



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

RMUTL Engineering Journal

RMUTL. Eng. J.

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1
มกราคม - มิถุนายน 2561

ISSN 2465-4248



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี RMUTL Engineering Journal

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประพัฒน์	เชื้อไทย
นายภฤศพงศ์	เพชรบุล
ดร.ภาสวรรณ	วัชรดำรงศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิธ	ชัยเนตร
ดร.ทินกร	ทาตระกูล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จัตตุฤทธิ์	ทองปรอน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประยงค์	ไสนวน
ดร.ธนกศักดิ์	ตันตินาคม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์	อินผาง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิตติชัย	ระมิงค์วงศ์
นายเผ่าภิญโญ	ฉิมพะเนาว์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุภัทรา	ปานสุวรรณจิตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรรณี	นกุลคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชาติ	สุวัठी
ดร.ศิริประภา	ชัยเนตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชนิตา	โชติเสถียรกุล
ดร.กิจจา	ไชยทนต์
ดร.ยรรยง	เฉลิมแสน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ถาวร	ผั่นชมภู
นายอนันท์	ทับเกิด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ	วงศ์พานิช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ	โสติธิกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา



กองบรรณาธิการ

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สักรกมน	เทพหัสดิน ณ อยู่ชยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ดนัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเอเซีย
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ	รุจิจินากุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Associate Professor Mark	Adom-Asamoah	Kwame Nkrumah University of Science & Technology
รองศาสตราจารย์ ดร.วิสันย์	วรรณจรรย์ยา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.จรศักดิ์	โสภากาญจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒ	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วดาพิทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ	บุตรดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสุวรรณค์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	เย็นยงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์	อินผาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลิ่นประทุม	ปัญญาปิง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ	อินต๊ะวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	ภาพสินธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลทรัพย์	ผ่องศรีสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.ฟองจันทร์	จิราลิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.บุปผเวช	พันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.ภาณุ	อุทัยศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นายณัฐชาติ	ชูเกียรติขจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวปรีศนา	กุลนลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นายปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
Mr. Russell	James Pierce	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
Miss Kalil	Zender	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ฝ่ายประสานงานและเผยแพร่

นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวอุไรวรรณ	สายะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาวพิชญ์	ศรีพรหมมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นายครรชิต	เงินคำคง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นางสาววัลลภา	วงศ์ชายะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



จดหมายจากบรรณาธิการ

สวัสดีครับท่านผู้อ่านทุกท่านครับ เวลาผ่านไปอย่างรวดเร็วมาก ในปีนี้ถือได้ว่าวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หรือ RMUTL ENGINEERING JOURNAL (RMUTL.Eng.J) นี้ได้มีอายุก้าวเข้าสู่ปีที่ 3 แล้ว ผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการปรับปรุงคุณภาพและเนื้อหาของวารสารอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดประโยชน์แก่ท่านผู้อ่านไม่มากนักน้อย ในนามของกองบรรณาธิการของวารสารฯ ผมรู้สึกดีใจและภูมิใจเป็นอย่างยิ่งที่วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน พ.ศ.2561) นี้ได้ถูกเผยแพร่ออกสู่ประชาคมวิจัยของประเทศไทยอีกครั้งหนึ่ง

ในฉบับนี้ท่านผู้อ่านจะได้พบกับบทความวิชาการที่น่าสนใจ จำนวน 6 บทความ โดยมีรายละเอียดที่ครอบคลุมสาขาวิชาและหัวข้องานวิจัยดังนี้ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้ทำงานวิจัยในด้านชีววิทยาจากโทรศัพท์กับความปลอดภัยต่อสุขภาพ งานฟาร์มและเกษตรอัจฉริยะ ส่วนสาขาวิศวกรรมเครื่องกลได้ทำงานวิจัยในด้านการแลกเปลี่ยนความร้อน สาขาพลังงานทดแทนที่ได้เน้นไปที่เซลล์แสงอาทิตย์ และสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการที่ได้เน้นการหาคุณสมบัติทางกลที่ดีในเหล็กหล่อเหนียว เป็นต้น โดยรายละเอียดทั้งหมดของบทความวิชาการประกอบด้วย ดังนี้ 1. ผลกระทบทางชีววิทยาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อศีรษะและสมองของมนุษย์ 2. ผลของความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเกลียวของท่อความร้อนแบบสั่นวรอบต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ 3. การออกแบบระบบควบคุมและการบันทึกข้อมูลระยะไกลเพื่อโรงเรือนสำหรับการเกษตรอัจฉริยะโดยใช้ APRS โปรโตคอล 4. แบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบผลึกซิลิกอน 5. การวิเคราะห์โลกกำลังเชิงซ้อนจุดทำงานและเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเชิงโครนอสชนิด 3 เฟส และ 6. ผลของปริมาณแมกนีเซียมที่มีต่อสมบัติทางกลและรูปร่างกราฟไฟท์ในเหล็กหล่อเหนียว

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ขอขอบคุณต่อข้อเสนอแนะจากท่านผู้อ่านทุกท่าน หากมีข้อเสนอแนะหรือคำติชมใด ๆ ท่านสามารถส่งคำแนะนำต่าง ๆ เข้ามาผ่านช่องทางไปรษณีย์ หรือ Email: EngineeringJournal@rmutl.ac.th และสุดท้ายนี้ผมขอขอบคุณคณะกรรมการประเมินบทความผู้ทรงเกียรติ ที่ได้ให้คำแนะนำพร้อมกับให้ข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อให้บทความต้นฉบับมีความสมบูรณ์ซึ่งส่งผลให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้นและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL.Eng.J) นี้จะได้สร้างคุณประโยชน์ต่อวงการวิชาการและประเทศชาติต่อไปทั้งในปัจจุบันและอนาคตต่อไป

พบกันใหม่ฉบับหน้า สวัสดีครับ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน
บรรณาธิการ

สารบัญ

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2561

บทความวิจัย

ผลกระทบทางชีววิทยาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อศีรษะและสมองของมนุษย์ ปิยะภัทร พ่วงศรี นนชณัต ฉัตรภูติ และ อภิบาล พุกษานุบาล	1
---	---

ผลของความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ทิวากร กาจันทร์ ธนกร แต่งก่อ วีรชัย แก้วฉัยยา นพรัตน์ สี่หะวงษ์ ปฐมศก วิไลพล และ ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ	9
---	---

การออกแบบระบบควบคุมและการบันทึกข้อมูลระยะไกลเพื่อโรงเรือนสำหรับการเกษตรอัจฉริยะโดยใช้ APRS โปรโตคอล นิมิตร หงษ์ยิ้ม และ สมศักดิ์ มิตะถา	19
--	----

แบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบผลึกซิลิกอน เกษม ตรีภาค จิตตฤทธิ ทองปรอน อีระศักดิ์ สมศักดิ์ ยุทธนา กันทะพะเยา และ นพพร พัทธประภักดิ์	31
---	----

การวิเคราะห์โลกกำลังเชิงซ้อน จุดทำงาน และเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า แบบเชิงโครนัสชนิด 3 เฟส ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ อานนท์ สิงห์เสถียร และ ปิยะภัทร พ่วงศรี	41
---	----

ผลของปริมาณแมกนีเซียมที่มีต่อรูปร่างกราฟต์และสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว กฤษฎ ฐนรักษา ชลที มูลทา อนรรช มุลรักษา นิรวิทย์ สุทธิ และ คณินนิตย์ จัปใจเหมาะ	49
--	----



ผลกระทบทางชีววิทยาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อศีรษะและสมองของมนุษย์

Biological Effect from Mobile Phone to Human Head and Brain

ปิยะภัทร พ่วงศรี^{1*} นนชณัต ฉัตรภูติ² และ อภิบาล พฤษานุบาล²

¹โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ไทย-เยอรมัน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนพิบูลสงคราม แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

Piyapat Pounsri¹, Nonchanut Chudputi² and Aphibal Pruksanubal²

¹Thai-German Pre-Engineering School, College of Industrial Technology

²Department of Electrical and Electronic, Faculty of Engineering

King Mongkut's University of Technology North-Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangkok, Thailand, 10800

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : piyapat.p@cit.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงงานวิจัยเรื่องการจำลองผลกระทบจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อศีรษะและสมองของมนุษย์ โดยการใช้ตัวแปรสามตัว ประกอบด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้า มวลเนื้อเยื่อเฉลี่ยของศีรษะและสมองและความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์ ผลลัพธ์ของการจำลองนี้ถูกวัดโดยค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate: SAR) ค่าความหนาแน่นพลังงานสูญเสียในศีรษะมนุษย์ และรูปแบบการแผ่พลังงานจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ งานวิจัยนี้จำลองโดยใช้แบบจำลองศีรษะแบบ Flat Specific Anthropomorphic Mannequin (SAM) ร่วมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามมาตรฐาน IEEE วิธีที่ใช้ในการจำลองนี้มีสองวิธีได้แก่ Perfect Boundary Approximation (PBA) และ Thin Sheet Technique (TST) สำหรับการแบ่งเมช ร่วมกับระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องในโดเมนเวลาสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ผลการวิจัยพบว่าค่า SAR ในทุกเงื่อนไขการจำลองอยู่ในช่วง 0.013-9.95 วัตต์ต่อกิโลกรัม ประการที่สองมีความสัมพันธ์ในทางบวกระหว่างค่า SAR กับมวลเนื้อเยื่อเฉลี่ยและความถี่ ประการที่สามพื้นที่ค่า SAR อันเนื่องมาจากความถี่ 1800 MHz นั้นแคบที่สุดเพราะมี Main lobe direction เท่ากับ -60 องศา และสุดท้ายค่าความหนาแน่นพลังงานสูญเสียแปรผกผันกับค่าความถี่

คำสำคัญ อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ ความหนาแน่นพลังงานสูญเสีย รูปแบบการแผ่พลังงาน

Abstract

This article describes research entitled the simulation of effect from mobile phone to human head and brain. Based on three variables, they are comprised of electrical properties, averaged mass tissues of human head and brain and frequencies of electromagnetic wave from the phone. The results of this simulation are power pattern of mobile phone, Specific Absorption Rate (SAR) and power loss density in human head. The research uses Flat Specific Anthropomorphic Mannequin (SAM) combined with IEEE mobile phone. The two methods named Perfect Boundary Approximation (PBA) and Thin Sheet Technique (TST) are used for mesh dividing. Finite Difference Time Domain numerical method is used to analyze. The results are found that SAR values in

all conditions are in the range of 0.013-9.95 W/kg. The second point, the SAR values are increased according to averaged mass tissues and frequencies. Then, the area of SAR values of 1800 MHz is the narrowest due to - 60 degree Main Lobe direction. Finally, the power loss density varies directly with frequencies.

Keywords: specific absorption rate, power loss density, power pattern.

1. บทนำ

ในสภาวะการณ์ปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ออกพัฒนาและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยอุปกรณ์นั้นได้เป็นตัวกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference) ซึ่งถ้ามนุษย์ได้รับคลื่นนี้ในปริมาณและเวลาที่มากพอ ก็อาจนำไปสู่การเกิดโรคต่างๆ เช่น มะเร็ง พาร์กินสัน อัลไซเมอร์ และ โรคทางระบบสืบพันธุ์ เป็นต้น องค์การอนามัยโลก สื่อ และ งานวิจัยจำนวนมากได้มีคำเตือนถึงอันตรายที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่เหล่านี้ ดังรูปที่ 1 [1-2]



รูปที่ 1 ความเสี่ยงอันเนื่องมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ จาก (www.deesillustration.com)

ในทางวิศวกรรมการศึกษาผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อมนุษย์ หรือ biological effect เป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งในด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic compatibility) ค่า SAR เป็นส่วนหนึ่งของการวัด biological effect โดยการวัดผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสุขภาพของมนุษย์ งานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับ SAR ในศีรษะมนุษย์สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 วิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของการดูดซับพลังงานศีรษะมนุษย์อันเนื่องมาจากตำแหน่งของโทรศัพท์ โดยการวัดค่ายอดและค่ารวมของ SAR ทั้งมวลเนื้อเยื่อเฉลี่ย 1 และ 10 กรัม ที่ 850, 900 และ 1600

MHz ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งและมุมของโทรศัพท์มีผลต่อค่า SAR กลุ่มที่ 2 เน้นการแปรผันของขนาดและชนิดของศีรษะ โดยการวัดค่ายอดของ SAR มวลเนื้อเยื่อเฉลี่ย 10 กรัม ความถี่ 835 และ 1900 MHz ในขณะที่กลุ่มที่ 3 ได้พัฒนาการตรวจสอบในทางปฏิบัติ โดยการเพิ่มมือของมนุษย์เข้ามาคำนวณค่า SAR ด้วย กลุ่มนี้มีสภาวะการทดลองคือวัดค่า SAR รวม มวลเนื้อเยื่อเฉลี่ย 1 และ 10 กรัม ความถี่ 835 - 2100 MHz กลุ่มสุดท้ายเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบจากวัตถุโลหะรูปทรงวงแหวนต่อการดูดซับพลังงานที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งผลการวิจัยคือการดูดซับพลังงานขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งของวัตถุ สภาวะการทดลองนี้คือการวัดค่า SAR รวม มวลเนื้อเยื่อเฉลี่ย 10 กรัม ความถี่ 1900 MHz บทความนี้สนใจในผลกระทบของการดูดซับพลังงานในศีรษะมนุษย์อันเนื่องมาจากมวลเนื้อเยื่อเฉลี่ย 1 และ 10 กรัม และความถี่ใช้งาน 850, 900, 1800 และ 1900 MHz ซึ่งเป็นความถี่ในระบบ Global System for Mobile communication (GSM) เพื่อช่วยเสริมข้อมูลของค่า SAR รูปแบบของสนาม ระยะไกล และค่าความหนาแน่นพลังงานสูญเสียมากขึ้น [3-9]

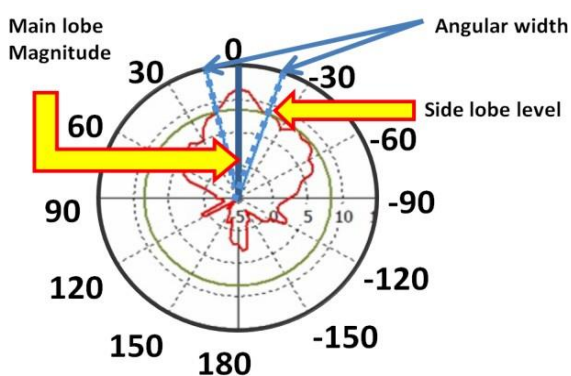
2. สนามระยะไกล

สนามระยะไกลคือกราฟแสดงคุณลักษณะของสายอากาศซึ่งแผ่ออกมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยประกอบด้วยค่าความถี่ ขนาดและทิศทางของโลบหลัก (main lobe magnitude and direction) ความกว้างประกอบไปด้วยค่าความถี่ ขนาดและทิศทางของโลบหลัก (main lobe magnitude and direction) ความกว้างของมุม (angular width) และระดับโลบข้าง (side lobe level) สนามระยะไกลแปรผันโดยตรงกับความถี่ขนาด

ของโอบหลักคือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมามากที่สุด มีหน่วยเป็นเดซิเบล รัศมีของโอบหลักมีสูตรว่า [10]

$$R = 2d^2 / \lambda \quad [\text{m}] \quad (1)$$

โดยที่ d หมายถึงค่าระยะห่างของสายอากาศที่มากที่สุด หน่วยเป็นเมตร และ λ คือความยาวคลื่น หน่วยเป็นเมตรทิศทางของโอบหลักแสดงทิศทางของเวกเตอร์ สนามไฟฟ้าในหน่วยองศา ระดับโอบข้างกล่าวเกี่ยวกับขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ขอบของความกว้างของมุมงานวิจัยนี้เน้นที่พิกัดเชิงขั้วของสนามระยะไกล ที่ประกอบไปด้วย 4 ค่าหลักที่ได้กล่าวมาแล้วดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 พิกัดเชิงขั้วของสนามระยะไกล

3. อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (SAR) และความหนาแน่นพลังงาน

SAR ถูกใช้เพื่อคำนวณหาปริมาณของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เนื้อเยื่อของมนุษย์ได้ดูดซับไว้ในหน่วยวัตต์ต่อ กิโลกรัม (W/kg) การเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์ไร้สายทำให้ปริมาณของพลังงานการแผ่กระจายคลื่นต่อร่างกายมนุษย์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพราะฉะนั้นเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะหลีกเลี่ยงพลังงานการแผ่กระจายคลื่นเข้าไปในศีรษะ ซึ่งค่า SAR สามารถคำนวณได้โดย [11]

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} E^2 = \frac{P}{\rho} \quad [\text{W/kg}] \quad (2)$$

โดยที่

σ คือ ค่าความนำไฟฟ้า หน่วยเป็นซีเมนส์ต่อเมตร

ρ คือความหนาแน่น หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

E คือสนามไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร

P คือความหนาแน่นพลังงาน หน่วยเป็นวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร

ในการทดลองทาง thermographic ค่า SAR สูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SAR = \frac{C \cdot \Delta T}{2\rho} \quad [\text{W/kg}] \quad (3)$$

เมื่อ

C = ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุภาพเสมือน [(จุลต่อ กิโลกรัม) * เคลวิน]

ΔT = การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดใดๆ [เคลวิน]

Δt = ช่วงเวลาของการแผ่รังสี [วินาที]

โดยทั่วไปปริมาณเนื้อเยื่อที่ถูกนำมาคำนวณค่า SAR จะมีค่า 1 และ 10 กรัม อันเนื่องมาจากข้อกำหนดจาก International Commission on Non-Ionization Radiation Protection (ICNIRP) และ American National Standard Institute (ANSI) ในปี 1991 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ได้ตีพิมพ์ “Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz.” ได้ระบุค่าของความหนาแน่นพลังงานไว้ด้วย โดยกล่าวว่าพลังงานทั้งหมดที่ล้อมรอบพื้นที่ผิวปิดสามารถคำนวณได้จากสูตร

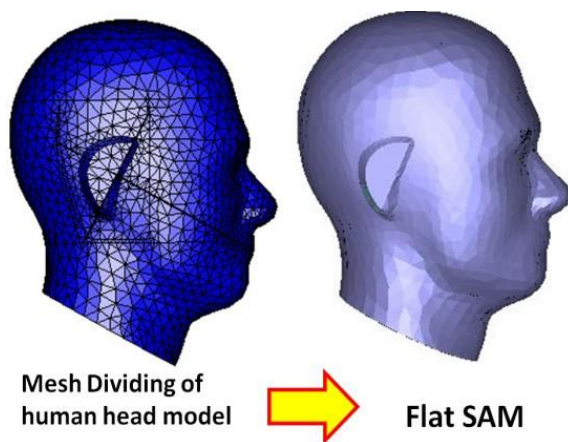
$$P = \frac{f}{300} \quad [\text{W/m}^3] \quad (4)$$

โดย f คือความถี่ จนมาถึงปัจจุบัน IEEE ได้ปรับปรุงมาตรฐานให้ทันสมัย จึงได้ตีพิมพ์ IEEE Std. 1528™ - 2013 “Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques.” ซึ่งได้มีการคำนวณค่า SAR บริเวณเฉลี่ยค่าอด ในทางปฏิบัติค่า SAR นั้นได้ถูกแนะนำถึงค่า SAR บริเวณเฉลี่ยค่าอดสูงสุดที่ไม่ควรเกิน โดย 2 องค์กรคือ ICNIRP ได้จำกัดไว้ที่ 2 W/kg และ International Electrotechnical Commission (IEC) ร่วมกับองค์การอาหารและยา (FDA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้จำกัดไว้ที่ 4 W/kg ถ้าค่า SAR เกินขีดจำกัด

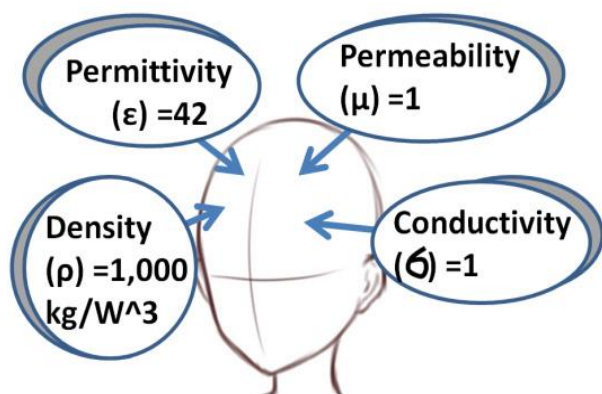
พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจจะสามารถเอาชนะสมดุของอุณหภูมิร่างกาย เนื้อเยื่อก็จะได้รับความร้อนมากขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดโรคต่างๆ ในที่สุด [12-15]

4. โมเดลการจำลอง

โมเดลศีรษะเป็นโมเดลที่ถูกปรับแต่งเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของการทดลองของ Specific Anthropomorphic Mannequin (SAM) หรือเรียกว่า Flat SAM ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 Flat SAM



รูปที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง

ภายในบรรจุของเหลวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 42 ค่าสภาพยอมให้ซึมผ่านได้เท่ากับ 1 ค่าความหนาแน่นมวลเท่ากับ 1000 กก.ต่อลบ.ม. และค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 1 ซี-เมนส์ต่อเมตรดังรูปที่ 4 โมเดลสมอนั้นถูกออกแบบให้เป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 170 มิลลิเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกระจายตัวจำลองอันดับ 4 ค่าสภาพให้

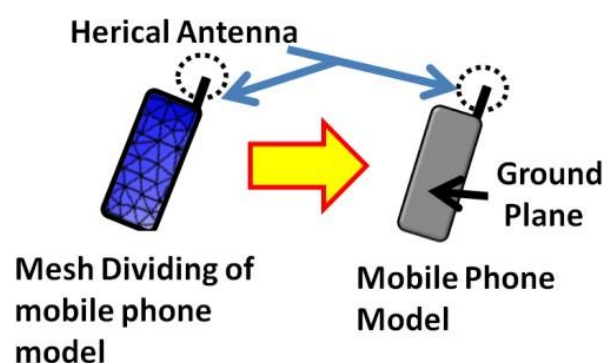
ซึมผ่านได้เท่ากับ 1 และค่าความหนาแน่นมวลเท่ากับ 1030 กก.ต่อลบ.ม. โมเดลโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นโทรศัพท์ทั่วไปแบบโมโนโพลซึ่งเรียกว่า โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ IEEE โดยเป็นที่รู้จักกันว่าถูกใช้เพื่อการจำ ลองเพื่อหาค่า SAR โทรศัพท์เคลื่อนที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือโครงและสายอากาศโมโนโพล แบบเกลียว โครงนั้นทำมาจากตัวนำไฟฟ้าที่ยาว (PEC) ซึ่งทำหน้าที่เป็นกราวด์ ส่วนสายอากาศนั้นก็มีกำลังไฟฟ้า 1 วัตต์ ทำมาจาก PEC เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5 การออกแบบสายอากาศเกลียวที่แสดงในรูปที่ 6 นั้นมี 5 ตัวแปร ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$L^2 = (\pi D)^2 + S^2 \quad [\text{cm}] \quad (5)$$

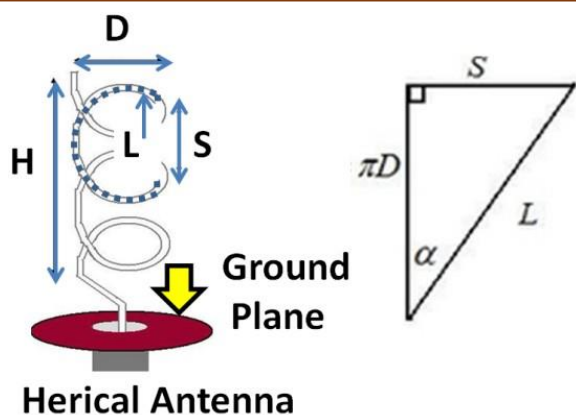
$$\tan \alpha = \frac{S}{\pi D} \quad (6)$$

$$H = NS \quad [\text{cm}] \quad (7)$$

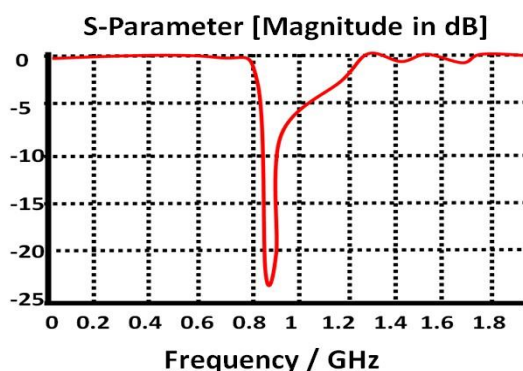
โดยที่ N นั้นคือจำนวนรอบของขดลวด ความถี่ที่สายอากาศส่งออกมานั้นคือ 900 MHz ซึ่งแสดงผ่านพารามิเตอร์ S11 ดังแสดงในรูปที่ 7 วิธีการที่ใช้คำนวณคือระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่องจา กัดโดเมนเวลา (finite difference time domain) เข้ากับสมการแมกซ์เวลล์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5 โทรศัพท์เคลื่อนที่ตามมาตรฐาน IEEE



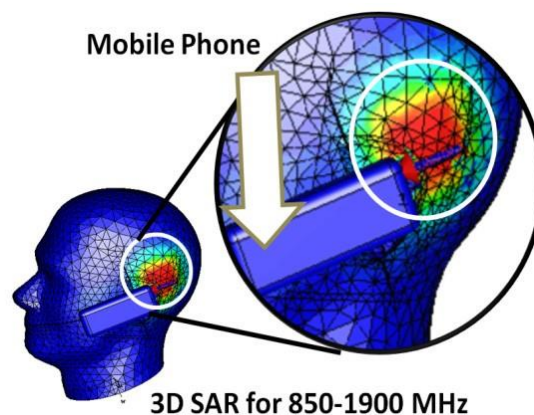
รูปที่ 6 การออกแบบสายอากาศแบบเกลียว



รูปที่ 7 พารามิเตอร์ S ของสายอากาศ

5. ผลการจำลอง

จากการศึกษาด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์เพื่อหาค่า SAR ค่ายอด สนามระยะไกล และความหนาแน่นพลังงานสูญเสียถูกวัดใน ความถี่ใช้งาน 4 ค่าอันได้แก่ 850, 900, 1800 และ 1900 MHz และมวลเนื้อเยื่อเฉลี่ย 2 ค่า คือ 1 และ 10 กรัม รูปแบบของการแสดงผลการจำลองอยู่ในรูปที่ 8 และจาก ตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่า SAR นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ ความถี่มากขึ้น และค่านี้ใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่นงานวิจัยของ Eduard (2012) ในกรณีมวลเนื้อเยื่อเฉลี่ย 10 กรัม ความถี่ 900 MHz ค่า SAR นั้นต่างกัน 0.15 W/kg และ Joo (2005) ก็สอดคล้องเช่นกัน [16] ในกรณีมวล เนื้อเยื่อเฉลี่ย 1 กรัมความถี่ 1800 MHz ค่า SAR นั้นต่างกัน 0.12 W/kg [17] และเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขทาง ชีววิทยา คือ ถ้าค่า SAR เท่ากับ 1 W/kg จะทำให้เกิดการ เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อ 0.11 °C ก็สามารถสรุป ได้ว่าผลการทดลองนี้อาจทำให้อุณหภูมิภายในศีรษะและ สมอเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 0.11°C



รูปที่ 8 ตัวอย่างการแสดงผลจากการจำลอง

ตารางที่ 1 ค่า SAR ในทุกสถานะการทดลอง

Frequency (MHz)	Mass Tissue (gram)	SAR (W/kg)	
		Head	Brain
850	1	5.21	3.266
	10	6.33	1.971
900 effective frequency	1	5.49	2.998
	10	6.48	1.895
1800	1	0.199	5.555
	10	8.41	3.544
1900	1	0.284	4.583
	10	9.95	2.765

สนามระยะไกลถูกกล่าวถึงเป็นผลการจำลอง ประการที่ 2 เวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ออกมาจากสายอากาศ ถูก พิจารณาจากการที่โทรศัพท์อยู่ในแนวแกน x และจาก ผลการ จำลองในตารางที่ 2 ที่มีค่าขนาดและทิศทางของ โลบลึก ความกว้างของมุมและระดับโลบข้างพบว่า ค่าองศาของ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าไม่ขึ้นอยู่กับมวล เนื้อเยื่อเฉลี่ยและความถี่ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจากความถี่ 1800 MHz นั้นเบี่ยงเบนไป จากแกน 0 องศามากที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ -60 องศา [18-19]

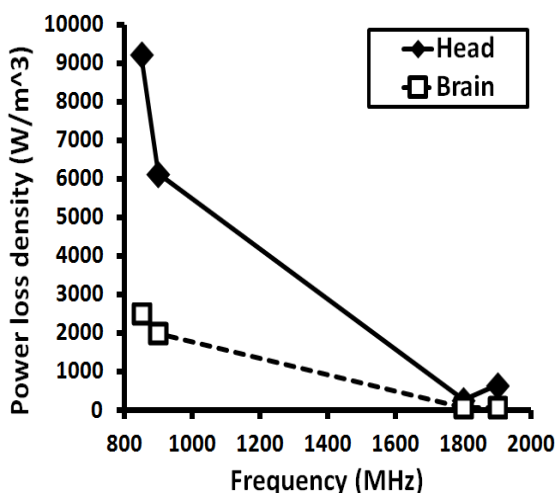
ตารางที่ 2 ส่วนประกอบต่างๆ ของสนามระยะไกล

