

การพัฒนาเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง

Development of Spinning Marigolds Dehydrator Machine

พิบูลย์ เครือคำอ้าย^{1*}, ทศพร เงินเนตร², วุฒิชัย หีบคำ³ และ พิชิตรี ทองดี⁴

Phiboon Kruekumary^{1*}, Tasaporn Ngermnate², Wutthichai Hebkham³ and Phichitree Thongdee⁴

^{1,2,3,4} สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

^{1,2,3,4} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak.

* Corresponding author e-mail: Bossbest_@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรืองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาและหาประสิทธิภาพในการสลัดน้ำออกจากดอกเรืองให้อยู่ในช่วง 4.00-4.48 กิโลกรัมจากน้ำหนักก่อนสลัดที่ 5.00 กิโลกรัม โดยไม่ทำให้ดอกดาวเรืองช้ำ ใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 220 โวลต์ 1/3 แรงม้า ซึ่งต่อกับถัง ให้ถังหมุนในอัตรา 500 รอบต่อนาที เพื่อสลัดน้ำที่ตกค้างออกจากดอกดาวเรือง การหาประสิทธิภาพของเครื่องจะนำดอกดาวเรืองน้ำหนัก 5 กิโลกรัม เข้าเครื่องเพื่อสลัดน้ำที่ตกค้างออก ทำซ้ำจำนวน 30 ครั้ง และวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหาค่าความเชื่อมั่นที่ 95% และระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลจากการทดลองในการเปรียบเทียบการสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยใช้แรงงานคนกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นมาในการทดลอง 30 ครั้งด้านเวลาพบว่า เครื่องที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการสลัดน้ำดอกดาวเรืองน้อยกว่าเครื่องที่ใช้แรงงานคนอยู่ที่ 25 นาที และด้านประสิทธิภาพในการทำงานพบว่าเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรืองที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าแบบเดิมอยู่ที่ร้อยละ 62.5 % และจากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติพบว่า น้ำหนักที่ได้จากการสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยใช้แรงงานคนแบบเครื่องเดิม น้ำหนักเฉลี่ย 4.72 กิโลกรัม และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.8 กิโลกรัม ค่าต่ำสุด เท่ากับ 4.6 กิโลกรัม ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0791 ค่าความแปรปรวน เท่ากับ 0.00626 และ ส่วนน้ำหนักที่ได้จากการสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยใช้เครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรืองที่พัฒนาขึ้น มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 4.25 กิโลกรัม และมีค่าสูงสุด 4.3 กิโลกรัม ค่าต่ำสุด 4.1 กิโลกรัม ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0884 ค่าความแปรปรวน เท่ากับ 0.00781 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ : เครื่องสลัดน้ำ, ดอกดาวเรือง

Abstract

The development of spinning marigolds dehydrator machine is aimed to reduce working time and find working efficiency of the spinning marigolds dehydrator machine during 4.00 – 4.48 kilograms differently from before weight at 5.00 kilograms by a voiding using repeated marigolds. The bucket was connected with 220 volts, 1/3 horsepower at 500 rpm speed to dehydrated the water out of marigolds. For the finding working efficiency of machine, the 5 kilograms of marigolds were dehydrated for 30 times and was statistical analyzed for 95% reliability and 0.05 statistical significant.

The result of the comparison reveals that the machine which is developed consumes the time in spinning less than the machine which uses man power for 25 minutes. For the working efficiency, the machine which is developed has the efficiency higher than the machine which uses man power 62.5% in 30 times of testing From the statistical analysis, it explores that the spinning water out from the marigolds by the original machine which used man power get 4.72 kg average weight, 4.8 kg highest weight, 4.6 kg lowest weight, 0.0791 standard deviation and the 0.00626 variance. While, the spinning water out of the marigolds by the machine which is developed get 4.25 kg average weight, 4.3 kg highest weight, 4.1 kg lowest weight, 0.0884 standard deviation and 0.00781 variance at the 0.05 statistical significant and the 95% reliability.

Keywords: Spinning dehydrator machine, Marigolds

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งประชากรส่วนใหญ่จะยึดอาชีพการทำเกษตรกรรมเป็นหลัก ปัจจุบันภาครัฐได้ให้ความสำคัญและได้สนับสนุนให้เกษตรกรมีรายได้เสริมโดยการนำผลผลิตทางการเกษตรมาทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นแปรรูปให้กับโรงงานผลิตอาหารสัตว์และการสกัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด ทั้งนี้เนื่องจากกระแสอาหารสุขภาพที่มาแรง ผู้ประกอบธุรกิจจากภาครัฐทั้งในและต่างประเทศที่เริ่มมองหาอาหารและผลิตภัณฑ์ปลอดสารพิษมากขึ้น ดอกดาวเรืองเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ผู้ประกอบการด้านอาหารสัตว์นำมาผสมในการผลิตอาหารสัตว์ เพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหาร เพราะดอกดาวเรืองมีสารแซนโทฟิลล์ที่ทำให้อาหารมีสีแดง จึงนิยมนำไปผสมกับอาหารสัตว์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในส่วนของอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง อาหารเสริมสุขภาพ เนื่องจากเป็นแหล่งวิตามินเอจากธรรมชาติ ทำให้ความต้องการสารแซนโทฟิลล์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ชุมชนบ้านเจดีย์โคะ ตำบลมหาวัน อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เป็นอีกหนึ่งชุมชนที่ให้ความสำคัญและนิยมปลูกดอกดาวเรืองส่งขายในพื้นที่การเพาะปลูกประมาณ 300-400 ไร่ ก่อนนำดอกดาวเรืองไปจำหน่ายให้กับผู้ค้า เกษตรกรจะต้องทำการสลัดน้ำที่ตกค้างออก โดยนำดอกดาวเรืองสดครึ่งละ 5 กิโลกรัม ซึ่งมีน้ำตกค้างจากการรดน้ำ เข้าเครื่องสลัดน้ำส่วนเกินให้เหลือน้ำหนักระหว่าง 4.00-4.48 กิโลกรัมต่อ 5 กิโลกรัม เครื่องสลัดแบบเดิมจะใช้แรงงาน 2 คนในการออกแรงเพื่อให้ถังปั่นของเครื่องหมุน ใช้เวลาต่อครั้งไม่เท่ากัน และทำงานต่อเนื่องไม่ได้ เนื่องจากเกิดความเมื่อยล้า จึงไม่สามารถส่งดอกดาวเรืองได้ตามความต้องการ โชคชรัตน์ ฤทธิ์เย็น และคณะ (2558) ได้พัฒนาเครื่องสลัดน้ำออกจากดอกดาวเรืองควบคุมการทำงานด้วย

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้สำหรับลดความชื้นของดอกดาวเรืองโดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งเครื่องสลัดน้ำออกจากดอกดาวเรืองมีองค์ประกอบหลักคือ ส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ มีหลักการการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 เป็นตัวควบคุม เริ่มจากปรับตั้งค่าความชื้น ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ จากนั้นกดสวิทช์เพื่อเริ่มการทำงาน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณ PWM ออกมาเพื่อปรับค่าตัวดีไซเคิลไปขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้หมุนเพื่อสลัดน้ำออกจากดอกดาวเรือง เมื่อเซ็นเซอร์วัดความชื้นตรวจจับได้ว่าค่าความชื้นเท่ากับค่าที่ปรับตั้งไว้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะหยุดส่งสัญญาณทำให้มอเตอร์หยุดหมุนและส่งเสียงเตือนออกมา ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ทดสอบวัดค่าความชื้น โดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องสลัดน้ำออกจากดอกดาวเรืองและเครื่องวัดความชื้นในงานอุตสาหกรรมยี่ห้อ OMNI รุ่น MC7825G และกรณีที่ 2 ทดสอบค่าความเร็วที่เหมาะสม โดยนำดอกดาวเรืองที่มีน้ำในกลีบดอกน้ำหนักรวม 5 กิโลกรัม นำมาทดสอบที่ความเร็ว 200 ถึง 800 รอบต่อนาที จากผลการทดสอบกรณี 1 พบว่า ค่าความชื้นที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย 0.5% และกรณีที่ 2 พบว่า ค่าความเร็วที่ 700 รอบต่อนาทีเหมาะสม ดอกดาวเรืองไม่เสียหายและลดความชื้น ดอกดาวเรืองให้น้อยกว่า 2% ได้ดังนั้นคณะผู้ดำเนินงานจึงตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดจากในการพัฒนาเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง โดยการประยุกต์ใช้มอเตอร์แทนแรงงานคน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพจากการทำงาน และตอบสนองต่อความต้องการของตลาดที่ต้องการใช้ดอกดาวเรืองในเชิงการค้ามากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเครื่องสลัดน้ำจากดอกดาวเรือง
2. เพื่อลดเวลาและหาประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แนวความคิดในการออกแบบสำหรับการพัฒนาเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง ได้ประยุกต์ใช้หลักการหมุนเหวี่ยงของถังปั่นของเครื่องซักผ้าและนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาพิจารณาในการจัดสร้างเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง ดังนี้

1. การคำนวณหาค่ากำลังของมอเตอร์ (ณรงค์ ขอนตะวัน, 2538) เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการสลัดน้ำออกจากสมการที่ 1

$$\text{เมื่อ } P_w = \frac{2\pi T n}{60} \quad (1)$$

$$P_w = \text{กำลังขับ} \quad (W)$$

$$T = \text{Torqueที่ได้จากการทดลอง (Nm.)}$$

2. การคำนวณหาโมเมนต์บิด(ชนะ กสิภรณ์, 2528) หาได้จากสมการที่ 2

$$T = F \times r \quad (2)$$

$$F = \text{แรง} \quad (N)$$

$$R = \text{รัศมีแกนหมุน} \quad (\text{mm.})$$

3. การคำนวณระบบส่งกำลังด้วยสายพาน (อัมพล ชี้อตรง, 2536) หาได้จากสมการที่ 3

$$d_1 n_1 = d_2 \times n_2 \quad (3)$$

$$d_{m_2} = d_{m_1} - 2c$$

$$d_1 = \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อขับ} \quad (\text{mm.})$$

$$d_2 = \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อตาม} \quad (\text{mm.})$$

$$c = \text{ค่าระยะความลึกของสายพานจากตาราง} \quad (\text{mm.})$$

$$n_1 = \text{ความเร็วรอบล้อขับ} \quad (\text{rpm.})$$

$$n_2 = \text{ความเร็วรอบของล้อตาม} \quad (\text{rpm.})$$

$$\alpha = \text{มุมของสายพาน (Degree)}$$

4. การคำนวณหาขนาดของเพลาลูกจากค่าโมเมนต์บิด(บรรเลง ศรีนิล และ กิตติ นิมสานนท์, 2541)หาได้จากสมการที่ 4

$$D^3 = \frac{16T}{\pi \tau} \quad (4)$$

เมื่อ

$$D = \text{ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาลูก} \quad (\text{mm.})$$

$$T = \text{โมเมนต์บิด (Nm)}$$

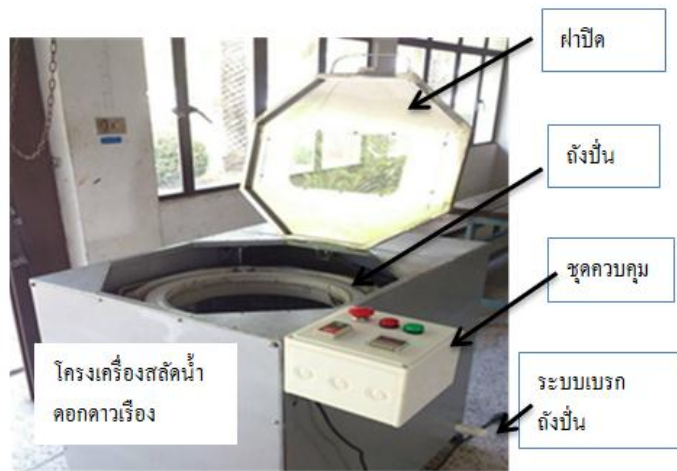
$$\tau = \text{ความเค้นแรงบิดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้} \quad (\text{N/mm}^2)$$

5. ทฤษฎีทางสถิติและการตั้งสมมติฐาน[4,7] ในการทดลองการสลัดน้ำดอกดาวเรืองจากเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรืองที่สร้างขึ้นนั้น จำเป็นต้องนำค่าทางสถิติมาเกี่ยวข้องเนื่องจากต้องนำมาใช้ในงานคิดคำนวณในการหาจำนวนครั้งที่ใช้ทดลองที่เหมาะสมในการทดลอง ค่าความเชื่อมั่นในการทดลอง ทั้งนี้รวมถึงการหาประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องและการหาจุดคุ้มทุน

วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยคณะผู้วิจัยได้ออกแบบและวางแผนวิธีการวิจัยดังนี้

1. สร้างเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง ใช้หลักการหมุนเหวี่ยงเพื่อสลัดน้ำส่วนเกินออกจากดอกดาวเรือง เมื่อน้ำตกลงเบื้องล่างถังปั่นจึงไหลออกตรงท่อระบาย เครื่องที่สร้างมีลักษณะดังรูปที่ 1 ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 1/3 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการขับถังปั่นซึ่งตัดแปลงจากถังเครื่องซักผ้า ความเร็วรอบของถังปั่นทำได้สูงสุดที่ 517 รอบต่อนาที พร้อมมีชุดควบคุมสำหรับตั้งเวลาการทำงานของเครื่อง



ภาพที่ 1 เครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง

2. การทดลอง ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเมื่อเครื่องเสร็จสมบูรณ์ได้ทำการทดลองการทำงานของเครื่อง เพื่อทดลองสลัดน้ำส่วนเกินออกจากดอกดาวเรืองให้เหลือน้ำหนักระหว่าง 4.00-4.48 กิโลกรัม จากน้ำหนักก่อนสลัดที่ 5.00 กิโลกรัม พบว่าการทำงานของเครื่องที่เหมาะสมโดยไม่ทำดอกดาวเรืองซ้ำ ใช้เวลาสลัดประมาณ 30 วินาที โดยที่ถังปั่นหมุนในอัตรา 500 รอบต่อนาที

3. การหาประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องสามารถทำได้สมการในการคำนวณดังนี้

$$\frac{\text{การทำงานของเครื่องใหม่} - \text{การทำงานของเครื่องเก่า}}{\text{การทำงานของเครื่องเก่า}} \times 100\%$$

4. การหาค่าความเชื่อมั่นในการทดลองของเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง ได้นำทฤษฎีทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์จากการทดลองจำนวน 30 ครั้ง เพื่อหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และระดับความเชื่อมั่น 95%

5. การคำนวณจุดคุ้มทุน เป็นการศึกษารถึงจุดคุ้มทุนของการสร้างเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง

ผลการวิจัย

ผลการทดลองในการสร้างเครื่องสลัดน้ำออกจากดอกดาวเรืองแบ่งออกเป็น 3 ด้านดังนี้

1. ด้านเวลา จากการทดลองในการสลัดน้ำดาวเรืองจากเครื่องที่พัฒนาขึ้นที่น้ำหนัก 5 กิโลกรัม ในการทดลอง 30 ครั้ง ซึ่งการสลัดน้ำดอกดาวเรืองออกที่ยอมรับได้จะต้องอยู่ในช่วง 4.00-4.48 กิโลกรัมและดอกดาวเรืองไม่ซ้ำ พบว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการสลัดน้ำออกที่ 30 วินาที

2. ด้านประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรือง จากการทดลองในเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการทำงานดีกว่า 62.5%

3. ด้านค่าความเชื่อมั่นการทดลอง จากการวิเคราะห์ทางสถิติและสมมุติฐานในการทดลองสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีค่าความเชื่อมั่น 95% และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องแบบเดิม สามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปเวลาผลการทดลอง

ค่าทางสถิติ	เครื่องแบบเดิม	เครื่องแบบใหม่
MAX	4.8	4.3
MIN	4.6	4.1
STDVE(S)	0.0791	0.0884
VARIANCE(S ²)	0.00626	0.00781
น้ำหนักเฉลี่ย (กิโลกรัม)	4.72	4.25

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักที่ได้จากการสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยใช้แรงงานคน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.8 กิโลกรัม ค่าต่ำสุด เท่ากับ 4.6 กิโลกรัม ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0791 ค่าความแปรปรวน เท่ากับ 0.00626 และน้ำหนักเฉลี่ย 4.72 กิโลกรัม ส่วนน้ำหนักที่ได้จากการสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยใช้เครื่องสลัดน้ำที่พัฒนาขึ้น มีค่าสูงสุด 4.3 กิโลกรัม ค่าต่ำสุด 4.1 กิโลกรัม ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0884 ค่าความแปรปรวน เท่ากับ 0.00781 และน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 4.25 กิโลกรัม จากการทดลอง 30 ครั้ง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และระดับความเชื่อมั่น 95%

4. ด้านจุดคุ้มทุนในการสร้างเครื่องพบว่าจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 31,984 ดอกโดยคิดราคาขายดอกดาวเรืองในราคา 0.75 บาทต่อดอกจากค่าใช้จ่ายในการสร้างเป็นเงิน 14,348 บาท

อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาและสร้างเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 220 โวลต์ 1/3 แรงม้า ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เพื่อสลัดน้ำที่ตกค้างออกจากดอกดาวเรือง จากผลการทดลองพบว่าด้านเวลา เครื่องที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาน้อยกว่าการสลัดน้ำดอกดาวเรืองเครื่องเดิมอยู่ที่ 25 นาที ด้านประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรืองที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพ

มากกว่าเครื่องเดิมอยู่ที่ร้อยละ 62.5% ด้านค่าความเชื่อมั่นการทดลอง เครื่องสลัดน้ำดอกดาวเรืองโดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีค่าความเชื่อมั่น 95% และมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่จำนวนดอกดาวเรืองที่ 31,984 ดอก โดยคิดยอดขายดอกละ 0.75 บาทต่อดอก

สรุป

การพัฒนาและสร้างเครื่องสลัดน้ำตกค้างออกจากดอกดาวเรืองโดยการประยุกต์การหมุนเหวี่ยงของถังปั่นของเครื่องซักผ้า ใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 220 โวลต์ 1/3 แรงม้า ต่อกับถัง โดยให้ถังหมุนในอัตรา 500 รอบต่อนาที เพื่อสลัดน้ำที่ตกค้างออกจากดอกดาวเรือง ผลการทดลองพบว่าเครื่องที่พัฒนาและสร้างขึ้น มีความสามารถและประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่อง ร้อยละ 62.5% ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% ส่งผลให้เกษตรกรสามารถส่งมอบสินค้าได้ตรงตามกำหนดและไม่ทำให้สินค้าเกิดการเน่าเสีย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

เอกสารอ้างอิง

ชนะ กสิภรณ์. (2528). **ความแข็งแรงของวัสดุ**.

กรุงเทพมหานคร.โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.

โชคชัยรัตน์ ฤทธิเย็น และคณะ. (2558). **การพัฒนา**

เครื่องสลัดน้ำออกจากดอกดาวเรืองควบคุม

ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก.

ณรงค์ ขอนตะวัน. (2538). **มอเตอร์ไฟฟ้า**

กระแสสลับ. กรุงเทพมหานคร.เอราวัณการพิมพ์.

ตารางสถิติ.(ม.ป.ป).ม.ป.ท.: แผนกวิชาคณิตศาสตร์.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก.

ทฤษฎีการทดสอบสมมติฐาน. สืบค้นเมื่อ 15

พฤษภาคม 2558, จาก http://file.siam2web.com/natcha/531special/2จ09913_27970.pdf.

บรรเลง ศรีนิลและกิตติ นิ่มसानนท์.(2541). **การ**

คำนวณและออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล.

ม.ป.ท

อำพล ช่อตรง. (2536). **ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล**.

ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.

ผลของธาตุสตรอนเทียมและเวลาอบแช่ต่อโครงสร้างกิ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียม
ผสมเกรด AA6061

The Effect of Strontium and Holding Time on Semi-Solid Structure of
AA6061 Aluminum Alloy

ทศพร เงินเนตร^{1*} และ พิบูลย์ เครือคำอ้าย²
Tasaporn Ngermnate^{1*} and Phiboon Kruekumary²

^{1,2}สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

*Corresponding author e-mail: tasaporn1@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของธาตุสตรอนเทียมต่อโครงสร้างในสภาพกิ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 วิธีทดลองนำธาตุสตรอนเทียมร้อยละ 0.005, 0.01 และ 0.015 โดยน้ำหนักผสมในโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 หลอมเหลวและเทลงสู่แบบหล่อเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อผลิตเป็นวัสดุป้อน นำวัสดุป้อนให้ความร้อนสู่สภาพกิ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 645 องศาเซลเซียส และอบแช่เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที แล้วจุ่มลงในน้ำ

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณธาตุสตรอนเทียมทำให้โครงสร้างในสภาพกิ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 มีขนาดเกรนที่เล็กลง และความกลมของเกรนเพิ่มขึ้น การเพิ่มเวลาอบแช่ทำให้โครงสร้างในสภาพกิ่งของแข็งมีขนาดและความกลมของเกรนเพิ่มขึ้นทุกๆ ปริมาณการผสมธาตุสตรอนเทียม

คำสำคัญ : อะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061, ธาตุสตรอนเทียม, โครงสร้างในสภาพกิ่งของแข็ง

Abstract

This research aimed to study the effect of strontium on structure in semi-solid state of AA6061 aluminum alloy. The experiments were added strontium 0.005, 0.010 and 0.015 wt% to the molten of AA6061 aluminum alloy and pouring into the stainless steel mold for feedstock manufacturing. For to study; reheat the feedstock to semi-solid state at 645 °C with 5, 10, 15 minute of holding time and quench in the water.

It was found that increasing the amount of strontium the structure in semi-solid state of AA6061 aluminum alloy has a smaller grain size and roundness of the grains increases. Increasing the hold time the structure in semi-solid state with size and roundness of the grains increases all the amount of strontium.

Key words: AA6061 Aluminum Alloy, Strontium, Semi-Solid Structure

บทนำ

โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 เป็นวัสดุที่นำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ชิ้นส่วนอากาศยาน รถยนต์ รถจักรยาน รถจักรยานยนต์ ครอบประตูหน้าต่างของอาคารและเครื่องใช้ไฟฟ้า (Askeland, D.R. and Phule, P.P., 2003) การขึ้นรูปจะทำในสภาพที่โลหะเป็นของแข็งด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งมีข้อจำกัดเมื่อชิ้นส่วนมีรูปร่างที่ซับซ้อนทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ แต่สามารถขึ้นรูปในสภาพกึ่งของแข็งได้ (Lee, Sang-Yong and Oh, Se-Il., 2002)(Pitts, H.E. and Atkinson, H.V., 1998) ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดนี้ลงไป โดยผลิตวัสดุป้อน (feedstock) แล้วป้อนเข้าแม่พิมพ์หล่อฉีดหรือแม่พิมพ์ขึ้นรูป วัสดุป้อนเป็นโลหะที่ประกอบด้วยเฟสของแข็ง และเฟสของเหลว (slurry) ซึ่งอยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้น และสิ้นสุดการแข็งตัว ขั้นตอนนี้ต้องควบคุมรูปร่าง (morphology) เฟสของแข็งไม่ให้เป็นโครงสร้างกิ่งก้าน (non-dendritic) แต่ให้เป็นลักษณะกลม (globular or sphere) มีขนาดต่ำกว่า 100 μm และกระจายตัวสม่ำเสมอในเฟสของเหลว เพื่อให้สามารถไหลตัว (flowability) ได้ดีในแม่พิมพ์ ซึ่งช่วยลดรูพรุน ทำให้เนื้อชิ้นงานแน่น (Govender, G. and Ivanchev, L.,

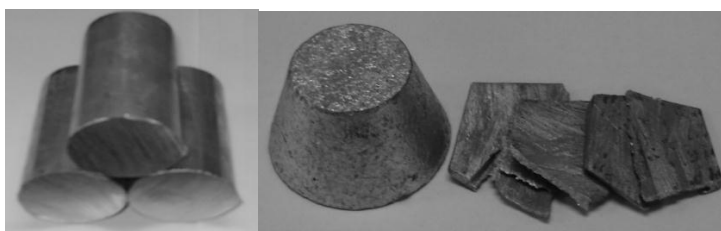
2005)(Kapranos, P., et al., 2000)(Salleh, M.S., et al., 2013) วัสดุป้อนสามารถเตรียมได้หลายวิธีการเติมธาตุผสมเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ สตรอนเทียมเป็นธาตุสำหรับใช้ตัดแปลงโครงสร้างในงานหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 แต่ผลของธาตุสตรอนเทียมในโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ยังไม่มีรายงานการวิจัย งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของธาตุสตรอนเทียมที่มีต่อโครงสร้างในสภาพกึ่งของแข็งโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 เพื่อใช้เป็นข้อมูลการวิจัยต่อไป

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. วัสดุทดลอง

1.1 โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 [ส่วนผสม 0.8-1.2%Mg, 0.4-0.8%Si, max.0.7%Fe, 0.15-0.40%Cu, max. 0.25%Zn, max. 0.15%Ti, max. 0.15 %Mn, 0.04-0.35%Cr, 0.05%Others, Al-Balance] [อุณหภูมิช่วงของการแข็งตัว (solidification range) ระหว่าง 582-652 องศาเซลเซียส] ตัดเตรียมให้เข้าเบ้าหลอมได้ ดังรูปที่ 1 (ก)

1.2 โลหะแม่อะลูมิเนียม-สตรอนเทียม (Al10Sr) ลักษณะดังภาพที่ 1 (ข)



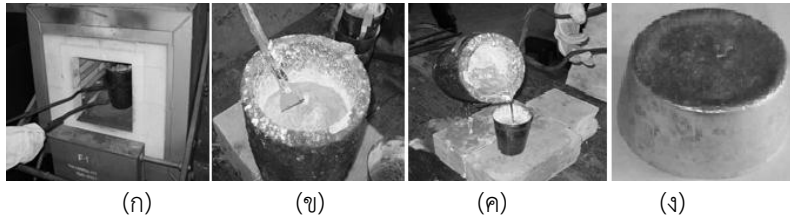
(ก)

(ข)

ภาพที่ 1 (ก) โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ก่อนทำการหลอมละลาย และ (ข) โลหะแม่ Al10Sr

2. การผลิตวัสดุป้อน หลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ด้วยเตาหลอมแบบขดลวดความต้านทานไฟฟ้า ผสมโลหะแม่อะลูมิเนียม-สตรอนเทียม (Al10Sr) เพื่อให้ได้สตรอนเทียมร้อยละ

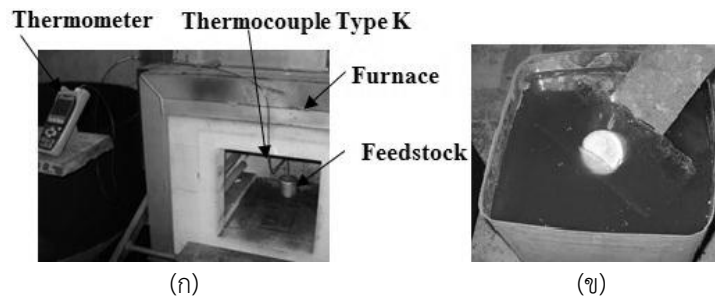
0.005, 0.01 และ 0.015 โดยน้ำหนัก เทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ลงในแบบหล่อเหล็กกล้าไร้สนิม ปล่องยให้โลหะแข็งตัวจึงนำออกจากแบบหล่อ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการผลิตวัสดุป้อน (ก) หลอมด้วยเตาขดลวดความต้านทานไฟฟ้า (ข) ผสมโลหะแม่ Al10Sr เพื่อให้ได้สตรอนเทียมร้อยละ 0.005, 0.01 และ 0.015 โดยน้ำหนัก (ค) เทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียสลงในแบบหล่อเหล็กกล้าไร้สนิม และ (ง) วัสดุป้อนที่ได้จากการผลิต

3. วิธีศึกษาผลของธาตุสตรอนเทียมและเวลาอบแห้งต่อโครงสร้างในสภาพกึ่งของแข็ง นำวัสดุป้อนที่ฝังเทอร์โมคัปเปิลให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 645 องศาเซลเซียส ด้วยเตา

ขดลวดความต้านทานไฟฟ้า และอบแห้งเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที นำออกจากเตา และทำให้เย็นตัวโดยเร็วด้วยการจุ่มน้ำเพื่อรักษาโครงสร้างในสภาพกึ่งของแข็ง ดังในภาพที่ 3



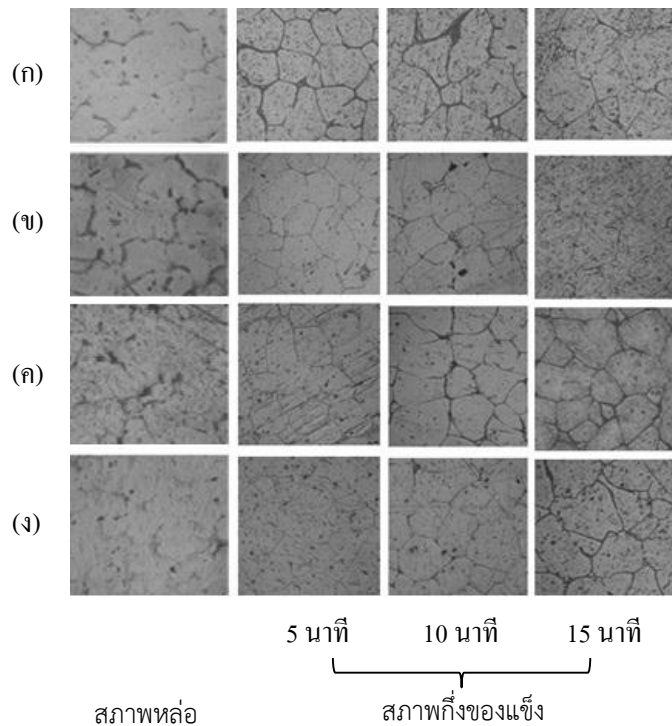
ภาพที่ 3 (ก) ให้ความร้อนวัสดุป้อนสู่สภาพกึ่งของแข็ง และ (ข) จุ่มวัสดุป้อนในน้ำ

4. การศึกษาโครงสร้าง นำวัสดุป้อนที่ผ่านการให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งแล้วทำให้เย็นตัวโดยเร็วด้วยการจุ่มน้ำไปเตรียมผิว กัดผิวหน้าด้วยสารละลาย Keller's ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 150 เท่า และนำภาพโครงสร้างจุลภาคไปวิเคราะห์ขนาดเกรนด้วยวิธี Intercept Length ตามมาตรฐาน ASTM E112-96 และวิเคราะห์ความกลมของเกรนด้วยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ ความกลมของเกรนแสดง

ด้วยค่า Shape Factor ซึ่งความกลมของเกรนจะสมบูรณ์ที่สุดเมื่อ Shape Factor = 1

ผลการศึกษา

เมื่อนำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ที่ผสมธาตุสตรอนเทียมร้อยละ 0.0, 0.005, 0.01 และ 0.015 โดยน้ำหนัก ทั้งในสภาพหล่อ และสภาพกึ่งของแข็งไปศึกษาโครงสร้างได้ผลดังภาพที่ 4

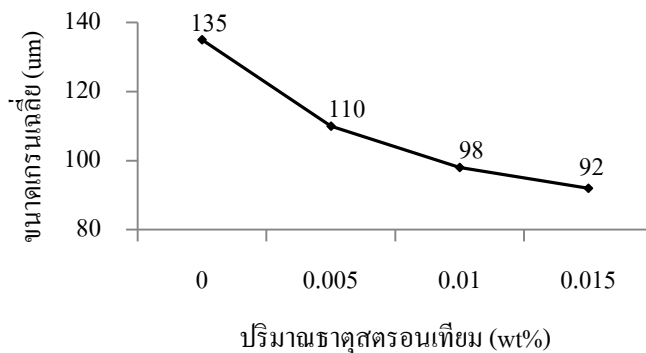


ภาพที่ 4 โครงสร้างโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ผสมธาตุสตรอนเทียมร้อยละ (ก) 0.0 (ข) 0.005 (ค) 0.01 และ (ง) 0.015 โดยน้ำหนัก ทั้งในสภาพหล่อ และสภาพกึ่งของแข็งจากการให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 645 องศาเซลเซียส และอบแช่เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที

อภิปรายผลการศึกษา

จากภาพที่ 5 โครงสร้างในสภาพหล่อของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ที่ผสมสตรอนเทียมร้อยละ 0.0, 0.005, 0.01 และ 0.015 โดยน้ำหนัก มีขนาดเกรน 104, 95, 86 และ 83 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 ขนาดเกรนที่เล็กลงตามปริมาณธาตุสตรอนเทียมที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการฟอร์มตัวที่อุณหภูมิสูงของเฟส Al_4Sr (Alcock, C.B. and Itkin V.P., 1989) และ Al_2Si_2Sr (เสาวลักษณ์

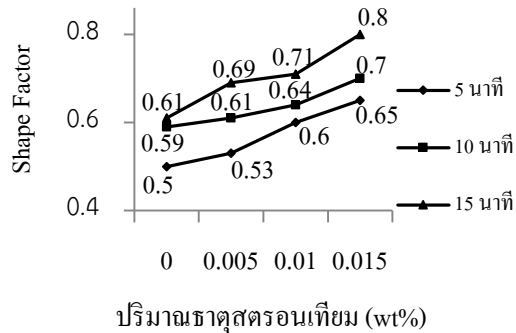
ค ง เอี ย ง , 2553)(Gautam, Krishnan, R. and Somasekharan, Nair, E. M., 2013) จึงทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสของการแข็งตัว เมื่อผสมสตรอนเทียมมากขึ้นทำให้การฟอร์มตัวของเฟส Al_4Sr และ Al_2Si_2Sr เพิ่มขึ้น ทำให้เกรนอัลฟาอะลูมิเนียมเกิดขึ้นจำนวนมากระหว่างการแข็งตัว จึงเป็นผลให้ในสภาพหล่อมีขนาดเกรนเล็กลงตามปริมาณธาตุสตรอนเทียมที่เพิ่มขึ้น



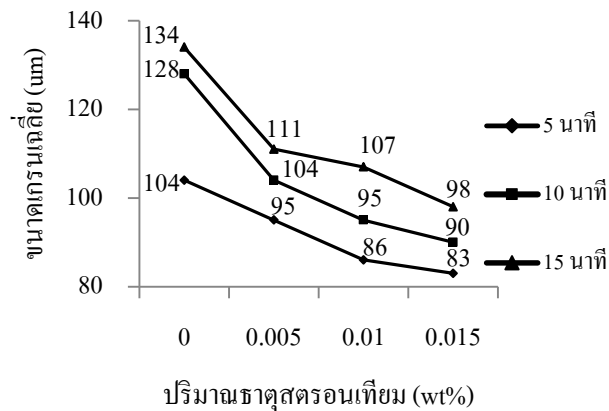
ภาพที่ 5 ผลของปริมาณธาตุสตรอนเทียมต่อขนาดเกรนในสภาพหล่อของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061

เมื่อนำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 ที่ผสมธาตุสตรอนเทียมร้อยละ 0.0, 0.005, 0.01 และ 0.015 โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 645 องศาเซลเซียส และอบแห้งเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที ทำให้โครงสร้างในสภาพหล่อ ซึ่งมีเกรนเป็นกิ่งก้าน (dendrite) เปลี่ยนเป็นลักษณะกลม (globular) ดังรูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการหลอมละลายของเฟสที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำที่อยู่ในบริเวณขอบเกรนพร้อมกับแขนของโครงสร้างกิ่งก้าน (dendrite arms) ที่มีเฟสของเหลวแทรกอยู่จะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว และเปลี่ยนเป็นลักษณะกลมด้วยกระบวนการแพร่ซึมของอะตอม (Fan, Z., 2002) ความกลมของเกรนแปรผันตามเวลาอบแห้ง ผลดังรูปที่ 6 เนื่องจากกระบวนการแพร่ซึมของอะตอมเกิดขึ้นได้ยาวนาน การเพิ่มเวลาอบแห้งยังมีผลทำให้

ขนาดเกรนเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7 ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากกลไกการรวม (coalescence) ระหว่างเฟสของแข็ง (Wang, Shun-cheng, et al., 2008)(Chayong, S., Atkinson, H.V. and Kapranos, P., 2005) และกลไกการเคลื่อนย้ายของอนุภาคขนาดเล็กไปยังอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (Ostwald ripening) [13-16] อีกทั้งก่อนให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งหากเกรนมีขนาดเล็ก ภายหลังการให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งก็จะได้เกรนที่มีขนาดเล็กลง (Margarido, M. and Robert, M.H., 2003) ซึ่งธาตุสตรอนเทียมที่ผสมเข้าไปทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงจากผลของเฟส Al_4Sr และ Al_2Si_2Sr ซึ่งสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจึงทำหน้าที่ขัดขวางการโตของเกรนระหว่างการให้ความร้อน (Samuel, F.H., et al., 2001) ส่งผลให้โครงสร้างในสภาพกึ่งของแข็งมีขนาดเกรนเล็กลง



ภาพที่ 6 ผลของปริมาณธาตุสตรอนเทียมและเวลาอบแข็งในสภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 645 องศาเซลเซียส ต่อ ความกลมของเกรนของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA6061



ภาพที่ 7 ผลของปริมาณธาตุสตรอนเทียมและเวลาอบแข็งในสภาพกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ 645 องศาเซลเซียส ต่อ ขนาดเกรนของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA6061

สรุป

1. ธาตุสตรอนเทียมทำให้โครงสร้างในสภาพกึ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม AA6061 มีขนาดเกรนที่เล็กลง และระดับความกลมเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของธาตุสตรอนเทียม

2. การเพิ่มเวลาอบแข็งทำให้โครงสร้างในสภาพกึ่งของแข็งมีขนาดและความกลมของเกรนเพิ่มขึ้นทุกๆ ปริมาณการผสมธาตุสตรอนเทียม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- เสาวลักษณ์ คงเอียง. (2553). การปรับปรุงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมที่แข็ง 7075 โดยการอบละลายสองขั้นตอน และการเติมธาตุสตรอนเทียม สแกนเดียม และ/หรือเซอร์โคเนียม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Alcock, C.B. and Itkin V.P. (1989). **Journal of Phase Equilibria**.
- Askeland, D.R. and Phule, P.P. (2003). **The Science and Engineering of Materials**. 4th Edition. USA. Thomson Learning.
- Chayong, S., Atkinson, H.V. and Kapranos, P. (2005). Thixoforming 7075 aluminium alloys. **Materials Science and Engineering**. A390, 3-12.
- Fan, Z. (2002). **Semisolid Metal Processing**. Haddersfield. The Charlessworth Group. 11-20.
- Gautam, Krishnan, R. and Somasekharan, Nair, E. M. (2013). Study of Strontium Modification in Aluminium Alloy. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**. 3(10), 2250-2459.
- Govender, G. and Ivanchev, L. (2005). **Near Net shape Forming Using Semi-Solid Metal Forming**. South Africa. National Product Development Center. 1-15.
- JIANG, Ju-fu and LOU Shou-jing. (2004). Reheating microstructure of refined AZ91D magnesium alloy in semi-solid state. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 14(6), 1074- 1081.
- Kapranos, P., et al. (2000). Near net shaping by semi-solid metal processing. **Materials and Design**, 387-394.
- LE, Qi-chi, et al. (2003). Microstructure evolution and partially remelting processing two-phase- region casting AZ91D semisolid slurry ingot. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**. 13(6), 1488-1493.
- Lee, Sang-Yong and Oh, Se-II. (2002). Thixoforming characteristics of thermo-mechanically treated AA6061 alloy for suspension parts of electric vehicles. **Journal of Materials Processing Technology**. 130-131, 587-593.
- LIU, C. M., HE, N. J. and LI, H. J. (2001). Structure evolution of AlSi6.5Cu2.8Mg alloy in semi-solid remelting processing. **Journal of Materials Science**. 36, 4949-4953.
- Margarido, M. and Robert, M.H. (2003). Influence of thermomechanical treatment on the production of rheocast slurries by partial melting. **Journal of Materials Processing Technology**. 133, 149-157.
- Pitts, H.E. and Atkinson, H.V. (1998). Thixoforming of AA6061 Al alloy for automotive components. In: **Proceedings of the Fifth Semi-solid Processing of Alloys and Composites**. 97-104.
- Salleh, M.S., et al. (2013). Review Article: **An Overview of Semisolid Processing of Aluminium Alloys**. Hindawi Publishing Corporate.

Samuel, F.H., et al. (2001). Decomposition of Fe-Intermetallics in Sr-Modified Cast 6XXX Type Aluminium Alloys for Automotive Skin. **Metallurgical and Materials Transaction**. A3(8), 2061-2075.

Wang, Shun-cheng, et al. (2008). Microstructure evolution of semi-solid 2024 alloy during two-step reheating process. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 18, 784-788.

ZHAO, Gaozhan, et al. (2014). The Development of Spheroidal Grains and Thixoforming of AZ91D Magnesium Alloy Treated by Different Routes. **Materials Science**. 20(4), 1392–1320.

การพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับกำลังงานหลายชุดเพื่อวิเคราะห์
พารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย
The Development of Multiple Receiver Wireless Power Transfer to
Analyze Influence Parameter on Performance of Wireless
Power Transfer

กิตติ พิลาจัน¹, ณัฐพงศ์ เชื้อเมืองพาน² และ เอกชัย ชัยดี^{3*}
Kitti pilajan¹, Nattapong Chuamuangphan² and Ekkachai Chaidee^{3*}

^{1,2,3} สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

*Corresponding author e-mail: ekkachai@rmutl.ac.th, ekkachai.ch799@gmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายขนาดพร้อมกันโดยใช้ขดส่งกำลังงานหนึ่งชุดจำเป็นต้องเข้าใจลักษณะทางไฟฟ้า แม่เหล็ก และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับกำลังงานหลายชุด ได้วิเคราะห์วงจรสมมูลไฟฟ้าพบว่า พารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ โหลดความเหนี่ยวนำรวม และความถี่ใช้งาน เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงได้ออกแบบชุดทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดส่งกำลังงานหนึ่งชุดและขดรับกำลังงานหลายชุด ใช้วงจรขับแบบเต็มคลื่นทำงานที่ความถี่ระดับกิโลเฮิร์ต ออกแบบการทดสอบ และทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในแต่ละกรณี ผลการศึกษาพบว่า 1) สนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นมากที่ระยะใกล้ขดตัวนำด้านในและเบาบางบริเวณกลางขด 2) การลดขนาดขดส่งกำลังงานสามารถเพิ่มความหนาแน่นสนามแม่เหล็กบริเวณกลางขด 3) กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพลดลงตามระยะห่างของขดตัวนำที่เพิ่มขึ้น 4) ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามจำนวนขดรับกำลังงาน 5) วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโหลดมีค่าที่เหมาะสม 6) วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ดีเมื่อความถี่โซ่เนนซ์ขดรับมีค่าเข้าใกล้ความถี่โซ่เนนซ์ของขดส่งกำลังงาน 7) ค่าความเหนี่ยวนำผลโดยตรงต่อการส่งกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพ ผลการวิจัย การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับกำลังงานสามขดตัวนำสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 25.72 วัตต์ มีกำลังไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยอยู่ที่ 8 วัตต์ ต่อชุดที่ระยะทาง 1 เซนติเมตร งานวิจัยนี้สามารถศึกษาเชิงลึก ออกแบบ และพัฒนา วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้ต่อไป

คำสำคัญ : การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย, ขดรับกำลังงานหลายชุด, โหลดทางไฟฟ้า, ความเหนี่ยวนำรวม, ความถี่โซ่เนนซ์

Abstract

To design of multiple receiver wireless power electrical, magnetic characteristics and effect of parameter on performance of wireless power transfer should be known. Objective of this study is to analyze the effect of parameters on the performance of wireless power transfer. Equivalent circuit was analyzed. Load, mutual inductance and operating frequency are parameters that have effected on performance of wireless power transfer. To study the effect of these parameters, circuit of wireless power transfer was designed by using one transmitter and multiple receivers. The circuit has driven by using full bridge inverter operating at the kilohertz range of frequency. Experiments were designed and each cases was tested power transfer. The study results found that 1) high magnetic field density occurs at nearing inside transmitter and sparse at central area of transmitter coil 2) size reduction of transmitter can increase the central area magnetic field density 3) output power and efficiency decreases with increasing distance of resonators 4) average output power and efficiency are increased when receivers are increased 5) wireless power transfer circuit can transfer maximum power at optimal load 6) wireless power transfer circuit can transfer can deliver well power when using resonance frequency of transmitter. The results can be applied deep study, design and development of wireless power transfer.

Keywords: Wireless power transfer, multiple receiver, electrical load, mutual inductance, resonance frequency

บทนำ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ เทคโนโลยีที่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้สายตัวนำ แบ่งประเภทตามกลไกการส่งกำลังงานได้ 3 แบบ คือ การแผ่คลื่นแม่เหล็ก(far-field radiation) (W.C. Brown, 1984), (W.C. Brown et al, 1992) การเหนี่ยวนำ(inductive coupling) (H. Hao et al, 2014) และ การเหนี่ยวนำในสภาวะรีโซแนนซ์(magnetic resonance coupling) (A. Kurs et al, 2007), (S.Y.R. Hui et al, 2014) แต่ละแบบแตกต่างกันด้าน ความถี่ใช้งาน ระยะทาง และระดับการส่งกำลังงาน (N. Shinohara et al, 2011)

เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบการเหนี่ยวนำในสภาวะรีโซแนนซ์ เป็นที่รู้จักครั้งแรกจากการทดลองของนิโคลาร์ เทสลา (S.Y.R. Hui et al, 2014) การทำงานใช้สนามแม่เหล็กในสภาวะรีโซแนนซ์คล้องระหว่างขดตัวนำด้านส่งและด้านรับกำลังงานให้ประสิทธิภาพการส่งกำลังงานสูงกว่าการส่งกำลังงานแบบแผ่คลื่นแม่เหล็ก ในขณะที่ส่งกำลังไฟฟ้าได้ไกลกว่าแบบการเหนี่ยวนำ (M. Fu et al, 2015) การประยุกต์ใช้ เช่น ประจุแบตเตอรี่ให้กับ

รถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก และงานทางการแพทย์ เป็นต้น โดยมีแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีในปัจจุบันด้านหนึ่งคือ ใช้ขดส่งกำลังงาน 1 ขด ส่งกำลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กหลายขนาด ที่มีพิกัดกำลังงาน และเงื่อนไขการประจุแบตเตอรี่ต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นความท้าทายอย่างหนึ่งในการออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายให้สามารถตอบสนองความต้องการในสภาวะดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบการเหนี่ยวนำในสภาวะรีโซแนนซ์ มีหลายด้าน เช่น การพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย (J. J. Casanova et al, 2009) โมเดลทางคณิตศาสตร์ของสัมประสิทธิ์การคล่องสนามแม่เหล็ก (T. Imura et al, 2011) การวิเคราะห์สภาวะโหลดที่เหมาะสม (M. Fu et al, 2015) การพัฒนาประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย (A. Rajagopalan et al, 2014) งานวิจัยที่พัฒนาวงจรสำหรับควบคุมกำลังงานด้านขาออก (W. Zhong et al, 2014) เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่าวิธีการที่ใช้งานวิจัยเหล่านี้ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้กับการ

ส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายกรณีใช้ขดส่งกำลังงาน 1 ขด และขดรับกำลังงานหลายขด บางงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่ การอธิบายปรากฏการณ์โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ แบบคัปเปิลโหมด(Coupled mode theory) (A. Kurs et al, 2011) และการวิเคราะห์วงจรสมมูล ไฟฟ้า (B. L. Cannon et al, 2009), (W. Zhong et al, 2014) การวิเคราะห์วงจรสมมูลมีความแตกต่างกันด้านจำนวนวงจรที่ใช้ซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนขด ตัวนำและพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณา โดยที่การ เลือกใช้วิธีการใดขึ้นอยู่กับพื้นฐานความรู้ ความเข้าใจ ของผู้ศึกษาเอง

การออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ ขดส่งกำลังงาน 1 ขด ส่งกำลังงานให้ขดรับกำลังงาน หลายขดจำเป็นต้องเข้าใจลักษณะทางไฟฟ้า แม่เหล็ก และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังงาน งานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้มุ่งเน้นแสดงให้เห็นถึงข้อมูลที่ จำเป็นดังกล่าว งานวิจัยในครั้งนี้นี้จึงเป็น การวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การส่ง กำลังไฟฟ้าไร้สายในกรณีใช้ส่งกำลังงาน 1 ขด และ ขดรับกำลังงานหลายขด ผลการวิจัยที่ได้รับสามารถ นำไปพัฒนา ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้ ต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขด รับหลายขด และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อ สมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ได้แก่ ความ ต้านทานของโหลด แรงดันไฟฟ้าขาเข้า ความ เหนียวแน่นร่วม มีค่าขึ้นอยู่กับระยะห่าง การจัดวาง ตัวนำ แบ่งออกเป็น ความเหนียวแน่นร่วมระหว่างขด ส่ง และขดรับกำลังงาน ความเหนียวแน่นร่วมระหว่าง ขดรับกำลังงาน ความถี่รีโซแนนซ์

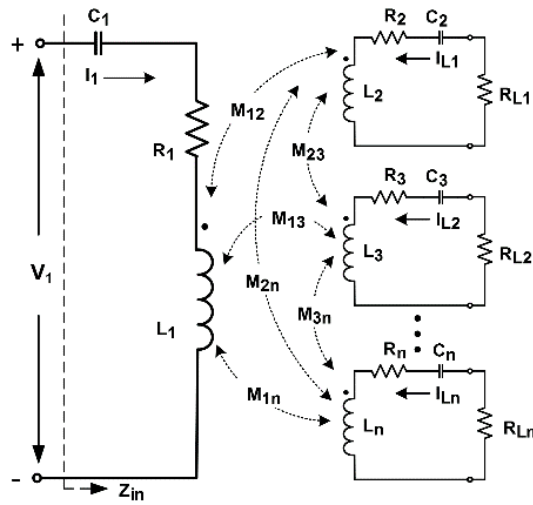
แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. วงจรในสภาวะรีโซแนนซ์ สามารถส่ง กำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเนื่องจากในสภาวะรีโซแนนซ์ค่า X_L และ X_C หักล้างกันทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจร เหลือเฉพาะความต้านทาน ความถี่รีโซแนนซ์หาได้ จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

2. ลักษณะการส่งกำลังงานเป็นไปตามหลักการ ของทฤษฎีการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่ว่า การส่ง กำลังไฟฟ้ามียุคสูงสุด เมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย เท่ากับอิมพีแดนซ์ของโหลด

3. การวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของวงจร ส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถใช้วงจรสมมูลของหม้อ แปลงแกนอากาศต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ใช้โดยมี การวิเคราะห์สมการทางไฟฟ้าดังนี้



ภาพที่ 1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับ n ขด

ใช้สมการแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) หาสมการแรงดันในแต่ละวงจรในภาพที่ 1 จากนั้นจึงจัดสมการความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน อิมพีแดนซ์ และกระแสในแต่ละวงจร ตามสมการที่ (2) ดังนี้

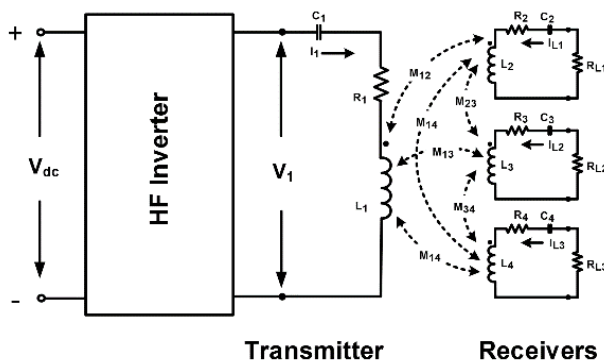
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} & j\omega M_{14} & \cdots & j\omega M_{1n} \\ j\omega M_{12} & Z_2 & j\omega M_{23} & j\omega M_{24} & \cdots & j\omega M_{2n} \\ j\omega M_{13} & j\omega M_{23} & Z_3 & j\omega M_{34} & \cdots & j\omega M_{3n} \\ j\omega M_{14} & j\omega M_{24} & j\omega M_{34} & Z_4 & \cdots & j\omega M_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j\omega M_{1n} & j\omega M_{2n} & j\omega M_{3n} & j\omega M_{4n} & \cdots & Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

สมการที่ (2) ใช้หากระแสในแต่ละวงจร สำหรับนำไปหากำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ ได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out1} + P_{out2} \cdots + P_{outn}}{P_{in}} \\ &= \frac{I_{L1}^2 R_{L1} + I_{L2}^2 R_{L2} + \cdots + I_{Ln}^2 R_{Ln}}{V_1 I_1} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (I_{Li}^2 R_{Li})}{V_1 I_1} \end{aligned} \quad (3)$$

วิธีการวิจัย

1. ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายองค์ประกอบของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบแสดงดังภาพที่ 2

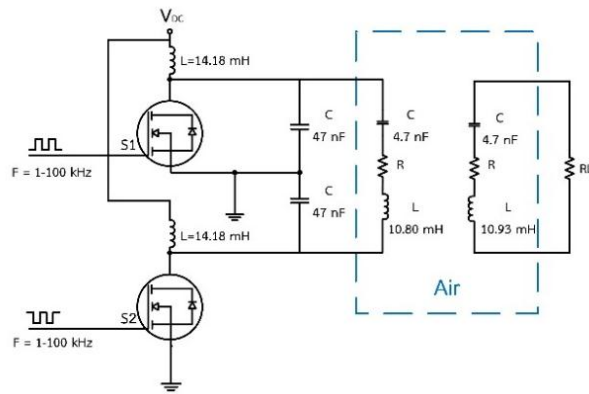


ภาพที่ 2 องค์ประกอบของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

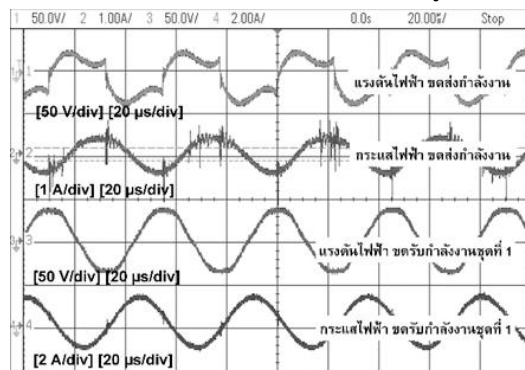
ส่วนประกอบหลักประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์ขดตัวนำด้านส่ง (Transmitter) และด้านรับ (Receivers) ทำมาจากขดลวดทองแดงต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์พันบนแกนอากาศ

2. อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น พัฒนามาจากวงจร

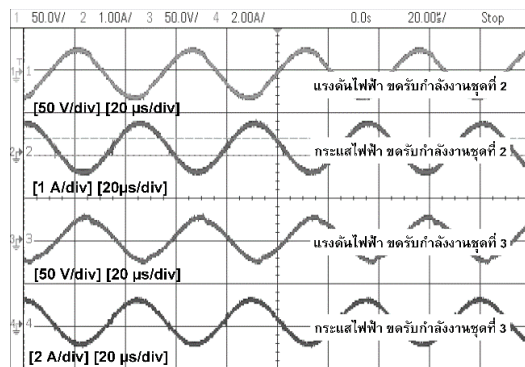
อินเวอร์เตอร์แบบพุก-พูล ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ใช้สำหรับจ่ายกำลังงานให้กับขดส่งกำลังงาน ความถี่ใช้งานในระดับกิโลเฮิร์ต แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุก-พูล ดังภาพที่ 3 มีลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะจ่ายโหลด แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง



ก) สัญญาณแรงดันและกระแส ด้านขดส่งกำลังงาน



ข) สัญญาณแรงดันและกระแสด้านขดรับกำลังงาน

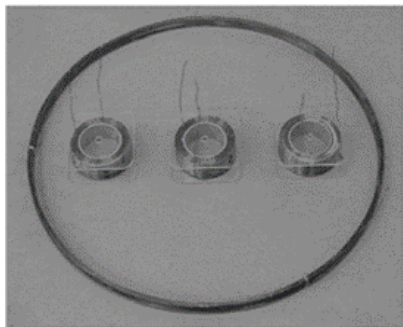
ภาพที่ 4 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแส ด้านขดส่งและขดรับกำลังงาน

3. พารามิเตอร์ของการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายขดตัวนำด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน ทำมาจากขดลวดทองแดงเบอร์ 18 AWG พันบนแกนอากาศ ได้ออกแบบให้ขดส่งมีขนาดใหญ่กว่าขดรับกำลังงาน เพื่อให้กระจายสนามแม่เหล็กได้เพียงพอกับขดรับกำลังหลายชุด พารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 ลักษณะขดตัวนำและการจัดวางแสดงดังรูปที่ 5 ค่า

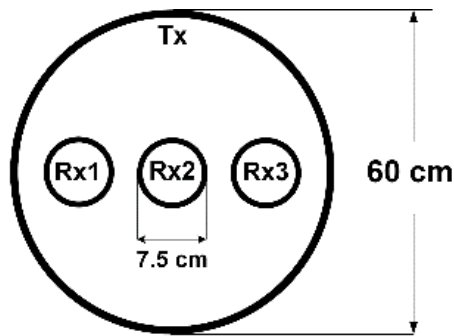
ความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุทำการวัดใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์รุ่น GW-INSTEKLCR-915 กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น Fluke 179 True RMS เปรียบเทียบกับการคำนวณ ส่วนคาปาซิแตนซ์คำนวณให้สัมพันธ์กับความถี่รีโซแนนซ์และความเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)	ขนาดขดลวด (AWG)	จำนวนรอบ (N)	ความเหนี่ยวนำ (mH)	ความต้านทาน (Ω)	ความถี่รีโซแนนซ์ (kHz)	คาปาซิเตอร์ (nF)
ขดส่งกำลังงาน	60	18	105	13.41	2.81	22.20	3.64
ขดส่งกำลังงาน	45	18	105	10.18	2.16	22.20	4.75
ขดส่งกำลังงาน	30	18	105	6.3	1.46	22.20	8.85
ขดรับชุดที่ 1	7.5	18	403	12.21	2.10	22.20	4.7
ขดรับชุดที่ 2	7.5	18	403	12.20	2.08	22.20	4.7
ขดรับชุดที่ 3	7.5	18	403	12.20	2.07	22.20	4.7

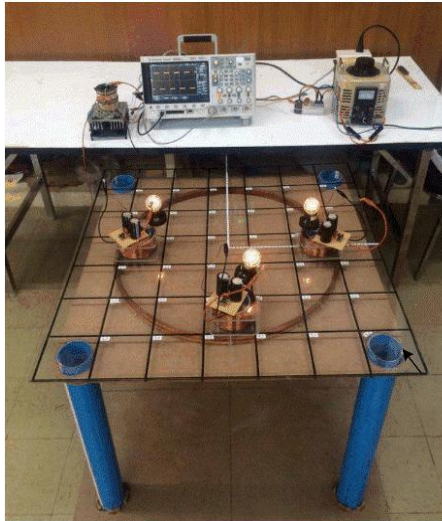


ก) ขดส่งและขดรับกำลังงาน

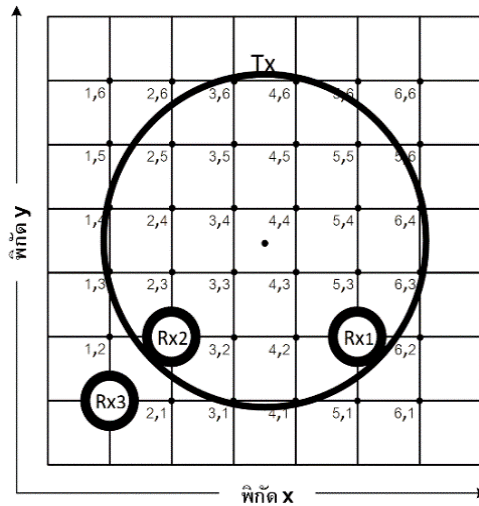


ข) ภาพด้านบน

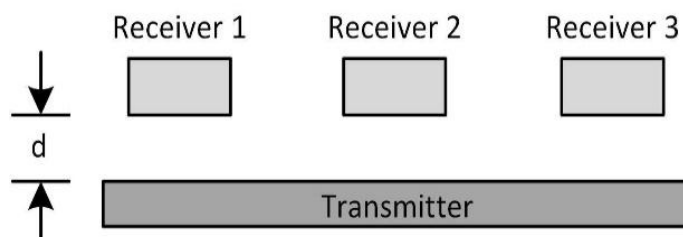
ภาพที่ 5 ลักษณะขดส่ง ขดรับกำลังงาน และการจัดวางตัวนำ



ก) การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



ข) พิกัดการจัดวางขดส่งและขดรับกำลังงาน



ค) ภาพด้านข้าง

ภาพที่ 6 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับกำลังงานหลายขด

4. ออกแบบการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจากการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้าพบว่าพารามิเตอร์ที่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงและมีผลต่อ

กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ ก) ความต้านทานของโหลด ข) แรงดันไฟฟ้าขาเข้า ค) ความเหนี่ยวนำร่วม มีค่า

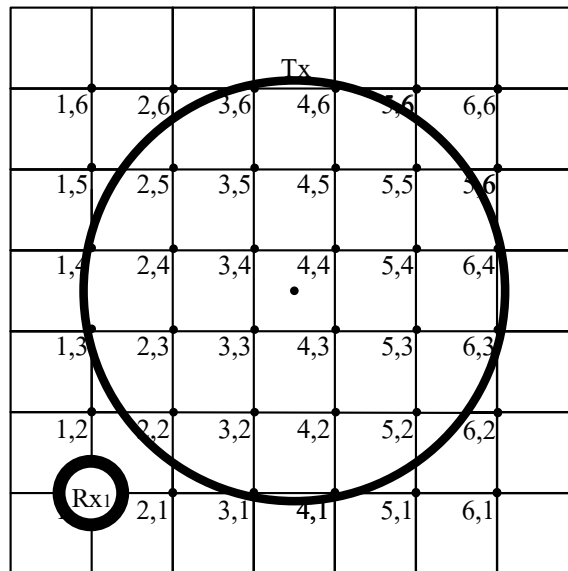
ขึ้นอยู่กับระยะห่าง การจัดวางตัวนำ แบ่งออกเป็น ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดรับกำลังงาน ง) ความถี่รีโซแนนซ์ จึงได้ออกแบบ การทดลองเพื่อ วิเคราะห์ผลของรามิเตอร์ดังกล่าวลักษณะการ ทดลองและตำแหน่งพิกัดการจัดวางขดตัวนำแสดงดัง ภาพที่ 6

ในแต่ละการทดลองใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้า 40 โวลต์ วงที่ทดลองการทดลอง ความถี่รีโซแนนซ์ 22.2 กิโลเฮิร์ตซ์ จ่ายกำลังงานให้กับโหลดตลอดได้

ขนาด 60 วัตต์ ขดส่งและขดรับกำลังงานวางห่างกัน 1 เซนติเมตร

4.1 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดตำแหน่ง ต่างๆ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง

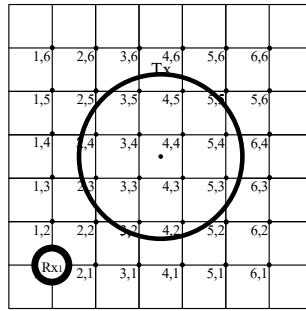
การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดตำแหน่ง ต่างๆ มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาตำแหน่งที่จะให้ กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพได้สูงสุด โดยขด รับกำลังงาน 1 ชุดเลื่อนตำแหน่งตั้งแต่ตำแหน่ง 1,1 จนถึงตำแหน่ง 6,6 ตามพิกัด ทำการวัดค่ากระแส และแรงดันของวงจรใช้คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าขา ออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน



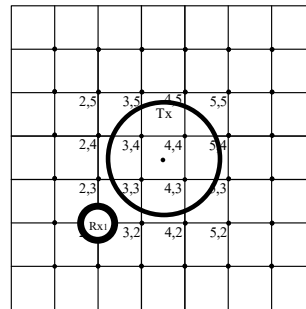
ภาพที่ 7 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามตำแหน่งต่างๆ

การเปลี่ยนขนาดขดส่งกำลังงาน การทดลองนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะสนามแม่เหล็กของ ขดส่งกำลัง โดยใช้ขดส่งกำลังงาน 2 ขนาด แบ่งการ ทดลองเป็น 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ขดส่งกำลังงานขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร และครั้งที่ 2 ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ทำการทดลอง เหมือนกับการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดตำแหน่ง ต่างๆ



ก) ขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร

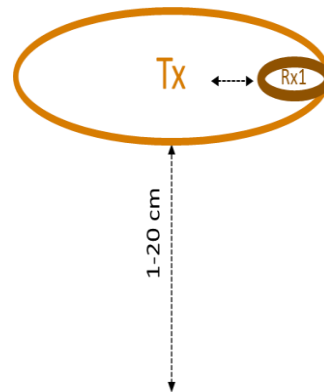
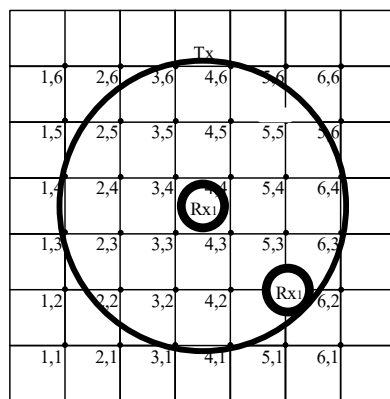


ข) ขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร

ภาพที่ 8 การเปลี่ยนขนาดขดส่งกำลังงาน

4.2 การเลื่อนระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน 2) เพื่อศึกษาผลของความเหนี่ยวนำร่วม (M_{12}) ใช้ขดรับ

กำลังงาน 1 ขด เลื่อนระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงานออกจากกันตั้งแต่ 0 – 20 เซนติเมตร คงตำแหน่งขดรับไว้ตำแหน่ง 5,2 ตลอดการทดลอง บันทึกค่าแรงดันและกระแสในวงจรเพื่อใช้สำหรับคำนวณหากำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ



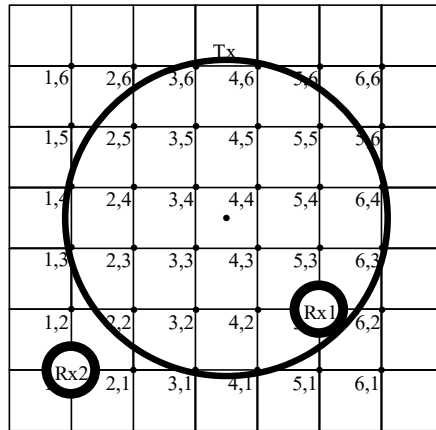
ภาพที่ 9 การเลื่อนระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน

4.3 การเพิ่มขดรับกำลังงาน ในการเพิ่มขดรับกำลังงานแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงาน 2 ขด การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดรับกำลังงาน

M_{13}, M_{23} คงตำแหน่งขดรับกำลังงานชุดที่ 1 ไว้ตำแหน่ง 5,2 ตลอดการทดลอง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดพิจารณาจากการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดตำแหน่งต่างๆ เลื่อนขดรับกำลังงานชุดที่ 2 ที่ละตำแหน่งตั้งแต่ตำแหน่ง 1,1

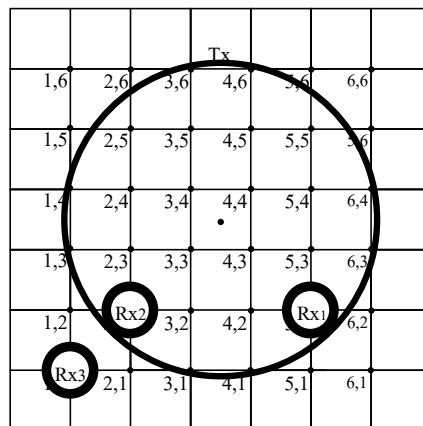
จนถึงตำแหน่ง 6,6 ยกเว้นตำแหน่ง 5,2 ที่ขดรับกำลังงานชุดที่ 1 คงตำแหน่งอยู่ไม่สามารถเก็บค่าได้ วัดค่ากระแสและแรงดันของวงจรเพื่อใช้คำนวณหากำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน



ภาพที่ 10 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงาน 2 ชุด

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงานชุด การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดรับกำลังงาน M_{14}, M_{24}, M_{34} คงตำแหน่งขดรับกำลังงานชุดที่ 1 ไว้ตำแหน่ง 5,2 ตลอดการทดลอง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดพิจารณาจากผลการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดตำแหน่งต่างๆ และคงตำแหน่งขดรับกำลังงานชุดที่ 2 ไว้ตำแหน่ง 2,2

ตลอดการทดลอง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดพิจารณาจากผลการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงาน 2 ชุด เลื่อนขดรับกำลังงานชุดที่ 3 ที่ละตำแหน่งตั้งแต่ตำแหน่ง 1,1 จนถึงตำแหน่ง 6,6 ยกเว้นตำแหน่ง 5,2 และ 2,2 ที่ขดรับกำลังงานชุดที่ 1 และ 2 คงตำแหน่งอยู่ วัดค่ากระแสและแรงดันของวงจรเพื่อใช้คำนวณหากำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน



ภาพที่ 11 การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับ กำลังงาน 3 ชุด

4.4 การเปลี่ยนโหลด การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโหลดที่มีต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายใช้ขดรับกำลังงาน 1 ชุด จ่ายกำลังงานให้กับโหลดขนาดต่างๆ ดังนี้ (ขนาด 5 วัตต์, ขนาด 25 วัตต์, ขนาด 40 วัตต์, ขนาด 60 วัตต์, ขนาด 65 วัตต์, ขนาด 70 วัตต์, ขนาด 85 วัตต์, ขนาด 100 วัตต์, ขนาด 105 วัตต์, ขนาด 125 วัตต์, ขนาด 140 วัตต์, ขนาด 160 วัตต์, และขนาด 200 วัตต์) คงตำแหน่งขดรับกำลังงานไว้ที่ตำแหน่งพิกัด 5,2 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด พิจารณาได้จากการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดตำแหน่งต่างๆ วัดค่ากระแสและแรงดันของวงจรเพื่อใช้คำนวณหากำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน

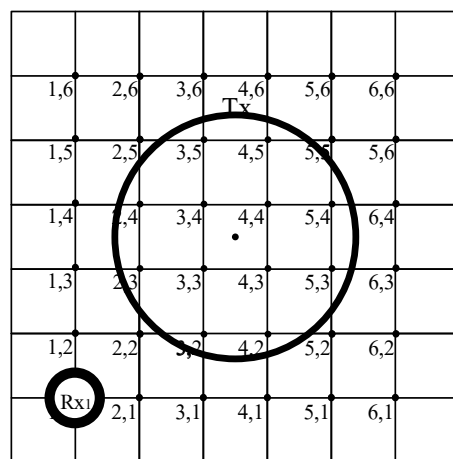
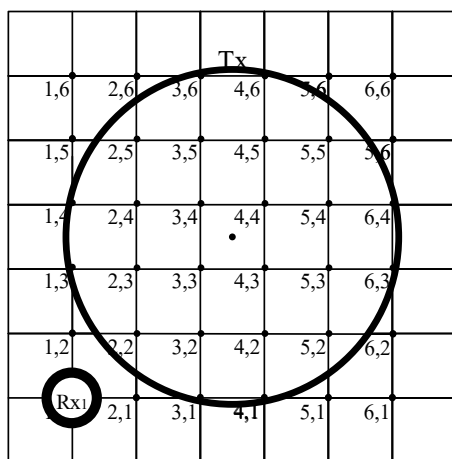
4.5 การเปลี่ยนค่าความถี่โซแนนซ์ในขดรับ กำลังงานการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของขดรับกำลังงานที่ความถี่โซแนนซ์ต่างกันที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย การทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ครั้ง

ครั้งที่ 1 ใช้ขดรับกำลังงานที่มีความถี่โซแนนซ์ 15.70 กิโลเฮิร์ตซ์ (น้อยกว่าความถี่

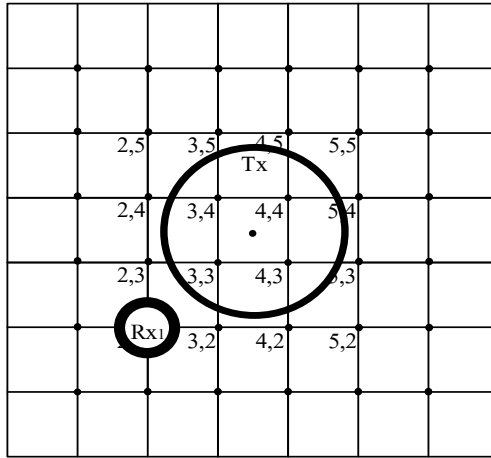
โซแนนซ์ของระบบ) ครั้งที่ 2 จะใช้ขดรับกำลังงานที่มีความถี่โซแนนซ์ 22.20 กิโลเฮิร์ตซ์ (เป็นความถี่โซแนนซ์ของระบบ) ครั้งที่ 3 จะใช้ขดรับกำลังงานที่มีความถี่โซแนนซ์ 31.40 กิโลเฮิร์ตซ์ (มากกว่าความถี่โซแนนซ์ของระบบ) การเปลี่ยนขดรับกำลังงานให้มีความถี่โซแนนซ์ต่างกันนั้น ทำได้ด้วยการเปลี่ยนค่าความจุของคาปาซิเตอร์ โดยที่ใช้ขดรับกำลังงานชุดเดิมชุดเดียว

จ่ายความถี่ให้ระบบตั้งแต่ 13.00 - 39.00 กิโลเฮิร์ตซ์ คงตำแหน่งขดรับกำลังงานไว้ที่ตำแหน่ง 5,2 ตลอดการทดลอง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด พิจารณาได้จากการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดตำแหน่งต่างๆ วัดค่ากระแสและแรงดันของวงจรเพื่อใช้คำนวณหากำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน

4.6 การพิสูจน์ความเหนี่ยวนำร่วม การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) กับตำแหน่งในแต่ละจุด ใช้ขดส่งกำลังงาน 3 ขนาด คือ ขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร 45 เซนติเมตร และ 30 เซนติเมตร



ก) ขดส่งขนาด 60 เซนติเมตร ข) ขดส่งขนาด 45 เซนติเมตร



ค) ขดส่งขนาด 40 เซนติเมตร

ภาพที่ 12 การหาค่าความเหนี่ยวนำร่วม

ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง จะทดลองแบบเดียวกันใช้ขดรับกำลังงาน 1 ชุด จ่ายกำลังงานแบบไม่ต่อโหลดเลื่อนขดรับกำลังงานทีละตำแหน่งตั้งแต่ตำแหน่ง 1,1 จนถึงตำแหน่ง 6,6 วัดค่าแรงดันกระแสสลับคร่อมขดส่งกำลังงาน และวัดแรงดันกระแสสลับคร่อมขดรับกำลังงานโดยไม่ต่อโหลดใช้ค่านวณเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำร่วม

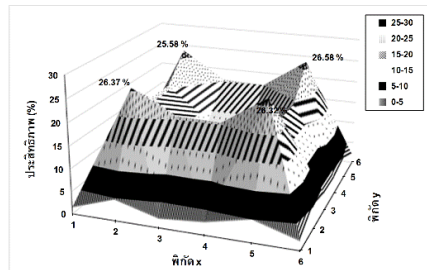
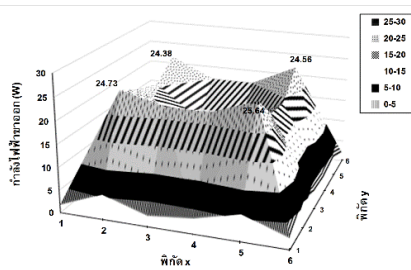
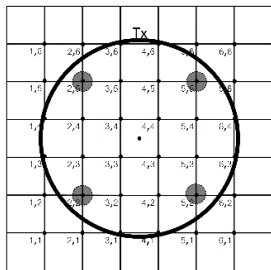
ผลการวิจัย

1. ผลการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดต่างๆ มีผลการทดลองแยกย่อยอีก 2 ผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามตำแหน่งพิกัด พบว่าลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและ

ประสิทธิภาพดังภาพที่ 13 พบว่าตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพมีค่ามาก คือตำแหน่งที่ 2,2 2,5 5,2 และ 5,5 และมีค่าเบาบางในบริเวณกลางขดส่ง

1.2 การทดลองเปลี่ยนขนาดขดส่ง เพื่อศึกษา ลักษณะสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 14 และ 15 เห็นได้ว่าเมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดส่งกำลังงานลงทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ บริเวณกลางขดส่งเพิ่มมากขึ้น โดยตำแหน่งที่ให้กำลังและประสิทธิภาพสูง อยู่บริเวณใกล้ขดส่งกำลังงานด้านใน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมาก พิจารณาได้จากภาพที่ 13 ก) 14 ก) และ 15 ก)



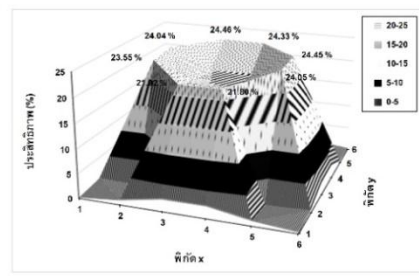
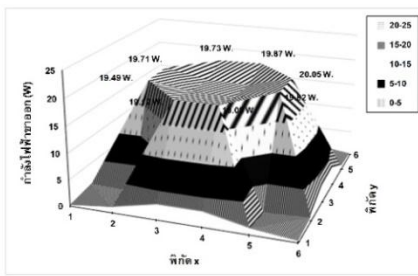
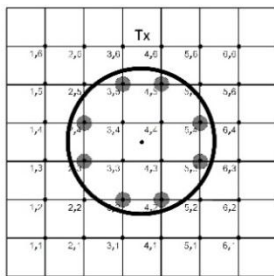
ก) ตำแหน่งพิกัดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ข) กำลังไฟฟ้าขาออก

ค) ประสิทธิภาพ

ภาพที่ 13 พิกัดตำแหน่ง กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ

เมื่อใช้ขดส่งกำลังงานเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร



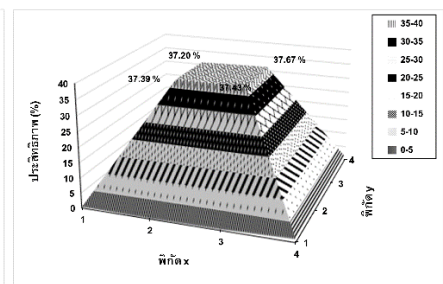
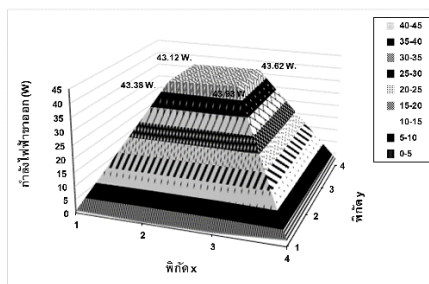
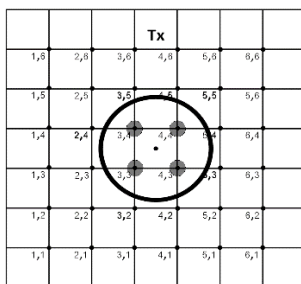
ก) ตำแหน่งพิกัดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ข) กำลังไฟฟ้าขาออก

ค) ประสิทธิภาพ

ภาพที่ 14 พิกัดตำแหน่ง กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ

เมื่อใช้ขดส่งกำลังงานเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร



ก) ตำแหน่งพิกัดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ข) กำลังไฟฟ้าขาออก

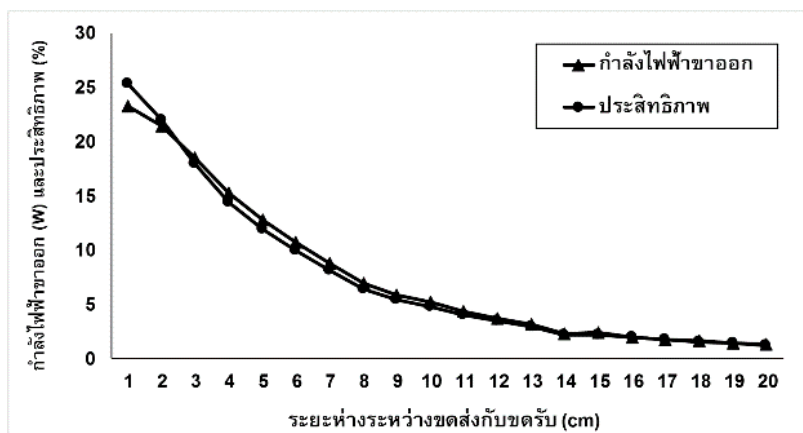
ค) ประสิทธิภาพ

ภาพที่ 15 พิกัดตำแหน่ง กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ

เมื่อใช้ขดส่งกำลังงานเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร

2. ผลการเคลื่อนระยะระหว่างขดส่งและขดรับ กำลังงาน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง กำลังไฟฟ้าขาออก ประสิทธิภาพ และความ

เหนี่ยวนำร่วมได้ลักษณะกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกและ ประสิทธิภาพดังภาพที่ 16

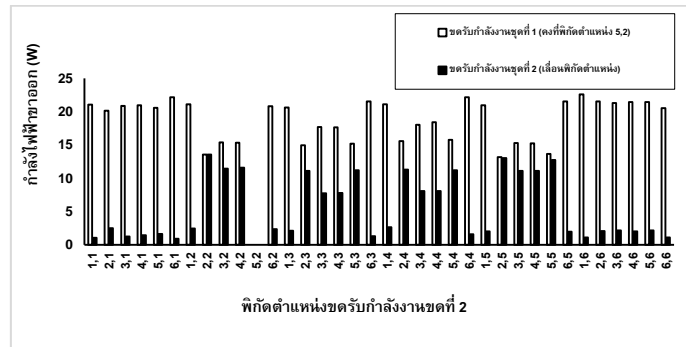


ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างของขดตัวนำกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ

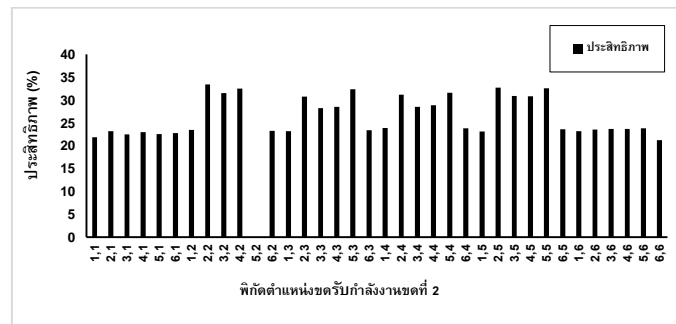
เมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าขาออกลดลงเนื่องจากความเหนี่ยวนำร่วม (M_{12}) ลดลงตามระยะห่าง

3. ผลการเพิ่มขดรับกำลังงาน มีผลการทดลองแยกย่อยอีก 2 ผลการทดลอง

3.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงาน 2 ชุด



ภาพที่ 17 กำลังไฟฟ้าขาออกขดรับที่ 2 ที่ตำแหน่งพิกัดต่างกัน ขดรับที่ 1 คงที่ตำแหน่ง 5,2



ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพ เมื่อใช้จำนวนขดรับกำลังงาน 2 ชุด

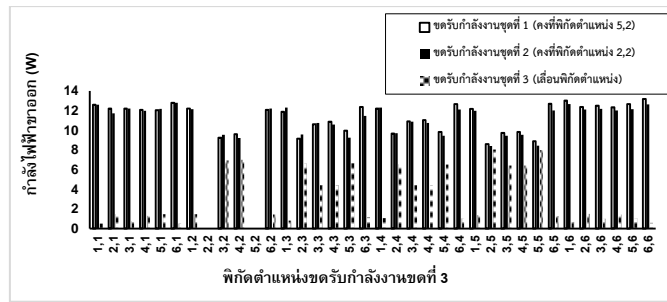
ผลการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงาน 2 ชุด พบว่ามีตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพได้ดีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่ง 2,2 2,5 และ 5,5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดต่างๆ รูปที่ 12

เมื่อเพิ่มขดรับกำลังงานเป็น 2 ชุด จะทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน จากการใช้ขดรับกำลังงาน 1 ชุด พิกัดตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกได้ดีที่สุดมีกำลังงานไฟฟ้าอยู่ที่

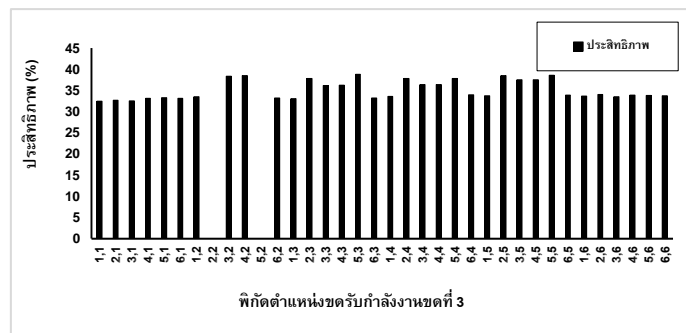
25.64 วัตต์ เมื่อเพิ่มขดรับกำลังงานเป็น 2 ชุด ในตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกได้ดีเหมือนกันขดรับทั้ง 2 ชุด มีกำลังไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยอยู่ที่ 13 วัตต์ ต่อชุด

ความคล่องสนามแม่เหล็ก ระหว่างขดรับกำลังงานชุดที่ 1 กับขดรับกำลังงานชุดที่ 2 นั้นไม่มีผลต่อกัน

3.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงาน 3 ชุด



ภาพที่ 19 กำลังไฟฟ้าขาออกขดรับที่ 3 เมื่อขดรับที่ 1 และ 2 คองที่ ตำแหน่ง 5,2 และ 2,2



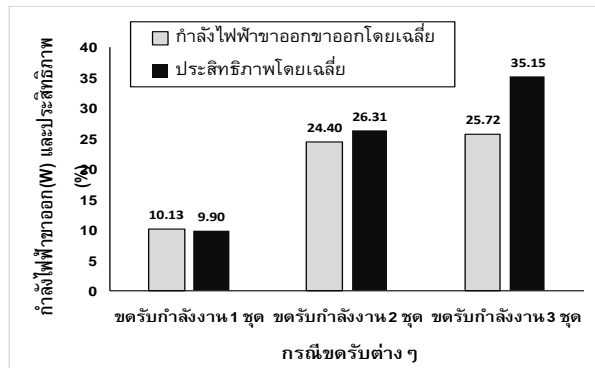
ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพ เมื่อใช้จำนวนขดรับกำลังงาน 3 ชุด

ผลการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดรับกำลังงาน 3 ชุด พบว่ามีตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพได้ดีทั้งหมด 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่ง 2,5 และ 5,5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดต่างๆ ภาพที่ 13 เมื่อเพิ่มขดรับกำลังงานเป็น 3 ชุด ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกของระบบถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน จากใช้ขดรับกำลังงาน 1 ชุด พิกัดตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกได้ดีที่สุดมีกำลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 25.64 วัตต์ เมื่อเพิ่มขดรับกำลังงานเป็น 3 ชุด ในตำแหน่งที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกได้ดีเหมือนกันขดรับ

ทั้ง 3 ชุด นั้นมีกำลังไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยอยู่ที่ 8 วัตต์ต่อชุด

ความเหนี่ยวนำร่วม ระหว่างขดรับกำลังงานชุดที่ 1, 2 กับขดรับชุดที่ 3 ไม่มีผลต่อกัน

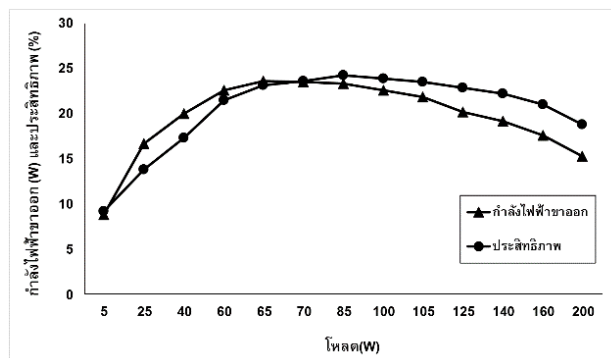
จากการทดลอง ขดรับกำลังงาน 1 ชุด ขดรับกำลังงาน 2 ชุดและ ขดรับกำลังงาน 3 ชุด ที่ผ่านมาเมื่อนำเปรียบเทียบกัน พบว่าจำนวนขดรับกำลังงานที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกโดยเฉลี่ยและประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น แสดงตามภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย

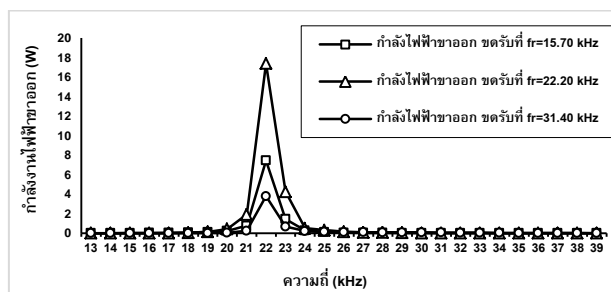
4. ผลการเปลี่ยนโหลด พบว่าวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลด 65 วัตต์ ซึ่งพิจารณาได้ว่าวงจรส่งกำลังไฟฟ้า

ไร้สายสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดที่โหลดที่เหมาะสมค่าหนึ่ง พิจารณาได้ในภาพที่ 22

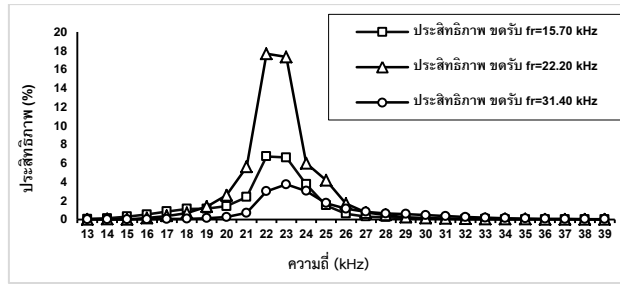


ภาพที่ 22 กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพที่โหลดต่างกัน

5. ผลการเปลี่ยนค่าความถี่เรโซแนนซ์ของขดรับกำลังงานได้ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงานดังภาพที่ 23 และ 24 ดังนี้



ภาพที่ 23 กำลังไฟฟ้าขาออกที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่างกัน

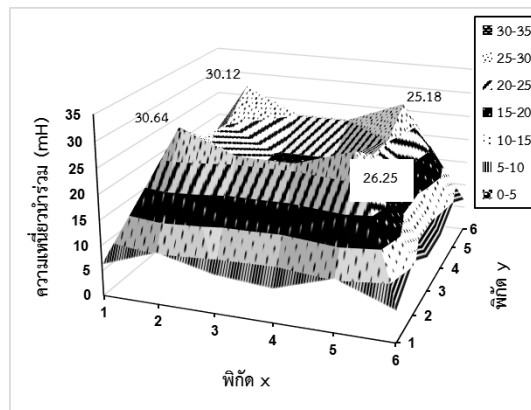


ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่างกัน

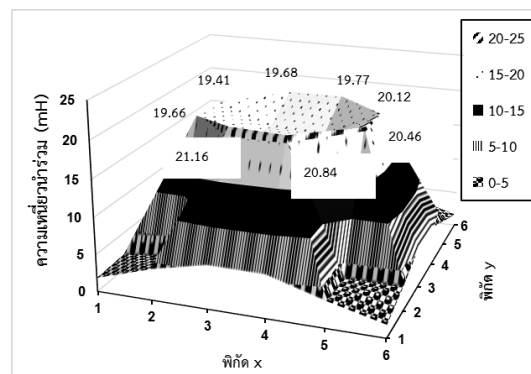
พิจารณาภาพที่ 17 และ 18 เห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดใน ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์ของขดส่งกำลังงานที่

22.20 กิโลเฮิร์ตซ์ นั้นแสดงว่าการส่งกำลังงานได้ดี เกิดเมื่อใช้ความถี่เรโซแนนซ์ขดส่งและขดรับต้องมีความถี่นั้นด้วย

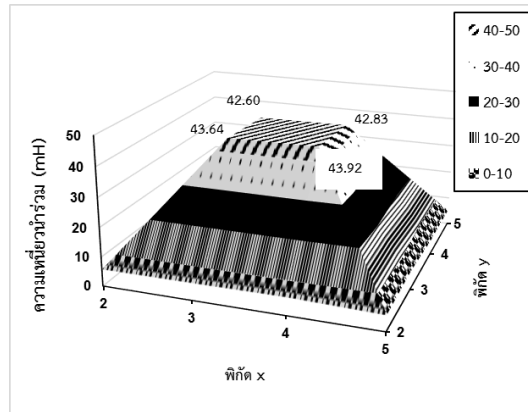
6. ผลความเหนี่ยวนำร่วม แบ่งผลการทดลองเป็น 3 ครั้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 25 ผลความเหนี่ยวนำร่วมขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร



ภาพที่ 26 ผลความเหนี่ยวนำร่วมขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร



ภาพที่ 27 ผลความเหนี่ยวนำร่วมขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร

ผลความเหนี่ยวนำร่วม พบว่าความเหนี่ยวนำร่วมมีผลสอดคล้องกับกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ หมายความว่าตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำร่วมสูง ตำแหน่งนั้นจะมีกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพดี ตามไปด้วย

พิจารณาได้ จากภาพที่ 13 ข) กำลังไฟฟ้าขาออกและ ค) ประสิทธิภาพ ของขดส่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร เทียบกับภาพที่ 25 ผลความเหนี่ยวนำร่วมขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร พบว่ากราฟมีลักษณะที่คล้ายกัน และในผลความเหนี่ยวนำร่วมขดส่งกำลังงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 เซนติเมตรและ 30 เซนติเมตร ก็เช่นเดียว เมื่อเทียบกับภาพที่ 14 ข), ค) และภาพที่ 15 ข), ค) ตามลำดับ

อภิปรายผลการวิจัย

1. การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายตามพิกัดต่างๆ ขดส่งที่มีขนาดใหญ่ (60เซนติเมตร) สนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นสูงที่บริเวณรอบขดด้านใน เมื่อลดขนาดของส่งให้ขนาดเล็กลง (45เซนติเมตรลงมา) สนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นสูงที่กลางขดส่ง

ตามทฤษฎีสสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดวงกลม พบว่าจำนวนรอบของลวดตัวนำและ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ มีผลต่อค่าความหนาแน่นนามแม่เหล็ก

2. การเลื่อนระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) และระยะห่างของขดส่งและขดรับ เมื่อขดส่งและขดรับมีระยะที่ใกล้กัน ความเหนี่ยวนำร่วมของทั้ง 2 ขดจะทำให้ดีกำลังงานไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพจึงมีมาก ในทางกลับกัน หากขดส่งและขดรับมีระยะที่ห่างกันความเหนี่ยวนำร่วมของทั้ง 2 ขดก็ทำไม่ได้ดีกำลังงานไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพจึงมีน้อย

3. การเพิ่มขดรับกำลังงาน ขดรับกำลังงาน 2 และ 3 ชุด ผลการใช้จำนวนขดรับกำลังงานเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่ออิมพีแดนซ์ของวงจรเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสขาเข้าลดลงซึ่งหมายถึงกำลังไฟฟ้าขาเข้าลดลง และทำให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้น โดยที่ กำลังไฟฟ้าขาออกโดยเฉลี่ยมีอัตราเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

ในการทดลองนี้พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์คือ M_{13} , M_{23} , M_{14} , M_{24} , M_{34} ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดรับกับขดรับ ไม่มีผลต่อกันนั่นคือค่า M_{23} , M_{24} , M_{34} หรืออธิบายได้อีกอย่างว่า ขดรับกำลังงานจะรับกำลังไฟฟ้าได้จากขดส่งเท่านั้น

ระหว่างขดรับกับขดรับไม่สามารถเสริมหรือเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าให้กันได้

4. การเปลี่ยนโพลด์ โพลด์มีต่อการส่งกำลังไฟฟ้า พบว่า โพลด์มีผลต่ออิมพีแดนซ์ของวงจรส่งผลต่อการส่งกำลัง เนื่องจากวงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ดีที่สุดเมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบสมดุลกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ซึ่งหมายความว่าโพลด์มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยนั่นเอง อย่างไรก็ตาม ลักษณะสภาวะโพลด์ที่เหมาะสมยังไม่ได้ศึกษาเชิงลึกในการศึกษานี้

5. การทดลองเปลี่ยนค่าความถี่รีโซแนนซ์ของขดรับกำลังงาน เพื่อวิเคราะห์ผลของความถี่รีโซแนนซ์ พบว่าวงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ดี เมื่อความถี่รีโซแนนซ์ของขดรับมีค่าเข้าใกล้ความถี่รีโซแนนซ์ของขดส่ง เนื่องจากสนามแม่เหล็กในสภาวะรีโซแนนซ์ของขดส่งมีค่ามาก

6. การพิสูจน์ความเหนี่ยวนำร่วม พบว่าความเหนี่ยวนำร่วมมีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพโดยตรง ซึ่งเป็นไปตามสมการการวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลของการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับหลายชุด

สรุป

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับกำลังหลายชุด ครั้งนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับหลายชุดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและความถี่รีโซแนนซ์วิเคราะห์ห้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าเพื่อหาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ จากนั้นจึงทำการออกแบบและทดลองตามการทดลองทั้งหมด

ผลการวิจัยพบว่า 1) สนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นมากที่ระยะใกล้ขดตัวนำด้านในและเบาบางบริเวณกลางขด 2) การลดขนาดขดส่งกำลังงานสามารถเพิ่มความหนาแน่นสนามแม่เหล็กบริเวณกลางขด 3) กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพลดลงตามระยะห่างของขดตัวนำที่เพิ่มขึ้น

4) ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามจำนวนขดรับกำลังงานโดยขดรับกำลังงาน 1 ขด 2 ขด และ 3 ขด ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 9.90% 26.31% และ 35.15 % ตามลำดับ 5) วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโพลด์มีค่าที่เหมาะสมโดยใช้โพลด์ขนาด 65 วัตต์ 6) วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ดีเมื่อความถี่รีโซแนนซ์ขดรับมีค่าเข้าใกล้ความถี่รีโซแนนซ์ของขดส่งกำลังงาน คือค่าความถี่ที่ 22.20 กิโลเฮิรตซ์ 7) ค่าความเหนี่ยวนำผลโดยตรงต่อการส่งกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพผลการวิจัยการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดรับกำลังงานหลายชุดสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 25.72 วัตต์ มีกำลังไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยอยู่ที่ 8 วัตต์ต่อชุด ที่ระยะทาง 1 เซนติเมตร

พิจารณาด้านความคุ้มค่าของเทคโนโลยีเนื่องจากความสูญเสียในระบบมีค่ามาก ดังนั้นการพัฒนาควรพิจารณาประเด็นอื่นประกอบพร้อม เช่น เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ การใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีพลังงานทดแทน ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเสถียรภาพของระบบ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอุดหนุนการวิจัย โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่สังคม (HRS) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ปี 2558

เอกสารอ้างอิง

- A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljacic. (2007). **Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances.** Science 317 (5834), 83-86.
- A. Kurs, R. Moffatt and M. Soljacic. (2011). **Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices.** Appl. Phys. Lett 96 (4), 98-109.
- A. Rajagopalan, A. K. RamRakhyani, D. Schurig and G. Lazzi. (2014). **Improving power transfer efficiency of a short-range telemetry system using compact metamaterials.** IEEE Trans. Microw. Theory Techn 62 (4) : 947-955.
- B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil and S. C. Goldstein. (Jul, 2009). **Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers.** IEEE Trans. Power Electron 24 (7), 1819 – 1825.
- H. Hao, G. A. Covic and J.T. Boys. (2014). **A Parallel Topology for Inductive Power Transfer Power Supplies.** IEEE Trans. Power Electron 29 (3), 1140-1151.
- J. J. Casanova, Z. N. Low and J. Lin. (2009). **Design and optimization of class-E amplifier for a loosely coupled planar wireless power system.** IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs 56 (11), 830-834.
- M. Fu, H. Yin, X. Zhu and C. Ma. (2015). **Analysis and tracking of optimal load in wireless power transfer systems.** IEEE Trans. Power Electron 30 (7), 3952-3963.
- M. Fu, T. Zhang, C. Ma and X. Zhu. (2015). **Efficiency and Optimal Loads Analysis for Multiple-Receiver Wireless Power Transfer Systems.** IEEE Trans. Microw. Theory Techn 63 (3), 801 – 812.
- N. Shinohara. (2011). **Power without wires.** IEEE Microw. Mag 12 (7), S64-S73.
- S.Y.R. Hui, W.Zhong and C.K.Lee. (2014). **A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer.** IEEE Trans. Power Electron 29 (9), 4500-4511.
- T. Imura and Y. Hori. (2011). **Maximizing air gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit and neumann formula.** IEEE Trans. Ind. Electron 58 (10), 4746-4752.
- W. Zhong and S. Y. R. Hui. (2014). **Auxiliary Circuits for Power Flow Control in Multi-frequency Wireless Power Transfer Systems with Multiple Receivers.** IEEE Trans. Power Electron 30 (10), 5902-5910.
- W.C. Brown and E. E. Eves. (1992). **Beamed microwave power transmission and its application to space.** IEEE Trans. Microw. Theory Techn 40 (6), 1239 – 1250.
- W.C. Brown. (1984). **The history of power transmission by radio waves.** IEEE Trans. Microw. Theory Techn 32 (9), 1230-1242.

การทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูงแบบโพลีไทพ์ 22 กิโลโวลต์
ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนด้วยวงล้อทดสอบ
The Testing of Post Type Insulator for 22 kV Deterioration System under
Polluted Conditions by Wheel Test

เอกพันธ์ พงษ์ปัญญาเนตร¹, กิตติพันธ์ น้อยปาปลูก² และ วิเชษฐ ทัพย์ประเสริฐ^{3*}
Aekaphan Phongpunyanat¹, Kittipun Noipapook² and Wichet Thipprasert^{3*}

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Rajamangla University of Technology Lanna Chiang Rai

* Corresponding author e-mail: wichet_thip@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจทำให้จำนวนสถานประกอบการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะสถานประกอบการที่ก่อให้เกิดฝุ่นและแก๊บชายทะเลที่มีมลภาวะหมอกไอเกลือส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนที่มีผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูงแบบโพลีไทพ์ 22 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนด้วยวงล้อทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง การสร้างชุดทดสอบการเสื่อมสภาพภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนจากการจุ่มน้ำเกลือที่ใช้ในการทดสอบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 62730 กำหนดพิกัดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบไว้ที่ 18 กิโลโวลต์ สารละลายที่ใช้ในการทดสอบเป็นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีค่าความนำที่ 3.50 มิลลิซีเมนต์ จากผลการทดสอบพบว่าค่าความเปรอะเปื้อนที่ค่อยๆ สะสมบนผิวลูกถ้วยฉนวนเมื่อเกิดการสะสมมาก กระแสรั่วไหลยิ่งมาก ซึ่งสภาพอากาศมีผลต่อความเปรอะเปื้อนที่เกาะบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนและความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อนจากการเกิดโคโรนาดีสชาร์จเป็นระยะเวลานานส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนและเกิดความเสียหายต่อระบบผลที่ได้จากการทดสอบสามารถประเมินความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาออกแบบฉนวนและสามารถที่จะนำไปใช้ในการเลือกพิจารณาเพื่อเลือกชนิดของลูกถ้วยฉนวนที่เหมาะสมไปใช้งานในบริเวณที่เปรอะเปื้อน

คำสำคัญ: มลภาวะ, โซเดียมคลอไรด์, วงล้อทดสอบ

Abstract

The production growth of a number of enterprises has increased steadily. This increased production has resulted in an increase in dust. Near the ocean salt is deposited on the insulation cups causing them to deteriorate which severely impacts on the electricity transmission systems. This research aims to test the deterioration of insulators on 22 kV. High voltage lines using a wheel testing method to place strain on the insulator over 1,000 hours. The test was based on the standard IEC 62730. Rated Voltage testing solution for 18 kV. Using Sodium Chloride (NaCl). The test result showed that 3.50 mS. of conductivity occurred. Fouling gradually accumulated on the surface of the dielectric insulator consistent with the effect of weather. Electrical and thermal stress on the insulator was caused by a corona discharge. Over a long period of time this resulted in the deterioration of the dielectric insulators and damage to the system. The results of the test can be used to assess the suitability of materials used in the design of insulation, based on the location and type of fouling to ensure the insulation is suitable.

Keywords: Pollution, sodium chloride, wheel test.

