระเหยเป็นไอน้ำสำหรับนึ่ง จึงได้เลือกกระบวนการผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ และท่อความร้อน (Vacuum Tube Solar Collector with Heat Pipe) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูง ผลิตน้ำร้อนได้ถึงเกือบ 100 องศาเซลเซียส ดังในรูปที่ 2 คือ



รูปที่ 2 ระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ



ก) ตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (The Absorber) ที่ผ่านกรรมวิธี เคลือบผิวพิเศษด้วย Aluminum Nitride ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแสงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ได้สูงเกินกว่า 92%

ข) หลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Glass Tube) จะมีลักษณะเป็นหลอดแก้วสองชั้น ด้านในเป็นสุญญากาศ

ค) คอนเดนเซอร์ (Condenser) เป็นส่วนถ่ายเทความร้อนของสารทำงานหลังจากได้รับพลังงานความร้อนจนกลายเป็นไอให้กับน้ำและกลั่นตัวกลับเป็นของเหลวตกลงไปด้านล่างของท่อทองแดง

ง) อุปกรณ์อื่นๆ เช่น แมนิโฟล (Manifold) ถึงเก็บน้ำร้อนระบบปั๊ม และอุปกรณ์ประกอบเครื่อง เช่น แท่งแมกนีเซียม สำหรับจับตะกรันให้ย่อยสลายในถังป้องกันถังน้ำร้อนตัน และชุดควบคุมสำหรับควบคุมฮีตเตอร์และอุณหภูมิพร้อมบอกอุณหภูมิในถัง วาวส์ลดแรงดัน สำหรับลดแรงดันในถังน้ำร้อนเมื่ออุณหภูมิสูงเดือดมาก

พลังงานความร้อนอีกส่วนที่ใช้ในการนี้ คือ ความร้อนแฝงกลายเป็นไอ ที่ใช้ระเหยน้ำร้อนให้กลายเป็นไอน้ำ ดังสมการที่ (4)

$$Q = mL \quad (4)$$

เมื่อ L คือ ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอของน้ำ 2,257 kJ/kg สำหรับสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์ที่ใช้ในการต้มน้ำให้เดือดเป็นระยะเวลา t นาที (ชั่วโมง) ได้ดังสมการที่ (5)

$$P = \frac{Q}{\eta t} \quad (5)$$

เมื่อ

- P คือ กำลังไฟฟ้า หน่วย kW
- Q คือ ปริมาณความร้อน หน่วย kJ หรือ kWh
- η คือ ประสิทธิภาพของฮีตเตอร์ = 0.85
- t คือ เวลาที่ใช้ในการระเหย (วินาที) หรือ ชั่วโมง

ซึ่งฮีตเตอร์ไฟฟ้า(Electric Heater) จะใช้สำหรับทำอุณหภูมิให้น้ำร้อนเสถียรในกรณีไม่มีแสงอาทิตย์ และการระเหยน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ

2.3 กระบวนการอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้น พร้อม ๆ กัน ความร้อนที่ทำให้ไอน้ำระเหยออกจากวัสดุ ส่วนมากแล้วได้รับมาจากความร้อนสัมผัสของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนจะมีทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี แต่โดยทั่วไปแล้ว จะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเป็นหลัก โดยอัตราการแห้ง (drying rate) หรืออัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหย ต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง ขึ้นอยู่กับสภาพธรรมชาติของอาหาร

เริ่มต้นก่อนการทำแห้ง และสภาวะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) เป็นต้น กราฟระหว่างอัตราการแห้ง (drying rate) และความชื้น

ค่าความชื้น (Moisture content, M) คือค่าความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือวัสดุแห้งการบอกความชื้นในวัสดุมี 2 แบบ คือ ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน มักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ เป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ ดังสมการที่ (6)

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \quad (6)$$

ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งและใช้ในบทความนี้ เนื่องจากน้ำหนักแห้งของอาหารจะคงที่ โดยบอกเป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักแห้งของวัสดุ ดังสมการที่ (7)

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \quad (7)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก

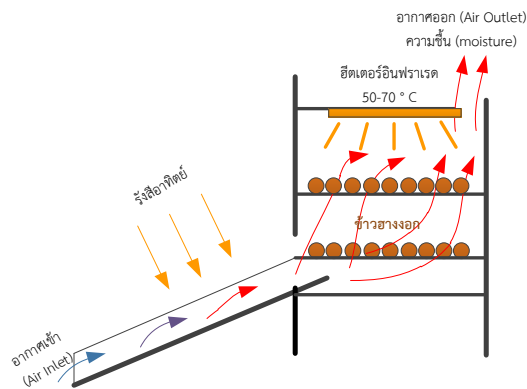
M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

w คือ น้ำหนักของวัสดุ (kg)

d คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ (kg)

ในการอบข้าวฮางอกได้เลือกใช้การอบด้วยวิธีเครื่องอบแห้งโดยอ้อม เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบนี้วัสดุอบแห้งไม่ได้รับรังสี อาทิตย์โดยตรง ทำให้ลดการเปลี่ยนสีและผลกระทบ อื่นๆ ของวัสดุอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัสรังสี โดยตรง โดยระบบดังกล่าวจะมีส่วนของอุปกรณ์ผลิตอากาศร้อน สำหรับใช้ในห้องอบแห้ง ที่หุ้ม ฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกภายนอก ภายในห้องอบแห้งอาจทำเป็นชั้น หลายๆ ชั้น เพื่อให้ บรรจุวัสดุในการอบแห้งได้มากขึ้น เพื่อให้ บรรจุวัสดุในการอบแห้งได้มากขึ้น ลักษณะโครงสร้างของเครื่องอบแห้งนี้แสดงในรูปที่ 3 ประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ระบบอากาศ (solar air system collector) หรือใช้หลักการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไป ยังแผ่นดูดกลืนรังสีสำหรับผลิตอากาศร้อนในการให้ ความร้อนกับวัสดุเพื่อระเหยความชื้นออกจากวัสดุโดยหลักการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ระหว่างอากาศร้อน และวัสดุเปียก บนพื้นฐานของความแตกต่างความเข้มข้นของความชื้นระหว่างอากาศที่เข้าอบแห้งกับความชื้น ของอากาศบริเวณผิวของวัสดุเปียกในส่วน

การถ่ายโอนความร้อนและมวล ตามลำดับ ในกรณีที่พลังงานแสงอาทิตย์มีไม่เพียงพอ จะใช้หลอดรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งเสริม ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นรังสีอินฟราเรด โดยการดูดซับรังสีอินฟราเรดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นอินฟราเรด ส่วนประกอบวัสดุลักษณะพื้นผิววัตถุ มุมตกกระทบ และสีของวัตถุ พลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะแผ่ไปยังวัสดุซึ่งจะทำให้น้ำภายในวัสดุสั่นและเกิดความร้อนขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ระยะเวลาการอบแห้ง



รูปที่ 3 ตู้อบรังสีอาทิตย์ชนิดโดยอ้อม

3. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.1 การเลือกขนาดแผงน้ำร้อนและฮีตเตอร์ไฟฟ้า

ในกระบวนการนึ่งข้าวใช้หม้อนึ่งไอน้ำสำหรับกระบวนการนึ่งด้วยไอน้ำ โดยน้ำที่ป้อนเข้าหม้อนึ่ง ใช้ไอน้ำร้อนที่ผลิตได้จากแผงรับรังสีความร้อน (Solar Collector) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำให้มีความสูงขึ้น จาก 25 °C ให้มีอุณหภูมิสูงใกล้เคียง 100 °C โดยระบบทำน้ำร้อนประกอบด้วยส่วนใหญ่ๆ 2 ส่วนได้แก่ แผงรับรังสีความร้อนแบบสุญญากาศ ถึงน้ำร้อนขนาด 70 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์

ในกรณีที่พลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ ได้มีการเพิ่มหลอดความร้อน สำหรับผลิตน้ำร้อนและไอน้ำสำหรับการนึ่ง โดยทำการคำนวณหาค่ากำลังวัตต์ของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นต้องการใช้ในการนึ่งข้าว 10 กิโลกรัม ต้มน้ำ 10 ลิตร จากอุณหภูมิ 25 °C ให้น้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 °C ภายใน 10 นาที จึงสามารถหาค่ากำลังฮีตเตอร์ได้ จากสมการที่ (2) จะได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 6.24 kW และในการนึ่งใช้เวลา 40 นาที ใช้ น้ำ 10 ลิตร หรือเทียบเท่า 10 kg ดังนั้นเมื่อหาขนาดกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้าสำหรับต้มน้ำ จากสมการที่ (5) จะต้องแปลงค่า MJ ให้เป็นค่า kWh โดยหารด้วย 3.6 และหารด้วยเวลาชั่วโมง ก็จะได้ค่ากำลังวัตต์ของฮีตเตอร์ และเมื่อคิดประสิทธิภาพ 85% จึงเลือกใช้ฮีตเตอร์ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 11 กิโลวัตต์

3.2 การเลือกขนาดตู้อบแห้งและหลอดอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดที่สร้างขึ้น โดยประกอบด้วย กระจกหลังมี ขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 55x85x80 ซม. และใช้แผ่นเหล็กรับรังสีอาทิตย์ทำด้วยสแตนเลส เพื่อให้มีการดูดกลืนการแผ่รังสีสูง ปิดด้านบนไว้ด้วยกระจก ขนาด 100 x 100 ซม. ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบโดยอ้อม

ฮีตเตอร์อินฟราเรด(Infrared Heater) เป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี เหมือนกับที่ดวงอาทิตย์ส่งความร้อนมายังโลก จึงมีประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ ประหยัดไฟได้ 30-50% สามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อใน จึงทำให้ประหยัดเวลาได้ 1-10 เท่า ซึ่งการให้ความร้อน แบบการพาและการนำความร้อน จะทำให้อายุของวัสดุสั้นลงแล้วค่อยๆ ซึมเข้าไปเนื้อใน จึงใช้เวลานานกว่า ขนาดจะมีขนาดเล็กกว่าฮีตเตอร์แบบทั่วๆ ไป ทำให้ประหยัดเนื้อที่การติดตั้ง และการถอดเปลี่ยนเพื่อซ่อมบำรุงง่าย มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากไม่มีเปลวไฟ ตัวเรือนมีความเป็นฉนวนสูง ไฟไม่รั่ว ให้รังสีช่วง 3 – 10 mm. ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกือบทุกชนิดสามารถดูดซับรังสี

ได้ดี ในการพิจารณาเลือกใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรด พิจารณาจากอุณหภูมิที่เกิดจากการแผ่รังสี ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิได้ด้วยชุดควบคุม ให้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 60-80 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้า 500-800 วัตต์ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 อินฟราเรดฮีตเตอร์

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและพารามิเตอร์สำหรับทดสอบเครื่องนึ่งและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด ข้าวเปลือกขั้นที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวเปลือกพันธุ์หอมมะลิ 105 ที่ผ่านกระบวนการแช่น้ำมาแล้ว และมีค่าความชื้นเริ่มต้นที่ 65% จำนวน 10 กิโลกรัมต่อการผลิต 1 ครั้ง และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอบแห้งในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ประกอบด้วย อุณหภูมิ ระยะเวลา และความเร็วลม โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังอบแห้งมากที่สุด

โดยเกณฑ์ที่ใช้ประเมินคุณภาพข้าวเปลือก คือ หลังการนำไปสีของเมล็ดข้าว ข้าวจะต้องไม่แตกหัก ซึ่งหากอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ข้าวแตกหักได้ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิที่มีค่าต่ำอบแห้งข้าวเปลือก จะไม่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของคุณภาพของข้าว โดยปกติในการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกจะต้องทำไปพร้อมกับการตรวจสอบคุณภาพ จะทำให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสม ประหยัดพลังงานและได้ข้าวที่มีคุณภาพ โดยขั้นตอนการทดลอง มีดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 จำนวน 10 กก.
- 2) นำข้าวไปนึ่ง โดยใช้ความร้อนจาก Solar Collector ในการเพิ่มอุณหภูมิและใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการระเหยน้ำให้เป็นไอน้ำ
- 3) นำข้าวไปอบแห้งทั้ง 4 วิธี คือ ตากแสงอาทิตย์ธรรมชาติ อบแห้งด้วยตู้อบแสงอาทิตย์ อบแห้งด้วยตู้อบแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรด และใช้หลอดอินฟราเรด ช่วงอุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- 4) เก็บบันทึกข้อมูลอัตราการลดความชื้นและระยะเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก โดยพิจารณาความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 65% และความชื้นสุดท้าย 14% ของแต่ละกรณี

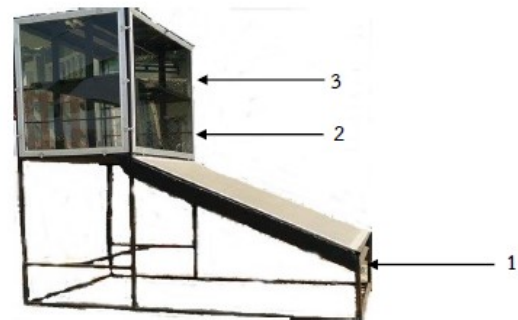
4. ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลการนึ่งข้าวฮางอก

ผลการทดลองนึ่งข้าวฮางอก โดยใช้แหล่งพลังงานได้แก่ การใช้ไฟฟ้าร่วมกับแผงรับน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการนำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีอุณหภูมิสูงใกล้เคียง 100 องศาเซลเซียสก่อนแล้วจึงป้อนน้ำเข้าไปในระบบนึ่ง และใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าต้มให้น้ำกลายเป็นไอน้ำ ทำให้สามารถประหยัดพลังงาน คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 3,694.41 kJ หรือ 1.026 kWh ต่อการนึ่งข้าวฮาง 10 kg หรือ 0.0102 kWh/kg และคิดเป็นพลังงานความร้อน 3.744 MJ เทียบเท่ากับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่มีค่าความร้อน 50.22 MJ/kg ทำให้ประหยัดแก๊สได้ 0.0074 kg/kg

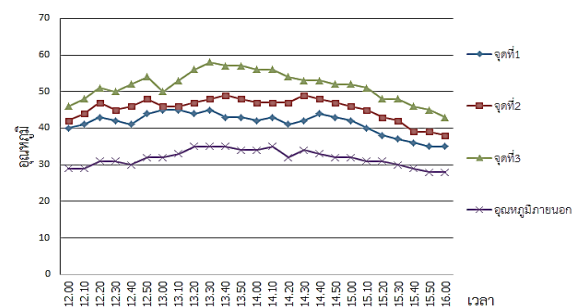
4.2 ผลการทดลองตู้อบข้าวฮางอก

ผลการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ในแต่ละจุดภายในตู้อบทั้งหมด 3 จุดด้วยกัน คือ ทางช่องลมเข้า ทางช่องลมเข้ามาในตู้อบ และกลางตู้อบ เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในตู้อบกับอุณหภูมิภายนอก แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อุณหภูมิในจุดต่างๆ ของตู้อบ