Frequencies (MHz)	Electric Field Vector (Degree)	Angular Width (Degree)	Main lobe magnitude (dB)	Side lobe level (dB)
850	-5	117.2	0.03	-10.7
900	-5	114.9	0.7	-11.4
1800	-60	111.9	0.52	-11.4
1900	0	31.7	11.5	-3.1

ความหนาแน่นพลังงานนั้นหาได้จาก $SAR \cdot P$ จากรูปที่ 9 ความหนาแน่นกำลังแปรผันกลับกับความถี่ของศีรษะและสมองของมนุษย์ในลักษณะกราฟเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของโทรศัพท์และความหนาแน่นกำลังของศีรษะและสมองด้วยวิธีการ regression [20] ค่า R^2 นั้นเท่ากับ 0.9709 นั้นหมายความว่ากราฟที่ได้มีความใกล้เคียงค่าที่พล็อตได้ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$P = \frac{74}{ef} \quad [kW/m^3] \quad (8)$$

$$P = \frac{46}{ef} \quad [kW/m^3] \quad (9)$$



รูปที่ 9 ค่าความหนาแน่นกำลังแปรผันตามความถี่

6. สรุป

บทความนี้ได้แสดงให้เห็นว่าโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นได้กระจายพลังงานออกมาแล้วศีรษะมนุษย์นั้นก็ได้ดูดซับพลังงานเอาไว้ อัตราการดูดซับพลังงานนั้นก็แปรผันตามความถี่ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าอยู่ใน ระหว่าง 0.199 – 9.95 W/kg และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า ขีดจำกัดขององค์กรต่างๆ ก็เกินค่าที่กำหนดไว้ แต่อย่างไรก็ตาม อันตรายจากพลังงานจากโทรศัพท์ นั้นก็ต้องมีช่วงระยะเวลาหนึ่ง จึงอาจกล่าวได้ว่าคลื่นจากโทรศัพท์นั้นไม่ได้ทำอันตรายต่อ ศีรษะของมนุษย์มากนัก

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยในด้านต่างๆ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งคณะผู้เขียนบทความจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] David M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, 4th Edition, 2012.
- [2] World Health Organization, Electromagnetic fields and public health: mobile phones, 2014.
- [3] J.G. Eduard, C. Moraru, and R. Mihai, “Study of Energy Absorption Field Emitted by Generic Mobile Phone at 900 MHz Frequency”, 9th International Conference on Communications (COMM), Bucarest, 2012, pp.267-270.
- [4] Lee A. K. and Yun J., “A Comparison of Specific Absorption Rates in SAM Phantom and Child Head Models at 835 and 1900 MHz”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Vol.53 No.3, (March 2011) : 619-627.
- [5] Hadjem A., et al., “Analysis of Power Absorbed by Children’s Head as a Result of New Usages of Mobile Phone”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.52. No.4. (August 2010) : 812-819.
- [6] C. Sriprasoet and A. Pruksanubal, “Effects of Ring Metallic Objects on Specific Absorption Rate in Human Head Caused by Mobile Phone”, 12th International conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecom-munications and Information Technology, Hua Hin, Thailand, 2015.
- [7] A.Hirata et.al., “Temperature Increase in the Human Head Due to a Dipole Antenna at Microwave Frequencies”, IEEE transactions on



- Electromagnetic Compatibility, Vol.45, No.1, Feb.2003
- [8] Behari J and Nirala JP, "Specific absorption rate variation in a brain phantom due to exposure by a 3G mobile phone: problems in dosimetry", Indian J Exp Biol. 2013 Dec;51 (12):1079-85.
- [9] P. Pongsri and A. Pruksanubal, "The biological effect from mobile phone in human head", 13th International conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chiangmai, Thailand, 2016.
- [10] Soo-Ji Lee, et al., "Bandwidth Enhanced Tri-Band Monopole Slot Antenna on Ultra-Thin Metal Housed Devices", The 44th European Microwave Conference, Italy, Oct 2014.
- [11] G. Schmid et. al., "Bestimmung der Expositionsverteilung von HF Feldern im menschlichen Koerper unter Beruecksichtigung kleiner Strukturen und thermophysologisch relevanter Parameter", Forschungsvorhaben, Deutschland, 2008.
- [12] Institute of Electrical and Electronics Engineers. "Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields - RF and Microwave" IEEE Standard C95.3TM-1991. [serial online] 1991 : 1-93.
- [13] Institute of Electrical and Electronics Engineers. "Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz." IEEE Standard C95.1TM-2005. [serial online] 2005 : 1-238.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers. "Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques." IEEE Std 1528TM- 2013. [serial online] 2013 : 1-246.
- [15] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)." Health Physics 74 (4), [serial online] 1998 : 494-522.
- [16] Ervin Joo, "Absorption of The Electromagnetic Energy in Human Head", Doctoral Dissertation, 2005.
- [17] Lias K., et al. "Biological Effect of 900 MHz and 1800 MHz Mobile Phones in SAR Weight." In IEEE. 2nd International Conference on Information and Multimedia Technology (ICIMT), Jeju Island, 2009 : (422-425).
- [18] Andre V. Vorst, Arye Rosen and Youji Kotsuka, RF/Microwave Interaction with Biological Tissues, Wiley-Interscience, 2006.
- [19] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Wiley-Interscience, 3rd Edition, 2005.
- [20] K. Huang and Y. Liao, "Transient Power Loss Density of Electromagnetic Pulse in Debye Media", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.63, No.1, Jan. 2015.



ผลของความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

Effects of Evaporator Length and Number of Turns of Closed-Loop Oscillating Heat Pipe on Thermal Performance of Flat Plate Solar Collector

ทิวากร กาจันทร์ ธนกร แต่งก่อ วีรชัย แก้วฉัยยา นพรัตน์ สีหะวงษ์ ปฐมศก วิไลพล และ ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ *

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Thiwakorn Kachan, Tanagorn Tangkor, Weerachai Keawchaiya, Nopparat Seehawong,

Patomsok Wilaipon and Piyanun Charoensawan *

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

99 Moo 9 Phitsanulok-Nakhonsawan Road, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน : piyanunc@nu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-5596-4231

บทคัดย่อ

ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีขนาด $1 \times 1.5 \text{ m}^2$ ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสร้างจากท่อคาปิลลารีทองแดงและใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงาน ทำการศึกษาเชิงการทดลองถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์ คือ ความเข้มแสง ความยาวของส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยทำการทดสอบตัวรับรังสีอาทิตย์กับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ใช้หลอดไฟฮาโลเจนเป็นตัวจำลองพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า สมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง ความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเลี้ยวที่เหมาะสมของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบคือ 1 m และ 20 รอบ ตามลำดับ โดยให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดประมาณ 0.6

คำสำคัญ ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ สมรรถนะทางความร้อน

Abstract

The tested flat plate solar collector was $1 \times 1.5 \text{ m}^2$ in size. The closed-loop oscillating heat pipe (CLOHP) was made of a copper capillary tube and the distilled water was used as its working fluid. The effects of various parameters i.e., the solar intensity, the evaporator length of CLOHP and the number of meandering turns of CLOHP, on the thermal performance of solar collector were experimentally investigated. The solar collector was tested under the solar simulator. The halogen lamps were used to simulate the solar energy. It was found from all experiments that the thermal performance of solar collector improved with an increase in the radiation intensity. The proper evaporator length and number of turns, for which the maximum thermal efficiency of flat plate solar collector with CLOHP was about 0.6, were 1 m and 20 turns, respectively.

Keywords: closed-loop oscillating heat pipe, evaporator length, flat plate solar collector, number of turns, thermal performance.

1. บทนำ

การศึกษาพัฒนาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบในการผลิตน้ำร้อนอย่างต่อเนื่อง เช่น การปรับปรุงกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงานตัวกลาง (absorbing medium) ที่นำความร้อนจากผิวดูดซับมาถ่ายเทให้กับน้ำในถังเก็บ [1] การใช้ของไหลนาโน (nanofluid) เป็นสารทำงานตัวกลางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวรับรังสี [2] เนื่องจากสารทำงานตัวกลางไม่มีการเปลี่ยนสถานะจึงเป็นการถ่ายเทความร้อนสัมผัส (sensible heat) ซึ่งมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับค่าความร้อนแฝง (latent heat) จึงมีการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์นำความร้อนจากผิวดูดซับมาให้น้ำ โดยสารทำงานภายในท่อความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะส่งถ่ายความร้อน อย่างไรก็ตามท่อความร้อนที่นำมาใช้ในตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบมักจะเป็นแบบทั่วไป นั่นคือ เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ [3-6] ซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการไหลเวียนของของเหลวควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหยจึงมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนต่ำเมื่อวางตัวเอียงทำมุมน้อยกว่า 50° เทียบกับแนวระดับ [7] จึงมีการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนที่มีวัสดุพรุนในตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ [8-11] ซึ่งอาศัยแรงคาпилลารีช่วยในการไหลเวียนของของเหลวควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหย แต่การใช้วัสดุพรุนจะมีการออกแบบและสร้างที่ซับซ้อนและยุ่งยากขึ้นทำให้ราคาการผลิตสูงขึ้นด้วย และยังพบขีดจำกัดสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนหลายอย่างเกิดขึ้นในท่อความร้อนชนิดนี้ [12] ซึ่งจะทำให้ท่อความร้อนไม่สามารถทำงานส่งถ่ายความร้อนได้ ดังนั้น เพื่อเป็นการกำจัดปัญหาเหล่านี้ จึงมีการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นซึ่งเป็นอุปกรณ์นำความร้อนที่มีสมรรถนะทางความร้อนสูง ถูกค้นพบและประดิษฐ์ขึ้นโดย Akachi ในราวปี ค.ศ. 1990 [13] ข้อดีของท่อความร้อนชนิดนี้คือ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูง สร้างขึ้นได้ง่ายโดยสร้างจากท่อคาพิลลารีขนาดเล็กระดับมิลลิเมตรท่อเดียวที่นำมาดัดโค้งขดไปมาระหว่างแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเกิดเป็นโค้งเลี้ยวขึ้น (meandering turn) จึงสามารถดัดโค้งตัวท่อให้เหมาะสมกับงานได้ตามต้องการ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเกี่ยวกับตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบยังมีค่อนข้างน้อยมาก นั่นคือ Arab และคณะ (2012) [14] ได้ทำการศึกษาเชิงการทดลองถึงการใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบควบคู่กับการไหลเวียนแบบธรรมชาติของน้ำร้อนในตัวรับรังสี (thermosyphon solar water heater) โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นอุปกรณ์เสริมที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากผิวดูดซับมาให้น้ำในถังเก็บและมีการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการเติมสารทำงานภายในท่อความร้อนด้วย แต่การออกแบบการวางตัวของระบบท่อค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากมีการใช้ทั้งท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและระบบท่อไหลเวียนของน้ำร้อนแบบธรรมชาติด้วยสำหรับตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้เฉพาะท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นอุปกรณ์นำความร้อนของระบบได้มีการศึกษาไว้โดย Hudakorn และ Terdtoon (2010) [15] โดยนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจำนวน 5 ท่อ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 1 mm ความยาวส่วนควบแน่นเป็น 0.17 m ความยาวส่วนทำระเหยเป็น 1 m มีจำนวนโค้งเลี้ยวเท่ากับ 15 รอบ และใช้ R134a เป็นสารทำงานที่อัตราส่วนการเติมสารทำงานเท่ากับ 50% ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อความร้อน มาติดตั้งในตัวรับรังสีขนาด $2 \times 1 \text{ m}^2$ พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านส่วนควบแน่นของท่อความร้อนเพิ่มขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบในระบบการกลั่นน้ำด้วยแสงอาทิตย์มีการทำวิจัยไว้โดย Kargar Sharif Abed และคณะ (2013) [16] ท่อความร้อนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 2 mm ความยาวส่วนควบแน่นเป็น 0.4 m ความยาวส่วนทำระเหยเป็น 1 m จำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 24 รอบ และใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงาน ตัวรับรังสีมีขนาดเท่ากับ $0.5 \times 1 \text{ m}^2$ พบว่ามีอัตราการผลิตน้ำกลั่นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ Nguyen และคณะ (2012) [17] ได้ทำการศึกษาตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบกับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ โดยใช้หลอดไฟฮาโลเจนเป็นตัว

จำลองพลังงานแสงอาทิตย์ ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 2 mm และมีจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 8 รอบ พบว่าอัตราส่วนการเติม



สารทำงานและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลต่อสมรรถนะของตัวรับรังสี

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด จะเห็นว่าผลกระทบของความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบยังไม่ได้มีการศึกษาไว้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการวิเคราะห์ผลของตัวแปรเหล่านี้

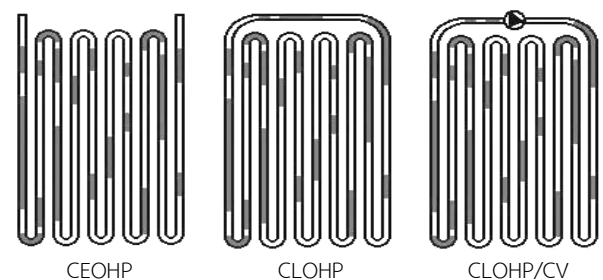
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ [18]

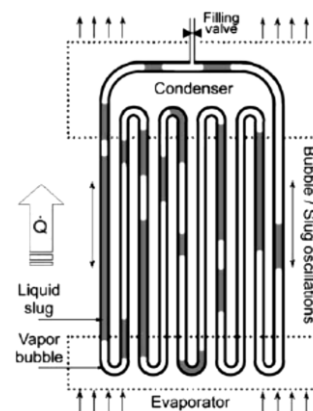
โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของท่อความร้อนแบบสั่นได้ 3 ชนิดตามโครงสร้างของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 1 คือ 1) ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (closed-end oscillating heat pipe, CEOHP) ที่มีการปิดปลายท่อทั้งสองข้างแยกจากกัน 2) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (closed-loop oscillating heat pipe, CLOHP) ที่มีการเชื่อมต่อปลายท่อทั้งสองข้างเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ และ 3) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีการติดตั้งวาล์วกันกลับไว้ในวงจรตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป (closed-loop oscillating heat pipe with check valves, CLOHP/CV) จากการเปรียบเทียบทั้งสามชนิดนี้พบว่า ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีฟลักซ์ความร้อนที่สูงสามารถสร้างขึ้นได้ง่าย และสามารถทำงานได้ไม่ว่าตัวท่อจะวางตัวเอียงทำมุมใดๆ เทียบกับแนวระดับ ตัวแปรที่มีผลต่อคุณลักษณะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบคือ จำนวนโค้งเลี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ความยาวส่วนทำระเหย อัตราส่วนการเติมสารทำงาน ชนิดของสารทำงาน มุมเอียงการทำงาน อุณหภูมิการทำงาน และความร้อนป้อนเข้าสู่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

กลไกพื้นฐานในการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างจากท่อความร้อนแบบธรรมดา นั่นคือ สารทำงานภายในท่อจะเรียงตัวอยู่ในรูปแท่งของเหลว (liquid slug) และฟองไอ (vapor bubble) สลับกันไปตลอดความยาวท่อแสดงในรูปที่ 2 เมื่อส่วนทำระเหย (evaporator) ได้รับความร้อน สารทำงานเหลวจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้ฟองไอในส่วนทำระเหยมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความดันไอเพิ่มขึ้น จึงเกิดแรงดันสารทำงานในรูปแท่งของเหลวและฟองไอให้ไหลไปยังส่วนควบแน่น (condenser) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เรียก

แรงนี้ว่า แรงขับ (driving force) หลังจากนั้นฟองไอยังเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวที่ส่วนควบแน่นนี้ และช่วยเพิ่มผลต่างความดันระหว่างสองส่วนนี้ เนื่องจากท่อคาปิลลารีเป็นท่อเดี่ยวที่ขดไปมาระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นยาวต่อเนื่องกันไป ดังนั้นการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวและฟองไออนั่นหนึ่งจากส่วนทำระเหยมายังส่วนควบแน่น จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของแท่งของเหลวและฟองไออนั่นหนึ่งผ่านโค้งเลี้ยวมายังส่วนทำระเหยและเกิดการระเหยของสารทำงานเช่นกัน จึงทำให้ความดันไอเพิ่มสูงขึ้นและเกิดแรงย้อนกลับ (restoring force) ซึ่งจะดันสารทำงานให้ไหลย้อนกลับไปยังส่วนควบแน่นอีกครั้ง จากผลของแรงขับและแรงย้อนกลับที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมาหรือแบบสั่นของสารทำงานตามแนวแกนท่อ (oscillation) และสารทำงานสามารถส่งถ่ายความร้อนจากส่วนทำระเหยมายังส่วนควบแน่นได้



รูปที่ 1 ประเภทของท่อความร้อนแบบสั่น [18]

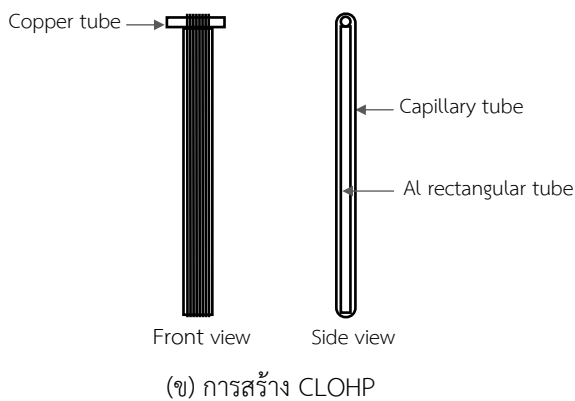
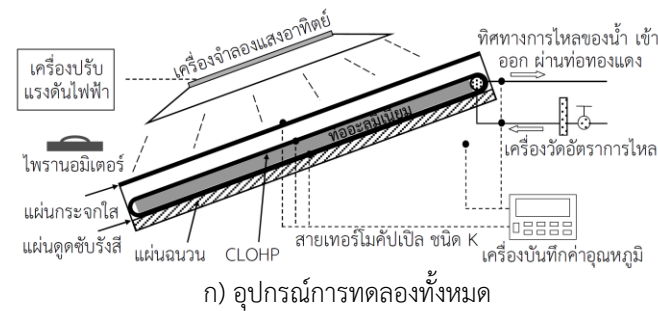


รูปที่ 2 การจัดเรียงตัวสารทำงานภายในท่อ [18]

2.1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 3 (ก) ประกอบด้วย ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่มีท่อความ

ร้อนแบบสั่นวงรอบซึ่งเอียงทำมุม 18 องศาจากแนวระดับ เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ต่อเข้ากับเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าไพแรนอมิเตอร์ (pyranometer) ที่ต่อเข้ากับเครื่องมัลติมิเตอร์ (multimeter) สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type thermocouple) ที่ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ และเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ



รูปที่ 3 รายละเอียดอุปกรณ์การทดลอง

ตัวรับรังสีมีขนาดเท่ากับ $1 \times 1.5 \text{ m}^2$ มีแผ่นกระจกใสปิดอยู่ที่ด้านบน ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจำนวน 5 ท่อ ซึ่งติดตั้งอยู่บนแผ่นดูดซับรังสี (absorber plate) ที่มีสีดำ และมีแผ่นฉนวนกันความร้อนปิดอยู่ด้านล่างของแผ่นดูดซับรังสี ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบแต่ละท่อจะสร้างขึ้นจากท่อคาปิลลารีทองแดง (copper capillary tube) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเป็น 1.5 mm และ 2.8 mm ตามลำดับ โดยนำท่อคาปิลลารีทองแดงมาพันรอบท่ออะลูมิเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและท่อทองแดงเพื่อให้เกิดเป็นจำนวนโค้งเลี้ยวต่างๆ ดังรูปที่ 3 (ข) ซึ่งเป็นการออกแบบโดยเฉพาะเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรในการทดลองได้ง่ายและเหมาะสมกับระบบเครื่องทำน้ำร้อน

เนื่องจากมุมเอียงของท่อความร้อนที่ใช้ทดสอบมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงกำหนดจำนวนโค้งเลี้ยวที่ใช้ทดสอบ คือ 15 20 และ 25 รอบ ซึ่งจะสูงกว่าค่าจำนวนโค้งเลี้ยววิกฤติของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ [18] ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนจะพันอยู่บนท่ออะลูมิเนียมและความยาวเท่ากับ ความยาวท่ออะลูมิเนียม นั่นคือ 1 m และ 1.5 m ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hudakorn และ Terdtoon (2010) [15] โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมที่ความยาวส่วนทำระเหยเป็น 1.5 m ขณะที่ส่วนควบแน่นจะพันรอบท่อทองแดงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 12.7 mm ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงานที่อัตราส่วนการเติมสารทำงานเป็น 50% ของปริมาตรภายในท่อทั้งหมด เนื่องจากน้ำมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและค่าความตึงผิวที่สูง ไม่เป็นพิษ ราคาถูก และมีสภาพเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

ทำการทดสอบตัวรับรังสีตามมาตรฐานของ ASHRAE 93-77 [19] โดยเป็นการทดสอบในร่ม (Indoor) ภายใต้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ซึ่งใช้หลอดไฟฮาโลเจนขนาด 500 W จำนวน 9 หลอด เป็นตัวจำลองพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถปรับค่าความเข้มรังสีของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ได้ด้วยเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า และทำการวัดค่าความเข้มแสงด้วยไพแรนอมิเตอร์ (ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น SP Lite 2) ที่ต่อกับเครื่องมัลติมิเตอร์ (ยี่ห้อ EXTECH รุ่น MM560A) เมื่อแสงตกกระทบบนตัวรับรังสี ความร้อนที่ถูกเก็บไว้ในแผ่นดูดซับรังสีจะถ่ายเทให้แก่สารทำงานภายในส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ และมีการถ่ายเทความร้อนออกจากสารทำงานที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนให้แก่ น้ำที่ กำลังไหลผ่านภายในท่อทองแดง โดยน้ำหล่อเย็นที่ใช้ทดสอบมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ที่ 0.4 l/min และมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $28-30^\circ\text{C}$ ในระหว่างทำการทดลองจะทำการวัดค่าอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆ คือ อากาศแวดล้อม ผิวกระจก ผิวดูดซับรังสี ส่วนทำระเหยของท่อความร้อน และอุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของส่วนควบแน่น โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล (ยี่ห้อ OMEGA ชนิด K) และบันทึกค่าด้วยเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34970A ความละเอียด $\pm 0.5^\circ\text{C}$) หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งมีการพิจารณาถึงค่าความผิดพลาดของ



เครื่องมือวัด มาคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ ได้จาก

$$Q = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (1)$$

เมื่อ Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ, W

$\dot{m}_w$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ, kg/s

$c_{p,w}$ คือความร้อนจำเพาะของน้ำ, J/kg-K

$T_{w,o}$ คืออุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งทางออก, °C

$T_{w,i}$ คืออุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งทางเข้า, °C

และคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีจาก

$$\eta = \frac{\dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i})}{IA} \quad (2)$$

เมื่อ η คือประสิทธิภาพของตัวรับรังสี

I คือความเข้มแสง, W/m²

A คือพื้นที่ตัวรับรังสี, m²

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจะมีสมการเป็น [19]

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_e - T_a}{I} \quad (3)$$

เมื่อ F_R คือตัวประกอบการดึงความร้อนของตัวรับรังสี

$\tau\alpha$ คือค่าการส่งผ่านและการดูดซับรังสี

U_L คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวรับรังสี, W/m²-K

T_e คืออุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อน, °C

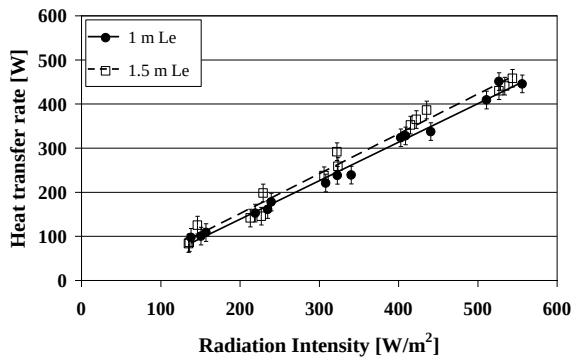
T_a คืออุณหภูมิอากาศแวดล้อม, °C

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

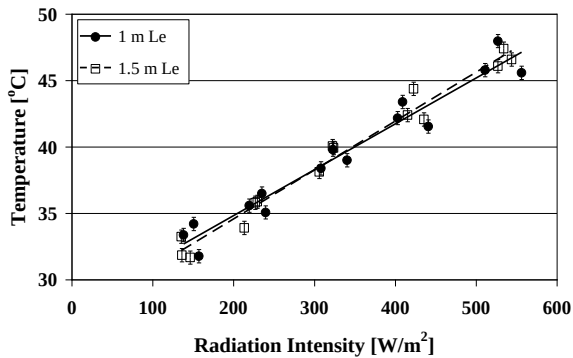
ตัวแปรที่ต้องการศึกษาประกอบไปด้วย ความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเกลียวของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบที่ใช้ในตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ และค่าความเข้มแสง ที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสี

3.1 ผลของความยาวส่วนทำระเหยและค่าความเข้มแสง

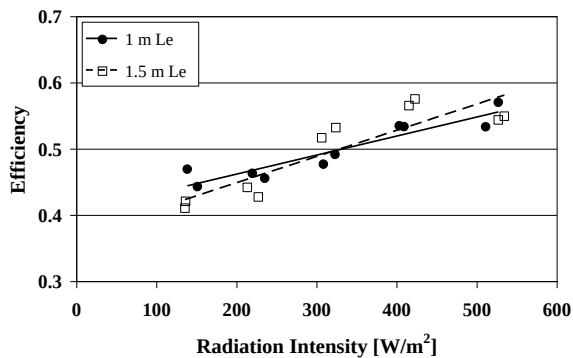
เนื่องจากจำนวนโค้งเกลียวของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นด้วย [18] ดังนั้นจึงเลือกตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีจำนวนโค้งเกลียวของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบต่ำสุดคือ 15 รอบ มาพิจารณาเพื่อให้เห็นผลกระทบของความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4 (ก-ค) แสดงผลกระทบของความยาวส่วนทำระเหยและค่าความเข้มแสงที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ จะเห็นว่าเมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ อุณหภูมิน้ำขาออก และประสิทธิภาพตัวรับรังสีจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยให้ผลไปในทางเดียวกันทั้งสองค่าของความยาวส่วนทำระเหย อย่างไรก็ตาม สำหรับความยาวส่วนทำระเหยที่ใช้ทดสอบที่ 1 m และ 1.5 m พบว่าความยาวส่วนทำระเหยจะมีผลต่อสมรรถนะของตัวรับรังสีค่อนข้างน้อย ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ อุณหภูมิน้ำขาออก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีที่มีความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบเป็น 1 m และ 1.5 m มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างกันประมาณ 6.4% อุณหภูมิน้ำร้อนขาออกจะแตกต่างกันประมาณ 3.2% และประสิทธิภาพตัวรับรังสีจะแตกต่างกันประมาณ 3.6% ที่ค่าความเข้มแสงสูงสุดประมาณ 530 W/m² ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก และประสิทธิภาพของตัวรับรังสีของทั้งสองความยาวส่วนทำระเหยจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 440 W 46.5°C และ 0.55 ตามลำดับ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงสนับสนุนงานวิจัยของ Hudakorn และ Terdtoon (2010) [15] โดยแสดงให้เห็นถึงสาเหตุของการเลือกใช้ท่อความร้อนแบบส้นวงรอบที่มีความยาวส่วนทำระเหยเป็น 1 m ในตัวรับรังสีอาทิตย์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของตัวรับรังสีจะแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากผลกระทบของชนิดของสารทำงานและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนที่ต่างกัน



(ก) อัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ



(ข) อุณหภูมิ น้ำร้อน ขาออก



(ค) ประสิทธิภาพ ตัวรับรังสี

รูปที่ 4 ผลกระทบของความยาวส่วนทำระเหย (Le)