บทนำ

ปัจจุบันระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นแบบสายลอยในอากาศโดยใช้สายตัวนำเดินไปตามเสาไฟฟ้าโดยใช้ลูกถ้วยฉนวนเป็นส่วนที่รองรับโดยจะส่งผ่านระบบจำหน่ายแรงสูงขนาด 22 กิโลโวลต์ (สกลวิฒิ ภูผาสุข, 2552) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่เกิดจากลูกถ้วยฉนวนซึ่งลูกถ้วยฉนวนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดของสายส่ง เพราะเป็นส่วนที่รองรับสายส่งที่ขึงในอากาศ ดังนั้นการสะสมของคราบสกปรกที่เกิดจาก ไอเกลือจากทะเลฝุ่นซีเมนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมหรือสิ่งอื่น ๆ ที่มีผลทำให้คุณสมบัติของฉนวนเสื่อมลง ซึ่งในสภาพแห้งสิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้ยังคงสภาพเป็นฉนวนอยู่จึงไม่เกิดการวาวไฟ (Flashover) บนผิวลูกถ้วย แต่ในสภาพเปียกชื้นสิ่งเปราะเปื้อนจะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นตัวนำ ทำให้เกิดการวาวไฟตามบริเวณผิว (Flashover) กลายเป็นการลัดวงจรลงดิน อีกทั้งเกิดกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ในระดับมิลลิแอมป์ และระดับความชื้นของสภาพแวดล้อมและในปี 2554 จากการสำรวจและเก็บข้อมูลลักษณะการชำรุดของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าชนิด Line post type และ Pin post type จำนวน 4 พื้นที่ซึ่งประกอบด้วยพื้นที่จังหวัดสงขลาบริเวณใกล้โรงงานแปรรูปอาหารสัตว์พื้นที่อำเภอหาดใหญ่ บริเวณเขตชุมชนหนาแน่นและมีการจราจรคับคั่งตลอดทั้งวันพื้นที่จังหวัดสมุทรสาครบริเวณที่มีโรงงานอุตสาหกรรมแบบกระจายตัวและพื้นที่อำเภอปรางค์บุรีบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลเพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมและรูปแบบการชำรุดพบว่าลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ชำรุดเป็นชนิด Line post type โดยเป็นการชำรุดในลักษณะที่ใกล้เคียงกันกล่าวคือบริเวณผิวที่ปลายปีกด้านบนของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในแต่ละชั้นมีคราบสกปรกสีขาวขุ่นในลักษณะของการเกิดแถบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากมีสิ่งสกปรกสะสมอยู่ที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเมื่อมีความชื้นหรือฝน

ตกปรอยๆจะทำให้มีกระแสรั่ว (Leakage current) ไหลที่ผิวสูงมากขึ้นแต่เนื่องจากสิ่งสกปรกที่สะสมมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจึงทำให้กระแสรั่วที่ไหลในแต่ละเส้นทางมีปริมาณไม่เท่ากัน (กิตติกร มณีสว่าง, 2554) และกระแสรั่วนี้จะสร้างความร้อนบนเส้นทางการไหลผ่านทำให้เส้นทางการนั้นแห้งเกิดเป็นแถบแห้งแบบถาวรส่งผลทำให้เกิดโคโรนา และเกิดการอาร์คหรือสปาร์คบนแถบแห้งนั้น (กิตติกร มณีสว่าง, 2553) ทำให้กำลังสูญเสียของระบบและส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่าย จากผลกระทบดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิจัยซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การนำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้ามาทำการทดสอบเพื่อที่จะเป็นทางเลือกหรือเป็นแนวทางในการศึกษากรณีที่จะนำลูกถ้วยฉนวนมาใช้ งาน ซึ่งวิธีการศึกษาวิจัยโดยอาศัยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนภายใต้สภาวะการทดสอบด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือเพื่อทำการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลตามผิวฉนวน โดยการทดสอบลูกถ้วยจะอยู่ในภายใต้สภาวะเปราะเปื้อนโดยการจุ่มน้ำเกลือ (NaCl.) ซึ่งสิ่งเปราะเปื้อนที่ทำการละลายน้ำได้จะมีผลต่อการใช้งานของลูกถ้วยฉนวน

เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าในสภาวะสิ่งเปราะเปื้อน การเกิดวาวไฟตามผิว (Flashover) และการกร่อนของผิวฉนวนลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน (Porcelain) แบบ Line-post types. ภายใต้การทดสอบด้วยวงล้อที่จุ่มด้วยน้ำเกลือตามมาตรฐาน IEC 62730

ออกแบบและสร้างชุดทดสอบการเสื่อมอายุด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือตามมาตรฐาน IEC 62730

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

1. ลูกถ้วย

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึดหรือรองรับตัวนำไฟฟ้าที่มีแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าศักย์ดินยึดตัวนำไฟฟ้าให้อยู่ห่างกันอย่างมั่นคงพอที่จะไม่ทำให้แกว่งหรือเคลื่อนไหวเข้า

ใกล้กันจนทำให้เกิดสปาร์คหรือเบรกดาวนและเกิดลัดวงจรระหว่างตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันโดยมีตัวกลางอื่นเป็นฉนวนกันคืออากาศก๊าซหรือฉนวนเหลว

2. ลูกถ้วยแห้ง

ลักษณะคล้ายลูกถ้วยก้านตรงธรรมดาแต่มีคอตันยาวส่วนยอดบนมีปาร์บสายเป็นพอร์ชเลนส่วนฐานล่างมีแท่นโลหะยึดก้านตรงเนื่องจากมีคอตันยาวจึงมีข้อเด่นที่ไม่เกิดการเจาะทะลุการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้งานลูกถ้วยชนิดนี้ในระบบจำหน่าย 33 กิโลโวลต์จะเป็น Type 57-3 และ 57-4 มาตรฐาน

อุตสาหกรรมหมายเลข 1077 ส่วนในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์จะเป็น Type 57-2 มาตรฐานอุตสาหกรรมหมายเลข 1077 (วีราพล อินคต, วสวัตตี้ มณีรัตน์ชยะกูร และอภิสิทธิ์ พุ่งโปร่ง, 2555) สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันใช้ลูกถ้วยฉนวนนี้มากกว่า 80% มีประวัติการใช้งานนานอายุการใช้งานมากกว่า 50 ปีตรวจหาจุดบกพร่องยากเกิดวาบไฟง่ายที่สภาวะเปราะเปื้อน (วีราพล อินคต, วสวัตตี้ มณีรัตน์ชยะกูร และอภิสิทธิ์ พุ่งโปร่ง, 2555) ซึ่งมีรายละเอียดทางเทคนิคในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดทางเทคนิคของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (วีราพล อินคต, วสวัตตี้ มณีรัตน์ชยะกูร และอภิสิทธิ์ พุ่งโปร่ง, 2555)

รายละเอียด	Line Post
	57-2
Leakage distance (mm)	559
Dry arcing distance (mm)	241
Low-frequency dry flashover, kV	110
Low-frequency wet flashover, kV	85
Critical- impulse flashover, positive, kV	180
Critical- impulse flashover negative, kV	205

ลูกถ้วยพอร์ชเลนที่ติดตั้งใช้งานในบริเวณมลภาวะ จะมีโอกาสเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือได้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนจะเกิดได้ยากขึ้นถ้าลูกถ้วยฉนวนมีความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวสูงขึ้น อาจจะทำให้ได้โดยการเพิ่มระยะรั้วของลูกถ้วยฉนวนหรือการใช้ลูกถ้วยฉนวนเคลือบสารกึ่งตัวนำ (นเรศเรษฐ พัฒนเดช, 2550)

บ่อยครั้งที่ระบบไฟฟ้าแรงสูงประสบกับปัญหาการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจนทำให้เกิดความเสียหายต่อการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่วนหนึ่งเกิดจากมีสิ่งปนเปื้อนสะสม

อยู่ที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (อุดมศักดิ์ มาลัยวงศ์ และวินัย พฤกษ์วัน, 2553) ส่งผลทำให้ปัญหาการขัดข้อง (Trip) หรือเกิดความผิดปกติของสายส่งที่เกี่ยวข้องกับลูกถ้วยลดลงได้ และสาเหตุหนึ่งเกิดจากฟ้าผ่าทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย ซึ่งกระทบต่อความมั่นคงความเชื่อถือได้ในระบบสายส่งสภาพแวดล้อมในปัจจุบันนี้มีสิ่งเปราะเปื้อนหรือมลภาวะ เช่น ฝุ่น คาร์บอน สารเคมีและเกลือ เป็นต้น จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนในระบบสายส่งเช่นกัน (ชานี ใจประดิษฐ์ธรรม และชัชชัย อุทัยวศิน, 2557)

กระแสรั่วลงดินในเชิงของฮาร์โมนิกส์ ของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าภายใต้สายละลายเกลือที่ทดสอบด้วย Rotaring Wheel Tester ซึ่งสามารถทดสอบได้ครั้งละ 4 ลูกโดยตรวจวัดค่ากระแสรั่วลงดินของลูกถ้วยฉนวน ผ่านความต้านทานมาตรฐาน จากการทดลองพบว่าลูกถ้วยที่ระดับของกระแสรั่วลงดินสูงจะมีค่าความต้านทานผิวลดลง และค่ากระแสรั่วลงดินที่ฮาร์โมนิกต่างๆมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ลูกถ้วยฉนวนสูญเสียความเป็นฉนวนทำให้อายุการใช้งานสั้นลง [8-9]

ผลกระทบจากตะไคร่น้ำบนลูกถ้วยสายส่งแรงสูง พบว่าผลกระทบของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วย โดยเฉพาะตะไคร่น้ำ ซึ่งเป็นปัญหาหลัก ฝ่ายปฏิบัติการภาคใต้ ซึ่งเป็นพื้นที่แถบร้อนชื้น (สมคิด ธิวงค์ และ สมบูรณ์ ดวงแก้ว, 2549)

การเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากผิวเปรอะเปื้อนผิวจะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนเหล่านั้นเปียกน้ำและความต้านทานที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนลดลง ดังนั้นการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนจึงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งปนเปื้อน (อำนาจ สุขศรี, กิตติพงษ์ ตันมิตร และคงจักร บุญทัน, 2546)

การประเมินสมรรถนะการใช้งานลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในพื้นที่ซึ่งมีมลภาวะไอเกลือรุนแรง พบว่ามลภาวะจะทำให้ค่าความเป็นฉนวนของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าลดลง และยังส่งผลเสียต่อ

อายุการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (กิตติกร มณีสว่าง, 2553)

การทดลองโดยการนำลูกถ้วยมาทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสกปรก ESDD กับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ลูกถ้วยเหมือนกับใช้งานจริงโดยการจำลองความสกปรกโดยมีอยู่ 2 วิธี คือ

1.การทดลองความสกปรกตามธรรมชาติ โดยการนำลูกถ้วยไปติดตั้งในห้องทดลองแล้วพ่นหมอกที่สร้างขึ้นลูกถ้วยที่ใช้เป็นลูกถ้วยที่สกปรกขึ้นเองตามธรรมชาติ หลังจากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ลูกถ้วยและรักษาค่าระดับแรงดันไว้ถ้ายังไม่เกิด การวาบไฟให้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีก จนกว่าจะเกิดการการวาบไฟ

2.การทดลองสิ่งสกปรกที่สร้างขึ้นมา โดยการผสมส่วนประกอบด้วยเกลือและพ่นลงลูกถ้วยตลอดเท่าๆกันและนำไปติดตั้งในพอกรัม จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ลูกถ้วยนั้น (อภิรักษ์ เหลืองชูพรานีต, 2526)

ฉนวนที่มีความสะอาดมีความเสถียร ในขณะที่ฉนวนที่มีความเปรอะเปื้อนน้อยกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเกิดขึ้นในระยะสั้นๆ เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มและค่อยๆ คงที่และลักษณะฉนวนที่มีความเปรอะเปื้อนมากกระแสรั่วไหลมากขึ้นทำให้เกิดความร้อนและการอาร์คเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้แรงดันสูงกับฉนวน ความกว้างแถบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น (กิตติกร มณีสว่าง, 2553)

ตารางที่ 2 กระแสรั่วระดับความรุนแรงของสิ่งเปรอะเปื้อน ตามค่า ESDD (International Electro technical Commission, 1991)

ค่า ESDD mg/cm ²	ระดับความรุนแรงของสิ่งเปรอะเปื้อน
0-0.03	สะอาดหรือน้อยมาก
0.03-0.06	เล็กน้อย
0.06-0.1	ปานกลาง
>0.1	รุนแรง

3. ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 62730.
(IEC/TR 62730, 2013)

การทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวน ตัวอย่างที่ใช้จะต้องทำความสะอาดลูกถ้วยฉนวนด้วย น้ำบริสุทธิ์ก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบตัวอย่างของ ลูกถ้วยฉนวนเป็นดังรูปที่(2)โดยใน 1 รอบใช้เวลา 192 วินาทีแบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่งกำหนดให้ ระยะเวลาในการทดสอบแต่ละตำแหน่งใช้เวลา 40 วินาทีจากนั้นหมุนเป็นมุม 90° และใช้เวลา 8 วินาที เพื่อหมุนเปลี่ยนตำแหน่งโดยมีรายละเอียดของแต่ละ ตำแหน่งดังนี้ (IEC/TR 62730, 2013)

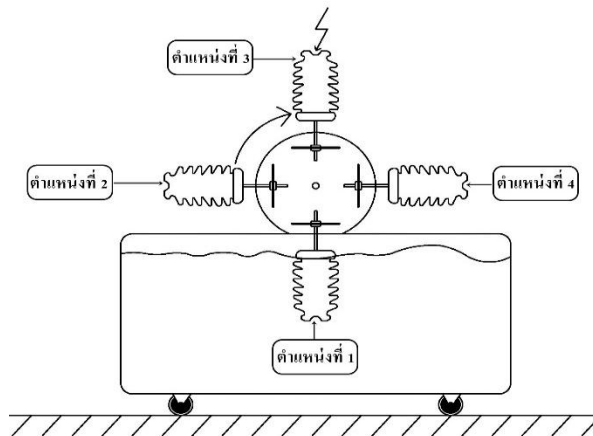
ตำแหน่งที่ 1 ลูกถ้วยถูกแช่น้ำเกลือเป็นเวลา 40 วินาที

ตำแหน่งที่ 2 ลูกถ้วยถูกพักกลางอากาศเป็น เวลา40 วินาที

ตำแหน่งที่ 3 ลูกถ้วยสัมผัสชั่วคราวแรงดันเป็นเวลา 40 วินาที

ตำแหน่งที่ 4 ลูกถ้วยถูกพักกลางอากาศเป็น เวลา40วินาที

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบได้จากหม้อแปลง แรงดันสูงที่มีความต้านทานกระแสไม่เกิน 250 มิลลิ แอมป์น้ำเกลือต้องทำการเปลี่ยนทุกๆสัปดาห์โดยใน แต่ละสัปดาห์มีการหยุดทดสอบเป็นการตรวจสอบ และบำรุงรักษาอย่างละเอียดของชุดทดสอบการ เสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนโดยกำหนดให้ ระยะเวลาในการหยุดทดสอบต้องไม่เกิน 1 ชั่วโมง ในช่วงที่มีการหยุดทดสอบจะไม่นับรวมกับเวลาของ การทดสอบดังนั้นระยะเวลาที่มีการหยุดทดสอบ ทั้งหมดคือ 60 ชั่วโมงของการทดสอบทั้งหมด (IEC/TR 62730, 2013)



ภาพที่ 2 ตัวอย่างชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า (IEC/TR 62730, 2013)

ข้อกำหนดในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน (IEC/TR 62730, 2013)

ความเข้มข้นของน้ำเกลือ $1.40 \text{ kg/m}^3 \pm 0.06 \text{ kg/m}^3$

4. การคำนวณหาสิ่งเปราะเปื้อน (ESDD)
(International Electro technical Commission, 1991)

ในการหาพื้นที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนที่นำมาใช้ งาน โดยการจำลองแบบให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับของ

จริงมากที่สุดโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และให้ โปรแกรมคำนวณพื้นที่ผิวทั้งหมดออกมา

$$\sigma_{20} = \sigma_0 \left[(1 - b(\theta - 20)) \right] \quad (1)$$

โดย

θ คือ อุณหภูมิสารละลาย ($^{\circ}\text{C}$)

σ_0 คือค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ
 θ ($^{\circ}\text{C}$) (S/m)

σ_{20} คือค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่
อุณหภูมิ (20°C)(S/m)

b คือค่าตัวประกอบแปรตามอุณหภูมิของ
สารละลายแสดงตามตาราง

ตารางที่ 3 ค่าตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิต่างๆ
(มาตรฐาน IEC 507) (International Electro technical Commission, 1991)

θ ($^{\circ}\text{C}$)	b
5	0.03156
10	0.02817
20	0.02277
30	0.01905

$$S_a = (5.7\theta_{20(\text{mS/m})})^{1.03} \quad (2)$$

$$S_a = (5.7\theta_{20(\text{uS/cm} \times 10^4)})^{1.03}$$

โดย

S_a คือค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือ (kg/m^3)

$$\text{ESDD} = \frac{S_a \times V}{A} \quad (3)$$

โดย

ESDD คือค่าความเปรอะเปื้อน (mg/cm^2)

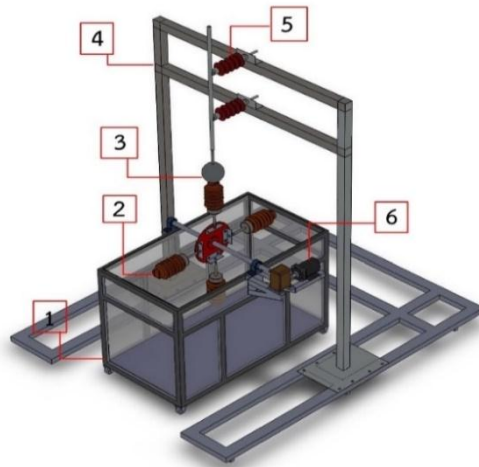
V คือปริมาตรสารละลาย (cm^3)

A คือพื้นที่ผิวลูกถ้วย (cm^2)

ขั้นตอนการสร้างชุดทดสอบการเสื่อมสภาพ ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

การสร้างชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วย
ฉนวนพอร์ซเลน เปรียบเสมือนการจำลอง
สถานการณ์จริงเนื่องจากลูกถ้วยในธรรมชาตินั้น
จะต้องพบกับฝุ่นละอองน้ำฝนแสงแดด ฯลฯ ซึ่งจะทำให้
ให้ลูกถ้วยอยู่ในสภาพเปรอะเปื้อนมีผลทำให้ค่าความ
เป็นฉนวนลดลง(กิตติกร มณีสว่าง, 2554) และมี
ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างชุดทดสอบการ
เสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ดังภาพที่(3)

ชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวน
พอร์ซเลนได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยคำนึงถึง
ความแข็งแรงทนทานและมีความปลอดภัยในการใช้
งานและสามารถใช้งานได้จริงดังภาพที่ (4)



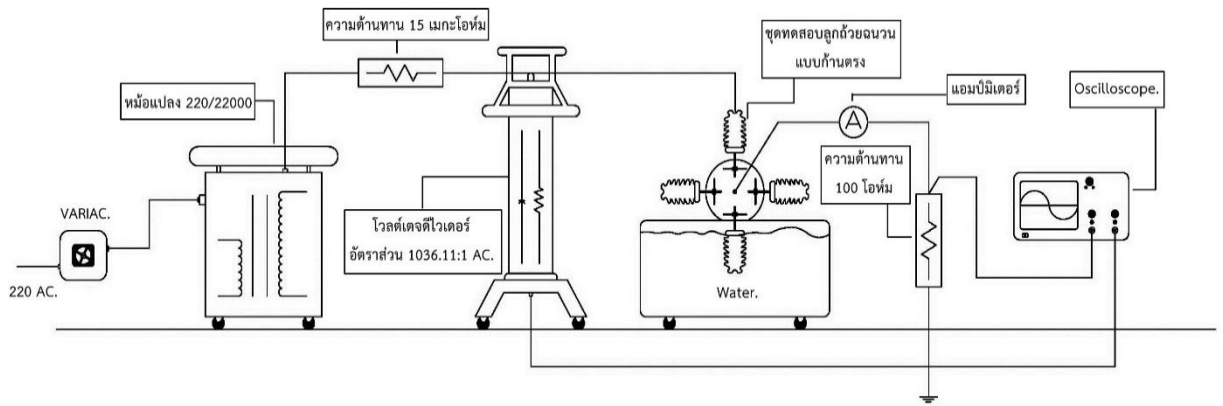
ภาพที่ 3 ชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ได้ออกแบบไว้

ตารางที่ 4 รายละเอียดชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ได้ออกแบบไว้

ลำดับที่	อุปกรณ์
1	ถังน้ำเกลือขนาด 1.6 m ³
2	ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน
3	อิเล็กโตรดสำหรับป้อนแรงดัน
4	โครงสร้างเหล็กติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ
5	บุชชิ่งแรงดันสูง
6	มอเตอร์และชุดควบคุมมอเตอร์



ภาพที่ 4 ชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบไลน์โพสต์



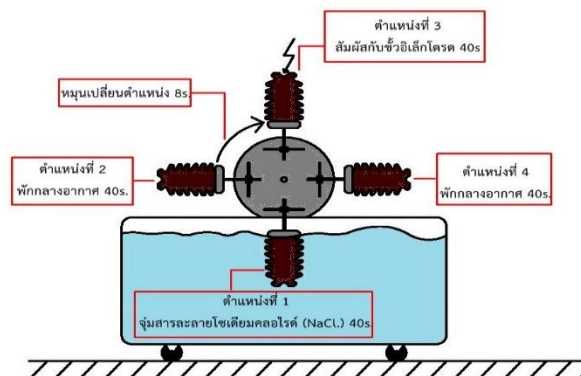
ภาพที่ 5 วงจรการทดสอบลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบโพสตีไฟฟ์ ชนิดไลน์โพสตี

จากรูปที่ (5) จะประกอบไปด้วยหม้อแปลงปรับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันทางด้านแรงต่ำตามที่ต้องการต่อเข้ากับหม้อแปลงขนาด 220/22000 เพื่อที่จะได้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ 22 กิโลโวลต์ต่ออนุกรมกับความต้านทานขนาด 15 เมกะโอห์ม เพื่อจำกัดกระแสที่ไหลในวงจรเพื่อไม่ให้สูงเกินไปและป้องกันกรณีกระแสลัดวงจรเข้าสู่หม้อแปลงและต่อขนานเข้ากับโวลต์เตจติไวเตอร์วัดแรงดันขาเข้าจากนั้นจะใช้อิเล็กทรอนิกส์ให้สัมพันธ์กับลูกถ้วยพอสตีซึ่งลูกถ้วยฉนวนนั้นจะติดตั้งอยู่กับวงล้อหมุนซึ่งวงล้อนี้อาศัยการทำงานอัตโนมัติโดยใช้บอร์ด Arduino Mega2560 เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์จากนั้นจะใช้แอมป์มิเตอร์และออสซิลโลสโคป วัดกระแสที่ไหล

ผ่านตามผิวของลูกถ้วยฉนวนผ่านความต้านทานที่มีค่า 100 โอห์ม 100 วัตต์ ซึ่งมีค่าน้อย

การทดสอบ

การทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนในงานวิจัยนี้ จะถูกทดสอบภายใต้ภายใต้เงื่อนไขของผิวลูกถ้วยที่ปกคลุมด้วยมลภาวะที่เปียกชื้น ด้วยวงล้อจุ่มน้ำเกลือ (Wheel test) ตามมาตรฐาน IEC 62730 โดยที่ในการทดสอบแต่ละครั้ง ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนจะถูกติดตั้งบนชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูงทั้ง 4 ตำแหน่งแสดงในรูปที่(6) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หากระแสรั่วไหล (Leakage current)



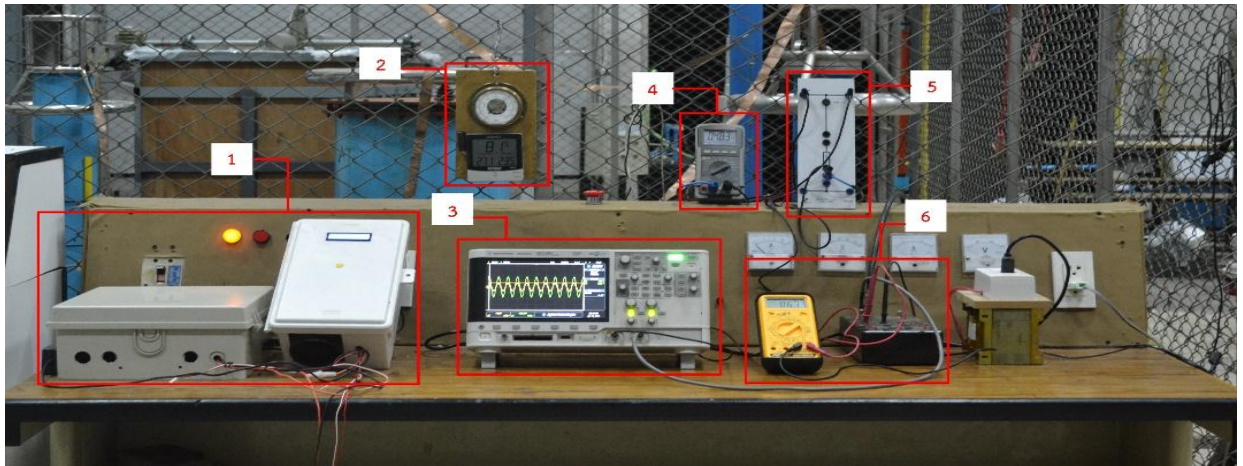
ภาพที่ 6 การทำงานของชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

ในการทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์-ซเลนโดยการจำลองสภาวะของลูกถ้วยบริเวณชายฝั่งทะเลโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงและมีการสัมผัสน้ำเกลือที่สูงกว่าการทำงานปกติของลูกถ้วย

ฉนวนพอร์ซเลน โดยใช้ระยะเวลาทดสอบทั้งสิ้น 1000 ชั่วโมงของการทดสอบ 1 ครั้งโดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดมี 1 ชนิด ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลูกถ้วยที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของลูกถ้วยฉนวน	จำนวน
ลูกถ้วยแท่ง (Line Post Insulator)	4



ภาพที่ 7 ชุดควบคุมชุดทดสอบและเครื่องมือวัดต่าง ๆ

การวัดค่ากระแสรั่วไหลที่ได้และการควบคุมการทำงานของชุดทดสอบโดยจะมีผังตามลำดับ ดังรูป(7) ซึ่งมีการเรียงลำดับความสำคัญไว้ดังนี้

หมายเลข 1 ชุดควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่ชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้การหมุนของวงล้อตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

หมายเลข 2 เครื่องวัดวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ EXTECH วัดค่าและแสดงผลค่าอุณหภูมิและความชื้นได้พร้อมกันช่วงการวัดความชื้น 10 ถึง 85% RH ความแม่นยำ $\pm 6\%$ ช่วงการวัดอุณหภูมิ -10 ถึง 60 °C หรือ 14 ถึง 140 °F ความแม่นยำ ± 1.8 °F หรือ ± 1 °C ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิ

ความชื้น และความชื้นสัมพัทธ์ ในช่วงเวลาการทดสอบ

หมายเลข 3 ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Agilent รุ่น DSO-X 2002A 70MHz 2GSa/S. เพื่อวัดรูปคลื่นแรงดันที่โวลต์เตจดีไวเดอร์และกระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยที่ลงสู่ดิน

หมายเลข 4 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ SUNWA รุ่น PC500a เพื่อวัดกระแสรั่วไหลที่ไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนลงสู่ดิน

หมายเลข 5 ความต้านทานขนาด 100 โอห์ม 100 วัตต์ ที่ต่ออนุกรมกับลูกถ้วยฉนวนพอร์-ซเลนแบบไลน์โพสต์ เพื่อที่จะสามารถวัดแรงดันตกคร่อมที่

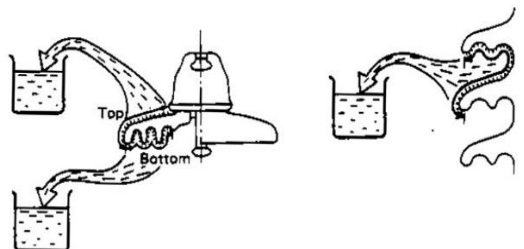
ตัวต้านทานเพื่อคำนวณหากระแสรั่วไหลจากรูปคลื่นที่วัดได้

หมายเลข 6 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ CIE รุ่น DMM-8007 เพื่อวัดแรงดันที่ลดทอนลงจากโวลต์เตจดีไวเดอร์

1. การวัดค่าสิ่งเปราะเปื้อนโดยวิธีหาค่า ESDD

สำหรับวิธีวัดหาค่าสิ่งเปราะเปื้อนโดยวิธีการหาจากค่า ESDD โดยจะหาจากค่าความนำที่เกาะติดกับลูกถ้วยฉนวนที่ทำการทดสอบเสร็จ จากการทดสอบโดยชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบไลน์โพสต์ที่ระยะเวลาที่ทำการทดสอบที่ 1000 ชั่วโมง ขั้นตอนการเก็บสิ่งเปราะเปื้อน โดยใช้น้ำกลั่นจำนวนที่แน่นอนใส่ลงไปในบีกเกอร์นำไปล้างสิ่งเปราะเปื้อนจากผิวลูกถ้วยโดยการเช็ดถูโดยใช้แปรงเช็ดผิวลูกถ้วยใส่ในบีกเกอร์ดังรูปที่ (8) สิ่งเปราะ

เปื้อนถูกทำให้ละลายในน้ำโดยการเขย่าผิวลูกถ้วยถูถูกระทำซ้ำจนกระทั่งไม่เหลือสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย จำนวนน้ำกลั่นที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดและระดับสิ่งเปราะเปื้อนโดยทั่วไปใช้ประมาณ 100-500 ซีซีแต่อาจใช้ถึง 1000-2000 ซีซีในกรณีของสิ่งเปราะเปื้อนมีขนาดใหญ่เป็นชนิดละลายน้ำได้น้อยปกติแล้วค่าความนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นน้อยกว่า $5\mu\text{s}/\text{cm}$ ถ้าความนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นสูงก็ใช้ตัวประกอบแก้ไขสำหรับความนำไฟฟ้าเริ่มต้นของน้ำ การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับระดับความต้องการความถูกต้องของค่า ESDD แต่วิธีที่นิยมมี 2 วิธีคือการคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD ตามมาตรฐาน (อำนาจ สุขศรี, กิตติพงษ์ ตันมิตร และคงจักร บุญทัน, 2546)



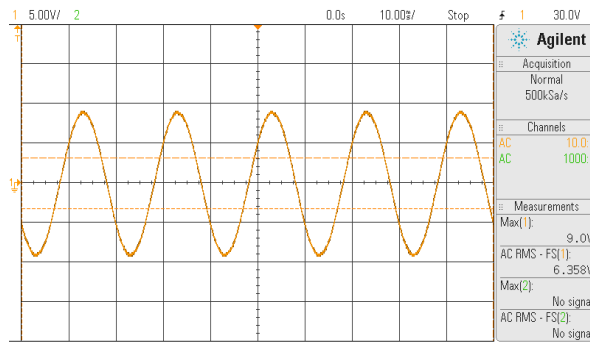
ภาพที่ 8 วิธีการล้างลูกถ้วยเพื่อหาค่าสิ่งเปราะเปื้อน(International Electro technical Commission, 1991)

ผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบ

การทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบไลน์โพสต์ นั้นแสดงถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยที่ค่าความต้านทานของฉนวนนั้นลดลง โดยเทียบจากกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนนั้นเพิ่มขึ้น โดยเกิดจากการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนที่เกาะตามผิวฉนวนที่มีการสะสมที่มากขึ้นทำให้ความต้านทาน

ของฉนวนนั้นลดลง ซึ่งสังเกตจากรูปคลื่นที่วัดได้ดังภาพที่(9)

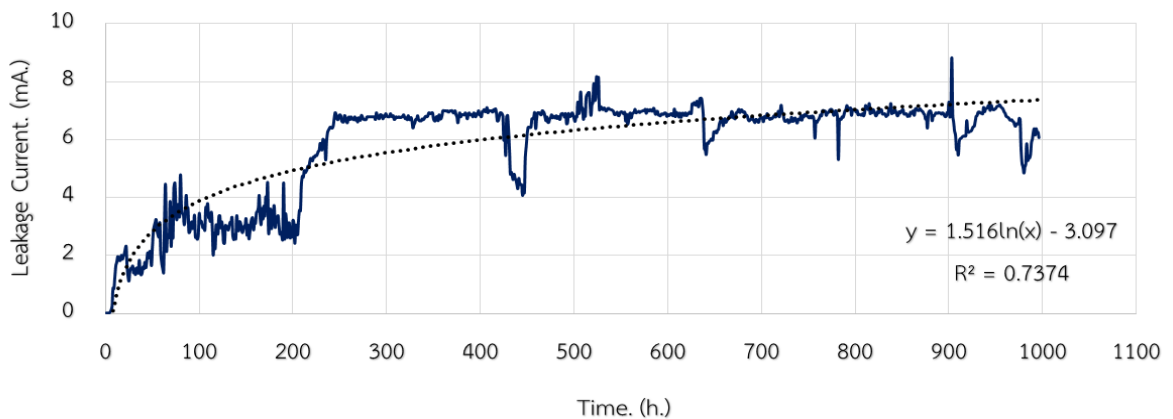
กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ 500 ชั่วโมง ที่ทำการทดสอบพบว่ากระแสรั่วไหลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 6.36 มิลลิแอมป์ ซึ่งสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนของลูกถ้วยเป็นผลทำให้เกิดกระแสรั่วไหล โดยสิ่งเปราะเปื้อนนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งทำให้คุณสมบัติการเป็นฉนวนของลูกถ้วยนั้นลดลง



ภาพที่ 9 กระแสรั่วไหลบนผิวฉนวนลงสู่ดิน

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลบนผิวฉนวน

ชั่วโมงที่ทำการทดสอบ	กระแสรั่วไหลเฉลี่ย (mA)
100	2.28
200	3.11
300	6.04
400	6.81
500	6.38
600	7.03
700	6.74
800	6.80
900	6.93
1000	6.49



ภาพที่10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับระยะเวลาที่ทำการทดสอบ

กระแสรั่วไหลบนผิวฉนวนลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ทำการทดสอบด้วยชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนที่ 1000 ชั่วโมง พบว่า ในช่วงระยะเวลาที่ 100 ชั่วโมง จะมีกระแสรั่วไหลบนผิวของลูกถ้วยฉนวนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.3 มิลลิแอมป์ โดยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจะพบว่า ในระยะเวลาที่ 200 ชั่วโมง จะมีกระแสรั่วไหลเฉลี่ยที่

3.1 มิลลิแอมป์ เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงระยะเวลาที่ 100 ชั่วโมงแรก จะพบว่ากระแสรั่วไหลนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 36.62 ช่วงระยะเวลา 200-300 ชั่วโมงพบว่า กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นเฉลี่ยที่ 6.04มิลลิแอมป์ โดยคิดเป็นร้อยละ 165.2 เมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาที่ 100 ชั่วโมงแรก และช่วงระยะเวลาที่ 300- 400 ชั่วโมง

กระแสรั่วไหลเฉลี่ยที่ 6.81 มิลลิแอมป์ โดยคิดเป็นร้อยละ 199.20 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงระยะเวลาที่ 100 ชั่วโมงแรก ช่วงระยะเวลาที่ 400-500 ชั่วโมง จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ที่ 6.38 มิลลิแอมป์โดยคิดเป็นร้อยละ 180.1 เมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาที่ 100 ชั่วโมงแรก ช่วงระยะเวลาที่ 500-600 ชั่วโมง กระแสรั่วไหลตามผิวลูกถ้วยฉนวนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.03 มิลลิแอมป์คิดเป็นร้อยละ 208.67 เมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาที่ 100 ชั่วโมงแรก ช่วงเวลาที่ 600-700 ชั่วโมง จะมีกระแสรั่วไหลเฉลี่ยที่ 6.73 มิลลิแอมป์ โดยคิดเป็นร้อยละ 195.67 เมื่อเทียบกับช่วงระยะเวลาที่ 100 ชั่วโมงแรก ช่วงเวลาที่ 700-800 จะมีกระแสรั่วไหลเฉลี่ยอยู่ที่ 6.8 มิลลิแอมป์คิดเป็นร้อยละ 198.7 ช่วงเวลาที่ 800-900 จะมีกระแสรั่วไหลเฉลี่ยที่ 6.9 มิลลิแอมป์โดยคิดเป็นร้อยละ 204.23 และในช่วงเวลาที่ 900-100 ชั่วโมง จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ที่ 6.5 มิลลิแอมป์โดยคิดเป็นร้อยละ 185 เมื่อเทียบกับระยะเวลาช่วงที่ 100 ชั่วโมงแรก เช่นกัน สามารถสรุปได้ว่ากระแสรั่วไหลนั้นมีอัตราที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะเวลาของการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนที่ได้นำมาทำการทดสอบเกาะติดกับผิวฉนวนจึงทำให้ความเป็นฉนวนของลูกถ้วยนั้นลดลง ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนของลูกถ้วย

เมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้นกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนของลูกถ้วยนั้นมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนที่นำมาทดสอบ ระยะเวลาการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนเหล่านี้จะเกาะติดกับผิวฉนวนนั้นมากขึ้น ทำให้กระแสรั่วไหลนั้นมีปริมาณที่มากขึ้น

พิจารณาจากเส้นแนวโน้มของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบไลน์โพสท์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง x และ y ในสมการลอการิทึม

$$y = 1.516 \ln(x) - 3.037$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การกำหนด } R^2 = 0.7374$$

จากสมการลอการิทึม สามารถเขียนแทนเป็นสมการได้ดังนี้

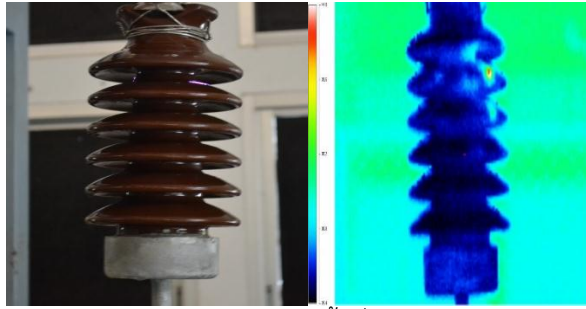
$$I_{\text{leakage}} = 1.516 \ln(t) - 3.037 \quad (4)$$

I_{leakage} คือ ค่าของกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนของลูกถ้วย (Leakage Current) มีหน่วยเป็นมิลลิแอมป์ (mA)

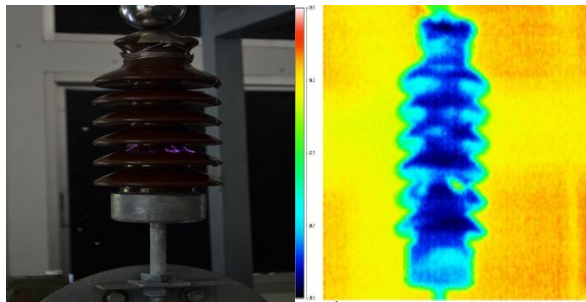
t คือระยะเวลา (Time) มีหน่วยเป็นชั่วโมง ผลที่ได้จากสมการเส้นแนวโน้มของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบไลน์โพสท์ สามารถพยากรณ์กระแสรั่วไหลตามผิวฉนวนที่จะเกิดขึ้นในแต่ละเวลาได้ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) เพื่อจะนำไปวิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับระบบส่งจ่าย และเป็นแนวทางของการบำรุงรักษาระบบส่งจ่ายให้มีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพต่อไป

1. ผลการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ

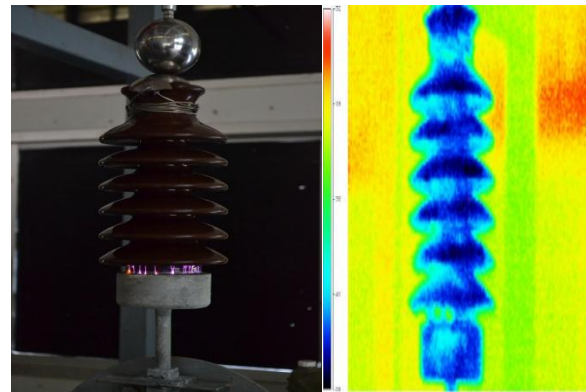
การเกิดโคโรนาดิสชาร์จปรากฏการณ์หนึ่งที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าด้วยการสังเกต ซึ่งปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้นจากที่ประจุไฟฟ้าทำลายความเป็นฉนวน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายในเนื้อฉนวนและภายนอกเนื้อฉนวน เป็นผลจากการที่ประจุไฟฟ้าไหลผ่านช่องว่างเล็ก ๆ โดยส่งผลต่อความเสียหาย ซึ่งช่องว่างเหล่านี้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้น้อยกว่าฉนวนที่อยู่รอบ ๆ ความเสียหายจากการเกิดโคโรนาดิสชาร์จบางส่วนที่รุนแรงขึ้น จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ (breakdown) ได้ในที่สุด



ภาพที่ 11 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จบริเวณผิวปีกชั้นที่สองของลูกถ้วยและภาพถ่ายความร้อน



ภาพที่ 12 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จบริเวณผิวปีกชั้นที่ห้าของลูกถ้วยและภาพถ่ายความร้อน



ภาพที่ 13 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จบริเวณผิวแกนชั้นล่างของลูกถ้วยและภาพถ่ายความร้อน

จากภาพที่ (11-13) การเกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จในแต่และพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อลูกถ้วยสัมผัสกับแท่งอิเล็กโตรดเป็นระยะเวลานานและอยู่ในสภาวะสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ การสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อน ทำให้บริเวณผิวลูกถ้วยฉนวนสกปรก สภาพความเป็นฉนวนลดลงจนเกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านทางสิ่งสกปรกนั้น กระแสบางส่วนจะสร้างความร้อนบนเส้นทางที่ผ่านและทำให้เส้นทางนั้นแห้ง หยุดการนำไฟฟ้า ในขณะที่พื้นที่ใกล้เคียงบางส่วนยังไม่แห้ง จึง

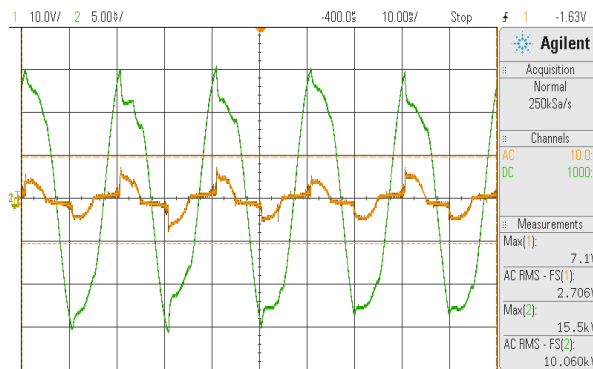
ก่อให้เกิดแรงดันตกคร่อมสูงมาก และเกิดเป็นการอาร์คแถบแห้ง ซึ่งในช่วงระยะเวลาแรก ๆ นั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อลูกถ้วยฉนวนที่นำมาทดสอบถูกทดสอบนานขึ้นในช่วงระยะเวลา 500 ชั่วโมงขึ้นไป ความรุนแรงของการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและการอาร์คแถบแห้งจึงมีมากขึ้นและได้ปรากฏออกมาให้เห็นอย่างชัดเจน เมื่อลูกถ้วยฉนวนที่นำมาทดสอบนั้นได้รับความเครียดทางไฟฟ้าเป็นเวลานาน ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์คแถบแห้ง ซึ่งปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้

ส่งผลกระทบต่าง ๆ ต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงบน
พื้นผิวลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน

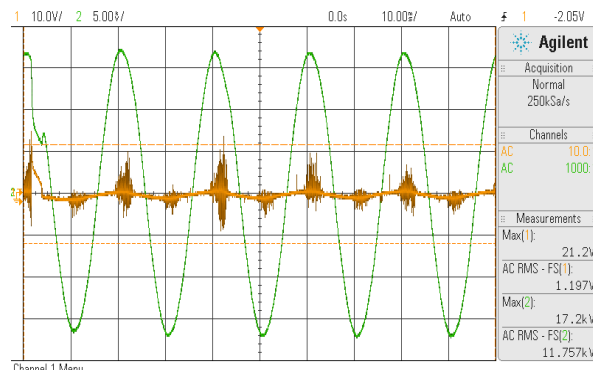
2. ผลกระทบการเกิดปรากฏการณ์โคโรนา ดิซชาร์จ

การเกิดปรากฏการณ์โคโรนาดิซชาร์จ ที่เกิดขึ้น
เป็นผลทำให้รูปคลื่นของกระแสที่ได้นั้นเปลี่ยนไป

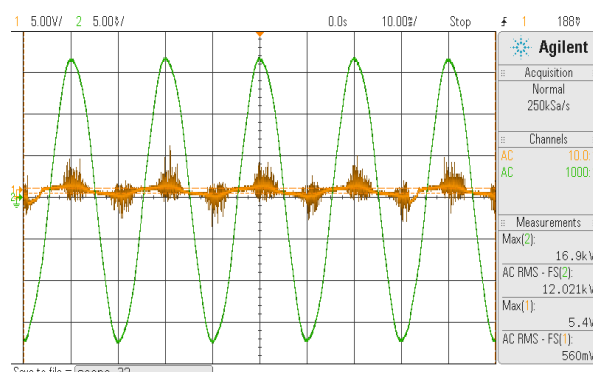
เปรียบเสมือนกับฟันเลื่อย ซึ่งเกิดจากคลื่น
แม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปบริเวณสัญญาณใน
ขณะที่ทำการบันทึกค่ากระแสรั่วไหล



ภาพที่ 14 กระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดโคโรนาดิซชาร์จ



ภาพที่ 15 กระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดโคโรนาดิซชาร์จผ่านไป 5 วินาที



ภาพที่ 16 กระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดโคโรนาดิซชาร์จผ่านไป 7 วินาที

จากรูปที่ (14-16) รูปคลื่นของกระแสรั่วไหลที่
วัดได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูปคลื่นที่วัดได้ใน

ข้างต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดปรากฏการณ์โคโรนา
ดิซชาร์จเกิดขึ้น ค่าของกระแสจะลดลงและเกิดการ

ผิเดเพี้ยนของรูปคลื่นตามระยะเวลาที่ถูกด้วยสัมผัสกับแท่งอิเล็กโตรดทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ภายระบบไปโดยเปล่าประโยชน์

ประโยชน์ของการศึกษาเรื่องกระแสรั่วไหล นอกจากจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมทางกายภาพของกระแสรั่วไหลตามผิวฉนวน ซึ่งจะบ่งบอกถึงพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นและความเสียหายของฉนวน ทำให้สามารถประเมินความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาออกแบบฉนวนได้ การตรวจจบบกระแสรั่วไหลอย่างต่อเนื่องสามารถที่จะนำไปใช้ในการป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนฉนวนเนื่องจากสภาวะเปรอะเปื้อน โดยอาศัยความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างขนาดของกระแสรั่วไหลกับปริมาณการสะสมของสิ่ง

เปรอะเปื้อน ทำให้สามารถที่จะรู้ระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำความสะอาดฉนวนด้วยฉนวน หรือเปลี่ยนฉนวนด้วยฉนวนเมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนมีปริมาณมากพอที่จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ และสามารถนำมาใช้ในการเลือกพิจารณา ชนิดที่เหมาะสมไปใช้บริเวณที่มีสิ่งเปรอะเปื้อน

3. ผลการเปรียบเทียบผิวฉนวนของลูกถ้วย

การสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวฉนวนเป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหล ซึ่งกระแสรั่วไหลจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนและค่าความนำของสิ่งเปรอะเปื้อนที่สะสมอยู่



(ก)

(ข)

ภาพที่ 17 ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบไลน์โพสท์ในการทดสอบ

(ก) ก่อนการทดสอบ

(ข) หลังการทดสอบ



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงบนผิวลูกถ้วยฉนวน

หลังจากการทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนจำนวน 1000 ชั่วโมง (42 โดยประมาณ) พื้นผิวของลูกถ้วยได้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นผลจากการเกิดโคโรนาดีซชาร์จและอาร์คแฉกทั้งสิ้น ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 17 (ก) นั้นเป็นลูกถ้วยฉนวนขณะก่อนการทดสอบ และรูปที่ 17 (ข) นั้นเป็นขณะหลังการทดสอบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นคือ เกิดคราบของสิ่ง

เปรอะเปื้อนบนพื้นผิวของลูกถ้วยที่ได้รับการทดสอบ ซึ่งคราบของสิ่งเปรอะเปื้อนที่อยู่บริเวณตัวของลูกถ้วยและบนปีกของลูกถ้วยมีความเปรอะเปื้อนมากกว่าใต้ปีกของลูกถ้วย เกิดรอยตามผิวฉนวนจากรูปที่ (18) ทำให้ผิวเสื่อมสภาพจากการเกิดอาร์คแฉกแฉง ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณปีกของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งทำให้ลูกถ้วยฉนวนเสื่อมสภาพ

4. ผลการวัดค่าสิ่งเปรอะเปื้อน (ESDD)

ตารางที่ 7 ค่าความเปรอะเปื้อนที่ติดกับผิวลูกถ้วยฉนวน ESDD

ตำแหน่งลูกถ้วยฉนวน	ค่า ESDD	ระดับความเปรอะเปื้อน
1	0.0055	เล็กน้อย
2	0.0126	เล็กน้อย
3	0.0140	เล็กน้อย
4	0.0184	เล็กน้อย

สรุป

จากการศึกษาและวิเคราะห์กระแสรั่วไหลตามผิวของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบไลน์โพส ในสภาวะเปรอะเปื้อนด้วยวงล้อทดสอบเพื่อที่ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อลูกถ้วยฉนวนและทำการวัดค่าระดับค่าความเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยฉนวน ESDD ที่ระยะเวลาทดสอบที่ 1000 ชั่วโมง กระแสรั่วไหลตามผิวของลูกถ้วยฉนวนนั้นเพิ่มขึ้น จากค่าความเปรอะเปื้อนที่น้อย ๆ สอดคล้องกับผิวลูกถ้วยฉนวนเมื่อเกิดการสะสมมากกระแสรั่วไหลยิ่งมาก ซึ่งสภาพอากาศมีผลต่อความเปรอะเปื้อนที่เกาะบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวน และความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน จากการเกิดโคโรนาดีซชาร์จเป็นระยะเวลานานส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนและเกิดความเสียหายต่อระบบ และทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเร็ว อายุการใช้งานสั้นลง และการทำความสะอาดลูกถ้วยทำให้ค่าความเป็นฉนวนของลูกถ้วยเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กิตติกร มณีสว่าง. (2553). การประเมินสมรรถนะการใช้งานลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดต่างๆในพื้นที่ซึ่งมีมลภาวะไอเกลือรุนแรง. **ไฟฟ้าสาร (Electrical Engineering Magazine)**. 17(2).
- กิตติกร มณีสว่าง. (2554). กรณีศึกษาเชิงเปรียบเทียบการใช้งานลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแบบแท่งชนิด Line post type และ Pin post type. **นิตยสารเทคโนโลยีไฟฟ้าสาร 2554**. 12(5), 44-49.
- คงจักร บุญทัน. (2547). การวิเคราะห์กระแสรั่วลงดินของลูกถ้วยฉนวนในเชิงฮาร์มอนิกภายใต้สภาวะของสารละลายเกลือที่ทดสอบโดย **Rotating Wheel Tester**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์(วิศวกรรมไฟฟ้า). มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- ชำนาญใจประดิษฐ์ธรรม และชัชชัย อุทัยวาทิน. (2557). การวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าและทดสอบผลกระทบการเกิดวาปไฟตามผิวของสิ่งเปราะอ่อนบนลูกถ้วยแขวนระบบสายส่ง 115 kV ในสถานะขอบเขตไม่สมมาตร. บทความวิจัย การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6.
- นเรศเรษฐ พัฒนเดช. (2550). วิธีการแก้ปัญหาการใช้งานลูกถ้วยพอร์ซเลนในบริเวณมลภาวะ. ไฟฟ้าสาร (Electrical Engineering Magazine). 14(3).
- วีราพล อินคต, วสวัตต์ มณีรัตน์ชยะกูร, อภิสิทธิ์ ทุ่งโปร่ง. (2555). การศึกษาและทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าและเคเบิลสเปเซอร์ในสถานะแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงราย.
- สกลวิฒิ ภูผาสุข. (2552). การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนและโพลีเมอร์สถานะเปราะอ่อน ที่ใช้ในระบบจำหน่ายแรงสูงระบบ 33 kV ของ กฟภ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สมคิด ธิวรงค์, สมบูรณ์ ดวงแก้ว. (2549). ผลกระทบจากตะไคร่น้ำบนลูกถ้วยสายส่งแรงสูง. นิตยสารเทคโนโลยีไฟฟ้าสาร 2549. 13(3), 46-49.
- อภิรักษ์ เหลืองธูวปราณีต. (2526). วิธีเลือกลูกถ้วยชนิดต่างๆภายในสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีความสกปรก. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อำนาจ สุขศรี, กิตติพงษ์ ตันมิตร และคงจักร บุญทัน. (2546). กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินของลูกถ้วย ฉนวน 22 กิโลโวลต์ทดสอบภายใต้สภาวะสารละลายเกลือ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อำนาจ สุขศรี, กิตติพงษ์ ตันมิตร, คงจักร บุญทัน. (2546). กระแสไฟฟ้ารั่วลงดินของลูกถ้วยฉนวน 22 กิโลโวลต์ ทดสอบภายใต้สภาวะสารละลายเกลือ. วิศวกรรมสาร ม.ช. 30(4), 379-89.
- อุดมศักดิ์ มาลัยวงศ์ และวินัย พฤกษ์วัน. (2553). การศึกษาค่าความเปราะอ่อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดการวาปไฟตามผิว ของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า). มหาลัยเกษตรศาสตร์
- IEC/TR 62730. (2013-03). HV polymeric insulators for indoor and outdoor use tracking and erosion testing by wheel test and 5000h test. Edition 1.0. International Electro technical Commission. (1991). Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators to be Used on AC Systems. International Standard IEC 507.

คุณลักษณะสนามไฟฟ้าบนเคเบิลสเปเซอร์ ชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง
ของระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน

Electric Field Characteristic on Polyethylene High Density Cable Spacer Type
of 22 kV Distribution Systems under Polluted Conditions

ภาณุพงศ์ จงบริบูรณ์¹, วรวรรณ จันทร์น้ำท่วม² และ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ^{3*}
Panupong Jongboriboon¹, Worawan Junnumtome² and Wichet Thipprasert^{3*}

^{1,2,3} มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Rajamangla University of Technology Lanna Chiang Rai

* Corresponding author e-mail: wichet_thip@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอคุณลักษณะสนามไฟฟ้าบนเคเบิลสเปเซอร์ไฟฟ้าแรงสูง 22 กิโลโวลต์ ชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อน โดยการทดสอบเคเบิลสเปเซอร์ของระบบสายส่ง 22 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง การสร้างห้องทดสอบเคเบิลสเปเซอร์ภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อนจากการจำลองสภาวะทั้ง 3 แบบ ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ต หมอกไอเกลือและฝน เพื่อหากระแสรั่วไหลและการเสื่อมสภาพของเคเบิลสเปเซอร์ และใช้การจำลองผลโดยโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics version 4.3b เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยรอบของเคเบิลสเปเซอร์ ผลการทดสอบวัดกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นบนผิวของเคเบิลสเปเซอร์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบ 22 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาวะ รังสีอัลตราไวโอเล็ต หมอกไอเกลือและฝน เพื่อประเมินว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้สามารถทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดจากการจำลองสภาวะต่าง ๆ ที่ส่งผลให้กับเคเบิลสเปเซอร์และจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จ COMSOL Multiphysics version 4.3b เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณของผิวเคเบิลสเปเซอร์ จากการจำลองผลของสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น คือ บริเวณจุดรองรับสายซึ่งจะเกิดสนามไฟฟ้ามากที่สุด

คำสำคัญ: สนามไฟฟ้า, กระแสรั่วไหล, สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อน

Abstract

This paper presents the characteristics of electric field for the high-density polyethylene cable spacers for 22 kV distribution systems under polluted conditions through cable spacer tests of 22 kV transmission line for 1,000 hours. The cable spacer testing rooms under polluted conditions are built for simulation of 3 conditions: ultraviolet, salt fog and rain in order to detect leakage current and deterioration of the cable spacers. The result was simulated by the COMSOL Metaphysics Version 4.3b from the existing electric field around the cable spacers.

The result shows the leakage current existed on the surface of the high-density polyethylene cable spacers for 22 kV distribution systems under the polluted conditions of ultraviolet, salt fog and rain in order to evaluate whether the cable spacers are able to resist to the electric field stress, the effect from various simulated conditions to the cable spacers, and the result simulation from the COMSOL Multiphysics Version 4.3b in order to detect the electric field that existing on the surface of cable spacers. From the result simulation of the electric field, the electric field existed around the point of the support line the most.