ผลการวัดอุณหภูมิจากรูปที่ 7 การวัดอุณหภูมิในจุดที่ 1 ทางช่องลมเข้า จุดที่ 2 ทางช่องลมเข้ามาในตู้อบ จุดที่ 3 กลางตู้อบ และอุณหภูมิภายนอก เพื่อเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลความแตกต่างของอุณหภูมิแต่ละส่วน



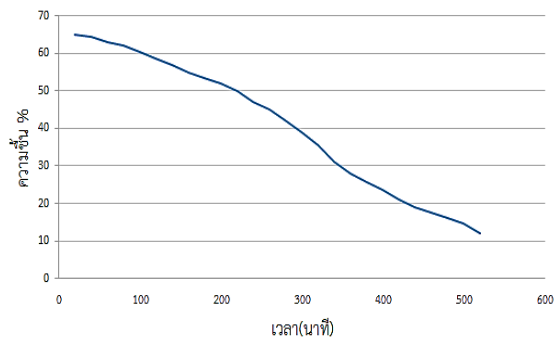
รูปที่ 8 อุณหภูมิภายในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์



ตารางที่ 1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้อบ

อุณหภูมิ	จุดที่ 1 ทางช่องลมเข้า	จุดที่ 2 ช่องลมเข้าตู้อบ	จุดที่ 3 กลางตู้อบ	อุณหภูมิภายนอก
อุณหภูมิสูงสุด	45	49	58	35
อุณหภูมิต่ำสุด	35	38	43	28
อุณหภูมิเฉลี่ย	40	44	51	34

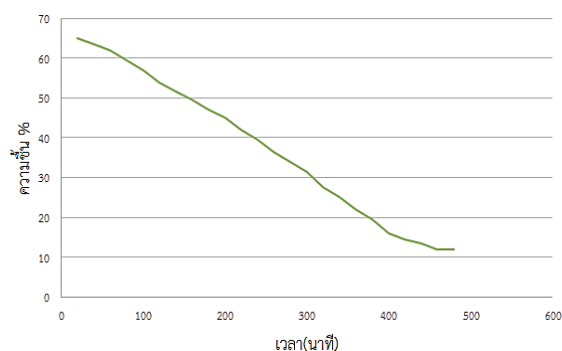
4.3 การลดความชื้นข้าวฮางอกด้วยวิธีธรรมชาติ



รูปที่ 9 อัตราลดความชื้นของข้าวฮางอกวิธีธรรมชาติ

ผลจากการลดความชื้นข้าวฮางอกรูปที่ 7 ด้วยวิธีธรรมชาติใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นจาก 65% ถึง 14% ใช้เวลาทั้งสิ้น 500 นาที่ (8 ชั่วโมง 20 นาที)

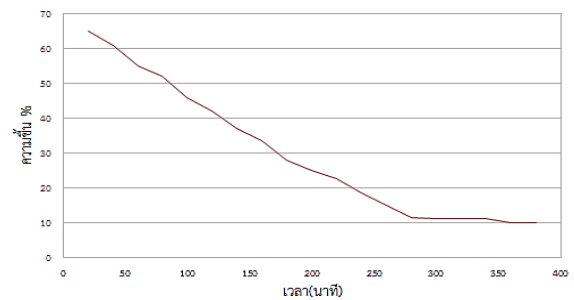
4.4 การลดความชื้นข้าวฮางอกโดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 10 อัตราลดความชื้นข้าวฮางอกด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์

ผลจากการลดความชื้นข้าวฮางอก พบว่าการลดความชื้นข้าวฮางอกโดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นจาก 65% ถึง 14% ใช้เวลาทั้งสิ้น 420 นาที่ (7 ชั่วโมง)

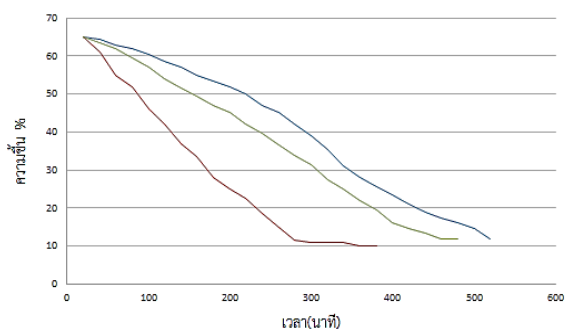
4.5 การทดลองลดความชื้นข้าวฮางอกโดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดที่อุณหภูมิคงที่ 70 องศา



รูปที่ 11 การลดความชื้นของข้าวฮางอกกับเวลาโดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด

ผลจากการลดความชื้นข้าวฮางอกรูปที่ 8 การลดความชื้นข้าว ฮางอกโดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นจาก 65% ถึง 14% ใช้เวลาทั้งสิ้น 280 นาที่ (4 ชั่วโมง 40 นาที) และค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ฮีตเตอร์อินฟราเรด ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 700 วัตต์ จะใช้พลังงานเท่ากับ 3.26 kWh ต่อการอบ 10 กก. หรือ 0.326 kWh/kg คิดเป็นค่าใช้จ่าย 1.3 บาท/กก.

4.6 ผลการเปรียบเทียบการลดความชื้นของข้าวฮางอก 3 วิธี



รูปที่ 12 การลดความชื้นของข้าวฮางอก

จากรูปที่ 12 กราฟเส้นที่ 1 (บน) แสดงถึงการลดความชื้นวิธีธรรมชาติ กราฟเส้นที่ 2 (กลาง) แสดงถึงการใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว และกราฟเส้นที่ 3 (ล่าง) แสดงถึงการใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด ผลที่ได้จากการทดลองลดความชื้นข้าวฮางอกทั้ง 3 วิธีพบว่า การลดความชื้นวิธีที่เร็วที่สุดคือ ใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด เมื่อเทียบกับวิธีตากแดดธรรมชาติ และใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว และสามารถผลิตได้มากกว่า 2 ครั้งต่อวัน ข้อดีของ



อินฟราเรดมีการสูญเสียความร้อนน้อย มีปริมาณความร้อนสะสมจากแผงรับรังสีความร้อนจะลอยตัวขึ้นเข้ายังภายในตู้อบ และการแผ่รังสีจากหลอดอินฟราเรดจะดูดซับรังสีโดยตรง การทะลุทะลวงของรังสีทำได้ดี จึงทำให้น้ำสามารถระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้เร็ว และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้นด้วย

5. สรุป

ในบทความนี้ได้นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตข้าวฮางอก ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการหนึ่ง โดยระบบผลิตน้ำร้อนแผงพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ น้ำที่ให้ความร้อนเป็นไอน้ำสำหรับหนึ่ง และในกระบวนการอบเพื่อลดความชื้นได้ใช้กระบวนการเปรียบเทียบกัน 3 วิธี คือ วิธีตากแดดด้วยธรรมชาติใช้เวลา 8 ชั่วโมง 20 นาที วิธีตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวใช้เวลา 7 ชั่วโมง และวิธีใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดใช้เวลา 4 ชั่วโมง 40 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดสามารถทำได้ดีกว่าเนื่องจากทำการผลิตได้ 2 ครั้งต่อวันดีกว่าการตากแดดธรรมชาติประมาณ 2 เท่า ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินทางเทคนิคไปวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป ซึ่งมีปัจจัยขึ้นอยู่กับยอดขาย ราคาขายที่เพิ่มขึ้นจากการผลิตข้าวฮางอก

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ในโครงการยกระดับปริญญานิพนธ์ (Hands-on research :HR)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] นันนิภา ประสันลักษณ์ และ ธนาภรณ์ อธิปัญญากุล (2557). การจัดการผลิตและการตลาดของข้าวพันธุ์สกลนครและข้าวเก่า ในจังหวัดขอนแก่น, *วารสารวิจัย มข.2*(1):ม.ค.-เม.ย. 2557.
- [2] ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล รัชฎาพร อินพา และ ทิพวรรณ ใจกว้าง (2555). การผลิตข้าวกล้องมอลต์จากข้าวไร่พื้นที่สูงในจังหวัดเชียงใหม่, *วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท.)*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1 พฤษภาคม 2555, หน้า 105-118.
- [3] ชลิดา เนียมนัย, สุขทิพย์ สุขใส, อนุกุล วัฒนสุข, กนกภรณ์ ครุฑภาพันธุ์ และ โสรยา เกิดพิบูลย์ (2555). สมบัติเชิงกายภาพบางประการของซูปที่ผลิตจากข้าวกล้องและข้าวฮาง, *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, ปีที่ 43, ฉบับที่ 2 (พิเศษ), พฤษภาคม - สิงหาคม 2012, หน้า 237-240.

- [4] กรณิการ์ ห้วยแสน (2556). วิธีการเตรียมและการอบแห้งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวฮางอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105, *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*, 2556.
- [5] ชัยวัฒน์ ทองวันชัย และเอกราช ตากกระโท, “การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ผลิตข้าวเปลือกอกที่ให้สาร GABA สูง”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, ตุลาคม 2555, จังหวัดเชียงราย
- [6] อธิคม จิรจินดาเลิศ (2546). การนึ่งข้าวกล้องด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
- [7] Saeid, S., Xiaolin, W., Alan D. H. and Ziwen X., (2015). Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 49, September 2015, Pages 517-533.
- [8] วิภาดา ราญมีชัย, พนิดา บุญฤทธิ์ธงชัย, อภิรดี อุทัยรัตน์กิจ และ ทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย(2557). ผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนต่อคุณภาพข้าวฮางอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105, *วารสารวิทยาศาสตร์การเกษตร* 45(2), 2557, หน้า 129-132.
- [9] Vijayaven, k., Sanjairaj , Iniyan, S., and Ranko, G., (2012). A review of solar drying technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, June 2012; Vol 16(5), 2012, 2652-2670.
- [10] Best, R., Soto, W., Pilatowsky, I., and Gutierrez, L.J., (1994). Evaluation of a rice drying system using a solar assisted heat pump, *Renewable Energy*, Volume 5, (1-4), August 1994, Pages 465-468.
- [11] ธวัชชัย ธรรมชั้นแก้ว และ วีระ ฟ้าเฟื่องวิทยากุล (2555). การประเมินสมรรถนะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพื่อใช้กับวัสดุเกษตร, *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13*, เมษายน 2555.



- [12] กิตติ สถาพรประสาน และ ฉัตรชัย นิยมล (2556). อิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบการอบแห้งด้วยเจตสเปาเต็ดเบตเป็นจังหวะ, *KKU Research Journal*, 18(2), 2013; page 325-343.
- [13] Amer, B.M., Hossain, M.A., and Gottschalk, K. (2013). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana, *Energy Conversion and Management*, September 2013.
- [14] สุทธิชัย ภมรสมิต (2550). การศึกษาการอบแห้งเนื้อปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรด, *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*
- [15] มะลิ นาขันสินธุ์, จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และ ชลิตา เนียมมัญญ (2556). Instant Parboiled Germinated Brown Rice (Khao Hom Tong Sakonthawapee) Prepared by Far Infrared Assisted Drying Technique, *The Fifth International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB V)*, กันยายน 2013, Luang Prabang, สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว.
- [16] Chantana, P., Rattanachai, P., Sirinuch, C. and Somchai, M., (2009). Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD), *Food and Bioproducts Processing*, Volume 87 (2), June 2009, Pages 77–86.
- [17] Abe, T., and Afzal. T.M., (1997). Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 67, (4), August 1997, Pages 289–297.



ประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

Efficiency of the Microalgae *Chlorella sp.* TISTR 8432 to CO₂ Capture from Biogas System

ครรชิต เงินคำคง^{1*} นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์¹ สิทธิศักดิ์ แก้วหนัก¹ กฤษณฉัตร เมืองใจ¹ นิตยา ดันติวา²
นันทน์ภัส มโนนนท์² และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kunchit2516@rmutl.ac.th, 08-6184-7248, 0-5392-1444 ต่อ 2441

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่ายในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ผ่านการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* TISTR 8432 ในถังไบโอรีแอคเตอร์ปริมาตร 5 ลิตร ด้วยอาหารสูตร JM ที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ หลังจากการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 16 วัน ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm การเจริญของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าที่อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.589 ± 0.11 ต่อวัน และมวลสาหร่ายสูงสุด $2,800 \pm 100.00$ มก./ล. ประสิทธิภาพในการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ $97.48 \pm 0.31\%$ สัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ออกจากระบบมีปริมาณมีเทนสูงขึ้นไปเป็น $73.57 \pm 0.81\%$ และสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ $21.60 \pm 1.35\%$

คำสำคัญ คลอเรล TISTR 8432 การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซชีวภาพ

Abstract

The purpose of this research was to study the efficiency of microalgae in capturing CO₂ from the desulfurized biogas. *Chlorella sp.* TISTR 8432 was cultivated in working volume 5 liters bioreactor with Jaworski's medium (JM) at 0.05, 0.10 and 0.15 vvm biogas system flow rates, respectively. After 16 days, the results showed that at 0.05 vvm biogas system flow rate, the growth of algae and CO₂ capture efficiency were better than at 0.10 and 0.15 vvm biogas system flow rates with the maximum specific growth rate was 0.589 ± 0.11 day⁻¹, and the biomass productivity was $2,800 \pm 100.00$ mg/L. The maximum CO₂ capture efficiencies was $97.48 \pm 0.31\%$. The CH₄ increased up to $73.57 \pm 0.81\%$ in biogas effluent, and the maximum enrichment of CH₄ was $21.60 \pm 1.35\%$.