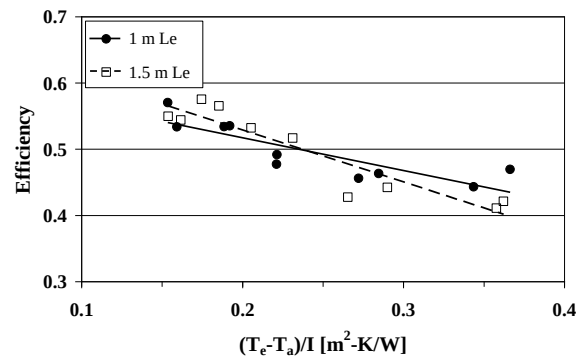
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพตัวรับรังสี (η) และ $(T_e - T_a)/I$ ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ 3 ขึ้น นั่นคือ สำหรับความยาวส่วนทำระเหยเป็น 1 m จะมีสมการเป็น

$$\eta = 0.6164 - 0.4951 \left(\frac{T_e - T_a}{I} \right) \quad (4)$$

และสำหรับความยาวส่วนทำระเหยเป็น 1.5 m จะมีสมการเป็น

$$\eta = 0.6858 - 0.7847 \left(\frac{T_e - T_a}{I} \right) \quad (5)$$

โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขการถดถอยแบบเชิงเส้นกำลังสองน้อยสุด (Least-square linear regression) กับชุดข้อมูลที่เชื่อถือได้ดังแสดงในรูป และได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ของทั้งสองสมการอยู่ที่ประมาณ 0.8 จุดตัดเส้นสมการกับแกนตั้งคือค่า $F_R(\tau\alpha)$ และความชันของเส้นสมการคือค่า $F_R U_L$ ดังสรุปในตารางที่ 1 ค่า $F_R(\tau\alpha)$ แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านและดูดซับรังสีของตัวรับรังสีและค่า $F_R U_L$ แสดงถึงสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสี แม้ว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสีที่มีความยาวส่วนระเหยของท่อความร้อนเป็น 1.5 m จะสูงกว่าค่าที่ 1 m แต่ค่าความสามารถในการส่งผ่านและดูดซับรังสีก็สูงกว่าด้วย ทำให้ประสิทธิภาพของตัวรับรังสีของทั้งสองความยาวส่วนทำระเหยมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ความยาวส่วนทำระเหยต่างๆ

ตารางที่ 1 ค่า $F_R(\tau\alpha)$ และ $F_R U_L$ สำหรับความยาวส่วนทำระเหยต่างๆ

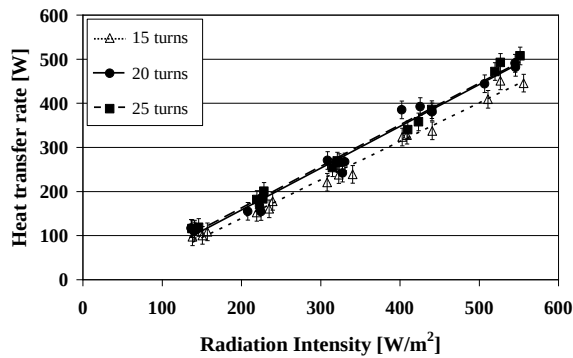
ความยาวส่วนทำระเหย (m)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$ (W/m²-K)
1.0	0.6164	0.4951
1.5	0.6858	0.7847

ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก แม้ว่าการเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นดูดซับมายังท่อความร้อน แต่ก็เป็น การเพิ่มพื้นที่ในการสูญเสียความร้อนของท่อความร้อนให้แก่ภาวะแวดล้อมเช่นเดียวกัน อีกทั้งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าเมื่อเพิ่มความยาวส่วนทำระเหยจะทำให้

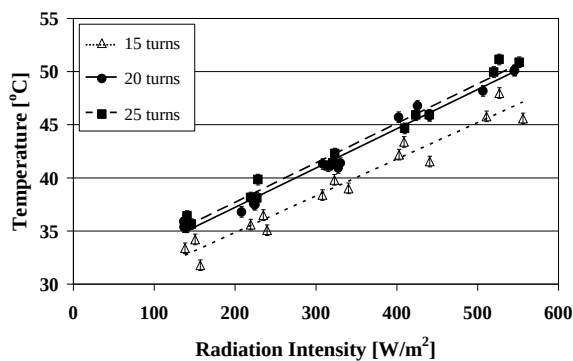


สมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบต่ำลง [18] เนื่องจากการเพิ่มการสูญเสียความดันของไหลทำงานในการเคลื่อนที่ระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารทำงานเพื่อส่งถ่ายความร้อนได้ยากขึ้นด้วย

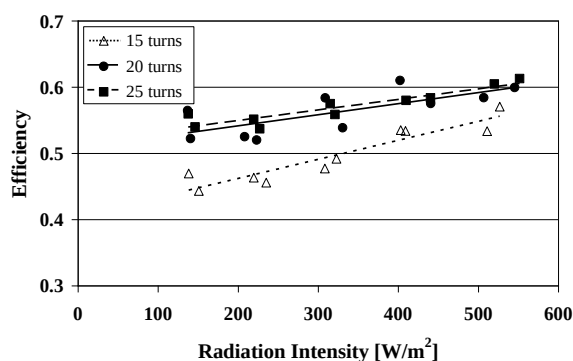
3.2 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยว



(ก) อัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ



(ข) อุณหภูมิ น้ำร้อน ขาออก

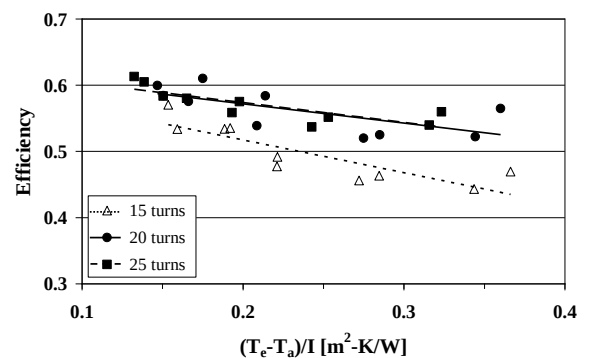


(ค) ประสิทธิภาพ ตัวรับรังสี

รูปที่ 6 ผลกระทบของจำนวนโค้งเลี้ยว (Number of turns)

จากผลของความยาวส่วนทำระเหยในหัวข้อก่อนหน้า ในหัวข้อนี้จึงพิจารณาเฉพาะตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส้นวงรอบซึ่งมีความยาวส่วนทำระเหย

เป็น 1 m เพราะตัวรับรังสีจะมีขนาดเล็กและใช้พื้นที่ในการติดตั้งลดลง รวมทั้งสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ ดังรูปที่ 6 (ก-ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ อุณหภูมิ น้ำร้อน ขาออก และประสิทธิภาพของตัวรับรังสีกับความเข้มแสงตามลำดับ ณ จำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบต่างๆ คือ 15 20 และ 25 รอบ พบว่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส้นวงรอบซึ่งมีจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 15 รอบ จะมีค่าต่ำกว่าที่ 20 และ 25 รอบ อย่างเห็นได้ชัดสำหรับสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 20 และ 25 รอบ นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างกันประมาณ 5.5% อุณหภูมิ น้ำร้อน ขาออกจะแตกต่างกันประมาณ 2.5% และประสิทธิภาพตัวรับรังสีจะแตกต่างกันประมาณ 2.6% ที่ค่าความเข้มแสงสูงสุดประมาณ 530 W/m² ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ อุณหภูมิ น้ำร้อน ขาออก และประสิทธิภาพของตัวรับรังสี ณ จำนวนโค้งเลี้ยวทั้งสองจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 480 W 50°C และ 0.6 ตามลำดับ



รูปที่ 7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรังสีอาทิตย์ที่จำนวนโค้งเลี้ยวต่างๆ

ตารางที่ 2 ค่า $F_R(\tau\alpha)$ และ $F_R U_L$ สำหรับจำนวนโค้งเลี้ยวต่างๆ

จำนวนโค้ง เลี้ยว (รอบ)	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$ (W/m²- K)
15	0.6164	0.4951
20	0.6302	0.2921
25	0.6335	0.2996

รูปที่ 7 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ณ จำนวนโค้งเลี้ยวต่างๆ นั้นคือ สำหรับจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 15 รอบ จะเป็นสมการที่ 4 นั้นเอง สำหรับจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 20 รอบ จะมีสมการเป็น

$$\eta = 0.6302 - 0.2921 \left(\frac{T_e - T_a}{I} \right) \quad (6)$$

และสำหรับจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 25 รอบ จะมีสมการเป็น

$$\eta = 0.6335 - 0.2996 \left(\frac{T_e - T_a}{I} \right) \quad (7)$$

จากสมการที่ได้จะสามารถทำนายค่าความสามารถในการส่งผ่านและดูดซับรังสีของตัวรับรังสีหรือ $F_R(\tau\alpha)$ และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสีหรือ $F_R U_L$ สรุปดังตารางที่ 2 จะเห็นว่า ค่าความสามารถในการส่งผ่านและดูดซับรังสีของตัวรับรังสีที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 15 รอบ จะมีค่าต่ำกว่าที่จำนวนโค้งเลี้ยว 20 และ 25 รอบ และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นตัวรับรังสีที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 15 รอบ จึงมีสมรรถนะทางความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอีกสองจำนวนโค้งเลี้ยวที่เหลือ สำหรับตัวรับรังสีที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 20 และ 25 รอบนั้น จะมีค่าความสามารถในการส่งผ่านและดูดซับรังสีและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนแทบไม่แตกต่างกัน ทำให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า แม้ว่าการเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะสามารถเพิ่มความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนได้ [18] เนื่องจากเป็นการเพิ่มความไม่สมดุลของความดันไอสารทำงานระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลทำงานเพื่อส่งถ่ายความร้อนได้มากขึ้น อีกทั้งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหยด้วย แต่ในทางกลับกันก็เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการสูญเสียความร้อนของท่อความร้อนให้แก่ภาวะแวดล้อมเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงมีจำนวนโค้งเลี้ยวที่เหมาะสมซึ่งให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีสุดคือ 20 รอบ นั้นเอง

4. บทสรุป

จากการทดลองศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ สรุปได้ว่า สมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง ความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเลี้ยวที่เหมาะสมของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบคือ 1 m และ 20 รอบ ตามลำดับ ณ ค่าความเข้มแสงสูงสุดประมาณ 530 W/m² ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสี จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 480 W 50°C และ 0.6 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณรายได้มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ภายใต้สัญญาเลขที่ R2559C196

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tse KK, Chow TT. Dynamic model and experimental validation of an indirect thermosyphon solar water heater coupled with a parallel circular tube rings type heat exchange coil. Solar Energy. 2015;114:114-33.
- [2] He Q, Zeng S, Wang S. Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids. Applied Thermal Engineering. 2015;88:165-71.
- [3] Esen M, Esen H. Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon solar water heater. Solar Energy. 2005;79(5):459-68.
- [4] Hussein HMS. Theoretical and experimental investigation of wickless heat pipes flat plate solar collector with cross flow heat exchanger. Energy Conversion & Management. 2007;48:1266-72.



- [5] Hussein HMS, El-Ghetany HH, Nada SA. Performance of wickless heat pipe flat plate solar collectors having different pipes cross sections geometries and filling ratios. *Energy Conversion & Management*. 2006;47(11-12):1539-49.
- [6] Nada SA, El-Ghetany HH, Hassein HMS. Performance of a two-phase closed thermosyphon solar collector with a shell and tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2004;24(13):1959-68.
- [7] Anon. Heat pipes-performance of two-phase closed thermosyphons. Data Item No. 81038. London: Engineering Sciences Data Unit;1981.
- [8] Azad E. Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008;32(8):1666-72.
- [9] Deng Y, Zhao Y, Quan Z, Zhu T. Experimental study of the thermal performance for the novel flat plate solar water heater with micro heat pipe array absorber. *Energy Procedia*. 2015;70:41-48.
- [10] Deng Y, Zhao Y, Wang W, Quan Z, Wang L, Yu D. Experimental investigation of performance for the novel flat plate solar collector with micro-channel heat pipe array (MHPA-FPC). *Applied Thermal Engineering*. 2013;54(2):440-49.
- [11] Wei L, Yuan D, Tang D, Wu B. A study on a flat-plate type of solar heat collector with an integrated heat pipe. *Solar Energy*. 2013;97:19-25.
- [12] Faghri A. *Heat pipe science and technology*. Washington: Taylor & Francis;1995.
- [13] Akachi H, Poláček F, Štulc P. Pulsating heat pipes. In: *Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium*, 1996, Melbourne, Australia. p. 208-217.
- [14] Arab M, Soltanieh M, Shafii MB. Experimental investigation of extra-long pulsating heat pipe application in solar water heaters. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012;42:6-15.
- [15] Hudakorn T, Terdtoon P. Thermal performance investigation of a closed-loop oscillating heat pipe flat plate solar collector. In: *Proceedings of the Second International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being*, 2010, Quang Binh University, Vietnam.
- [16] Kargar Sharif Abed H, Ghiasi M, Jahangiri Mamouri S, Shafii MB. A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe. *Desalination*. 2013;311:206-10.
- [17] Nguyen KB, Yoon SH, Choi JH. Effect of working-fluid filling ratio and cooling-water flow rate on the performance of solar collector with closed-loop oscillating heat pipe. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012;26(1):251-58.
- [18] Charoensawan P. *Heat pipe technologies*. Naresuan University: Department of Mechanical Engineering;2012. Thai.
- [19] Hirunlabh J. *Solar energy thermal processes*. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi;1998. Thai.

การออกแบบระบบควบคุมและการบันทึกข้อมูลระยะไกลเพื่อโรงเรือนสำหรับการเกษตรอัจฉริยะ โดยใช้ APRS โพรโตคอล

Designing Controlling System and Long Range Data-logging Systems for Smart Agriculture using APRS Protocols

นิมิตร หงษ์ยิม^{1*} และ สมศักดิ์ มิตะธา²

¹ สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์

9 หมู่ 1 ถนนนครอินทร์ อำเภอบางกรวย นนทบุรี 11130

² สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Nimit Hongyim^{1*} and Somsak Mitatha²

¹ Department of Business Computer, Faculty of Business Administration, Rajapruk University

9 M.1 Nakorn-in Road, Bang Khanun Sub-district, Nonthaburi, 11130

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1 Chalongkrung Road, Ladkrabang District, Bangkok, 10520

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : nimith@siamsq.net เบอร์โทรศัพท์ 02-510-0304

บทคัดย่อ

การนำระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมสภาพแวดล้อมที่อยู่ภายในโรงปลูกมาควบคุมการทำการเกษตร โดยควบคุมความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิต่อความชื้นที่มีความละเอียดถึง $\pm 5\%$ มีการคำนวณมาจากการหาค่าเฉลี่ยของเซ็นเซอร์จำนวน 4 ตัว ซึ่งในการทดลองนี้ที่ติดตั้งไว้ภายในโรงปลูกและมีการบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์และควบคุมการเพิ่มผลผลิตของการปลูกพืชตามเงื่อนไขของพืช แต่เนื่องจากข้อจำกัดสำหรับบางพื้นที่ที่ไม่มีอินเทอร์เน็ตซึ่งงานวิจัยนี้ได้แก้ปัญหาโดยการนำการส่งข้อมูลเพื่อผ่านคลื่นวิทยุโดยใช้เลือกใช้การส่งข้อมูล APRS (Automatic Position Report System) โพรโตคอล ซึ่งสามารถนำข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นไปบันทึกผลเข้าสู่ฐานรับเพื่อส่งเข้าฐานข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตในอีกพื้นที่ที่อยู่ห่างไปได้มากกว่า 1-2 กิโลเมตร เป็นผลการทดลอง

คำสำคัญ การเกษตรอัจฉริยะ ระบบการวัดอุณหภูมิและความชื้น โพรโตคอลระบบสื่อสารระยะไกล APRS

Abstract

Microcontroller system used for the internal environment control of farming which is to control the temperature humidity ratio with a resolution of $\pm 5\%$, by calculating the average of measurement from four sensors. In this experiment, the system was installed in a small Greenhouse to record information Data-log into Database for analysis and control to improve the productivity of crops in each condition. However, due to limitations in certain areas, i.e. no Internet access, this research has solved the problem by sending temperature and humidity information to the receiving station over RF (Radio Frequency) waves using the transmission APRS (Automatic Position Report System) protocol. This protocol enables access the database via the Internet in another location that is not more than 1-2 km away.

Keywords: smart farming, measuring system temperature and humidity, remote communication protocol APRS.

1. บทนำ

การทดลองวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ได้กับการเกษตรที่มีความต้องการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่แน่นอนและเที่ยงตรงโดยการทดลองนี้ได้เลือกการปลูกเห็ดซึ่งเป็นการปลูกที่มีข้อกำหนดของสภาพแวดล้อมที่ละเอียดอ่อนและมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมระดับของอุณหภูมิและความชื้นโดยปัญหาสำคัญในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงปลูกการควบคุมระบบสิ่งแวดล้อมภายในเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการปลูกเห็ดที่อาจจะนำความเสียหายได้ถ้าไม่มีดูแลอย่างใกล้ชิด การระบายอากาศแบบตั้งเวลา [1] การออกแบบการขจัดเชื้อราสูญเสียความชื้นเพราะว่าความชื้นที่ลดลงอาจเกิดได้จากความร้อนหรือความเย็นโดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการออกแบบสร้างมาในการปลูกเห็ดและทำให้เห็ดแห้งเสียหายได้ ดังนั้นมีความจำเป็นต้องนำระบบเกษตรอัจฉริยะที่มีคุณภาพ มาตรฐานและระบบอัตโนมัติมาใช้ โดยที่ผ่านมาการออกแบบในอดีตมีการสร้างระบบปลูกเห็ดโดยคอมพิวเตอร์ควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงปลูกโดยวัดจากเซ็นเซอร์ การใช้งานของระบบการควบคุมสภาพแวดล้อมซึ่งคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการเพาะปลูกส่วนใหญ่พัฒนาเพื่อการใช้ในโรงปลูกเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2-4] ซึ่งมีอยู่ในเชิงพาณิชย์ที่แพร่หลายแต่มีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาโดยใช้ต้นทุนต่ำและส่วนประกอบสามารถหาได้อย่างง่ายดายซึ่งการนำการพัฒนาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความแน่นอนและมีราคาต่ำรวมไปถึงความสามารถในการจัดบันทึกและติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายในโรงเห็ดที่ห่างไกลจากระบบบริการเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมาด้วยระบบออนไลน์โดยใช้ APRS protocol มาใช้ในการส่งข้อมูลจากพื้นที่ห่างไกลไปยังสถานีรับข้อมูลซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการให้บริการระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่สามารถบันทึกลงในฐานข้อมูลหลักเพื่อการเฝ้าดูผ่าน Web Interface ที่ได้พัฒนาไว้แล้วในการทำ Data Query ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ต้องมีการพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติมแต่อย่างใด

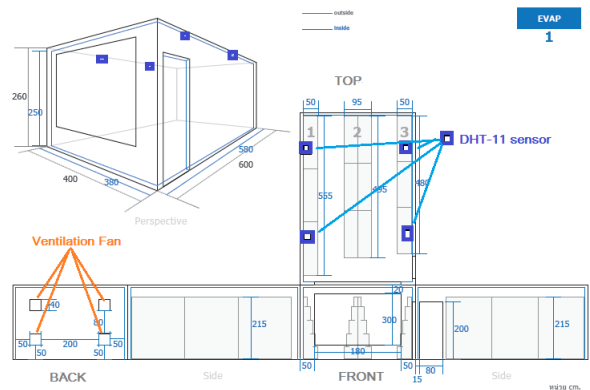
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของการนำเอาระบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นต้องศึกษาพื้นฐานที่มีองค์ประกอบ

หลายๆ อย่างที่ต้องนำมาประกอบกันเพื่อเป็นโจทย์ในงานวิจัยและทดลองเพื่อให้ได้ผลที่เราได้ตั้งสมมติฐานเอาไว้ตามเงื่อนไขของพืชที่นำเอาระบบมาพัฒนาในการปลูกแบบอัจฉริยะนี้ โดยจะถูกแบ่งออกตามหลักการโดยรวมที่จะอธิบายในรายละเอียดเช่น การทำความเข้าใจโรงปลูกและการถ่ายเทไหลเวียนอากาศมีผลต่อการออกแบบโรงปลูกเห็ดศึกษาอุปกรณ์ที่ช่วยในการเพิ่มความชื้นและอุณหภูมิเพื่อการรักษาระดับให้คงที่ตามเงื่อนไขของการปลูกที่พืชต้องการในที่นี่จะใช้เงื่อนไขการปลูกเห็ดนางฟ้า การออกแบบระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และเงื่อนไขการเขียนโปรแกรม การอธิบายเกี่ยวกับโปรโตคอลการส่งข้อมูลเพื่อนำข้อมูลบันทึกเข้า APRS Database Server

2.1 ลักษณะโรงเรือนและการถ่ายเทอุณหภูมิและความชื้น

โรงเรือนที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีขนาดที่ถูกรัง อยู่ก่อนแล้ว การทดลองจะทดลองที่ขนาดของโรงเรือนมีขนาดอยู่ที่ สูง 2.6 เมตร x กว้าง 4 เมตร x ยาว 6 เมตร ตามแบบแปลนแสดงดังรูปที่ 1

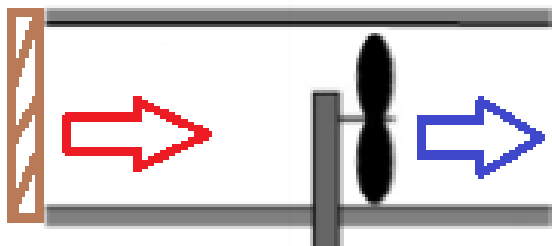


รูปที่ 1 แบบแปลนของโรงปลูกและตำแหน่งเซ็นเซอร์

โดยโรงปลูกที่ใช้ในการวิจัยทดลองนี้ตั้งอยู่ที่ ฟาร์มเห็ดสหวัฒน์ ซอยเลียบวารี 49 เขตหนองจอก กรุงเทพฯ สนับสนุนให้ใช้เพื่อการทดลองนี้ตั้งแต่สร้างจนการวิจัยเสร็จสิ้น

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่ได้เป็นผู้ออกแบบโรงเรือนตามรูปที่ 1 แต่ได้แนะนำให้นำต้นนี้มาทำการทดลองเพื่อใช้ระบบที่ผู้วิจัยออกแบบและการใช้ระบบการบันทึกข้อมูลที่จะใช้ APRS โปรโตคอลโดยหลักการหลักนั้นมีการทดลองที่ท้าทายในการกฎการถ่ายเทของอากาศที่จะไหลเข้ามาโดยใช้การนำระบบ

ทำความเข้าใจเข้ามาใช้ กล่าวไว้ในการถ่ายเทมวลสารโดยนำเอากฎเทอร์โมไดนามิก [5] มาเพื่อพิจารณาในการติดตั้งเซ็นเซอร์ในโรงเรือนแบบปิดเพื่อจะได้ทราบการไหลเวียนของอากาศร้อนและอากาศเย็น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการเพื่อพิสูจน์ว่าน่าจะเป็นไปได้ของการไหลเวียน



รูปที่ 2 การไหลคงที่และสภาวะคงที่ต่อช่วงเวลา

โดยพัดลมระบายอากาศของโรงเรือนที่จะใช้ปลูกที่มีลักษณะมีอัตราการไหลของปริมาตร 30 ลิตร / วินาทีและทำงานต่อเนื่อง ถ้าความหนาแน่นของอากาศภายในอยู่ที่ 1.20 กก. / ลบ.ม. ให้พิจารณาปริมาณอากาศที่ระบายออกภายในหนึ่งวัน สามารถคำนวณจากสมการ [5]

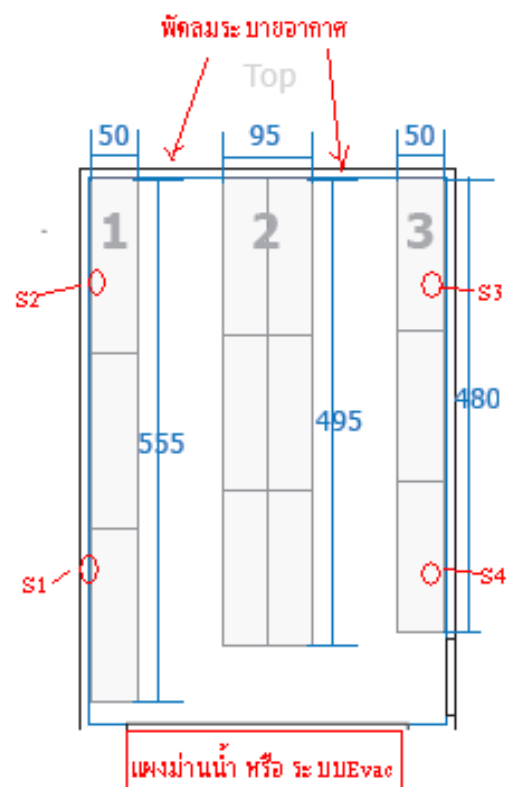
โดย การไหลของลมจากพัดลมทำงานคงที่ตลอดความหนาแน่นของอากาศที่ไหลออก กำหนดให้ 1.20 kg/m^3 วิเคราะห์มวลอากาศที่ไหลออก คือ

$$m^{\text{air}} = pV^{\text{air}} = (1.20 \text{ kg/m}^3) (0.030 \text{ m}^3/\text{s}) = 0.036 \text{ kg/s} \quad (1)$$

ดังนั้น มวลอากาศที่ไหลออกในเวลา 24 ชั่วโมงจะได้

$$m^{\text{air}} = pV^{\text{air}} = (1.20 \text{ kg/m}^3) (24.030 \text{ m}^3/\text{s}) = 3,110 \text{ kg} \quad (2)$$

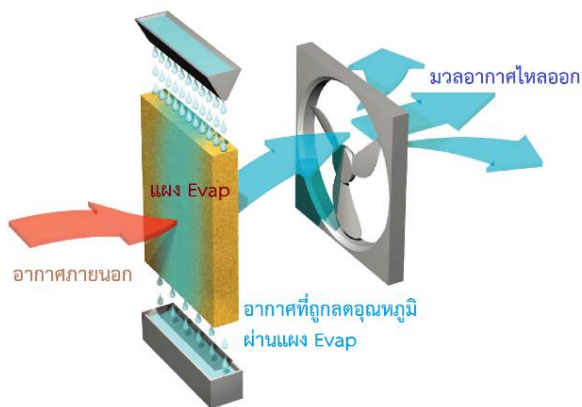
ผลการคำนวณที่ได้จะมีมวลอากาศที่สามารถไหลผ่านพัดลมดูดอากาศได้มากกว่า 3 ตัน ต่อ พัดลมเพียงหนึ่งตัวต่อเวลา 24 ชั่วโมง โดยการเติมอากาศและการถ่ายเทความร้อนและระบายอากาศ อ้างถึงหลักการข้างต้นมาอธิบายในการจำลองการไหลเวียนของอากาศที่ต้องการควบคุมในโรงปลูกที่ได้ทำการออกแบบไว้มาแสดงการออกแบบเพื่อติดตั้งพัดลม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การติดตั้งพัดลมและแบบการวางในโรงเรือน

2.2. อุปกรณ์ช่วยในการสร้างความชื้น

การควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการทำได้โดยสร้างความชื้นจากระบบ EVAP (evaporative air cooling system) [6] โดยเรียกระบบนี้ว่า EVAP ซึ่งหมายถึงระบบทำความเย็นที่ใช้พลังงานธรรมชาติ และการระเหยของน้ำช่วยในการทำความเย็น หลักการทำงานของระบบ EVAP คือการปล่อยกระแสลมไหลผ่านตัวกลางที่มีน้ำไหลผ่าน (cooling pad) และการที่อากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าไหลผ่านน้ำจะทำให้ให้น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำโดยหลักการหมายความว่าความชื้นหรือแยกอุณหภูมิความร้อนของอากาศออกตามหลักการในรูปที่ 4 ทำให้อุณหภูมิของอากาศลดลงและอากาศที่วิ่งผ่านแผงน้ำจะมีอุณหภูมิที่เย็นมากขึ้น โดยแผงความเย็น (cooling pad) ที่ทำจากกระดาษอัดเคลือบน้ำยาชนิดพิเศษซึ่งกระดาษอัดชนิดน้ำที่ได้นั้นนำมาเรียงเป็นแท่งให้ความหนาประมาณ 6 นิ้ว สูง 183 ซม ต้องวางเรียงให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดในด้านหน้าดังรูปที่ 3 เพื่อให้มีโอกาสสัมผัสน้ำและอากาศที่ไหลผ่านมากที่สุดเพื่อเป็นการช่วยให้ให้น้ำระเหยได้มากนั่นเองและมีพัดลมระบายดูดเอาอากาศร้อนออกข้างนอกทางด้านหลังของโรงปลูกแสดงตำแหน่งของพัดลมตามรูปที่ 3



รูปที่ 4 พื้นฐานระบบ EVAP

การติดตั้งของระบบ Evap นั้น ทำการติดตั้งระบบที่ออกแบบเสร็จเรียบร้อยในพื้นที่ที่ตั้งโรงปลูกเห็ด ขนาดความกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร และสูง 2.50 เมตร โดยมีพัดลมดูดอากาศติดตั้งในด้านหลัง 4 ตัว เพื่อควบคุมความชื้นโดยใช้ระบบแผง EVAP หน้า 4 นิ้ว ด้านหน้าเพื่อสร้างความชื้นให้ระบบแสดงดังรูปที่ 5