Keywords: Electric field, Leakage Current, Polluted Condition

บทนำ

เคเบิลสเปเซอร์มีความสำคัญต่อระบบชุมชนและภาคอุตสาหกรรมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้มีความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ฉะนั้นการพัฒนาคุณภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจึงมีความสำคัญอย่างมากเคเบิลสเปเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำไปใช้ ประกอบสายเคเบิลในอากาศเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ สายเคเบิลสามารถทนต่อแรงลมในอากาศและช่วยป้องกันความเสียหายจากความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า อาจจะมีเกิดจากการที่สายเคเบิล แกว่งไปสัมผัสกันกับกิ่งไม้หรือสัตว์ต่างๆโดยเคเบิลสเปเซอร์ยังมักจะถูกนำมาใช้ติดตั้งเสริมความแข็งแรงในกรณี ที่มี การแขวนสาย เคเบิลเป็นแนวยาวหรือมีการติดตั้งสายไฟหลายวงจรในบริเวณเดียวกัน

สำหรับการใช้งานจริงของเคเบิลสเปเซอร์นั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงที่มีการเปราะเปื้อนตามผิวได้เลย เพราะเป็นการติดตั้งใช้งานกลางแจ้งจึงมีสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนจากมลภาวะต่าง ๆ มาเกาะตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ เช่น ฝุ่น เหม่า ขี้เถ้า ไอเสีย ควันหรือเกลือจากทะเลหรือสิ่งอื่น ๆ ส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนลดลง สิ่งเปราะเปื้อนบางชนิดเช่นเกลือ ในสภาวะแห้งอาจไม่ส่งผลมากนัก แต่เมื่อรวมตัวกับน้ำ

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการกระจายสนามไฟฟ้าของของเคเบิลสเปเซอร์ ชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่ใช้สำหรับระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวกับเคเบิลสเปเซอร์ในบทนี้ จึงได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับการใช้งานเคเบิลสเปเซอร์อย่างละเอียดเช่น ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้งานร่วมกับเคเบิลสเปเซอร์คุณสมบัติของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและปัจจัยที่ส่งผลเกิดสนามไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์

การเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยอธิบายรายละเอียดดังนี้

1. เคเบิลสเปเซอร์

เคเบิลสเปเซอร์เป็นอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงทำหน้าที่เป็นตัวยึดและจัดระเบียบสายส่งในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ เพื่อไม่ให้สายตัวนำทั้ง 3 เฟสอยู่ใกล้ กันมากเกินไปทำให้ช่วยลดอัตราความผิดพลาดอันเกิดจากต้นไม้ กิ่งไม้หรือสิ่งต่าง ๆ

2. ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์

เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้งานในประเทศไทยมีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดเซรามิกและชนิดพอลิเมอร์แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก เคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิกมีทั้งแบบ พอร์ซเลนเคลือบเพฟลอนและพอร์ซเลนเคลือบเซรามิก จุดเด่นของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้คือ ความแข็งแรงความคงทนต่อแสงแดด ฝวิเรียบมันทำให้น้ำฝุ่นหรือสิ่งสกปรกเกาะติดได้ยาก มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2.2 เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ เคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ผลิตจาก พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) เคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้มีจุดเด่นในเรื่อง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ น้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดเซรามิก ประมาณ 2-3 เท่า

ตามข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วอย่างไรก็ตามแม้ว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอร์ซเลน เคลือบเซรามิก จะมีความทนทานต่อการทดสอบทางไฟฟ้าที่สูงกว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเมอร์แต่เมื่อใช้งานจริงร่วมกับสายเคเบิลก็ยังคงมีปัญหาในเรื่องความเครียดสนามไฟฟ้าสูงบริเวณจุดรองรับสายเคเบิล ส่งผลให้เกิดร่องผิวเสื่อมสภาพ ขึ้นที่ผิวของสายเคเบิล จนทำให้สายเคเบิลเกิดความเสียหายและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระบบเกิดความผิดพลาด

3. สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า หมายถึง บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้า สามารถส่งอำนาจไป ถึงหรือ

บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าทดสอบเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้าทดสอบนั้นตามจุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าต้นกำเนิดสนามจะมี ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไป หน่วยของสนามไฟฟ้าคือนิวตันต่อคูลอมบ์หรือโวลต์ต่อเมตร

4. การวัดระดับความเปรอะเปื้อน

สำหรับการใช้งานจริงของเคเบิลสเปเซอร์ นั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงสภาวะที่มี การเปรอะเปื้อนตามผิวได้เลย เพราะเป็นการติดตั้งใช้งานนอกอาคารหรือกลางแจ้ง จึงเป็นเรื่องปกติ ที่มี สิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนจากมลภาวะต่าง ๆ มาเกาะตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ เช่น ฝุ่น เหม่า ซี้เก้ ไอเสีย คิวินจากโรงงานอุตสาหกรรม เกลือจากทะเล หรือสิ่งอื่น ๆ ส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนลดลง สิ่งเปรอะเปื้อนบางชนิดเช่น เกลือจากทะเล ในสภาวะแห้งอาจไม่ส่งผลมากนัก แต่เมื่อรวมตัวกับน้ำกลายเป็นสารละลายก็ทำให้ผิวเคเบิลสเปเซอร์ เกิดกระแสรั่วไหลได้มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งได้ง่ายขึ้น

สำหรับเคเบิลสเปเซอร์ที่ผ่านการทดสอบเสร็จสิ้นนี้จะถูกวัดค่าความเปรอะเปื้อนโดยการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเกลือ (Equivalent Salt Deposit Density: ESDD) อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 60507 มี วิธี การตรวจวัดและคำนวณค่าความเปรอะเปื้อนดังนี้

4.1 นำเคเบิลสเปเซอร์ ออกมาจากห้องทดสอบหรือฐานติดตั้ง โดยระวังอย่าให้มี การสัมผัสกับผิวเคเบิลสเปเซอร์ หรือสัมผัสให้น้อยที่สุด เท่าที่จะทำได้

4.2 ใช้ถ้วยตวงน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร แล้วนำแปรขนาด 1 นิ้ว จุ่มลงไปใต้น้ำ

กลั่น จากนั้นจึงนำมาเช็ดทำความสะอาดเคเบิลสเปเซอร์ให้ทั่ว ในขณะที่ทำความสะอาดนั้นต้องสวมถุงมือยางด้วย

4.3 นำสำลีกลับไปจุ่มน้ำและเขย่าเพื่อให้สิ่งเปรอะเปื้อนที่ติดอยู่หลุดออกมาแล้วบีบน้ำออกอีกครั้งก่อนนำไปเช็ดใหม่ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนผิวเคเบิลสเปเซอร์ สะอาดไม่มี สิ่งเปรอะเปื้อนเหลืออยู่

4.4 คนน้ำกลั่นและสิ่งที่เหลือปนให้ละลายเข้ากัน จากนั้นใช้มิเตอร์วัดค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำกลั่นและจดบันทึก

เมื่อวัดค่าความนำไฟฟ้าได้แล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณโดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1-b(\theta-20)] \quad (1)$$

เมื่อ θ คือ อุณหภูมิ ของสารละลาย ($^{\circ}\text{C}$)

σ_{θ} คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ θ ($^{\circ}\text{C}$)(S/m)

σ_{20} คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20 ($^{\circ}\text{C}$)(S/m)

b คือ ค่าคงที่ ณ อุณหภูมิ ที่ วัดได้ในขณะนั้น

สามารถคำนวณ ESDD ได้จากสมการ (2) และ (3)

$$S_a = (5.7 \times \sigma_{20})^{1.03} \quad (2)$$

$$\text{ESDD} = \frac{S_a \times V}{A} \quad (3)$$

เมื่อ S_a คือ ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (mg/cm^3)

ESDD คือ Salt deposit density (mg/cm^2)

V คือ ปริมาณของสารละลายใช้ทำความสะอาด (cm^3)

A คือ พื้นที่ ผิวของชิ้นงานที่ ทดสอบ (cm^2)

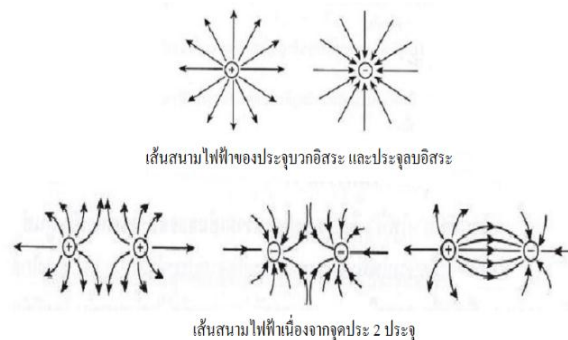
ตารางที่ 1 การแบ่งระดับความรุนแรงของสิ่งเปราะเปื้อน ตามค่า ESDD

ค่า ESDD mg/cm ²	ระดับความรุนแรงของสิ่งเปราะเปื้อน
0-0.03	สะอาดหรือน้อยมาก
0.03-0.06	เล็กน้อย
0.06-0.1	ปานกลาง
>0.1	รุนแรง

5. เส้นแรงไฟฟ้า

หมายถึง เส้นสมมติ ที่ใช้เขียนเพื่อแสดงสนามไฟฟ้าโดยทิศทางของสนามไฟฟ้า หรือเส้นที่ใช้แสดงทิศทางของแรงที่กระทำต่อประจุ บวกที่วางอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าแสดงถึง

ขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้า ถ้าเส้นแรงหนาแน่นมาก หมายถึง ค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามาก ด้วย ภาพที่ 1 แสดงเส้นแรงไฟฟ้า



เส้นสนามไฟฟ้าของประจุบวกอิสระ และประจุลบอิสระ

เส้นสนามไฟฟ้าที่เนื่องจากจุดประจุ 2 ประจุ

ภาพที่ 1 เส้นแรงไฟฟ้า

6. ลูกถ้วยฉนวนในสถานะเปราะเปื้อน

สิ่งเปราะเปื้อนที่จับเกาะอยู่บนผิวของลูกถ้วยฉนวน เมื่อเปียกน้ำอันอาจเกิดจากหมอกหรือความชื้นในตอนเช้าหรือฝนที่ตกปรอย ๆ สภาพน้ำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้น และสาเหตุทำให้เกิดวาบไฟตามผิวง่าย การเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อน ขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้รวมทั้งปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของการเกิดวาบไฟตามผิว

7. การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

การเกิดโคโรนาดีสชาร์จจะเกิดขึ้นเมื่อสเปเซอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลานานและอยู่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอบริเวณนั้นๆและการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนทำเคเบิลสเปเซอร์สกปรกทำให้ความเป็นฉนวนลดลงจนเกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้ากระแสจะสร้างความร้อนบนเส้นที่ผ่าน และทำให้เส้นทางนั้นแห้งหยุดการนำไฟฟ้าแต่พื้นที่บางส่วนยังไม่แห้งจึงเกิดแรงดันตกคร่อมสูงมากและเกิดอาร์คแถบแห้ง เมื่อเคเบิลสเปเซอร์ได้ถูก ทำการทดลองเป็นเวลานานๆ สิ่งเปราะเปื้อนเริ่มมีมากขึ้นจึงทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์คแถบแห้งมากขึ้น ทั้ง2ปรากฏการณ์

นี้จะส่งผลกระทบต่อเคเบิลสเปเซอร์ทำให้ผิวของเคเบิลสเปเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสภาพ

วิธีการดำเนินงาน

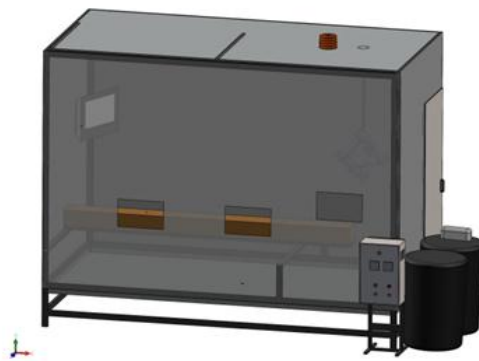
การจัดทำงานวิจัยเรื่อง การศึกษาและทดสอบการกระจายสนามไฟฟ้าของลูกเคเบิลสเปเซอร์พอลิเอทิลีน ที่ 22 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีทดสอบในห้องแชมเบอร์ (Chamber) มีขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มหาหัวข้องานวิจัย หาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจนกระทั่ง ถึงขั้นตอนสุดท้ายของการ จัดทำ งานวิจัย เพื่อให้ได้ผลการทำงานตามขอบเขตของงานวิจัยที่ได้กำหนดเอาไว้ มีแผนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

การสร้างห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อศึกษากระแสรั่วไหลของเคเบิลสเป

เซอร์ในแต่ละสถานะของความเปรอะเปื้อนโดยใช้ เวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง มีขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์

ห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์ ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยคำนึงถึงความแข็งแรงทนทานและมีความปลอดภัยในการใช้งาน ก่อนทำการสร้างห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนได้มีการออกแบบห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนที่สามารถรองรับการทดสอบของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงขนาด 22 กิโลโวลต์ ชุดทดสอบแรงการเสื่อมอายุห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์แบบไว้โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์แสดง ได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ห้องทดสอบสิ่งเปรอะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์ที่ได้ออกแบบไว้

ซึ่งในภายในห้องทดสอบประกอบด้วย หลอด อัลตราไวโอเลต ฮีตเตอร์ และหัวพ่น(สำหรับหมอก

ฝน และความชื้น) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวควบคุมด้วยชุด ควบคุมเวลาการทำงานที่อยู่ภายนอก



ภาพที่ 3 ห้องทดสอบเคเปิลสเปเซอร์

2. การทดสอบของเคเบิลสเปเซอร์ด้วยพหุ ความเครียด

การทดสอบเคเบิลสเปเซอร์ด้วยพหุความเครียด เป็นการจำลองสภาวะความเครียดที่เคเบิลสเปเซอร์ได้รับ เมื่อติดตั้งใช้ทั่วไปและในบริเวณชายฝั่งทะเล เป็นการทดสอบที่จำกัดเวลาโดยต้องทำการทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง

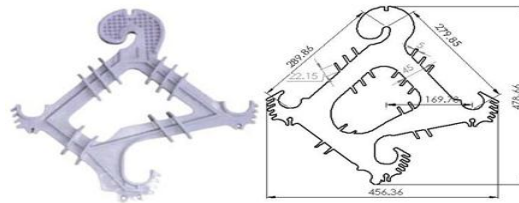
ลักษณะการทดสอบคือ ติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ไว้ในห้องทดสอบ จากนั้นจึงป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเคเบิลสเปเซอร์ตลอดการทดสอบ และมีการจำลองสภาวะอากาศที่มีหมอกไอเกลือ ฝน แสง ความร้อน ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวประยุกต์จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC Publ. 61109 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดการทดสอบด้วยพหุความเครียด

ข้อกำหนด	มาตรฐาน	ค่าที่ใช้งานจริง
ขนาดห้องทดสอบสูงสุด (m ³)	ไม่ระบุ	9
ระยะเวลาในการทดสอบ (h)	5000	1000
แรงดันทดสอบ (kV)	ไม่ระบุ	18.6
อัตราการไหลของน้ำ (l/m ³ h)	0.4±0.1	0.5
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (kg/m ³)	7	7
ขนาดของละอองหมอก (μm)	5-10	8
อุณหภูมิทดสอบสูงสุด (°C)	50	45-55
อุณหภูมิปกติ (°C)	15-20	อุณหภูมิต้อง
ระดับการป้องกันกระแสรั่ว	1	1
จำนวนชิ้นงานการทดสอบ	ไม่ระบุ	5

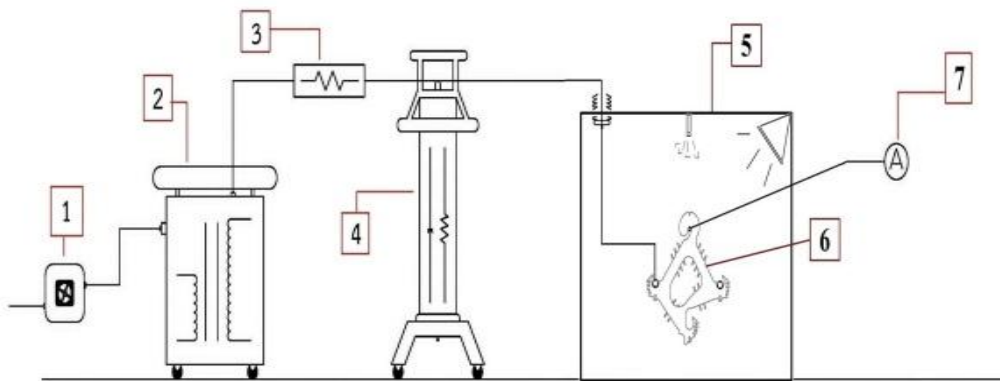
2.1 เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบสำหรับ
เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบใน เป็น เคเบิล
สเปเซอร์ ชนิด โพลีเอทิลีน ดังภาพที่ 4 ที่ใช้ในระบบ

จำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเคเบิลสเป
เซอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นชิ้นงานใหม่ที่ยังไม่ผ่าน
การใช้งานส่วนภูมิภาค โดยเคเบิล



ภาพที่ 4 เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

3. วงจรการทดสอบ



ภาพที่ 5 วงจรการทดสอบ

จากวงจรการทดสอบในภาพที่ 5 อุปกรณ์หลัก
ที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยมี
รายละเอียดดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 คือ Variac 220 AC.

หมายเลข 2 คือ หม้อแปลง 220/22000

หมายเลข 3 คือ ความต้านทาน 15 เมกะโอห์ม

หมายเลข 4 คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์ อัตราส่วน
1036.11:1 AC.

หมายเลข 5 คือ ห้องทดสอบพหุความเครียด(ห้อง
แชมเบอร์)

หมายเลข 6 คือ เคเบิลสเปเซอร์

หมายเลข 7 คือ แอมป์มิเตอร์

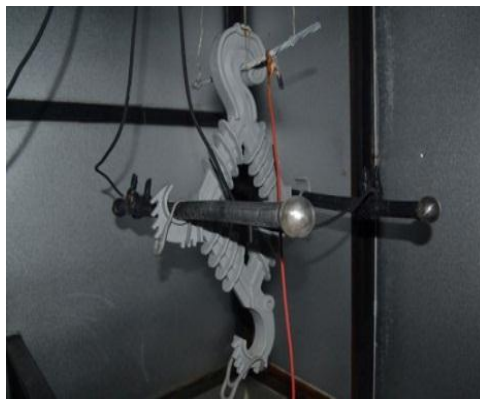
ซึ่งจากภาพที่ 5 จะประกอบไปด้วย หม้อแปลง
ปรับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันทางด้านแรงต่ำตามที่
ต้องการ ต่อเข้ากับหม้อแปลงขนาด 220/22000
เพื่อที่จะได้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ 18 กิโลโวลต์อาร์
เอ็มเอส ต่ออนุกรมกับความต้านทานขนาด 15 เม
กะโอห์ม เพื่อจำกัดกระแสที่ไหลในวงจรเพื่อไม่ให้สูง
เกินไปและป้องกันกรณีกระแสลัดวงจรเข้าสู่หม้อ
แปลง และต่อขนานเข้ากับโวลต์เตจดีไวเดอร์ จากนั้น
นำไปต่อเข้ากับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ตัวเคเบิลสเปเซอร์
ซึ่งจะติดตั้งตามแบบการใช้งานจริงอยู่ในห้องทดสอบ

พหุความเครียด ซึ่งห้องทดสอบนี้อาศัยการทำงานอัตโนมัติโดยใช้บอร์ด Arduino Mega2560 เป็นตัวควบคุมการทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ จากนั้นจะใช้แอมป์มิเตอร์วัดกระแสที่ไหลผ่านตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์

4. การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์

เคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ทดสอบ ชนิด โพลีเอทิลีน จะถูกติดตั้งในลักษณะแขวนและใช้สายเคเบิลวางพาดบนจุดรองรับสายของเคเบิลสเปเซอร์แล้วยึดสาย

เคเบิลติดกับสเปเซอร์โดยใช้ลวดกลมรัดสาย จากนั้นใช้สาย THW เชื่อมระหว่างสายเคเบิลกับตัวนำที่บุขิง และสุดท้ายต่อสาย THW ต่อกับสายกราวด์ของเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อใช้วัดกระแสรั่วไหลตามผิวระหว่างการทดลอง การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ในการทดสอบสิ่งเปราะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ในห้องทดสอบ

5. วิธีการดำเนินการทดสอบ

การทดสอบเคเบิลสเปเซอร์ด้วยสิ่งเปราะเปื้อนในการทดสอบใช้เคเบิลสเปเซอร์ 1 ตัว โดยจะป้อนแรงดันให้กับเคเบิลสเปเซอร์โดยตรง 2 เฟส ป้อนเข้ากับสายเคเบิลผ่านจุดรองรับสายทั้ง 2 ข้างของเคเบิลสเปเซอร์ ดังภาพที่ 4 ข้างต้นเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจในวิธีดำเนินการทดสอบจึงแสดงเป็นลำดับดังนี้

1. เมื่อติดตั้งเคเบิลสเปเซอร์ในห้องทดสอบเรียบร้อยแล้วจึงผสมเกลือ (NaCl) ลงในถังที่เตรียมไว้ ตามความเข้มข้นที่กำหนด
2. จ่ายแรงดันทดสอบขนาด 18.6 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันเฟสของระบบ 22 กิโลโวลต์

ตารางที่ 3 รอบเวลาการทดสอบพหุความเครียด

ช่วงระยะเวลา(ชั่วโมง)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
-----------------------	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----

3. เปิดเครื่องควบคุมเวลาการทำงาน โดยเครื่องควบคุมเวลาการทำงานจะทำงานตามช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละสถานะใน 24 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3 แล้วจะทำงานวนไปเรื่อย ๆ จนครบ 1000 ชั่วโมง
4. จากนั้นก็เฝ้าสังเกตการณ์ตลอดระยะ 1,000 ชั่วโมง เช่น เติมน้ำเกลือ เปิดระบบเมื่อไฟฟ้าดับและสังเกตการณ์เกิดวาบไฟ เป็นต้น ทำการจดบันทึกค่ากระแสรั่วไหล อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ ความชื้นในห้องทดสอบ และถ่ายภาพจริงกับภาพความร้อน โดยเก็บค่าทุก 1 ชั่วโมง
5. เมื่อทำการทดสอบครบตามเวลาที่กำหนด นำค่าที่ได้จากการทดสอบแล้วที่ไปวิเคราะห์ผล

แรงดันทดสอบ													
ฝน													
อุณหภูมิสูงสุด 50° C													
ความชื้น(95%)													
หมอกไอเกลือ													
แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV)													

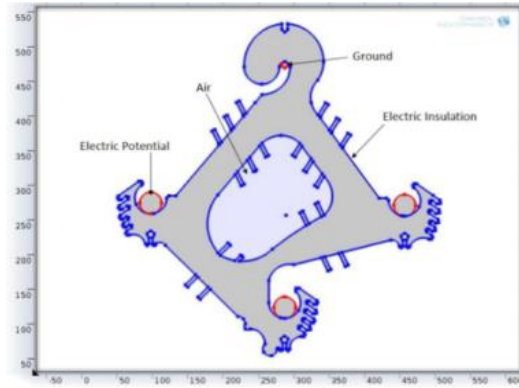
ผลและอภิปราย

หลังจากดำเนินการทดลองในห้องทดสอบพบความเครียดของเคเบิลสเปเซอร์ที่เปลี่ยนตามขั้นตอนเรียบร้อยแล้วขั้นตอนสุดท้ายที่สำคัญที่สุดกานำเสนอผลการทดสอบผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิว ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ

1. ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อุปกรณ์ฉนวนต่าง ๆ เกิดการเสื่อมอายุ และเกิดความเสียหายมากที่สุด จึงได้มีการวิเคราะห์และเปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อแตกต่างของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเคเบิลสเปเซอร์ เมื่อใช้งานจริงในระบบจำหน่ายและเมื่อใช้ในการทดสอบสิ่งเปราะเข็อนสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้โดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL multiphasic Version 4.3b

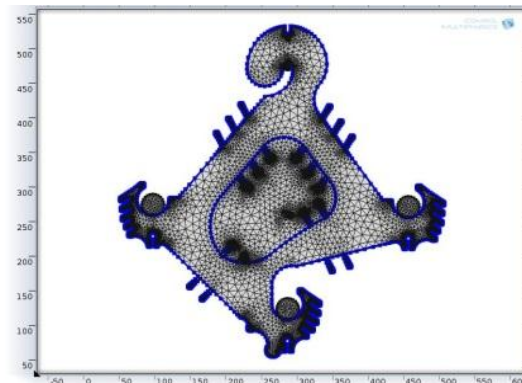
สำหรับการจำลองกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้กับระบบจำหน่าย 3 เฟส 22 กิโลโวลต์ จะแบ่งการจำลองเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่เกิดแรงดันเฟสสูงสุดที่เฟส A, B และ C แรงดันเฟสสูงสุดจะมีค่าแรงดันเท่ากับ $1V_p$ ส่วนเฟสที่เหลือจะมีค่าแรงดัน $0V_p$ และเมื่อ $V_p = 17.963$ กิโลโวลต์ เพื่อให้ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้นจึงกำหนดขนาดสายเคเบิลต่าง ๆ ให้ตรงกับที่ใช้งานจริง ได้แก่ สายดินขนาด 50 ตารางมิลลิเมตร สายเคเบิลขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร กำหนดให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกฉนวนเคเบิลมีค่าเท่ากับเคเบิลสเปเซอร์ คือ 2.3 ส่วนการจำลองกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้า และการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในการทดลองใช้แหล่งจ่าย 1 เฟสต่อเข้ากับสายเคเบิลขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร สายเปลือย และจ่ายให้ กับตำแหน่งเฟส A และ B ของเคเบิลสเปเซอร์เท่านั้นในการจำลองจึงให้แรงดันที่เฟส A และ B เท่ากับ $V = 17.963$ กิโลโวลต์ ในการจำลองมีการกำหนดค่าขอบเขต (Boundary Setting) แสดงดังรูปที่ 7 ส่วนตัวอย่างของ Triangular mesh ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 กำหนดค่าขอบเขตในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและกระแสรั่วไหล

การกำหนดค่าขอบเขตนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน อธิบายดังนี้ เริ่มต้นเป็นการกำหนดเส้นสีฟ้าให้เป็นฉนวนกันความร้อน (Electric Insulation) คือ เคเบิลสเปเซอร์ ส่วนที่ 2 เลือกเส้นขอบของสายเคเบิลส่วนที่เป็นตัวนำ ดึงเส้นวงกลมใหญ่สีแดงตามรูปตั้งค่าเป็นศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential) แล้วกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ ส่วนที่ 3 กำหนด

เส้นขอบของลวดที่ใช้ แขนวเคเบิลสเปเซอร์ดึงเส้นวงกลมเล็กสีแดงตามรูปตั้งค่าเป็นกราวด์ และส่วนสุดท้ายให้กำหนดเป็นค่าของอากาศ ภาพที่ 8 กำหนดค่า Triangular mesh ในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและกระแสรั่วไหล 36758 เอลิ-เมนต์



ภาพที่ 8 กำหนดค่า Triangular mesh ในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและกระแสรั่วไหล 36758 เอลิ-เมนต์

การจำลองลักษณะการกระจายตัวของความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics version 4.3b ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์เป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่ใช้ในการจำลองผลนั้นประกอบด้วย 2

ค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าความนำสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุแต่ละชนิด หรือ ϵ_r (Relative Permittivity) และค่าความนำไฟฟ้า หรือ EC (Electrical Conductivity) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ได้แสดงตามตารางที่ 4 และตารางที่ 5

2. การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ตารางที่ 4 ค่าความนำสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุแต่ละชนิด

ประเภทของวัสดุ	ϵ_r (RelativePermittivity)
high density polyethylene (HDPE)	2.3
อะลูมิเนียม (aluminum)	2.2
อากาศ	1.00058986

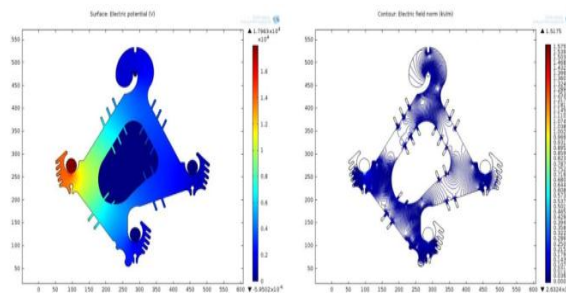
ตารางที่ 5 ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ EC (Electrical Conductivity)

ประเภทของวัสดุ	EC(S/m)
high density polyethylene (HDPE)	(6.3×10^{-14})
อะลูมิเนียม (aluminum)	(3.5×10^7)
อากาศ	(5.12×10^{-5})

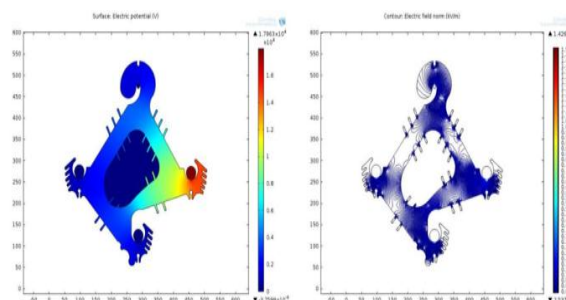
3. ผลการจำลองลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้า

ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของเคเบิลสเปเซอร์สำหรับระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ แสดงดัง

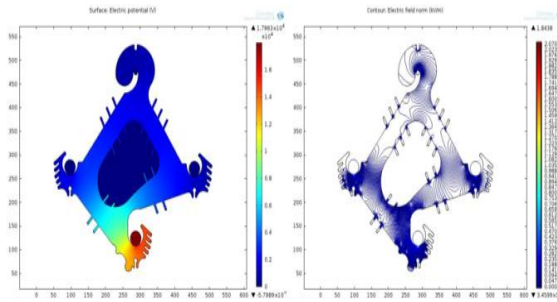
ภาพที่ 9, (ก), (ข) และ (ค) ที่มีแรงดันสูงสุด ส่วนการจำลองการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังภาพที่ 9, (ง)



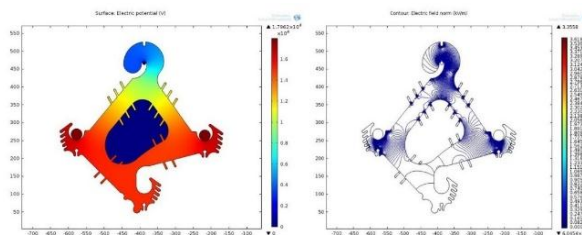
(ก) เฟส A มีค่าแรงดันสูงสุด



(ข) เฟส B มีค่าแรงดันสูงสุด



(ค) เฟส C มีค่าแรงดันสูงสุด



(ง) การทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ (เฟส A และ B มีค่าแรงดันสูงสุด)

ภาพที่ 9 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในการจำลอง

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า บริเวณจุดรองรับสายเคเบิลหรือสายกราวด์นั้นจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นสำหรับการจำลองระบบ 3 เฟส 22 กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่งจุดรองรับสายเฟส A = 1579.41 V/m, B = 1376.32 V/m, C = 2075.92 V/m และตำแหน่งกราวด์ = 1519.37 V/m ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของเฟส C ที่แตกต่างจากเฟส A และ B เกิดจากตำแหน่งของเฟส C อยู่ห่างจากตำแหน่งกราวด์มากกว่าทั้งสองเฟส

จึงทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เฟส C มีค่ามากที่สุดส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่เฟส A และ B มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากระยะห่างของเฟสทั้งสองเทียบกับตำแหน่งกราวด์มีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการจำลองสำหรับงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกราวด์ เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 2 เท่า คือ 3627.25 V/m ส่วนตำแหน่งจุดรองรับสายเฟส A และ B กลับมีค่าลดลงประมาณ 3 เท่า การเปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่ง	ค่าแรงดันที่กำหนด			ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m)				ตำแหน่งความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
	A	B	C	A	B	C	Ground	
ระบบ 3 เฟส 22 kV	1Vp	0Vp	0Vp	1579.41	434.82	1054.62	1375.73	A
	0Vp	1Vp	0Vp	437.66	1376.32	678.93	1519.37	B
	0Vp	0Vp	1Vp	679.64	435.72	2075.92	616.44	C
งานวิจัย	1Vp	1Vp	-	561.77	579.32	-	3627.25	Ground

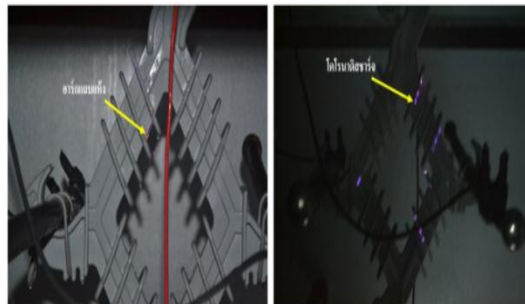
4. ผลการทดลองในห้องทดสอบพหุ ความเครียด

จากการทดลองในห้องทดสอบพหุความเครียด ในช่วงที่อยู่ระหว่างการทดสอบ 1000 ชั่วโมง เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแฉกแห้งขึ้น ซึ่งโคโรนาดีสชาร์จที่เกิดขึ้นจะเป็นลำแสงหรือแถบแสงสีน้ำเงินหรือม่วง ส่วนอาร์กแฉกแห้งนั้นจะเป็นลำแสงหรือแถบแสงสีส้ม ในการทดสอบช่วงแรก ๆ นั้นจะเกิดไม่บ่อยและไม่รุนแรงมากนัก

แต่เมื่อทดสอบที่ระยะเวลามากขึ้น จะเกิดบ่อยและรุนแรงขึ้น โดยเฉพาะบริเวณปีกทั้ง 2 ข้างในช่วง

เวลาของหมอกไอเกลือ เมื่อเกลือเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี จึงทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแฉกแห้งขึ้น การเกิดปฏิกิริยานี้จะทำให้เคเบิลสเปเซอร์เสื่อมสภาพและหมดอายุการใช้งานลงได้

การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแฉกแห้งบนผิวเคเบิลสเปเซอร์ตอนทดสอบในห้องทดสอบพหุความเครียด เกิดจากกระแสรั่วไหลตามผิวเคเบิลสเปเซอร์ เมื่อความหนาแน่นของกระแสตามผิวแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ทำให้ความร้อนเกิดขึ้นตามผิวไม่เท่ากัน จึงเกิดเป็นพื้นที่แห้งไม่พร้อมกันเรียกพื้นที่นี้ว่า แฉกแห้ง

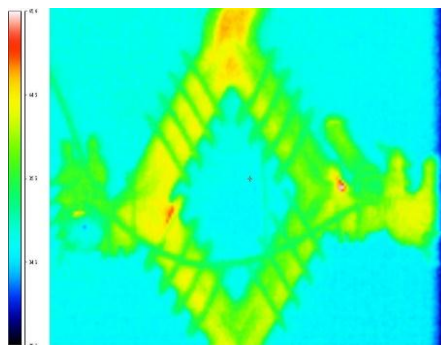


ภาพที่ 10 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแฉกแห้งบนผิวเคเบิลสเปเซอร์

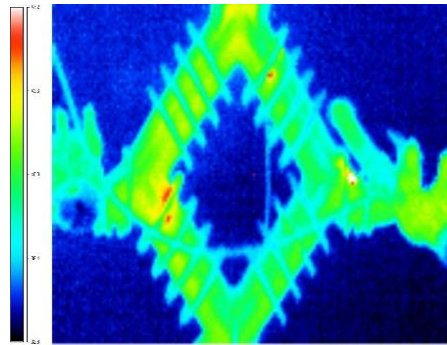
5. การถ่ายภาพความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ

การถ่ายภาพความร้อน คือ การถ่ายภาพความร้อนจะมองไม่เห็นภาพจริง แต่มันจะจับพลังงานรังสีอินฟราเรด ที่ถ่ายทอดออกมาจากวัตถุไปสู่สิ่งแวดล้อมและสร้างภาพแถบสีที่วัตถุที่ร้อนกว่าจะ

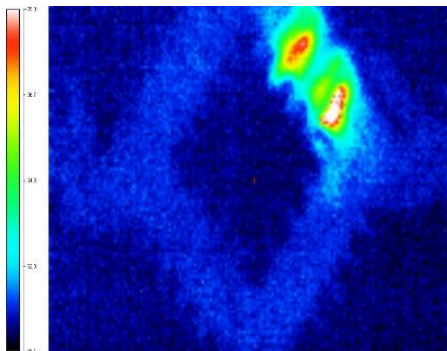
แสดงสีสว่างและวัตถุที่เย็นกว่าจะแสดงสีมืดกว่า พฤติกรรมคล้ายกับแสงสว่างที่มองเห็น ซึ่งสามารถสะท้อนหักเห ดูดซับ และเปล่งแสง ซึ่งระหว่างการทดสอบได้มีการถ่ายภาพความร้อนที่เกิดขึ้นกับเคเบิลสเปเซอร์ที่กำลังทดสอบในห้องทดสอบพหุความเครียด ภาพถ่ายความร้อนแสดงดังภาพที่ 11



(ก) ภาพถ่ายความร้อนจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต



(ข) ภาพถ่ายความร้อนจากฝน



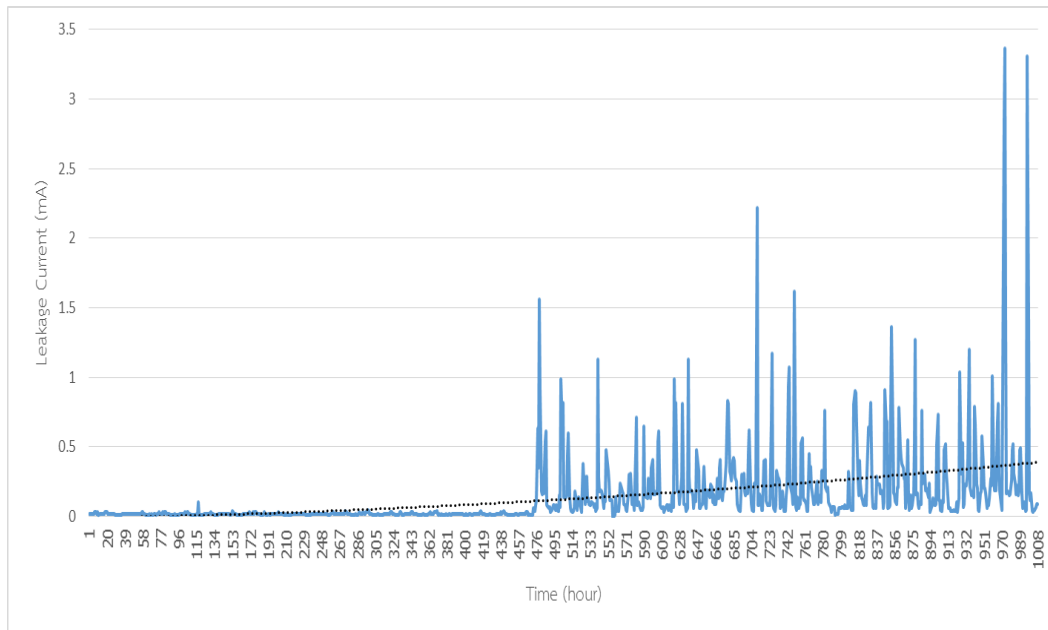
(ค) ภาพถ่ายความร้อนจากหมอกไอเกลือ

ภาพที่ 11 แสดงภาพถ่ายความร้อนแต่ละสถานการณ์ทดสอบ

จากภาพที่ 11 เป็นการแสดงภาพถ่ายความร้อนของแต่ละสถานะสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ แสงอัลตราไวโอเล็ต อุณหภูมิ ฝน และหมอกไอเกลือ ภายใต้การจ่ายแรงดันไฟฟ้า 18.6 กิโลโวลต์ ตลอดระยะเวลา จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณที่เกิดความร้อนจะมีความเข้มของแสงที่แตกต่างกัน บริเวณที่มีความร้อนที่สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ พบว่ามีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณนั้นมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งจะเกิดเบรกดาวน์ของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จขึ้น และถ้าบริเวณพื้นที่แถบแห้งหลาย ๆ ส่วนอยู่ใกล้กันแล้วโอกาสที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย

6. กระแสรั่วไหลตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์

จากการทดสอบในงานวิจัยนี้การศึกษาลักษณะสนามไฟฟ้าบนเคเบิลสเปเซอร์ไฟฟ้าแรงสูง 22 กิโลโวลต์ชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงภายใต้สภาวะเปราะเปื้อน โดยการจำลองสภาวะต่าง ๆ จนทำให้มีกระแสรั่วไหลออกมาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ผิวได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าตลอดเวลา การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลตามผิวจึงจำเป็นต้องบันทึกค่าทุก ๆ 1 ชั่วโมงตลอดเวลาการทดสอบที่ 1,000 ชั่วโมง (42 วันโดยประมาณ) โดยใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบดิจิตอลมิเตอร์ ซึ่งจากการบันทึกผลปริมาณกระแสรั่วไหลนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟได้แสดงดังภาพที่ 12

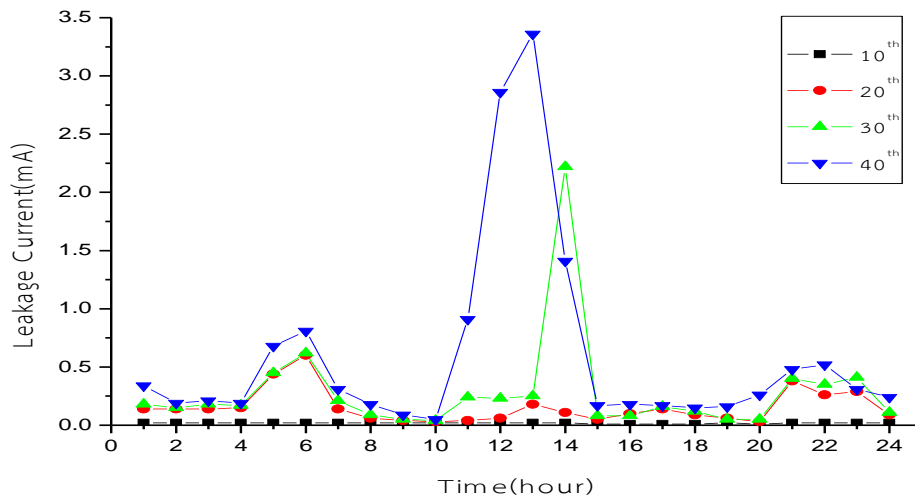


ภาพที่ 12 กระแสรั่วไหลจากการทดสอบห้องสิ่งเปราะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer)

จากภาพที่ 12 กราฟกระแสรั่วจากการทดสอบในห้องสิ่งเปราะเปื้อนของเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer) โดยกราฟนี้เป็นการทดสอบเป็นระยะเวลาที่ 1,000 ชั่วโมง (ประมาณ 42 วัน) มีสภาวะการทำงานของระบบภายใน 24 ชั่วโมง คือ อัลตราไวโอเลต, ความร้อน, ความชื้น, ฝน และ หมอกไอเกลือ แสดงในตารางที่ 3 จากการทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมงพบว่าค่ากระแสรั่วไหลจะแบ่งเป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกตั้งแต่ 1-460 ชั่วโมงแรกค่ากระแสรั่วไหลของเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer) จะมีค่าประมาณ 0.02 มิลลิแอมป์ และช่วงที่สองจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 450-1,000 ชั่วโมง ค่ากระแสรั่วตามผิวที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นลงมีค่าสูงสุดประมาณ 3.36 มิลลิแอมป์ และต่ำสุดประมาณ 0.02 มิลลิแอมป์ เนื่องจากสภาวะของการทดสอบค่าที่อยู่ในสภาวะ

หมอกไอเกลือ และฝน จะมีค่ากระแสรั่วตามผิวสูงและค่ากระแสรั่วตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดสอบ เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนในการทดสอบเป็นสิ่งเปราะเปื้อนจากหมอกไอเกลือ ทำให้เมื่อทำการทดสอบที่ระยะเวลามากขึ้น ทำให้มีการสะสมเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วตามผิวได้มากขึ้น

ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับทฤษฎีและงานวิจัยพบว่า การทดสอบเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer) ทดสอบระยะเวลาที่นานขึ้นทำให้กระแสรั่วไหลตามผิวมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ และการสะสมของสิ่งเปราะเปื้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสรั่วไหลตามผิวมากขึ้น ดังนั้นจึงนำค่าของกระแสรั่วไหลในวันที่ 10, 20, 30 และ 40 ของการทดสอบมาเปรียบเทียบกัน

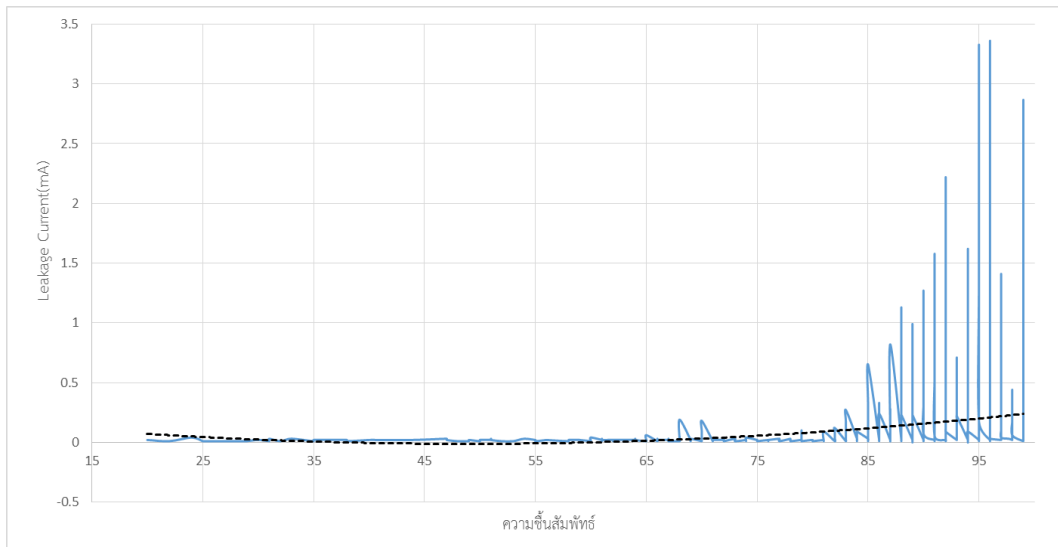


ภาพที่ 13 กระแสรั่วไหลจากการทดสอบพหุความเครียดของเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer)

จากภาพที่ 13 ในช่วง 2 ชั่วโมงแรก ห้องทดสอบได้ทำงานในสภาวะรังสีอัลตราไวโอเลต ค่ากระแสรั่วไหลจะมากเนื่องจากเป็นผลจากสภาวะหมอกไอเกลือก่อนหน้า ต่อมาช่วงชั่วโมงที่ 2-4 สภาวะความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต ทำให้มีค่ากระแสรั่วไหลลดลงเนื่องจากผิวของเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer) แห่งทำให้กระแสรั่วน้อยลง ชั่วโมงที่ 4-6 เป็นสภาวะฝนและรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งทำให้กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นเพราะว่าทำให้ผิวของเคเบิลสเปเซอร์เปียกและเป็นหยดน้ำทำให้ระยะรั่วของเคเบิลสเปเซอร์ลดลงทำให้มีกระแสรั่วมาก ช่วงเวลาที่ 6-8 สภาวะความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต ที่มีสภาวะความร้อนเพิ่มมากขึ้นทำให้ผิวของเคเบิลสเปเซอร์แห้งและยากต่อการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งได้ จึงเป็นผลทำให้ค่ากระแสรั่วไหลมีค่าน้อย รวมไปถึงช่วงเวลา 8-10 ห้องทดสอบพหุความเครียดอยู่ในสภาวะอุณหภูมิ, ความชื้น ซึ่งก็เป็นผลทำให้อุณหภูมิคงที่ ทำ

ให้เคเบิลสเปเซอร์มีค่าขนาดของกระแสรั่วไหลน้อยมากเช่นกัน แต่เมื่อถึงช่วงเวลาที่ 10-14 ที่ทำการฉีดพ่นหมอกไอเกลือ ทำให้ผิวของเคเบิลสเปเซอร์เปียกและเกิดการสะสมของไอเกลือตลอดเวลา ค่ากระแสรั่วไหลจึงเพิ่มขึ้นสูงกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ ส่วนช่วงชั่วโมงที่ 14-16 กลับสู่สภาวะรังสีอัลตราไวโอเลต ต่อมาช่วงชั่วโมงที่ 16-18 เป็นสภาวะความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลต ช่วงชั่วโมงที่ 18-20 ทำให้มีค่ากระแสรั่วไหลลดลงเนื่องจากผิวของเคเบิลสเปเซอร์แห้ง ช่วงชั่วโมงที่ 20-24 สภาวะหมอกไอเกลือทำให้กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ขนาดของค่ากระแสรั่วไหลตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่าสภาวะหมอกไอเกลือ และสภาวะฝนมีผลอย่างมากต่อค่ากระแสรั่วตามผิวทำให้กระแสรั่วตามผิวมีค่าสูงขึ้น และการสะสมของคราบเกลือที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ทำการทดสอบก็ส่งผลให้ขนาดของกระแสรั่วมีค่าสูงขึ้นได้



ภาพที่ 14 กระแสรั่วไหลกับความชื้นสัมพัทธ์ของเคเบิลสเปเซอร์ (Cable Spacer)

จากภาพที่ 14 เมื่อนำค่ากระแสรั่วไหลกับความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 100 พบว่าค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับเคเบิลสเปเซอร์ จะเกิดขึ้นในสถานะที่มีความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 85 ขึ้นไป โดยสภาพความชื้นนี้ ยังทำให้ค่ากระแสรั่วไหลตามผิวมีค่าสูงขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น และค่ากระแสรั่วไหลสูงสุดอยู่ที่ความชื้นร้อยละ 95 วัดค่ากระแสรั่วไหลได้ 3.31 มิลลิแอมป์ ขณะความชื้นที่ร้อยละ 95 แต่ผิวของเคเบิลสเปเซอร์มีความเปียก เพราะว่ามีหยดน้ำเกาะอยู่จึงทำให้ค่ากระแสสูงมาก แต่ในขณะที่ความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้น้ำได้ระเหยไปรวมกันขึ้นบรรยากาศ ความชื้นจึงเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันทำให้ผิวของเคเบิลสเปเซอร์แห้ง ทำให้ค่ากระแสรั่วไหลต่ำกว่า แต่บางช่วงยังมีสถานะของหมอกไอเกลืออยู่เลยทำให้ความชื้นมีมากขึ้น

สรุป

มีเนื้อหาเกี่ยวกับการทดสอบในห้องสิ่งเปราะเข็งของเคเบิลสเปเซอร์ ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ภายใต้การทดสอบในสถานะหมอกไอเกลือ, น้ำฝน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

และกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นบนผิวเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อประเมินว่าเคเบิลสเปเซอร์ชนิดนี้สามารถทนต่อผลกระทบจากความเครียดสนามไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดจากการจำลองสถานะต่างๆ ที่ส่งผลให้กับเคเบิลสเปเซอร์มีการนำเสนอวิธีการดำเนินงานออกแบบ และสร้างห้องทดสอบพหุความเครียด รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในห้องทดสอบ และขั้นตอนการทำงานในสถานะต่าง ๆ ของห้องทดสอบ เพื่อวัดค่ากระแสรั่วไหลตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ และการนำเสนอผลการจำลองความเครียดทางสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการจำลอง COMSOL Multiphysics version 4.3b ผลการทดสอบพหุความเครียดของสถานะต่าง ๆ การวิเคราะห์กระแสรั่วไหล และผลการวัดค่าความเปราะเข็งตามผิวเคเบิลสเปเซอร์ ซึ่งผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า พบว่าบริเวณจุดรองรับสายเคเบิลและตำแหน่งกราวด์จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ ของเคเบิลสเปเซอร์ สำหรับการจำลองในงานวิจัยจะพบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่งกราวด์

สำหรับผลการทดสอบพบความเครียดเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าการวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหลตามผิวก็พบว่าขนาดของกระแสรั่วมีค่าสูงอยู่ในช่วงที่มีการจ่ายหมอกไอเกลือ สภาวะฝนโดยที่สภาวะฉีดพ่นหมอกไอเกลือทำให้เกิดค่ากระแสรั่วไหลสูงที่สุด อีกทั้งยังช่วยทำให้เกิดการอาร์กแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จได้ง่ายเนื่องจากการสะสมของคาบหมอกเกลือบนผิวสเปเซอร์ ส่วนในช่วงสภาวะความร้อนและรังสีอัลตราไวโอเลตนั้นขนาดของกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจะมีค่าคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ทำการทดสอบก็จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นนั้นไม่เปลี่ยนแปลงมากเท่าไรนัก

เอกสารอ้างอิง

กิตติกร มณีสว่าง. การประเมินสมรรถนะการใช้งาน

ถ้วยฉนวนไฟฟ้าชนิดต่างๆ ใน พื้นที่ซึ่งมีมลภาวะไอเกลือรุนแรง. **ไฟฟ้าสาร** 2554. 18, 44-9.

คเชนทร์ วุฒิเมธารักษ์, ศิริวัฒน์ จันทกัลป์ยกุล, วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ และพีรพล จิราพงศ์. (2554). ทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 507. ใน **เอกสารการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 3**. (หน้า 119-22).

ชำนาญใจประดิษฐ์ธรรม และชัชชัย อุทัยวสิน. (2014). การวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าและทดสอบหาผลกระทบการเกิดวาปไฟตามผิวของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยฉนวนระบบ 115kV ในสภาวะขอบเขตไม่สมมาตร. ใน **เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. (หน้า 17-20).

ปรัชญา แก้วจันทิก. (2556). การเสื่อมอายุของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่น

สูงสำหรับ ระบบจ่าย หน่วย ภายใต้การทดสอบ

เร่งการเสื่อมอายุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2556. (หน้า 15-99)

วีราพล อินคต, วสวัตต์ มณีรัตน์ชยะกูร, อภิสิทธิ์ พุงโปรง และวิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ. (2556).

การศึกษาและทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า และเคเบิลสเปเซอร์ในสภาวะแห้ง. ใน **เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5**. มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สำรวจ สังข์สะอาด. (2549). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**.

คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

A study of the correlation of leakage current.

(2011). **humidity and temperature of 25 kV insulators in urban and rural areas**.

Article from <https://www.researchgate.net/publication/254043617>.

C.Volat, M. Farzaneh. (2005). Three-Dimensional Modeling of Potential and Electric- Field Distributions Along an EHV Ceramic Post Insulator Covered With Ice. Part II: Effect of Air Gaps and Partial Arcs. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 20(Issue 3), 2014-21.

Fernín P. Espino-Cortés, Isaías Ramírez-Vázquez, Pablo Gómez. (2014). **Electric Field Analysis of Spacer Cable Systems under Polluted Conditions**. Electrical Insulation. Conference Philadelphia Pennsylvania. USA. Article from <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6869382&newsearch=true&queryText=Electric%20Field%20Analysis%20of%20Spacer%20Cable%20Systems%20under%20Polluted%20Conditions>.

- G. Duyan, X. Guizhi, Y. Hongli, Y. Shuo, Y. Qingxin, Y. Weili. (EMBS 2008). Modeling of Electromagnetic Environment of Transmission Lines for Studying Effect of ELF-EMF. Engineering in **Medicine and Biology Society 2008, 30th Annual International Conference of the IEEE**. August 20-25 2008, 1331-1334.
- Isaias Ramírez Vázquez, FerminP. EspinoCortés. (OCTOBER 2012). Electric-Field Analysis of Spacer Cable Systems for Compact Overhead DistributionLines. **IEEE TRANSACTIONSONPOWERDELIVERY**. VOL.27(NO.4). Article from <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6298064&queryText=ElectricField%20Analysis%20of%20Spacer%20Cable%20Systems%20for%20Compact%20Overhead%20Distribution%20Lines&newsearch=true>.
- Kaewchanthuek P, Rawonghad R, Marungsri B. (2014). Ageing Deterioration of HighDensity Polyethylene Cable Spacer under Salt Water Dip Wheel Test. WorldAcademy of Science. Engineering and Technology International Journal of Electrical. **Electronic Science and Engineering**. Vol.8.
- Paul Taklaja, Ivar Kiitam, Jaan Niitsu, Joni Klüss and Petri Hyvönen. (2015). Electric field distribution in glass and porcelain pin insulators. In: Environment and Electrical Engineering (EEEIC). **IEEE 15th**. International Conference on.
- S. Chakravorti, H. Steinbigler. (2000). Boundary Element Studies on Insulator Shape and Electric Field around HV Insulators with or without Pollution. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. Vol.7 (Issue 2), 69–176.
- Vassiliki, T. Kontargyri, Ioannis. F. Gonos, Ioannis, A. Stathopoulos et al. (2006). Simulation of the Electric Field on High Voltage Insulator using the Finite Element Method. In **2006,12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation**, 373.
- Youping Tu, Hui Zhang, Jingjing Chen, Conghui Chen. (2013). Influences of Electric-Field Distribution Along the String on the Aging of Composite Insulators. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 28(Issue 3).

การศึกษาและทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยชนิดสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ

The Study and Testing of Composite Insulator for 22 kV Deterioration System under Polluted Conditions by Wheel Test

ชยณัฐ ตูย์ดี¹, ภัทรชนก แนนัน² และ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ^{3*}

Chayanut Tuidee¹, Puttarachanok Nawnun² and Wichet Thipprasert^{3*}

^{1,2,3} มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่

^{1,2,3} Rajamangla University of Technology Lanna Chiang Rai

* Corresponding author e-mail: wichet_thip@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ความบกพร่องของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าอันเนื่องจากการเสื่อมสภาพ ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อระบบ งานวิจัยนี้การศึกษาถึงลักษณะการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์สำหรับระบบส่งจ่าย 22 กิโลโวลต์ ทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน ไออีซี 62730 ทดสอบภายใต้สภาวะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อโดยกำหนดพิกัดแรงดันกระแสสลับ 17.96 กิโลโวลต์ ให้กับอิเล็กโทรด โดยการนำโซเดียมคลอไรด์มาใช้เป็นสารละลายปนเปื้อนที่มีค่าความนำ 3.50 มิลลิซีเมนส์/เซนติเมตร ผลการทดสอบพบว่าความร้อน 38.4-50.5 องศาเซลเซียส เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลจำนวนมากและยังส่งผลเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวฉนวนลูกถ้วยฉนวน เช่น การเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรืออาร์กแถบแห้งขึ้นในระหว่างการทดสอบ ส่งผลให้ความเป็นฉนวนของลูกถ้วยฉนวนลดลง นำผลที่ได้จากการทดสอบจริงมาวิเคราะห์และศึกษาถึงการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ เพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าและการเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าให้เหมาะสมกับพื้นที่และสภาพการใช้งาน เพื่อลดการสูญเสียที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพและส่งผลกระทบต่อระบบ

คำสำคัญ: มาตรฐานไออีซี 62730 ,กระแสรั่วไหล,โคโรนาดีสชาร์จ

Abstract

The electrical insulator is an important part on stability of the power system. The defects of electrical insulators had a cause from a deterioration, which strongly affected on power system. According to this problem, this research aimed to study a characteristic of deterioration of **composite** insulators for power transmission 22 kilo voltage by designing and creating a standard test set IEC Publ. 62730 under polluted conditions by wheel test and setting AC voltage 17.96 kilo voltage to electrodes by using Sodium Chloride as a polluted with conductivity 3.50 Millisiemens / Centimeters. From the testing results showed that the heat from 38.4 to 50.5 degrees Celsius was a main cause of leakage current and also affected on changing the surface of electrical insulators. As well, the corona discharge or the Dry band up could occur while testing and could be a result on reducing the insulator. The results were analyzed and studied the deterioration of **composite** insulators as a guideline for maintenance the electrical power system and electrical insulators and for selecting the electrical insulators with the suitable conditions to reduce the causes of deterioration and the effects on the power system.