Keywords: *Chlorella sp.* TISTR 8432, CO₂ capture, Biogas

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของโลก คือ ปัญหาทางด้านภาวะโลกร้อน (global warming) หรือภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (climate change) โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยสาเหตุหลักเกิดจากก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases) ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) และไฮโดรฟลูโอโรคาร์บอน (CFC-12) เป็นต้น แต่สาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในชั้นบรรยากาศของโลก การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าว มีสาเหตุสำคัญมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยทั่วไปก๊าซที่เกิดจากการ

เผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จะประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 10-20% [1] ซึ่งมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential; GWP) ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้ ถือเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ จึงมีการศึกษาวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ถือว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน ใช้ก๊าซ



คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสงและเป็นสารอาหารหลัก เพื่อการเติบโตและสร้างมวลสาหร่าย จึงเป็นวิธีที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [2] ก๊าซชีวภาพ (biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน โดยทั่วไปจะหมายถึง ก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักของสารอินทรีย์ โดยกระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในหลุมขยะ กองมูลสัตว์ และก้นบ่อแหล่งน้ำนิ่ง กล่าวคือ เมื่อไร้ก็ตามที่มีสารอินทรีย์หมักหมมกันเป็นเวลานานก็อาจเกิดก๊าซชีวภาพได้ [3] ก๊าซชีวภาพจัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ประโยชน์ ไม่ว่าจะนำไปใช้งานรูปของพลังงานความร้อน การเปลี่ยนเป็นพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรม ปศุสัตว์ และเกษตรอุตสาหกรรม จึงมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจำนวนมาก ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจะเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้เป็นอย่างดี ก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) 50–70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 30–40% ส่วนที่เหลือจะเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ ซึ่งก๊าซมีเทนสามารถจุดติดไฟได้ ใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ได้ [4] ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หากยังไม่มีการจัดการที่ดี จะทำให้เกิดการสะสมของก๊าซเรือนกระจกเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในบรรยากาศสูงขึ้นตามมา

ดังนั้น ควรหาวิธีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ หรือการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง [5] โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเป็นผลให้ก๊าซชีวภาพมีค่าความร้อนสูงขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติ ที่เรียกว่า ไบโอมีเทน (biomethane) การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยน้ำ (water scrubbing method) การดูดซับด้วยแบบสลับแรงดัน (pressure swing adsorption method) การดักจับด้วยสารเคมี (chemical scrubbing method) และการแยกชั้นด้วยเมมเบรน (membrane separation method) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีจะใช้พลังงานที่สูง และต้องใช้เงินลงทุนจำนวนมาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น [6] ด้วยเหตุนี้ การศึกษาวิธีปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ สาหร่ายหลายสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เช่น สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึง 97.07% [7] และ 82.50–99% [8] ด้วยกัน ส่วนสาหร่ายสายพันธุ์ *Spirulina maxima* มีประสิทธิภาพในลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 98% [9] จาก

ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายมีศักยภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางในปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ต้นทุนต่ำ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 สารเคมีและวัสดุ

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษาสายพันธุ์ *Chlorella* sp. TISTR 8432 ได้รับมาจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกชนิดเป็น Analytical Reagent (AR)

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายและการเพิ่มปริมาณ

นำหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Jaworski's medium (JM) โดยใช้หัวเชื้อเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 0.5 จำนวน 2% โดยปริมาตร มาถ่ายลงถังขนาด 50 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว ปริมาตร 40 ลิตร เพื่อทำการเพิ่มปริมาณสาหร่าย โดยให้แสงจากหลอดไฟสีส้ม (warm white light) ความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ (4 in 1 Multi-function environmental meter model ST-8820) โดยให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง และเติมอากาศจากปั๊มเติมอากาศที่อัตราการเติม 30 ลิตรต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงสาหร่ายจนมีค่าการดูดกลืนแสง (Optical density : OD_{560}) โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer (HACH model DR/4000U; USA) อยู่ในช่วง 0.3–0.5 เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการทดลองขั้นต่อไป

2.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณ CO_2 จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm

2.2.2.1 การเตรียมระบบผลิตก๊าซชีวภาพเตรียมระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังหมักขนาด 200 ลิตร วันแรกเติมน้ำมูลสุกร (หัวเชื้อ) 100 ลิตร ลงในถังหมัก และเติมมูลสุกร 20 ลิตร (โดยชั่งมูลสุกร 800 กรัม ละลายน้ำให้ครบ 20 ลิตร) เติมน้ำลงในถังหมัก และวันที่ 2–5 เติมนูลสุกร 20 ลิตร ทุกวันจนครบ 5 วัน ตั้งไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้เกิดก๊าซ และสร้างระบบเก็บก๊าซชีวภาพแบบแทนที่น้ำที่ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำขนาด 200 ลิตร และถังบรรจุก๊าซขนาด 160 ลิตร ต่อท่อก๊าซจากถังหมักเข้าสู่ถังบรรจุก๊าซเพื่อให้อากาศชีวภาพที่เกิดขึ้นไหลมาเก็บยังถังเก็บ หลังจากนั้นต่อจากถังเก็บเข้าสู่ชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำขึ้นมาจากผงซีลิก (H₂S>100 ppm) โดยใช้เครื่อง peristaltic pump (Watson marlow model 502S; UK) (รูปที่ 1)

2.2.2.2 นำหัวเชื้อสาหร่ายที่ได้จากข้อ 2.2.1 มาถ่ายลงในถังไบโอรีแอक्टरขนาด 10 ลิตร ปริมาตรทำการ 5 ลิตร



(ทำการทดลอง 3 ขั้ว) มาทำการศึกษา โดยเติมก๊าซชีวภาพจากถังเก็บที่อัตราการไหล 0.05 vvm ตลอดเวลาการทดลอง โดยใช้เครื่อง peristaltic pump ในการดูจ่ายปริมาณก๊าซชีวภาพ โดยให้แสงไฟจากหลอดไฟสีส้ม ค่าความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ และให้อากาศจากปั๊มเติมอากาศที่อัตราการเติม 30 ลิตรต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 วัน และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วัน หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำเติมและเปลี่ยนอัตราการเติมก๊าซชีวภาพจาก 0.05 เป็น 0.10 และ 0.15 vvm โดยทำการวิเคราะห์ดังนี้

1) การเจริญเติบโตของสาหร่ายในรูปค่ามวลสาหร่าย [10] และในรูปอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate; μ) โดยนำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณ เพื่อคำนวณการเจริญเติบโตของสาหร่ายซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1 [11]

$$\mu = \ln(N/N_0) / t \quad (1)$$

เมื่อ

- μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (วัน⁻¹)
 N = มวลสาหร่ายวันเก็บตัวอย่าง (มก./ล.)
 N_0 = มวลสาหร่ายเริ่มต้น (มก./ล.)
 t = เวลา (วัน)

2) ค่าความเป็นกรดต่าง โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (ohaus model starter 3100; USA)

3) ศึกษาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 โดยวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าถัง และหลังจากออกจากถังไบโอรีแอคเตอร์ โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ (geotech model Biogas 5000; UK) แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 คำนวณได้จากสมการที่ 2 [12]

$$CO_2 \text{ capture efficiency (\%)} = \frac{\text{Influent of } CO_2 - \text{Effluent of } CO_2}{\text{Influent of } CO_2} \times 100 \quad (2)$$

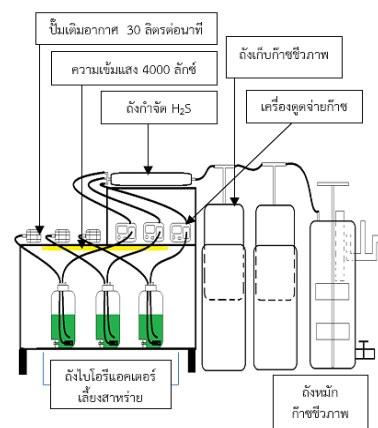
4) เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3 [12]

$$CH_4 \text{ enrichment (\%)} = \frac{\text{Influent of } CH_4 - \text{Effluent of } CH_4}{\text{Influent of } CH_4} \times 100 \quad (3)$$

3. ผลการทดลองและอภิปราย

จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm

ผลการศึกษาพบว่า ชุดทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm สำหรับเจริญได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ชุดทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ โดยมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.82 ± 0.06 - 7.40 ± 0.00 , 6.42 ± 0.06 - 7.40 ± 0.00 และ 6.30 ± 0.05 - 7.40 ± 0.00 ตามลำดับ (รูปที่ 2) โดยค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.589 ± 0.11 , 0.405 ± 0.00 และ 0.347 ± 0.00 ต่อวัน ตามลำดับ (รูปที่ 3) มีมวลสาหร่ายสูงสุด $2,800 \pm 100.00$, $2,100 \pm 100.00$ และ $1,300 \pm 100.00$ มก./ล. ตามลำดับ (รูปที่ 4) ส่วนชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.15 vvm ในวันแรกๆ ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าลดต่ำลงมาก เป็นเพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่เติมลงไปมีปริมาณมาก ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดต่ำลง เมื่อสาหร่ายปรับตัว (lag phase) เข้ากับสภาวะได้และเข้าสู่ช่วงเจริญเติบโต (exponential phase) จึงมีความต้องการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง เมื่อสาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์หมดไปสาหร่ายจะดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) มาเป็นคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าความเป็นกรดต่างค่อยๆ เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ทำการศึกษถึงผลของการเติมก๊าซชีวภาพลงในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. MM-2 พบว่าเมื่อเติมก๊าซชีวภาพลงไปค่าความเป็นกรดต่างลดลงจาก 8.50 มาอยู่ที่ 6.50 เมื่อหยุดเติมค่าความเป็นกรดต่างค่อยๆ เพิ่มขึ้น [12] ส่วนสาหร่าย *Chlorella* sp. MTF-7 เมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพลงไปค่าความเป็นกรดต่างลดลงจากช่วง 7.90-8.20 มาอยู่ที่ 6.30-6.50 [13] และสาหร่าย *Spirulina platensis* เมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพลงไปพบว่าค่าความเป็นกรดต่างลดลงจาก 9.60 มาอยู่ที่ 7.00 [14]

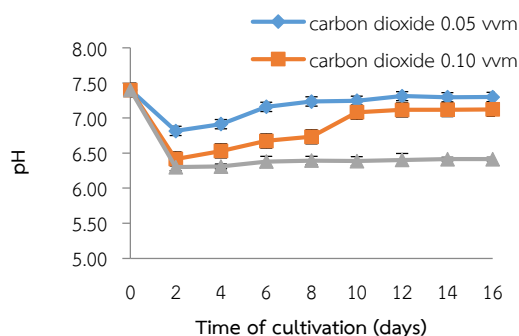


รูปที่ 1 แผนภาพอธิบายขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

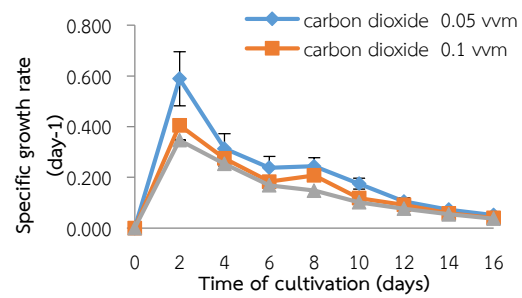


จากการศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่าง และมวลสาหร่ายในชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพในอัตราการใช้ 0.05 vvm พบว่าในวันที่ 8 สำหรับ *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีมวลสาหร่ายมากที่สุด และค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 7.24 ± 0.02 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 เจริญเติบโตได้ดีที่มีสภาวะความเป็นกรดต่างที่ 7.24 ± 0.02 โดยทั่วไป สำหรับ *Chlorella* sp. เติบโตได้ดีในค่าความเป็นกรดต่างช่วงกว้าง และสามารถเติบโตในช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่มีสภาวะเป็นกรดเล็กน้อยจนถึงกลาง ค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายบางสายพันธุ์ เช่น *Chlorella vulgaris* คือ 6.30 [15] สำหรับ *Chlorella* sp. คือ 6.70 [16] สำหรับ *Chlorella homishpaera* คือ 6.00 [17] และสำหรับ *Chlorella minutissima* คือ 6.00 [18]

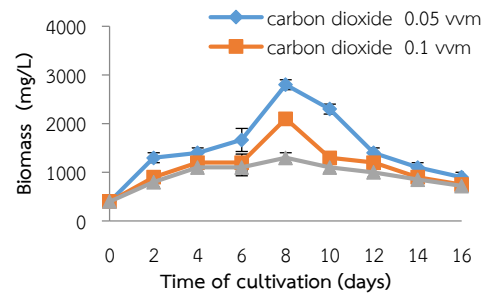
จากการศึกษา พบว่าค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการใช้ 0.05 vvm มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการใช้ 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ และทุกชุดการทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดในวันที่ 2 แสดงว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในทุกชุดการทดลองมีการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ จึงทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีการเจริญเติบโตได้ดีเมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(N/N_0)$ กับค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 (รูปที่ 5) พบว่าการเติมก๊าซชีวภาพลงไปในน้ำทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นสาหร่ายจะเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตช้าลง และเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตหยุดนิ่งทำให้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและค่า $\ln(N/N_0)$ ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารอาหารที่ลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย



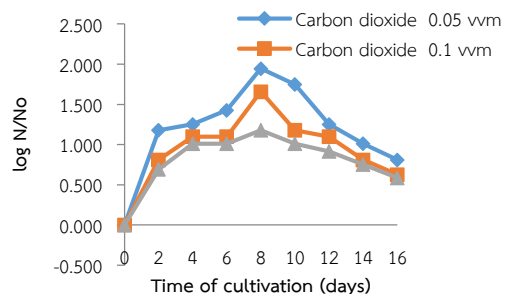
รูปที่ 2 ผลของก๊าซชีวภาพต่อค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



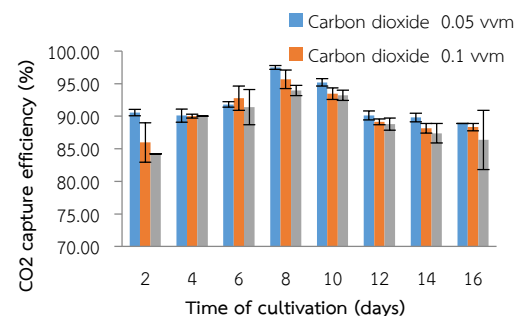
รูปที่ 3 ผลของก๊าซชีวภาพต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



รูปที่ 4 ผลของก๊าซชีวภาพต่อมวลสาหร่าย (Biomass) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลของก๊าซชีวภาพที่อัตราการใช้ต่างกันต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432



ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการลดของสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนก๊าซมีเทน และผลของก๊าซชีวภาพต่ออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432

Gas flow rate	0.05 vvm	0.10 vvm	0.15 vvm
Influent of CO ₂ (%)	18.50 ± 1.15	18.50 ± 0.41	18.20 ± 0.22
Effluent of CO ₂ (%)	0.47 ± 0.06	0.80 ± 0.26	1.10 ± 0.17
Efficiency of maximum CO ₂ capture (%)	97.48 ± 0.31 ^a	95.68 ± 1.43 ^b	93.96 ± 0.95 ^b
Influent of CH ₄ (%)	60.50 ± 0.50 ^a	63.00 ± 1.00 ^b	62.67 ± 1.70 ^b
Effluent of maximum CH ₄ (%)	73.57 ± 0.81 ^b	72.33 ± 0.58 ^b	68.33 ± 0.58 ^a
Enrichment of maximum CH ₄ (%)	21.60 ± 1.35 ^a	14.81 ± 0.92 ^b	9.04 ± 0.92 ^c
Maximum specific growth rate (day ⁻¹)	0.589 ± 0.11 ^a	0.405 ± 0.00 ^b	0.347 ± 0.00 ^c