(ก) ด้านในที่แสดงติดตั้งระบบ EVAP

(ข) ด้านหลังที่มีการติดตั้งพัดลม และ ชุดควบคุม

รูปที่ 5 โรงปลูกที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้

2.3. นำเงื่อนไขความต้องการของพีชนำไปออกแบบระบบ

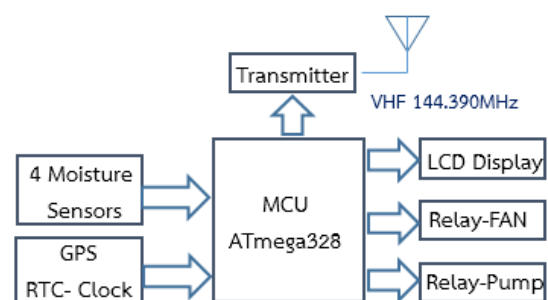
การเขียนโปรแกรมให้สามารถควบคุมโรงปลูกเห็ดนั้นอาศัยหลักการและช่วงวงจรชีวิตอ้างอิงถึง งานวิจัยของ Tscierpe (1973) [7] ได้ทำการวิจัยและอธิบายข้อกำหนดการควบคุมในสองช่วงของวงจรชีวิตการปลูกเห็ด ในดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงปลูกตามช่วงเวลา (ความชื้นหน่วย: %)

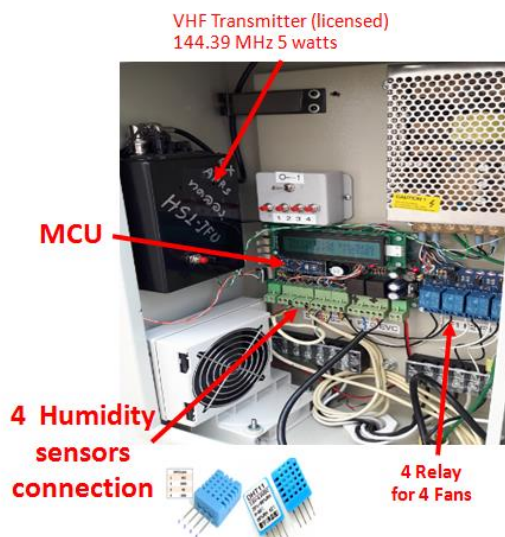
1. ช่วงบ่มให้เชื้อเดิน (Mycelium)	ความชื้น ในช่วง 95 -100%
2. ช่วงออกดอก (Production)	ความชื้น ในช่วง 80-95%

2.4. ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และ Block Diagram

โดยจากการทดลองหลักวัตถุดิบนั้นมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความชื้น โดยจากตารางนี้การทดลองเน้นการควบคุมเพียงแต่ควบคุมความชื้นเท่านั้นโดยการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมความชื้น โดยการเปิดปิดพัดลมระบายอากาศนั้นจะเป็นการเพิ่มหรือลดความชื้นที่ได้มาจากระบบ EVAP ถ้าความชื้นใกล้กับเงื่อนไขจะไม่มีเปิดพัดลมหรือเปิดเพียงพัดลมตัวเดียวสลับกันไปเพื่อระบายให้มีการไหลของอากาศแบบเข้า โดยงานวิจัยนี้มีการเลือกใช้ออกแบบระบบควบคุมความชื้นและพัดลมโดยเลือกใช้ IC Chip ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีราคาถูกและหาง่ายของ ATMEL ATMEGA 328 8 bit RISC [8] ประกอบไปด้วย 13 GPIO 5 A/D 10 bit มีความสะดวกในการใช้งาน ทำให้เขียนโปรแกรมได้ง่าย การออกแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อที่มีอินพุตเป็นอุปกรณ์วัดความชื้นและเอาต์พุตเป็นพัดลม 4 ตัว ควบคุมการเปิดปิดผ่านการทำงานของรีเลย์ และการส่งข้อมูลที่อ่านได้จากค่าเฉลี่ยของเซ็นเซอร์ส่งผ่านทางพอร์ตอนุกรมไปยังชุดส่ง ข้อมูลทางวิทยุใช้โปรโตคอล APRS การเขียนโปรแกรมให้เก็บค่าเซ็นเซอร์ DHT11[9] ที่เป็นเซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิจำนวน 4 ตัวโดยวัดค่าอุณหภูมิ และความชื้น 4 ตัวคำนวณหาค่าเฉลี่ยเพื่อทำการควบคุมพัดลมในการเพิ่มหรือลดความชื้นภายในตามเงื่อนไขข้างต้นแสดงได้ใน Block Diagram รูปที่ 6[10-11]

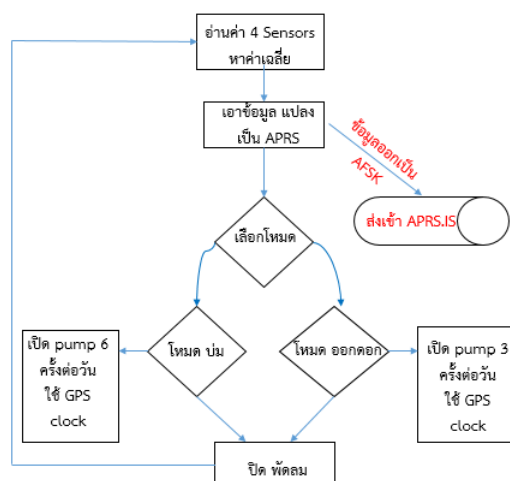


รูปที่ 6 System Block Diagram



รูปที่ 7 Block Diagram และ ระบบควบคุม

ในการทดลองนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน เพื่อนำค่าที่ได้มาปรับเปลี่ยนในการเขียนโปรแกรมควบคุมพัดลมที่ดูดความชื้นให้อากาศถ่ายเทดีขึ้น และเพื่อรักษาระดับความชื้นด้านหลังของโรงปลูกให้ได้ค่าที่ต้องการ โดยมีการควบคุมพัดลมให้สลับกันทำงาน เพื่อกระจายความชื้นให้มีความสัมพันธ์กันในพื้นที่ทำการทดลอง แสดง Flowchart ตามเงื่อนไข ที่ได้มาจากการทดลองที่ทำก่อนหน้านี้ ออกมาได้แสดงตาม Flowchart ในรูปที่ 8

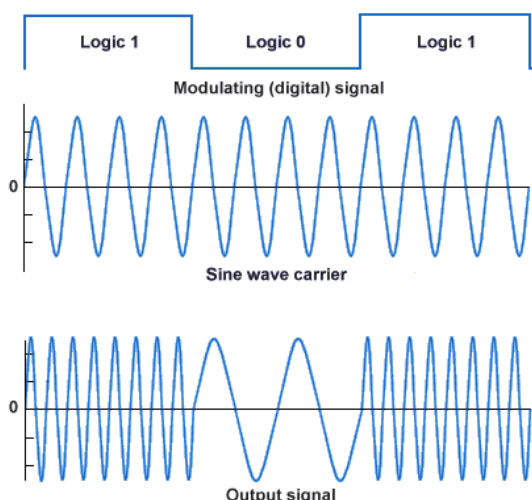


รูปที่ 8 Flowchart การเขียนโปรแกรมควบคุมและส่งข้อมูล

2.5. โปรโตคอล APRS

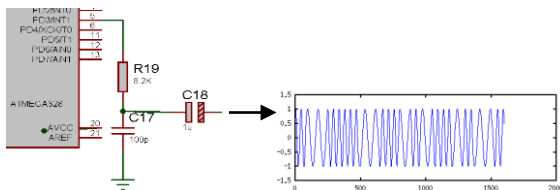
การส่งข้อมูลออกมาเพื่อเข้าระบบอินเทอร์เน็ตนั้นใช้ Packet Radio protocol หรือที่นิยมเรียกอีกชื่อว่า APRS (automatic position report system) หรือ Packet

Radio [10-12] โดยการส่งรูปแบบข้อมูลจากโรงปลูกเห็ดออกไปผ่านคลื่นวิทยุย่าน VHF 144.390* MHz (*จำเป็นต้องมีใบอนุญาตการใช้ความถี่จาก กสทช.) ในลักษณะของข้อมูลถูกจัดให้มีรูปแบบของข้อมูลหรือ Data Frame ที่ใช้กับสถานีตรวจอากาศ (weather station) ส่งเข้าไปยังสถานีรับที่การเชื่อมต่อกับเครือข่ายระบบอินเทอร์เน็ตหรือที่เรียกว่า Internet Gateway นั้นอยู่ห่างออกไปประมาณ 2 กิโลเมตร โดยที่พื้นที่โรงปลูกเห็ดนั้นไม่มีเครือข่ายบริการของระบบอินเทอร์เน็ตจึงจำเป็นต้องใช้ระบบการส่งสัญญาณระยะไกลเป็นทางเลือก เพื่อส่งข้อมูลที่ได้ไปยังระบบการรับสัญญาณในสถานที่ที่เชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต การอธิบายหลักการการส่งข้อมูลที่นำมาใช้มีหลักการดังนี้ คือ มีความเร็วในการส่งที่ 1200 BPS (Baud per second) ใช้มาตรฐานการส่งแบบ AFSK (audio phase shift keying) หรือความถี่เสียงแบบ Shift Keying, ใช้ NRZI (ไม่กลับไปเป็นศูนย์ inverted) โดยการเข้ารหัสของ Logic 0 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และการถูกเข้ารหัสเป็นการเปลี่ยนแปลงเป็น Logic 1 จะถูกเข้ารหัสเป็นการเปลี่ยนแปลงในโทนถ้ากำลังส่งสองโทน 1200 Hz รูปแบบของคลื่นที่ จุดสูงสุดเมื่อเปลี่ยน 2200 Hz, รูปแบบของคลื่นยังคงอยู่ที่จุดสูงสุดของ ไม่สามารถเริ่มกลับมาที่ศูนย์หรือจุดอื่น ๆ นี้จะเป็นไปไม่ได้ที่จะสร้าง AFSK ใช้เสียงแบบ Dual Tone 1200 Hz Mark และ 2200 Hz Space อธิบายง่ายๆ ตามรูปที่ 9



รูปที่ 9 อธิบายรูปคลื่นที่ถูกสร้างจากข้อมูลมาเป็น Data Packet (frequency shift keying)

ในการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถนั้นไม่มี ความซับซ้อนทางการออกแบบด้านHardware แต่ทาง การเขียนโปรแกรมจะมีความซับซ้อนมากไม่สามารถอธิบายได้ เพียงพอในบทความนี้ แต่จะสามารถอธิบายในหลักการ โดยสังเขป ได้ในรูปที่ 10



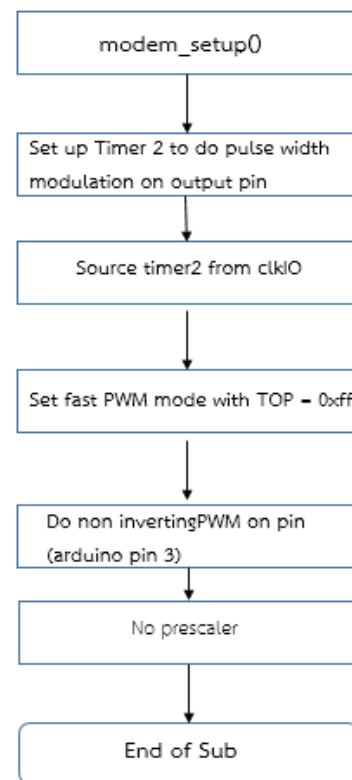
รูปที่ 10 สัญญาณที่ส่งออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์

โดยเสียงที่ได้ออกมาจาก C18 ซึ่งเป็นวงจร low-pass filter ($R=8k\Omega$ $C=0.1\mu$) plus DC coupling * ($C_c=1\mu$). จะ ช่วยลดระดับของเสียงให้อยู่ที่ 500mV peak-peak ซึ่งถูก กำหนดโดยเครื่องส่งวิทยุแบบโมดูล

การเขียนโปรแกรมนั้นเขียนบน Bootloader ของ Arduino โดยที่ การสร้าง Audio โดยใช้ Arduino และการ สร้างรูปคลื่น PWM: นั้น Arduino หรือ ATmega328 chip ไม่ได้ให้มาพร้อมกับ DAC (digital-to-analog converter) ดังนั้นสองตัวเลือกในการสร้างสัญญาณอนาล็อกเป็นบันไดโดย ใช้ตัวต้านทาน หรือ โดยการสร้าง PWM ออกแบบนั้นน่าจะ ดีกว่าออกแบบโดยใช้บันไดตัวต้านทานแบบ 4 บิต แต่การใช้ PWMจะมีเสถียรกว่า แต่การสร้าง PWM นั้นจะมีความ ซับซ้อนมากขึ้นในด้านการเขียนโปรแกรม แต่ต้องใช้ ส่วนประกอบภายนอกน้อยและมีขาออกเพียงหนึ่งขาเท่านั้น เพื่อไปป้อนให้ชุดส่งวิทยุเป็น AFSK (audio frequency shift keying)

Arduino Library มีตัวจับเวลา (timer) 3 ตัวที่สามารถ ทำ PWM ได้ บางฟังก์ชันการจับเวลา (timer) ซึ่งอยู่ใน Library ของ Arduino (delay และ millis) ใช้ Timer 0 ดังนั้นพวก Timer 1 และ 2 มีความสามารถเหมือนกัน แต่ Timer 1 สามารถนับได้ถึง 16 บิตและ Timer 2 จะเพิ่มขึ้น เพียง 8 บิต มีการเขียนขึ้นในการสร้าง PWM กับ Arduino และ ตัวจับเวลาสองตัวโดยใช้ Timer 1 เพื่อป้อนตัวอย่าง (ตาม sampling rate) และ Timer 2 ทำ PWM จริง (ตาม Sampling Rate สูงสุดที่เป็นไปได้คือ $16\text{ MHz} / 256 = 62,500\text{ Hz}$ sampling rate) แต่ด้วยการทำให้การทำ

สัญญาณ Interrupt ในเวลาอันสั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำเพียง แค่ตัวจับเวลาเดียวและลดความซับซ้อนของโค้ดลงเล็กน้อย ทั้งหมดจะใช้เวลาคือบอก AVR เรียกเข้าขา INT เมื่อตัวจับ เวลา PWM overflow และป้อนตัวอย่างจากขั้นตอน Interrupt Routine ISR จะเรียกว่าทุกๆรอบนาฬิกา 256 รอบ แต่นั่นเป็นเวลานานพอสำหรับการ ใช้ Look up Table ที่ใช้ ตาราง SINE เพื่อสร้างคลื่น PWM โดยมี Flow ที่ อธิบายการทำงานของ Routine Modem() ในรูปที่ 11



รูปที่ 11 Flow ของการสร้างสัญญาณ AFSK

ข้อมูลดิบที่จะถูกส่งออกไปจากระบบนั้นจะต้องถูก กำหนดตามรูปแบบที่มีการกำหนดแบบตายตัวตามมาตรฐาน ของแบบข้อมูลที่ใช้สำหรับสถานีตรวจอากาศเพื่อให้สามารถ ตรวจ สอบ หรือ Validation โดย Database Server (APRS.IS) ก่อนที่จะนำเข้าทุกครั้งและรูปแบบนี้เป็นรูปแบบ มาตรฐานที่ใช้ในระบบตรวจอากาศในระบบ APRS นี้ โดย หลักการนี้นำไปเป็น Data Frame ที่ APRS โปรโตคอล ต้องการให้มีรูปแบบที่ตายตัวสำหรับรูปแบบของการใช้เหมือน สถานีตรวจอากาศ แต่ ยังมีในส่วนของ Weather Data ที่ สามารถใส่ลงไปได้ “n” คือใส่ได้มีจำนวนถึง 30 ตัวอักษร ดัง รูปที่ 12 [12]

Complete Weather Report Format — with Lat/Long position, no Timestamp						
1 or ID	Lat	Sym Table ID	Long	Symbol Code	Wind Directn/ Speed	Weather Data
1	8	1	9	1	7	n

Examples

!4903.50N/07201.75W 220/004q005t077r000p000P000h50b09900

=1350.37N/10049.64E,000/000g000t072r000p000h22b00000@FARM-D
 =1350.37N/10049.64E,000/000g000t072r000p000h22b00000@FARM-D
 =1350.37N/10049.64E,000/000g000t072r000p000h22b00000@FARM-D
 =1350.37N/10049.64E,000/000g000t072r000p000h22b00000@FARM-D
 =1350.37N/10049.64E,000/000g000t073r000p000h22b00000@FARM-D

GPS-data TEMP Humid Extend data

รูปที่ 12 แบบมาตรฐานการส่งข้อมูลและตัวอย่างข้อมูลดิบ

โดยที่โปรโตคอล APRS นั้นมี มาตรฐานในการรับส่งข้อมูลหลายรูปแบบโดยแต่ละรูปแบบมีการกำหนดแบบตายตัวที่นำมาใช้งานในแบบต่างๆกันเพื่อให้การเข้ารหัสและการถอดรหัสที่ออกมาเป็น AFSK นั้นสามารถทำได้ แต่ระบบนี้จะมีข้อดีและข้อเสีย โดยข้อดีของระบบคือสามารถติดตั้งได้ง่ายไม่ต้องทำอะไรหรือกำหนดอะไรเลย เพราะว่าการรับส่งข้อมูลมีการกำหนดไว้หมดแล้วในรูปแบบ HDLC (High Level Data Link Control) ที่มีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยการ Checksum (CRC) และมี Header (0x7E) และ สามารถส่งผ่านสัญญาณ Carrier ด้วยความถี่อะไรก็ได้ เพื่อสร้างระยะทางได้ตามความต้องการในแต่ละงานนั้น ส่วนข้อเสียนั้นมีมากมาย เช่น การออกแบบทำได้มีความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมการเข้ารหัสและถอดรหัสทำได้ยากซับซ้อนเพราะว่าต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความสามารถแปลงสัญญาณหรือที่เรียกว่า Radio Modem ซึ่งเป็นระบบเก่า แต่เนื่องด้วยเทคโนโลยีไมโครคอมพิวเตอร์เริ่มมีความเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงสามารถทำให้การออกแบบ Radio Modem เริ่มง่ายขึ้น และ ข้อเสียอีกข้อที่มีผลต่อการส่งสัญญาณวิทยุในพื้นที่ที่มีการรบกวนสูงอาจจะทำให้การรับส่งข้อมูลไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร แต่สาเหตุที่เลือกเอามาทดลองกับการวิจัยนี้ เพราะการทำการเกษตรส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ห่างไกลจากเทคโนโลยีการรบกวนจึงเกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้น APRS จึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในการนำ Protocol มาใช้ในการทดลองนี้

การส่งข้อมูลที่ได้จะส่งออกไปยังสถานีรับที่มีอินเทอร์เน็ตหรือที่เรียกว่า I-GATE (Internet Gateway) ซึ่งจะมีสองหน้าที่: จะผ่าน Data Packet ทั้งหมดได้ขึ้น RF เพื่อส่งเข้า

APRS-IS และจะผ่าน Data Packet ข้อความทั้งหมด เพื่อส่งผ่านสำหรับสถานีท้องถิ่นเพื่อ RF (ถ้าแบบสองทิศทาง iGATE) โดรนอุปกรณ์ I-Gate นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นเครื่อง Personal computer ที่ติดตั้งโปรแกรม I-Gate หรืออุปกรณ์ที่เป็น Embedded Computer แสดงให้เห็นในรูปที่ 14 (กล่องที่อยู่บนเครื่องวิทยุ) ใช้ Linux OS. และมีการตั้งค่าการทำงานให้ทำหน้าที่เป็น I-Gate และส่งข้อมูลที่กำหนดไปยังเครือข่ายที่ต่อกับ APRS Database Server ตามที่ตั้งโดยใช้ Web base setup แสดงในรูปที่ 13

APRS-IS settings

Username:

Password:

APRS-IS servers:

Server 1	asia.aprs2.net	: 14580
Server 2	aunz.aprs2.net	: 14580
Server 3	euro.aprs2.net	: 14580

รูปที่ 13 การตั้งค่า APRS-IS ในอุปกรณ์ I-GATE

แสดงการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องรับส่งวิทยุเพื่อรับสัญญาณ APRS ที่มาจากสัญญาณวิทยุย่านความถี่ VHF 144.390 MHz ที่ได้รับอนุญาตจาก กสทช. เพื่อการทดลองในกิจกรรมวิทยุสมัครเล่นให้ใช้ความถี่นี้เพื่อรับส่งข้อมูลนี้ โดยในการรับส่งข้อมูลโดยมีการเชื่อมต่อเพื่อตั้งเป็นสถานี I-GATE ดังในรูปที่ 14 เป็นอุปกรณ์ i-Gate และ เครื่องอุปกรณ์รับส่งวิทยุตั้งค่าความถี่แบบสังเคราะห์ที่ 144.390 MHz

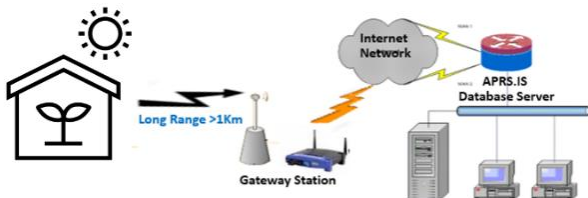


รูปที่ 14 อุปกรณ์ I-GATE

อธิบายถึง Database Server นั้นในระบบ APRS มีการวางเครือข่าย Database Server หรือ APRS-IS (APRS Internet Service) บนอินเทอร์เน็ตตั้งอยู่ทั่วโลกแบบขนานกันทั่วโลกและมีการตั้งสถานีรับแบบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองนี้ มีจำนวนมากเพื่อใช้ในการเก็บค่าสภาพอากาศเพื่อ

ใช้ในการพยากรณ์อากาศแบบ Real-time เกิดขึ้นทั่วโลก ดังนั้นการรับข้อมูลที่เป็นข้อมูลเกี่ยวกับสภาพอากาศจะเป็นรูปแบบเดียวกับการรับข้อมูลที่ส่งมาจากสถานีตรวจอากาศอยู่ โดยการใช้ข้อมูลเหล่านั้นมีรายละเอียดมากกว่าเท่านั้นเอง ตามที่อ้างมาเพื่อการนำมาใช้ในการวิจัยและทดลองนี้ เรา นำเอาการวัดอุณหภูมิและความชื้นเพียงส่วนเดียวมาเพื่อส่ง และเก็บบน Database server และนี่เป็นข้อดีของระบบที่ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเข้าถึงหรือเช่าใช้ Database Server เพราะว่าเราใช้การบันทึกข้อมูลเหมือนการส่งรายงาน สภาพอากาศในพื้นที่นั้น ซึ่งขนาดของข้อมูลมีขนาดสั้นทำให้มีการส่งข้อมูลที่รวดเร็ว

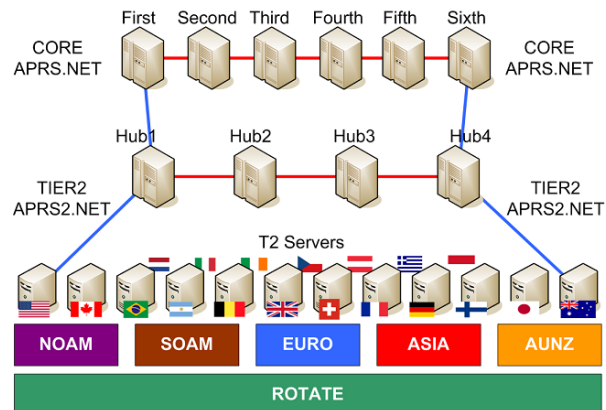
ระบบการส่งข้อมูลไร้สายในแบบอื่นที่มีอยู่ในเทคโนโลยี ปัจจุบันเช่น ระบบไร้สายย่านความถี่ 2.4GHz หรือ X-Bee ย่าน 433MHz หรือ 915MHz น่าจะมีความสามารถที่ดีกว่า แต่โดยเหตุผลใหญ่ที่สามารถอธิบายง่ายๆคือข้อจำกัดของ ระยะการติดต่อระยะทางไกลที่สุดที่สามารถใช้ในการส่งและ รับข้อมูลเพื่อเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตคือข้อจำกัด หลักของระบบเหล่านั้นและถึงแม้จะมีการใช้ Mesh network ในการส่งต่อข้อมูลอาจจะดูไม่เหมาะสมนักเพราะว่า Sensor Node มีจำนวนไม่มากพอหรือไม่อาจจะดูเหมาะสมนักหากมีการจัดให้มี Node จำนวนมากมายในขณะนี้ก็มีเพียง Node เดียวเท่านั้น ในขณะที่เดียวกับการส่งข้อมูลแบบที่นำมาใช้ในการ ทดลองวิจัยนี้ สามารถทำได้เลยและไม่ต้องมีการวาง ระบบให้ยุ่งยากอธิบายได้เพียงง่ายในรูปที่ 15 นี้จะส่งข้อมูล จาก Sensor Node ที่ได้จากการวัดในแต่ละโรงปลูกส่งเข้า ตรงที่สถานีรับและผ่านเข้าระบบเครือข่ายที่เชื่อมต่อไปตามที่ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น I-GATE โปรแกรมให้เข้าไปยังตำแหน่ง ของ Database Server ตัวอย่างเช่น asia.aprs2.net:14580



รูปที่ 15 ระบบเครือข่ายที่ใช้ในการส่งข้อมูลระยะไกล

อธิบายเพิ่มในส่วน ของ APRS Database Internet Service (APRS.IS) ที่มีการเชื่อมต่อทั่วโลกในแบบขนานกัน และมีการแชร์ข้อมูลกันตลอดเวลาเนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ที่ ส่งไปเก็บใน APRS Database Server เหล่านี้เป็นข้อมูลที่มี

การกำหนดรูปแบบ(Data Frame) ที่แน่นอนเช่น ข้อมูล ตำแหน่งการเดินทาง ตำแหน่งและสภาพอากาศของสถานี ตรวจอากาศทั่วโลกมาเก็บไว้อย่างน้อยมีการเก็บรักษานาน กว่า 5 ปีบน APRS Database Server เหล่านี้ แสดงผังการ เชื่อมต่อดังรูป 16 [12]

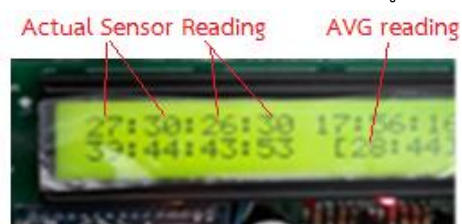


รูปที่ 16 APRS Database cross connected backbone[13]

โดย APRS Database Server (APRS.IS) ที่แสดงในรูป จะเชื่อมต่อกันบนเครือข่ายโดยใช้ Port number 14580 ซึ่งเป็น port number หนึ่งที่กำหนดให้ใช้ในการชี้ตำแหน่งไปยัง Server เหล่านั้นในแต่ละทวีปเพื่อรองรับการบริการข้อมูลใน ประเทศทั่วโลก ในส่วนของ APRS Database Server ที่มีอยู่ ไกลที่สุดตั้งอยู่ที่ประเทศญี่ปุ่น Tokyo.aprs2.net

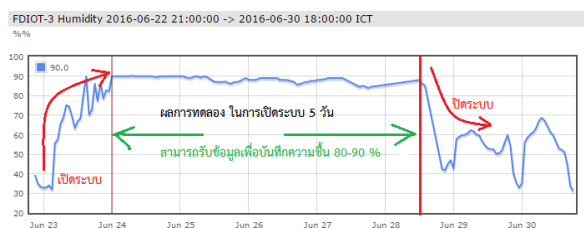
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การติดตั้งระบบการควบคุมความชื้นนั้นต่อกับเซ็นเซอร์ 4 จุดภายในโรงปลูกกระจายไปทั้งสี่มุม โดยติดตั้ง ระบบกล่อง ควบคุมที่ด้านหน้าของโรงเรือนปลูกแสดงดังรูปที่ 17 ซึ่งจะมี ชุดการวัดและควบคุมความชื้นจากค่าเฉลี่ยที่วัดได้ และส่ง ข้อมูลต่อไปให้อีกชุดที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลผ่านระบบสัญญาณ วิทยุไปยังสถานีรับที่อยู่ไกลออกไป 2 กิโลเมตร เพื่อป้อน ข้อมูลเข้า Database Server (APRS.IS) แสดงผลออกมาใน รูปกราฟ เพื่อใช้วิเคราะห์ความเที่ยงตรงของระบบควบคุมให้ ได้ตามที่ตั้งไว้ในตารางที่ 1 แสดงตำแหน่งได้ในรูปที่ 17



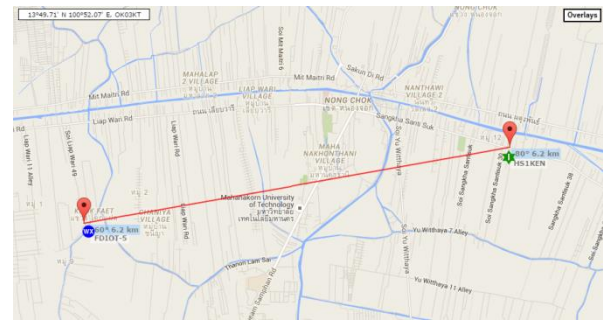
รูปที่ 17 ค่าที่อ่านได้จาก Sensor 4 ตัวและค่าเฉลี่ย