Keywords: Standard IEC 62730, Leakage Current, Corona Discharge

บทนำ

ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าถือเป็นส่วนประกอบสำคัญต่อการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ในสภาวะใช้งานจะต้องทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ทุกรูปแบบต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ความร้อน และปฏิกิริยาเคมี (สำรวย สังข์สะอาด, 2549) ซึ่งพื้นที่ที่มีสภาวะไอเกลือรุนแรงหรือในบริเวณที่มีการสะสมของสิ่งปนเปื้อนผงฝุ่นหรือละอองของสารเคมีจากโรงงานอุตสาหกรรมมักมีโอกาสที่จะเกิดการวาวไฟตามผิวของฉนวนไฟฟ้า เมื่อสภาพผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเริ่มอยู่ในสภาพอากาศที่มีละอองน้ำจะพบว่ากระแสรั่วไหลผ่านผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าลงสู่ระบบกราวด์จะมีปริมาณที่สูงขึ้น และกระแสรั่วนี้จะสร้างความร้อนบนเส้นทางที่ไหลผ่านทำให้เส้นทางนั้นแห้ง จึงทำให้ผิวฉนวนในบริเวณนั้นหยุดการนำไฟฟ้า ในขณะที่พื้นที่ใกล้เคียงบางส่วนยังไม่แห้ง จึงทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณที่แห้งนี้สูงมาก ส่งผลทำให้เกิด โคโรนาดีสชาร์จและเกิดการอาร์คหรือสปาร์ค

นอกจากสิ่งปนเปื้อนจากมลภาวะจะทำให้ค่าความเป็นฉนวนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าลดลงแล้ว ยังส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเองด้วย กล่าว คือ สิ่งปนเปื้อนสามารถทำให้ผิวฉนวนถูกทำลายจากความร้อนเนื่องจาก โคโรนาดีสชาร์จ การอาร์คหรือสปาร์คและส่งผลทำให้เกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าขึ้น และส่งผลกระทบต่อระบบ [2,3]

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ออกแบบและสร้างชุดทดสอบการเสื่อมสภาพลูกถ้วยฉนวนชนิดเนื้อสารสังเคราะห์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ (อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC Publ. 62730) เพื่อการศึกษาคุณลักษณะและทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ของยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ด้วยสภาพแวดล้อมและภูมิอากาศของประเทศไทยที่อยู่ใกล้กับพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่มีสภาวะไอเกลือ

รุนแรงหรือในบริเวณที่มีการสะสมของสิ่งปนเปื้อนผงฝุ่นหรือละอองของสารเคมีจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEC Publ. 62730 ต่อไป

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ จำเป็นอย่างยิ่งต้องรู้ถึงคุณสมบัติต่างๆ ของยางซิลิโคน โครงสร้างทั่วไปของยางซิลิโคน ลักษณะการเสื่อมสภาพสำหรับใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโดยอธิบายรายละเอียด

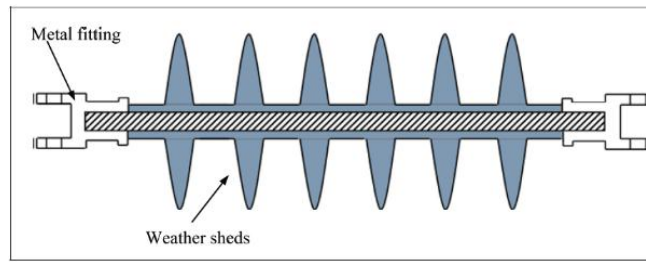
1. ลูกถ้วยฉนวน

ลูกถ้วยฉนวนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับสายไฟ ทำหน้าที่เป็นฉนวนและป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟรั่วลงดินหรือลัดวงจรลงดิน เพราะถ้าปริมาณกระแสที่รั่วไหลมีจำนวนมาก อุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายก็จะตัดวงจรออก ทำให้การจ่ายไฟฟ้าหยุดชะงัก ลูกถ้วยฉนวนจึงมีความสำคัญตราบดีที่ยังมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปตามสายเหนือดิน

ลูกถ้วยเนื้อสารสังเคราะห์ (Composite หรือ Non Ceramic) มี คุณสมบัติ ผิวไม่เปียกน้ำ (Hydrophobicity) ได้แก่ Silicone rubber, Ethylene propylene rubber(EPR) น้ำหนักเบา ทนต่อสภาวะเปรอะเปื้อน ลูกถ้วยฉนวนชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศ เพราะยังไม่มั่นใจในเรื่องคุณภาพและอายุการใช้งาน จะมีข้อใช้ในการศึกษาวิจัย และการทดลองเป็นส่วนมาก (สำรวย สังข์สะอาด, 2549)

2. โครงสร้างพื้นฐาน (Hillborg, H. C., and Gedde, U. W., 1999),(Khan, Y. Z., Al-Arainy, A. A., Malik, N. H. and Qureshi M. I., 2006)

ลูกถ้วยฉนวนประกอบด้วย 3 ส่วน คือ



ภาพที่ 1 โครงสร้างลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์

2.1 แกนลูกถ้วย (fiber reinforced plastic: FRP core) มีส่วนประกอบของใยแก้วและยางสำหรับเสริมใยแก้ว โดยมียางสำหรับเสริมใยแก้วประมาณร้อยละ 70 -75 ของน้ำหนักใยแก้วทั้งหมด เส้นใยแก้วที่เป็นส่วนผสมของแกนลูกถ้วย มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-20 ไมโครเมตร

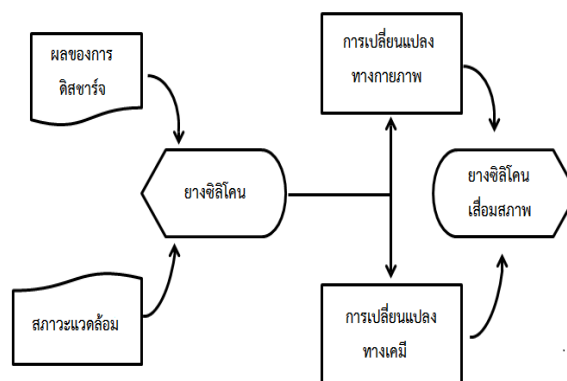
2.2 Metal fittings เป็นวัสดุโลหะประกอบกับแกนลูกถ้วย เป็นวัสดุโลหะประกบกับแกนลูกถ้วยทั้งสองด้านเพื่อใช้เป็น โครงสร้างรับน้ำหนัก

2.3.ปีกลูกถ้วย (weather sheds) วัสดุที่ใช้ในการผลิตปีกลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ มีหลายชนิด เช่น โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (poly tetra fluoro ethylene : PTFE) เทฟลอน (teflon) ยางอีพอกซี (epoxy resins) โพลีเอทิลีน (polyethylene: PE)

คอนกรีตพอลิเมอร์ (polymer concretes) ยางเอทิลีน โพรพิลีน (ethylene propylene elastomers) และ ยางซิลิโคน (silicone elastomers) ซึ่งในวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

3. การเสื่อมสภาพของยางซิลิโคน (Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R., and Kumagai, S., 2006)

การใช้ลูกถ้วยฉนวนเป็นเวลานานต้องมีการเสื่อมสภาพทางฉนวนซึ่งเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น ความร้อนและความเครียดทางไฟฟ้า บางกรณีการเสื่อมสภาพของยางซิลิโคนเกิดจากสภาวะแวดล้อมกันเช่น ความชื้น รังสี และ ความร้อนจากทางกลต่างๆ



ภาพที่ 2 กระบวนการเสื่อมสภาพของยางซิลิโคน

เมื่อลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ถูกนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง ภายใต้สภาพอากาศและสิ่งแวดลอมแบบต่างๆ เป็นเวลานาน การ

เปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติต่างๆ ของยางซิลิโคนจะเกิดขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ อาจจะเป็นการ

เปลี่ยนแปลงทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเคมี การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะนำไปสู่ปัญหาการล้มเหลวทางไฟฟ้าและทางกลของลูกถ้วยเนื้อสารสังเคราะห์ที่ใช้ ทำนวน การเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้เรียกว่า “การเสื่อมสภาพ (ageing)” (Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R., and Kumagai, S., 2006)

4. ลักษณะของสิ่งเปราะเปื้อนบนผิวฉนวนสารสังเคราะห์

การเกิดวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากผิวเปราะเปื้อน จะเกิดขึ้นเมื่อสิ่งเปราะเปื้อนเหล่านั้นอยู่ในสภาวะที่เป็ยกขึ้นและความต้านทานที่ผิวของลูกถ้วยฉนวนลดลง ดังนั้นการเกิดวาทไฟตามผิวเนื่องจากความเปราะเปื้อนจึงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อน สิ่งเปราะเปื้อนที่ผิวลูกถ้วยฉนวนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทสารละลายน้ำได้และนำไฟฟ้า กับประเภทสารที่ไม่ละลายน้ำและไม่นำไฟฟ้า ประเภทของสิ่งเปราะเปื้อนแบ่งตามสภาพแวดล้อมที่ลูกถ้วยฉนวนเหล่านั้นใช้งานอยู่ได้ดังนี้

4.1 สิ่งเปราะเปื้อนจากทะเลได้แก่ เกลือ ลูกถ้วยฉนวนที่ใช้งานริมชายฝั่งทะเลและบริเวณใกล้ เคียง (Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R., and Kumagai, S., 2006) ความเปราะเปื้อนชนิดนี้แบ่งเป็น 2 แบบคือความเปราะเปื้อนแบบธรรมดา (Ordinary Pollution) และความเปราะเปื้อนก่อตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid Pollution)

4.2 สิ่งเปราะเปื้อนจากอุตสาหกรรมมีความเปราะเปื้อนจากควันและเขม่าที่ปล่อยออกมาจากปล่องไอเสีย แต่ในปัจจุบันระดับของเขม่าควัน ถูกควบคุมด้วยกฎหมายควบคุมมลพิษและสภาพแวดล้อม ดังนั้นลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในบริเวณนี้จึงไม่ค่อยมีปัญหาหนัก

4.3 สิ่งเปราะเปื้อนจากฝุ่นในบริเวณชนบท ลูกถ้วยฉนวนอาจจะเปราะเปื้อนด้วยทรายหรือดินที่ลม

พัดหอบขึ้นมา ซึ่งจะพบว่าส่วนประกอบของความเปราะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) และเกลือ สัดส่วนของสารดังกล่าวจะเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิประเทศ

5. กระแสรั่วตามผิว (สำรวจ สังข์สะอาด, 2549)

กระแสรั่วเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนง่ายขึ้นการที่ลูกถ้วยฉนวนมีกระแสรั่วไหลอยู่ต่อเนื่อง จะทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนอย่างซิลิโคนได้รับความเสียหาย เป็นผลให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำลดลงและทำให้มีพลังงานสูญเสียอย่างต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อร่วมกับลูกถ้วยฉนวนร้อนขึ้นด้วย โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสรั่วบนผิวลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ประกอบด้วยคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นของวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวน, ปริมาณของสิ่งเปราะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนและลักษณะแวดล้อมของสถานที่ติดตั้งใช้งาน

6. การเสื่อมสภาพจากการดิสชาร์จและการวาทไฟตามผิว (สำรวจ สังข์สะอาด, 2549)

การเกิดวาทไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนที่เปราะเปื้อน สิ่งเปราะเปื้อนที่อยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน อาจมีสารประกอบของเกลือจากทะเล ฝุ่นหรือสิ่งอื่นๆ ซึ่งมีผลให้คุณสมบัติของฉนวนเสื่อมลง

ด้วยสาเหตุนี้จะนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น เมื่อดิสชาร์จที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยฉนวนเกิดการเชื่อมถึงกันก็จะทำให้เกิดการวาทไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวลูกถ้วยฉนวนขึ้น ส่งผลให้มีความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งทำให้ผิวลูกถ้วยฉนวนไม่สามารถทนได้ ผลดังกล่าวจะทำให้ฉนวนอย่างซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพจากวาทไฟและเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ผิวฉนวนซึ่งร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาทไฟและการกัดกร่อนนี้มีส่วนประกอบของคาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยไหม้มากยิ่งขึ้น เพราะคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าจึงเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหาย

ผลของการเสื่อมสภาพของฉนวนลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์จากสภาวะแวดล้อมที่เปรอะเปื้อนและการดิสชาร์จ ยังเร่งให้คุณสมบัติฉนวนที่ผิวของซิลิโคนลดลง ส่งผลให้ผิวของยางซิลิโคนเปียกน้ำและมีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำที่มีความนำไฟฟ้าสูง ผลที่ตามมาคือ ทำให้มีกระแสรั่วตามผิว ส่งผลให้เกิดดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้นบนผิวของลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์

7. ส่วนหนึ่งการศึกษาและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Marungsri et al. (2006) ได้ศึกษาผลกระทบของการเสื่อมอายุที่มีต่อยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์ ด้วยการจำลองสภาวะหมอกเกลือ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน CIGRE WG 15-04 การทดสอบมี 3 ลักษณะ คือ ยางซิลิโคนแบบแห้งทรงกระบอก ลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์แบบปีกตรง และ ชนิดปีกเล็กและปีกใหญ่สลับกัน ซึ่งในการทดสอบภายในเวลา 24 ชั่วโมง จะเปิดหมอกเกลือ 8 ชั่วโมงและอีก 16 ชั่วโมง หมอกเกลือจะถูกปิด ทำการทดสอบทั้งสิ้น 50 รอบ (1 รอบเท่ากับ 24 ชั่วโมง) หลังจากการทดสอบ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพพบว่าบนพื้นผิวของยางซิลิโคนเกิดการสึกกร่อน คุณสมบัติฉนวนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีพบว่า ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบมาตรฐานของยางซิลิโคนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ (Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R., and Kumagai, S., 2006)

Li et al. (2008) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ภาพบนพื้นผิวคุณสมบัติฉนวนที่ลดลงของลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์ที่มีความเปรอะเปื้อน โดยการใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำไปยังลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์และใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์ด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูง เพื่อแบ่งประเภทคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์ตามมาตรฐาน IEC 62073 และ STRI ซึ่งจากการทดสอบสามารถแบ่งประเภทคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ

ออกเป็น 7 ประเภท (Li, C., Huang, X., and Zhao, L. Image., 2008)

Venkatesulu et al. (2010) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาล์วของยางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติมและยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติม (เติมอะลูมินาและอนุภาคของซิลิกา) พบว่า ประสิทธิภาพของยางซิลิโคนที่มีสารตัวเติมชนิดอะลูมินา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่ายางซิลิโคนที่มีสารตัวเติมแบบซิลิกาและดีกว่ายางซิลิโคนที่ไม่มีสารตัวเติมเนื่องจากวัสดุที่มีส่วนผสมของอะลูมินาสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าชนิดอื่นๆ (Venkatesulu, B., and Thomas, M., 2010)

Zhijin Zhang. (2011) ทำการวิเคราะห์ของการสะสมมลพิษและการวาล์วไฟลักษณะลักษณะการเสื่อมอายุของลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์สายส่ง 110 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นความหนาแน่นของเกลือที่สะสม (ESDD) และการสะสมที่ไม่ละลายน้ำความหนาแน่น (NSDD) บนพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของลู่ด้วยฉนวนอัตราส่วนของ ESDD และ NSDD ของพื้นผิวด้านบนที่พื้นผิวที่ต่ำกว่าคือ 0.76 และ 0.46 ภายใต้มลพิษแรงดันวาล์วไฟตามผิวตามธรรมชาติลู่ด้วยฉนวนที่มีมลพิษสูงประมาณ 50% เป็นเหตุผลหลักที่ก่อให้เกิดมลพิษแรงดันวาล์วไฟตามผิวของการปนเปื้อนตามธรรมชาติ (Zhijin Zhang, Xingliang Jiang, 2011)

Paul Taklaja. (2012) การทดสอบลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์เทียบกับลู่ด้วยแก้วเหนียวในที่เปียกชื้นด้วยมลพิษการปนเปื้อนที่เกิดจากอุณหภูมิ พบว่าลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์ดีกว่า ลู่ด้วยแก้วเหนียว(ในสภาวะเปียกความต้านทานและกระแสรั่วไหล)การปนเปื้อนเมื่อเทียบกับลู่ด้วยฉนวนแบบแก้วเหนียว กระแสรั่วไหล ลู่ด้วยฉนวนสารสังเคราะห์จะต่ำกว่าลู่ด้วยฉนวนแบบแก้วเหนียว (Paul Taklaja, Jaan Niitsoo, and Ivo Palu, 2012)

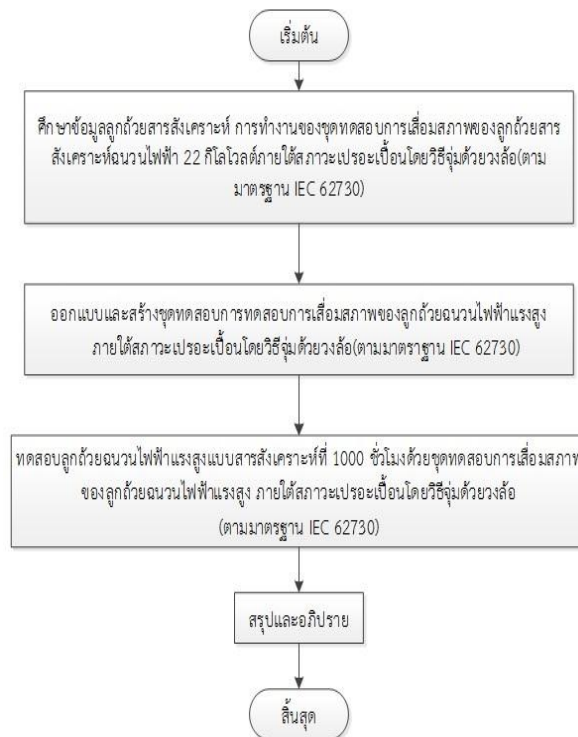
วิธีการวิจัย

เรื่อง การศึกษาและทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ มีขั้นตอนต่างๆ ตั้งแต่เริ่มหาหัวข้องานวิจัย หาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจนกระทั่ง ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยใน

การออกแบบชิ้นงานก่อนนำไปสร้างเป็นชุดทดสอบจริง และจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับจำลองสภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC Publ. 62730 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. แผนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจัดทำงานวิจัย (Flow Chart)



ภาพที่ 3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจัดทำงานวิจัย

กระบวนการทำงานจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทำการศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์และการทำงานของชุดทดสอบการเสื่อมสภาพ ส่วนที่ 2 ทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการเสื่อมสภาพ ตามมาตรฐาน IEC Publ. 62730 และส่วนที่ 3 จึงทำการทดลองภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนด้วยวงล้อทดสอบ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์กระแสรั่วไหล (Leakage current) ศึกษาคุณลักษณะการเสื่อมสภาพของผิวลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ

2. ชุดทดสอบการเสื่อมสภาพ

ชุดทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยคำนึงถึงความแข็งแรงทนทานสามารถรองรับการทดสอบมีความปลอดภัยในการใช้งานจริง ก่อนทำการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมอายุจริงได้มีการออกแบบชุดทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพที่ออกแบบไว้โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

โครงสร้างหลักเป็นส่วนที่สำคัญในการรองรับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพ

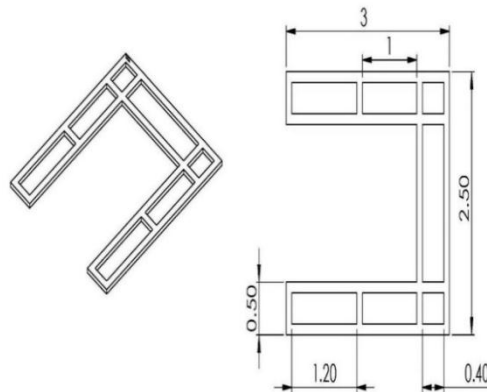
ของลูกถ้วยฉนวนซึ่งชุดทดสอบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

1. โครงสร้างเหล็กฐานล่างเพื่อรองรับโครงสร้างเสา

2. โครงสร้างเสาส่วนบนเป็นชุดที่ติดตั้งบุซึ่งแรงดันสูง

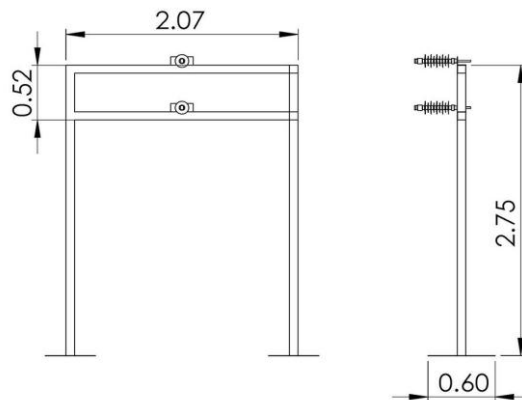
3. ถังที่ติดตั้งลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ที่ทำการทดสอบ

2.1 การออกแบบฐานส่วนล่าง



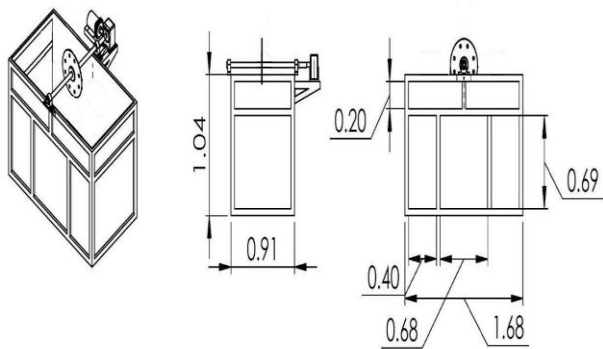
ภาพที่ 4 ขนาดของฐานส่วนล่างที่ได้ออกแบบไว้

2.2 การออกแบบฐานส่วนบน



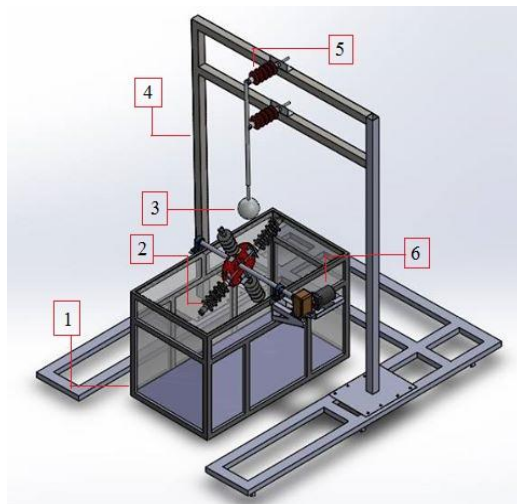
ภาพที่ 5 ขนาดของโครงสร้างเหล็กส่วนบนที่ได้ออกแบบไว้

2.3 การออกแบบส่วนถังน้ำเกลือ



ภาพที่ 6 ขนาดของโครงสร้างถังน้ำเกลือที่ได้ออกแบบไว้

2.4 รายละเอียดโดยรวมของการออกแบบชุดทดสอบ



ภาพที่ 7 ชุดทดสอบแรงการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ที่ได้ออกแบบไว้

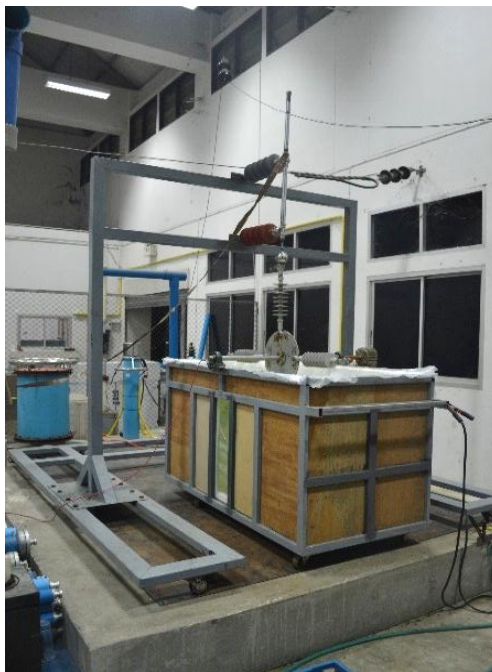
จากรูปที่ 7 ชุดทดสอบแรงการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์มีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ได้ ออกแบบไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดชุดทดสอบแรงการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ที่ได้ออกแบบ

ลำดับที่	อุปกรณ์
1	ถังน้ำเกลือขนาด 1.6 m ³
2	ลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์
3	อิเล็กทรอนิกส์สำหรับป้อนแรงดันให้กับลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบ
4	โครงสร้างเหล็กสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

5	บุชชิงแรงดันสูง
6	มอเตอร์และชุดควบคุมมอเตอร์

2.5 ชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 8 ขนาดของโครงสร้างถังน้ำเกลือที่ได้ออกแบบไว้

3. มาตรฐาน IEC Publ. 62730 (Thai Industrial Standards Institute, 2012)

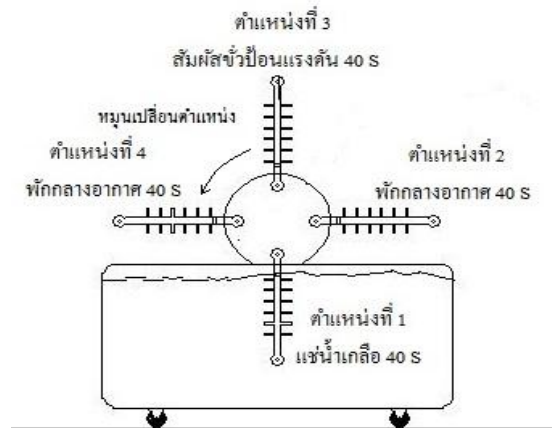
3.1 ข้อกำหนดลูกถ้วย การทดสอบลูกถ้วยฉนวนถูกออกแบบให้มีการทดสอบลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อนซึ่งนำมาจากสายการผลิตโดยตรง

3.2 วิธีการทดสอบ โดยใน 1 รอบ ใช้เวลา 192 วินาที แบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่ง กำหนดให้ระยะเวลาในการทดสอบแต่ละตำแหน่งใช้เวลา 40 วินาที จากนั้นหมุนเป็นมุม 90° และใช้เวลา 8 วินาที เพื่อหมุนเปลี่ยนตำแหน่ง

3.3 ข้อกำหนดการทดสอบ แรงดันที่ใช้ทดสอบ 35 โวลต์/มิลลิเมตร ของระยะตามผิว ความเข้มข้น

ของน้ำเกลือ 1.40 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร \pm 0.06
กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ระยะเวลาในการทดสอบ (1

รอบ = 192 วินาที)



ภาพที่ 9 หลักการทำงานของชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

4. การต่อวงจรที่ใช้ในการทดสอบ

ลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์จะถูกติดตั้งบนชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ทั้ง 4 ตำแหน่ง แสดงในภาพที่ 9 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หากระแสรั่วไหล (Leakage current) บนผิวลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ ประกอบไปด้วย หม้อแปลงปรับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันทางด้านแรงต่ำตามที่ต้องการ ต่อเข้ากับหม้อแปลงขนาด 220/22000 เพื่อที่จะได้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ 18 กิโลโวลต์ ต่ออนุกรมกับความต้านทานขนาด 15 เมกะโอห์ม เพื่อจำกัดกระแสที่ไหลในวงจรเพื่อไม่ให้สูงเกินไปและป้องกันกรณีกระแสลัดวงจรเข้าสู่หม้อแปลง และต่อขนานเข้ากับโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันขาเข้าจากนั้นจะใช้อิเล็กโตรดให้สัมผัสกับลูกถ้วยพอดี

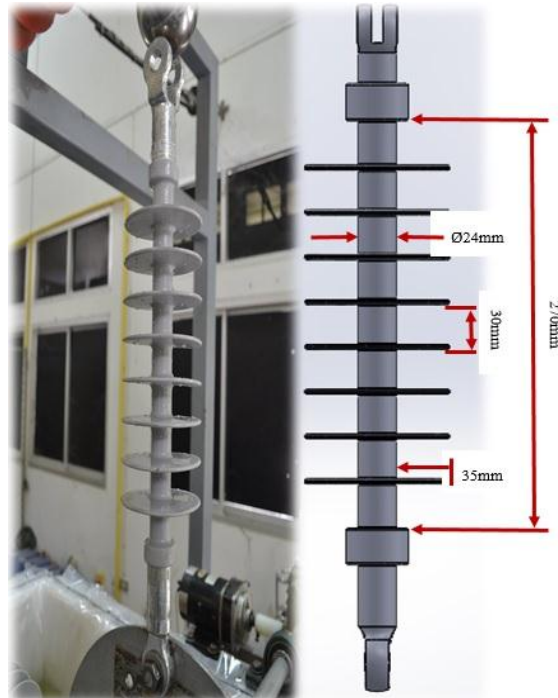
ลูกถ้วยฉนวนนั้นจะติดตั้งอยู่กับวงล้อหมุน ซึ่งวงล้อนี้อาศัยการทำงานอัตโนมัติโดยใช้บอร์ด

Arduino Mega 2560 เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์จากนั้นจะใช้แอมป์มิเตอร์และ Oscilloscope DSO - X 2002A 70MHz 2GSa/S. วัดกระแสที่ไหลผ่านตามผิวของลูกถ้วยฉนวนผ่านความต้านทานที่มีค่า 100 เมกะโอห์ม 100 วัตต์ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนทำให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้นในการเก็บผลการทดลอง

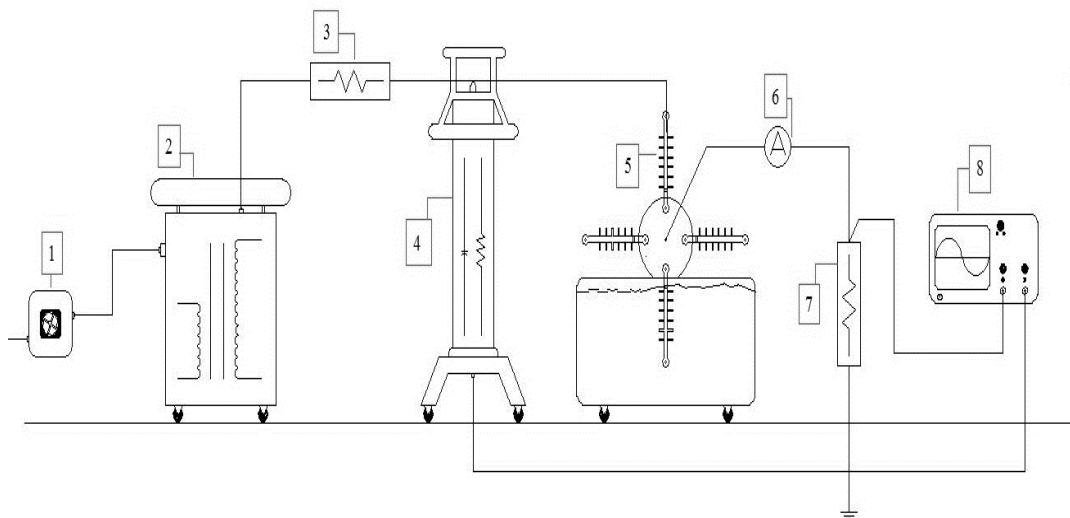
5. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงการเสื่อมอายุ

ในการวิจัยนี้เป็นการเร่งการเสื่อมอายุของลูกถ้วยลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ ซึ่งดำเนินการตามมาตรฐานไออีซี 62217 โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดมี 1 ชนิดคือ

1.ลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ สำหรับระบบ 22 กิโลโวลต์ จำนวน 4 ตัวดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ สำหรับระบบ 22 กิโลโวลต์



ภาพที่ 11 วงจรจำลองที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูงชนิดสารสังเคราะห์

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 หมายเลข 1. Variac 220 กระแสสลับ
 หมายเลข 2. หม้อแปลง 220/22000
 หมายเลข 3. ความต้านทาน 15 เมกะโอห์ม

หมายเลข 4. โวลต์เตจดีไวเดอร์ อัตราส่วน 1036.11:1
 หมายเลข 5. ชุดทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
 หมายเลข 6. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ วัดกระแสรั่วไหล
 หมายเลข 7. ความต้านทาน 100 เมกะโอห์ม 100 วัตต์

หมายเลข 8. ออสซิลโลสโคป Agilent DSO-X
2002A

จากภาพที่ 11 จะประกอบไปด้วย หม้อแปลงปรับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันทางด้านแรงต่ำตามที่ต้องการ ต่อเข้ากับหม้อแปลงขนาด 220/22000 เพื่อที่จะได้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ 18 กิโลโวลต์ ต่ออนุกรมกับความต้านทานขนาด 15 เมกะโอห์ม เพื่อจำกัดกระแสที่ไหลในวงจรเพื่อไม่ให้สูงเกินไปและป้องกันกรณีกระแสลัดวงจรเข้าสู่หม้อแปลง และต่อเข้ากับโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันขาเข้าจากนั้นจะใช้โอเล็กโตรดให้สัมผัสกับลูกถ้วย ซึ่งลูกถ้วยฉนวนนั้นจะติดตั้งอยู่กับวงล้อหมุน ซึ่งวงล้อนี้อาศัยการทำงานอัตโนมัติโดยใช้บอร์ด Arduino Mega2560 เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์จากนั้นจะใช้แอมป์มิเตอร์และ Oscilloscope วัดกระแสที่ไหลผ่านตามผิวของลูกถ้วยฉนวนผ่านความต้านทานที่มีค่า 100 โอห์ม 100 วัตต์

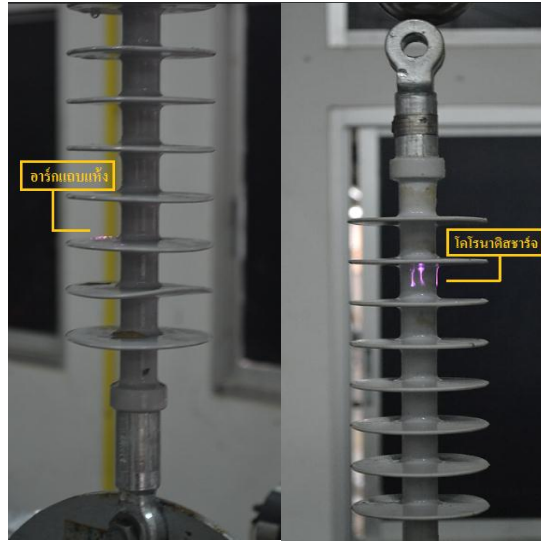
ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ทางกายภาพของลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์
ในระหว่างการทดสอบและหลังจากการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์จำนวน 1000 ชั่วโมง การวิเคราะห์กายภาพเป็นการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตา

เปล่าหรือใช้เครื่องมือแบบง่าย เพื่อช่วยต่อการสังเกต การวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1.1 การสังเกตลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ด้วยสายตาระหว่างการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับระบบ 22 กิโลโวลต์ เป็นวิธีการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนโดยการสังเกตด้วยตาเปล่าทั้งในระหว่างการทดสอบและหลังจากการทดสอบได้มีการเกิดโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้น โดยที่ลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จมีลักษณะเป็นเส้นแสงสีม่วง และอาร์กแถบแห้งมีลักษณะเป็นเส้นแสงสีส้มลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์

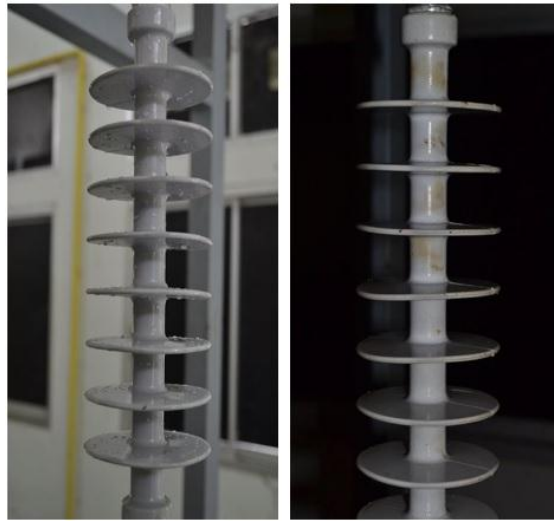
การทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับระบบ 22 กิโลโวลต์พบว่า มีแสงสีม่วงที่เกิดจากโคโรนาดีสชาร์จและแสงสีเหลืองจากอาร์กแถบแห้งขึ้นบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนทั้งสองโดยระหว่างการทดสอบในช่วงแรก (ภายใน 24 ชั่วโมงแรก) จะเกิดไม่รุนแรงและไม่บ่อยมากนัก แต่เมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้นลูกถ้วยฉนวนจะเริ่มเสื่อมสภาพมากขึ้น ทำให้ทั้งโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งเกิดบ่อยครั้งและมีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วปรากฏการณ์ดังกล่าวมักเกิดบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนมากกว่าบริเวณปีก



ภาพที่ 12 การเกิดโคโรนาดีชาร์จและอาร์กแถบแห้งบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ ระบบ 22 กิโลโวลต์

ลักษณะของการเกิดโคโรนาดีชาร์จและอาร์กแถบแห้งที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของยางซิลิโคน สังเกตได้ว่าเส้นแสงที่เกิดขึ้นทั้งโคโรนาดีชาร์จและอาร์กแถบแห้งนั้น เกิดบริเวณตัวและใต้ปีกของลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ ซึ่งในช่วงแรกของการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพ การเกิดโคโรนาดีชาร์จและอาร์กแถบแห้งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ทดสอบ 400-500 ชั่วโมง ความ

รุนแรงของการเกิดโคโรนาดีชาร์จและอาร์กแถบแห้งจึงมีมากขึ้นและได้ปรากฏออกมาอย่างชัดเจนเมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับความเครียดทางไฟฟ้าเป็นเวลานาน ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาดีชาร์จและอาร์กแถบแห้ง ซึ่งปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้ ส่งผลกระทบต่างๆ ต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของลูกถ้วยสารสังเคราะห์



(ก) ก่อนทำการทดสอบ

(ข) หลังทำการทดสอบ

ภาพที่ 13 ตรวจสอบประกบบริเวณตัวของลูกถ้วยฉนวน

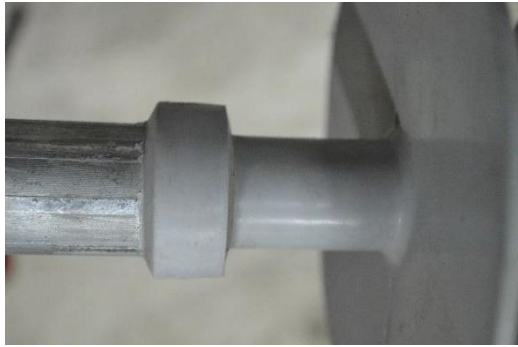


(ก) ก่อนทำการทดสอบ



(ข) หลังทำการทดสอบ

ภาพที่ 14 ตรวจสอบประกบบริเวณปีกของลูกถ้วยฉนวน



ก่อนทำการทดสอบ



หลังทำการทดสอบ

ภาพที่ 15 ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาทไฟบริเวณรอยตะเข็บของตัวลูกถ้วยฉนวน

เมื่อลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ถูกทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพ 1000 ชั่วโมง พบว่า บริเวณผิวของฉนวนนั้นนับว่าเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกทั้งหลาย ซึ่งสิ่งสกปรกเหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆที่เปียกและกลายเป็นคราบสิ่งสกปรกเกาะอยู่ตามพื้นผิว ฉนวน ตามรูปที่ 13 และรูปที่ 14 คราบสิ่งสกปรกเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดส่วนที่นำไฟฟ้าขึ้นบริเวณผิว ดังนั้นกระแสจึงสามารถวิ่งไหลผ่านไปบนผิวฉนวนระหว่างด้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับด้านที่ต่อลงดินได้ หรือที่เรียกว่า กระแสรั่ว (Leakage Current) ค่าความต้านทานของผิวฉนวนจึงลดลงอย่างมากเมื่อมีสิ่งสกปรก และความต้านทานที่ต่ำลงนั้นในทางกลับกันจะทำให้กระแสรั่วบนผิวยังมีค่าสูงขึ้นมีการขยายตัวเร็วขึ้นและมีพลังงานมากพอที่จะทำลายผิววัสดุ เนื่องจากการสูญเสียความชื้นของผิวฉนวนโดยความร้อนของกระแสรั่วที่ไหลผ่านนั้นจะไม่มีรูปแบบที่แน่นอนทำให้นำไปสู่การสร้างพื้นที่แห้งเล็กๆในหลายบริเวณ เมื่อ

พื้นที่แห้งเล็กๆเหล่านี้ได้ก่อตัวขึ้นการไหลของกระแสรั่วก็จะถูกขัดขวางจึงเปรียบเสมือนเป็นความต้านทานที่มีค่าสูง มากส่งผลให้ความเครียดทางไฟฟ้าบริเวณพื้นที่แห้งดังกล่าวสูงตามไปด้วย เมื่อค่าความเครียดที่บริเวณพื้นที่แห้งเล็กๆสูงขึ้นจนทำให้อากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออน หรือเกิดปรากฏการณ์ไอออนไนเซชัน ทำให้อากาศกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าจนมี พลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดเส้นประกายไฟขึ้นที่บริเวณพื้นที่แห้งที่กระจายอยู่ในหลายบริเวณบนผิวฉนวนซึ่งเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วน ส่งผลให้พื้นที่ นั้นมีความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆตามระดับความรุนแรงของดิสชาร์จไฟฟ้า จนกระทั่งทำให้ผิววัสดุไม่สามารถทนได้จึงเกิดเป็นรอยไหม้(Tracking)ขึ้นที่ผิวตามรูปที่ 15 โดยส่วนใหญ่ร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาทไฟเกิดขึ้น บริเวณข้อบ่อนแรงดันที่ใช้เชื่อมต่อกับอเล็กโตรดขั้วต่อลงดินมากที่สุด ซึ่งรอยไหม้มีส่วน ประกอบของคาร์บอนนับว่าเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้เกิดการขยายตัวของรอยไหม้เพราะสารคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติใน

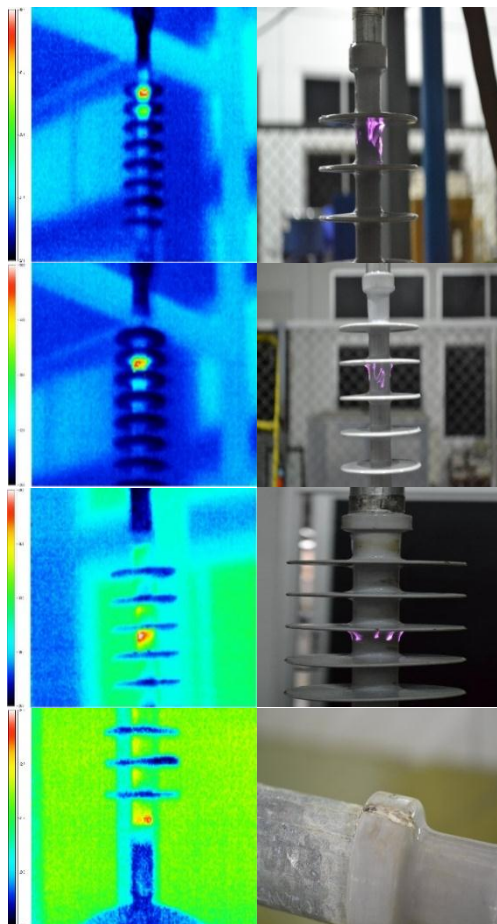
การนำไฟฟ้า จึงเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายการเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ของพิวฉนวน โดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นเมื่อส่วนตัวนำคาร์บอนได้ขยายตัวจนกระทั่งฉนวนไม่สามารถทนต่อระบบแรงดันนั้นได้อีกต่อไป

2. การวิเคราะห์ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermography) หรือ กล้องถ่ายภาพด้วยแสงอินฟราเรด กล้องถ่ายภาพนี้

สามารถสร้างภาพจากการแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งเปรียบเทียบกับกล้องถ่ายภาพธรรมดาแตกต่างกันที่กล้องถ่ายภาพธรรมดาใช้การสร้างภาพจากแสงที่มองเห็นได้ซึ่งมีความยาวคลื่น อยู่ใน ช่วง 450 – 750 นาโนเมตรแต่กล้องถ่ายภาพความร้อนทำงานกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ 14000 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ารังสีอินฟราเรดหรือเรียกว่า คลื่นรังสีความร้อน



ภาพที่ 16 กล้องถ่ายภาพความร้อน



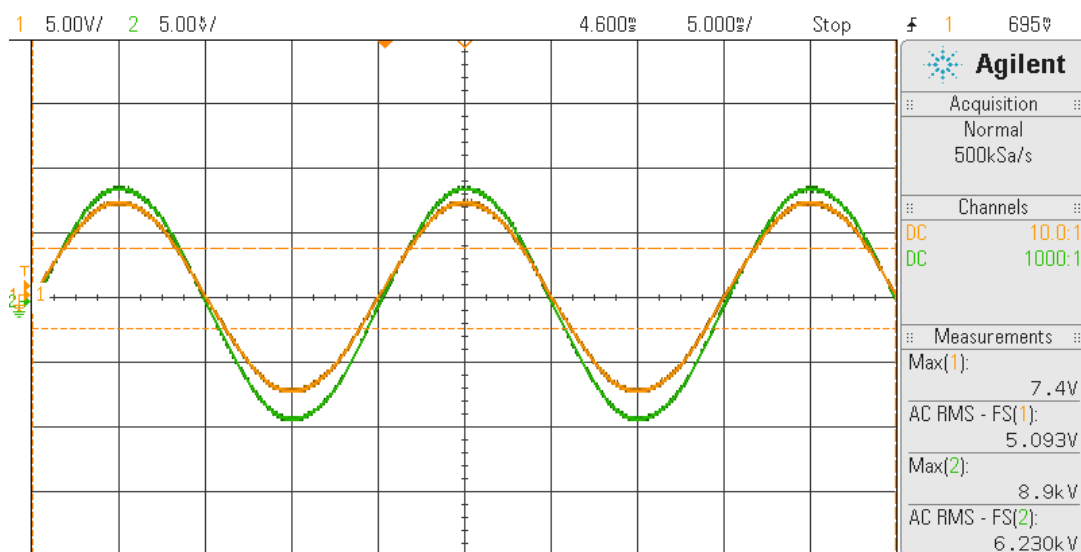
ภาพที่ 17 ถ่ายภาพความร้อนจากกล้อง FLUKE TI30 Thermal Image

จากภาพที่ 17 ถ่ายภาพความร้อนจากกล้อง FLUKE Ti30 Thermal Image แสดงให้เห็นถึง กระแสรั่วไหลมากจนทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้า จนทำให้เกิดความร้อนอุณหภูมิ 35.3-50.5 องศาเซลเซียส จากกล้องถ่ายภาพความร้อน จนเกิดเป็นโคโรนา ดิสชาร์จ สังเกตได้ว่าโคโรนาดิสชาร์จเกิดบริเวณตัว และใต้ปีกของลูกถ้วยฉนวนเมื่อลูกถ้วยฉนวนได้รับความเครียดทางไฟฟ้าเป็นเวลานาน ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาดิสชาร์จซึ่งปรากฏการณ์ส่งผลกระทบต่อ การเกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของลูกถ้วย ฉนวน

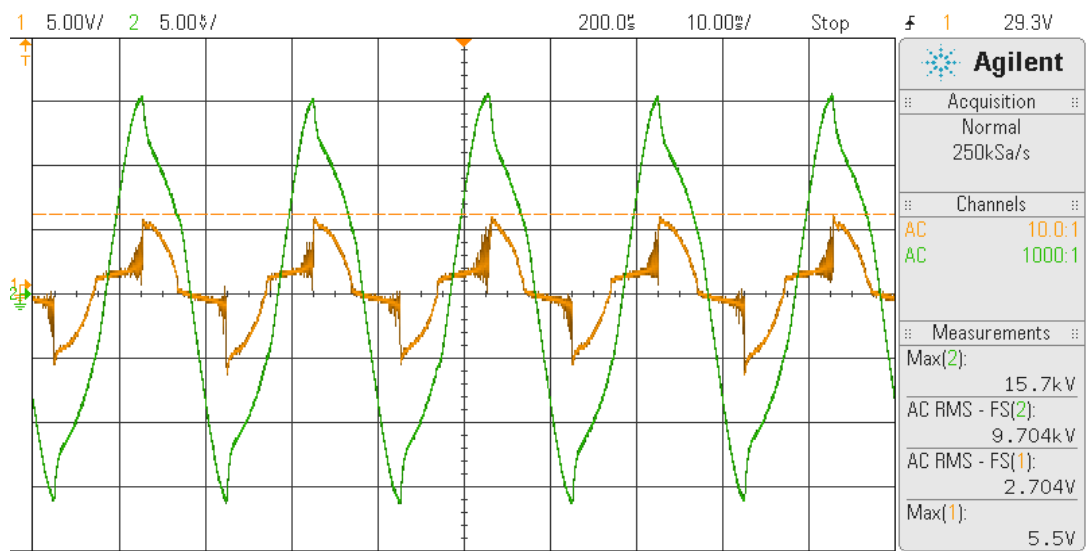
3. การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสรั่วไหลตามผิว การเกิดกระแสรั่ว (Leakage Current) ตามผิวลูก ถ้วยฉนวนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดวาปไฟตามผิว ของลูกถ้วยฉนวนฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ง่ายขึ้น การที่ลูกถ้วยฉนวนมีกระแสรั่วตามผิวอยู่ต่อเนื่อง จะ

ทำให้ผิวของลูกถ้วยฉนวนได้รับความเสียหาย เป็นผล ให้คุณสมบัติผิวหยดน้ำล้นลดลงและทำให้การ กระจายของ

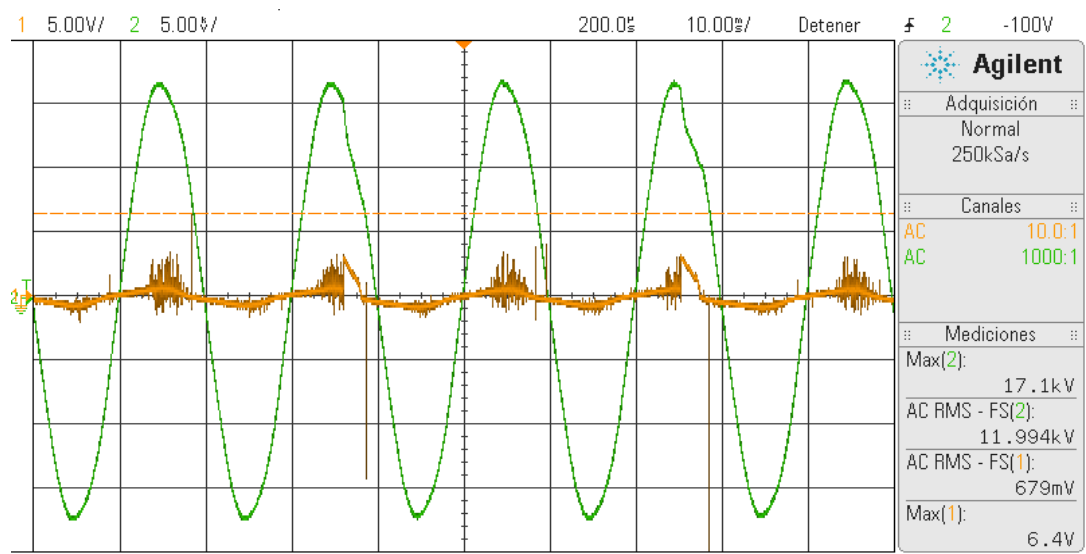
สนามไฟฟ้าตามผิวของลูกถ้วยฉนวน เปลี่ยนแปลงไป กระแสรั่วที่เกิดขึ้นทำให้มีพลังงาน สูญเสียอย่างต่อเนื่องและมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผล ให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่อร่วมกับลูกถ้วยฉนวนร้อนขึ้น ด้วย เหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์การ เกิดกระแสรั่วตามผิว เพื่อช่วยวิเคราะห์ปัญหาการ เสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนฉนวนเนื้อสาร สังเคราะห์ การวิเคราะห์กระแสรั่วตามผิวจำเป็นต้อง มีการบันทึกค่าตลอดเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง ผู้วิจัยจึงต้องมีการออกแบบซอฟต์แวร์ เพื่อช่วยใน การบันทึกค่ากระแสรั่ว ลักษณะของรูปคลื่นกระแส รั่วตามผิวที่วัดได้ระหว่างการทดสอบ



ภาพที่ 18 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้า

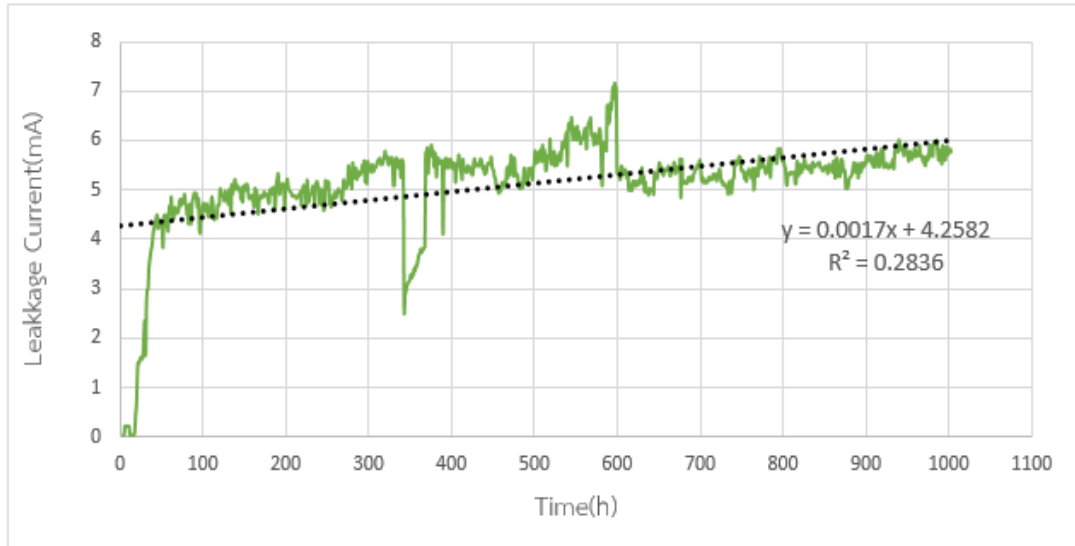


ภาพที่ 19 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดโคโรนาดิสชาร์จ ผ่านไป 3 วินาที



ภาพที่ 20 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลและแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดโคโรนาดิสชาร์จ ผ่านไป 5 วินาที

4.4 การวิเคราะห์กระแสรั่วไหล



ภาพที่ 21 กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์

พบว่าเมื่อนำค่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนที่ผ่านการทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ 1000 ชั่วโมง กระแสรั่วจากกระแสที่เกิดจากความนำไฟฟ้า จากการวิเคราะห์พบว่า ลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ทั้ง 4 ลูก มีค่าประจุไฟฟ้าใกล้เคียงกันมากอย่างเห็นได้ชัด โดยส่วนใหญ่แล้วค่าประจุไฟฟ้าสะสมจะมาจากการที่ลูกถ้วยฉนวนอยู่ในสภาวะเปียกชื้นรวมทั้งมีสิ่งเปรอะเปื้อนสะสมหรือเกาะอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน สภาวะดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิวสังเกตกระแสรั่วไหลในช่วง 200 ชั่วโมงแรกกระแสเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เริ่มจาก 0.02 จนถึง 5.18 มิลลิแอมป์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 47 เมื่อเทียบกับกระแสรั่วไหลครั้งแรก ในช่วง 201 ถึง 400 ในช่วงนี้กระแสรั่วไหลจะน้อยที่สุดอยู่ที่ 2.72 จนถึง 5.88 มิลลิแอมป์ เพิ่มขึ้น 51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกระแสรั่วไหลครั้งแรก ในช่วง 401 ถึง 600 ในช่วงนี้กระแสรั่วไหลจะน้อยที่สุดอยู่ที่ 4.9 จนถึง 7.06 มิลลิแอมป์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 79 เมื่อเทียบกับกระแสรั่วไหลครั้งแรกในช่วง 601 ถึง 800 ในช่วง

นี้กระแสรั่วไหลจะน้อยที่สุดอยู่ที่ 4.73 จนถึง 5.71 มิลลิแอมป์ จะเห็นได้ว่ากระแสเริ่มลดลงร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับกระแสรั่วไหลในช่วง 401 ถึง 600 และในช่วง 801 ถึง 1000 ชั่วโมง กระแสรั่วไหลจะน้อยที่สุดอยู่ที่ 5.1 จนถึง 5.92 มิลลิแอมป์ จะเห็นได้ว่ากระแสเริ่มลดลงร้อยละ 6 เมื่อเทียบกับกระแสรั่วไหลในช่วง 401 ถึง 600 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า ลูกถ้วยฉนวนผ่านการทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ 1000 ชั่วโมง กระแสรั่วไหลสูงสุดอยู่ที่ 7.06 มิลลิแอมป์ โดยส่วนใหญ่แล้วค่าประจุไฟฟ้าสะสมจะมาจากการที่ลูกถ้วยฉนวนอยู่ในสภาวะเปียกชื้นรวมทั้งมีสิ่งเปรอะเปื้อนสะสมหรือเกาะอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน สภาวะดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และผลของกระแสรั่วที่มากขึ้น จะเป็นสาเหตุให้ค่าประจุไฟฟ้าสะสมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนหรือเกิดการเสื่อมอายุขึ้นนั่นเอง

อภิปรายผล

ค่ากระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวนที่ผ่านการทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อน โดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ 1000 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์พบว่า ระดับสิ่งเปรอะเปื้อนที่อยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนนั้นประกอบด้วย เกลือ ซีเมนต์และสิ่งอื่นๆซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติของฉนวนเสื่อมลงในสภาพแห้ง สิ่งเปรอะเปื้อนยังคงสภาพเป็นฉนวนอยู่จึงไม่ทำให้เกิดการวาบไฟบนผิวลูกถ้วยได้ แต่ในสภาพเปียกน้ำสิ่งเปรอะเปื้อนจะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นตัวนำทำให้เกิดการวาบไฟตามบริเวณผิวได้นั้นคือในบริเวณที่มีสิ่งเปรอะเปื้อนอยู่ในระดับสูงพบว่า แรงดันวาบไฟตามผิว (Flashover Voltage) ของลูกถ้วยฉนวนที่มีสิ่งเปรอะเปื้อนที่เปียกเกาะอยู่จะมีปริมาณแรงดันวาบไฟน้อยลงเมื่อเทียบกับแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนที่สะอาด กลไกการเกิดวาบไฟตามผิวเริ่มต้นจากสิ่งเปรอะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวนได้รับความชื้นจากภายนอกสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวลูกถ้วยฉนวนจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มตามไปด้วยโดยที่อิมพีแดนซ์ของผิวของลูกถ้วยฉนวน (Surface impedence) จะเปลี่ยนสภาพจากเชิงตัวเก็บประจุในตอนเริ่มต้นไปเป็นเชิงแบบความต้านทานเมื่อเวลาผ่านไปกระแสรั่วไหลจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความชื้นที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวลูกถ้วย โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสบริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูงเช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวลูกถ้วยฉนวนบริเวณนั้นแห้งก่อน มีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เรียกว่าแถบแห้ง (Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านทานสูงไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ทำให้ แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความเป็นฉนวนของอากาศ แถบแห้งมีค่าน้อยกว่า

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อม แถบแห้งจะเกิดการเบรกดาวน์ของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้นเรียกว่า การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial- discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น อาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อม แถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะหยุดลงจนในที่สุดเมื่อดิสชาร์จที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยเกิดการเชื่อมต่อถึงกันจนมีความยาวมากกว่า ค่าพิคัดก็จะเกิดวาบไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวลูกถ้วยฉนวน จนเกิดโคโรนาดิสชาร์จและอาร์กแถบแห้งขึ้น โดยที่ลักษณะของโคโรนาดิสชาร์จมีลักษณะเป็นเส้นแสงสีม่วง และอาร์กแถบแห้งมีลักษณะเป็นเส้นแสงสีส้ม ส่งผลให้ความเป็นฉนวนของลูกถ้วยลดลงหรือเสื่อมสภาพนั่นเอง

สรุป

งานวิจัยปริญญาโทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการทดสอบของลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ ที่ใช้ในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อ เพื่อประเมินว่าลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์นี้สามารถทนต่อผลกระทบที่เกิดจากการจำลองในสภาวะเปรอะเปื้อนที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยฉนวน การดำเนินงานวิจัยปริญญาโทนี้ดังกล่าวนี้ได้ สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์โดยสามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

การศึกษาที่มีความสำคัญและความเป็นมา คือ ลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ที่ใช้งานจริงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ ซึ่งสภาวะแวดล้อมมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพขึ้นจนเป็นเหตุให้เกิดความผิดปกติได้ เนื้อหาในบทนี้ยังรวมถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยการศึกษาและทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อในครั้งนี้ได้มีขั้นตอนการดำเนินงานหลักที่ประกอบไปด้วยขั้นตอนที่หนึ่งศึกษาทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเช่น ชนิดของลูกถ้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้า ความเครียดทางกลและกลไกของการร้าวไฟตามผิว และการเกิดโคโรนาดีสชาร์จจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบถึงแนวทางการปฏิบัติการวิจัยต่างๆ ที่มีการใช้งานมาก่อน ขั้นตอนที่สองทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบเพื่อทดสอบการเสื่อมสภาพลูกถ้วยฉนวนชนิดเนื้อสารสังเคราะห์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อจากนั้นทำการสรุปผล อภิปรายผลการทดสอบ

ในขั้นตอนการสร้างชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อโดยอธิบายถึงการออกแบบชุดทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ก่อนที่จะลงมือสร้าง ส่วนประกอบหลักที่ต้องใช้ในการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ การออกแบบโครงสร้างหลักสำหรับฐานส่วนล่าง โครงสร้างเหล็กส่วนบน และถังสำหรับบรรจุน้ำเกลือ โดยมีจุดมุ่งหมายของการออกให้มีความแข็งแรงทนทาน และสามารถควบคุมการทำงาน(ตามมาตรฐาน IEC 62730)สำหรับลูกถ้วยฉนวนสารสังเคราะห์ที่ใช้ในระบบส่งจ่ายและจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ นอกจากนี้ได้อธิบายการสร้างชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อที่สร้างขึ้นจากที่ได้ออกแบบไว้ และอธิบายถึงส่วนประกอบต่างๆ ที่ต้องใช้ในการติดตั้งชุดทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ เพื่อให้เข้าใจถึงการสร้างชุดทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ได้โดยละเอียด

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการเสื่อมสภาพของลูกถ้วยสารสังเคราะห์ฉนวนไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนโดยวิธีจุ่มด้วยวงล้อที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 เพื่อนำข้อมูลและผลจากการทดสอบวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงต่างๆ การวิเคราะห์ผลหลังการทดสอบเร่งการเสื่อมสภาพลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ มีด้วยกันหลายวิธี เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี ประกอบด้วย การวิเคราะห์ลูกถ้วยฉนวนเนื้อสารสังเคราะห์ด้วยสายตา พบว่า บริเวณผิวของฉนวนนั้นนับว่าเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกทั้งหลาย ซึ่งสิ่งสกปรกเหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆที่เปียกและกลายเป็นคราบสิ่งสกปรกเกาะอยู่ตามพื้นผิวฉนวน คราบสิ่งสกปรกเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดส่วนที่นำไฟฟ้าขึ้นบริเวณผิว ดังนั้นกระแสวิงสามารถวิ่งไหลผ่านไปบนผิวฉนวนระหว่างด้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับด้านที่ต่อลงดินได้หรือที่เรียกว่า กระแสรั่ว(Leakage Current)ค่าความต้านทานของผิวฉนวนจึงลดลงอย่างมากเมื่อมีสิ่งสกปรกและความชื้น ความต้านทานที่ต่ำลงนั้นในทางกลับกันจะทำให้กระแสรั่วบนผิวยิ่งมีค่าสูงขึ้น มีการขยายตัวเร็วขึ้นและมีพลังงานมากพอที่จะทำลายผิววัสดุ เนื่องจากการสูญเสียความชื้นของผิวฉนวนโดยความร้อนของกระแสรั่วที่ไหลผ่านนั้นจะไม่มีรูปแบบที่แน่นอนทำให้นำไปสู่การสร้างพื้นที่แห้งเล็กๆในหลายบริเวณ เมื่อพื้นที่แห้งเล็กๆเหล่านี้ได้ก่อตัวขึ้นการไหลของกระแสรั่วก็จะถูกขัดขวางจึงเปรียบเสมือนเป็นความต้านทานที่มีค่าสูง มากส่งผลให้ความเครียดทางไฟฟ้าบริเวณพื้นที่แห้งดังกล่าวสูงตามไปด้วย จนกระทั่งฉนวนไม่สามารถทนต่อระบบแรงดันนั้นได้ จนเกิดปรากฏการณ์เส้นแสงสีม่วงที่เกิดจากโคโรนาดีสชาร์จและเส้นแสงสีเหลืองจากอาร์กแถบแห้งขึ้นบนพื้นผิวลูกถ้วยฉนวนทั้งสองโดยระหว่างการทดสอบในช่วงแรก (ภายใน 24 ชั่วโมงแรก) จะเกิดไม่รุนแรงและไม่บ่อยมากนักแต่เมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้นลูกถ้วยฉนวนจะเริ่ม

เสื่อมสภาพมากขึ้น ทำให้ทั้งโคโรนาดีสชาร์จและอาร์กแถบแห้งเกิดบ่อยครั้งและมีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วปรากฏการณ์ดังกล่าวมักเกิดบริเวณลำตัวของลูกถ้วยฉนวนมากกว่าบริเวณปีกกระแสรั่วไหลสูงสุดอยู่ที่ 7.06 มิลลิแอมป์แปร์ โดยส่วนใหญ่แล้วค่าประจุไฟฟ้าสะสมจะมาจากจากการที่ลูกถ้วยฉนวนอยู่ในสภาวะเปียกชื้นรวมทั้งมีสิ่งเปราะเปื้อนสะสมหรือเกาะอยู่บนผิวลูกถ้วยฉนวน สภาวะดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่วตามผิวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และผลของกระแสรั่วที่มากขึ้น จะเป็นสาเหตุให้ค่าประจุไฟฟ้าสะสมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนขึ้นนั่นเอง

เอกสารอ้างอิง

สำรวจ สังข์สะอาด. (2549). วิศวกรรม

ไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนงค์พันธุ์ แม้นอิม และวินัย พุกกะวัน. (2553).

การศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจาก การ

ดีสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิวฉนวน. คณะ

วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตบางเขน.

อุดมศักดิ์ มาลัยวงศ์. (2553). การศึกษาค่าความ

เปราะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดการวาบไฟ

ตามลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบ

สายเปลือย. คณะวิศวกรรมศาสตร์.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Hillborg, H. C., and Gedde, U. W. (1999).

Hydrophobicity changes in silicone

rubbers. IEEE Transactions on

Dielectric and Electrical Insulation.

6(5), 703-717.

Khan, Y. Z., Al-Arainy, A. A., Malik, N. H. and

Qureshi M. I. (2006). Effect of thermo-

electrical. Stresses and ultra-violet

radiation on composite polymer

insulators. King Saud University.

Li, C., Huang, X., and Zhao, L. Image. (2008).

analysis on the surface hydrophobicity

of polluted silicone rubber insulators.

International Conference on

Condition Monitoring and Diagnosis.

Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R.,

and Kumagai, S. (2006). Effect of

specimen configuration on

deterioration of silicone rubber for

composite insulators in salt fog

ageing test.

Marungsri, B., Shinokubo, H., Matsuoka, R.,

and Kumagai, S. (2006). Effect of

specimen configuration on

deterioration of silicone rubber for

composite insulators in salt fog

ageing test.

Paul Taklaja, Jaan Niitsoo, and Ivo Palu.

(2012). Wet Tests on Naturally

Polluted Glass and Composite

Insulators.

Thai Industrial Standards Institute. (2012).

Edition 1.0 2012-03. TISI Rama VI Rd,

Rajathevee Bangkok Tel: 202-3510 IEC.

Venkatesulu, B., and Thomas, M. (2010).

Tracking and erosion resistance of nano-

filled silicone rubber for use in high

voltage outdoor insulators. National

Power Systems Conference. 562-566.

Zhijin Zhang, Xingliang Jiang. (2011)

Analysis of the Pollution

Accumulation and Flashover

Characteristics of Field aged 110kV

Composite Insulators. State Key

Laboratory of Power Transmission

Equipment & System Security and New

Technology Chongqing University

Shapingba District, Chongqing, China.

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์: กรณีศึกษาบริษัทจำกัดแห่งหนึ่ง ในตำบลแม่ปะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

Enhancing Efficiency of Electronic Components Production: Case Study One of The Company, MaePa Parish, Maesot District, Tak Province.

ทวีศักดิ์ มโนสืบ^{1*} และ จำเนียร แดงเถิน²

Thaweesak Manosueb^{1*} and Jumnain Dangturn²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

^{1,2} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

* Corresponding author e-mail: Thaweesak_Tak@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองจริงในโรงงาน ซึ่งจะทำให้ส่งผลที่เป็นประโยชน์และเป็นจริงที่สุดโดยเบื้องต้นได้ศึกษาการวิเคราะห์วิธีการทำงาน การศึกษาการทำงาน การวัดผลงาน การวิเคราะห์กระบวนการผลิต เวลาในการผลิต และเขียนวิธีการทำงานของกระบวนการผลิตในการลดความยาวของวัสดุ (ลวด) โดยการลดความยาวลวดให้ได้ตามขนาดที่กำหนด แล้วจึงนำไปปฏิบัติงานจริง ในการปรับปรุงนั้นได้นำหลัก 4M ,7 QC Tools มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อให้การปรับปรุงเป็นไปอย่างมีระเบียบแบบแผนรวมทั้งออกแบบและจัดสร้างฟิกเจอร์ที่ใช้ในการทำงานได้ สะดวกและรวดเร็วขึ้นซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการลดเวลาในการทำงานของพนักงาน

ผลการทดลองพบว่าเมื่อได้นำหลักการ 4M ,7 QC Tools มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิต ทำให้ความยาว ลวดทองแดง ลดลง จากเดิมลวดทองแดง 1 เส้น มีความยาว 1,320 มิลลิเมตร หลังการปรับปรุงมีความยาว 1,280 มิลลิเมตร สามารถ ลดความยาว ลวดทองแดงได้ 40 มิลลิเมตร และลดค่าใช้จ่ายได้เส้นละ 0.067 บาท ในสถานีบัดกรีปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการนำฟิกเจอร์มาช่วยในการเพิ่มผลผลิต จากเดิมใช้เวลาเฉลี่ยชิ้นละ 7.30 วินาที หลังการปรับปรุงใช้เวลาเฉลี่ยชิ้นละ 4.66 วินาที สามารถลดเวลาในการ บัดกรีเฉลี่ยชิ้นละ 2.64 วินาที

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ, ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์, การศึกษาการทำงาน, การวิเคราะห์กระบวนการผลิต

Abstract

This research aim to enhance the efficiency of electronic components production. This research was conducted in the factory, which will result in a useful and realistic as possible. The preliminary study to analyze how to work, work study, performance measurement, Production Process Analysis, production time, and write the working methods of the manufacturing process to reduce the length of material (wire). By reducing the length of wire according to determined size and then put into the actual work. The improvements that have led the main 4M, 7 QC Tools to help in the analysis to make improvements as to convention the design and construction of fixture used to work more conveniently and faster, which is important in reducing the working time of employees.

The results showed that the length of copper wire was reduced from 1,320 mm. to 1,280 mm. by using 4M, 7 QC Tools. By using this method, the length was reduced 40 mm. and the cost was decreased 0.067 baht per wire. In the soldering station, the figure was used to reduce the productivity time processing. Instead of using 7.30 seconds, we only used 4.66 seconds per piece. It means that with this technique, we can save 2.64 seconds of the time production.

Keywords: Efficiency, Electronic Components, Work Study, Production Process Analysis

บทนำ

เนื่องจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ถือว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจไทยในปัจจุบันค่อนข้างมาก โดยมีการส่งออกเป็นอันดับหนึ่งต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลาหลายปี จากการประเมินของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมพบว่า จุดแข็งที่สำคัญของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยในปัจจุบันคือ เป็นฐานการผลิตเพื่อการส่งออกที่สำคัญของสหรัฐอเมริกา สิงคโปร์ โดยเฉพาะญี่ปุ่น ที่เข้ามาลงทุนจำนวนมากในไทย ประกอบกับไทยมีแรงงานที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ ทั้งความละเอียด ประณีต ซึ่งเหมาะกับความต้องการของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งประเทศไทยเริ่มที่จะพัฒนาขีดความสามารถของศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลมากขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยเริ่มเป็นที่ยอมรับในศักยภาพและได้รับความเชื่อถือในด้านการผลิตจากหน่วยงานและบริษัทต่างประเทศเป็นลำดับ

จากโรงงานกรณีศึกษาจะผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นโรงงานขนาดเล็กมีพนักงานทั้งหมด 1,079 คน ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้นทางบริษัทต้องใช้ต้นทุนและพนักงานจำนวนมากในการผลิตเพื่อส่งให้แก่บริษัทที่มีชื่อเสียง ได้แก่ Samsung Apple Sony และ Hitachi เป็นต้น จากการวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษาโดยประเมินจากการวิเคราะห์การทำงานของพนักงานพบว่ากระบวนการที่เกิดปัญหาเนื่องจากบริษัทตั้งเป้าหมายการผลิตที่ 3 ล้านชิ้นต่อเดือน แต่สามารถผลิตได้จริงเพียง 2.7 ล้านชิ้นต่อเดือน จากการสำรวจในขั้นตอนการผลิตบางสถานียังพบว่าการใช้วัสดุเกินความจำเป็น และก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองในกระบวนการผลิตอีกด้วย ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดการใช้

ต้นทุนที่เกินความจำเป็น ใช้วัสดุในการผลิตอย่างคุ้มค่าและสร้างความสมดุลในสายการผลิตตลอดจนทำให้ผลผลิตเป็นไปตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้ (ยูทธี ไกยวรรณ)

จากปัญหาดังกล่าวนั้นสามารถที่จะแก้ไขและปรับปรุงกระบวนการผลิตให้สามารถมีผลผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นได้ โดยนำหลักการพิจารณา 4M (Man, Machine, Material, Method) และหลักการ 7 QC Tools (Check Sheet, Pareto Diagram, Fish Bone Diagram, Graph, Histogram, Scatter Diagram, Control Chart) มาช่วยพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าว (ศิริพร ขอพรกลาง, 2544) (ทวีศักดิ์ มโนสืบ, 2558) (Dale H. Besterfield, 1998)

วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มี 2 ข้อดังต่อไปนี้คือ

1. เพื่อช่วยลดเวลาในการทำงานของพนักงานในกระบวนการผลิต
2. เพื่อช่วยลดการใช้วัตถุดิบ (ลวดทองแดง) ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

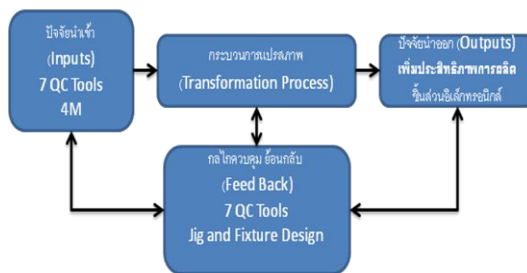
แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จิตินัดดา เย็นทรวง (จิตินัดดา เย็นทรวง, 2558) ศึกษาการลดต้นทุนด้านแรงงานและการบริหารจัดการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลงวัตถุดิบกรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นไม้สับ พบว่า การปรับปรุงตัดแปลงทางลากกระบะกึ่งพวงและการจัดทำรถทิลเตอร์ (Truck Tilter) ของบริษัทกรณีศึกษาสามารถลดต้นทุนการลงวัตถุดิบประเภทชิ้นไม้สับ ในด้านค่าจ้างแรงงานคนและในส่วนของค่าจ้างรถโหลดเดอร์ (Loader) โดยสามารถลดต้นทุนลงได้ 1.9 ล้านบาทต่อเดือน เมื่อเทียบกับปริมาณต้นวัตถุดิบที่เท่ากัน และบริษัทยังสามารถลงวัตถุดิบประเภทชิ้น

ไม้สับได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 500 ต้นต่อวัน โดยรถบรรทุกใช้เวลารอคิวลงวัตถุดิบเฉลี่ยลดลง 80 นาที เหลือประมาณ 60 นาทีต่อคัน และเวลาในการลงวัตถุดิบเฉลี่ยลดลงคันละ 11 นาที เหลือประมาณ 14 นาทีต่อคัน ทำให้บริษัทสามารถตอบสนองความต้องการของกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของตลาดได้ นิรุทธิ์ กาบแก้ว(นิรุทธิ์ กาบแก้ว, 2551) ศึกษาการพัฒนากระบวนการควบคุมชิ้นส่วนของเครื่องจักรและเครื่องมือจิ๊กฟิกเจอร์ที่ใช้ในสายการประกอบรถจักรยานยนต์พบว่า จากการเปรียบเทียบข้อมูลปัญหาการหยุดสายการประกอบอันเนื่องมาจากรอเปลี่ยนชิ้นส่วน อะไหล่ที่จำเป็นภายในเดือน มกราคม พ.ศ. 2551เทียบกับ เดือน

มกราคม พ.ศ. 2552 ได้พบว่าปัญหาการหยุดสายการประกอบ มีเพียง 6 นาทีที่ลดลงถึง 104 นาที พบว่าปัญหาได้ลดลงถึง 94.55% คิดเป็นจำนวนพบว่าสามารถค่าความสูญเสียภายในเดือนมกราคม พ.ศ. 2552 ได้ประมาณ 866,000 บาท และอีกทั้งยังสามารถวางแผนในการสั่งซื้อ ชิ้นส่วนอะไหล่จากต่างประเทศ ให้ตรงกับความต้องการที่จะนำไปใช้จริง เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ และ จัดเก็บชิ้นส่วนอะไหล่ เกินความต้องการ

โครงการวิจัยนี้ใช้แนวคิดทฤษฎีเชิงระบบ (วิชัย แหวนเพชร, 2547) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ได้กรอบแนวคิดดังนี้คือ



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัยเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

วิธีการวิจัย

จากการศึกษาและเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักได้แก่ตัว Filter ทำหน้าที่กระจายรังสีเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน จากภายนอก ตลอดจนทำหน้าที่ไหลลดกระแสไฟให้คงที่ กรณีมีไฟฟ้ากระตุกใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้า จำพวก ทีวี เครื่องปรับอากาศ เครื่องถ่ายเอกสาร หรือเครื่องที่มีแผง พีซีบอร์ด ทางบริษัทมีการผลิตเพื่อส่งให้แก่บริษัท Samsung Apple Sony และ Hitachi เป็นต้น

ได้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์งานวิจัยคือ 1. เพื่อช่วยลดเวลาในการทำงานของพนักงานใน

กระบวนการผลิต 2. เพื่อช่วยลดการใช้วัตถุดิบ (ลวดทองแดง) ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

จากวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 1 มีวิธีการดำเนินการดังนี้

1.ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเดิมทำการจับเวลาและศึกษาปัญหาได้ผลดังตารางที่ 1

2.ทราบเป้าหมายของผลิตภัณฑ์โมเดลรุ่น CS540110SRB เพื่อการปรับปรุงและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานที่นำมาศึกษา

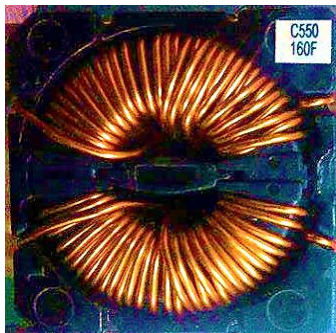
ผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา คือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โมเดลรุ่น CS540110SRB ซึ่งมี

ตารางที่ 1 ข้อมูลการผลิตผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษาของเดือนมิถุนายน จำนวน 25 ลำดับ

ลำดับที่	ชื่อโมเดล	ของดี	ของเสีย	รวมผลิต	%ของเสีย
1	CH570120S	5,759	1,115	6,874	16.22
2	CH005250SB	8,294	1,110	9,404	11.80
3	PV06045USE2	10,486	1,074	11,560	9.29
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
11	CS540110SRB	118,208	4,348	122,556	3.54
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
23	CV415200SH	75,453	590	76,043	0.78
24	CS530150SRB	7,559	55	7,614	0.72
25	CV940120SE	36,519	260	36,779	0.71

จากตารางที่ 1. จากข้อมูลของทางโรงงานพบว่าโมเดลที่มีการผลิตจำนวนมากคือโมเดล CS540110SRB ซึ่งทางโรงงานสะดวกให้ปรับปรุงโมเดลนี้จึงดำเนินการศึกษาเน้นที่ โมเดลดังกล่าว

*หมายเหตุ ลำดับที่ 1-10 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทางโรงงานได้ดำเนินการแก้ไขแล้ว ดังนั้นโรงงานจึงมอบหมายให้ปรับปรุงแก้ไขโมเดลรุ่น CS540110SRB ที่มีของเสียจำนวน 4,348 ชิ้น



ภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับมอบหมายที่เป็นกรณีศึกษาโมเดลรุ่น CS540110 SRB

การผลิตของโรงงานกรณีศึกษาจะผลิตตามความต้องการของลูกค้า โดยทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเป็นการผลิตโมเดลรุ่น CS540110SRB โดยผู้วิจัยเริ่มเข้าเก็บข้อมูลในเดือนมิถุนายน ซึ่งโมเดลรุ่น CS540110SRB ได้มีการสั่งจำนวน 118,208 ชิ้น

ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานโดยรวมของการผลิตโมเดลรุ่น CS540110SRB โดย

ก่อนการผลิตเริ่มจากฝ่ายขายจะต้องรู้ความต้องการของลูกค้าก่อน คือฝ่ายขายจะรับยอดความต้องการผลิตภัณฑ์จากลูกค้า (Order) แล้วจากนั้นจะส่งยอดความต้องการผลิตภัณฑ์ของลูกค้าให้ฝ่ายวางแผนการผลิต เพื่อฝ่ายวางแผนจะได้วางแผนการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า เมื่อมีการวางแผนการผลิตแล้วก็เข้าสู่กระบวนการผลิต (วิจัย

แหวนเพชร, 2547) ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเดิมทำ

การจับเวลาและศึกษาปัญหาได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ข้อมูลการผลิตของผลิตภัณฑ์โมเดลรุ่น CS540110SRB ของโรงงานกรณีศึกษาซึ่งมีรอบเวลาในการผลิตของทั้ง 12 สถานี

DATE :	1-ส.ค.-57	จำนวนพนักงาน		23 คน							
MODEL :	CS540110SRB	Cycle Time ของแต่ละสถานี		5 วินาที							
LINE :	D13										
Station	JOB DESCRIPTION	จำนวนคน	จำนวนชิ้นงาน	CYCLE TIME (วินาที)					วินาที / 1 ชิ้น		
				1	2	3	4	5	MAX	MIN	AVG.
1	วัดและตัดลวด	1	200	406.58	411.65	400.01	420.11	409.76	2.10	2.00	2.05
2	ตรวจสอบลวด	1	200	3.21	4.56	4.77	3.45	3.28	0.02	0.02	0.02
3	ร้อยลวด	11	11	100.63	97.65	95.27	96.62	97.36	9.15	8.66	8.86
4	ตรวจสอบด้วยสายตา	1	1	3.13	2.95	3.77	3.16	4.00	4.00	2.95	3.40
5	การตรวจสอบกระแสไฟ	1	1	3.49	3.85	3.65	3.70	3.72	3.85	3.49	3.68
6	ตรวจสอบการใส่ฐาน	1	1	3.32	4.99	5.43	3.90	5.10	5.43	3.32	4.55
7	ติด Label	1	1	4.70	4.79	4.41	4.18	4.80	4.80	4.18	4.58
8	บัดกรี	1	6	45.13	41.95	45.21	41.02	42.91	7.54	6.84	7.21
9	ควบคุมความสูง	1	1	3.68	2.67	3.84	3.73	4.03	4.03	2.67	3.59
10	การตรวจสอบกระแสไฟ	1	1	2.20	1.65	2.54	2.31	2.70	2.70	1.65	2.28
11	วัดขา Pin	1	1	3.12	2.98	2.75	3.40	2.89	3.40	2.75	3.03
12	การแพ็คสินค้า	1	370	481.00	490.00	475.65	502.03	512.90	1.39	1.29	1.33
TOTAL									48.40	37.79	44.58

จากตารางที่ 2. จากข้อมูลของการผลิตโมเดล CS540110SRB ซึ่งทางโรงงานสะดวกให้ปรับปรุงโมเดลนี้จึงดำเนินการศึกษาได้ข้อมูลรอบการผลิตของแต่ละสถานีผลก็คือสถานีที่ 3, 8 และ 7 มีรอบการผลิตสูงสุดเฉลี่ยตามลำดับ

วิเคราะห์กระบวนการผลิตโมเดลรุ่น CS540110SRB

การนำหลักการ 7 QC Tool มาปรับใช้ ได้แก่ แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) โดยวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น

(ลำปาง แสงจันทร์, 2554) ซึ่งอาจเกิดจาก คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัสดุดิบ (Materials) วิธีการทำงาน (Method) และนำมาหาวิธีแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นให้ตรงจุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเดิมทำการจับเวลาและศึกษาปัญหารอบการผลิตเฉลี่ยเรียงจากมากไปน้อย (วันชัย ธิจิรวนิช, 2543) ได้ผลดังตารางที่ 3

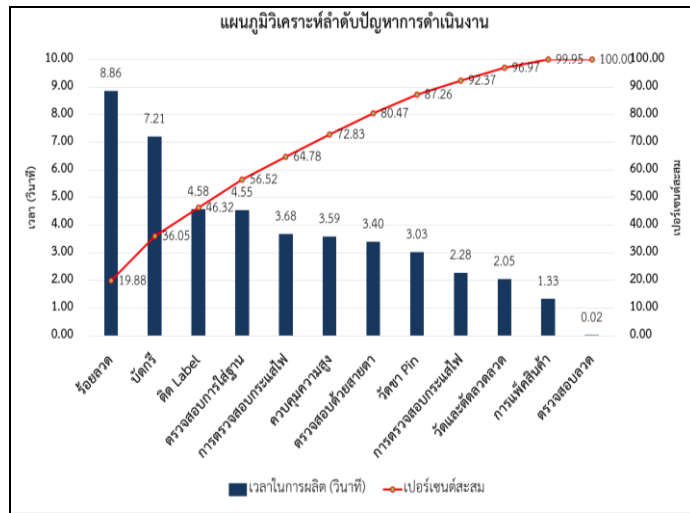
ตารางที่ 3. ข้อมูลการผลิตผลิตภัณฑ์โมเดล CS540110SRB เรียงลำดับเวลาการผลิตจากมากไปหาน้อยจำนวน 12 สถานี

Station	JOB DESCRIPTION	จำนวน คน	จำนวน ชิ้นงาน	AVG.	%	% สะสม
1	ร้อยลวด	11	11	8.86	19.88	19.88
2	บัดกรี	1	1	7.21	16.17	36.05
3	ติด Label	1	1	4.58	10.27	46.32
4	ตรวจสอบการใส่ฐาน	1	1	4.55	10.20	56.52
5	การตรวจสอบกระแสไฟ	1	1	3.68	8.26	64.78
6	ควบคุมความสูง	1	1	3.59	8.05	72.83
7	ตรวจสอบด้วยสายตา	1	1	3.40	7.63	80.47
8	วัดขา Pin	1	1	3.03	6.79	87.26
9	การตรวจสอบกระแสไฟ	1	1	2.28	5.11	92.37
10	วัดและตัดลวด	1	200	2.05	4.59	96.97
11	การแพ็คสินค้า	1	370	1.33	2.98	99.95
12	ตรวจสอบลวด	1	200	0.02	0.04	100.00
TOTAL				44.58	100.00	

จากตารางที่ 3 ข้อมูลเรียงลำดับเวลาการผลิต Cycle Time แต่ละสถานีจากมากไปหาน้อยจำนวนทั้งหมด 12 สถานีเพื่อหาสถานีที่ใช้เวลาในการทำงานและมีงานรอคอยมากที่สุด (วันชัย วิจิรวนิช, 2543)

เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาพลอต ลงในแผนภูมิพาเรโต ก็จะได้ทราบว่าปัญหาหลักและปัญหารองใน

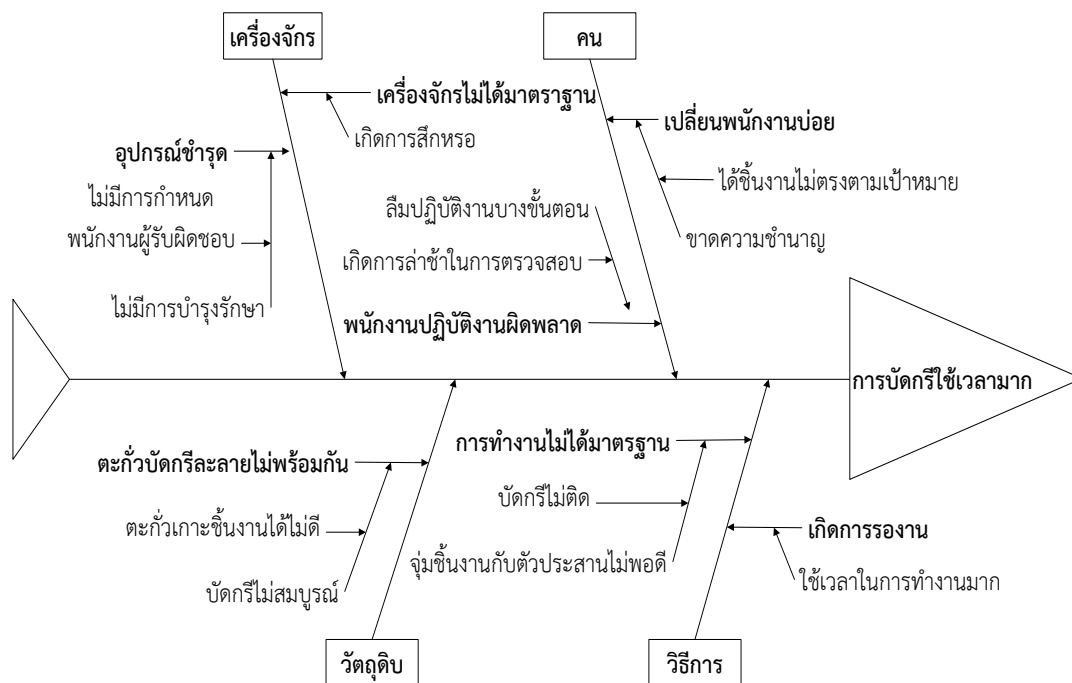
กระบวนการผลิตคือสถานีใดที่ใช้เวลาในการทำงานและมีงานรอคอยมากที่สุด และเพื่อดำเนินการพัฒนาและดำเนินการแก้ไขต่อไป(วิฑูรย์ สิมะโชคดี, 2541) ดังแสดงในรูปที่ 3



ภาพที่ 3 กราฟแสดงแผนภูมิวิเคราะห์ลำดับปัญหาหลักและปัญหารองของการดำเนินงาน

จากรูปที่ 3 สถานีร้อยลวดใช้เวลาในการปฏิบัติงานสูงที่สุดแต่ผู้จัดทำกรวิจัย ไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้เนื่องจากในการร้อยลวดนั้นพนักงานมีการลาออกบ่อยดังนั้นพนักงานจึงต้องฝึกทักษะอยู่บ่อยครั้งทำให้มีทักษะในการทำงานที่ไม่

เท่ากันและในการทำงานแต่ละสถานีพนักงานจะทำได้เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับประสบการณ์และแรงจูงใจ (วิฑูรย์ สิมะโชคดี, 2541) นั่นก็คือเงิน ดังนั้นทีมจึงเลือกแก้ไขในสถานีบัดกรีซึ่งเป็นสถานีที่ใช้เวลารอบการผลิตมากรองลงมาจากสถานีร้อยลวดดังกล่าว



ภาพที่ 4 แผนผังก้างปลาแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดการสูญเสียในการบัดกรี

ตารางที่ 4 ปัญหา สาเหตุ วิธีการแก้ไขปัญหาในกระบวนการลดการสูญเสียในการบัดกรี

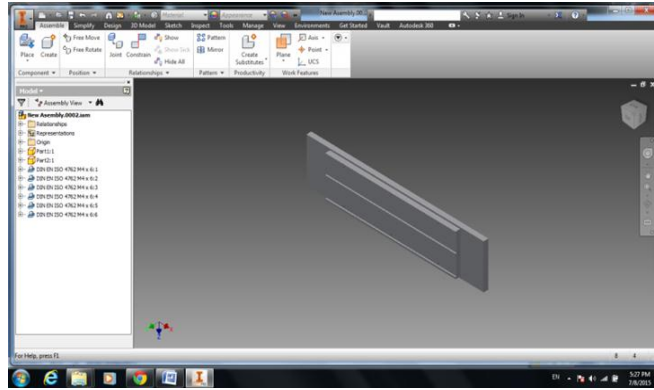
ปัญหา	ปัญหาหลัก	ปัญหารอง	ปัญหาย่อย	แก้ปัญหา
คน	เปลี่ยนพนักงานบ่อย	ขาดความชำนาญ	ได้ชิ้นงานไม่ตรงตามเป้าหมาย	จัดอบรมพนักงาน สอนวิธีปฏิบัติงานให้มีความเข้าใจก่อนทำงานจริง
	พนักงานปฏิบัติงานผิดพลาด	ลืมปฏิบัติงานบางขั้นตอน	เกิดการล่าช้าในการตรวจสอบ	จัดทำใบปฏิบัติงานให้ละเอียดและเข้าใจได้ง่าย
เครื่องจักร	เครื่องจักรไม่ได้มาตรฐาน	เกิดการสึกหรอ		จัดทำใบตรวจสอบระยะเวลาในการซ่อมบำรุงเครื่องจักร
เครื่องจักร	อุปกรณ์ชำรุด	ไม่มีการบำรุงรักษา	ไม่มีการกำหนดพนักงานผู้รับผิดชอบ	มอบหมายหน้าที่ให้รับผิดชอบเครื่องจักรที่ตนปฏิบัติงาน

ตารางที่ 4 ปัญหา สาเหตุ วิธีการแก้ไขปัญหาในกระบวนการลดการสูญเสียในการบัดกรี (ต่อ)

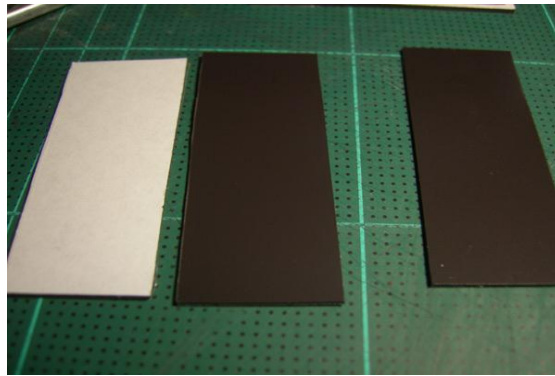
ปัญหา	ปัญหาหลัก	ปัญหารอง	ปัญหาย่อย	แก้ปัญหา
วัตถุดิบ	ตะกั่วบัดกรีละลายไม่พร้อมกัน	บัดกรีไม่สมบูรณ์	ตะกั่วเกาะชิ้นงานไม่ดี	กำหนดอุณหภูมิให้อยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้ในการบัดกรี
วิธีการ	เกิดการรอกาน	ใช้เวลาในการทำงานมาก		ทำฟิกเจอร์ช่วยในการทำงานเพื่อความสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น
	การทำงานไม่ได้มาตรฐาน	จุ่มชิ้นงานกับตัวประสานไม่พอดี	บัดกรีไม่ติด	หมั่นเติมตัวประสานให้ถึงจุดที่กำหนด และพอดีกับขาพินในการบัดกรี

จากตารางที่ 4 พบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียเวลาในการผลิตแบ่งออกเป็นสาเหตุหลัก 4 ประเภทคือสาเหตุจากคน สาเหตุจากกระบวนการ สาเหตุจากเครื่องจักร และสาเหตุจากวัสดุ (ทวีศักดิ์ มโนสีบ, 2558) ซึ่งจากการที่คณะผู้วิจัยได้ศึกษา และสังเกตการณ์กระบวนการผลิต สาเหตุหลักที่เกิดความถี่ทำให้เสียเวลาคือสาเหตุที่เกิดจากวิธีการทำงาน

ทำการออกแบบฟิกเจอร์ (Fixture Design) เพื่อช่วยในการทำงานของพนักงานให้สะดวกและง่ายขึ้นได้ ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตที่สถานีบัดกรี (Solder) จัดทำการควบคุมด้วยการใช้ฟิกเจอร์เพื่อลดความสูญเสียเปล่าในการทำงานที่ซ้ำซ้อนรวมถึงช่วยลดเวลาในการทำงาน (วชิระ มีทอง, 2537) แสดงดังภาพที่ 5,6 และ 7



ภาพที่ 5 ออกแบบอุปกรณ์จับงานและเขียนแบบงานช่วยในการจับยึดชิ้นงาน



ภาพที่ 6 แผ่นแม่เหล็กขนาดความกว้างเท่ากับ 64 มิลลิเมตรและความยาวเท่ากับ 220.3 มิลลิเมตร



ภาพที่ 7 พิกเจอร์ช่วยในการจับยึดชิ้นงาน

จากวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 2 มีวิธีการดำเนินการดังนี้

ดำเนินการลดต้นทุนโดยการลดปริมาณความยาวของลวดทองแดงให้มีความยาวเหมาะสมกับชิ้นงาน โดยมี

ตารางที่ 5 ข้อมูลการตัดเส้นลวดทองแดง

ผลการวิจัยดังรายละเอียดดังนี้คือ ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการตัดเส้นลวดทองแดงในการลดขนาดความยาวแสดงดังตารางที่ 5

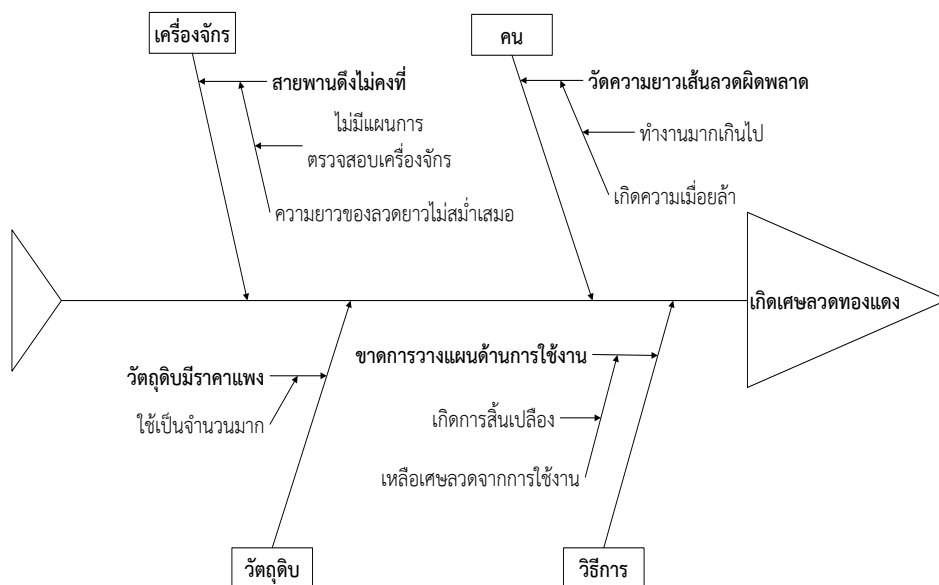
ครั้งที่	เศษลวดทองแดงที่ตัดทิ้ง
----------	------------------------

	(มิลลิเมตร)
1	37
2	37
3	45
⋮	⋮
↓	↓
28	40
29	52
30	56
เฉลี่ย	43

จากตารางที่ 5 พบว่าในการตัดเส้นลวดทองแดงมีความยาว 1,320 มิลลิเมตร และมีการตัดเส้นลวดทองแดงที่มีความยาวสูงสุด 56 มิลลิเมตร ความยาวต่ำสุด 37 มิลลิเมตร โดยเฉลี่ยการตัดเส้นลวดทองแดงที่มีความยาว 43 มิลลิเมตร

วิเคราะห์ปัญหาของเสียในโรงงานกรณีศึกษา การนำหลักการ 7 QC Tools มาปรับใช้ ได้แก่ แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) โดยวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจาก คน(Man) เครื่องจักร(Machine) วัสดุ(Materials) วิธีการทำงาน(Method) และนำมาหาวิธีแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นให้ตรงจุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต (ทวิศักดิ์ มโนสีบ, 2558) แสดงดังรูปภาพที่ 8

วิเคราะห์ปัญหาของการเหลือเศษลวดทองแดง



ภาพที่ 8 แผนผังก้างปลาแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดต้นทุนของลวดทองแดง

ตารางที่ 6 ปัญหา สาเหตุ วิธีการแก้ไขปัญหาในกระบวนการวัดและตัดเส้นลวดทองแดง

ปัญหา	ปัญหาหลัก	ปัญหารอง	ปัญหาย่อย	แก้ปัญหา
คน	วัดความยาวลวด ผิดพลาด	เกิดความเมื่อยล้า	ทำงานมากเกินไป	กำหนดเวลาในการพักของแต่ละช่วงเวลาในการทำงาน
เครื่องจักร	สายพานตึงไม่คงที่	ความยาวของลวดไม่สม่ำเสมอ	ไม่มีแผนการตรวจสอบเครื่องจักร	จัดทำใบตรวจสอบระยะเวลาในการซ่อมบำรุงเครื่องจักร(ทวิศักดิ์ มโนสืบ, 2558)
วัตถุดิบ	วัตถุดิบมีราคาแพง	ใช้เป็นจำนวนมาก		วางแผนในการใช้วัตถุดิบให้เหมาะสม
วิธีการ	ขาดการวางแผนด้านการใช้งาน	เหลือเศษลวดจากการใช้งาน	เกิดการสิ้นเปลือง	วางแผนในการตัดความยาวของเส้นลวดทองแดงให้เหมาะสมกับการใช้งาน

กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานกระบวนการตัดลวดทองแดง

ทางคณะผู้จัดทำโครงการได้สังเกตเห็นปัญหาของเส้นลวดทองแดงที่ต้องตัดทิ้งในกระบวนการทำงานในสถานีการใส่ฐานชิ้นงาน ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองวัสดุ

โดยไม่จำเป็น จึงได้ทำการปรับปรุงที่สาเหตุการเหลือเศษวัสดุโดยการตัดความยาวเส้นลวดทองแดงให้มีความยาวลดลงจากเดิมในสถานีการวัดและตัดเส้นลวดทองแดง จากเดิมตัดความยาว 1,320 มิลลิเมตรปรับปรุงให้เหลือความยาว 1,280 มิลลิเมตร



ภาพที่ 9 เศษเส้นลวดทองแดงที่ตัดทิ้ง

วิเคราะห์ผลการตัดลวดทองแดง

การใช้อัตราส่วนทางการเงินในการวิเคราะห์สมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ จำนวนชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น × ราคาชิ้นงาน

การคำนวณความยาวของลวดทองแดงที่ตัดทิ้ง สูตรที่ใช้ในการคำนวณ คือ (จำนวนชิ้นงานที่ผลิต × ความยาวของเส้นลวดทองแดงก่อนปรับปรุง × จำนวนเส้นลวดทองแดงที่ใช้) - (จำนวนชิ้นงานที่ผลิต × ความยาวของเส้นลวดทองแดงหลังปรับปรุง × จำนวนเส้นลวดทองแดงที่ใช้)

สรุปผลการปรับปรุงของกระบวนการตัดลวดทองแดง

ในส่วนของ การใช้วัตถุดิบสิ้นเปลืองมากในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในการผลิตจะมีลวดที่ต้องตัดทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาฯ ยังไม่ได้มีการแก้ไขปัญหาตรงจุดนี้ เพราะโรงงานกรณีศึกษาฯ ไม่ได้สังเกตเห็นความสูญเปล่าของวัสดุ

ผลการวิจัย

จากการศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการศึกษาจากโรงงานกรณีศึกษาฯ ซึ่งดำเนินการตามวัตถุประสงค์งานวิจัยคือ 1. เพื่อช่วยลดเวลาในการทำงานของพนักงานในกระบวนการผลิต 2. เพื่อช่วยลดการใช้

วัตถุดิบ (ลวดทองแดง) ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

จากวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 1 ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการจับเวลาและออกแบบฟิกเจอร์ (Fixture Design) เพื่อช่วยในการทำงานของพนักงานของโรงงานกรณีศึกษาเพื่อค้นหาปัญหาและทำการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

ในโรงงานจากการศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตที่สถานีบัดกรี (Solder) จัดทำการควบคุมด้วยการใช้ฟิกเจอร์เพื่อลดเวลาในการทำงาน (วชิระ มีทอง, 2537) โดยมีการนำเสนอตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ 3 เดือนก่อนการใช้อุปกรณ์ช่วยจับยึด (เฉลี่ย: เดือน)

เดือน	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	เฉลี่ย/เดือน
จำนวนชิ้นงานที่ผลิต (ชิ้น)	118,208	98,132	116,734	111,925

จากตารางที่ 7 ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เรานำข้อมูลการผลิต 3 เดือนคือตั้งแต่เดือนมิถุนายน – สิงหาคม มาเก็บไว้เพื่อแสดงเป็นข้อมูลในการจับเวลาก่อนการใช้อุปกรณ์ช่วยจับยึด โดยมีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 111,925 ชิ้นต่อเดือน

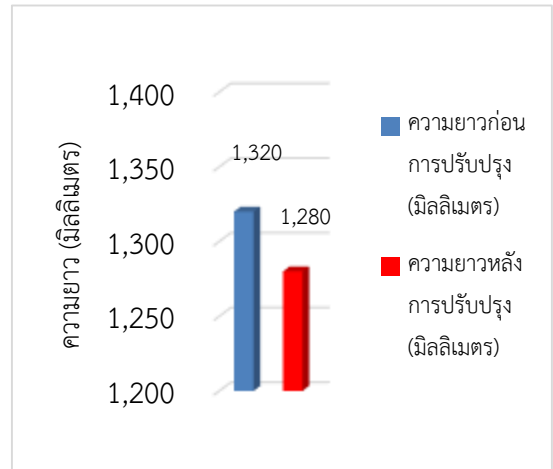
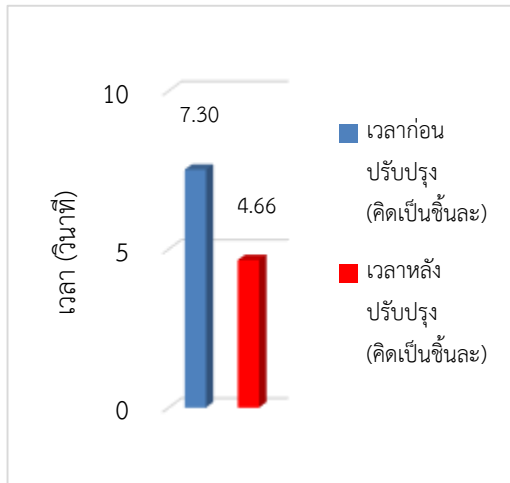
ข้อมูลการจับเวลาในกระบวนการบัดกรี เมื่อทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงประสิทธิภาพเมื่อนำอุปกรณ์ช่วยจับยึดฟิกเจอร์(วชิระ มีทอง, 2537) มีผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์ช่วยจับยึดในเวลาประมาณ 60 วินาที (เฉลี่ย:1นาท)

ครั้งที่	ก่อนปรับปรุงฟิกเจอร์ จับชิ้นงานได้ 6 ชิ้น		หลังปรับปรุงฟิกเจอร์ จับชิ้นงานได้ 12 ชิ้น		(E= B-D) เวลาที่ลดลง (วินาที)
	(A) เวลาก่อนปรับปรุง (วินาที)	(B) เวลาก่อนปรับปรุง (คิดเป็นชิ้นละ)	(C) เวลาก่อนปรับปรุง (วินาที)	(D) เวลาก่อนปรับปรุง (คิดเป็นชิ้นละ)	
1	43.21	7.20	55.14	4.59	2.61
2	42.02	7.00	57.28	4.77	2.23
3	41.32	6.89	56.28	4.69	2.20
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
↓	↓	↓	↓	↓	↓
28	41.58	6.93	55.68	4.64	2.29
29	42.36	7.06	59.32	4.94	2.12
30	45.72	7.62	58.34	4.86	2.76
เฉลี่ย	43.81	7.30	55.90	4.66	2.64

จากตารางที่ 8 ก่อนการปรับปรุงในสถานีบัดกรี 1 ครั้ง ได้ชิ้นงาน 6 ชิ้น ใช้เวลาเฉลี่ยในการทำงาน 43.81 วินาที คิดเป็นเวลาที่ใช้เฉลี่ย 7.30 วินาทีต่อชิ้น หลังการปรับปรุงสามารถเพิ่มชิ้นงาน

เป็น 12 ชิ้น ใช้เวลาเฉลี่ย 55.90 วินาที คิดเป็นเวลาที่ใช้เฉลี่ย 4.66 วินาทีต่อชิ้น แสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 2 ดังนั้นเวลาที่ลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 2.64 วินาทีต่อชิ้น



ภาพที่ 10 แผนภูมิเปรียบเทียบการจับเวลาในการบัดกรีเฉลี่ย

ภาพที่ 11 แผนภูมิเปรียบเทียบความยาวของเส้นลวดทองแดง ก่อนและหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 9 ปริมาณการเพิ่มจำนวนของชิ้นงานหลังการปรับปรุง

เดือน	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	เฉลี่ย/เดือน
จำนวนชิ้นงานที่ผลิต (ชิ้น)	137,047	115,340	121,443	119,786	123,404

จากตารางที่ 9 ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เรานำข้อมูลการผลิต 4 เดือนคือตั้งแต่เดือน กันยายน – ธันวาคม มาเก็บไว้เพื่อแสดงเป็นข้อมูลในการจับเวลาหลังการใช้อุปกรณ์ช่วยจับยึด โดยมีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 123,404 ชิ้นต่อเดือน

จากการทดลองในการวัดผลโมเดลรุ่น CS540110SRB การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการผลิตในโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้หลักการ 4M หลักการ

7 QC Tools ซึ่งได้แก่ ใบตรวจสอบ แผนภูมิเหตุ และผล แผนภูมิพาเรโต และกราฟ มาวิเคราะห์ในการหาปัญหาเพื่อทำการแก้ไขการปรับปรุงประสิทธิภาพอุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงานเพื่อให้ลดเวลาการทำงานของพนักงานก่อนการปรับปรุงใช้เวลาเฉลี่ยชิ้นละ 7.30 วินาที เมื่อปรับปรุงฟิกเจอร์ใช้เวลาเฉลี่ยชิ้นละ 4.66 วินาที มีผลดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณการเพิ่มจำนวนของชิ้นงานหลังการปรับปรุง

การปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	ก่อนการปรับปรุง	เพิ่มขึ้น
เฉลี่ย/เดือน	123,404	111,925	12,379

จากตารางที่ 10 พบว่าหลังการปรับปรุงเก็บข้อมูลการผลิตจำนวน 4 เดือนดังกล่าวมีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 123,404 ชิ้นต่อเดือน เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิต 3 เดือนก่อนการปรับปรุงคือตั้งแต่เดือน มิถุนายน – สิงหาคม มีปริมาณการผลิตเฉลี่ย

111,925 ชิ้นต่อเดือน หากนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงเราจะพบว่าจำนวนชิ้นงานที่ทำการผลิตจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 12,379 ชิ้นต่อเดือน

จากวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 2 ดำเนินการลด ต้นทุนโดยการลดปริมาณความยาวของลวดทองแดงให้ มีความยาวเหมาะสมกับชิ้นงาน โดยมีผลการวิจัยดัง

รายละเอียดดังนี้คือ ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการตัด เส้นลวดทองแดงในการลดขนาดความยาวแสดงดัง ตารางที่ 11

ตาราง 11 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงการลดความยาวของเส้นลวดในกระบวนการวัดและตัดลวด

ครั้งที่	(A) ความยาวลวดก่อน ปรับปรุง (มิลลิเมตร)	(B) เศษลวดที่ตัดทิ้ง ก่อนปรับปรุง (มิลลิเมตร)	(C) ความยาวลวดหลัง ปรับปรุง (มิลลิเมตร)	(D) เศษลวดที่ตัดทิ้งหลัง ปรับปรุง (มิลลิเมตร)	(B/D) × 100 เศษลวดที่สามารถ ลดได้ (คิดเป็นร้อยละ)
1	1,320	37	1,280	16	43.24
2	1,320	37	1,280	17	45.95
3	1,320	45	1,280	21	46.67
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
↓	↓	↓	↓	↓	↓
28	1,320	40	1,280	16	40.00
29	1,320	52	1,280	14	26.92
30	1,320	56	1,280	19	33.93
เฉลี่ย	1,320	43	1,280	17.5	41.23

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบความยาวของเส้นลวดทองแดงก่อนและหลังการปรับปรุง

ความยาวก่อนการปรับปรุง (มิลลิเมตร)	ความยาวหลังการปรับปรุง (มิลลิเมตร)	ความยาวที่ลดลง/เส้น (มิลลิเมตร)	ความยาวที่ลดลง/ชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
1,320	1,280	40	80

จากตารางที่ 12 พบว่าในการประกอบชิ้นงานใช้ ลวดทองแดง 2 เส้นต่อ 1 ชิ้นงานและมีความยาวเส้นละ 1,320 มิลลิเมตร แต่หลังการประกอบจะมีเศษ เส้นลวดทองแดงเหลืออยู่โดยเฉลี่ย 43 มิลลิเมตร ซึ่ง ก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองและเพื่อความสะดวกในการ ปฏิบัติงานของพนักงาน จึงได้ทำการตัดเส้นลวดทองแดง ลดลงที่ความยาว 40 มิลลิเมตร เหลือชิ้นงานที่ความยาว เส้นละ 1,280 มิลลิเมตร แสดงดังรูปภาพที่ 3 เป็นผลให้ พนักงานทำงานสะดวกพอสมควรและสามารถลดต้นทุน การผลิตจากการใช้ลวดทองแดงที่เหมาะสมลงได้ 80 มิลลิเมตรต่อ 1 ชิ้นงาน (หากว่ามีการผลิตเฉลี่ย 123,404 ชิ้น/เดือน) สามารถลดปริมาณการใช้ลวดทองแดงลงได้ $123,404 \times 80 = 9,872,320$ มิลลิเมตร (ประมาณ 9872.3 เมตร) ต่อเดือน