หมายเหตุ: อักษร a, b และ c ที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p<0.05) โดยวิธี Tukey and Duncan

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนในอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05, 0.10 และ 0.15 vvm

		Time of cultivation (days)							
		2	4	6	8	10	12	14	16
Gas flow rate 0.05 vvm									
Influent of CO ₂ (%)	21.20 ± 1.14	19.80 ± 1.51	18.50 ± 2.31	18.50 ± 1.15	21.10 ± 1.50	16.50 ± 1.54	14.70 ± 0.80	9.00 ± 1.18	
Effluent of CO ₂ (%)	2.00 ± 1.00	1.97 ± 0.21	1.53 ± 0.06	0.47 ± 0.06	0.97 ± 0.12	1.63 ± 0.12	1.50 ± 0.10	1.00 ± 0.00	
Efficiency of CO ₂ mitigation (%)	90.57 ± 0.47	90.07 ± 1.05	91.81 ± 0.42	97.48 ± 0.31	95.42 ± 0.55	90.10 ± 0.70	89.80 ± 0.68	88.89 ± 0.00	
Influent of CH ₄ (%)	40.00 ± 0.25	60.70 ± 1.25	61.70 ± 0.26	60.50 ± 0.50	57.50 ± 0.70	41.40 ± 1.97	39.70 ± 1.47	25.40 ± 1.22	
Effluent of CH ₄ (%)	43.00 ± 1.00	66.87 ± 0.55	71.20 ± 0.82	73.57 ± 0.81	64.50 ± 1.30	45.30 ± 0.75	42.83 ± 1.40	27.40 ± 0.75	
Enrichment of CH ₄ (%)	7.50 ± 2.50	9.83 ± 1.83	15.40 ± 1.33	21.60 ± 1.35	12.17 ± 2.26	9.42 ± 1.82	7.84 ± 3.54	7.87 ± 2.97	
Gas flow rate 0.10 vvm									
Influent of CO ₂ (%)	19.00 ± 0.82	19.67 ± 0.47	19.33 ± 0.47	18.50 ± 0.41	19.87 ± 0.26	16.13 ± 0.26	13.50 ± 0.51	10.00 ± 0.15	
Effluent of CO ₂ (%)	2.67 ± 0.58	1.97 ± 0.06	1.40 ± 0.36	0.80 ± 0.26	1.30 ± 0.17	1.77 ± 0.06	1.60 ± 0.10	1.17 ± 0.06	
Efficiency of CO ₂ mitigation (%)	85.96 ± 3.04	90.00 ± 0.29	92.76 ± 1.87	95.68 ± 1.43	93.46 ± 0.87	89.05 ± 0.36	88.15 ± 0.74	88.33 ± 0.58	
Influent of CH ₄ (%)	42.17 ± 3.01	57.00 ± 4.36	62.67 ± 1.70	63.00 ± 1.00	62.67 ± 0.47	40.30 ± 0.98	39.00 ± 0.10	26.00 ± 1.12	
Effluent of CH ₄ (%)	43.33 ± 0.58	62.00 ± 1.00	70.00 ± 2.08	72.33 ± 0.58	71.47 ± 0.50	45.30 ± 0.75	41.67 ± 0.58	27.33 ± 0.58	
Enrichment of CH ₄ (%)	2.76 ± 1.37	8.77 ± 1.75	11.16 ± 3.32	14.81 ± 0.92	14.04 ± 0.80	12.41 ± 1.87	6.84 ± 1.48	5.13 ± 2.22	
Gas flow rate 0.15 vvm									
Influent of CO ₂ (%)	19.00 ± 0.00	20.00 ± 0.00	19.67 ± 1.25	18.20 ± 0.22	19.67 ± 0.47	16.33 ± 0.47	14.00 ± 0.65	11.00 ± 0.75	
Effluent of CO ₂ (%)	3.00 ± 0.00	2.00 ± 0.20	1.67 ± 0.58	1.10 ± 0.17	1.30 ± 0.17	1.83 ± 0.15	1.77 ± 0.21	1.50 ± 0.50	
Efficiency of CO ₂ mitigation (%)	84.21 ± 0.00	90.00 ± 0.00	91.53 ± 2.94	93.96 ± 0.95	93.39 ± 0.88	88.77 ± 0.94	87.38 ± 1.49	86.36 ± 4.55	
Influent of CH ₄ (%)	42.00 ± 1.00	56.00 ± 3.61	62.67 ± 0.94	62.67 ± 1.70	62.00 ± 1.00	40.47 ± 0.81	38.00 ± 0.55	25.00 ± 0.92	
Effluent of CH ₄ (%)	43.67 ± 0.58	58.00 ± 1.00	68.00 ± 1.53	68.33 ± 0.58	62.33 ± 0.58	43.67 ± 1.53	40.33 ± 1.73	25.67 ± 0.58	
Enrichment of CH ₄ (%)	3.97 ± 1.37	3.57 ± 1.79	9.04 ± 2.44	9.04 ± 0.92	0.54 ± 0.93	7.90 ± 3.77	5.26 ± 4.56	2.67 ± 2.30	

จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 6 และ ตารางที่ 1 และ 2) ผลการศึกษา พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีประสิทธิภาพที่สุด

รองลงมาคือชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 vvm ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 97.48 ± 0.31, 95.68 ± 1.43 และ 93.96 ± 0.95% ตามลำดับ สัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ออกจากระบบมีปริมาณก๊าซ



มีเทนสูงขึ้นเป็น 73.57 ± 0.81 , 72.33 ± 0.58 และ $68.33 \pm 0.58\%$ ตามลำดับ และสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 21.60 ± 1.35 , 14.81 ± 0.92 และ $9.04 \pm 0.92\%$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในชุดการทดลองที่เติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีประสิทธิภาพดีที่สุดพบว่า เมื่อสาหร่ายมีการเจริญเติบโตเต็มที่ จะเกิดการสังเคราะห์แสงได้ดี ส่งผลให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงขึ้น โดยพบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ระหว่าง 88.89 ± 0.00 - $97.48 \pm 0.31\%$ ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงขึ้น โดยพบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ระหว่าง 88.89 ± 0.00 - $97.48 \pm 0.31\%$ ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

4. สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน พบว่าผลของอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm มีอัตราการเจริญของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.10 และ 0.15 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 80% ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากเดิม 70% เป็น 87% โดยมีอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.1 vvm และเมื่อเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.3 vvm สาหร่าย *Chlorella* sp. MM-2 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดถึง 74% ปริมาณก๊าซมีเทน เพิ่มขึ้นสูงสุด 85.5% [12] สาหร่าย *Chlorella* sp. MB-9 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 86.3% และมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 85-90% โดยมีอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm และเมื่อเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. MB-9 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 80.3% และมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นสูงสุด 88.3% เมื่อมีการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหลมากขึ้นประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนจะลดลง [21] จากการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ค่อยๆ ลดลง เนื่องจากปริมาณสารอาหารเริ่มลดลงในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และ

ประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 สอดคล้องกับ รายงานวิจัยของ Chan (2011) ที่สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 98% และรายงานวิจัยของ Kao *et al.*, (2012) สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 86.3% เมื่อใช้อัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหล 0.05 vvm เท่ากัน แสดงว่าอัตราการเติมก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหลเท่ากัน แต่ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับได้ผลที่ต่างกัน อาจเป็นเพราะปัจจัยอื่น เช่น สายพันธุ์สาหร่าย ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ และองค์ประกอบของถังไบโอรีแอคเตอร์ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงสภาพอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศ จึงทำให้การทดลองมีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายดังกล่าว จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนการสนับสนุนจากโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์และงานบริการสู่ชุมชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Xinahai, Z., Micchael, K.D., Shiduo, Z., Xia, Z., Mengyang, W., Xiao, D.C., I-Son, N., Keju, J. and Yinghua, L. (2012). Autotrophic cultivation of *Spirulina patensis* for CO₂ fixation and phycocyanin production, *Chemical Engineering*, vol. 183, December 2011, pp. 192-197.
- [2] Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources, *Energy Conversion and Management*, vol. 51, December 2010, pp. 2738-2749.
- [3] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม (2553). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [4] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2556). เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ และการนำไปใช้ประโยชน์, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา



- http://biogas.erdia.or.th/biogasTech_sub_adv.php.
 เข้าดูเมื่อวันที่ 3/09/2556.
- [5] นุชนาถ แซ่ม้อย (2557). สำหรับรายขนาดเล็ก : การเพาะเลี้ยงและการนำมาใช้ประโยชน์, *วารสาร มจร. วิชาการ*, 17(34), มก-มย. 2557, หน้า 169-183.
- [6] Zhao, Q., E. Leonhardt, C. MacConnell, C. Frear and S. Chen. (2010). Purification technologies for biogas generated by anaerobic digestion, *CSANR Research Report 2010*.
- [7] Mann, G., Schlegel, M. Schumann, R. and Sakalauskas, A. (2009). Biogas-condition with Microalgae, *Agronomy Research*, vol. 7(1), pp. 33-38.
- [8] Man, K.L. and Keat, T.L. 2013. Effect of carbon source towards the growth of *Chlorella vulgaris* for CO₂ bio-mitigation and biodiesel production, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 14, February 2013, pp. 169-176.
- [9] Chan, A. (2011). Use of microalgae in wastewater treatment to remove contaminants and purify biogas. Ph.D. The University of Guelph, Canada. 136p.
- [10] Toledo-Cervantes, A, Morales, M., Novelo, E. and Revah, S. (2013). Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*, *Bioresource Technology*, vol. 130, December 2012, pp. 652-658.
- [11] Vonshak, A. (1986). *Microalgae: Laboratory Growth Techniques and Outdoor Biomass Production*, In Coombs, J. , Hall , D.O., Long , S.P. and Scurlock , J.M.O. (eds.). *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. 2nd Pergamon Press.
- [12] Kao, C-Y., Chiu, S-Y., Huang, T-T., Dai, L., Hsu L-K. and Lin, C-S. (2012). Ability of a mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide capture for biogas upgrading, *Applied Energy*, vol. 39, January 2012, pp. 76-183.
- [13] Chiu, S-Y., Kao, C-Y., Huang, T-T., Lin, C-J., Ong, S-C., Chen, C-D., Chang, J-S. and Lin, C-S. (2011). Microalgal biomass production and on site bioremediation of carbondioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures, *Bioresource Technology*, vol. 102, July 2011, pp. 9135-9142.
- [14] Sumardiono, S., Yono, B., Syaichurrozi, I. and Sasongko, S.B. (2014). Utilization of biogas as carbon dioxide provider for *Spirulina platensis* culture, *Biological Sciences*, vol. 6(1), January 2014, pp. 53-59.
- [15] Malis-Arad, S. and McGowan, R. E. (1982). Alkalinity-induced aggregation in *Chlorella vulgaris* II changes in the cell wall during the cell cycle, *Plant and Cell Physiology*, vol. 23(1), September 1982, pp. 11-17.
- [16] ผกาวดี แก้วกันเนตร และพนิดา รัตนพลที (2551). ศักยภาพการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก, *วารสารศูนย์บริการวิชาการ*, 16(1), มกราคม 2551, หน้า 9-13.
- [17] Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture, biotechnology and applied phycology*, USA : Blackwell Publishing.
- [18] Sankar, V., Daniel, D.K. and Krastanov, A. (2011). Carbon dioxide fixation by *Chlorella minutissima* batch cultures in a stirred tank bioreactor, *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, vol. 25(3), April 2014, pp. 2468-2476.
- [19] Serejo, M.L., Olmos, E.P., Boncz, M., Blanco, S., Garcia-Encina, P.A. and Munoz, R. (2015). Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial process, *Environmental Science & Technology*, vol. 49(5), February 2015, pp. 3228-3244.
- [20] Tongprawhan, W., Srinuanpan, S. and Cheirsilp, B. (2014). Biocapture of CO₂ from biogas by Oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid, *Bioresource Technology*, vol. 170, August 2014 pp. 90-99.



- [21] Kao, C-Y., Chiu, S-Y., Huang, T-T., Dai, L., Wang, G-H., Tseng, C-P., Chen, C-H. and Lin, C-S. (2012). A mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. for the carbon dioxide capture from biogas, *Biomass and Bioenergy*, vol. 36, November 2011, pp. 132-140.



การประยุกต์ใช้พีแอลซีในการควบคุมเครื่องบดถั่วเหลืองให้ทำงานโดยอัตโนมัติ Soybean Grinding Machine for Automatic Purpose by PLC Application

น้ามนต์ โชติวิศรุต^{1*} ประพันธ์ วัฒนศิริโชติ¹ และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์²

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*ผู้รับผิดชอบบทความ: nammont4426409@hotmail.com โทรศัพท์ 085-866-9848

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องบดถั่วเหลืองจากเดิมที่ทำงานเป็นแบบแมนนวลให้ทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งเดิมทีเครื่องบดถั่วเหลืองแบบแมนนวลนั้นต้องใช้นักปฏิบัติงานอยู่ตลอดเวลาเวลาที่เครื่องทำงาน การพัฒนาเครื่องบดถั่วเหลืองให้ทำงานแบบอัตโนมัตินั้นจะควบคุมการชั่งน้ำหนักถั่วเหลือง ปริมาณน้ำและเวลาในการแช่ถั่วเหลือง ปริมาณการฉีดน้ำผสมในขณะที่บดถั่วเหลือง การหมุนของมอเตอร์ให้ทำงานและหยุดด้วยตัวเองเมื่อถึงเวลาที่กำหนด ตลอดจนการฉีดน้ำล้างทำความสะอาดหน้าหินบด เครื่องบดถั่วเหลืองที่พัฒนาขึ้นมานี้จะควบคุมอัตราส่วนระหว่างเม็ดถั่วเหลืองตั้งต้นกับน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการบดอยู่ที่ 1.0 กิโลกรัมต่อ 5.0 กิโลกรัม เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการผลิตถั่วเหลืองบด โดยได้มีการชั่งน้ำหนักเม็ดถั่วเหลืองตั้งต้นก่อนบดและถั่วเหลืองที่ผ่านการบดแล้วเพื่อทำการคำนวณหาอัตราส่วนดังกล่าวเป็นการพิสูจน์ยืนยันความเชื่อถือได้ของระบบควบคุมอัตโนมัติ เครื่องบดถั่วเหลืองนั้นใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 0.5 แรงม้า เป็นอุปกรณ์ต้นกำลัง โดยใช้สายพานอัตราทด 1:1 ส่งกำลังงานโดยใช้สายพานลิ่มเพื่อใช้ขับเคลื่อนหินบดขนาดของหินบดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร โดยใช้ปั๊มน้ำและถังเก็บน้ำเป็นตัวจ่ายน้ำให้กับระบบซึ่งควบคุมด้วยสวิตช์ความดันและมีโซลินอยด์วาล์ว 3 ตัว คอยควบคุมการจ่ายน้ำ การควบคุมจะเป็นการควบคุมระบบการทำงานด้วยพีแอลซีทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลและสั่งการไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มปล่อยถั่วเหลืองจนกระทั่งได้ถั่วเหลืองบดในที่สุด จากการทดสอบการทำงาน of เครื่องเมื่อใส่เม็ดถั่วเหลืองโดยบดเม็ดถั่วเหลืองจากปริมาณ 1.0 กิโลกรัม ถึง 5.0 กิโลกรัม โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 กิโลกรัม นั้นพบว่าเมื่อจับเวลาที่ใช้นในแต่ละการทดสอบแล้วนำมาคำนวณคิดเป็นอัตราการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 7.14 กิโลกรัมของถั่วเหลืองตั้งต้นต่อชั่วโมง โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.7% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการผลิตถั่วเหลืองบดมีค่าเท่ากับ 0.004 กิโลกรัม เครื่องบดเม็ดถั่วเหลืองมีอัตราส่วนระหว่างเม็ดถั่วเหลืองตั้งต้นกับน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการบดอยู่ที่ 1:5.04 ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปผลิตน้ำเต้าหู้เพื่อบริโภค โดยหากใช้เครื่องบดเม็ดถั่วเหลืองนี้ทำงาน 6 ชั่วโมงต่อวัน จะสามารถคืนทุนได้ในเวลา 457 วัน