ผลการทดลองส่วนค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์จำนวน 4 ตัว สามารถควบคุมให้ได้ค่าตามที่กำหนดสมมติฐานตามเงื่อนไขตารางที่ 1 คือ ช่วงออกดอก (production) ต้องรักษาความชื้นไว้ที่ 95-100% ซึ่งกราฟที่ Plot ได้มาจากข้อมูลในระบบ APRS หรือ Packet Radio โดยชุดส่งข้อมูลผ่าน RF ทางความถี่ย่าน VHF 144.390MHz มีการส่งข้อมูลจากโรงปลูกเห็ดไปยังสถานีรับที่อยู่ในระยะที่ไกลถึง 2 กิโลเมตร ซึ่งได้ค่าตามที่กำหนดไว้ใกล้เคียงกับ 90 % (ค่าผิดพลาด $\pm 5\%$) ตามต้องการโดยนำค่าที่ได้ซึ่งดึงข้อมูลมาจาก Database Server ผ่าน Web Interface ทาง <http://aprs.fi/FDIOT-3> [13] ซึ่งผลการทดลองการควบคุมความชื้นสามารถแสดงในกราฟ โดยนำเอาข้อมูลจาก APRS.IS server แสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ผลของการวัดค่าความชื้นบันทึกบน Database Server

อีกส่วนของการทดลองตามสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ ระยะทางในการส่งต้องมีมากกว่า 2 กิโลเมตร โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดซึ่งจะส่งจากโรงปลูกซึ่งสถานที่ตั้งไม่มีระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อไปยังสถานีรับที่ห่างออกไปเพื่อนำข้อมูลการวัดไปบันทึกบน Database (APRS.IS) และเก็บไว้ประเมินผลนั้นสามารถพิสูจน์ได้จากระบบที่ตั้งข้อมูลออกจาก Database Server ได้ผ่าน Web Base โดยใช้ tool ที่มีอยู่แล้วจากผู้พัฒนาระบบนี้ ในการเข้าถึงในระบบของฐานข้อมูลแล้วนำมาหาตำแหน่งจากพิกัดที่ได้ป้อนเอาไว้ในการโปรแกรม และส่งค่าตามรูปแบบมาตรฐานที่ถูกกำหนดโดย APRS Protocol Data Frame ซึ่งสามารถส่งเข้าไปทำ Validation ที่ Database Server ได้ ดังที่แสดงให้ทราบถึงผลการรับส่งและการวัดระยะทางผ่าน Google Map ได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ผลของการวัดระยะทางการส่งและรับข้อมูล

อธิบายผลที่ได้จากจุดที่ตั้งในรูปแบบเป็นสถานีโรงปลูกส่งไปยังสถานีรับสัญญาณที่มีความสูงของสายอากาศที่ 25 เมตร และตั้งอยู่ห่างออกไปถึง 6 กิโลเมตรจากโรงเรือนตามแผนที่ในรูปที่ 19 โดยสามารถนำผลการวัดและข้อมูลที่ได้จากโรงปลูกบันทึกลงใน Database Internet Service (APRS.IS)

โดยหลังจากการทดลองที่ได้ทำตามเงื่อนไขเสร็จสิ้นได้มีการเริ่มทำการนำเอาก่อนเห็ดจำนวน 5,000 ก้อนเพื่อเริ่มการทำการปลูกตามเงื่อนไขที่ได้วางไว้ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 20 ในช่วงแรก ของการปลูกประมาณ 3 เดือน คือ การ บ่ม เพื่อสร้างเส้นใย หรือ รากของเห็ด



รูปที่ 20 เริ่มการปลูกจริง

หลังการบ่ม 3 เดือนเมื่อเส้นใยเริ่มเดินเห็ดจะมีการเปิดจุกของก้อนเห็ดโดยเห็ดจะเริ่มเติบโตและโตพอที่จะเริ่มมีการตัดเพื่อนำไปขายได้ โดยลักษณะของเห็ดที่เริ่มออกจากก้อนเห็ดมีในลักษณะแบบดังรูปที่ 21 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของ Production Mode ซึ่งจะกำหนดไว้ใน ตารางที่ 1 ที่อธิบายไว้ข้างต้น โดยจะมีการเปลี่ยนโปรแกรมมาเป็น Production Mode ก็จะมีการเพิ่มความชื้นโดยการพ่นหมอกให้มีความถี่มากขึ้น แสดงให้เห็นตาม Flow Chart ในรูปที่ 8 ที่ได้มีการกำหนดโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 21 เริ่มเข้าสู่ช่วงออกดอก Mode Production

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ที่มีการใช้งานจริงโดยการเอาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และ ระบบการส่งข้อมูลโดยใช้ APRS โปรโตคอลเพื่อส่งและรับข้อมูลสั้นๆ ที่อาศัยคลื่นวิทยุ โดยมาปรับใช้กับการเกษตรในเรื่องของการควบคุมสภาพแวดล้อมซึ่งในการทดลองนี้เพราะว่าหลักการออกแบบโรงเรือนที่ไม่สามารถจะมีการทำการบันทึกได้ตลอดเวลา การนำระบบการส่งข้อมูลอัตโนมัติด้วย APRS โปรโตคอลที่มีใช้ในสถานีตรวจอากาศทั่วไปอยู่แล้วในปัจจุบัน นำมาดัดแปลงกับการทำการเกษตรในโรงเรือนโดยนำตัวอย่างการปลูกเห็ดที่เป็นระบบซึ่งผสมผสานในการเก็บบันทึกข้อมูลซึ่งต้องการรายละเอียดซึ่งไม่สามารถทำได้ในแรงงานคนในการจดบันทึก ทำให้ได้ทราบถึงสภาพแวดล้อมภายในของโรงปลูกเห็ดได้ตลอดเวลาและด้วยเหตุผลนี้ทำให้ทราบถึงการเพิ่มผลผลิตให้มีมาตรฐาน มีประสิทธิภาพ โดยผลการทดลองสามารถนำไปใช้งานได้จริง ในพื้นที่ที่ห่างไกลที่ไม่มีบริการเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งการนำระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีราคาถูกมาประยุกต์ใช้งาน โดยระบบนี้สามารถนำไปดัดแปลงพัฒนาต่อยอดในระบบ Greenhouse หรือระบบการเกษตรแบบอื่นที่ต้องการควบคุมสภาพการทำเกษตรแบบปิดและต้องการเก็บข้อมูลระยะไกล และสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเชิงพาณิชย์ต่อไป เพิ่มเติมในอีกส่วนนอกเหนือจากการนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการทำงานตามโปรแกรม ก็ยังมีอีกส่วนที่ได้นำมาแสดงและทดลองเพื่อพัฒนาการส่งข้อมูลแบบที่มีความสามารถในการส่งข้อมูลในระยะไกลโดยระยะทางขึ้นอยู่กับความสูงและกำลังส่งของวิทยุสื่อสารและมียุทธศาสตร์ที่ต่ำมาก ซึ่งจริงๆ แล้วการวิจัยไม่ได้กำหนดแค่เพียงการ

ส่งข้อมูลสภาพอากาศภายในโรงปลูกแต่หากเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถการส่งข้อมูลโปรโตคอลนี้ไปต่อยอดได้อีกมากมายในโครงการพัฒนาต่อไปเช่น ระบบเตือนภัย หรือ แม้กระทั่งการสื่อสารระยะไกลในระบบอวกาศและการสื่อสารดาวเทียมซึ่งได้มีงานวิจัยอื่นได้นำไปใช้ในปัจุบันและอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ฟาร์มเห็ดสหวัฒน์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ ที่ได้เอื้อเฟื้อพื้นที่โรงเรือนปลูกเห็ดนางฟ้าภูฐานมาใช้ในการทดลอง โดยสนับสนุนบุคลากรช่วยในการติดตั้งระบบ สถานที่เพื่อทำการทดลองทั้งหมดซึ่งทำให้การทดลองได้มีการใช้งานได้ผลจริงและทำให้มีการต่อยอดทางธุรกิจและพัฒนาเป็นสินค้าให้กับฟาร์มเห็ดด้วยต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Vedder, P.J.C., Modern Mushroom Growing. Stanley Thomes, Cheltenham;1978, p. 420.
- [2] Willits, D.H., Karnoski, T.K. and McClure, W.F. A microprocessor-based control system for greenhouse research-Part I hardware. Trans. ASAE, 23;1980, p.692, 698.
- [3] Tantau, H.-J., The ITG digital greenhouse climate control system for energy saving, Gartenbauwissenschaft;1984, p.140-143
- [4] Saffell, R.A. and Marshall, B., Computer control of air temperature in a glasshouse. J. Agric.Eng. ;1983, 28: p.469-477.
- [5] Cengel, Yunus A., and Michael A. Boles. An engineering approach. ENERGY1;2002. p51.
- [6] Giabaklou, Zahra, and John A. Ballinger. A passive evaporative cooling system by natural ventilation. Building and Environment 31.6; 1996: p.503-507.
- [7] Tschierpe, J.J., Environmental factors and mushroom growing, Part II. Mushroom J. ;1973, 2: p.77-94.

- [8] Atmel 8-BIT Microcontroller with /8/16/32 Kbytes in system programmable flash. Available from: <http://www.atmel.com/devices/atmega328p.aspx> [Accessed 5th Feb 2017].
- [9] DHT11-Humidity & Temperature Sensor Datasheet. Available from: <http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf> [Accessed 5th Feb 2017].
- [10] Chaiyasoonthorn S, Hongyim N, Mitatha, S. Building Automatic Packet Report System to report position and radiation data for autonomous robot in the disaster area. Proceeding of Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015 15th International Conference on. IEEE;2015. p. 85-88.
- [11] Hongyim N, Mitatha, Chaiyasoonthorn S, Microcontroller Based for Smart mushroom cropping proceeding of 8th ECTI-CARD, Huahin, Thailand;2016. p.599-602.
- [12] APRS Database Web-Server. Tierr 2 Cross connected backbone detail. Available from: <http://aprs2.net/t2network.phpl> [Accessed 5th Feb 2017].
- [13] APRS.fi APRS Database Web-Server. Available from:http://aprs.fi/page/about_technical Accessed 5th Feb 2017].



แบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบผลึกซิลิกอน

A Mathematical Model of Crystalline Silicon Solar Module

เกษม ตรีภาค¹ จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน¹ ชีระศักดิ์ สมศักดิ์² ยุทธนา กันทะพะเยา³ และ นพพร พัชรประทีติ^{4*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²หน่วยวิจัยระบบพลังงานสะอาด วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

98 หมู่ 8 ตำบลป่าป้อ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

7/1 ถนนนนทบุรี 1 ตำบลสวนใหญ่ อำเภอนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

⁴สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

99 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120

Kasem Treephak¹, Jutturit Thongporn¹, Dhirasak Somsak², Yuttana Kanthapayao³

and Nopporn Patcharaprakiti^{4*}

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

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

²Clean Energy System Research Unit, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna

98 Moo 8, Papong, Doi Saket District, Chiang Mai, 50220

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

7/1 Nonthaburi Road, Sounyai, Muang, Nonthaburi, 11000

⁴Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

99 Saikhao, Phan, Chiangrai, 57120

*ผู้พิมพ์ประสานงาน : nopporn@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-53-723-977

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนเพื่อใช้สำหรับงานวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการนำวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเขียนเป็น บล็อกไดอะแกรมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แล้วนำไปทดสอบหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวขนาด 30 วัตต์ และ 100 วัตต์ และแบบผลึกผสมขนาด 150 วัตต์ และ 280 วัตต์ รวมทั้งสิ้น 4 แผง โดยเปรียบเทียบกับ การวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัด Solar analyzer ที่ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 5 ครั้งต่อแผง ผลการทดสอบพบว่า กราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟกำลังงานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีรูปร่างใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากเครื่องมือวัด ส่วนค่าตัวแปรอื่น ๆ นั้นเมื่อนำมาหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยแล้วพบว่า กระแสสูงสุดเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสมขนาด 280 วัตต์ มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 7.93 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.88 เปอร์เซ็นต์ และค่า Fill Factor (F.F.) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 – 0.8 ทั้งที่วัดได้จากเครื่องมือวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

คำสำคัญ แบบจำลองคณิตศาสตร์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอน กราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า กราฟ กำลังงานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

This paper proposes a mathematical model of silicon photovoltaic for photovoltaic system analysis. The electrical equivalent circuit of solar module is model by MATLAB-Simulink block diagram. The Mathematical model is verified by adjusting the parameter of mono-crystalline 30Wp, 100Wp and poly crystalline 150Wp, 280Wp. The mathematical model was compared with the solar analyzer measurements at different intensity and temperature values in 5 samples. The results showed that I-V curve and P-V curve of mathematical model was similar to the curve obtained from solar analyzer measurement. As for the remaining variables, the maximum current of poly crystalline P.V. at 280Wp had maximum average error 7.93% at standard deviation 4.88% and Fill Factor (F.F.) of every P.V. was between 0.75-0.8 both the solar analyzer measurement and mathematical model.

Keywords: mathematical model, silicon semiconductor P.V. , I-V Curve, P-V Curve, electrical equivalent of P.V.

1. บทนำ

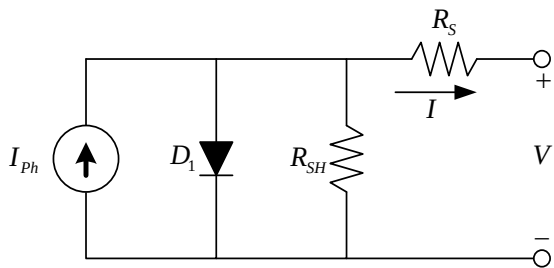
แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าของพลังงาน ปัจจุบันมีการผลิต ค้นคว้าวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์หลายชนิด เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง และมีราคาต้นทุนที่ถูกลง อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีจำหน่ายและนิยมใช้กันมากในท้องตลาดเป็นชนิดสารกึ่งตัวนำแบบ Silicon ซึ่งแบ่งออกเป็นชนิดผลึกเดี่ยว Mono crystalline หรือและแบบหลายผลึก Poly crystalline และ Amorphous Silicon ซึ่งแม้จะมีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพต่ำและใช้พื้นที่ค่อนข้างมากในการติดตั้ง จึงมีการใช้งานน้อยกว่า 2 ชนิดแรก นอกเหนือจากประสิทธิภาพที่เกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำแล้ว การควบคุมพารามิเตอร์และจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสม ก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพกำลังและพลังงานที่จะส่งผลให้ได้กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมดังกล่าวจำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะและพฤติกรรมการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงได้

เป็นสูตร สมการความสัมพันธ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ [1-2] ซึ่งวิธีการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายวิธี เช่น แบบจำลองไดโอดเดี่ยว (single diode model), แบบจำลองไดโอดคู่ (double diode model), แบบจำลองสามไดโอด (three diode model) แบบจำลองการบังเงาบางส่วน (partial shading model) เป็นต้น [3-4] ซึ่งแต่ละแบบมีความยากง่ายต่างกัน แต่แบบที่นิยมใช้ในการจำลองมากที่สุดได้แก่ แบบจำลองไดโอดเดี่ยว (single diode model) ที่มีตัวต้านทานขนาน (shunt resistance) และตัวต้านทานอนุกรม (series resistance) สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโปรแกรม MATLAB ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถเขียนได้ทั้งรูปแบบภาษา C และแบบ Block Diagram ซึ่งได้มีการนำมาใช้สร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบต่างๆ [5-8] และผลลัพธ์ของแบบจำลองสามารถเชื่อมโยงไปยังระบบควบคุม และระบบสั่งการจากอินเทอร์เน็ต ภายนอกได้ [9-10] ดังนั้นในบทความนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองเซลล์

แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองไดโอดเดี่ยว (single diode model) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการพัฒนาแบบจำลอง

2. วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถใช้วงจรไฟฟ้าในการแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แบบจำลอง Single Diode Model เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่สามารถอธิบายให้เข้าใจคุณลักษณะและพารามิเตอร์ของระบบได้ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส ไดโอด ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และความต้านทานอนุกรม (R_s) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรสมมูล Single Diode ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Silicon

วงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 1 สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 1

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{q(V + I R_s)}{N_s k T A} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 ตัวแปร I คือกระแสที่จ่ายออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ I_{ph} คือกระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาของแสงอาทิตย์ I_s คือกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด q คือประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูโลมบ์ k คือค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ จูลต่อองศาเคลวิน T คืออุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ V คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงในขณะจ่ายออกมา R_s คือค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ R_{sh} คือค่าความต้านทานขนานของเซลล์ N_s คือจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ A คือค่า Ideal factor ที่มีค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Ideal factor ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Technology	N	Technology	N
Si-mono	1.2	a-Si:H triple	5
Si-poly	1.3	CdTe	1.5
a-Si:H	1.8	CIS	1.5
a-Si:H tandem	3.3	AsGa	1.3

กระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาของแสงอาทิตย์นั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2

$$I_{ph} = \lambda (I_{sc} + K_l (T - T_r)) \quad (2)$$

โดย λ คือค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร I_{sc} คือกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะลัดวงจรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความเข้มแสงอาทิตย์ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร K_l คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจรมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อองศาเซลเซียส T_r คืออุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์มีหน่วยเป็นเคลวิน ส่วนกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\left[q E_g \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

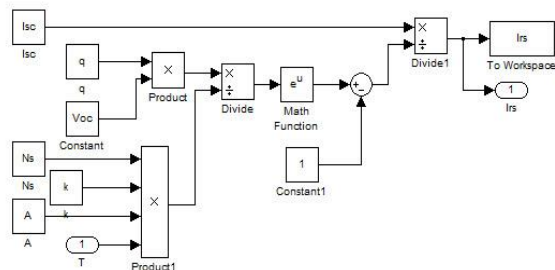
E_g คือ band-gap energy of the semiconductor used in the cell กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนมีค่าคงที่เท่ากับ 1.1 ส่วน I_{rs} คือค่า Reverse saturation current of diode คำนวณได้จากสมการที่ 4

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left[\frac{q V_{oc}}{N_s k A T} \right]} - 1} \quad (4)$$

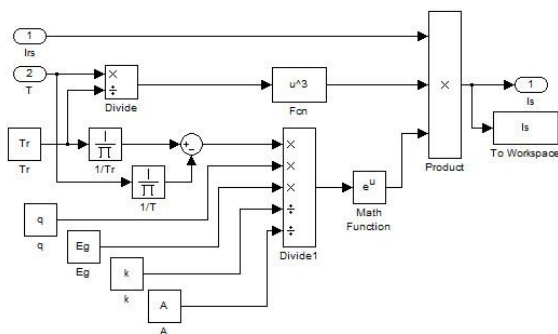
V_{oc} คือแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะเปิดวงจรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความเข้มแสงอาทิตย์ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร

3. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

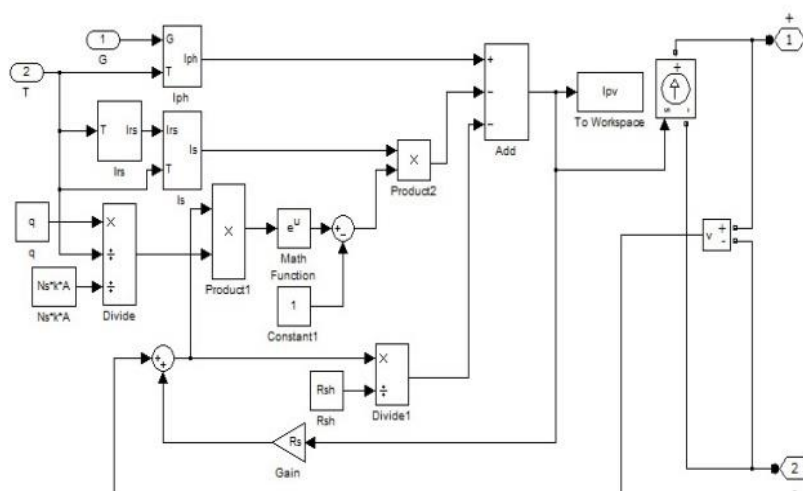
จากสมการคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนได้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สร้างบล็อกไดอะแกรมของสมการในวงจรสมมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 1 ถึงสมการที่ 4 ดังรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 ส่วนรูปที่ 6 คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้จำลองกราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟกำลัง



รูปที่ 2 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 7 ; I_{RS}

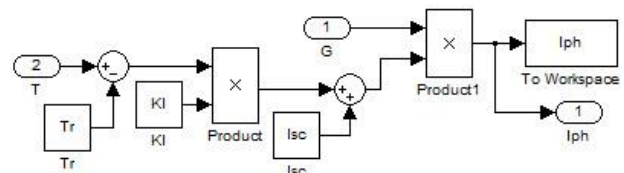


รูปที่ 3 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 3 ; I_s

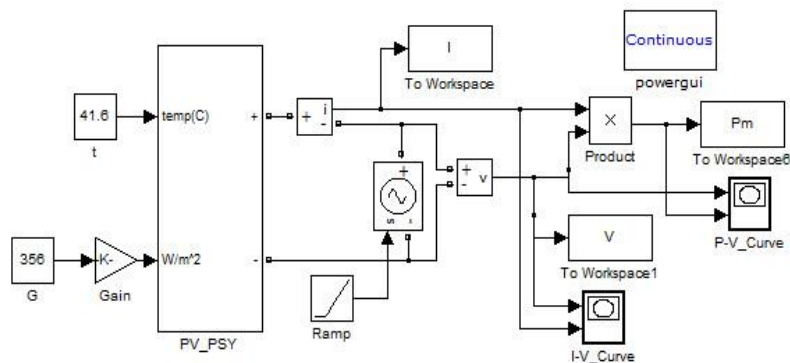


รูปที่ 5 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 1 ; I

งานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรมจากบล็อกไดอะแกรมของ MATLAB/Simulink แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ออกแบบนี้ เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการวิเคราะห์ ใน M-File ของโปรแกรม MATLAB ก่อน รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างของ MATLAB/M-File ที่ป้อนตัวแปรต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline ที่ต้องให้เก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ ก่อนเข้าโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 4 MATLAB/Simulink ของสมการที่ 2 ; I_{ph}



รูปที่ 6 แบบจำลองคณิตศาสตร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับเขียน I-V Curve และ P-V Curve

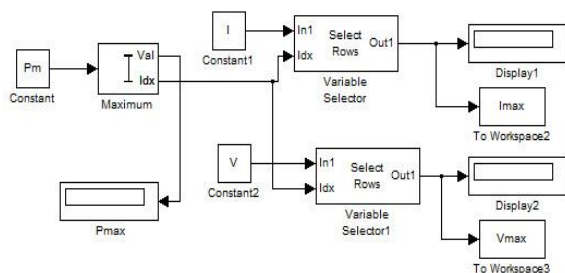
```

1 % DATA OF PV
2 clear;
3 q = 1.6e-19;
4 k = 1.38e-23;
5 Voc = 44.8;
6 Isc = 8.33;
7 Ns = 36;
8 A = 1.3;
9 Tr = 298;
10 Eg = 1.11;
11 K1 = 3.7e-3;
12 Rs = 0.52;
13 Rsh = 10000;
14 G = 1;
15 t1 = 25;
16 T = t1+273;
17 r=0;

```

รูปที่ 7 ตัวอย่าง M-File ของโปรแกรม MATLAB

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ออกแบบนี้สามารถวิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนชนิด Mono crystalline และ Poly crystalline และนอกจากนี้ทีมงานวิจัยยังได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถแสดงค่ากำลังงานสูงสุด กระแสสูงสุดและแรงดันสูงสุด เมื่อทดลองวัดค่าที่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับแสดงค่า P_{MAX} , I_{MAX} และ V_{MAX}

4. การทดสอบ

การทดสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นนั้นทดสอบโดยการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ในการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline จำนวน 2 แผง และชนิด Poly crystalline จำนวน 2 แผง รายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผงแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ

Parameter	Mono crystalline		Poly crystalline	
Pmax (Wp)	30	100	150	280
Vmax (V)	17.2	18	18.5	35.2
Imax (A)	1.74	5.55	8.1	7.95
Voc (V)	21.8	21.6	21.5	44.8
Isc (A)	1.91	6.11	8.91	8.33
Ns	36	36	36	72
A	1.2	1.2	1.3	1.3
Rs (Ω)	1.5m	77m	50m	52m
Rsh (Ω)	8.5k	1k	9k	10k

ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและขนาน ที่ระบุไว้ในตารางที่ 2 นั้น ไม่ได้ระบุมาที่ป้ายบอกคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ทีมงานวิจัยได้กำหนดค่าด้วยวิธีการสุ่มค่าความต้านทานทั้งสอง ที่ทำให้ I-V Curve ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีรูปร่างใกล้เคียงกับกราฟมาตรฐานที่ระบุมาตาม

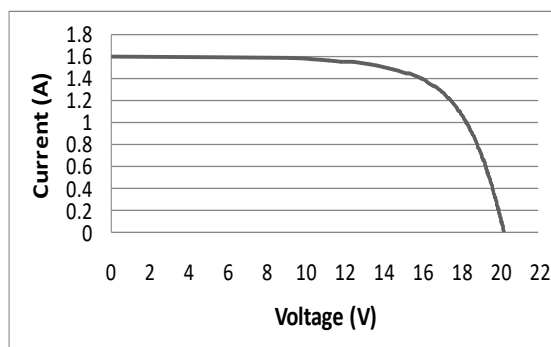
ข้อมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ ได้กำหนดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าตัวแปรตามมาตรฐานการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และยังได้ทำการตรวจสอบตัวแปรต่าง ๆ ที่ระบุไว้ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์เช่น กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{MAX}) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{MAX}) ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์มากที่สุด ส่วนการทดสอบนั้นเริ่มจากการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผงวัดค่า I-V Curve, P-V Curve, P_{MAX} , V_{MAX} , I_{MAX} , V_{OC} , และ I_{SC} ด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer ยี่ห้อ PROVA รุ่น 210 วัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Seaward รุ่น 200 และวัดอุณหภูมิได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบใช้แสงอินฟราเรด โดยกำหนดให้วัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ค่าความเข้มแสงที่แตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 5 ค่าของแต่ละแผงเซลล์ฯ เครื่องมือวัดต่าง ๆ ดังรูปที่ 9 จากนั้นนำค่าตัวแปรที่วัดได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB/Simulink



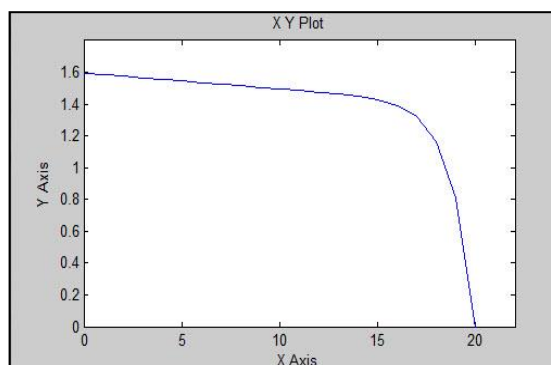
รูปที่ 9 เครื่องมือวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ

5. ผลการทดสอบ

I-V Curve แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline ขนาด 30 Wp เมื่อวัดที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 820 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผงเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 10 ส่วนที่แผง Mono crystalline ขนาด 100 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 528 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผงเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 11

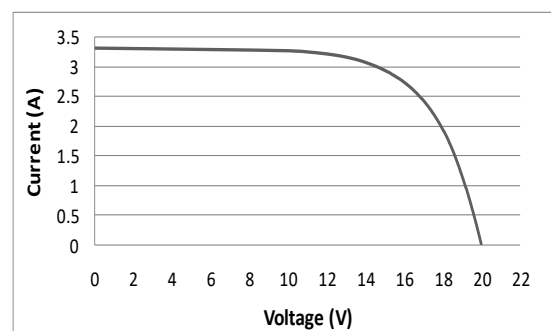


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

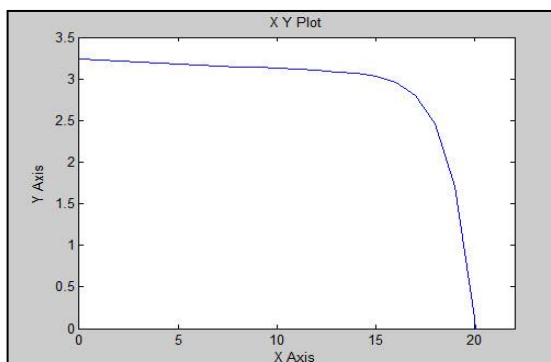


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 10 I-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 80 Wp ที่ 820 W/m² และ 35°C



ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer



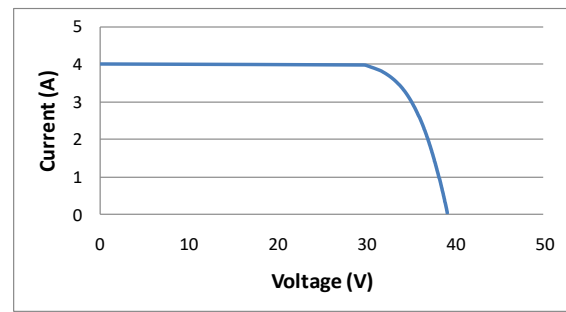
ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 11 I-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 100 Wp ที่ 528 W/m² และ 30°C

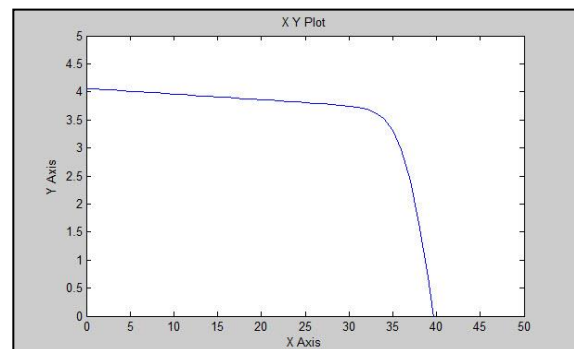


I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 589 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิได้แผง 42 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 12 และ I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 482 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิได้แผง 51.5 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 13