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพใน กระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยได้ ดำเนินการตามวัตถุประสงค์งานวิจัยคือ 1. เพื่อช่วยลด เวลาในการทำงานของพนักงานในกระบวนการผลิต 2. เพื่อช่วยลดการใช้วัตถุดิบ (ลวดทองแดง) ในการผลิต ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

จากวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 1 ทำการเก็บ รวบรวมข้อมูลการทำงานในปัจจุบันพร้อมกับการจับเวลา เพื่อศึกษาสภาพของปัญหาเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการ วิเคราะห์ผลในการตัดสินใจวางแผนดำเนินการปรับปรุง

แก้ไขเพื่อให้การปฏิบัติงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ ทวีศักดิ์ มโนสืบ (ทวีศักดิ์ มโนสืบ, 2558) วิชา สกอลารีพัฒนา (วิชา สกอลารีพัฒนา, 2547) ธนะศักดิ์ แก้วขมภู (ธนะศักดิ์ แก้วขมภู, 2553) และ เสาวนีย์ ชัยศิริพานิช (เสาวนีย์ ชัยศิริพานิช, 2553) ที่กล่าวว่าการสำรวจสภาพทั่วไปของโรงงานพร้อมทั้งเก็บข้อมูลเพื่อทำการการวิเคราะห์ปัญหาโดยอาศัยหลักการของการมีส่วนร่วมของพนักงาน มีแผนการดำเนินงานอย่างเป็นระบบและผู้บริหารต้องมีความสนใจในข้อมูลที่สามารถเปรียบเทียบได้หลายมิติ เพื่อช่วยในการตัดสินใจ โดยทำการรวมและแปลงข้อมูลของอุปกรณ์การbinและปัจจัยปัญหาทางเทคนิคให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการ วิเคราะห์ การตัดสินใจ และการวางแผนการดำเนินงานรวมทั้งได้รับข้อมูลสารสนเทศเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ ต่อไป

จากนั้นก็มาทำการ ออกแบบฟิกเจอร์ (Fixture Design) เพื่อช่วยในการทำงานของพนักงานให้สะดวกและง่ายขึ้น (วชิระ มีทอง, 2537) ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตที่สถานีบัดกรี (Solder) จัดทำการควบคุมด้วยการใช้ฟิกเจอร์เพื่อลดความสูญเปล่าในการทำงานที่เข้าซ้อนรวมถึงช่วยลดเวลาในการทำงาน สอดคล้องกับแนวคิดของทวีศักดิ์ มโนสืบ (ทวีศักดิ์ มโนสืบ, 2559) และสุชาติ วาริสตใส (สุชาติ วาริสตใส, 2551) ที่กล่าวว่าจิ๊กและฟิกเจอร์ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อทำการยึดจับรองรับ และกำหนดตำแหน่งชิ้นงานทุก ๆ ชิ้น เพื่อให้แน่ใจว่าในการเจาะรูหรือการตักแต่งด้วยวิธีอื่น ๆ จะได้ตำแหน่งเดิมหรือขนาดตามรายละเอียดที่กำหนดมาทุกประการ ช่วยลดการทำงานที่เข้าซ้อนรวมถึงช่วยลดเวลาในการปฏิบัติงาน ยังผลให้ก่อนการปรับปรุง มีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 111,925 ชิ้นต่อเดือน หลังการปรับปรุงมีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 123,404 ชิ้นต่อเดือน เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุงเราจะพบว่าจำนวนชิ้นงานที่ทำการผลิตจะมีจำนวนเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 12,379 ชิ้นต่อเดือน

จากวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 2 มีดำเนินการลดต้นทุนโดยการลดปริมาณความยาวของลวดทองแดงให้มีความยาวที่เหมาะสมกับชิ้นงาน โดยทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูล จากการตัดเส้นลวดทองแดงจากความยาวเส้นละ 1,320 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีเศษเส้นลวดทองแดงเหลืออยู่โดยเฉลี่ย 43 มิลลิเมตรต่อเส้น ได้ทำการลดขนาดลงเหลือความยาวเส้นละ 1,280 มิลลิเมตร (ตัดเส้นลวดทองแดงลดลงที่ความยาว 40 มิลลิเมตร) พนักงานก็ยังคงทำงานสะดวกพอสมควร และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของกิติชัย เตมียกุล (กิติชัย เตมียกุล, 2543) และสันติ ชินานูวิทวงศ์ (สันติ ชินานูวิทวงศ์, 2543) ที่เสนอว่า การจัดรูปแบบการตัดให้เหมาะสมเหลือเศษน้อยที่สุด ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการลดเศษจากการตัดวัสดุและวิธีการควบคุม ดูแลที่จะใช้ในการลดปริมาณของเสียให้มากที่สุดและมีผลสัมฤทธิ์สูงที่สุดได้แก่ การควบคุมดูแลการลดจำนวนของเสียจากการผลิตนั่นเอง ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนการผลิตจากการใช้ลวดทองแดงที่เหมาะสมลงได้ 80 มิลลิเมตรต่อ 1 ชิ้นงาน (จากข้อมูลหากมีการผลิตเฉลี่ย 123,404 ชิ้น/เดือน) สามารถลดปริมาณการใช้ลวดทองแดงลงได้ $123,404 * 80 = 9,872,320$ มิลลิเมตร (ประมาณ 9872.3 เมตร) ต่อเดือน ส่งผลให้เศษของเสียและปริมาณการใช้ลวดทองแดงลดน้อยลง

สรุป

จากการทดลองทางคณะผู้ดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดลองการทำงานจริงในโรงงาน ได้นำเอาหลักการต่างๆ ซึ่งใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตประกอบไปด้วยการสร้างอุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงานเพื่อได้จำนวนชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากเดิมและช่วยลดเวลาการทำงานของพนักงานให้น้อยลง, การลดขนาดความยาวของวัสดุ (ลวดทองแดง) ให้ได้ตามขนาดที่กำหนดแล้วจึงนำไปปฏิบัติการผลิตงานได้จริง

จากการทดลองจับเวลาเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงโดยใช้ฟิกเจอร์ในการบัดกรี

พบว่า พนักงานบัตรกรี 1 ครั้งได้ขึ้นงาน 6 ชิ้นโดยใช้ เวลาเฉลี่ย 43.81 วินาที คิดเป็นขึ้นใช้เวลาเฉลี่ย 7.30 วินาที หลังจากการปรับปรุงฟีกเจอร์พนักงานสามารถ เพิ่มขึ้นงานได้เป็น 12 ชิ้น โดยใช้เวลาเฉลี่ย 55.90 วินาที คิดเป็นขึ้นใช้เวลาเฉลี่ย 4.66 วินาที (ดังตารางที่ 8) จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงกระบวนการบัตรกรี สามารถ ลดเวลาในการปฏิบัติงานเฉลี่ยได้ 2.64 วินาทีหรือลด เวลาได้ต่อชิ้น 36.16 %

จากการทดลองลดความยาวของเส้นลวดทองแดงพบว่าลวดทองแดง 1 เส้นมีความยาวทั้งหมด 1,320 มิลลิเมตร สามารถลดความยาวของเส้นลวดทองแดงได้ 40 มิลลิเมตร จะเหลือความยาวของเส้นลวดทองแดงเท่ากับ 1,280 มิลลิเมตร ดังนั้นจากการดำเนินการดังกล่าวจึงเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้ต่อเส้น 3% และวัตถุดิบปริมาณเท่าเดิมสามารถผลิตได้จำนวนชิ้นงานเพิ่มขึ้น

ปัญหาที่พบ

1.การจัดเก็บข้อมูลของโรงงานกรณีศึกษา ถูกจัดเก็บในใบเอกสารที่บันทึกโดยไม่มีการจัดเก็บใส่เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ยากต่อการค้นหา และดึงข้อมูลที่ต้องการมาใช้ ซึ่งทำให้เกิดความไม่สะดวกและใช้เวลานาน และอาจทำให้การมองเห็นของสภาพปัญหาโดยภาพรวมที่เกิดขึ้นในโรงงานกรณีศึกษาไม่ชัดเจน

2. การใช้ภาษาต่างกันเนื่องจากพนักงานส่วนใหญ่เป็นชาวเมียนมา ทำให้มีความลำบากในการสื่อสาร ทำให้มีการสื่อสารที่ผิดและไม่เข้าใจความหมายที่ตรงกัน

3. สถานที่ปฏิบัติงานเพื่อใช้ในการทำงานของพนักงาน มีพื้นที่จำกัด จึงทำให้เกิดการทำงานที่ไม่สะดวก

4. แสงสว่างมีไม่เพียงพอต่อการมองเห็นสำหรับใช้ในการปฏิบัติงานของพนักงาน

ข้อเสนอแนะ

1.โรงงานกรณีศึกษาควรมีการจัดทำโปรแกรมในการบันทึกข้อมูลของเสียสำเร็จรูป เพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลได้สะดวกรวดเร็ว, มีความถูกต้อง และ

สามารถดึงข้อมูลนำมาใช้ได้โดยง่าย (ธนะศักดิ์ แก้วชมพู, 2553)

2. ศึกษาเรียนรู้การใช้ภาษาของพนักงานเพื่อใช้ในการสื่อสารสำหรับการปฏิบัติงานที่สะดวกขึ้น

3. สำหรับการศึกษาค่าการเคลื่อนที่ของพนักงานที่ใช้ในบริเวณสำหรับการปฏิบัติงาน ควรใช้แนวคิดตามหลักการยศาสตร์ (โชคชัย จันท์ธวัตรกุล, 2552)

4. ควรทำการศึกษาค่าความสว่างที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงาน และดำเนินการปรับปรุงแก้ไขให้ได้มาตรฐานการปฏิบัติงานที่เหมาะสม (วิฑูรย์ สิมะโชคดี, 2541)

เอกสารอ้างอิง

กิตติชัย เตมียกุล. (2543). แนวทางการลดต้นทุนของ

โรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ตามทัศนะของ

ผู้บริหารสูงสุดของโรงงาน. วิทยานิพนธ์นี้เป็น

ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ครุศาสตร์

อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต. สาขาวิชาธุรกิจ

อุตสาหกรรม. ภาควิชาบริหารเทคนิคศึกษา.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าพระนครเหนือ.

โชคชัย จันท์ธวัตรกุล. (2552). **การเพิ่มผลผลิตโดย**

การประยุกต์ใช้หลักการยศาสตร์. การศึกษา

ค้นคว้าด้วยตนเองเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.

สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม. ภาควิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ทวีศักดิ์ มโนสืบ. (2558). **เอกสารประกอบการสอน**

วิชาการควบคุมคุณภาพ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลล้านนา ตาก.

ทวีศักดิ์ มโนสืบ (2559). การศึกษาสภาพปัญหาและ

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต: กรณีศึกษาโรงงาน

ไผ่สุคนธ์ จังหวัดลำปาง. **การประชุมวิชาการ**

ข่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ.

2559. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. คณะ

วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 7-8

กรกฎาคม 2559. ขอนแก่น.

- ธนะศักดิ์ แก้วขมภู. (2553). **ระบบคลังข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลด้านการวินิจฉัยและการเจ็บป่วยของสถานีอนามัย**. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ. ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธิตินัดดา เย็นทรงง. (2558). **การลดต้นทุนด้านแรงงานและการบริหารจัดการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลงวัตถุดิบกรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นไม้สัก**. วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมมหาบัณฑิต. ภาควิชาการจัดการอุตสาหกรรม. คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นิรุทธิ์ กาบแก้ว. (2551). **การพัฒนากระบวนการควบคุมชิ้นส่วนของเครื่องจักรและเครื่องมือจักรฟูกเจอร์ที่ใช้ในสายการประกอบรถจักรยานยนต์**. วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ยุทธ ไภยวรรณ. **การบริหารคุณภาพในโรงงานอุตสาหกรรม**. สุริยวิสาสน์.
- ลำปาง แสงจันทร์. (2554). **หนังสือควบคุมคุณภาพ QC Lesson 3**.
- วชิระ มีทอง. (2537). **การออกแบบจิ๊กและฟิกเจอร์**. ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วันชัย ริจิรวนิช. (2543). **การศึกษาการทำงานหลักการและกรณีศึกษา**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- วิชา สุกุลอารีวัฒนา. (2547). **ระบบคลังข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ปัจจัยปัญหาทางเทคนิคและปฏิบัติการการบิน**. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ. ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิชัย แหวนเพชร. (2547). **การวางแผนและควบคุมการผลิต**. หจก.ธรรมมงคลการพิมพ์. กรุงเทพมหานคร.
- วิฑูรย์ สิมะโชคดี. (2541). **TQM คู่มือองค์กรคุณภาพยุค 2000**. TPA PUBLISHING.
- ศิริพร ขอฟรกกลาง. (2544). **การควบคุมคุณภาพ**. สกายบุ๊ก. กรุงเทพมหานคร.
- สันติ ชินานุวัตินวงศ์. (2543). **การลดเศษจากการตัดเหล็กเสริมคอนกรีตในโครงการก่อสร้างวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. ฉบับที่ 40, 39.
- สุชาติ วารีสดใส. (2551). **ศึกษาสมรรถนะที่ต้องการของช่างผลิต Jig & Fixture สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์**. วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต. สาขาวิชาบริหารอาชีพและเทคนิคศึกษา. ภาควิชาบริหารเทคนิคศึกษา. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เสาวนีย์ ชัยศิริพานิช. (2553). **การประยุกต์ใช้ระบบคลังข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์การส่งออกกรณีศึกษา กรมศุลกากร**. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาคอมพิวเตอร์. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- Dale H. Besterfield. (1998). **Quality Control. Fifth Edition. Phoenix Color Corp. New Jersey: Printed in the USA, 47-69.**

การออกแบบและสร้างระบบกำจัดควันสำหรับเตาเผาความร้อนต่ำ ด้วยวิธีตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

Design and Construction of Smoke Removal System for Low Heated Kiln with Electrostatic Precipitator

เพลิน จันทรสุยะ^{1*}, ชัยรัตน์ เจริญภูทอง^{2*} และ ธนกร ยอดยิ่ง^{3*}
Phlearn Jansuya^{1*}, Chairat Charouentong^{2*} and Thanakron Yotyong^{3*}

^{1,2,3} มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย 99 ถนนพหลโยธิน อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย

^{1,2,3} Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai

*Corresponding author e-mail: Jansuya@hotmail.com, chairat_1993@hotmail.com and thanakronyotyong@gmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบและสร้างระบบกำจัดควันสำหรับเตาเผาความร้อนต่ำด้วยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตนี้จะมีขนาดตัวเครื่องตกตะกอน (กว้าง x ยาว x สูง) 30 x 30 x 30 เซนติเมตร ชนิดเส้นลวดกับแผ่นเพลท เส้นลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร และความกว้างเพลท 25 x 25 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นเพลท 2 เซนติเมตร มีเส้นลวดเป็นขั้วปล่อยประจุไฟฟ้าขั้วลบ แผ่นเพลทเป็นขั้วบวก โดยใช้ไฟฟ้าจากชุดวงจรสร้างไฟฟ้าแรงดันสูง โดยใช้หลักการควบคุมสัญญาณพัลส์ความถี่สูงผ่านวงจรขับเกต เพื่อไปควบคุมมอสเฟตในการสับสวิชต์แรงดันไปจ่ายให้กับหม้อแปลงพลาเยแบค ได้อาต์พุตออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดถึง 18 กิโลโวลต์ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 5, 10, 15, 18 กิโลโวลต์ และมีความเร็วลมที่แตกต่างกันคือ ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ, 0.5, 07 เมตรต่อวินาที ผลสรุปออกมาพบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ เครื่องตกตะกอนมีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 99.05 เปอร์เซ็นต์ โดยพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องตกตะกอนเครื่องนี้อยู่ที่ 95 วัตต์

คำสำคัญ: ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต, กำจัดฝุ่น, ไฟฟ้าแรงสูง

Abstract

Design and build smoke removal system for heating furnace with low precipitation electrostatic precipitator is a machine (Width x length x height): 30 x 30 x 30 cm Wire to the plate Wire with a diameter of 0.5 mm and width 25 x 25 cm The distance between the wire and plate 2 cm with a wire electrode discharge cathode. The electricity generated from the high voltage circuit. Using the control signal pulses frequency, Through the gate drive circuit In order to control the MOSFET for switching the voltage supplied to fly back transformers. Has a DC output of up to 18 kV, researchers tested the voltage of 5, 10, 15, 18 kV and wind speed is different. Wind flow naturally, 0.5, 07 meters per second. The conclusion was that the electrical voltage 10 kV air flow naturally. Precipitation and high efficiency is 99.05 percent. The rated power of this precipitation is 95 watt

Keywords: Electrostatic Precipitator, Dust, High Voltage.

บทนำ

เครื่องกำจัดควันจากเตาเผา ทำให้ไม่ถึงมีความสำคัญ เพราะจากการที่เราเผาขยะ ซากพืชซากสัตว์ หรือแม้แต่การจุกรูป ก็ทำให้เกิดควันหรือก๊าซขึ้นมามาก เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซมีเทน (CH₂) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO) และสารก่อมะเร็งหลายชนิด สารเบนโซเอไพรีน ลอยออกมาปะปนกับอากาศที่เราหายใจเข้าไป หากเราสูดดมเข้าไปมากๆ อาจทำให้เกิดอาการแสบจมูกจนลุกลามไปถึงอาการอักเสบในระบบทางเดินหายใจ รวมถึงในกรณีที่ควันลอยผ่านเข้าไปในดวงตา ก็จะทำให้เกิดอาการแสบตาจนอาจทำให้ตาอักเสบได้ ซึ่งที่กล่าวมานี้ ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสัตว์ ทั้งในด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม สังคม เศรษฐกิจ การท่องเที่ยว ระบบกำจัดควันด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นมีความจำเป็นอย่างมากต่อโรงงานอุตสาหกรรม เพราะว่าโรงงานอุตสาหกรรมมีการปล่อยควันที่เป็นมลพิษ ส่งผลเสียต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมเป็นสาเหตุของโรคทางเดินหายใจ บดบังทัศนวิสัยในการจราจร เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ และเป็นอีกปัจจัยของการก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ

ระบบกำจัดควันด้วยไฟฟ้าสถิต หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitators; ESP) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถดักจับฝุ่นละอองด้วยไฟฟ้าสถิต สามารถกำจัดฝุ่นที่มีอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมครอน ทนต่ออุณหภูมิสูง และใช้ได้กับอัตราการไหลของอากาศสูงได้ดี วิธีนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูง จึงไม่แปลกที่ในเครือโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ส่วนใหญ่เลือกใช้การกำจัดควันด้วยไฟฟ้าสถิต

บททวนวรรณกรรม

พงศ์ประพัฒน์ พรหมสุวรรณ และคณะ (2556) [9] ออกแบบและสร้างเตาเผาขยะไร้ควันสำหรับสำนักงาน ที่มีขนาด 60 x 60 x 215 เซนติเมตร มี

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลทขนานสำหรับดักจับควันที่มีขนาดกว้าง 17.5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท 1.5 เซนติเมตร ขั้วดิสชาร์จมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.38 มิลลิเมตร ใช้แรงดันกระแสตรงอินพุตขนาด 24 โวลต์ นำหลักการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มมาคุมสัญญาณพัลส์สวิตชิงแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มระดับแรงดันให้กับหม้อแปลงฟลายแบค รุ่น TLF14675B มีการควบคุมค่าความถี่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Arduino uno R3

ดร.พานิช อินต๊ะ และคณะ (2555) [3] การออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการกำจัดฝุ่นควันจากเตาเผาขยะชุมชน ซึ่งเครื่องตกตะกอนที่ออกแบบประกอบด้วยแผ่นตกตะกอนและเส้นลวดดิสชาร์จ โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกใช้สำหรับสร้างสนามโคโรนาดิสชาร์จระหว่างเส้นลวดดิสชาร์จและแผ่นตกตะกอน เมื่อมีการไหลของไอเสียจากเตาเผาขยะผ่านเข้าไปในสนามโคโรนาดิสชาร์จนี้ จะทำให้อนุภาคถูกอัดประจุไฟฟ้าและถูกผลักเข้าหาแผ่นตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตและตกตะกอนบนแผ่นตกตะกอน มีประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมประมาณ 99 %

ประวิทย์ ลีเหมือดภัย (2553) [4] ได้ศึกษาเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตสำหรับการกำจัดอนุภาคไอเสียจากเตาเผาชีวมวล โดยใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อ ได้ศึกษาแบบได้จำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาประสิทธิภาพ และขนาดที่ได้ขนาด 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 158 เซนติเมตร และส่วนภายในประกอบด้วยท่อขนาดเล็กศูนย์กลางภายนอก 25.4 เซนติเมตร จำนวน 19 ท่อ แท่งอิเล็กโทรดขนาด 1 มิลลิเมตร โดยมีประสิทธิภาพ 73.50 % 64.49% และ 54.09% ที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 8kV 7kV 6kV ตามลำดับ

วรรณ กนกกัน ท พงษ์ (2551) [10] ทำการศึกษาการบำบัดฝุ่นละอองที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม ทำได้โดยใช้อุปกรณ์ดักจับฝุ่นซึ่งมีทั้งสิ้น 5 ประเภท ได้แก่ ระบบคัดแยกที่อาศัยการตกเนื่องจากน้ำหนักฝุ่น ระบบไซโคลน เครื่องดักจับด้วยหยดน้ำ ฤงกรอง และเครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต โดยฤงกรองจัดเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมาก ในขณะที่ระบบอื่นไม่สามารถดักจับฝุ่นขนาดเล็กมากได้ นอกจากนี้ การออกแบบระบบที่ต่างกัน เช่น การใช้ระยะมาตรฐานของระบบไซโคลน พื้นที่ในการติดตั้งการควบคุม ก็เป็นอีกปัจจัยในการพิจารณาเลือกอุปกรณ์บำบัดฝุ่น

จารุตรี คุณานภดล (2547) [11] ศึกษาเกี่ยวกับการดักกรองอนุภาคขนาดเล็กในเสียรถยนต์โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าสถิต ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือการคำนวณหาประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และจึงเขียนโปรแกรมคำนวณค่าประสิทธิภาพการดักกรองโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งได้เลือกกรณีเครื่องดักกรองแบบ 4 ชุดท่อ โดยแต่ละท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เซนติเมตร ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 10 กิโลโวลต์ ได้ประสิทธิภาพที่ 70%

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต เป็นอุปกรณ์กำจัดอากาศเสีย โดยใช้ไฟฟ้าสถิตในการแยกอนุภาคออกจากอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง [1] ซึ่งโดยทั่วไปในเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต จะมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) อยู่ 2 ชนิดคือ

1. ขั้วปล่อยประจุ (Discharge electrode) ทำจากวัสดุที่มีหน้าตัดเล็กๆเช่น เส้นลวด (Wire) หรือเป็นแผ่นบางๆ (Flat plate) เป็นต้น ซึ่งโดยปกติขั้วปล่อยประจุนี้จะเป็นขั้วลบ 2. ขั้วเก็บ (Collection

electrode) ปกติจะต่อสายดิน และ ออกแบบขั้วเก็บให้มีพื้นผิวแบบแผ่น (Plate) หรือท่อ (Tube)

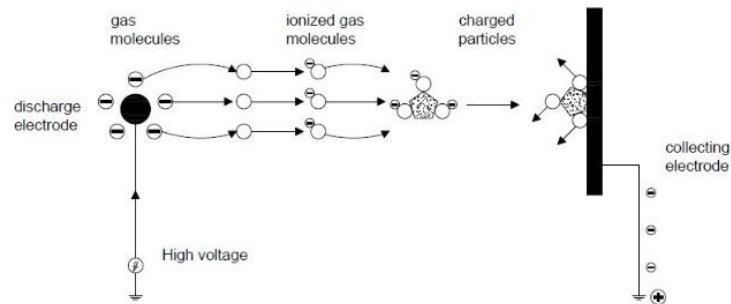
ขั้นตอนการทำงานของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การใส่ประจุให้กับอนุภาค (Particles charging) ทำโดยการใช้ขั้วปล่อยประจุหรือขั้วไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าความต่างศักย์สูงๆ ทำให้โมเลกุลของกระแสอากาศที่อยู่รอบๆนั้น เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและถูกอิเล็กตรอนหรือประจุลบที่ปล่อยออกจากขั้วไฟฟ้าไปกระทบหรือชน ทำให้โมเลกุลของอากาศกลายเป็นไอออนลบ บริเวณขั้วปล่อยประจุจะเกิดปรากฏการณ์เห็นเป็นแสง สีน้ำเงินส่องสว่างบริเวณรอบๆ ที่เรียกว่า โคโรนา (Corona) เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาสนามไฟฟ้าจะถูกไอออนลบของโมเลกุลของอากาศจำนวนมากชนทำให้อนุภาคมีประจุเป็นลบ

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บอนุภาคประจุโดยใช้แรงไฟฟ้าสถิต จากสนามไฟฟ้า (Electrostatic collection) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากอนุภาคมีประจุเป็นลบแล้วเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในสนามไฟฟ้า โดยจะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก และเกาะติดอยู่กับขั้วเก็บ ความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บ นี้เรียกว่า Migration velocity ซึ่งขึ้นกับแรงไฟฟ้า ที่กระทำต่ออนุภาค และแรงลาก (Drag force) ที่เกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังขั้วเก็บ เมื่ออนุภาคเกาะติดกับขั้วเก็บแล้วจะค่อยๆถ่ายเทประจุลบสู่ขั้วเก็บ ทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้า ระหว่างอนุภาคกับขั้วเก็บลดลง อย่างไรก็ตามการที่อนุภาคจะหลุดจากขั้วเก็บหรือเกิดการฟุ้งกลับ ของอนุภาคที่เกิดจากการไหลของกระแสอากาศจะค่อนข้างน้อย เนื่องจากมีการทับถมหรือเกิดการ สะสมของอนุภาคที่มีประจุบนขั้วเก็บ กล่าวได้ว่าขณะที่อนุภาคที่ยึดเกาะกับขั้วเก็บเสียประจุไป เกือบหมดอนุภาคใหม่ที่อยู่ด้านนอกที่เข้ามายึดเกาะนั้นจะยังคงมีประจุไฟฟ้าอยู่เนื่องจากไม่อาจถ่ายเทประจุผ่านชั้นของอนุภาค

เก่าที่สะสมอยู่ได้ทันที รวมทั้งในการยึดเกาะจะเกิดแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่า แรงยึดติด และแรงดึงดูดที่จะช่วยในการยึดอนุภาคทั้งหมดให้

อยู่กับขั้วเก็บ โดยขั้นตอนการใส่ประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคและการเก็บอนุภาคที่มีประจุแสดงไว้ใน รูปที่ 1



ภาพที่ 1 การใส่ประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคและการเก็บอนุภาค ที่มีประจุ

ขั้นตอนที่ 3 การแยกอนุภาคของพื้นที่ผิวขั้วเก็บ (Dust removal) และหลังจากที่เกิด การสะสมของอนุภาคที่ขั้วเก็บถูกทำให้หลุดออก โดยใช้วิธีการเคาะ (Rap) หรือการสั่น (Vibration) และ ตกลงโดยแรงโน้มถ่วงของโลกสู่ถังพักอนุภาคด้านล่าง ก่อนถูกนำไปกำจัดต่อไป โดยจะเรียก เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีระบบการแยกอนุภาคแบบนี้ว่า แบบแห้ง นอกจากนี้การทำให้อนุภาคหลุดจากขั้วเก็บ อาจใช้น้ำ ในการชะล้าง ซึ่งเรียกระบบการแยกนี้ว่า แบบเปียก

สมรรถนะเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

สมรรถนะเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตคำนวณได้จากการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต หรือค่าประสิทธิภาพในการเก็บกักอนุภาคซึ่งสมการที่นิยมใช้คือสมการ Deutsch ดังนี้ [7]

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{wL}{v_0 S}\right) \quad (1)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการตกตะกอน

W คือ ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วเก็บ

L คือ ความยาวของขั้วตกตะกอน

v_0 คือ ความเร็วของของไหล

S คือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นราบ

ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บ

ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บ

ขึ้นอยู่กับแรงไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาค สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [8]

$$w = \frac{n_p e E C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (2)$$

เมื่อ W คือ ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บ

e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (1.61×10^{-19})

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

C_c คือ ตัวประกอบการปรับแก้สลิปแรงดันคันทิงแฮม

μ คือ ความหนืดของไหล

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

แทนค่าในสมการ

$$w = \frac{(3.31 \times 10^{-5})(1.61 \times 10^{-19})(5112.44 \times 10^3)(2.866)}{3\pi(193.96)(0.1 \times 10^{-6})}$$

$$w = 4.271 \times 10^{-13}$$

การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค

อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศจะถูกอัดประจุด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนาดิสชาร์จอิเล็กทรอนิกส์ ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้า เนื่องจากเหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 ไมครอน โดยสามารถหาจำนวนประจุอนุภาค จากสมการดังนี้ [8]

$$n_p = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon+2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1+\pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (3)$$

เมื่อ ε คือ ค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค(อากาศ) 1.00038986

E คือ สนามไฟฟ้า

K_E คือ ค่าคงที่ จากสมการคูลอมบ์ $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$

Z_i คือ ความสามารถในการเคลื่อนตัวของไฟฟ้าของไอออนลบ $1.425 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

E คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน $1.61 \times 10^{-19} \text{ C}$

$N_i t$ คือ ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุ

แทนค่าในสมการ

$$n_p = \left(\frac{3 \times (1.00058986)}{(1.00058986) + 2} \right) \left(\frac{(5112.44 \times 10^3)(0.1 \times 10^{-6})^2}{4(9 \times 10^9)(1.61 \times 10^{-19})} \right) \times \left(\frac{\pi(9 \times 10^9)(1.61 \times 10^{-19})(1.423 \times 10^{-4})(5753514.22)}{1 + \pi(9 \times 10^9)(1.61 \times 10^{-19})(1.423 \times 10^{-4})(5753514.22)} \right)$$

$$n_p = 3.31 \times 10^{-5}$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดของสนามไฟฟ้าเส้นลวดกับ แผ่นราบ

ความเข้มสนามไฟฟ้าของสนามไฟฟ้าเส้นลวดกับแผ่นราบ สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [8]

$$E_{max} = \frac{V}{r_0 \ln(d/r_0)} \quad (4)$$

เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

V คือ แรงดันไฟฟ้าใช้งาน

r_0 คือ รัศมีของเส้นลวดด้านใน

d คือ รัศมีของทรงกระบอกสมมูล

หาได้จาก

$$d = 4s/\pi$$

S คือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นราบแทนค่าในสมการ

$$E_{max} = \frac{10,000 \text{ V}}{(0.0005) \ln\left(\frac{0.025}{0.0005}\right)} \quad (5)$$

$$E_{max} = 5112.44 \text{ kV/m}$$

ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล

ความหนืด คือ ค่าคงตัวของสัดส่วนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉื่อยและความเร็วกราดิเียนต์ สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [8]

$$\mu = \mu_r \left(\frac{T_r + S}{T + S} \right) \left(\frac{T}{T_r} \right) \quad (6)$$

เมื่อ μ_r คือ ความหนืดอ้างอิง (อากาศ 182.03) [8]

T คือ อุณหภูมิของแก๊ส

T_r คือ อุณหภูมิของแก๊สที่สภาวะมาตรฐาน

S คือ ค่าคงตัวการประมาณค่าพหุนามต่อเนื่องแทนค่าในสมการ

$$\mu = 182.03 \left(\frac{293.15 + 110.4}{378.15 + 110.4} \right) \left(\frac{378.15}{293.15} \right)$$

$$\mu = 193.96 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

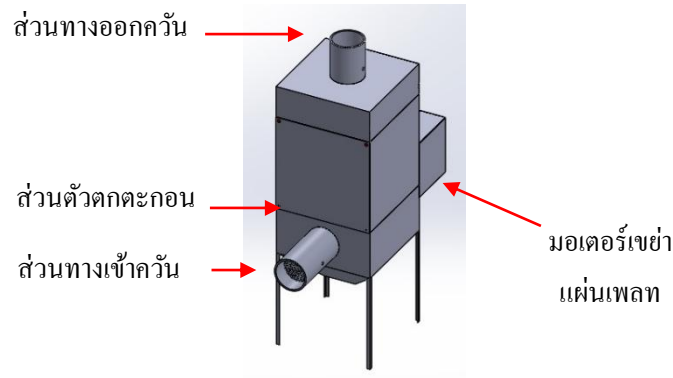
วิธีการวิจัย

ในการออกแบบและสร้างระบบกำจัดควันสำหรับเตาเผาความร้อนต่ำนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ 1. ส่วนเครื่องตกตะกอน ใช้สำหรับจับควันที่ไหลผ่านเข้ามา 2. ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับขั้วปล่อยและขั้วเก็บ 3. ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นควัน ใช้เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพของระบบกำจัดควัน

โดยการออกแบบจะทำการออกแบบโมเดลในคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 2 และออกแบบวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงฟลายแบคดังภาพที่ 3 และ

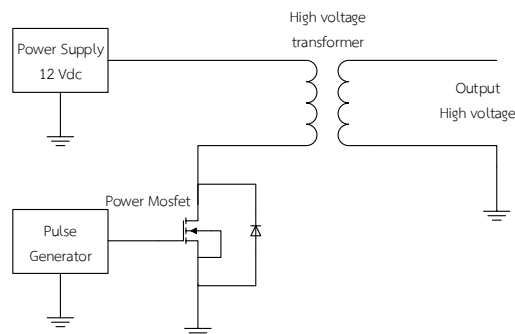
นำส่วนประกอบต่างๆ ติดตั้งจนเสร็จสมบูรณ์จึงทำการทดสอบการทำงาน เมื่อแก้ไขข้อบกพร่องเรียบร้อยแล้วจึงจะทำการทดลองต่อไป

ออกแบบและสร้างเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

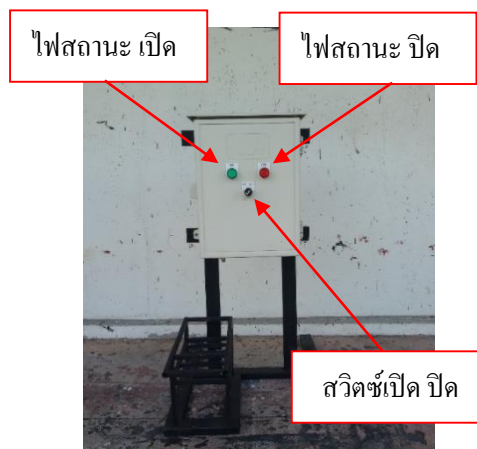


ภาพที่ 2 โมเดลเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่ได้ออกแบบไว้ในคอมพิวเตอร์

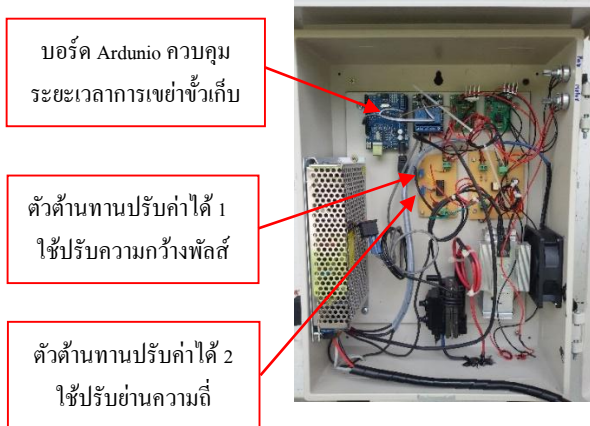
การออกแบบและสร้างวงจรสร้างไฟฟ้าแรงดันสูง



ภาพที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการหลักการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงฟลายแบค

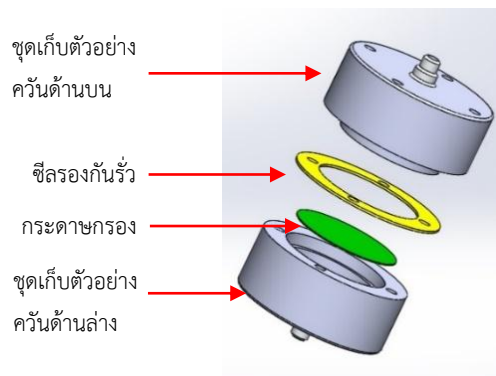


ภาพที่ 4 จุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดัน เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

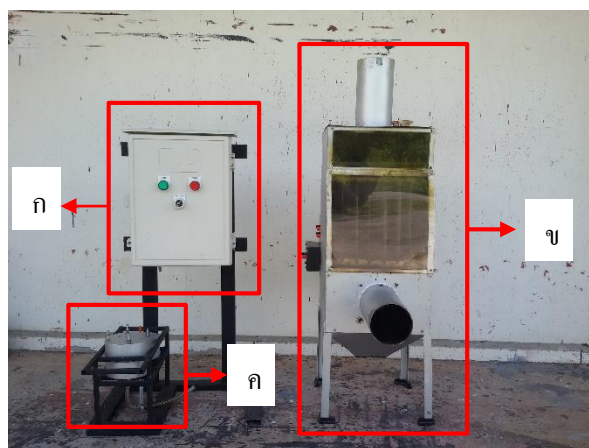


ภาพที่ 5 วงจรต่างๆภายในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

การออกแบบชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นควัน



ภาพที่ 6 โมเดลชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่ได้ออกแบบไว้ในคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 7 ชุดเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

- (ก) ตัวเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
- (ข) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง
- (ค) ชุดเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นควัน

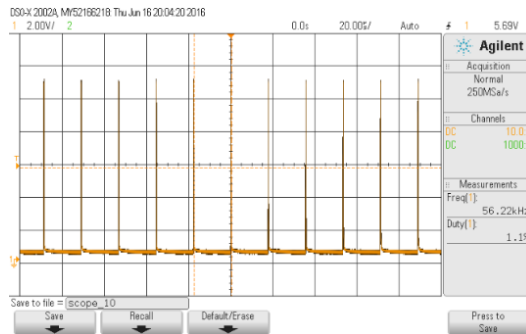
วิธีการทดลอง

1. เริ่มจากทดลองจุดคว้นรูปจำนวน (20ก้าน)
2. รอจนรูปนั้นติดไฟจนลูกใหม่เต็มที่แล้ว จึงเริ่มเดินเครื่อง
3. หลังจากเริ่มเดินเครื่อง ผู้วิจัยจะเริ่มเก็บตัวอย่างฝุ่นคว้น จากชุดเก็บตัวอย่างฝุ่นคว้น โดยการดูดอากาศจากปากทางเข้าของคว้นและทางออกของคว้น ผ่านกระดาษกรองฝุ่น เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วจึงทำการปิดเครื่อง

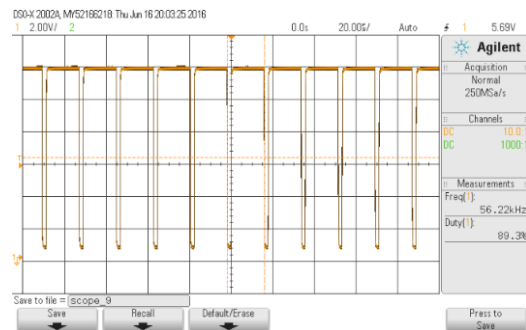
4. จัดเก็บตัวอย่างฝุ่นไว้ในถุงที่บรรจุสารดูดความชื้น
5. นำกระดาษกรองที่ทำการทดลองแล้วไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักฝุ่น(ก่อนการทดลองนั้นมีการชั่งกระดาษกรองก่อนแล้ว)
6. หาประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนโดยการเปรียบเทียบน้ำหนักฝุ่นทางด้านขาเข้าและขาออก

ผลการวิจัย

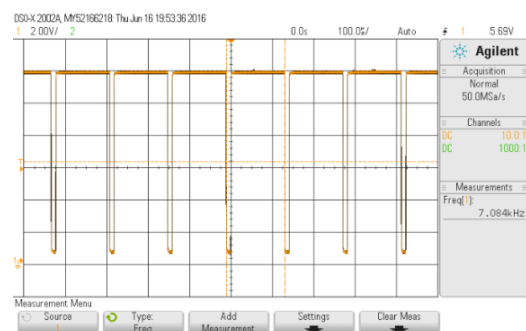
การทดลองที่ 1 ทำการปรับ Duty cycle ของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์และปรับความถี่ของวงจร



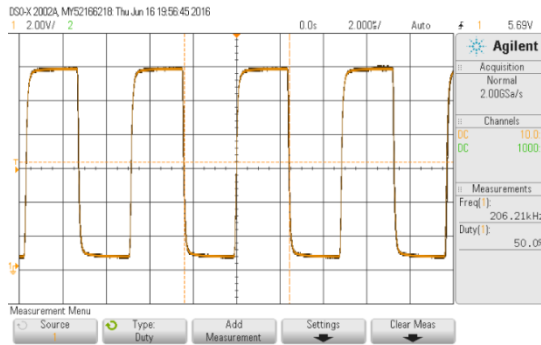
ภาพที่ 8 ค่า Duty cycle ที่ 1 %



ภาพที่ 9 ค่า Duty cycle ที่ 89 %

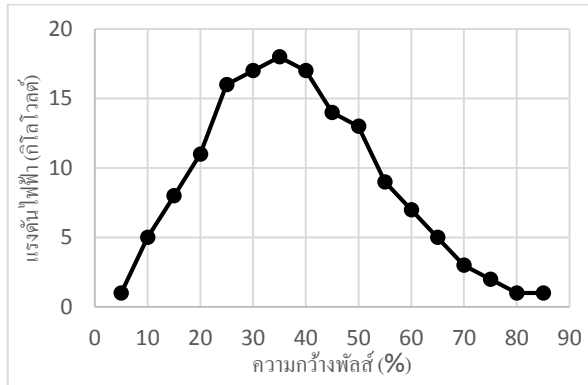


ภาพที่ 10 ความถี่ที่ 7 kHz



ภาพที่ 11 ความถี่ที่ 206 kHz

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างพัลส์ กับไฟฟ้าแรงดันสูง











กราฟที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Duty cycle กับไฟฟ้าแรงดันสูงที่ความถี่ 56 kHz

สรุปผลการทดลองที่ 1 พบว่าเมื่อทำการปรับความกว้างพัลส์ 0 – 20 % พบว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึง 10 กิโลโวลต์ และสูงสุดอยู่ที่ 18 กิโลโวลต์ ที่ค่าความกว้างพัลส์ 35 % จากนั้นจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆจะถึง 0 โวลต์ สังเกตได้จากกราฟที่ 1 ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการเลือกใช้อ่านความถี่ที่ 56 กิโลเฮิรตซ์ เพราะว่าสามารถให้

แรงดันไฟฟ้าได้สูงที่สุด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ กราฟที่ 1 จะไม่สามารถใช้อ้างอิงได้

การทดลองที่ 2 การทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 5, 10, 15, 18 กิโลโวลต์และความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ, 0.5 0.7 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ที่แรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ

เวลาดทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 2 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ

เวลาดทดลอง(นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ(%)
15	0.0294	0.0078	73.47 %
30	0.0015	0.0003	80.00 %
45	0.0104	0.0005	95.19 %
60	0.0422	0.0051	87.91 %

ประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้ [5]

$$m_{in} = \text{น้ำหนักฝุ่นทางด้านขาเข้า}$$









$$m_{out} = \text{น้ำหนักฝุ่นทางด้านขาออก}$$

$$\eta = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \times 100\%$$

เมื่อ η = ประสิทธิภาพการตกตะกอน

$$\text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} = \frac{73.47+80+95.19+87.91}{4} = 84.14 \%$$

ตารางที่ 3 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ที่แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ

เวลาทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่องตกตะกอน ไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		



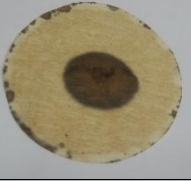

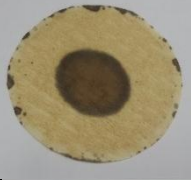



ตารางที่ 5 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 10 kV ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ

เวลาทดลอง (นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0134	0.0031	76.87 %
30	0.0145	0.0005	96.55 %
45	0.0315	0.0003	99.05 %
60	0.0304	0.0006	98.03 %

$$\text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} = \frac{76.87+96.55+99.05+98.03}{4}$$

$$= 92.63 \%$$

ตารางที่ 6 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ที่แรงดันไฟฟ้า 15 kV ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ









เวลาทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอน ไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 7 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 15 กิโลโวลต์ ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ

เวลาทดลอง (นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0345	0.0053	84.64 %
30	0.0292	0.0036	87.67 %
45	0.0225	0.0091	59.56 %
60	0.0261	0.0066	74.71 %

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} &= \frac{84.64+87.67+59.56+74.71}{4} \\ &= 76.65 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ 8 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ที่แรงดันไฟฟ้า 18 kV ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ

เวลาทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		









ตารางที่ 9 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 18 kV ความเร็วลมไหลตามธรรมชาติ

เวลาทดลอง (นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0044	0.0059	60.81 %
30	0.0062	0.0015	75.81 %
45	0.0196	0.0034	82.65 %
60	0.014	0.0038	72.86 %

$$\text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} = \frac{60.81+75.81+82.65+72.86}{4}$$

$$= 73.03 \%$$

ตารางที่ 10 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV ความเร็วลม 0.5 m/s

เวลาทดลอง (นาท)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		









ตารางที่ 11 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 5 kV ความเร็วลม 0.5 m/s

เวลาทดลอง (นาท)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0090	0.0038	57.78 %
30	0.0182	0.0059	67.58 %
45	0.0121	0.0090	25.62 %
60	0.0129	0.0101	21.71 %

$$\text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} = \frac{57.78+67.58+25.62+21.71}{4}$$

$$= 43.17\%$$

ตารางที่ 12 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ที่แรงดันไฟฟ้า 10 kV ความเร็วลม 0.5 m/s









เวลาดทดลอง (นาท)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 13 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 10 kV ความเร็วลม 0.5 m/s

เวลาดทดลอง (นาท)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0060	0.0037	38.33 %
30	0.095	0.0061	35.79 %
45	0.0111	0.0069	37.84 %
60	0.0202	0.0066	67.33 %

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} &= \frac{38.33+35.79+37.84+67.33}{4} \\ &= 44.82 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ 14 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 15 kV ความเร็วลม 0.5 m/s









เวลาทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 15 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 15 kV ความเร็วลม 0.5 m/s

เวลาทดลอง (นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0092	0.0116	26.09 %
30	0.0104	0.0153	47.12 %
45	0.0258	0.0134	48.06 %
60	0.0130	0.0093	28.46 %

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} &= \frac{26.09+47.12+48.06+28.46}{4} \\ &= 37.43 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ 16 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 18 kV ความเร็วลม 0.5 m/s

เวลาทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		







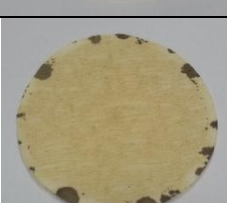
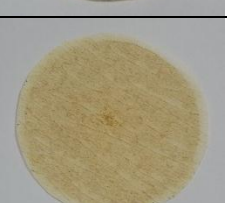
ตารางที่ 17 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 18 kV ความเร็วลม 0.5 m/s

เวลาทดลอง (นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0174	0.0075	56.90 %
30	0.0246	0.0062	74.80 %
45	0.0320	0.0046	85.62 %
60	0.0263	0.0015	94.30 %

$$\text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} = \frac{56.90+74.80+85.62+94.30}{4}$$

$$= 77.91 \%$$

ตารางที่ 18 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV ความเร็วลม 0.7 m/s









เวลาทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 19 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 5 kV ความเร็วลม 0.7 m/s

เวลาทดลอง (นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0076	0.0062	18.42 %
30	0.0131	0.0113	13.74 %
45	0.0118	0.0099	16.10 %
60	0.0305	0.0274	10.16 %

$$\text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} = \frac{18.42+13.74+16.10+10.16}{4} = 14.61 \%$$

ตารางที่ 20 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 10 kV ความเร็วลม 0.7 m/s









เวลาทดลอง (นาท)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 21 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 10 kV ความเร็วลม 0.7 m/s

เวลาทดลอง (นาท)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0133	0.0070	47.37 %
30	0.0171	0.0115	32.75 %
45	0.0200	0.0113	43.50 %
60	0.2112	0.0214	89.87 %

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} &= \frac{47.37+32.75+43.50+89.87}{4} \\ &= 53.37 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ 22 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 15 kV ความเร็วลม 0.7 m/s









เวลาทดลอง (นาที)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 23 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 15 kV ความเร็วลม 0.7 m/s

เวลาทดลอง (นาที)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0690	0.0092	86.67 %
30	0.0212	0.0033	84.43 %
45	0.0427	0.0109	74.47 %
60	0.0445	0.0084	81.12 %

$$\text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} = \frac{86.67+84.43+74.47+81.12}{4} = 81.67 \%$$

ตารางที่ 24 การทดลองแสดงการเปรียบเทียบกระดาษกรองที่ไม่ใช้งานและผ่านการใช้เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้า 18 kV ความเร็วลม 0.7 m/s

เวลาทดลอง (นาท)	กระดาษกรองที่ไม่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต	กระดาษกรองที่ผ่านเครื่อง ตกตะกอนไฟฟ้าสถิต
15		
30		
45		
60		

ตารางที่ 25 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต 18 kV ความเร็วลม 0.7 m/s

เวลาทดลอง (นาท)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาเข้า (กรัม)	น้ำหนักฝุ่นด้านขาออก (กรัม)	ประสิทธิภาพ (%)
15	0.0458	0.0084	81.12 %
30	0.0458	0.0095	79.26 %
45	0.0267	0.0153	42.70 %
60	0.0099	0.0058	41.41 %

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย} &= \frac{81.12+79.26+42.70+41.41}{4} \\ &= 61.12 \% \end{aligned}$$

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยนั้นพบว่าจากผลการทดลอง เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต สามารถกำจัดควันได้ สูงสุดที่ 99.01 % (ตารางที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับทาง ทฤษฎีโดยสามารถที่สามารถกำจัดควันได้ 99.9 % แต่ต้องปล่อยให้อนุภาคควันไหลไปตามธรรมชาติจึง จะเห็นผลดีที่สุดเนื่องจากว่าเมื่อเราเพิ่มความเร็วม แล้วจะทำให้มีเวลาในการชำระประจุให้กับอนุภาคมี น้อยลง และพื้นที่ขั้วเก็บมีน้อยทำให้อนุภาคควัน เคลื่อนที่ผ่านไปเร็ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับ ควันลดน้อยลงไปด้วย จะสังเกตได้ชัดเจนจากตาราง ความเร็วลมที่ 0.5 m/s ช่วงแรงดันที่ 5-15 กิโลโวลต์ และมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน ของเครื่องตกตะกอนคือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้ว ดิสชาร์จและขั้วเก็บ(ปรากฏการณ์โคโรน่า) ยิ่งเกิดโคโร นามากเท่าไรจะทำให้เครื่องตกตะกอนสามารถ ทำงานได้ดียิ่งขึ้น แต่ต้องไม่เกินค่าแรงดันเบรกดาวน หากใช้งานเป็นระยะเวลานานจะต้องมีการทำความสะอาด ขั้วเก็บอยู่เสมอไม่อย่างนั้นจะส่งผลทำให้ ประสิทธิภาพในการทำงานลดลงได้ เมื่อนำไปเทียบกับ “ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่10 พศ.2538 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพ อากาศอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ” ในข้อความ ข้อ 4 (2) ค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนใน 24 ชั่วโมงจะต้องไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเทียบกับตารางที่4 ช่วงเวลา 60 นาทีจะมีค่าที่ 0.6 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่ง ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน

สุดท้ายนี้ระบบกำจัดควันด้วยไฟฟ้าสถิตยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายเช่น ระบบ พอกอากาศภายในห้อง กำจัดกลิ่นเหม็นจากควัน บุหรี่ กำจัดเชื้อโรค เชื้อราได้ เพราะการดิสชาร์จจะ ทำให้เกิดก๊าซโอโซน ที่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรคได้

สรุป

การทดลองพบว่า เมื่อนำควันปล่อยเข้าไปใน เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตเป็นระยะเวลา 15, 30, 45 และ60 นาที พบว่าควันจะเริ่มเกาะตัวสะสมที่ขั้ว เก็บและกระดาศกรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลา และเมื่อนำกระดาศกรงไปชั่งน้ำหนักตามการวัด ตามระบบกราวิเมตริก พบว่าน้ำหนักฝุ่นทางด้านขา ออกจากเครื่องมีน้อยกว่าทางเข้าเครื่อง เมื่อคิดเป็น เปอร์เซ็นต์แล้วค่าสูงสุดอยู่ที่ 99.05 % และจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาการใช้งานเนื่องจากการสะสมของ ฝุ่นที่ตัวขั้วเก็บ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองครั้ง นี้คือ แรงดันไฟฟ้า ความเร็วลมและความชื้นที่เอ ทดลองแล้วพบว่าถ้าผู้วิจัยจ่ายไฟฟ้าน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการชำระประจุน้อยทำให้อนุภาคนั้นมีแรง ดึงดูดน้อยและใช้เวลาในการชำระเพิ่มขึ้นทำให้ไป เกาะที่ผิวของขั้วเก็บข้างล่างดังนั้นจะต้องเพิ่ม แรงดันไฟฟ้าเข้าไปให้เกิดความชื้นของสนามไฟฟ้าที่ เหมาะสม

อุปสรรคในการวิจัยเป็นเรื่องของการควบคุม ความชื้นของตัวกระดาศกรง พบว่าถ้ากระดาศ กรงมีความชื้นจะทำให้น้ำหนักกระดาศเพิ่มขึ้น ทำ ให้ไม่สามารถหาประสิทธิภาพที่แม่นยำได้ สามารถ แก้ไขได้โดยใส่สารดูดความชื้นในช่องที่บรรจุกระดาศ กรงทั้งก่อนและหลังการทดลอง

ตารางที่ 26 ตารางสรุปค่าใช้จ่ายการสร้งเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

สรุปตารางค่าใช้จ่าย		
ลำดับที่	รายการ	ราคา
1	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ 10 แอมป์	520
2	หม้อแปลงพลาเยแบค เบอร์ FCM20A029	300
3	วงจรสร้างสัญญาณพัลส์	150
4	วงจรขับเคลื่อน	150
5	วงจรปรับความเร็วมอเตอร์	250
6	บอร์ด Arduino R3 แบบ SMD+EMS	250
7	บอร์ด Relay	100
8	มอเตอร์ IRFP 460 และซิงค์ระบายความร้อน	150
9	พัดลมระบายอากาศ	120
10	สายไฟ	200
11	มอเตอร์ DC 12 โวลต์ 1000 รอบ/นาที อุปกรณ์ต่อพ่วง	480
12	เหล็กโครงสร้าง	3000
13	อะคิลิก	100
14	กลึงชิ้นงาน	3300
15	ท่อดูดควัน ตัวหนอน	470
16	น็อต สกรู และแหวน	165
17	สีสเปรย์	520
18	ซูเปอร์ลีน	550
19	เซลิค้ำเจล	250
20	ถุงซิปล็อก	38
21	ตุ้กันฝน SP	665
22	ไฟแสดงสถานะ แดง, เขียว	130
23	ป้ายเนมเพลท ON, OFF, RUN, STOP	42
24	ใส่ไก่	90
25	สวิตช์ลูกศร 2 จังหวะ (ON OFF)	65
26	ท่อฉนวนกันความร้อน	80
27	ซิลิโคน	185
28	PUMP ออกซิเจนตู้ปลา	840
29	สายยาง	60
30	เส้นลวด (ขั้วปล่อยประจุ)	120
31	แผ่นอลูมิเนียม (ขั้วเก็บ)	540
32	กระดาษกรอง	205
33	รูปมัดใหญ่	160
รวม		14,245

กิตติกรรมประกาศ

โครงการออกแบบและสร้างระบบกำจัดควันของเตาเผาความร้อนต่ำด้วยวิธีตกตะกอนไฟฟ้าสถิตในครั้งนี้จะดำเนินการราบรื่นไปได้ด้วยดี ไม่ได้ถ้าขาดความอนุเคราะห์และให้การสนับสนุน จาก อาจารย์เพลิน จันทรสุยะ อาจารย์ดอกเตอร์ อนนท์ นำอิน รองศาสตราจารย์ดอกเตอร์ พานิช อินต๊ะ อาจารย์อาทิตย์ ยาวุฒิ อาจารย์ท่านอื่นๆและบุคคลที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยให้ความรู้ และแนวทางการแก้ปัญหาแก่ตัวผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของผู้วิจัยที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดมา

สุดท้ายนี้คุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากโครงการนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ที่คอยให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2538). **มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป**. สืบค้นจาก http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html.