คำสำคัญ พีแอลซี อัตโนมัติ บด ถั่วเหลือง

Abstract

This project aimed to develop soybean grinding process. An ordinary manual grinding machine was modified to be working automatically. An ordinary soybean grinding machine needed an operator to operate it almost every process. Automatic processes such as soybean weight controlling, soaking water supply and soybean soaking time, grinding water supply, grinding controlling and rinsing water supply for grinding unit were applied for automatic purpose. This unit would control raw soybean to mixing water ratio at desired value to be around 1.0 kg: 5.0 kg in order to maintain the quality of the product. The weight of raw soybean and grinded soybean was monitored to find that ratio to prove reliability of automatic system. Soybean grinding machine had a 1 phase, 0.5 HP. motor as primary driving component. The driving wheel belt ratio was 1:1 to drive a 150 mm. grinding unit. Electric water pump and water tank were used for supplying water to during all process. Three solenoid valves were used to control supply water. An automatic process was archived by using Programmable Logic Controller (PLC). The process started from loading soybean until getting raw soy milk at the end of the process. The testing result when this unit to grind soybean in the amount of 1.0 to 5.0 kg. with 0.5 kg. increment showed that the grinding rate was around 7.14 kg. of raw soybean an hour with error around 0.7% and standard deviation of 0.004 kg. of grinded soybean. The grinded soybean have average raw soybean to mixing water ratio of about 1:5.04 which was appropriate for consumption. To operate this automatically grinding machine in full capacity, 6 working hours per day, would get the breakeven point in 457 days.

Keywords: PLC, Automatic, Grinding, Soybean

1. บทนำ

ถั่วเหลือง (Soybean) [1] เป็นพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสมสำหรับปลูกสลับกับการปลูกข้าว การปลูกถั่วเหลืองในประเทศไทยจะปลูกแถบภาคเหนือและภาคกลางตอนบน คุณค่าทางโภชนาการของถั่วเหลืองนั้นมีทั้งโปรตีน เลซิทีน ไขมัน กรดอะมิโน แคลเซียม ฟอสฟอรัส ธาตุเหล็ก ไนอะซิน วิตามินบี 1, วิตามินบี 2, วิตามิน A และวิตามิน E ทำให้ถั่วเหลืองสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของกระดูก ป้องกันการขาดแคลเซียมในกระดูกและบำรุงระบบประสาทในสมอง และหากรับประทานเป็นประจำจะช่วยป้องกันโรคหลอดเลือดแข็งตัว โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจและโรคเบาหวาน ถั่วเหลืองจึงได้รับการขนานนามว่า "ราชาแห่งถั่ว"

การแปรรูปถั่วเหลือง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลายขึ้น ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่จำหน่ายในท้องตลาดแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่ผ่านการหมักและไม่ผ่านการหมัก ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่ผ่านการหมัก เช่น ถั่วเน่า ซอสถั่วเหลือง เต้าเจี้ยว เป็นต้น ส่วนผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองไม่ผ่านการหมัก เช่น นมถั่วเหลือง ถังอกและน้ำเต้าหู้ เป็นต้น น้ำเต้าหู้หรือนมถั่วเหลืองมีคุณค่าทางโภชนาการเทียบเท่านม แต่สัดส่วนของเหล็กในน้ำเต้าหู้มากกว่านมถั่วเหลืองถึง 1.6 เท่า นอกจากนั้นน้ำเต้าหู้ยังมีโปรตีน 1.8 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นโปรตีนจากพืชที่มีคุณภาพดีมาก และจากผลการทดลองพบว่าร่างกายสามารถย่อยและดูดซึมน้ำเต้าหู้ได้กว่า 90% ซึ่งสูงกว่าถั่วเหลืองต้มถึง 25% น้ำเต้าหู้จึงเป็นแหล่งโปรตีนชั้นดีสำหรับผู้ที่ไม่บริโภคเนื้อสัตว์ ส่วนผู้ที่บริโภคเนื้อสัตว์ก็สามารถดื่มน้ำเต้าหู้เป็นอาหารเสริมได้ เพราะถั่วเหลืองที่นำมาทำน้ำเต้าหู้นั้นมีโปรตีนสูง และมีคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ ปัจจุบันการผลิตน้ำเต้าหู้มีกรรมวิธีในการผลิตอยู่ 2 ลักษณะ คือ เครื่องที่ใช้ใบมีดในการทำให้เม็ดถั่วเหลืองละเอียด และเครื่องที่ใช้หินในการบดทำให้เม็ดถั่วเหลืองละเอียด เครื่องที่ใช้ใบมีดนั้นจะมีข้อเสีย คือ ถั่วเหลืองที่ได้จากการปั่นจะมีความละเอียดไม่เท่ากัน ต้องใช้น้ำในการปั่นมาก และใช้ความเร็วรอบสูงในการปั่น (2,500-3,000 รอบ/นาที) ในขณะที่เครื่องที่ใช้หินในการบดนั้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ถั่วเหลืองที่ได้จากการบดจะมีความละเอียดเท่ากัน และสามารถปรับตั้งความละเอียดได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนความเร็วรอบของตัวแผ่นหินหรือมอเตอร์ นอกจากนั้นยังใช้น้ำในการบดน้อยและใช้ความเร็วรอบในการบดไม่สูง (1,450-2,000 รอบ/นาที)

แต่เครื่องที่ใช้หินในการบดนั้นมีข้อเสียคือ จะมีเม็ดถั่วเหลืองติดอยู่ตามขอบกรวยที่อยู่ด้านบนของหินบด ดังแสดงในรูปที่ 2 ในการทำให้เม็ดถั่วเหลืองที่ติดอยู่ตามขอบกรวยไหลลงไปยังหินบด ผู้ควบคุมเครื่องจะต้องใช้น้ำราดบริเวณขอบด้านในของกรวยเพื่อทำการชะล้างลงไป นอกจากนี้เครื่องที่ใช้หินในการบดยังพบปัญหาการไหลของน้ำไม่เหมาะสม ทำให้เม็ดถั่วเหลืองติดอยู่ตรงหน้าของหินบด ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำให้

ต้องคอยควบคุมปริมาณการไหลของน้ำให้เหมาะสม โดยการปรับปริมาณการไหลของน้ำที่ออกจากแท่งน้ำด้วย



รูปที่ 1 เครื่องที่ใช้หินในการบดทำให้เม็ดถั่วเหลืองละเอียด



รูปที่ 2 เม็ดถั่วเหลืองติดอยู่ตามขอบของกรวย



รูปที่ 3 เศษถั่วติดอยู่ตรงหน้าหินบด

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ธนากรและอนุชา [2] ได้สร้างเครื่องทำน้ำดื่ม แต่เครื่องจะทำงานได้เป็นอย่างดีแต่ยังไม่มียระบบควบคุมโดยอัตโนมัติ โดยธนบูรณ์, สุรวิทย์และอนุชิต [3] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องหยอดข้าวกล้องอัตโนมัติที่ยังต้องใช้แรงงานมนุษย์ในการควบคุมเครื่องจักรอยู่ และพงษ์ศิริและพลรัตน์ [4] ได้นำพีแอลซีมาใช้ควบคุมเครื่องอัดกระดาษอัตโนมัติซึ่งทำงานด้วยระบบนิวเมติกส์ ซึ่งแม้ว่าเครื่องจะทำงานได้เป็นอย่างดีแต่ก็ยังคงมีการปรับตั้งค่าของไทเมอร์ของโปรแกรมอยู่ จะเห็นได้เครื่องจักรที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันยังมีจำนวนมากที่ไม่เป็นอัตโนมัติ หรือแม้จะเป็นอัตโนมัติก็ยังคงมีการปรับตั้งค่าไทเมอร์ในตัวโปรแกรมอยู่ ดังนั้นโครงการนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อแก้ปัญหาเม็ดแก้วเหลืองที่ติดอยู่ตามขอบกรวยและการไหลของน้ำที่ไม่เหมาะสม โดยกรณีเม็ดแก้วเหลืองที่ติดอยู่ตามขอบกรวยจะใช้ พีแอลซี ควบคุมการฉีดน้ำไปที่ผิวด้านในของกรวย เพื่อให้เม็ดแก้วเหลืองไหล ส่วนการแก้ปัญหากรณีการไหลของน้ำที่ไม่เหมาะสมนั้นจะปรับเปลี่ยนโดยจากเดิมที่ใช้แท่งน้ำที่ติดอยู่ด้านบนของเครื่องเป็นการต่อน้ำจากก๊อกน้ำโดยตรงโดยใช้ พีแอลซีในการควบคุมปริมาณการฉีดน้ำจากการแก้ปัญหาเม็ดแก้วเหลืองที่ติดตามขอบกรวยและการไหลของน้ำที่ไม่เหมาะสม ทำให้เครื่องบดเม็ดแก้วเหลืองที่มีการทำงานแบบแมนนวลเป็นการทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนและเวลาในการทำงาน และไม่ต้องปรับตั้งค่าไทเมอร์ของระบบควบคุมแต่อย่างใด

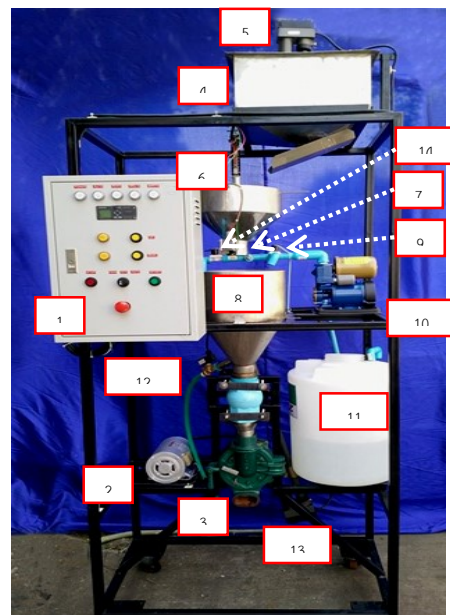
2. ทฤษฎีการทำงานของเครื่องบดแก้วเหลืองที่ทำการประยุกต์ใช้พีแอลซี (Programmable Logic Controller, PLC) เพื่อควบคุมให้ทำงานโดยอัตโนมัติ

โครงการวิจัยนี้เลือกใช้พีแอลซียี่ห้อ Siemens ในรุ่น LOGO series, มอเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ Mitsubishi รุ่น SC-KR 1/2 HP 4P และใช้โซลินอยด์วาล์วยี่ห้อ ASCO แบบ 2/2 DC24V จำนวน 3 ตัว สำหรับการควบคุมโดยอัตโนมัติ ซึ่งสำหรับ Diagram ของระบบควบคุมอัตโนมัติและรายละเอียดการเดินสายควบคุม นั้น สามารถติดต่อขอข้อมูลได้จาก Corresponding author

หลักการทำงานของเครื่องบดแก้วเหลืองที่ประยุกต์นำพีแอลซีเข้ามาควบคุมให้ทำงานโดยอัตโนมัติมีดังนี้ คือ

จากรูปที่ 4 เครื่องบดแก้วเหลืองจะควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมซึ่งมีพีแอลซีเป็นอุปกรณ์หลัก (หมายเลข 1) โดยอาศัยการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการบดแก้วเหลือง (หมายเลข 2) โดยส่งกำลังผ่านชุดสายพานเพื่อไปยังเพลลาที่ใช้ขับเคลื่อนบดแก้วเหลือง (หมายเลข 3) แก้วเหลืองจะถูกปล่อยลงมาจากถังเก็บ (หมายเลข 4) โดยมอเตอร์ปล่อยแก้วเหลือง (หมายเลข 5) ลงมายังกรวยที่เป็นชุดตาชั่ง (หมายเลข 6) เมื่อได้น้ำหนักตามที่เลือกไว้แล้วมอเตอร์ (หมายเลข 7) ก็จะปล่อยแก้วลงไปยังกรวยแก้วเหลือง (หมายเลข 8) ขณะเดียวกันโซลินอยด์วาล์ว (หมายเลข 9) ก็จะเปิดเพื่อทำ

การเติมน้ำในการแช่แก้วเหลือง โดยที่ปั้มน้ำ (หมายเลข 10) จะดูดน้ำจากถังน้ำ (หมายเลข 11) เพื่อเติมน้ำในการแช่แก้วเหลือง หลังจากการแช่ 2 ชั่วโมงแล้วโซลินอยด์วาล์ว (หมายเลข 12) จะเปิดเพื่อปล่อยน้ำที่แช่แก้วเหลืองทิ้ง หลังจากนั้นมอเตอร์ (หมายเลข 13) จะเปิดบดวาล์วเพื่อปล่อยแก้วเหลืองลงไปยังชุดบดแก้วเหลืองโดยที่มอเตอร์บดแก้วเหลืองเริ่มทำการบดและโซลินอยด์วาล์ว (หมายเลข 14) จะเปิดเพื่อฉีดน้ำบนแก้วเหลือง ในขณะที่บดเป็นจังหวะๆ โดยหลังจากบดเสร็จแล้วโซลินอยด์วาล์ว (หมายเลข 9) จะเปิดอีกครั้งเพื่อปล่อยน้ำลงมายังหน้าหินบดเป็นอันเสร็จสิ้น เมื่อได้แก้วเหลืองที่บดเสร็จแล้วก็นำเข้าสู่กระบวนการถัดไปตามขั้นตอนการผลิตต่อไป