ส่วนผลการทดสอบ P-V Curve ของแผง Mono crystalline ขนาด 30 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 621 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 33 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 14 และที่แผง Mono crystalline ขนาด 100 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 689 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 31 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 15

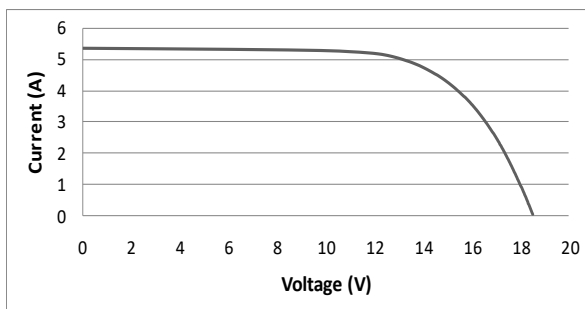


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

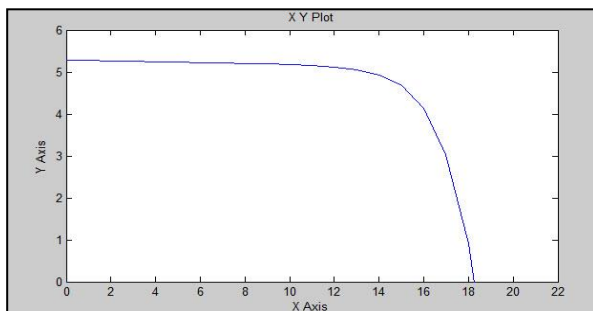


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 13 I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ 482 W/m² และ 51.5°C

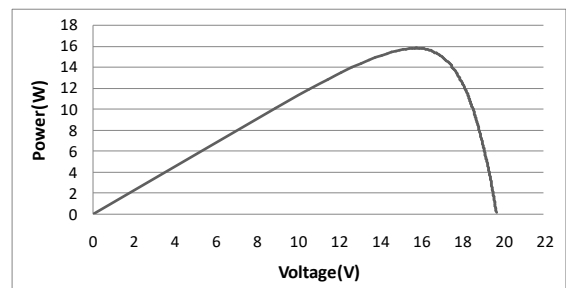


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

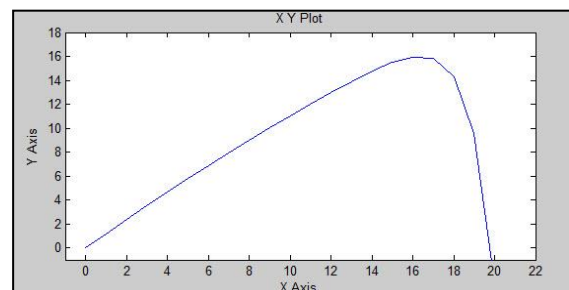


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 12 I-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ 589 W/m² และ 42°C

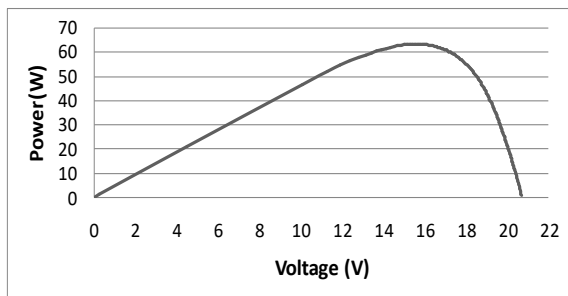


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

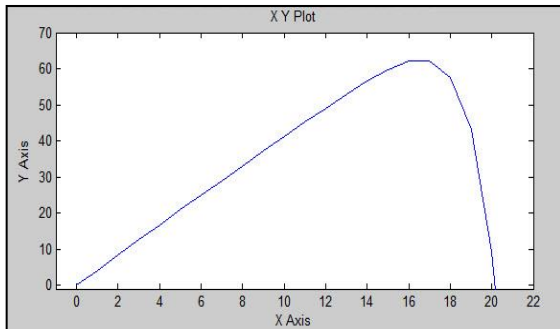


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 14 P-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 30 Wp ที่ 621 W/m² และ 33°C

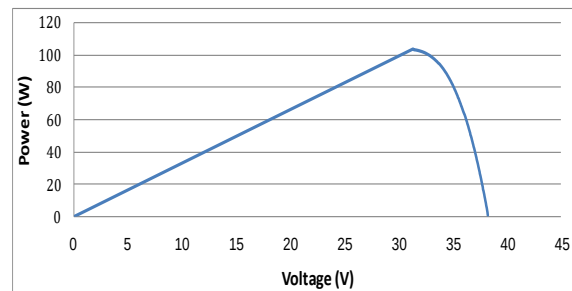


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

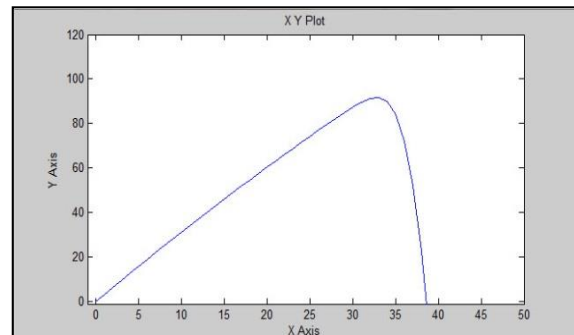


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 15 P-V Curve แผง Mono crystalline ขนาด 30 W ที่ 689 W/m^2 และ 31°C

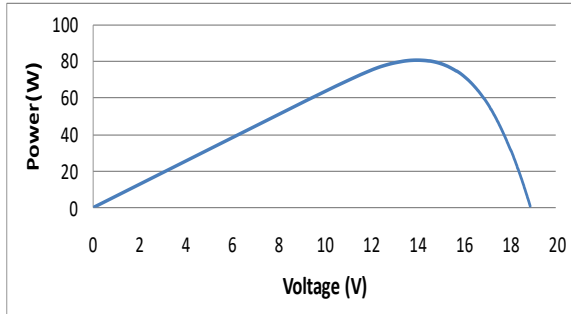


ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer

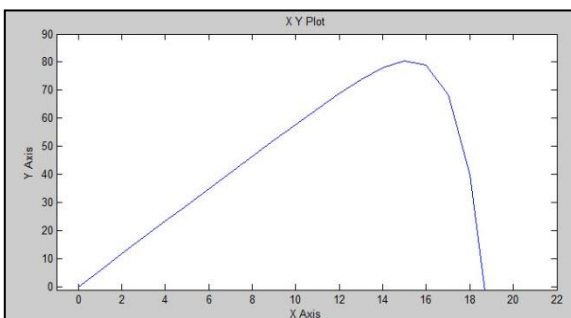


ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 17 P-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ 382 W/m^2 และ 56°C



ก. จากเครื่องวัด Solar Analyzer



ข. จาก MATLAB/Simulink

รูปที่ 16 P-V Curve แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ 657 W/m^2 และ 40°C

ขณะที่แผง Poly crystalline ขนาด 150 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 657 W/m^2 วัดต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 40 องศาเซลเซียสวัด P-V Curve ได้ ดังรูปที่ 16 และที่แผง Poly crystalline ขนาด 280 Wp ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 382 W/m^2 วัดต่อตารางเมตร และอุณหภูมิได้แผง 56 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 17 เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{MAX}) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{MAX}) กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) แรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจร (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้าในขณะลัดวงจร (I_{SC}) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 แผง ที่วัดได้จากเครื่องวัด Solar Analyzer เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 8 โดยคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเทียบกับการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer จำนวน 5 ครั้ง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3



ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความผิดพลาดเฉลี่ยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink

%Error (%)	Mono crystalline				Poly crystalline			
	30 Wp		100Wp		150 Wp		280 Wp	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
P_{MAX}	6.58	5.15	4.35	4.67	5.11	5.30	5.23	5.29
V_{MAX}	4.12	1.60	2.90	1.56	3.25	1.70	3.70	1.75
I_{MAX}	6.54	4.50	5.64	4.20	6.40	4.50	7.93	4.88
V_{OC}	1.50	2.08	1.65	2.05	1.54	1.95	1.73	2.12
I_{SC}	1.24	1.20	1.52	1.10	1.15	1.27	1.50	1.33

ตารางที่ 4 ค่า Fill Factor ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทดสอบ

Fill Factor (F.F.)	Mono crystalline				Poly crystalline			
	30 Wp		100Wp		150 Wp		280 Wp	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Solar Analyzer	0.79	0.03	0.78	0.04	0.79	0.03	0.8	0.04
MATLAB/Simulink	0.75	0.01	0.76	0.01	0.77	0.01	0.75	0.01

เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{MAX}) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{MAX}) กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) แรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจร (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้าในขณะลัดวงจร (I_{SC}) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer และ ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ MATLAB/Simulink คำนวณค่า Fill Factor เฉลี่ยของแต่ละแผง และนำมาเปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 4

6.สรุปและวิจารณ์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้น เมื่อนำมาทดสอบวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตามที่กำหนดไว้ และทำการเขียน กราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) และกราฟกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวัด Solar Analyzer ซึ่งใช้หลักการของ อิเล็กทรอนิกส์โหลด แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) และกราฟกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) เช่นกัน ซึ่งพบว่ากราฟที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้น ไม่ว่าจะเป็นกราฟกระแสไฟฟ้าและ

แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) หรือกราฟกำลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) ต่างก็มีรูปร่างที่ใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากเครื่องวัด Solar Analyzer นอกจากนั้นเมื่อพิจารณา ค่า Fill Factor (F.F.) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บอกถึงความคมของกราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) โดยคำนวณที่จากตัวแปรที่ได้จากการทดสอบของทุก ๆ แผงแล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของแต่ละแผงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า F.F เฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทุก ๆ แผง มีค่าใกล้เคียงกับค่า F.F. เฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัด Solar Analyzer และเมื่อนำค่า F.F เฉลี่ยทั้งสองมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดแล้วพบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าความผิดพลาดมากที่สุดคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline ขนาด 280 วัตต์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 6.25 เปอร์เซ็นต์ ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ตามตารางที่ 3 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 7.93 เปอร์เซ็นต์ที่ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline ขนาด 280 วัตต์ โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นได้จากค่าตัวต้านทานอนุกรม (R_s) 1 และค่าความต้านทานขนาน (R_{sh}) ซึ่งไม่ได้ระบุไว้ในคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการสุ่มด้วยวิธีการนำ I-V Curve มาตรฐานมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจึงมีโอกาที่จะค่าความต้านทานทั้งสองตัวนี้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าความต้านทานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ๆ ดังนั้นเมื่อต้องการให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีค่าความผิดพลาดน้อยลง จึงต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมและที่ต่อแบบขนานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุก ๆ แผงก่อนแล้วนำค่าความต้านทานที่ได้มาใช้งานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการตามบทความนี้ สามารถนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดกึ่งตัวนำแบบซิลิกอน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิได้ โดยมีค่าความผิดพลาดในการใช้งานไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์

สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้ได้กับเฉพาะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono Crystalline และ Poly Crystalline แต่ยังไม่สามารถใช้วิเคราะห์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous Thin film ได้ เนื่องจากแผงดังกล่าวไม่สามารถระบุจำนวนเซลล์ของแผงชนิดนี้ได้ แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้พัฒนาแบบจำลองได้ โดยใช้รูปแบบสมการและแนวทางในการจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดในการสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ ต่อไปได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยวิจัยระบบพลังงานสะอาด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินการทดลอง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. A. Gow, C. D. Manning “Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies,” IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, March 1999.
- [2] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli and A. Masmoudi “MATLAB/Simulink Based Modeling of Solar Photovoltaic Cell” International Journal of Renewable Energy Research, Vol.2 No.2 2012.
- [3] M.Azzouzi, D.Popescu and M. Bouchahdane, “Modeling of Electrical Characteristic of Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model”, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 6, November 2016, pp. 414-419.
- [4] B. Zaidi, I.Sanouane, C.Shekhar, “Simulation of single-diode Equivalent model of Polycrystalline Silicon Solar Cells”, International Journal of Materials Science and Applications, 31 August 2017.
- [5] H. Bellia, R. Youcef, Moulay Fatima, “A Detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB”, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, (2014), Vol. 3, pp. 53-61.
- [6] N. A.Zanial, A.man, A.Razaian Yusoft, “Modelling of Photovoltaic Module using MATLAB Simulink, Material Science and Engineering, Vol 114., 2016
- [7] H.Rezk, E.Hasaneen, “A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems, Ain Shams Engineering Journal, 2015, Vol.6, pp. 873-881.
- [8] X.Hieu Nguyen, M.P. Nguyen, “Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink, Environmental Systems Research, 2015, 4-24.
- [9] S.Said, A.Massoud, M.Benammar and S.Ahmed “A Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystem Toolbox” Journal of Energy and Power Engineering 6, December 2012.
- [10] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model," Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEA August, vol.21, No. 1, 2001, pp.49-56.



การวิเคราะห์โลกลำกำลังเชิงซ้อน จุดทำงาน และเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

An Analysis of the Locus of Complex Power, Operating Point and Stability on the 3 Phase Synchronous Machine

ณัฐพงศ์ พันธนะ¹ อานนท์ สิงห์เสถียร¹ และ ปิยะภัทร พ่วงศรี²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

²โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Nattapong phanthuna¹ Arnon Singhasathein¹ and Piyapat pongsri²

¹Department of Electrical Engineering, Faculty Engineering, Rajamangala University of Technology Phra-Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangkok, Thailand, 10800

²Thai-German Pre-Engineering School, King Mongkut's University of Technology North-Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangkok, Thailand, 10800

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : nattapong.p@rmutp.ac.th, arnon.si@rmutp.ac.th, piyapatpoung@cit.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้กล่าวถึงการจำลองและประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของโลกลำกำลังเชิงซ้อน จุดทำงาน และเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส โดยการจำลองดังกล่าวจะแสดงผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel เนื่องจากเป็นโปรแกรมปฏิบัติการพื้นฐานอย่างง่ายและที่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไป ซึ่งผลลัพธ์จากการจำลองที่ได้จะแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟฟิค (graphical) โดยลักษณะของกราฟฟิคที่ได้ดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงจุดทำงาน (operating point) และขีดจำกัดเสถียรภาพ (stability limit) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟสตามลำดับ นอกจากนี้ประโยชน์ของงานวิจัยในบทความฉบับนี้คือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเบื้องต้นในการออกแบบและการศึกษาถึงพฤติกรรมของของเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

คำสำคัญ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส, รูปแบบของโลกลำกราฟฟิค, ความสัมพันธ์โลกลำกำลังเชิงซ้อน

Abstract

This paper proposes the simulation and application of mathematical equations which concern the locus of complex power, operating point and stability of the three phase synchronous machine. The results of simulation can be illustrated through Microsoft excel, a popular platform for general computing. Moreover, the simulation results of the locus of complex power can be visualized graphically. Such visualization, once analyzed, can estimate the operating point and stability limit of the three phase synchronous machine, respectively. In addition, the proposed method can be utilized in designing and studying of the characteristic of stability of the three phase synchronous machine.

Keywords: the three phase synchronous machine, stability limit, operating point, the locus of complex power.

1. บทนำ

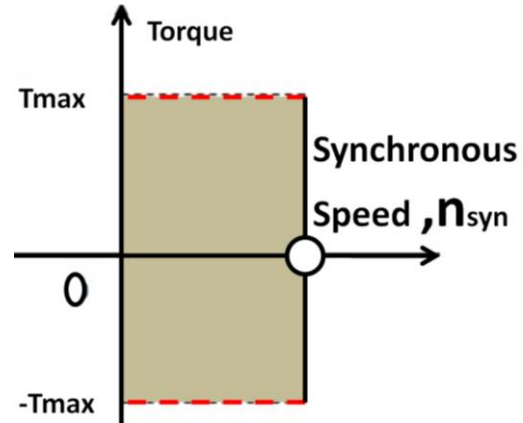
เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส (3 phase synchronous machine) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง กล่าวคือมักจะถูกใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [1] โดยมีสาเหตุอันเนื่องมาจากเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะความเร็วคงที่ ซึ่งเรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed, n_{syn}) อีกทั้งยังมีแรงบิดสูงสุดคงที่ (constant maximum torque, T_{max}) ตามลำดับ โดยในที่นี้จะสามารถแสดงให้เห็นถึงกราฟคุณลักษณะสำคัญคือความเร็วซิงโครนัสและแรงบิดสูงสุดคงที่ได้ดังรูปที่ 1 [1-2]

โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะมีโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) ตามลำดับ โดยในส่วนของสเตเตอร์จะเป็นโครงสร้างหลักของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ไม่มีการเคลื่อนที่ และจะมีการติดตั้งขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature winding) ที่สเตเตอร์อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของโรเตอร์จะเป็นโครงสร้างสำคัญที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนได้อย่างอิสระ โดยโรเตอร์จะเป็นส่วนที่อยู่ภายในสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2

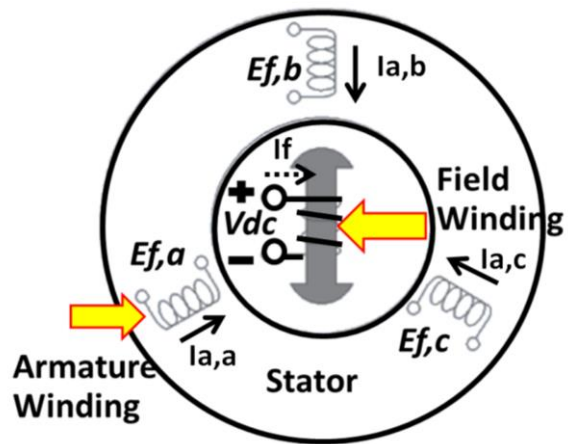
สำหรับในส่วนของโรเตอร์จะมีการติดตั้งขดลวดสนาม (field winding) ซึ่งเป็นขดลวดสำคัญที่จะต้องถูกกระตุ้น (excited) ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) ซึ่งจากผลการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) ภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้างกล่าว ซึ่งมีความสม่ำเสมอสูง [2] โดยอิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุนที่มีความสม่ำเสมอสูงจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสลับที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เฟส a, b, c คือ (E_{fa} , E_{fb} , E_{fc}) ตามลำดับ นอกจากนี้ในทางอุดมคติจะพิจารณาให้ความเร็วของโรเตอร์ดังกล่าว มีความเร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัสอีกด้วย [1-3]

จากลักษณะโครงสร้างในรูปที่ 2 ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจะมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกระแสสนาม (I_f) และกระแสอาร์เมเจอร์ (I_a) ที่เฟส a, b, c ตามลำดับ โดยกระแสทั้งสองประเภทจะเป็นตัวกำหนดถึงขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนาม

(field winding) และขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature winding) [3-5] ซึ่งขีดจำกัดความร้อนดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส อย่างยิ่ง



รูปที่ 1 คุณลักษณะของความเร็วซิงโครนัสและแรงบิดสูงสุด



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส 3 เฟส

จากความสัมพันธ์ของเสถียรภาพที่มีความเกี่ยวข้องระหว่างกระแส I_f และกระแส I_a ดังนั้นบทความฉบับนี้จะกล่าวถึงการศึกษาและประเมินขีดจำกัดเสถียรภาพที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส โดยในที่นี้จะทำการวิเคราะห์และประเมินผลลัพธ์ดังกล่าวในรูปของโลจิสติกส์กำลังเชิงซ้อน ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เนื่องจากโปรแกรม Microsoft Excel เป็นโปรแกรมพื้นฐานที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ทั่วไป



สำหรับเนื้อหาสำคัญที่จะถูกนำเสนอในบทความฉบับนี้ จะสามารถแบบเรียบเรียงตามลำดับต่างๆดังต่อไปนี้คือ ในหัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (S), กำลังไฟฟ้าจริง (P) รวมทั้ง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ตามลำดับ และในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของโลกลักกำลังเชิงซ้อนของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแบบ 3 เฟส ซึ่งมีความ เกี่ยวข้องโดยตรงกับพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่ เกิดขึ้นภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า (S, P, Q), แรงดันที่ขั้วของ เครื่องจักรกลไฟฟ้า (V_t), กระแส I_f และกระแส I_a เป็นต้น

สำหรับในหัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบและ วิเคราะห์โลกลักกำลังเชิงซ้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสแบบ 3 เฟส ในรูปของอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ และทำการแสดงผลลัพธ์ผ่านโปรแกรม Microsoft Excel

ในส่วนสุดท้ายของบทความฉบับนี้คือหัวข้อที่ 5 จะเป็นการกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความฉบับนี้

2. คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับ บัสอนันต์ (infinite bus) ซึ่งมีค่าระดับ แรงดันคงที่ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ก็มีขีดจำกัดในส่วนของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับบัสอนันต์ กล่าวคือการจ่ายกำลังไฟฟ้าง่ายๆจะต้องไม่มีสูญเสียการ เกาะติดความเร็วซิงโครนัสเกิดขึ้น (Lose synchronism) [1]-[2] ดังนั้นในทางอุดมคติจึงทำการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า ส่งผ่านให้กับบัสอนันต์ที่สภาวะคงตัว (steady state)

โดยในเบื้องต้นจะต้องกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของ แบบจำลองที่เป็นองค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์การส่งผ่าน กำลังไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ [1]-[3]

เมื่อ I_f คือ กระแสสนาม

V_{dc} คือแรงดันกระแสตรงที่ใช้กระตุ้นขดลวดสนาม

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ต่อเฟส

E_f คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดอาร์เมเจอร์ต่อเฟส

δ คือ มุมกำลังหรือมุมของแรงดันเหนี่ยวนำที่ขด อาร์เมเจอร์

R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อเฟส

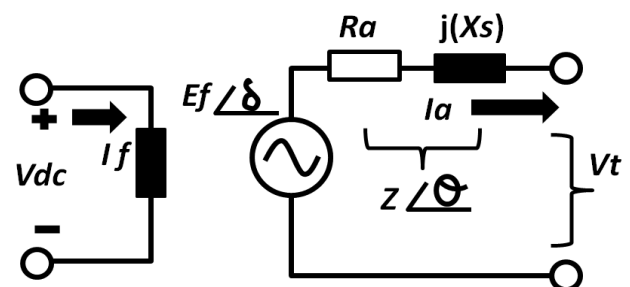
X_s คือ ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อเฟส

Z_s คือ อิมพีแดนซ์ของวงจรต่อเฟส

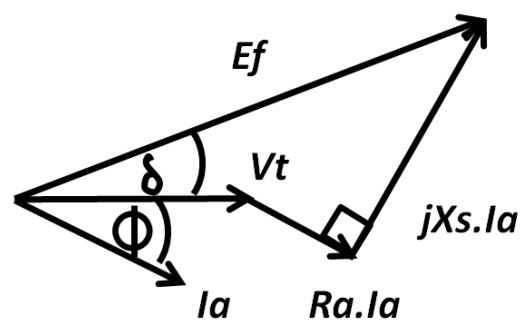
θ_s คือ มุมอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลต่อเฟส

V_t คือ แรงดันต่อเฟส ที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ ซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

ϕ คือมุมระหว่าง E_f และ I_a หรือมุมตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 3 พารามิเตอร์วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้า แบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส [2]



รูปที่ 4 เฟสเซอร์ไดอะแกรมต่อเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้า แบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

จากพารามิเตอร์ต่างๆในรูปที่ (3) ถึง (4) จะได้ผลลัพธ์ของ กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (S) ที่ขั้ว V_t ดังสมการที่ (1) คือ

$$S = V_t \cdot I_a^* = P + jQ \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) พารามิเตอร์ I_a^* คือค่าคอนจูเกตของกระแส I_a โดยที่ I_a^* มีเพื่อหาให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบล้าหลัง มีค่าเป็นบวก (+Q) และ P คือค่ากำลังไฟฟ้าจริง ตามลำดับ

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) จะได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของกำลังไฟฟ้าจริงต่อเฟสและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อเฟส ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ (2) และ (3) คือ [2], [3]

$$P = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{Z_s} \cos(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{Z_s} \cos(\theta_s) \quad (2)$$

$$Q = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{Z_s} \sin(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{Z_s} \sin(\theta_s) \quad (3)$$

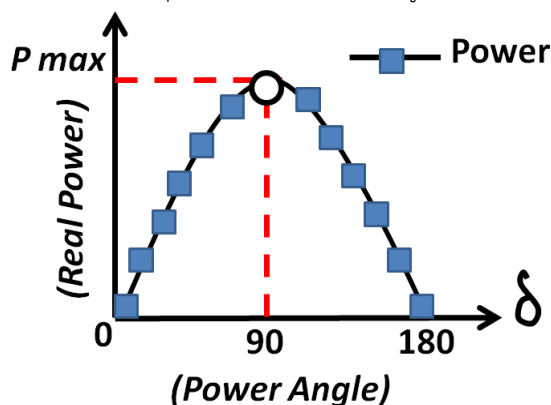
จากสมการที่ (2) และ (3) ในกรณีที่ไม่นับพิจารณาผลของ R_a จะมีผลทำให้ θ_s มีค่าเท่ากับ 90 องศา และจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (4), (5) และ (6) คือ

$$P = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s} \sin(\delta) \quad (4)$$

$$P_{\max} = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s} \quad (5)$$

$$Q = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s} \cos(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{X_s} \quad (6)$$

จากสมการที่ (4) ถึง (6) เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเชิงกราฟ (graphical method) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับมุมกำลัง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5



รูปที่ 5 คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าจริงและมุมกำลัง

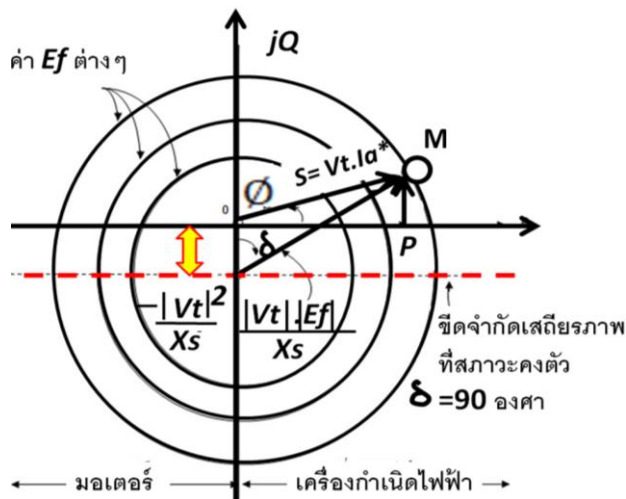
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่มุมกำลัง (δ) มีค่าเกินกว่า 90 องศา จะมีผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดจนทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส เกิดการสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุน [2-3] ดังนั้นขีดจำกัดของเสถียรภาพที่สถานะคงตัว (stability limit) สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะต้องมีความ δ ไม่เกิน 90 องศา

ทั้งนี้จากพารามิเตอร์ของสมการที่ (1) ถึง (6) รวมทั้งความสัมพันธ์ของขีดจำกัดของเสถียรภาพดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะสามารถถูกแสดงในรูปของโลกลัสกำลังเชิงซ้อนเพื่อเป็นการประเมินถึงขีดจำกัดของเสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ดังแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป

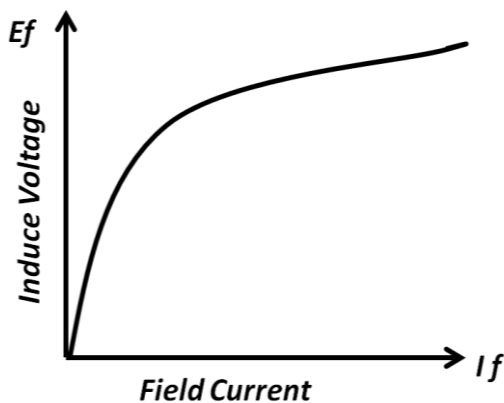
3. โลกลัสกำลังเชิงซ้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแบบ 3 เฟส

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ถึง (6) เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อเฟส มาทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของคุณลักษณะทางคณิตศาสตร์เชิงซ้อน จะทำให้ได้พิกัดโลกลัสในรูปของระนาบเชิงซ้อน (locus of complex s-plane) ซึ่งโลกลัสดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นวงกลม ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 6 ตลอดจนมีความสัมพันธ์ของโลกลัสดังต่อไปนี้ [6]

- โลกลัสวงกลมมีรัศมีเท่ากับ $P_{\max} = \frac{|V_t| \cdot |E_f|}{X_s}$
- โลกลัสวงกลมมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $(0, -\frac{|V_t|^2}{X_s})$
- M คือจุดทำงาน, δ คือมุมกำลัง และ ϕ คือมุมตัวประกอบกำลัง
- ขนาดวงกลมของโลกลัสจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของ E_f โดยค่า E_f จะแปรผันตามขนาดของกระแสสนาม (I_f) ดังแสดงในรูปที่ 7
- เส้นประในแนวนอน คือค่าขีดจำกัดกำลังสูงสุดในสถานะคงตัว (ตัดผ่านจุดศูนย์กลาง) โดยจะมีค่าขีดจำกัดที่ δ ไม่เกิน 90 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-\frac{|V_t|^2}{X_s}$



รูปที่ 6 โลกส์กำลังเชิงซ้อนต่อเฟสที่นำเสนอ

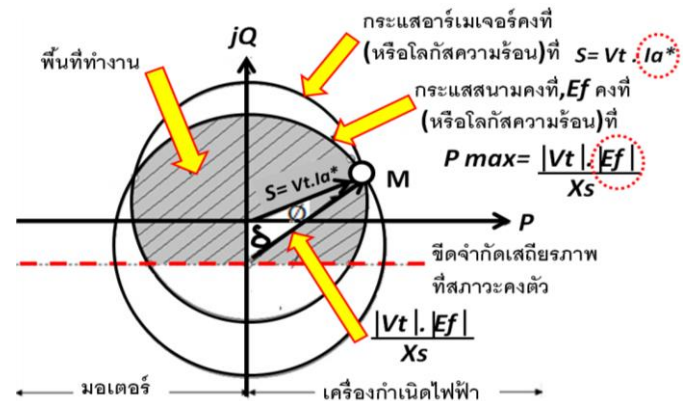


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ef และ If [3]

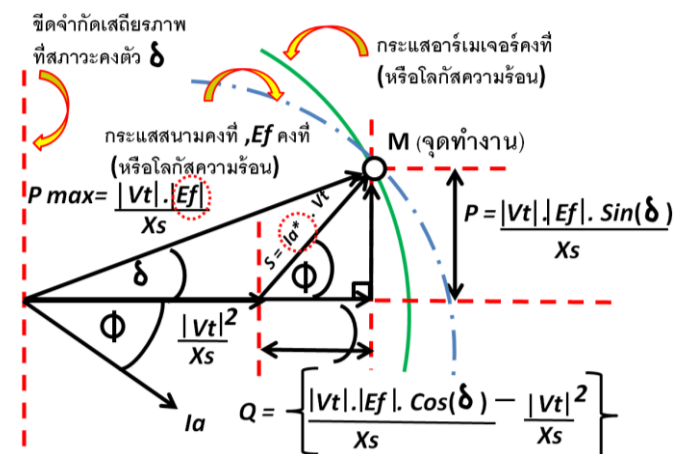
เมื่อนำสมการที่ (1) คือ $S = V_t \cdot I_a^*$ มาร่วมวิเคราะห์กับ โลกส์กำลังเชิงซ้อนต่อเฟสในรูปที่ 6 จะได้ผลลัพธ์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยวงกลมที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (1) จะมีรัศมีเท่ากับ $S = V_t \cdot I_a^*$ ซึ่งเป็นการสื่อถึงโลกส์ความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสอาร์เมเจอร์คงที่ (I_a คงที่) รวมถึงมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับจุดทำงาน (M) ของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ดังสามารถแสดงให้เห็นในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

จากรูปที่ 7 ได้เคยแสดงให้เห็นถึง E_f ซึ่งแปรผันกับขนาดของกระแสสนาม (I_f) ดังนั้นโลกส์ที่เกี่ยวข้องกับ E_f จึงสื่อถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสสนามคงที่ ดังแสดงในรูป

ที่ 8 และ 9 ทั้งนี้กระแสสนาม (I_f) และกระแสอาร์เมเจอร์ (I_a) จะเป็นตัวกำหนดขีดจำกัดความร้อนของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส เนื่องจากกระแสทั้งสองประเภทมีผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเกิดความร้อนที่รวดเร็วภายในเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ตามลำดับ



รูปที่ 8 พื้นที่ทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัส [2]



รูปที่ 9 จุดทำงาน (M) ที่เหมาะสมของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส [1]-[3]

ดังนั้นการออกแบบและวิเคราะห์โลกส์ของเครื่องจักรไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจึงจำเป็นต้องเลือกจุดทำงาน (M) ที่เหมาะสม กล่าวคือจะต้องเป็นจุดทำงานที่มีความสอดคล้องกันระหว่างขีดจำกัดความร้อนจากกระแส I_f และ I_a รวมถึงขีดจำกัดของเสถียรภาพจากรูปที่ 5 ซึ่งมีมุมกำลังไม่เกิน 90 องศา ตามลำดับ โดยในที่นี้จะสามารถแสดงให้เห็นการออกแบบดังกล่าวให้เห็นในหัวข้อที่ 4

4. การออกแบบและวิเคราะห์โลกกำลังเชิงซ้อน

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ถึง (6) ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อนำมาวิเคราะห์และออกแบบให้โมเดลของโลกกำลังจากสมการที่ (1) คือ $S = V_t \bullet I_a^*$ โดยกำหนดให้มีค่าระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อเฟส คือ $V_t = 1 \angle 0^\circ$ unit และกระแสอาร์เมเจอร์ต่อเฟสจะถูกพิจารณาให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างคงที่และมีความเป็นเชิงเส้นดังต่อไปนี้คือ $I_a = 4 \angle \phi^0, 6 \angle \phi^0, 8 \angle \phi^0, 10 \angle \phi^0$ unit ตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 10

นอกจากนี้จะออกแบบให้ขีดจำกัดของเสถียรภาพ (stability limit) ที่สภาวะคงตัว ซึ่งมีมุมกำลังไม่เกิน 90 องศา คือเส้นตรงที่มีลักษณะเป็นเส้นประแนวนอน ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ $|V_t|^2 / X_s = -4$ unit

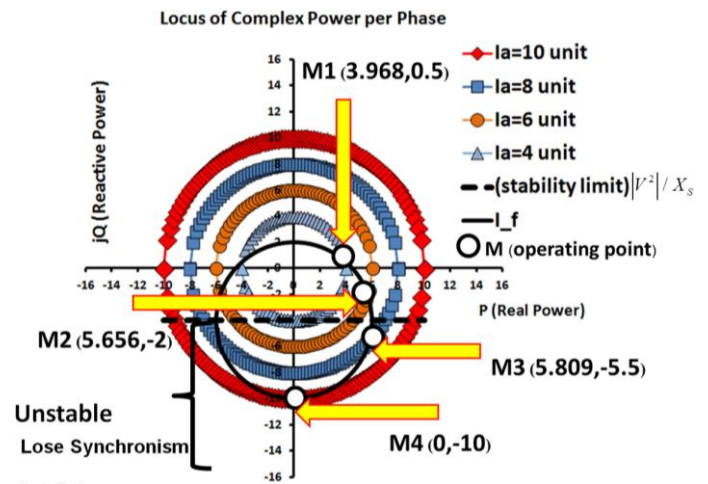
อีกทั้งโลกสวกลมที่ขึ้นอยู่กับแปรผันตามขนาดของกระแสสนาม (I_f) กำหนดให้มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ (0, -4) และรัศมีคงที่เท่ากับ $|V_t| \bullet |E_f| / X_s = 4$ unit (วงกลมเส้นทึบ I_f) โดยจากข้อกำหนดในการออกแบบดังกล่าวจะสามารถแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 เป็นการแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบโลกกำลังเชิงซ้อน โดยใช้การเขียนอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (1) ถึง (6) และแสดงผลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโลกสวกลมของ $S = V_t \bullet I_a^*$ จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีตามค่ากระแสอาร์เมเจอร์ต่อเฟส (I_a) ที่เปลี่ยนแปลงไป คือ $4 \angle \phi^0, 6 \angle \phi^0, 8 \angle \phi^0, 10 \angle \phi^0$ unit ตามลำดับ ในขณะที่โลกสวกลมที่ขึ้นอยู่กับแปรผันตามขนาดของกระแสสนาม (I_f) จะมีรัศมีที่คงที่เท่ากับ 4 unit เสมอ

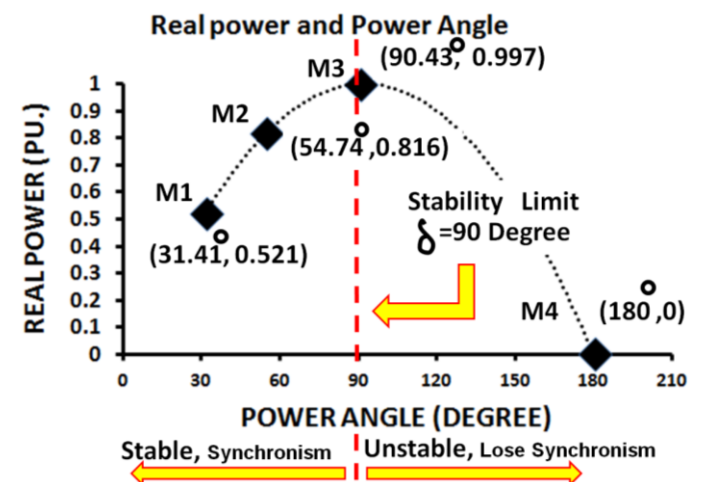
แต่อย่างไรก็ตาม จากผลลัพธ์ในรูปที่ 10 จะต้องทำการหาจุดตัดระหว่างโลกสวกลมของสมการที่ (1) คือ $S = V_t \bullet I_a^*$ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีตาม I_a และโลกสวกลมของกระแสสนาม (I_f) ที่มีขนาดรัศมีคงที่ โดยในที่นี้ความสัมพันธ์ของจุดตัดดังกล่าวจะอยู่ในรูปของสมการที่มีความซับซ้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาผลเฉลยของจุดตัดต่างๆด้วยเทคนิคระเบียบวิธีเชิงเลข (numerical method) แบบ Bisection Method [7]-[8] ซึ่งจะได้ค่าผลเฉลยของจุดตัดคือ $M_1(3.968, 0.5)$, $M_2(5.656, -2)$, $M_3(5.809, -5.5)$ และ $M_4(0, -10)$ ตามลำดับ

โดยผลลัพธ์ของจุดทำงานทั้ง 4 จุด คือ M_1, M_2, M_3, M_4 ได้ถูกกำกับขอบเขตให้มีค่าไม่เกินขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์ ด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ถึง (6) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3

นอกจากนี้เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้และค่าผลลัพธ์ของจุดตัดต่างๆดังกล่าว มาคำนวณตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (4) ถึง (6) จะทำให้ได้ผลลัพธ์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและมุมกำลัง (δ) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 11 โดยผลลัพธ์ของรูปที่ 11 เป็นการแสดงถึงเสถียรภาพการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเชิงโครนัสชนิด 3 เฟส



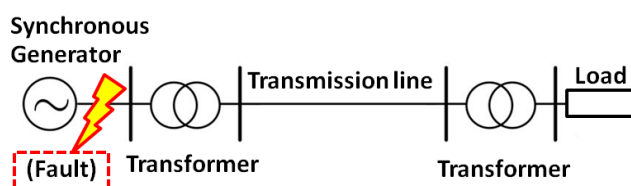
รูปที่ 10 โลกกำลังเชิงซ้อนที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 11 คุณสมบัติของกำลังไฟฟ้าและมุมกำลังที่ออกแบบ

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 10 และ 11 ได้แสดงให้เห็นว่า ที่จุดตัด M_1 และ M_2 สามารถใช้ออกแบบเป็นจุดทำงานได้ในทางอุดมคติ เนื่องจากเป็นจุดที่ไม่เกินขีดจำกัดของเสถียรภาพ (ไม่เกิน 90 องศา) แต่อย่างไรก็ตามที่จุดตัด M_3 และ M_4 เป็นจุดทำงานที่เกินขีดจำกัดของเสถียรภาพ (เกิน 90 องศา) ซึ่งตำแหน่งของทั้งสองจุดดังกล่าว ทำให้เกิดความไม่เสถียรหรือสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสของโรเตอร์ (Lose synchronism) ดังนั้นกรณีนี้จึงไม่สามารถนำมาออกแบบใช้งานได้ทางปฏิบัติ เนื่องจากผลของกระแสอาร์เมเจอร์มีค่าสูงมากเกินไป ซึ่งทำให้จุดทำงานเกินขีดจำกัดของเสถียรภาพที่กำหนดหรือมีมุมกำลังมากกว่า 90 องศาตามลำดับ [6]

โดยจากกรณีศึกษาดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้จริงในทางปฏิบัติคือ การเกิดกระแสลัดวงจรผิดปกติ (fault) ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 12 ซึ่งจากผลดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วคราว (sub-transient short circuit current) และกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วคราว (transient short circuit current) ซึ่งมีขนาดกระแสที่สูงกว่ากระแสปกติที่สภาวะอยู่ตัว (steady state current) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 13



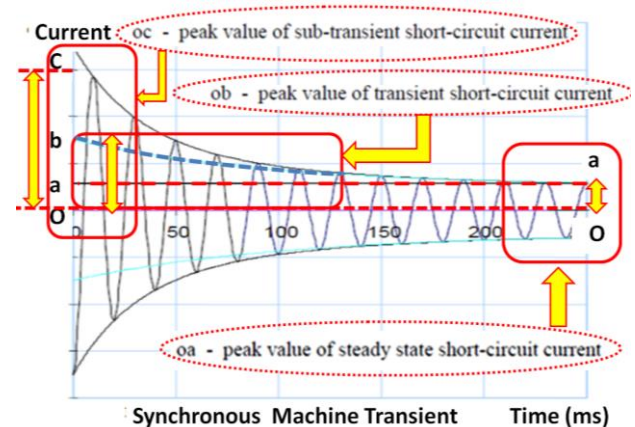
รูปที่ 12 การเกิดกระแสลัดวงจรผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 13 ช่วงเวลาที่เกิดกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วคราวจนกระทั่งถึงกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วคราว จะมีขนาดกระแสที่สูงในช่วงเวลาหลายสิบวินาที ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่าที่กระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติชั่วคราวจะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ดังนั้นในช่วงที่เกิดกระแสอาร์เมเจอร์ลัดวงจรผิดปกติ จึงมีโอกาสที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส จะสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสของโรเตอร์หรือมีมุมกำลังมากกว่า 90 องศา

ซึ่งกรณีนี้เป็นปัญหาสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการส่งจ่ายพลังงานในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องไม่มีสูญเสียการเกาะติดความเร็วซิงโครนัสเกิดขึ้น

สำหรับ ประโยชน์สำคัญของบทความฉบับนี้ที่ได้ถูกนำเสนอคือ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ได้จริง ที่ขอบเขตไม่เกินขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์

โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าได้ทราบถึงพารามิเตอร์จริงอย่างครบถ้วนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส ได้แก่ E_f , V_t , I_f , I_a , X_s ก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของจุดทำงาน (M) ซึ่งเกี่ยวข้องถึงเสถียรภาพที่สมจริงอย่างยิ่ง



รูปที่ 13 การเกิดกระแสลัดวงจรผิดปกติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

5. สรุปผล

การออกแบบโลกซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ควรออกแบบให้มีจุดทำงาน (M) ที่เหมาะสม กล่าวคือ จะต้องไม่จุดทำงานไม่เกินขีดจำกัดของเสถียรภาพ ($|V|^2 / X_s$) หรือมีค่ามุมกำลัง (δ) ที่ไม่เกิน 90 องศาตามลำดับ โดยกรณีที่กำลังถึงในการออกแบบโลกซ์สำหรับบทความฉบับนี้จะเป็นการอ้างอิงถึงในช่วงอุดมคติที่สภาวะอยู่ตัวของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส เท่านั้น และมีขอบเขตไม่เกินขีดจำกัดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดสนามและขดลวดอาร์เมเจอร์ ตามลำดับ นอกจากนี้การจำลองดังกล่าวจะแสดงผลผ่านโปรแกรม Microsoft

Excel เนื่องจากเป็นโปรแกรมปฏิบัติการพื้นฐานอย่างง่าย และที่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไป ตลอดจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเบื้องต้นในการ ออกแบบและการศึกษาถึงพฤติกรรมของของเสถียรภาพของ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิด 3 เฟส

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยในด้านต่างๆ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันวิจัยและพัฒนา (สวพ. มทร. พระนคร) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งคณะผู้เขียนบทความจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] บัลลังก์ เนียมมณี, และ สุขสันต์ หวังสฤตวงศ์ “เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ AC Machines” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2555.
- [2] P. C. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc 1997.
- [3] Stephen J. Chapman, Electrical Machinery Fundamental, Fourth Edition, McGraw-Hill International Edition, 2005.
- [4] ณัฐพงศ์ พันธนะ, ศุภโชค จินดาพล, กันตนิรันดร์ รื่นสัมฤทธิ์ อานนท์ สิงห์เสถียร “ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบชนิดเหนี่ยวนำ” การประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2016.
- [5] ณัฐพงศ์ พันธนะ, ศุภโชค จินดาพล, กันตนิรันดร์ รื่นสัมฤทธิ์ อานนท์ สิงห์เสถียร และ พูนศรี วรรณการ “การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ในสภาวะอยู่ตัว” การประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2016.
- [6] ณัฐพงศ์ พันธนะ, ชนันรัตน์ วีระเพ็ชร, วงศธร สุขสมสังข์, อานนท์ สิงห์เสถียร และ สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ “การวิเคราะห์โลกกำลังเชิงซ้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส” การประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2016.

[7] R.E. Larson, R.P. Hostetler and B.H.Edward, Calcululus and Analytic Geometry 5th. Canada: D.C.Health, 1994

[8] S.C.Chapra and R.P.Canale, Numerical Methods for Engineers. Singapore: McGraw-Hill (Asia), 2006



ผลของปริมาณแมกนีเซียมที่มีต่อรูปร่างกราฟไฟต์และสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว

The Amount of Magnesium Affected on Graphite Shape and Mechanical Property of Ductile Cast Iron

กฤษฎ รุณรักษา^{1*}, ชลธิ์ มูลทา¹, อนวรรษ มูลรักษา¹, นิรวิทย์ สุทธิ¹ และ คณินันต์ย์ จัปใจเหมาะ²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

²สาขาวิชาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

Krit Runraksa^{1*}, Chonnlatee Moonta¹, Anawat Moonraksa¹, Nirawit Sutth¹

and Khanuengnit Chapchaimoh²

¹Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

²Department of Post-Harvest and Processing Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan
150, Srichan Road, Nai Mueang, Amphoe Mueang Khon Kaen, Khon Kaen 40000

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน : krit.runruksa@gmail.com, 085-7585665

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมที่มีต่อรูปร่างกราฟไฟต์และสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียวที่ผลิตให้มีประกอบอื่นทางเคมีคือคาร์บอน 3.0-4.0% และซิลิกอน 1.8-2.9% ด้วยเตาหลอมโลหะแบบไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ ทำอินออกคิวเลชัน 0.30% โดยน้ำหนัก พร้อมกับเติม FeSi Mg 4.5-5.1% (แมกนีเซียมทรีทเมนต์) ในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.5, 1.0 และ 1.5% โดยน้ำหนัก ในบ๊าสแบบแซนวิชโปรเซสที่อุณหภูมิ 1450 °C แล้วตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดสมบัติทางกล พบว่าการเติมแมกนีเซียม 1.0% โดยน้ำหนัก ทำให้เหล็กหล่อเหนียวเกิดกราฟไฟต์โครงสร้างกลมซึ่งมีสมบัติทางกลดีที่สุด โดยมีความเค้นแรงดึงสูงสุด 782 MPa, ความเค้นจุดคราก 578 MPa, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 16% และความแข็ง 85 HB

คำสำคัญ เหล็กหล่อเหนียว รูปร่างกราฟไฟต์ แมกนีเซียมทรีทเมนต์

Abstract

This research aimed to investigate the the amount of magnesium affected on graphite shape and mechanical property of ductile cast iron, the rest of chemical components in iron were 3.0-4.0 %carbon and 1.8-2.9 %silicon, by the induction furnace in term of 0.30 %weight inoculation while three different levels of 0.5, 1.0 and 1.5 %weight of FeSiMg 4.5-5.1 % were used in the sandwich process-furnace at 1450°C. The microstructure was examined for the graphite shape and the mechanical property was investigated. It was found that the 1.0% weight of FeSiMg 4.5-5.1% provided the circular graphite shape which was the optimum mechanical property of the ultimate tensile strength at 782 MPa, yield strength at 578 MPa, elongation at 16% and hardness at 85 HB.

Keywords: ductile cast iron, graphite shape, magnesium treatment process.

1. บทนำ

ในประเทศไทยเหล็กหล่อเหนียวจัดได้ว่าเป็นเหล็กที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมฐานเครื่องจักรขนาดใหญ่ อีกทั้งอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปและวัสดุตั้งต้นเพื่อนำไปแปรรูปใช้งานต่อไปเป็นต้น เหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่อกราไฟต์ก๊อกลม (ductile cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีกราไฟต์เป็นลักษณะกลมแทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก เหล็กหล่อชนิดนี้เป็นการพัฒนาจากเหล็กหล่อสีเทา ด้วยลักษณะรูปร่างกราไฟต์ที่กลมจึงทำให้มีสมบัติด้านความเหนียวและรับแรงกระแทกได้ดี สามารถหล่อขึ้นรูปแม้ชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยเหล็กหล่อเหนียวมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 3-4% และมีเปอร์เซ็นต์ซิลิกอนผสมอยู่ 1.8-2.8% โดยผสมเติมแมกนีเซียม ลงในน้ำเหล็กหลอมเหลวก่อนจะเทลงแบบ ทำให้มีสมบัติในการต้านทานแรงดึงได้สูงประมาณ 540-700 MPa สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อน อบลดความเครียดหรือชุบแข็งผิวได้ ความแข็งและความเปราะลดลง ทำให้กลึงกัดไสเจาะได้ง่าย ทนความร้อนได้ดี ทนการเสียดสี สามารถตีขึ้นรูปได้ดี และสามารถรับแรงกระแทกได้ดี เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ดี [1]

ในการผลิตเหล็กหล่อเหนียวนั้นจำเป็นต้องอาศัยแมกนีเซียม ในการผสมเติมเพื่อช่วยทำให้คาร์บอนอิสระที่อยู่ในรูปกราไฟต์เปลี่ยนรูปร่างลักษณะการจับตัวกันแบบยาวๆ เป็นลักษณะก๊อกลม ซึ่งปริมาณแมกนีเซียมมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกล ดังนั้นในการเติมแมกนีเซียมในเหล็กหล่อเหนียวจะต้องทำการเติมในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ดีที่สุด

จากปัจจัยข้างต้นทำให้คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาปริมาณแมกนีเซียมมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว โดยมีการเติมแมกนีเซียมในบ้ำรับน้ำโลหะแบบ sandwich process ในช่วงปริมาณของ FeSi Mg 4.5-5.1% (แมกนีเซียมทริทเมนต์) ที่แตกต่างกันคือ 0.5%, 1% และ 1.5% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลใน

เหล็กหล่อเหนียวและเพื่อศึกษาปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อรูปร่างของกราไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียว

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์ก๊อกลม

เหล็กหล่อกราไฟต์ก๊อกลมสามารถจะหลอมได้โดยใช้เตาทุกชนิดที่หลอมเหล็กหล่อเทาได้ เตาไฟฟ้าหลอมโลหะทั้งอาร์คและเตาไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำจะสามารถควบคุมส่วนผสมเคมีของน้ำเหล็กได้ง่ายกว่าและควบคุมอุณหภูมิ น้ำเหล็กได้ง่ายกว่า ส่วนการหลอมด้วยเตาควิลโฟล น้ำเหล็กจะมีปริมาณกำมะถันเพิ่มมากขึ้นจึงจำเป็นต้องกำจัดกำมะถันออกจากน้ำเหล็กก่อนการผสม เติมแมกนีเซียม เหล็กหล่อกราไฟต์ก๊อกลมตามข้อกำหนดของ ASTM A339 โดยรหัสมาตรฐาน เหล็ก A 395 เป็นเหล็กหล่อกราไฟต์ก๊อกลมที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงเหล็กหล่อ รหัสมาตรฐาน A 396 เหล็กหล่อกราไฟต์ก๊อกลมที่ใช้งานสภาวะที่ต้องการความแข็งแรงสูง ส่วนเหล็กหล่อรหัสมาตรฐาน A 436 เป็นเหล็กหล่อที่มีโครงสร้างเนื้อเหล็กเป็นอสเตนไนต์ สมบัติทางกลของเหล็กหล่อกราไฟต์ก๊อกลมแต่ละรหัสเบอร์เหล็ก กรรมวิธีการผลิตจะใช้เหล็กหล่อดิบพิเศษที่มีกำมะถันน้อยปราศจาก As Pb Bi Ti หรือ เศษเหล็กกล้าที่ไม่เจือธาตุเพิ่มสมบัติอยู่ด้วย ต้องไม่มีน้ำมันและสนิมเจือปนเตาหลอม ใช้เตาควิลโฟลหลอมก่อนแล้วจึงไปหลอมในเตาไฟฟ้าให้สะอาดขึ้นหรือหลอมในเตาเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าส่วนเจือในเหล็กหล่อเหนียวจะมี 3.3-3.8% C ; 2.4-2.8% Si และ Mn < 0.5% โดยจะต้องมีความสะอาดเป็นพิเศษ กราไฟต์จึงจะจับตัวกันเป็นก๊อกลมได้ อุณหภูมิเจือน้ำเหล็กให้ไหลออกประมาณ 1500 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงมีการใส่ส่วนเจือลงในบ้ำ (ladle) ทำให้กราไฟต์จับตัวเป็นก๊อกลม

2.1.2 กลไกการเกิดกราไฟต์ก๊อกลม

2.1.2.1 เกิดในสภาวะของเหลวกลุ่มแนวคิดนี้เชื่อว่านิวเคลียสของกราไฟต์ก๊อกลมจะเกิดขึ้นครั้งแรกในน้ำเหล็กที่กำลังหลอมเหลวซึ่งปริมาณคาร์บอนสูงกว่าสภาวะสมดุลมาก ต่อจากนั้นจึงจะถูกห่อหุ้มด้วยเหล็กอสเตนไนต์อย่างรวดเร็ว อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเย็นตัวของเหล็กมีค่า degree of super cooling สูงมาก บางท่านเสนอว่ากำเนิดของกรา

ไฟต์กลมอาจเกิดขึ้นตามปฏิกิริยาเพอริเทคติก (peritectic) ด้วย ตัวอย่างแนวคิดในกลุ่มนี้เช่น Johnson และ Smartt ร่วมกันศึกษาและได้ข้อสรุปว่า รูปแบบของการเกิดกราไฟต์กลมในเหล็กหล่อถือกำเนิดขึ้นครั้งแรกจากสภาวะที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูงโดยเกิดนิวเคลียส (nucleation) ตรงบริเวณจุดกึ่งกลางของกราไฟต์กลมขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงเจริญเติบโต (growth) สู่ด้านนอกทำให้รัศมีของวงกราไฟต์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ เช่นเดียวกับ Oldfield ที่กล่าวอธิบายว่า จุดเริ่มต้นตรงบริเวณศูนย์กลางของกราไฟต์กลมจะมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม การเจริญเติบโตเป็นไปในลักษณะเกิดสกรูดิสโลเคชัน (screw dislocation) โดยมีทิศทางเริ่มจากในศูนย์กลางของทรงกลม นอกจากนั้น Minkoff และคณะฯ ยังได้ศึกษาระบบยูเทคติก (eutectic) ในหลายระบบที่เกี่ยวข้องกับกราไฟต์กลมภายใต้ตัวแปรอันเดอร์คูลิ่ง (undercooling) และปฏิกิริยาจากการเติมธาตุแมกนีเซียม, ซีเรียมและธาตุหายาก (rare earths) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อรูปแบบการเกิดและเจริญเติบโตในกราไฟต์กลมในเหล็กหล่อเหนียว อีกแนวทางได้จากแนวคิดด้านหนึ่งของ Prof. Albert Desy แห่งมหาวิทยาลัย Universite' de Gand ประเทศเบลเยียมที่แนะนำว่า กราไฟต์กลมอาจจะเกิดขึ้นได้ก่อนในน้ำเหล็กหล่อซึ่งขณะนั้นมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าสภาวะสมดุล หลังจากนั้นจึงเกิดออสเทนไนต์ล้อมรอบกราไฟต์กลมอย่างรวดเร็วในเวลาถัดมาตามปฏิกิริยาเพอริเทคติกคือ



เมื่อ L คือ น้ำเหล็กที่หลอมเหลว

S คือ เหล็กออสเทนไนต์ที่เป็นของแข็ง

G คือ กราไฟต์กลม

มีอีกหลายท่านที่ส่วนใหญ่แล้วต่างก็สรุปว่านิวเคลียสของกราไฟต์เกิดขึ้นก่อน จากนั้นจึงเจริญเติบโตเป็นเม็ดกราไฟต์กลมซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวเพื่อเป็นของแข็ง (solidification process) ของน้ำเหล็ก ถ้าเป็นเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูเทคติกครั้งแรกกราไฟต์จะเริ่มแยกตัวออกมาจากของเหลวก่อนโดยที่อุณหภูมิของการเกิดจะอยู่บริเวณตำแหน่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวไปถึงจุดยูเทคติกเมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคติกการเกิดนิวเคลียสและเจริญเติบโตของกราไฟต์ก็จะปรากฏให้เห็น