รูปที่ 4 เครื่องบดแก้วเหลืองที่นำพีแอลซีเข้ามาประยุกต์เพื่อให้งานโดยอัตโนมัติ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

สำหรับการทดสอบนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการผลิตแก้วเหลืองบด และตรวจสอบความแม่นยำของการควบคุมการปล่อยน้ำของชุดพีแอลซีและโซลินอยด์วาล์ว โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) ปรับตั้งระยะห่างของหน้าหินบดเป็น 0.5 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของหินบดอยู่ที่ 1450 รอบต่อนาที
- 2) จัดเตรียมแก้วเหลืองซีกเบอร์ 1 บรรจุในถังเก็บแก้วเหลือง
- 3) ทำการเดินเครื่องทั้งระบบ โดยทำการปรับตั้งค่าปริมาณต่างๆที่ต้องการดังนี้คือ

3.1 ในแต่ละการทดสอบนั้นปริมาณเม็ดแก้วเหลืองที่ตกลงมาในกรวยแช่แก้วเหลืองคือ 1.0 - 5.0 กิโลกรัม โดยเริ่มตั้งแต่

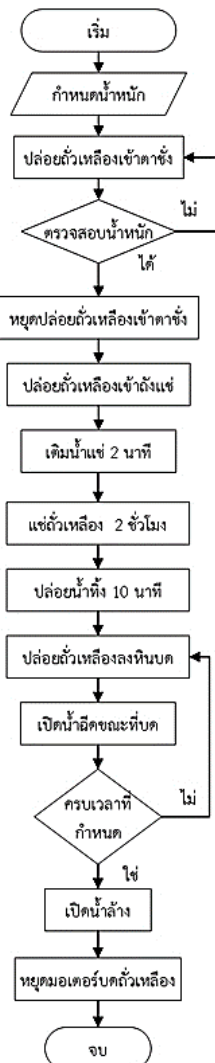
1.0 กิโลกรัม และเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 กิโลกรัม ในแต่ละการทดสอบ คือ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 จนถึงที่สุดที่ 5.0 กิโลกรัม

3.2 น้ำที่ใช้ผสมในขณะบดเม็ดถั่วเหลือง 5.0 ลิตรต่อถั่วเหลือง 1.0 กิโลกรัม เพื่อรวมกันเป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นในการผลิตนมถั่วเหลือง

3.3 น้ำที่ใช้ในการล้างหน้าหินบดหลังจากบดเสร็จ 1.0 ลิตรต่อครั้ง

4) บันทึกเวลาที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งพร้อมทั้งนำถั่วเหลืองที่ได้จากการบดไปชั่งน้ำหนัก

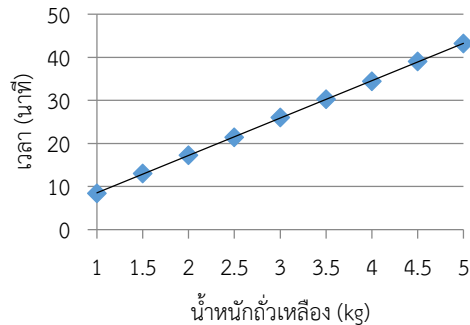
5) คำนวณหาอัตราการผลิตถั่วเหลืองบด และคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ผสมระหว่างกระบวนการบดโดยคิดจากส่วนต่างของน้ำหนักระหว่างถั่วเหลืองบดกับเม็ดถั่วเหลืองตั้งต้น



รูปที่ 5 ผังการทำงานของเครื่องบดถั่วเหลืองที่นำฟีดแอลซีเข้ามาประยุกต์เพื่อให้ทำงานโดยอัตโนมัติ

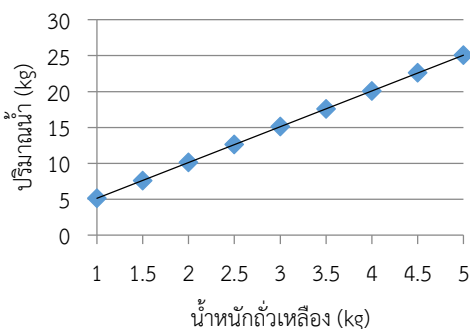
4. ผลการทดสอบและอภิปราย

สำหรับการทดสอบที่ได้นั้น สามารถนำเสนอในลักษณะกราฟได้ดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 เวลาที่ใช้ในการผลิตถั่วเหลืองบดกับค่าน้ำหนักถั่วเหลืองเริ่มต้น

โดยในรูปที่ 6 นั้นเป็นการแสดงผลของค่าเวลาที่ใช้ในการผลิตถั่วเหลืองบดกับค่าน้ำหนักถั่วเหลืองเริ่มต้น ซึ่งสามารถนำไปสู่การคำนวณค่าอัตราการผลิตถั่วเหลืองบดสำหรับผลิตนมถั่วเหลืองต่อไป



รูปที่ 7 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการบดกับค่าน้ำหนักถั่วเหลืองเริ่มต้น

ในรูปที่ 7 นั้นเป็นการแสดงถึงปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการบดกับค่าน้ำหนักถั่วเหลืองเริ่มต้นซึ่งสามารถแสดงถึงสมรรถนะการทำงานของระบบการทำงานที่ควบคุมด้วยพีแอลซีเพื่อการทำงานโดยอัตโนมัติ

จากการดำเนินการทดสอบการบดเม็ดถั่วเหลืองจากเครื่องบดถั่วให้ทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งทำการทดสอบการบดโดยเริ่มจากเม็ดถั่วเหลืองตั้งต้นที่ 1.0 กิโลกรัม และเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 กิโลกรัม จนถึงที่สุดที่ 5.0 กิโลกรัม คือ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 พบว่าได้ถั่วเหลืองที่ผ่านการบดและพร้อมนำไปผลิตนมถั่วเหลืองต่อไปคือ 6.10, 9.09, 12.12, 15.11, 18.09, 21.09, 24.08, 27.11 และ 30.08 กิโลกรัมตามลำดับ โดยเมื่อจับเวลาที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ



แล้วนำมาคำนวณคิดเป็นอัตราการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 7.14 กิโลกรัมของถั่วเหลืองตั้งต้นต่อชั่วโมง และอัตราส่วนเมล็ดถั่วเหลืองตั้งต้นกับน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมมีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 1:5.10, 1:5.06, 1:5.06, 1:5.04, 1:5.03, 1:5.02, 1:5.02, 1:5.02 และ 1:5.01 ตามลำดับการบด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของเมล็ดถั่วเหลืองตั้งต้นกับน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการบดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1:5.04

จากผลการทดสอบ เมื่อคำนวณหาอัตราการผลิตถั่วเหลืองบดจากกราฟในรูปที่ 6 จะพบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการผลิตถั่วเหลืองบดคือ 7.14 กิโลกรัมของถั่วเหลืองตั้งต้นต่อชั่วโมง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.7% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการผลิตถั่วเหลืองบดมีค่าเท่ากับ 0.004 กิโลกรัม และจากรูปกราฟที่ 6 นั้นกราฟแสดงตัวในลักษณะเป็นเส้นตรงอย่างยิ่ง โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงและมีอัตราส่วนในการเพิ่มหรือลดลงเกือบคงที่

ส่วนการวิเคราะห์ผลการทดสอบจากกราฟในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นปริมาณการใช้น้ำก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่คงที่ ซึ่งอัตราการเพิ่มของน้ำหนักถั่วเหลืองตั้งต้นนั้นอยู่ในเกณฑ์ของสมการเส้นตรง เนื่องจากกรวยที่เป็นชุดตวงน้ำหนักนั้นมีสปีริงมาตรฐานเป็นส่วนประกอบหลัก ส่วนน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมนั้นไหลผ่านการควบคุมโดยพีแอลซีและโซลินอยด์วาล์ว ซึ่งในการนี้จะเห็นได้ว่า การควบคุมการไหลของน้ำโดยใช้พีแอลซีและโซลินอยด์วาล์วสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากรูปกราฟที่ 7 จะเห็นได้ว่าเป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตรง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของเมล็ดถั่วเหลืองตั้งต้นกับน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการบดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1:5.04 โดยมีค่ามากที่สุดคือ 1:5.10 ที่น้ำหนักถั่วเหลืองตั้งต้น 1.0 กิโลกรัม และมีค่าน้อยที่สุด คือ 1:5.01 ที่น้ำหนักถั่วเหลืองตั้งต้น 5.0 กิโลกรัม

- เมื่อทำการวิเคราะห์หาระยะเวลาคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์โดยอาศัยปัจจัยดังนี้คือ [5]

- เงินลงทุนค่าเครื่องบดเมล็ดถั่วเหลือง 18,000 บาท
- เงินลงทุนค่าระบบควบคุมอัตโนมัติ 12,636 บาท
- ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 10 % ของเงินลงทุนสร้างเครื่อง

- ไม่คิดมูลค่าซากของเครื่องที่สร้าง
- ค่าจ้างแรงงาน 300 บาทต่อวันต่อคน
- ค่าจ้างแรงงานต่อชั่วโมง 37.5 บาทต่อชั่วโมงต่อคน
- ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย 4.16 บาทต่อหน่วย
- ค่าไฟฟ้าผันแปร (ft) 0.5896 บาทต่อหน่วย
- เครื่องทำงานวันละ 6 ชั่วโมง

โดยเครื่องบดถั่วเหลืองระบบเดิมนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ กิโลกรัมละ 6.500 บาท ส่วนเครื่องบดถั่วเหลืองที่ทำงานโดยอัตโนมัติมีค่าใช้จ่ายที่ กิโลกรัมละ 3.735 บาท จะคิดเป็นส่วนต่างของค่าใช้จ่ายคือ กิโลกรัมละ 2.765 บาท ซึ่งเมื่อคิดค่าผลิต

ถั่วเหลืองบดวันละ 10 กิโลกรัมตามความต้องการของตลาดชุมชนขนาดเล็ก ตลอด 6 ชั่วโมงทำงาน จะคิดเป็นส่วนต่างของค่าใช้จ่ายคือวันละ 27.65 บาท โดยเมื่อนำไปหารกับค่าลงทุนค่าระบบควบคุมอัตโนมัติแล้ว จะสามารถคืนทุนได้ภายในเวลา 457 วัน

5. สรุป

เครื่องบดถั่วสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติโดยราบรื่น คือสามารถทำการชั่งน้ำหนักของเมล็ดถั่วเหลืองตั้งต้น สามารถเติมน้ำสำหรับแช่เมล็ดถั่วเหลือง และสามารถฉีดน้ำได้เองโดยอัตโนมัติในขณะที่เริ่มทำการ จากการดำเนินการทดสอบการบดเมล็ดถั่วเหลืองจากเครื่องบดถั่วให้ทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งทำการทดสอบการบดโดยเริ่มจากเมล็ดถั่วเหลืองตั้งต้นที่ 1.0 กิโลกรัม และเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 กิโลกรัม จนถึงสิ้นสุดที่ 5.0 กิโลกรัม โดยเมื่อจับเวลาที่ใช้ในแต่ละการทดสอบแล้วนำมาคำนวณคิดเป็นอัตราการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 7.14 กิโลกรัมของถั่วเหลืองตั้งต้นต่อชั่วโมง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.7% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการผลิตถั่วเหลืองบดมีค่าเท่ากับ 0.004 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของเมล็ดถั่วเหลืองตั้งต้นกับน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการบดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1:5.04 โดยการประมาณระยะเวลาคืนทุนสำหรับกรณีการใช้เครื่องบดเมล็ดถั่วเหลืองนี้ทำงาน 6 ชั่วโมงต่อวัน จะสามารถคืนทุนได้ในเวลา 457 วัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน ประจำปี 2557 ทางคณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิพรณ พุกภักดี, (2546), ถั่วเหลือง พืชทองของคนไทย, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [2] ธนากร เอื้ออัมพร และ อนุชา วงศ์จันทร์สม, (2547), เครื่องทำน้ำเต้าหู้, ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [3] ธนบูรณ์ โรจนวงศ์, สุรวิทย์ ต.ประยูร และ อนุชิต ลาบุตติ, (2547), เครื่องบรรจุข้าวสารกึ่งอัตโนมัติ, ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [4] พงษ์ศิริ กาญจนาลัย และ พลรัตน์ วงศ์สุวรรณ, (2537), การนำ PLC มาควบคุมเครื่องอัดกระดาษ



อัตโนมัติซึ่งทำงานด้วยระบบนิวเมติกส์, ปรินูญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- [5] คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
(2558), เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม, [ออนไลน์],
แหล่งที่มา

<http://fmectt.lecturer.eng.chula.ac.th/2103361/Chapter9.pdf> เข้าดูเมื่อวันที่ 30/10/2558



การทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าของหน่วยวัดคุมระยะไกลสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ

Electromagnetic Susceptibility Testing of Feeder Remote Terminal Unit for Distribution Automation System

เจษฎา ชัดทองงาม*

กลุ่มวิจัยระบบจำหน่ายอัตโนมัติ หน่วยวิจัยระบบอัตโนมัติและอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

112 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ผู้รับผิดชอบบทความ: Jasada.kud@nectec.or.th โทรศัพท์ 02-564-6900

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าของหน่วยวัดคุมระยะไกลสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งในอดีต ดัชนีความเชื่อมั่นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถพิจารณาจาก SAIFI และ SAIDI ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่ง SAIFI และ SAIDI นั้นขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของอุปกรณ์ภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งหน่วยวัดคุมระยะไกล แนวทางการทดสอบนี้สามารถใช้ได้กับมาตรฐานบริบทเทคโนโลยีสารสนเทศทุกประเภท ดังนั้นการกำหนดมาตรฐานในการทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า (IEC 61000) หรือตรงกับ มอก. 1955 ที่สามารถเป็นตัวชี้วัดเสถียรภาพของระบบควบคุม ระบบจำหน่ายไฟฟ้าและระบบอื่นๆที่ใช้บริบทเทคโนโลยีสารสนเทศได้เป็นอย่างดี ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอแนวทางการทดสอบและผลลัพธ์ที่ผ่านการทดสอบมาแล้วของหน่วยวัดคุมระยะไกลตามมาตรฐาน IEC 61000

คำสำคัญ หน่วยวัดคุมระยะไกล ระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ ภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดัชนีความเชื่อมั่นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the electromagnetic susceptibility (EMS) testing of feeder remote terminal unit for distribution automation system. In the past, indicators of electrical distribution stability are depicted in SAIFI and SAIDI that they are depended on stabilities of equipment installed in distribution system. Especially, stability in feeder remote terminal unit plays a key role in those indicators. Therefore, EMS standard should be defined for indicating the system stability. This paper presents testing guideline and testing results of feeder remote terminal unit according to IEC 61000.

Keywords: Feeder remote terminal unit, distribution automation system, electromagnetic susceptibility, SAIFI, SAIDI.

1. บทนำ

ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีความต้องการใช้งานพลังงานไฟฟ้า เสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้ามากขึ้นเป็นลำดับ เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ การป้องกันและการซ่อมบำรุงให้ระบบไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะปกติให้นานที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อกิจกรรมหรือความเสียหายต่อภาคประชาชน ซึ่งดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในปัจจุบันคือ System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) และ System Average Interruption Duration Index (SAIDI)

SAIFI คือค่าเฉลี่ยความถี่ที่ระบบไฟฟ้าเกิดขัดข้องหรือไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้เป็นปกติ SAIDI คือค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่เกิดขัดข้องหรือผิดปกติ โดยหน่วยของ SAIFI คือ

จำนวนครั้งที่เกิดความขัดข้องหรือผิดปกติ/ปี/ผู้ใช้ไฟฟ้าหนึ่งราย และหน่วยของ SAIDI คือนาที/ปี/ผู้ใช้ไฟฟ้าหนึ่งราย ในปี 2010 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีค่า SAIFI อยู่ระหว่าง 3.76-13.84 และ SAIDI อยู่ระหว่าง 112.67-705.68 [1]

การเพิ่มเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าและการลดค่าดัชนีชี้วัด SAIFI และ SAIDI นั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งยวดในการใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ (Distribution automation system) และระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) มาช่วยให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าป้องกันเหตุผิดปกติและลดระยะเวลาที่เกิดความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติคือระบบตรวจวัดและควบคุมการจำหน่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติประกอบไปด้วย Load Break Switch

(LBS), Current Transformer (CT), Potential Transformer (PT), Feeder Remote Terminal Unit (FRTU), Communication และ Graphic User Interface (GUI) จากองค์ประกอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ เสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของหน่วยวัดคัมระยะไกล (FRTU) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ นอกจากนั้นเสถียรภาพของหน่วยวัดคัมระยะไกลขึ้นอยู่กับภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า และการทนต่อสภาวะแวดล้อม

ความสามารถในการทนต่อสภาวะแวดล้อมของหน่วยวัดคัมระยะไกลขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้อุปกรณ์ตามสภาพการทำงานจริง และความสามารถในการทนต่อการรบกวนทางไฟฟ้านั้นสามารถออกแบบวงจรทางวิศวกรรมโดยคำนึงถึงมาตรฐานของอุปกรณ์ที่ต้องนำไปใช้งาน

มาตรฐานของการทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility Testing: EMS) ในระบับนานาชาติสามารถแสดงได้ดังเช่น ISPR14-2, CISPR20, CISPR24, EN50082-1, EN50082-2, IEC6100-4 เป็นต้น ซึ่งเป็นมาตรฐานที่สำคัญต่อเสถียรภาพระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ

ในบทความนี้แสดงให้เห็นถึงการทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าของหน่วยวัดคัมระยะไกลตามมาตรฐาน IEC61000 โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น [2-8]

- Electrostatic Discharge (ESD) IEC61000-4-2
- Conducted Immunity (CI) IEC61000-4-6
- Radiated Immunity (RI) IEC61000-4-3
- Surge Immunity (Surge) IEC61000-4-5
- Electrical Fast Transient (EFT) IEC61000-4-4
- Power Frequency Magnetic IEC61000-4-5
- Voltage dips IEC61000-4-11

2. ทฤษฎีการทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ สำหรับมาตรฐานทาง Immunity นี้แบ่งเงื่อนไขในการตัดสินผลของการทดสอบออกเป็น

ผลลัพธ์ A: การทำงานตามสภาวะปกติเมื่อมีการรบกวน: เป็นไปตามคุณสมบัติของผู้ผลิต

ผลลัพธ์ B: การหยุดทำงานชั่วคราว และสามารถกลับมาทำงานใหม่ได้เอง

ผลลัพธ์ C: การหยุดทำงานชั่วคราว ผู้ใช้จะต้องทำการ Reset ผลิตภัณฑ์เสียก่อนจึงจะสามารถกลับมาทำงานใหม่ได้

ผลลัพธ์ D: ผลิตภัณฑ์ทดสอบนี้เสียหายทันที และไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก

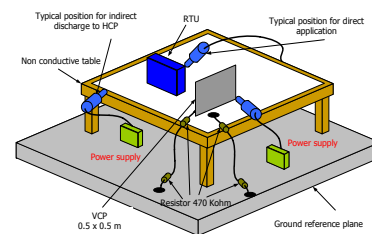
การทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะกำหนดไว้เป็นระดับความแรงของสัญญาณที่จะรบกวน ระดับการทดสอบ

(Level) โดยจะเริ่มจากระดับ 1 ถึง 3, 4 หรือ 5 และยังสามารถให้สามารถทำการทดสอบที่ระดับ X คือสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดได้

2.1. Electrostatic discharge immunity testing

การทดสอบภูมิคุ้มกันต่อประจุไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic discharge immunity testing) ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-2 (1995) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์สู่ตัวผลิตภัณฑ์ ทั้งการคายประจุไฟฟ้าแบบสัมผัส (Contact discharge) และการคายประจุไฟฟ้าผ่านอากาศ (Air discharge)

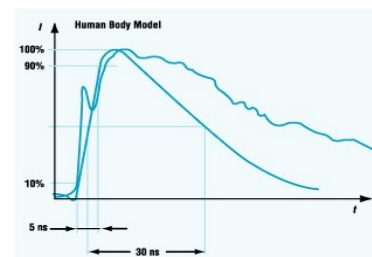
ผู้ทดสอบจะนำอุปกรณ์ทดสอบ ESD ทำการยิง ESD เข้ารบกวนหน่วยวัดคัมระยะไกล 3 ลักษณะด้วยกันคือ Indirect discharge to HCP, Indirect discharge to VCP และ Direct Application ดังแสดงในรูปที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 1 Electrostatic discharge testing



รูปที่ 2 การทดสอบยิงแบบ Indirect discharge to HCP



รูปที่ 3 รูปคลื่นสัญญาณ Electrostatic discharge ผลการทดสอบทั้งในรูปแบบ Contact และ Air discharge แสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 Contact Discharge Mode Test Results

Test point	Test Execution ESD Test Level (kV) / Number of Discharges (Times)	
	+4/10	-4/10
VCP (all sides of EUT)	NORM	NORM
HCP (all sides of EUT)	NORM	NORM
Point 1	NORM	NORM

ตารางที่ 2 Air Discharge Mode Test Results

Test point	Test Execution ESD Test Level (kV) / Number of Discharges (Times)	
	+8/10	-8/10
Power Cord	ND	ND
HCP (all sides of EUT)	ND	ND
Point 1	ND	ND

Note:

“-“ : Not Test

“ND”: Not Discharge

“NORM”: Normal

“AB”: Abnormal

2.2. Conducted immunity testing

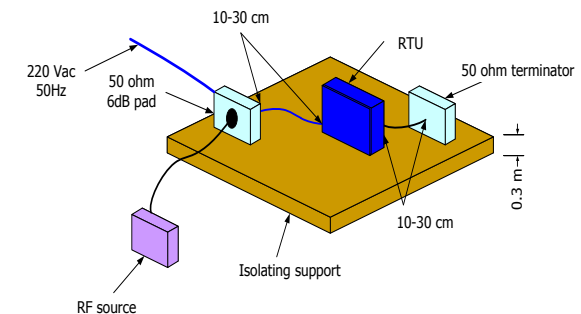
การทดสอบ Conducted immunity นี้เป็นการจำลองสัญญาณรบกวนจากสนามไฟฟ้าเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟและสายสัญญาณของผลิตภัณฑ์ทดสอบ มีการทดสอบ 2 แบบคือ ส่งสัญญาณที่มีความแรง 3 V without modulation และแบบ 10 V with modulation เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟและสายสัญญาณของผลิตภัณฑ์ทดสอบ โดยใช้ตัวกำเนิดความถี่และตัวขยายสัญญาณ ดังรูปที่ 4 และ 5

2.3. Radiated immunity testing

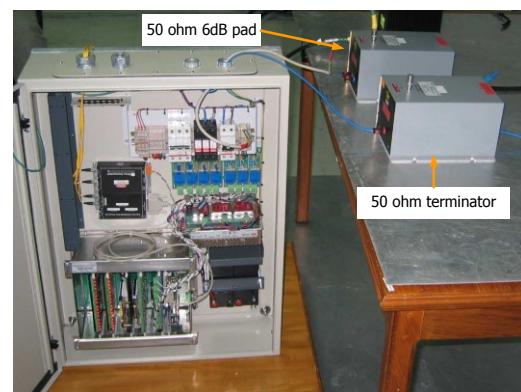
การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่วิทยุที่แผ่กระจาย Radiated Immunity (RI) IEC61000-4-3 สนามไฟฟ้าที่แพร่มาทางอากาศสามารถกำเนิดโดย สถานีวิทยุหรือโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่ใช้งานในปัจจุบันซึ่งมีความถี่ และมีความแรงของสัญญาณมากๆ สามารถรบกวนการทำงานของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและ อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดได้

สำหรับมาตรฐาน IEC61000-4-3 นี้ กำหนดให้จะต้องมีการทดสอบ Radiated Immunity ที่ระดับสัญญาณ 3V/m without modulation สัญญาณ 10V/m แบบ AM และ 10V/m สำหรับสัญญาณ PM และการทดสอบหัวข้อนี้จะทำในห้องปิดกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อนขนาดเล็ก

โดยไร้สายอากาศ Bi-Log ย่านความถี่ 80 MHz ถึง 1000 MHz เป็นตัวกำเนิดสัญญาณทดสอบ

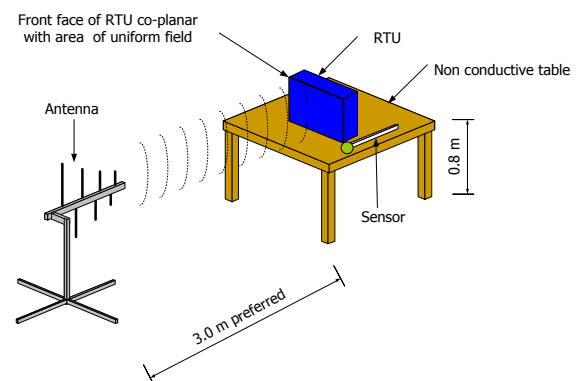


รูปที่ 4 Conducted immunity testing

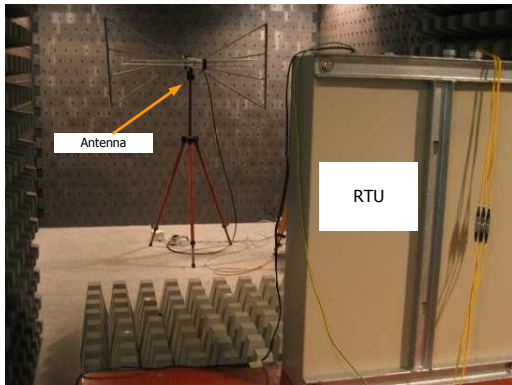


รูปที่ 5 การทดสอบแบบ 10 V with modulation

ห้องปิดกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อนขนาดเล็กนี้มีประโยชน์คือ ใช้สำหรับทดสอบ ทหารดับความคงทนของอุปกรณ์ ภายใต้ความแรงของระดับสัญญาณรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ ตามมาตรฐาน IEC61000-4-3 มีระยะทดสอบ 3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 Radiated immunity testing



รูปที่ 7 การทดสอบภายในห้องทดสอบ RI

คุณสมบัติของห้องทดสอบ มีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกไม่ให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ผนังภายใน ห้องทดสอบทั้ง 6 ด้านยังบุด้วยวัสดุ ดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อลดการสะท้อนของคลื่น ทำให้ห้องทดสอบนี้ มีคุณสมบัติ เป็นไปตามมาตรฐาน IEC61000-4-3

ลักษณะของห้องทดสอบ

- ผนังห้องด้านนอกเป็นแผ่นเหล็ก ป้องกันสนิมทั้ง 6 ด้านช่วยลดทอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ตั้งแต่ 9 kHz ถึง 40 GHz
- ผนังด้านในชั้นล่างบุด้วยแผ่นเฟอร์ไรต์เพื่อช่วยดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำกว่า 200 MHz
- ผนังด้านในชั้นบนบุด้วยแผ่นฟองน้ำชนิดพิเศษช่วยดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงตั้งแต่ 200 MHz ถึง 18 GHz
- ขนาดห้องด้านนอกกว้าง 3.1 เมตร ยาว 7.3 เมตร และสูง 3 เมตร
- ขนาดพื้นที่ทำงาน ภายในกว้าง 2.2 เมตร ยาว 6.6 เมตร และสูง 2.4 เมตร

2.4. Surge immunity testing

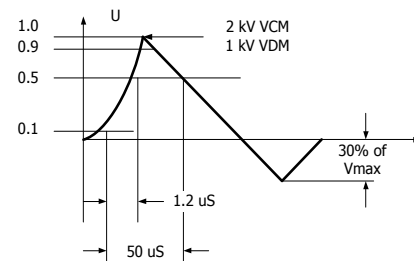
ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 (1995) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวน ที่เกิดจากการสร้างสัญญาณรบกวนในรูปของเล็กรั่วเข้ามาทางสายตัวนำไฟฟ้า (AC line)

วิธีการทดสอบที่ได้กล่าวมา ผู้ทดสอบจะนำอุปกรณ์ทดสอบ Surge ส่งแรงดันไฟฟ้าขนาด 1 kV VDM และ 2 kV VCM เข้ารบกวนทางสายตัวนำไฟฟ้า ของหน่วยวัดคุมระยะไกล เพื่อสร้างสัญญาณรบกวนทางแหล่งจ่ายไฟฟ้าของหน่วยวัดคุมระยะไกล โดยมีรูปคลื่นในการรบกวนดังแสดงในรูปที่ 8 และแสดงการทดสอบในรูปที่ 9

2.5. Electrical fast transient testing

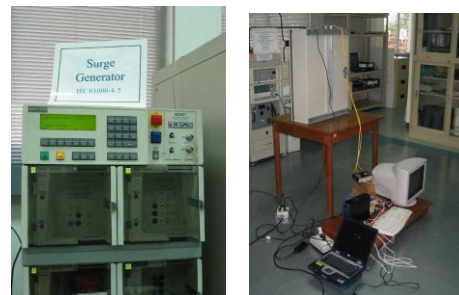
การทดสอบภูมิคุ้มกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่แบบรวดเร็ว (Electrical fast transient/burst immunity testing) ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-4 (1995) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนจากแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่แบบรวดเร็ว (electrical fast transient/burst) ที่เกิดขึ้นในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทั้งการรบกวนทางสายตัวนำไฟฟ้า (AC line) และการเหนี่ยวนำผ่านสายควบคุม (control line)