พร้อมกับการเกิดนิวเคลียสและการเจริญเติบโตของกราไฟต์ แต่ถ้าเป็นเหล็กยูเทคติกกับเหล็กไฮโปยูเทคติกการเกิดนิวเคลียสและการเจริญเติบโตของกราไฟต์จะไม่เกิดขึ้นจนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ยูเทคติก สำหรับรูปแบบการเกิดกราไฟต์กลมที่แสดงแนวคิดไว้ส่วนใหญ่จะมีอยู่ 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ

- เกิดนิวเคลียส

- เจริญเติบโต

นิวเคลียสนั้นน่าจะเกิดในลักษณะเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous) โดยความเห็นพ้องกันว่าอาจจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการเติมสารช่วยทำให้เกิดกราไฟต์กลม (spheroidizing treatment) หรือระหว่างการทำอินนอคูลูชันให้กับน้ำเหล็ก นอกจากนั้นแนวคิดบางส่วนซึ่งยังเชื่อว่าการเจริญเติบโตของผลึกกราไฟต์อาจมีลักษณะเกิดเป็นเดนไดรท์อย่างเข้มงวดที่เรียกว่า drastically คือมีการเติบโตสัมพันธ์กับเวลาที่จำกัดโดยเริ่มจากนาที่แรกที่เกิดแล้วจะพัฒนาเป็นหลายกิ่งก้าน (branching) ในลำดับต่อมา ถ้าขั้นตอนการเกิดช้าและไม่เข้มงวดกับการเติบโตของกิ่งก้าน (คือความถี่ของการเกิดกิ่งก้านสัมพันธ์กันต่ำมาก) ก็จะเกิดการตอกิ่งก้านเป็นกราไฟต์เกล็ดหรือแผ่นอย่างธรรมดาเหมือนในเหล็กหล่อเทา รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการเกิดกราไฟต์กลมโดยมีจุดเริ่มต้นที่ศูนย์กลางของทรงกลมก่อน จากนั้นจึงเจริญเติบโตขยายรัศมีขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ



รูปที่ 1 ลำดับขั้นตอนการเกิดกราไฟต์กลมตามแนวทางที่ 1
2.2.1.2 เกิดในสภาวะของแข็งกราไฟต์กลมเกิดขึ้นภายในสภาวะของแข็งในเหล็กออสเทนไนต์ โดยไม่มีโอกาสสัมผัสโดยตรงกับน้ำเหล็กที่หลอมเหลว ตัวอย่างแนวคิดกลุ่มนี้เช่น Prof. Albert Desy ที่เชื่อว่าเหล็กหล่อเหนียวแข็งตัวคล้ายคลึงกับระบบเพอริเทคติกทุกประการไม่เหมือนกับในเหล็กหล่อทั่วไปที่มีระบบการแข็งตัวแบบยูเทคติก นอกจากนั้นจุดยูเทคติกของเหล็กหล่อเหนียวจะอยู่ต่ำกว่าสภาวะสมดุลอีกด้วย อีกทั้งส่วนผสมของคาร์บอนก็มีค่าสูง

กว่าสมดุลด้วยเช่นกัน ดังนั้นนิวเคลียสของกราไฟต์ก่อนกลืนจึงควรถือกำเนิดขึ้นภายในเหล็กออสเทนไนท์ที่แข็งตัวแล้ว ทั้งนี้เพราะเหล็กออสเทนไนท์มีส่วนผสมคาร์บอนเกินสภาวะสมดุลมากกว่าในของเหลวที่คาร์บอนสูงกว่าสภาวะสมดุลเหมือนกันแต่ค่าน้อยกว่าส่วนการเจริญเติบโตของกราไฟต์กลืนได้จากอะตอมของคาร์บอนเคลื่อนที่จากน้ำเหล็กแพร่ซึมผ่านเหล็กออสเทนไนท์เพื่อนรวมกับนิวเคลียสของ กราไฟต์ขยายให้มีขนาดโตขึ้นเรื่อยๆตามปฏิกิริยาเพอริเทคติก

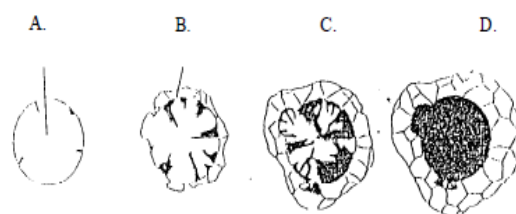
Gorshkov เป็นอีกผู้หนึ่งที่มีแนวคิดว่านิวเคลียสของคาร์บอนสำหรับเกิดกราไฟต์กลืนจะเกิดขึ้นและเจริญเติบโตในเหล็กออสเทนไนท์ นิวเคลียสแต่ละตัวจะมีลักษณะเป็นยูเทคติกเซลล์ (eutectic cell) และมีปริมาณมากกว่าในเหล็กหล่อเทา โดยมีจุดกำเนิดจากฟองแก๊สไฮโดรเจนเล็กๆในน้ำเหล็กหล่อ จากนั้นอะตอมของคาร์บอนจะเข้าร่วมกลุ่มเป็นนิวเคลียสพร้อมทั้งขยายการเจริญเติบโตอยู่ภายในฟองแก๊สนี้รูปร่างของกราไฟต์จึงกลมเหมือนกับฟองแก๊ส นอกจากนั้นยังมีแนวคิดอีกหลายท่านที่เสนอว่า นิวเคลียสของกราไฟต์กลืนควรจะกำเนิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกของฟองแก๊สตรงผิวอิสระ (free surface) จากนั้นจึงเจริญเติบโตเข้าสู่ด้านในโดยมีกลไกดังต่อไปนี้

- 1.เมื่อถึงอุณหภูมิแข็งตัว ออกซิเจนส่วนมากที่รวมตัวอยู่กับซิลิกอนจะมีการแยกตัวออกมาในรูปของสารแปลกปลอม SiO_2
- 2.ออกไซด์ของ Ca, Al, Ba และ Sr ที่ผสมในสารอินนอคูลแลนจะคอยทำหน้าที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดนิวเคลียสของ SiO_2 ที่แยกตัวออกมาและผลลัพธ์อันนี้คือ การได้รับขนาดหรือการกระจายตัวได้ดีของกราไฟต์ (high rate of dispersion)
- 3.หลังจากอนุภาคของ SiO_2 ปรากฏขึ้นชัดเจนแล้ว ความสมดุลระหว่าง SiO_2 และ C ก็จะถูกควบคุมโดยการเกิดปฏิกิริยาตามสมการนี้คือ



4. เกิดนิวเคลียสของกราไฟต์ขึ้นบนบริเวณผิวของฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
5. ทิศทางของการเจริญเติบโตสำหรับกราไฟต์กลืนจะไม่เป็นไปตามแนวยาว (basal plane) เหมือนในกรณีเหล็กหล่อเทา แต่จะมีทิศทางตั้งฉากกับผิวนั้นๆและเรียกรูปแบบนี้ว่ากราไฟต์วิกเกอร์ (whiskers graphite) การเจริญเติบโตจะมี

ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกบรรจุด้วยกราไฟต์จนเต็ม ขั้นตอนการเกิดกราไฟต์กลืน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 เริ่มเกิดนิวเคลียสขึ้นครั้งแรกตรงผิวฟองแก๊สก่อนจากนั้นจึงแพร่ซึมเข้าสู่ภายในฟองโดยมีเหล็กออสเทนไนท์เกิดขึ้นโดยรอบฟองแก๊ส การเจริญเติบโตจะมีได้ก็ต่อเมื่ออะตอมคาร์บอนจะแพร่ซึมผ่านเหล็กออสเทนไนท์เข้าไปรวมกลุ่มกันจนเต็มฟองแก๊ส



รูปที่ 2 ลำดับขั้นตอนการเกิดกราไฟต์กลืนตามแนวทางที่ 2

- A คือ ฟองแก๊ส B คือ กราไฟต์ Whiskers
C คือ น้ำเหล็กที่หล่อม D คือ เหล็กที่เป็นของแข็ง

2.2 การดำเนินการวิจัย

2.2.1 ขั้นตอนการหลอมเหล็กหล่อ

1. จัดเตรียมวัสดุที่จะใช้ในการหลอม โดยใช้หน้าหนักรวมในการหลอมทั้งหมด 65 kg เป็น pig iron 3 kg, return scrap 42.3 kg และ steel scrap 19.7 kg
2. ตรวจสอบความพร้อมของเตาอินดักชั่น (induction) โดยทำการตรวจเช็คปริมาณของน้ำหล่อเย็น ระบบน้ำหล่อเย็น แรงดันน้ำหล่อเย็น ตรวจเช็คผนังเตาและปากเตาว่ามีการสึกกร่อนหรือมีการแตกร้าวหรือไม่ก่อนทำการหลอม ตรวจสอบความพร้อมของเบ้าเทน้ำโลหะว่ามีความแข็งแรงหรือไม่ และตรวจเช็คแบบทรายว่ามีความหนาหรือการแตกร้าวหรือไม่ก่อนการเทน้ำโลหะ
3. นำวัสดุที่ได้ทำการจัดเตรียมไว้บรรจุลงเตาเพื่อเตรียมการหลอม
4. ดำเนินการเปิดเตาอินดักชั่น เพื่อทำการหลอมโลหะโดยใส่วัตถุดิบตามลำดับดังนี้
 1. เหล็กพิก (pig iron)
 2. เศษเหล็กหล่อ (return scrap)
 3. เศษเหล็กเหนียว (steel scrap)
5. ทำความสะอาดน้ำโลหะโดยการโรยแซนดสเลก (sand slag) บนผิวน้ำโลหะเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำโลหะ



ออกและทำการดักขึ้นทดสอบเพื่อเช็คส่วนผสมเคมีในโมลทองแดง

6. ตรวจเช็คส่วนผสมเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) โดยตรวจเช็คส่วนผสมเคมีที่ได้จากการหลอมบนเตาเพื่อทำการปรับปรุงส่วนผสมเคมี

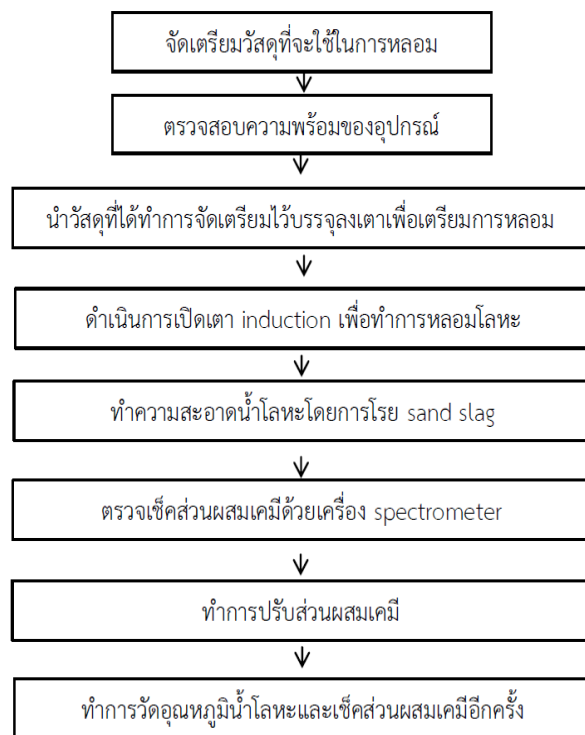
7. ทำการปรับส่วนผสมเคมีเพื่อให้ได้ค่าเคมีตามที่กำหนดไว้

8. ทำการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะถึง 1,450 องศาเซลเซียส และทำการเช็คส่วนผสมเคมีอีกครั้งเพื่อตรวจเช็คปริมาณของธาตุผสมเติม ดังแสดงขั้นตอนต่างๆในรูปที่ 3

2.2.2 ขั้นตอนการผสมเติมแมกนีเซียม

รูปที่ 4 แสดงถึงขั้นตอนการผสมเติมแมกนีเซียมโดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. จัดเตรียมสารอินออกคูเลน (inoculants) และเติม FeSiMg 4.5-5.1% ซึ่งจะคติน้ำหนักตามเปอร์เซ็นต์ที่ใช้เติมคือ 0.5%, 1.0% และ 1.5% เมื่อทำการตรวจเช็คส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เหล็กหล่อที่ได้จะมีปริมาณส่วนผสมของแมกนีเซียมอยู่ระหว่าง 0.015-0.017%, 0.021-0.037%, 0.052-0.063% ตามลำดับ



รูปที่ 3 ขั้นตอนการหลอมเหล็กหล่อเหนียว

2. ทำการผสมเติมแมกนีเซียมในเบ้ารับน้ำโลหะด้วยวิธีแซนวิชโปรเซส (sandwich process) โดยทำการเติม FeSiMg 4.5-5.1% ลงในเบ้ารับน้ำโลหะ แล้วนำเศษเหล็กเหนียวปกคลุมไว้ เพื่อชะลอระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมกับน้ำโลหะและทำอินออกคูเลน (inoculation) ไปพร้อมกับการถ่ายโอนน้ำโลหะจากเตาลงสู่เบ้ารับน้ำโลหะ



รูปที่ 4 ขั้นตอนการเติมแมกนีเซียมในเหล็กหล่อเหนียว

3. ทำความสะอาดน้ำโลหะด้วยแซนสแล็ก เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำโลหะก่อนเทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อ

4. ทำการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะถึง 1,400 องศาเซลเซียส จึงทำการตักน้ำโลหะจากเบ้ารับน้ำโลหะที่ทำการเติมแมกนีเซียมเทลงโมล (mold) ทองแดงเพื่อเป็นขึ้นทดสอบส่วนผสมเคมีของน้ำโลหะในขั้นตอนต่อไป [2]

2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติทางกล

2.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยาโดยการตรวจสอบใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

2.3.2 ดำเนินการนำชิ้นงานที่เตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8 [3] มาตรวจสอบคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึง (tensile test) ใช้เครื่อง universal testing machine และการทดสอบความแข็ง (hardness test) โดยใช้มาตรฐาน ASTM E10-96 [4] วัดแบบบรินเนลล์ตัวอย่างละ 3 ชิ้น

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคกราไฟต์และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว

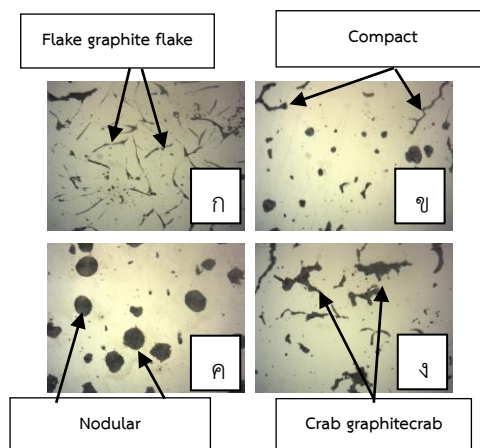
3.1.1 รูปร่างของอนุภาคกราไฟต์

การเติมแมกนีเซียมในปริมาณต่างๆ ทำให้เกิดรูปร่างของกราไฟต์ที่แตกต่างกันโดยรูปร่างของกราไฟต์ที่เหล็กหล่อมีปริมาณแมกนีเซียมผสมอยู่ในช่วง 0.015-0.017% คล้ายตัวหนอนและลักษณะของกราไฟต์ที่ไม่กลมชนิดที่ 2 และชนิดที่ 4 ซึ่งเกิดจากการเติมแมกนีเซียมในปริมาณที่น้อยจนเกินไป ส่วนเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียมผสมอยู่ในช่วง 0.021-0.037% พบว่ากราไฟต์ที่ได้มีลักษณะกลมปกติชนิดที่ 1 เนื่องจากปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียมผสมอยู่ในช่วง 0.052-0.063% พบว่าได้กราไฟต์รูปร่างผิดปกติ ชนิดที่ 5 กราไฟต์มีลักษณะคล้ายกำปูและชนิดที่ 7 กราไฟต์มีลักษณะเป็นแผ่นอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67 [5]

3.1.2 โครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองการผสมเติมแมกนีเซียมที่มีปริมาณแตกต่างกันทำให้เกิดโครงสร้างของเหล็กหล่อที่มีกราไฟต์รูปร่างแตกต่างกันดังนี้ เมื่อไม่เติมแมกนีเซียม ทำให้ได้ผลดังรูปที่ 5 (ก) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อที่มีกราไฟต์รูปร่างเป็นแผ่น (flake graphite) ที่เป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อเทา ส่วนเมื่อเหล็กหล่อมีแมกนีเซียมผสมในปริมาณ 0.015-0.017% จึงเกิดผลดังรูปที่ 5 (ข) ซึ่งเหล็กหล่อมีโครงสร้างกราไฟต์ตัวหนอน (compact graphite) และมีกราไฟต์ที่ไม่กลมกระจายอยู่ภายในโครงสร้างด้วย ซึ่งเป็นลักษณะกราไฟต์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากกราไฟต์แผ่นเป็นกราไฟต์กลม เนื่องจากเหล็กหล่อมีปริมาณแมกนีเซียมต่ำเกินไป ไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดกราไฟต์กลม แต่เมื่อเหล็กหล่อมีแมกนีเซียมผสมในปริมาณ 0.025-0.037% พบว่าเหล็กหล่อจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 5 (ค) ซึ่งแสดงรูปร่างกราไฟต์ลักษณะกลมปกติ กระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้าง เนื่องจากมีปริมาณแมกนีเซียมเหมาะสม อย่างไรก็ตามเมื่อเหล็กหล่อมีแมกนีเซียมผสมปริมาณ 0.052-0.063% จะเกิดโครงสร้างดังรูปที่ 5 (ง) ซึ่งมีรูปร่างกราไฟต์ที่ผิดปกติ เนื่องจากการเติมแมกนีเซียมมากเกินไป ทำให้เกิดกราไฟต์เสื่อม (degenerate graphite) โดยเฉพาะกราไฟต์รูปร่าง

คล้ายกำปู (crap graphite) และเกิดกราไฟต์แบบแผ่นเพิ่มขึ้น คาดว่าอาจมีธาตุอื่นมากเกินไปถูกขับออกมาที่บริเวณระหว่างอนุภาคกราไฟต์ในระหว่างการแข็งตัวที่ปฏิกิริยาอุทเคตอยด์ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอะตอมคาร์บอน ทำให้ไม่สามารถแพร่เข้าไปสู่ข้างในกราไฟต์ข้างเคียงได้ จึงทำให้เกิด กราไฟต์แผ่นเพิ่มขึ้น [6]



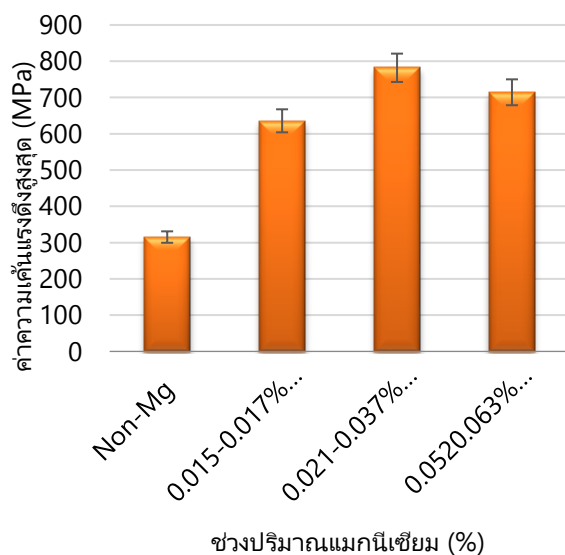
รูปที่ 5 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อเหนียว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ที่กำลังขยาย 50X ก) ไม่เติมแมกนีเซียม ข) 0.015-0.017% ค) 0.021-0.037% และ ง) 0.052-0.063%

3.2 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว

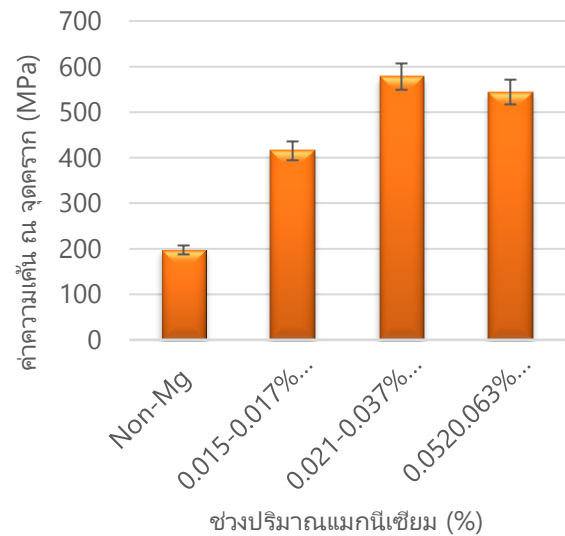
3.2.1 ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength), ความเค้นจุดคราก (Yield Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation)

เหล็กหล่อที่ไม่มีแมกนีเซียมจะมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด, ความเค้นจุดครากและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว คือ 300 MPa, 180 MPa และ 3% ตามลำดับ เมื่อเหล็กหล่อมีปริมาณของแมกนีเซียมในปริมาณที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีค่าสมบัติทางกลดังแสดงในรูปที่ 6, 7, 8 ซึ่งเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียม 0.015-0.017% พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 600 MPa, 400 MPa และ 10% เนื่องจากแมกนีเซียมทำให้เหล็กหล่อมีรูปร่างกราไฟต์เปลี่ยนจากแบบแผ่นเป็นแบบตัวหนอน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกราไฟต์แบบแผ่นนั้นมีส่วนปลายที่แหลมซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นการแตกร้าวในเหล็กหล่อ ส่วนกรา

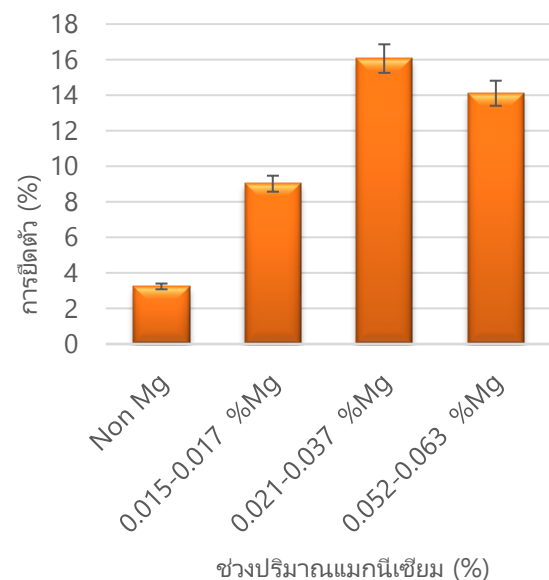
ไฟต์ตัวหนอนนั้นมีส่วนปลายของกราไฟต์ที่มีลักษณะโค้งมน จึงทำให้แตกร้าวได้ยากขึ้น ส่วนเหล็กหล่อที่มีปริมาณ แมกนีเซียม 0.021-0.037% พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อ เหนียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 782 MPa, 550 MPa และ 15% ตามลำดับ เนื่องจากเหล็กหล่อที่ได้มีรูปร่างกราไฟต์ลักษณะ กลมปกติ ไม่เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของส่วนที่เป็นเนื้อ พื้นในเหล็กหล่อ จึงส่งผลให้สมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้นกว่า เหล็กหล่อที่มีรูปร่างกราไฟต์แบบแผ่นและแบบตัวหนอน แต่ เมื่อเหล็กหล่อมีปริมาณแมกนีเซียม 0.052-0.063% ค่าความ เค้นแรงดึงสูงสุด, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ของเหล็กหล่อเหนียวมีค่าลดลงเป็น 700 MPa, 500 MPa และ 13% ทำให้เหล็กหล่อมีรูปร่างกราไฟต์ที่ผิดปกติและ เกิดกราไฟต์แบบแผ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณแมกนีเซียม มากเกินไปซึ่งคาดว่าแมกนีเซียมส่วนที่เกินนั้นจะเปลี่ยนเป็น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) จึงส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึง สูงสุด, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าลดลง [7]



รูปที่ 6 ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติม แมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน



รูปที่ 7 ค่าความเค้นจุดครากของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติม แมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน

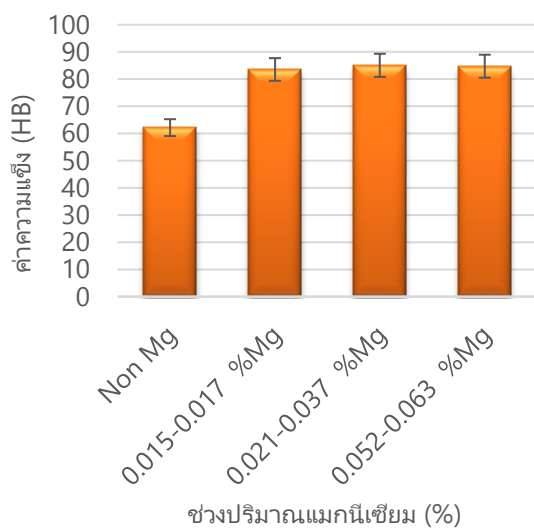


รูปที่ 8 เปอร์เซนต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติม แมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน

3.2.2 ความแข็ง (Hardness)

จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าเหล็กหล่อที่ไม่มี การเติมแมกนีเซียมจะมีความแข็ง 60 HB และเมื่อทำการเติม แมกนีเซียมส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ ตามเหล็กหล่อที่มีปริมาณ แมกนีเซียม 0.015-0.017%, 0.021-0.037% และ 0.052-0.063% นั้น ความแข็งของ เหล็กหล่อจะไม่แตกต่างกันโดยมีค่า 80 HB ทั้งนี้เนื่องจากการ เติมแมกนีเซียมในรูปของ FeSiMg4.5-5.1% ส่งผลให้ปริมาณ ของซิลิคอนมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมกนีเซียมที่เพิ่มขึ้น

ซึ่งซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ความเค้นจุดคราก และค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอนในเหล็กหล่อเหนียวทำหน้าที่เป็นสารละลายของแข็งซึ่งจะเข้าไปแทนที่อะตอมของเหล็กบางส่วนในผลึก (substitutional impurity atom) ทำให้เกิดความเครียดแรงดึงภายในแกนของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวรอบอะตอมของซิลิคอน ส่งผลให้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ภายในผลึกเมื่อผลึกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจึงส่งผลให้โครงสร้างเหล็กหล่อมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าลดลง [8]



รูปที่ 9 ค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติมแมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน

4. บทสรุป

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว

การเติมปริมาณของแมกนีเซียมในช่วงปริมาณ 0.021-0.037% เป็นการเติมปริมาณแมกนีเซียมที่เหมาะสม ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าแมกนีเซียมปริมาณที่เติมเพียงพอต่อความต้องการจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดกราฟไฟต์มีลักษณะกลมปกติและส่งผลให้เหล็กหล่อมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุดคือมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 782 MPa มีค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ย 578 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 16% และมีค่าความแข็งแรง 85 HB

4.2 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคกราฟไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียว

การเติมแมกนีเซียมในช่วงปริมาณ 0.021-0.037% ผลปรากฏว่าพบกราฟไฟต์ที่ลักษณะกลมปกติ ชนิดที่ 1 อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67 เนื่องจากปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงทำให้ได้กราฟไฟต์มีลักษณะกลม

11. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น รวมถึงคณะผู้จัดทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] สมนึก วัฒนศรีกุล. เหล็กหล่อกราฟไฟต์กลม. โลหะวิทยา. King mongkut's university of technology northbangkok (Thailand) Publishing;1995.
- [2] วุฒิสักดิ์ ออบมา. อิทธิพลของพารามิเตอร์การผลิตต่อโครงสร้างเหล็กหล่อเหนียว.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2539.
- [3] เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. การทดสอบแรงดึง. สถาบันเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย; 2550.
- [4] อิทธิพล เตียวนิชชัย. การทดสอบความแข็งแรงและการทดสอบการกระแทก.สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย; 2550.
- [5] Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron casting. ASTM A247-67;1998
- [6] ศักดิ์สิทธิ์ ไรจน์ฤทธาการ และ ประมูล บัวน้อย. อิทธิพลของปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2555;8(2)38-46.
- [7] D. Sheng and C. Shao-chun. "Critical Content of MgO in Spheroidisers." Journal of Iron and Steel Research, International. 2006;13(1):1-4.
- [8] Haycock, Meghan. Effects of silicon content and cooling rate on mechanical properties of heavy section ductile cast iron. Michigan Technological University. Master's Thesis;2011.



จดหมายนำส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เรียน หัวหน้ากองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ข้าพเจ้ามีความประสงค์ขอเสนอบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และขอรับรองว่าบทความนี้เป็นบทความต้นฉบับ ไม่มีส่วนลอกเลียนผลงานของผู้ใดและผลงานนี้ไม่ได้ส่งตีพิมพ์ผลงานในวารสารฉบับอื่นแต่ได้รับการปฏิเสธมาก่อน ข้าพเจ้าขอรับรองว่าข้าพเจ้ามีส่วนร่วมในการศึกษาและได้เห็นข้อมูลทั้งหมดในบทความอย่างครบถ้วนรวมทั้งได้ตรวจสอบข้อมูลความถูกต้องของเนื้อหาเป็นอย่างดีแล้ว

ประเภทบทความ ○ บทความวิจัย ○ บทความปริทัศน์

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ลายมือชื่อ

(.....) วันที่

ชื่อผู้เขียนที่ให้ติดต่อเกี่ยวกับบทความ.....

สถานที่ติดต่อ

.....

โทรศัพท์E-Mail.....