วิธีการทดสอบที่ได้กล่าวผู้ทดสอบจะนำอุปกรณ์ทดสอบ EFT จ่ายสัญญาณรบกวนเข้าทางสาย AC ของหน่วยวัดคุมระยะไกล เพื่อสร้างสัญญาณรบกวนทางแหล่งจ่ายไฟฟ้าของหน่วยวัดคุมระยะไกล โดยมีรูปคลื่นในการรบกวน ดังรูปที่ 10 และ 11

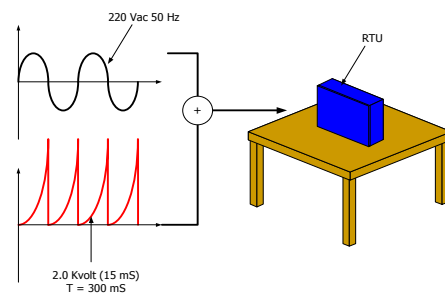


Angle of firing : 0, 90, 180, 270 degree
Positive side 5 times
Negative side 5 times

รูปที่ 8 Surge waveform



รูปที่ 9 Surge immunity testing



รูปที่ 10 Electrical fast transient testing

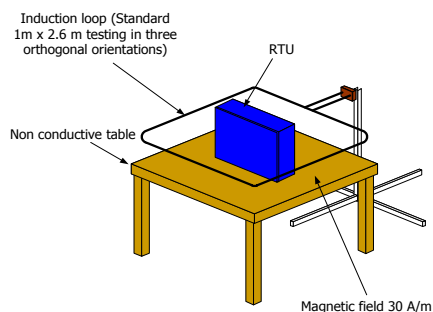


รูปที่ 11 การทดสอบ EFT ของหน่วยวัดคุมระยะไกล

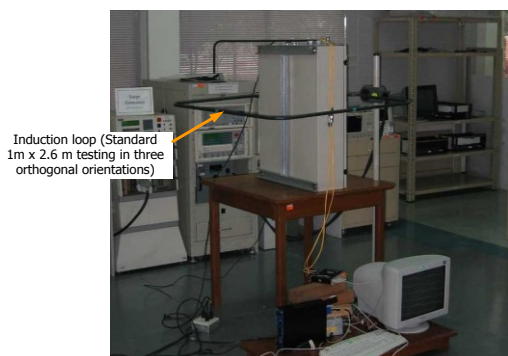
2.6. Power frequency magnetic testing

การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงกำลัง (Power magnetic field immunity testing) ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-8 (1993) เป็นการทดสอบความทนต่อการถูกรบกวนในรูปของสนามแม่เหล็กแบบความถี่สูงผ่านทางอากาศ

จากวิธีการทดสอบที่ได้กล่าวมาผู้ทดสอบจะนำอุปกรณ์ทดสอบ Power Frequency Magnetic คล้องหน่วยวัดคุมระยะไกล เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเข้ารบกวนหน่วยวัดคุมระยะไกล 3 ขนาด 30 A/m ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 12 Power frequency magnetic testing

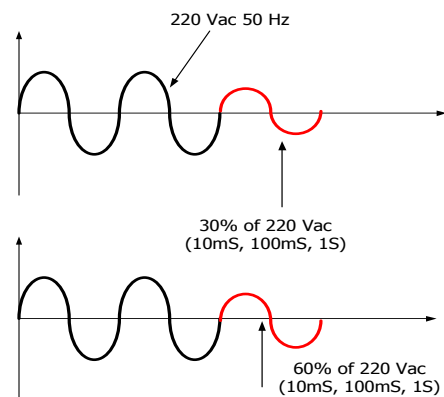


รูปที่ 13 การทดสอบสนามแม่เหล็กระยะไกล (30 A/m)

2.7. Voltage dips testing

การทดสอบภูมิคุ้มกันต่อแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage Dips) ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-11(1994) แรงดันไฟฟ้าหายไปชั่วขณะ (Voltage short interruptions) และแรงดันไฟฟ้าแกว่ง (Voltage Fluctuation)

วิธีการทดสอบที่ได้กล่าวผู้ทดสอบจะนำอุปกรณ์ทดสอบ Voltage dips จ่ายสัญญาณรบกวนเข้าทางสาย AC ของ RTU เพื่อสร้างสัญญาณรบกวนทางแหล่งจ่ายไฟฟ้าของ RTU โดยมีรูปคลื่นในการรบกวน ดังรูปที่ 14 และ 15



รูปที่ 14 Voltage dip waveforms



รูปที่ 15 การทดสอบ Voltage dips

3. ผลการทดสอบ

หน่วยวัดคุมระยะไกลถูกออกแบบเพื่อให้ทนต่อสัญญาณรบกวนในรูปแบบต่างๆ ได้ออกแบบ Noise reduction ทั้งใน Input, Output และ Communication Ports โดยใช้หลักการ Shield added one end grounded large enclosed area, Parallel connection reduction และ Common ground impedance สำหรับ Input และ Output ทั้งแบบ Digital และ Analog ในส่วนของ Communication ใช้ลดทอนสัญญาณรบกวนและป้องกันเสิร์จ ด้วย Isolation circuit ทำให้ผลการทดสอบหน่วยวัดคุมระยะไกลตามมาตรฐาน IEC 61000 แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Susceptibility Testing Results

Descriptions	NECTEC
	Level
Electrostatic Discharge Immunity	4kV/8kV
Radiated Immunity	10V/m
Fast Transient / Burst Immunity	AC 2kV
Surge Immunity	1kV/2kV
Conducted Immunity	10V
Power Frequency Magnetic Field Immunity	30A/m
Voltage Dips	30%+10%

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอแนวทางการทดสอบหน่วยวัดคุมระยะไกลที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ การสร้างเสถียรภาพของหน่วยวัดคุมระยะไกลจำเป็นต้องคำนึงถึงมาตรฐานที่สามารถอ้างอิงได้ และนำข้อมูลของมาตรฐานไปออกแบบทางวิศวกรรม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับการออกแบบทางวิศวกรรมอื่นๆได้ นอกจากนั้นผลการทดสอบหน่วยวัดคุมระยะไกลยังสามารถเป็นตัวชี้วัดถึงเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้อีกทางด้วย ซึ่งหน่วยวัดคุมระยะไกลที่ผ่านการทดสอบใช้หลักการ Noise reduction ทั้งในแบบ Shield added one end grounded large enclosed area, Parallel connection reduction และ Common ground impedance มาช่วยในการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องมาตรฐานรบกวนต่างๆได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khatsaeng, T., Rerkpreedapong, D. and Chaiyabut, N. (2014) Reliability assessment of power distribution systems using tripping rate of protective devices, paper presented in *the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Washington, DC, USA.
- [2] International Electrotechnical Commission Standard, Electrostatic Discharge (ESD) IEC61000-4-2
- [3] International Electrotechnical Commission Standard, Conducted Immunity (CI) IEC61000-4-6
- [4] International Electrotechnical Commission Standard, Radiated Immunity (RI) IEC61000-4-3
- [5] International Electrotechnical Commission Standard, Surge Immunity (Surge) IEC61000-4-5
- [6] International Electrotechnical Commission Standard, Electrical Fast Transient (EFT) IEC61000-4-4
- [7] International Electrotechnical Commission Standard, Power Frequency Magnetic IEC61000-4-5
- [8] International Electrotechnical Commission Standard, Voltage dips IEC61000-4-11



คำแนะนำในการเขียนบทความ

วัตถุประสงค์ของวารสาร

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นวารสารทางวิชาการจัดพิมพ์ฉบับแรกในเดือนมกราคม พ.ศ.2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ที่น่าสนใจในด้าน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ และมาตรฐานการประกอบวิชาชีพโดยสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องได้แก่วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ วิศวกรรมระบบควบคุม วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของบทความ

บทความวิจัย (research articles) เป็นรายการวิจัยหรือรายงานทางวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ โดยบทความดังกล่าวจะต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสือ

บทความปริทัศน์ (review articles) เป็นบทความที่รวบรวมความรู้เชิงวิชาการเรื่องใดเรื่องหนึ่งจากวารสารหรือหนังสือ โดยมีการวิเคราะห์และวิจารณ์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเชิงลึกอย่างแท้จริง

การส่งบทความ

นักวิจัยและผู้สนใจตีพิมพ์บทความในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สามารถจัดส่งบทความโดยมีรายการดังต่อไปนี้ คือ (1) ต้นฉบับบทความที่เป็นข้อมูลของโปรแกรม Microsoft word และ Adobe Acrobat จำนวนอย่างละ 1 ชุด (2) จดหมายนำส่งที่เป็นข้อมูลของโปรแกรม Adobe Acrobat จำนวน 1 ชุด โดยสามารถจัดส่งได้ทั้งทาง

อีเมล EngineeringJournal@rmutl.ac.th
และทางไปรษณีย์

ที่อยู่และสถานที่จัดส่งจดหมาย

“กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี”

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444 ต่อ 1236

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 21.2 x 29.7 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 ในกรณีที่ไม่มีกำหนด ให้เขียนภาษาอังกฤษในวงเล็บด้านหลังเฉพาะครั้งแรกเท่านั้น

9. การย่อคำและการกำหนดสัญลักษณ์ให้ใช้เฉพาะคำย่อมาตรฐานโดยควรกำหนดคำเต็มก่อนครั้งแรกและอ้างอิงคำย่อไว้ท้าย



ส่วนประกอบของบทความ

1. ชื่อเรื่องที่ใช้ควรกระชับและชัดเจนแต่ครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมด และไม่ควรใช้ตัวอักษรย่อ

2. บทความย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ จะต้องแสดงรายละเอียดและระบุ ชื่อเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการวิจัย ผลการวิจัย สรุปผล โดยความยาวของบทความไม่ควรเกิน 250 คำ และมีคำสำคัญประมาณ 3-5 คำ ส่วนการค้นในบทความย่อภาษาไทย ให้ใช้ เว้นวรรค และเรียงตามตัวอักษรส่วนการค้นคำสำคัญให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คำสำคัญภาษาอังกฤษต้องให้ความหมายเหมือนคำสำคัญภาษาไทย และมีจำนวนเท่ากับคำสำคัญภาษาไทย

3. เนื้อเรื่องของบทความจะประกอบไปด้วย บทนำ ทฤษฎีและวิธีการวิจัย ผลการวิจัยและอภิปราย บทสรุป กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิง

3.1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย สมมติฐาน ซึ่งเชื่อมโยงกับผลการวิจัย

3.2 ทฤษฎีและวิธีการวิจัย จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดของวัสดุและวิธีการที่ใช้ในการศึกษา โดยรายละเอียดที่แสดง สามารถนำไปทดลองทำซ้ำได้

3.3 ผลการศึกษาจะต้องแสดงเป็นหมวดหมู่ และสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของบทความซึ่งผลการศึกษาสามารถแสดงในรูปแบบตารางและรูปภาพได้ แต่ต้องไม่ซ้ำกับเนื้อหาที่เขียนในส่วนนี้ ส่วนตำแหน่งการวางรูปภาพจะต้องอยู่หลังจากคำแนะนำในบทความ และไม่จำเป็นต้องแสดงทันทีทันใดหลังจากแนะนำหรือบรรยายบทความ ผู้เขียนอาจวางรูปใกล้กับรูปอื่น โดยจัดให้อยู่บริเวณด้านบนสุดหรือล่างสุดของบทความ โดยในแต่ละช่วงของผลการวิจัย ผู้เขียนสามารถเขียนบทวิจารณ์ และวิจารณ์ได้ทุกส่วนประกอบของบทความ และผลของการวิจารณ์จะต้องแสดงองค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับผลประโยชน์ที่ได้รับ รวมทั้งรายละเอียดของปัญหาและอุปสรรคต่างๆ

3.5 สรุป เป็นการกล่าวถึงผลโดยย่อและข้อสรุปจากบทวิจารณ์

3.6 กิตติกรรมประกาศ เป็นส่วนที่กล่าวคำขอบคุณถึงองค์กร หรือบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนต่อผู้เขียน

3.7 เอกสารอ้างอิง ซึ่งการเขียนเอกสารอ้างอิงสามารถแสดงในลำดับถัดไป โดยใช้รูปแบบการอ้างอิงแบบ

การพิจารณาถ้อยแถลง

บทความวิจัยและบทความปริทัศน์จะได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขานั้นๆ 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].

- [3] สำนักงานราชบัณฑิตยสภา (2550). *ชื่อธาตุ* [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.royin.go.th> , สืบค้นวันที่ 24/04/2010

ตัวอย่างการอ้างอิงวิทยานิพนธ์จากฐานข้อมูล

- [1] Ignatov, I. (2013). *Eastward voyages and the late medieval European world-view* (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] จุฬาร ไซตช่วงนิรันดร์, นลินี ต้นธูวณิตย์ และ ปันทดา เพ็ชรสิงห์ (2529). *รายงานการวิจัยเรื่องประวัติศาสตร์หมู่บ้านคำม่วง, โครงการวิจัยระบบการทำฟาร์มมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, หน้า 54 – 57.
- [3] กรมโยธาธิการและผังเมือง (2554). *มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว* (มยผ.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.

**จดหมายนำส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**

เรียน หัวหน้ากองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ข้าพเจ้ามีความประสงค์ขอเสนอบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และขอรับรองว่าบทความนี้เป็นบทความต้นฉบับ ไม่มีส่วนลอกเลียนผลงานของผู้ใดและผลงานนี้ไม่ได้ส่งตีพิมพ์ผลงานในวารสารฉบับอื่นแล้วแต่ได้รับการปฏิเสธมาก่อน ข้าพเจ้าขอรับรองว่าข้าพเจ้ามีส่วนร่วมในการศึกษาและได้รู้เห็นข้อมูลทั้งหมดในบทความอย่างครบถ้วนรวมทั้งได้ตรวจสอบข้อมูลความถูกต้องของเนื้อหาเป็นอย่างดีแล้ว

ประเภทบทความ

☐ บทความวิจัย ☐ บทความปริทัศน์

ลายมือชื่อ
(.....) วันที่

ลายมือชื่อ
(.....) วันที่

ลายมือชื่อ
(.....) วันที่

ลายมือชื่อ
(.....) วันที่

ลายมือชื่อ
(.....) วันที่

ชื่อผู้เขียนที่ให้ติดต่อเกี่ยวกับบทความ.....

สถานที่ติดต่อ

.....

.....

โทรศัพท์E-Mail.....