กิตติธัช กันทามูล. ธนิต ทิมเที่ยง. (2557). **การพัฒนาเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่าจากเตาเผาขนาดเล็กด้วยเทคนิคพลาสมา**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. เชียงใหม่

จารุตม์ คุณานภดล. (2547). **การประยุกต์ใช้เทคนิคทางไฟฟ้าสถิตเพื่อดักจับอนุภาคจากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประวิทย์ ลีเหมือนภัย. (2553). **เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดอนุภาคไอเสียจากเตาเผาชีวมวล**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร

มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ปราโมช เขียวชาญ. (2552). **ชุดวิชาสุขศาสตร์อุตสาหกรรมหน่วยที่ 5: อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดอนุภาค**. พิมพ์ครั้งที่ 4. นนทบุรี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช.

พงศ์ประพัฒน์ พรหมสุวรรณ และมนตรี อุดร. (2556). **เตาเผาขยะไร้ควันสำหรับสำนักงานโดยใช้หลักการตรวจจับด้วยไฟฟ้าแรงสูง**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. เชียงใหม่

พานิช อินต๊ะ และณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2550). **การทำนายประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่นสำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นจากเตาเผาชีวมวล**. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21**. (เล่มที่ 1) (หมายเลขบทความ TSF-24), 17 – 19 ตุลาคม 2550. ชลบุรี.

พานิช อินต๊ะ. (2557). **เทคโนโลยีการวัดและควบคุมฝุ่นละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิต**. พิมพ์ครั้งที่ 3. เจริญ ก๊อปปี้ เซ็นเตอร์

มนตรี ชูติชัยศักดิ์ดา. (2557). **วิธีการตรวจวัดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ระบบ VFC HIGH VOLUMN**. สืบค้นเมื่อ 1 เมษายน 2559, จาก http://infofile.pcd.go.th/air/200257_1.pdf?CFID=2972058&CFTOKEN=33690543.

วรพจน์ กนกกันทพงษ์. **วารสาร มจก.วิชาการ**. ปีที่ 11 (ฉบับที่ 22), 79-91.

อาทิตย์ ยาวุฒิ, พานิช อินต๊ะ, วิสูตร อาสนวิจิตร, สุทธิชัย เปรมฤดีปริชาชาญ และนคร ทิพยาวงค์. **การออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการกำจัดฝุ่นควันจากเตาเผาขยะชุมชน**. **ประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7**. 3 – 5 พฤษภาคม 2554. ภูเก็ต.

ผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

Influence Parameters on Performance of Wireless Power Transfer

เกรียงศักดิ์ ปันทะนะ¹, ภาณุพงศ์ นรรัตน์² และเอกชัย ชัยดี^{3*}

Kriangsak Panthana¹, Panupong Norratat² and Ekkachai Chaidee^{3*}

^{1,2,3} สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chinagrui

*Corresponding author e-mail: ekkachai@rmutl.ac.th, Ekkachai.ch799@gmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจำเป็นต้องเข้าใจผลของพารามิเตอร์ของวงจร ที่มีผลต่อการส่งกำลังงานไฟฟ้า การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ได้ทำการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้าเพื่อแสดง พารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังงานไฟฟ้า ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยใช้วงจรขับอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น เพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงเฟอร์ไรต์ ออกแบบขดส่ง และขดรับกำลังงานจากการพันบนแกนอากาศ และพันบนแกนเฟอร์ไรต์ เพื่อ เลือกรูปแบบแกน และการพันที่เหมาะสม ทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเพื่อแสดงผลของพารามิเตอร์แต่ละตัว ผลการศึกษาพบว่า 1) รูปแบบการพันโดยใช้แกนอากาศเมื่อปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เหมาะสมสามารถให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมากกว่าการพันบนแกนเฟอร์ไรต์ 2) ความเหนี่ยวนำรวมลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างของขดตัวนำทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงตามมีผลต่อ กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ 3) การปรับค่าความถี่ตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างของขดตัวนำสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าขา ออกได้ เนื่องจากการชดเชยค่าความเหนี่ยวนำรวม 4) กำลังไฟฟ้าขาออกแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าขาเข้า อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ควรออกแบบให้สามารถทนพิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงได้ ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้ในการ ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายพิกัดกำลังสูง และศึกษาในเชิงลึกได้ต่อไป

คำสำคัญ: การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย, อินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น, หม้อแปลงเฟอร์ไรต์, ความถี่เรโซแนนซ์

Abstract

To design of wireless power transfer, influence parameters on performance of power transfer should be known. The objective of this study is a study of influence factors on performance of wireless power transfer. Equivalent circuit of wireless power transfer was analyzed in order to reveal the influence parameters on performance of wireless power transfer. Wireless power transfer circuit was designed driving by full bridge inverter. To increase power, Ferrite transformer are used. Transmitter and receiver coils with air and ferrite core were designed that using to choose optimization of core and coils. Power transfer was performed to present effect of the influence parameters. From the study results found that 1) Output power from adjustment optimal resonance frequency obtaining from using air core more than ferrite core. 2) Mutual inductance decreasing according to increasing of distance between coils causes increasing of impedance directly impact on the output power and efficiency. 3) Adjustment frequency according to changing of distance can increase the out power that is compensation the mutual inductance. 4) Output power very with input voltage however electronic equipment in inverter circuit should be designed to endure high voltage and current. The study results can be used to design high power wireless power transfer and to deep study.

Keywords: Wireless Power Transfer, Full Bridge Inverter, Ferrite Transformer, Resonance Frequency.

บทนำ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย คือ เทคโนโลยีที่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้สายตัวนำ ใช้สนามแม่เหล็กความถี่สูงในสภาวะรีโซแนนซ์คล้องระหว่างขดตัวนำด้านส่งและด้านรับกำลังงานผ่านตัวกลางอากาศ

การประยุกต์ใช้งานทำได้หลายลักษณะ เช่น ประจุแบตเตอรี่ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก (F. Muavi et al, 2012) รถยนต์ไฟฟ้า (S. Jeong et al, 2015) ลดอันตรายจากการสัมผัสสายตัวนำ และสารเคมีจากแบตเตอรี่โดยตรง ใช้กับงานทางการแพทย์ในการส่งกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ปลูกฝังในร่างกายมนุษย์โดยไม่ต้องผ่าตัดใหม่ (J.C. Lin et al, 2013) เป็นต้น

ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายมีการเพิ่มขึ้นก่อนจากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างขดตัวนำ (H. Jiang et al, 2013) ความสูญเสียส่วนใหญ่ เกิดขึ้นเนื่องจากใช้ตัวกลางอากาศ พลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่เป็นฟลักซ์รั่วไหล ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าต่ำ

จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ แบ่งได้ 3 กลุ่มหลัก คือ 1) การปรับค่าความถี่ เพื่อชดเชยความเหนี่ยวนำร่วม ทำได้ง่าย ให้อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าขาออกไม่มาก (N. Y. Kim et al, 2012), (A. P. Sample et al, 2011), (Y. Zhang et al, 2014) 2) การปรับค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อชดเชยความเหนี่ยวนำร่วม เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนแต่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นมาก (Y. Lim et al, 2014), (T. C. Beh et al, 2013), (A. Ong et al, 2014) 3) การออกแบบการพันขดส่งและขดรับกำลังงานร่วมกับการใช้แกนเฟอร์ไรต์ เพื่อเพิ่มความเหนี่ยวนำของขดตัวนำ (J. Kim et al, 2013), (H. Kim et al, 2016)

จากการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเพื่อหาสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออก คือ ความเหนี่ยวนำของขดตัวนำ ความเหนี่ยวนำร่วม ความถี่ใช้งาน แรงดันไฟฟ้าขาเข้า และความต้านทานของโหลด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ผลของพารามิเตอร์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย และนำเสนอวิธีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออกโดยการปรับค่าความถี่ร่วมกับการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาเข้าวงจร จากการเพิ่มหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์เข้าไปในวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย
2. เพื่อพัฒนางจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. วงจรในสภาวะรีโซแนนซ์

วงจรในสภาวะรีโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ของระบบเหลือเพียงความต้านทานเพียงอย่างเดียว กระแสสามารถไหลผ่านวงจรได้มาก ความถี่รีโซแนนซ์ หาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

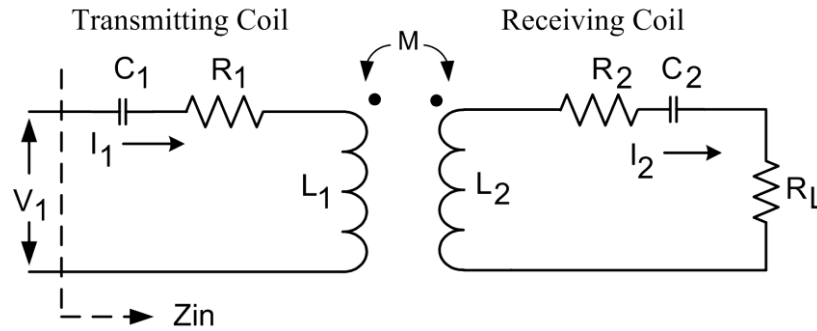
2. การส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดสมดุลกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ในสภาวะนี้ สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

วิธีการวิจัย

1. การวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

ใช้วงจรสมมูลของหม้อแปลงแกนอากาศต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรสมมูลการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

เมื่อ V_1 คือแรงดันไฟฟ้าขาเข้าวงจร C_1 , C_2 คือ คาปาซิเตอร์ภายนอกต่อกับวงจรเพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ R_1 , R_2 คือความต้านทาน L_1 , L_2 คือความเหนี่ยวนำของขดตัวนำทางด้านส่งและด้านรับกำลังงาน R_L คือ ความต้านทานไฟฟ้าของโหลด R_L คือ ความเหนี่ยวนำร่วม และ Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์ของวงจร จากวงจรรูปที่ 1 ใช้สมการแรงดันเคอร์ซอพฟ์ (KVL) หาสมการแรงดันทั้งสองด้านของวงจร แสดงตามสมการที่ (2)

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} \\ j\omega M_{12} & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

แก้สมการหากระแส I_1 และ I_2 จากนั้นจึงหาสมการกำลังไฟฟ้าขาเข้า ขาออก และประสิทธิภาพได้ตามสมการที่ (3) - (5) ดังนี้

$$P_{in} = V_1 I_1 = \frac{Z_2 V_1^2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \quad (3)$$

$$P_{out} = I_2^2 R_L = \frac{\omega^2 M^2 V_1^2 R_L}{[Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2]^2} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{Z_2 [Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2]} \quad (5)$$

$$Z_{in} = Z_1 + \frac{(\omega M)^2}{Z_2} \quad (6)$$

เมื่อ

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = (R_2 + R_L) + j\left(\omega L_2 + \frac{1}{\omega C_2}\right), \quad \omega = 2\pi f$$

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (7)$$

โดยที่ k ในสมการที่ (7) คือ Coefficient of Coupling มีรูปสมการเป็นฟังก์ชันของระยะทางดังนี้ (S. Y. R. Hui et al, 2014), (J.O. Mur-Miranda et al, 2010)

$$k = \frac{1}{\left[1 + 2^{2/3} \left(d / \sqrt{r_1 r_2}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (8)$$

เมื่อ r_1 , r_2 คือรัศมีขดตัวนำ และ d คือ ระยะห่างระหว่างขดตัวนำ ด้านส่ง และด้านรับกำลังงาน

2. การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

พิจารณาจากสมการกำลังไฟฟ้าขาออก ในสมการที่ (4) พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออก มีหลายตัว การศึกษานี้ให้ความสำคัญที่

ความเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) ความถี่รีโซแนนซ์ (f_r) ความเหนี่ยวนำร่วม (M) และแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_1) จากพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงได้แนวทางการเพิ่มกำลังไฟฟ้าออกดังนี้

2.1 การเพิ่มความเหนี่ยวนำจากการพันและแกนเฟอร์ไรต์

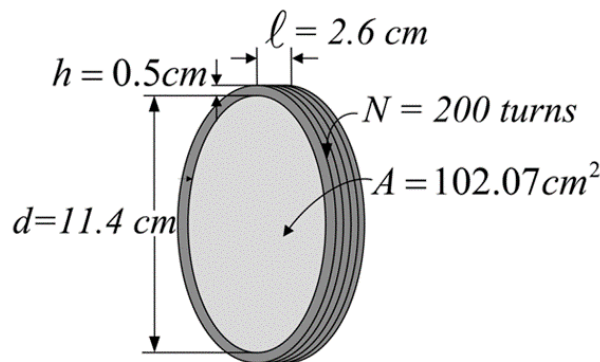
พิจารณาสมการความเหนี่ยวนำของขดตัวนำตามสมการที่ (9) การเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนขด (N) ค่าความซึมซาบ

สัมพัทธ์ (μ_r) พื้นที่หน้าตัดของแกน (A) และการลดความยาวทางเดินเฉลี่ยของฟลักซ์แม่เหล็ก (ℓ)

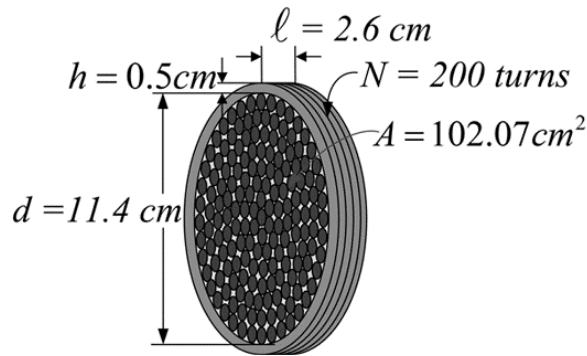
$$L = \frac{N^2 \mu A}{\ell} = \frac{N^2 \mu_r \mu_0 A}{\ell}$$

(9)

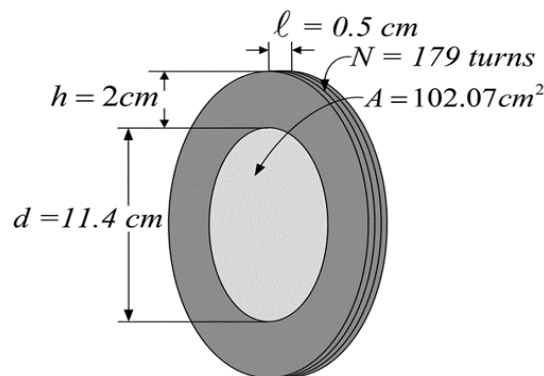
จึงได้ออกแบบขดตัวนำ 3 ลักษณะแสดงดังภาพที่ 2 ดังนี้



(ก) การพันแบบที่ 1 พันบนแกนอากาศ



(ข) การพันแบบที่ 2 เพิ่มความซึมซาบโดยใช้แกนเฟอร์ไรต์แท่ง



(ค) การพันแบบที่ 3 ลดความยาวทางเดินฟลักซ์แม่เหล็ก

ภาพที่ 2 ลักษณะการพันขดตัวนำ 3 แบบ

พิจารณาภาพที่ 2 การพันแบบที่ 1 พันบนแกนอากาศแบบปกติ การพันแบบที่ 2 เป็นการเพิ่มความขี้มซาบโดยใช้แกนเฟอร์ไรต์แบบแท่ง เนื่องจากสามารถหาได้ตามท้องตลาด ส่วนการพันแบบที่ 3 ลดความยาวเส้นทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กให้น้อยลงแต่มีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของแกนน้อยลง ในลักษณะการพันขดตัวนำทั้ง 3 แบบนี้ได้ทำการทดสอบ

เปรียบเทียบกับ เพื่อดูลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 15-16 เพื่อเลือกรูปแบบที่ดีที่สุด โดยที่ลักษณะการพันแต่ละแบบมีผลทำให้ความเหนี่ยวนำในสมการที่ (9) เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าพารามิเตอร์ของการพันขดตัวนำทั้ง 3 แบบแสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของขดตัวนำทั้ง 3 แบบ

รูปแบบที่	L (mH)	C (nF)	R (Ω)	ขนาดของขดลวด (AWG)	
1	ขดส่ง	6.82	4.7	3.41	22
	ขดรับ	6.96	4.7	3.41	22
2	ขดส่ง	10.3	4.7	3.48	22
	ขดรับ	10.23	4.7	3.47	22
3	ขดส่ง	6.02	4.7	3.45	22
	ขดรับ	7.9	4.7	3.43	22

ในการเปรียบเทียบรูปแบบการพันทั้ง 3 แบบนั้น กำหนดให้พารามิเตอร์ R และ C มีขนาดเท่ากัน แต่ L ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากการพันแต่ละแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำไม่เท่ากัน

2.2 การปรับความถี่รีโซแนนซ์

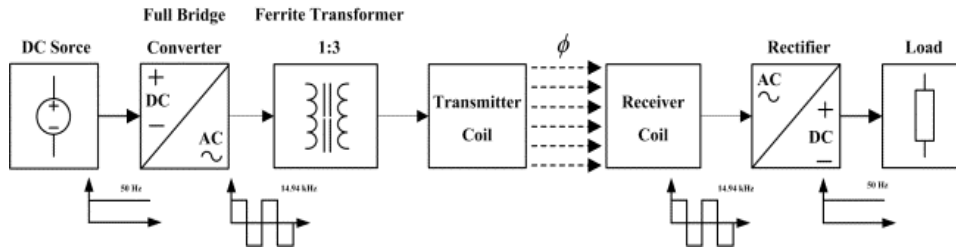
พิจารณาสมการที่ (4)-(8) เห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเปลี่ยนแปลงมีผลทำให้ความเหนี่ยวนำรวมเปลี่ยน ทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ อธิบายได้โดยตามหลักการการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power transfer) ดังนั้นเมื่อพิจารณาเทอม $(\omega M)^2$ ในสมการที่ (6) การขดเคยการเปลี่ยนแปลงของความ

เหนี่ยวนำรวม (M) สามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่

2.3 การเพิ่มแรงดันขาเข้าโดยใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์

กำลังไฟฟ้าขาออกตามสมการที่ (4) แปรผันกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้ายกกำลังสอง ดังนั้นการเพิ่มหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์เข้าไปในวงจรจึงสามารถเพิ่มกำลังขาออกของวงจรได้ หรืออาจมองว่าเป็นการปรับค่าตัวแปร V_1 นั้นเอง การที่เลือกใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์นั้นเนื่องจากสามารถตอบสนองย่านความถี่สูงได้ดีกว่าหม้อแปลงแกนเหล็ก อย่างไรก็ตามพิกัดของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับขนาดของแกนเฟอร์ไรต์

3. การออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

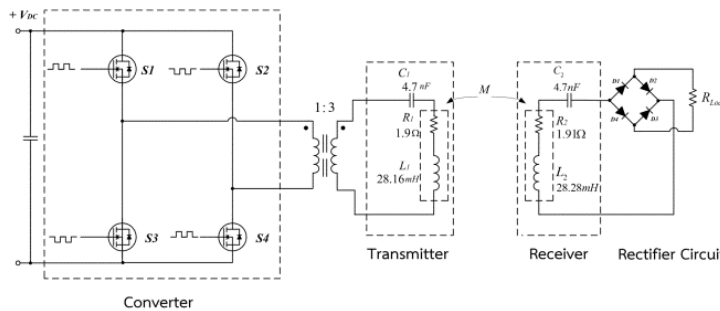


ภาพที่ 5 องค์ประกอบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

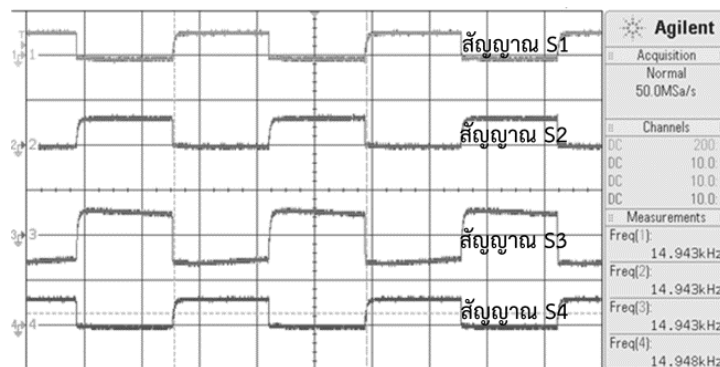
ออกแบบวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย มี ส่วนประกอบหลัก คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง คอนเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น (Full bridge converter) หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ ขดส่งและรับ กำลังงาน

3.1 อินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น (full bridge converter)

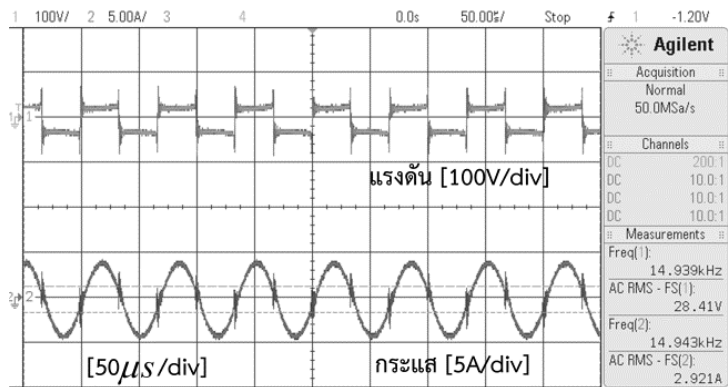
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น สามารถปรับ ค่าความถี่ได้สูงสุด 750 กิโลเฮิร์ต แสดงวงจรดังภาพ ที่ 3 ทำการทดลองจ่ายโหลดขนาด 160 โอห์ม (25วัตต์) ใช้แรงดันอินพุตกระแสตรง 10 โวลต์ ที่ ความถี่รีโซแนนซ์ 14.94 กิโลเฮิร์ต ระยะห่างระหว่าง ขดส่งกำลังงานและขดรับกำลังงาน 21 เซนติเมตร ได้ลักษณะสัญญาณแรงดัน และกระแส ด้านขดรับ และขดส่งกำลังงาน แสดงดังภาพที่ 5



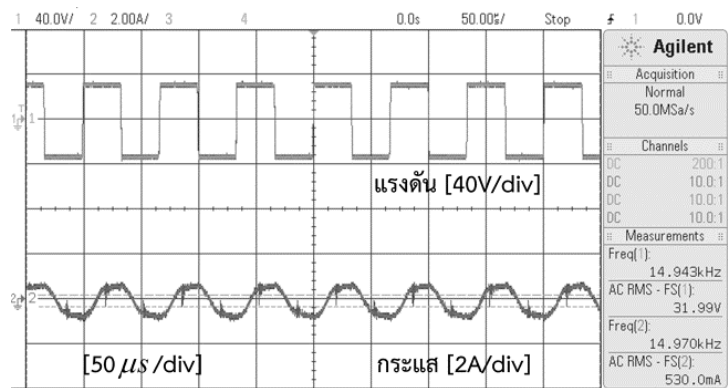
ภาพที่ 3 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น



ภาพที่ 4 สัญญาณป้อนเข้าขาเกตของมอสเฟต



(ก) แรงดัน และกระแส ด้านขาเข้าขดส่งกำลังงาน



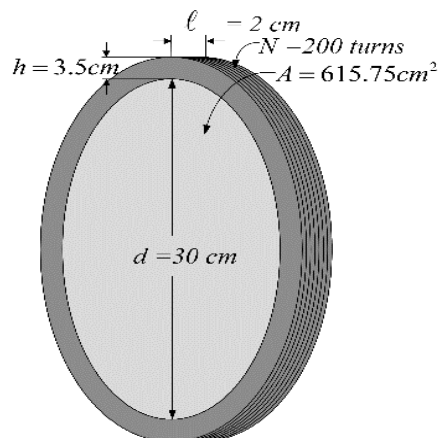
(ข) แรงดัน และกระแส ด้านขาออกขดรับกำลังงาน

ภาพที่ 5 สัญญาณขาเข้า และขาออก ขดส่ง และขดรับกำลังงานขณะจ่ายโหลด

จากภาพที่ 4 คือ สัญญาณที่จ่ายให้กับมอสเฟต ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์อิเล็กทรอนิกส์ สวิตซ์ S1 และ S4 ทำงานพร้อมกัน เช่นเดียวกับกับสวิตซ์ S2 และ S3 ก็

จะทำงานพร้อมกัน ทำให้ได้สัญญาณขาออก อินเวอร์เตอร์เป็นแบบ เต็มรูปคลื่น

3.2 การออกแบบขดตัวนำ



ภาพที่ 6 ขดส่ง และขดรับกำลังงานพันบนแกนอากาศ

ขั้นตอนที่ 1 จากการทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบของขดตัวนำทั้ง 3 ลักษณะแสดงดังรูปที่ 2 แล้วจึงเลือกรูปแบบที่ดีที่สุดในการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายคือการพันแบบที่ 1 พันบนแกนอากาศแบบปกติ และการออกแบบพารามิเตอร์ ได้กำหนดขนาดของขดส่ง และขดรับกำลังงานก่อนซึ่งกำหนดขนาดไว้ดังรูปที่ 6 จากนั้นจึงพันขดส่ง และขดรับกำลังงานตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ โดยใช้ขดลวดทองแดงขนาด 16 AWG ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ในตารางที่ 2 นั้นได้มาจากเครื่องวัด R L C ยี่ห้อ GWINSTEK รุ่น

LCR-916(100kHz) นอกจากนี้แล้วยังสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำได้โดยใช้สมการที่ (10)

$$L = \frac{r^2 \times N^2}{9r + 10l} \quad (10)$$

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดตัวนำแล้ว จึงกำหนดค่าตัวเก็บประจุที่จะนำมาต่อรวมเข้าในวงจร แล้วนำมาคำนวณหาค่าความถี่รีโซแนนซ์ของวงจร ได้ค่าพารามิเตอร์ของขดตัวนำแสดงในตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของขดส่ง และรับกำลังงาน

	L (mH)	C(nF)	R(Ω)	F(kHz)
ขดส่ง	24.16	4.7	1.90	14.94
ขดรับ	24.28	4.7	1.91	14.94

3.3 หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์

ออกแบบหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ สำหรับเพิ่มแรงดันด้วยอัตราส่วน 1/3 ใช้ขดลวดทองแดงเบอร์ 16 AWG พันด้านปฐมภูมิจำนวน 10 รอบ และด้านทุติยภูมิ 30 รอบ

4. การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

4.1 ทดสอบผลของตัวกลางที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการใช้ขดส่งและขดรับกำลังงาน แบบพันบนแกนอากาศและพันบนแกนเฟอร์ไรต์ เจื่อนไขการทดสอบจ่ายโหลดขนาด 1.2 กิโลโอห์ม (25 วัตต์) ใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้าคองที่ 10 โวลต์ ความถี่คองที่ 28.66 กิโลเฮิร์ต จากนั้นจึงทดสอบปรับความถี่

4.2 ทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายกรณีความถี่คองที่และปรับความถี่

การทดลองนี้จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์ คองที่ตลอดการทดลอง ใช้ความถี่คองที่ 14.94 กิโลเฮิร์ต ระยะห่างระหว่างขดรับ และขดส่งกำลังงาน 0-30 เซนติเมตร จ่ายกำลังงานให้กับโหลด

ความต้านทาน 286 โอห์ม (120 วัตต์) จากนั้นจึงทำการทดสอบปรับค่าความถี่ ทำการวัดค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าแต่ละส่วนของวงจร เพื่อใช้คำนวณหา กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ

4.3 ทดสอบหาพิภคการส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยการเพิ่มโหลด

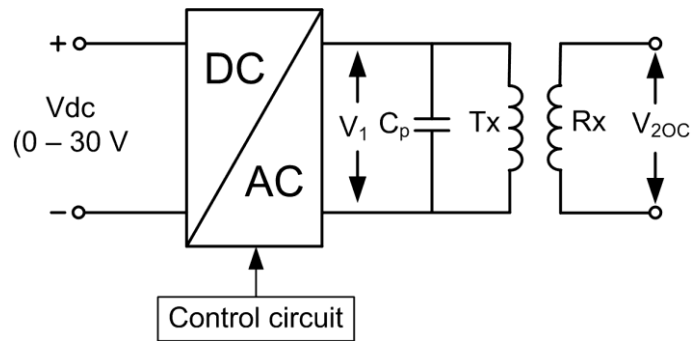
การทดลองนี้ เพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าครั้งละ 10 โวลต์ ใช้ความถี่ 14.94 กิโลเฮิร์ต ระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน 21 เซนติเมตร จ่ายกำลังงานให้กับโหลดความต้านทาน 37.8 โอห์ม (100 วัตต์) จากนั้นจึงทำการเพิ่มโหลด และวัดค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าแต่ละส่วนของวงจร เพื่อใช้คำนวณหา กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน

4.4 ทดสอบหาความเหนี่ยวนำร่วมในวงจรส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สาย

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำร่วม (M) จากการทดสอบใช้สำหรับเปรียบเทียบกับความเหนี่ยวนำร่วมจากการจำลองด้วยสมการ การทดสอบโดยใช้วิธีอัตราส่วนแรงดัน

ขณะเปิดวงจรตามวงจรการทดสอบแสดงดังภาพที่ 7 จากนั้นจึงคำนวณโดยใช้สมการที่ (11) (A. Dalal et

al, 2015), (T.P. Ezhil Reena Joy et al, 2014) ดังนี้



ภาพที่ 7 วงจรทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำรวม

$$M = \frac{V_{20C}}{V_1} L_1 \quad (11)$$

V_1 คือ แรงดันขาเข้าขดส่งกำลังงาน V_{20C} คือ แรงดันขาออกขดส่งกำลังงานขณะเปิดวงจร และ L_1 คือความเหนี่ยวนำขดส่งกำลังงาน และความจุไฟฟ้า (C_p) สำหรับทำให้วงจรทำงานในสภาวะรีโซแนนซ์สามารถต่อได้ทั้งอนุกรมและขนานมีสมการสัมพันธ์กับความถี่และความเหนี่ยวนำดังนี้

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_1} \quad (12)$$

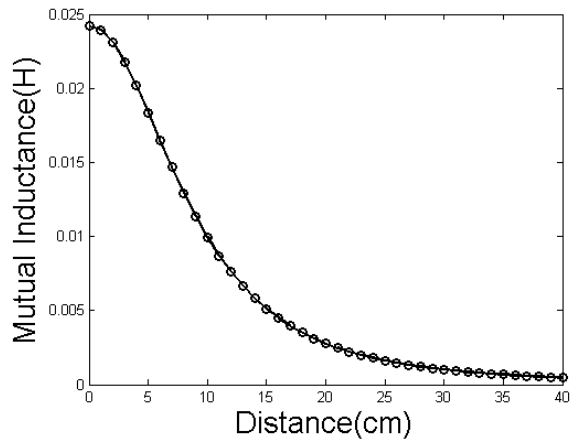
ทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 25 โวลต์ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย แสดงในตารางที่ 1 เลื่อนขดรับ

กำลังงานห่างออกจากขดส่งกำลังงาน 0-30 เซนติเมตร ทำการบันทึกค่าแรงดันขณะเปิดวงจรทั้งสองด้านของวงจรนำค่าที่ได้คำนวณหาความเหนี่ยวนำรวมตามสมการที่ (11)

ผลการวิจัย

1. ผลการจำลอง

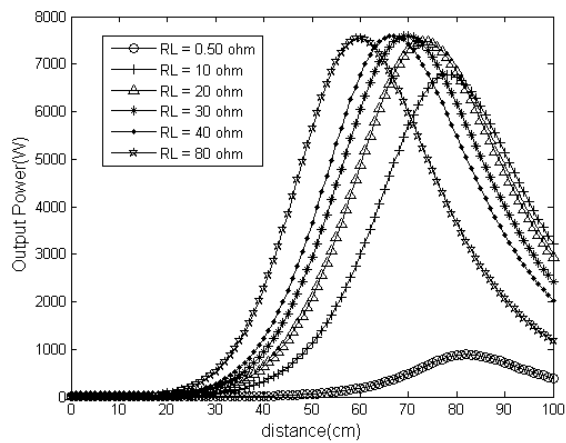
ใช้ค่าพารามิเตอร์ของขดส่ง และรับกำลังงานแสดงในตารางที่ 1 แทนค่าลงในสมการตามที่ได้พิสูจน์มา ได้กราฟความเหนี่ยวนำรวมแสดงดังรูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพที่โหลดต่างกันแสดงดังรูปที่ 9-10 อิมพีแดนซ์ของวงจรที่ความถี่ต่างกันแสดงในรูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพเมื่อปรับค่าความถี่แสดงดังรูปที่ 12-13 และกำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการปรับค่าแรงดันขาเข้าดังรูปที่ 14 ดังนี้



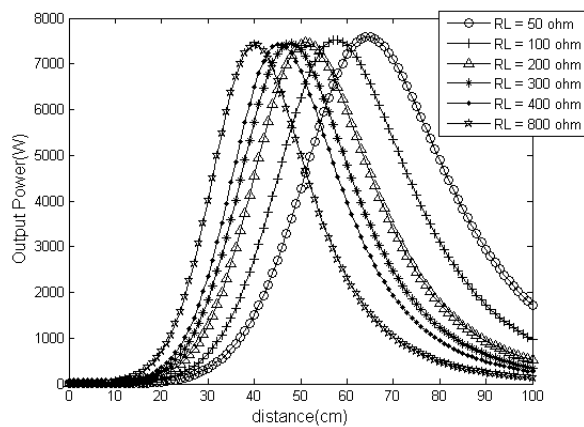
ภาพที่ 8 ความเหนี่ยวนำร่วม (M)

จากภาพที่ 8 ความเหนี่ยวนำร่วม (M) ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างขดตัวนำ เนื่องจาก Coefficient of coupling ลดลงตาม

ระยะห่างนั่นเอง ซึ่งมีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ โดยตรง

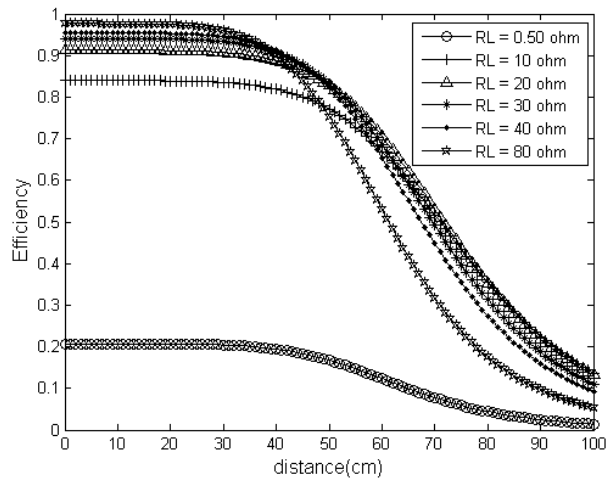


(ก) กำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดต่างกัน

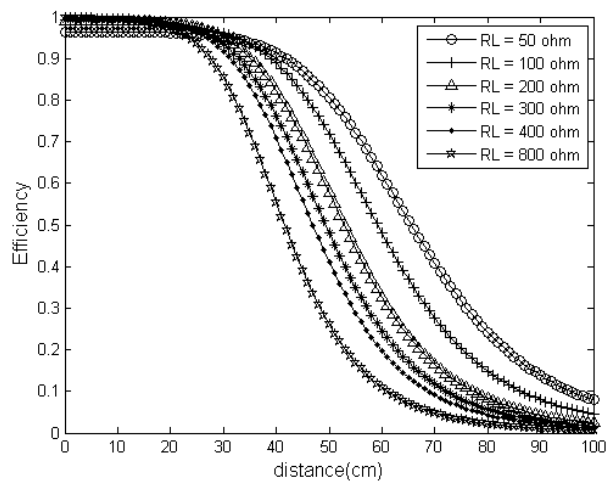


(ข) กำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 9 กำลังไฟฟ้าขาออกที่โหลดต่างกัน



(ก) ประสิทธิภาพที่โหลดต่างกัน

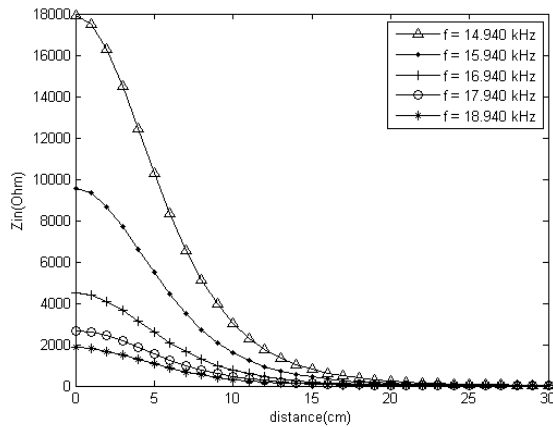


(ข) ประสิทธิภาพเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพกับระยะห่างระหว่างขดตัวนำที่โหลดต่างกัน

กราฟกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพตามภาพที่ 9 - 10 ได้จากการแทนค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 แทนลงในสมการกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ โดยกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 250 โวลต์ เปลี่ยนค่าโหลดให้มีขนาดต่างกัน พบว่าขนาด

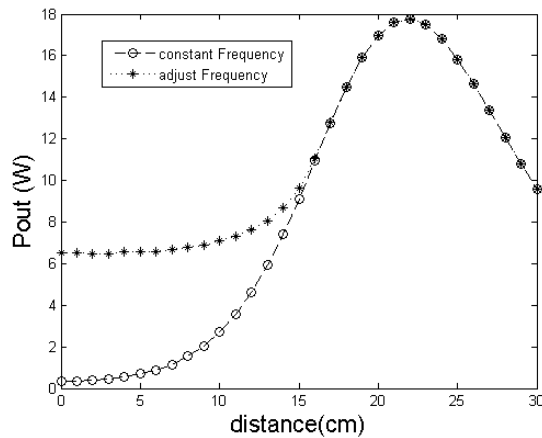
ของโหลดมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของระบบส่งผลให้ลักษณะของกราฟแตกต่างกันออกไป จุดที่เห็นได้ชัดคือ ตำแหน่งการเกิดจุดสูงสุดของกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกเกิดขึ้นในตำแหน่งต่างกัน



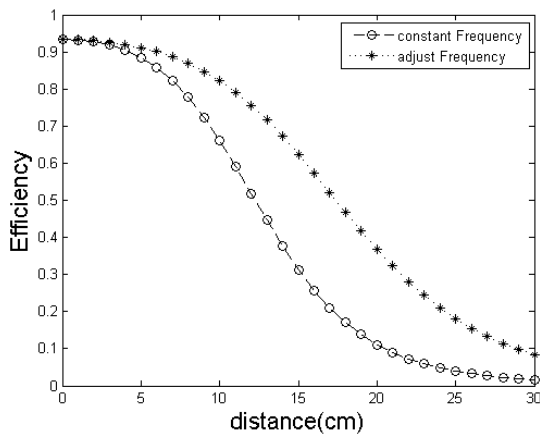
ภาพที่ 11 อิมพีแดนซ์ของวงจรที่ความถี่ต่างกัน

พิจารณาภาพที่ 11 ประกอบกับสมการที่ (3) ถึง (8) พบว่าความถี่ และความเหนี่ยวนำรวม มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า

อิมพีแดนซ์จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพเปลี่ยนไปตามหลักการส่งกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด



ภาพที่ 12 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าขาออกในกรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ตามระยะห่างขดตัวนำ

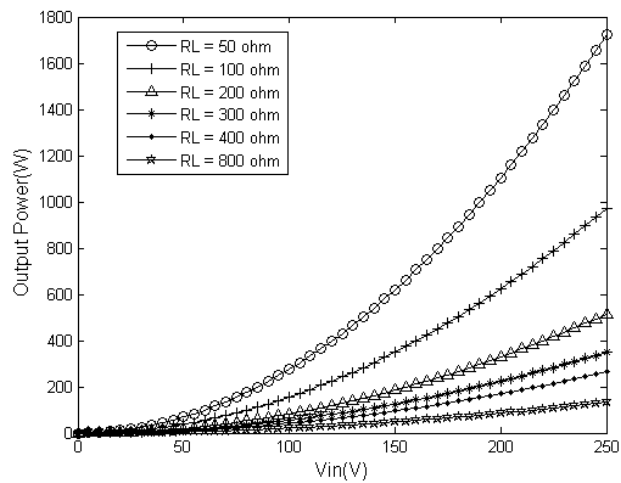


ภาพที่ 13 ผลการจำลองประสิทธิภาพในกรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ตามระยะห่างขดตัวนำ

จากภาพที่ 12 และ 13 ลักษณะกำลังงานไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ เมื่อระยะห่างระหว่างขดส่ง และขดรับกำลังงาน (d) เปลี่ยนแปลง ทำให้ค่า Coefficient of Coupling (k) เปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (M) เปลี่ยนตาม มีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์แต่ละระยะห่างต่างกัน

ออกไป การปรับค่าความถี่จึงเป็นการชดเชยผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว (เอกชัย ชัยดี และคณะ, 2559)

ลักษณะกราฟภาพที่ 14 แสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า



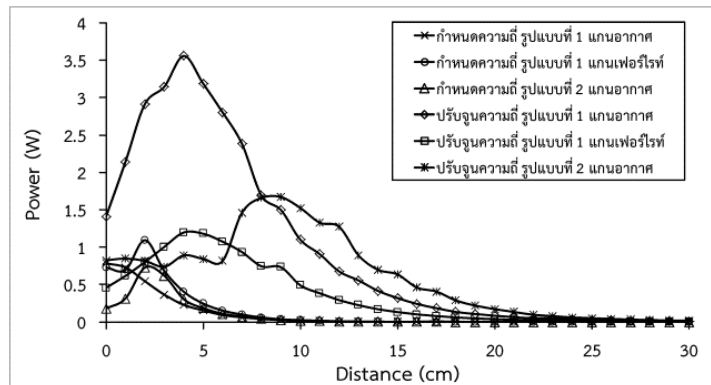
ภาพที่ 14 กำลังไฟฟ้าขาออก และแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ที่โหลดต่างกัน

ผลการทดลอง

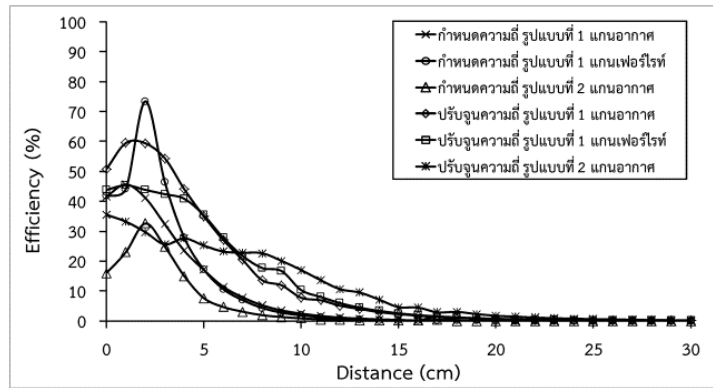
การทดลองที่ 1 ทดสอบผลของตัวกลางที่ใช้ในการเดินฟลักซ์แม่เหล็ก

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อ ศึกษาผลของตัวกลางที่ใช้เป็นเส้นทางเดินแม่เหล็ก ระหว่างแกน

อากาศกับแกนเฟอร์ไรต์ โดยใช้ความถี่ที่และการปรับความถี่ ของวงจร จ่ายโหลดขนาด 1.2 กิโลโอห์ม (25 วัตต์) ใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้าคงที่ 10 โวลต์ ความถี่คงที่ 28.66 กิโลเฮิร์ต จากนั้นจึงทดสอบปรับความถี่



ภาพที่ 15 กำลังงานขาออก ที่ความถี่คงที่ และปรับความถี่ตามระยะห่างของขดตัวนำ

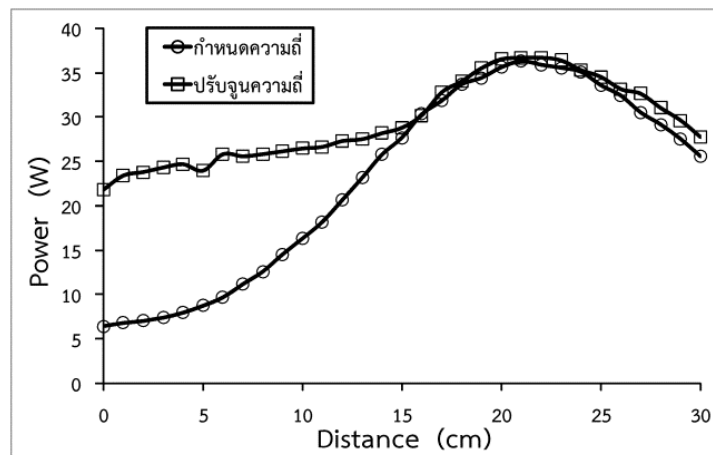


ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพ ที่ความถี่คงที่และปรับความถี่ตามระยะห่างของขดตัวนำ

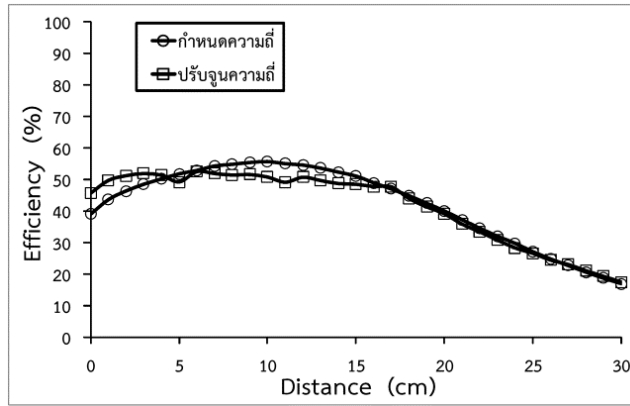
ผลการทดสอบตามรูปที่ 15-16 พบว่ารูปแบบที่ 1 แกนอากาศแบบปรับความถี่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 3.56 วัตต์ ที่ระยะ 4 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่าประสิทธิภาพ 44.04 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่รูปแบบที่ 1 แกนเพอร์โรต์ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด 73.44 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 2 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งเดียวกันได้กำลังไฟฟ้าขาออก 1.09 วัตต์

การทดลองที่ 2 การทดสอบส่งกำลังกำลังไฟฟ้าไร้สาย กรณีความถี่คงที่และปรับความถี่

ใช้ขดส่ง และขดรับกำลังงานพื้นบนแกนอากาศตามที่ได้ออกแบบแสดงดังรูปที่ 6 มีค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาหาระยะทางในการส่งกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยจะใช้ความถี่รีโซแนนซ์คงที่และการปรับความถี่



ภาพที่ 17 กำลังงานไฟฟ้าขาออก ในกรณีความถี่คงที่ และปรับจูนความถี่

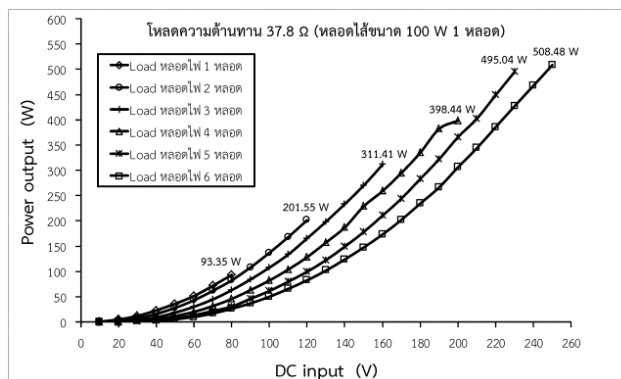


ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพ กรณีความถี่คงที่ และปรับจูนความถี่

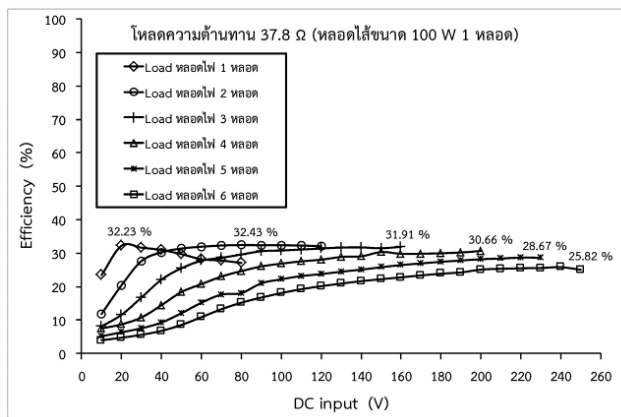
จากกราฟภาพที่ 17-18 พบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกกรณีปรับค่าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น 2.21 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 22 เซนติเมตร ในขณะที่ประสิทธิภาพลดลง 3.27 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเดียวกัน

การทดลองที่ 3 ทดสอบพิกัดการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ทำการทดสอบเพิ่มโหลดให้กับวงจร และทำการเพิ่มแรงดันขาเข้าจนกระทั่งวงจรไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มได้ ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 19 ดังนี้



(ก) กำลังไฟฟ้าขาออก จากการเพิ่มโหลด



(ข) ประสิทธิภาพ จากการเพิ่มโหลด

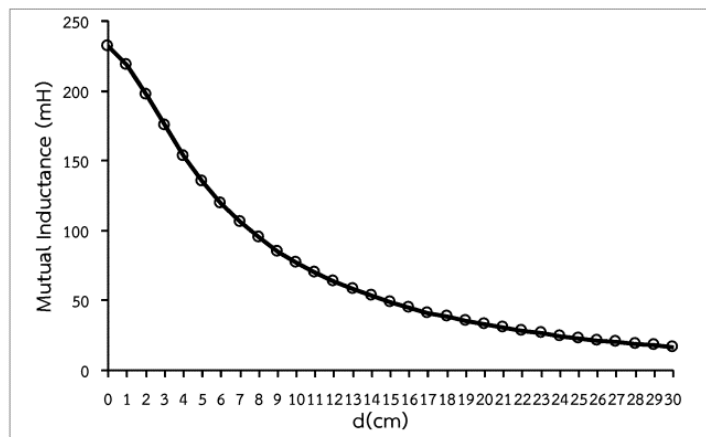
ภาพที่ 19 กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพจากการทดสอบเพิ่มโหลดที่ระยะ 21 เซนติเมตร

จากการทดลองการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยการเพิ่มโหลดความต้านทาน 37.8 โอห์ม (โหลดไส้ขนาด 100 วัตต์) พบว่า โหลดมีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ระบบสามารถส่งกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด 508.48 วัตต์ ที่ระยะทาง 21 เซนติเมตร ใช้ความถี่ไอแซนซ์ 14.94 กิโลเฮิร์ต จ่าย

แรงดันอินพุตเท่ากับ 250 โวลต์ ให้ประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายทั้งระบบ 25.04 เปอร์เซ็นต์

การทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำร่วม

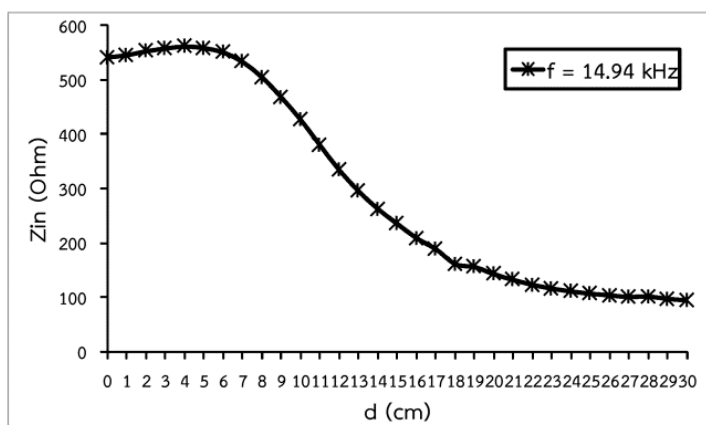
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของความเหนี่ยวนำร่วม เมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 20 ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดส่ง และขดรับกำลังงาน

จากกราฟภาพที่ 20 ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (M) ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างขดตัวนำ เนื่องจากอัตราการคล้องของสนามแม่เหล็ก หรือ แสดงในรูปค่า Coefficient of coupling (k) เปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนของความเหนี่ยวนำร่วมมีผลต่ออิมพีแดนซ์ พิจารณาตามสมการที่ 6 การเปลี่ยนแปลงกล่าวมีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยตรง



ภาพที่ 21 ลักษณะของอิมพีแดนซ์กับระยะห่างระหว่างขดส่งและขดรับกำลังงาน

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์แสดงดังภาพที่ 21 ได้จากการทดสอบโดยใช้พารามิเตอร์ขดตัวนำที่ได้ออกแบบไว้ตามรูปที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 ทำการประมาณการค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแรงดัน และกระแสไฟฟ้าสลับ ด้านขาเข้าของวงจร

อภิปรายผลการวิจัย

การทดสอบผลของตัวกลางที่ใช้ในการเดินปลั๊กแม่เหล็ก พบว่า กรณีใช้ความถี่ที่ขดตัวนำพันบนแกนเฟอร์ไรต์ใช้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมากกว่าขดตัวนำพันบนแกนอากาศ แต่เมื่อทำการปรับความถี่พบว่าขดตัวนำพันบนแกนอากาศกลับให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกมากกว่า นั่นแสดงว่าความถี่ มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

จากการทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายกรณีคงที่ความถี่และปรับความถี่ตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างขดตัวนำ พบว่าเมื่อระยะห่างเปลี่ยนแปลงทำให้ความเหนี่ยวนำรวมเปลี่ยนตาม มีผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์แต่ละระยะไม่เท่ากัน ดังนั้นการปรับค่าความถี่จึงเป็นการชดเชยผลการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำรวม สามารถทำให้วงจรส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่

การทดสอบหาพิสัยการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายพบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าขาเข้า อย่างไรก็ตามพบว่าวงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด 508 วัตต์ ที่ระดับแรงดัน 250 โวลต์ ไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากกว่านี้เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถทนแรงดันและกระแสที่สูงได้

จากการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำรวมพบว่าผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการจำลองโดยใช้สมการ แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเปลี่ยนแปลงทำให้อัตราส่วนการคล่อง

สนามแม่เหล็กระหว่างขดตัวนำด้านส่งและด้านรับลดลง ทำให้ความเหนี่ยวนำรวมเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลงตาม ส่งผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยตรง

สรุป

การวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ได้ทำการวิเคราะห์วงจรสมมูลทางไฟฟ้า พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยพิจารณาจากสมการที่ (4) คือ 1)ความต้านทานของโหลด 2)ความเหนี่ยวนำรวม และอิมพีแดนซ์ 3)ความถี่ 4)แรงดันไฟฟ้าขาเข้า ได้ทำการจำลองตามสมการเพื่อดูผลของพารามิเตอร์ดังกล่าว ได้ออกแบบและสร้างวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยการเลือกรูปแบบการพันและการใช้แกนที่เหมาะสม ใช้เทคนิคการปรับจูนความถี่ และเพิ่มหม้อแปลงเฟอร์ไรต์ทางด้านวงจรถ้าเข้า

วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ได้ออกแบบมีองค์ประกอบหลัก คือ อินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น หม้อแปลงเฟอร์ไรต์สำหรับเพิ่มกำลังไฟฟ้า ออกแบบขดตัวนำด้านส่ง และรับกำลังงาน โดยเลือกรูปแบบการพันที่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด ทำการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเพื่อแสดงผลของพารามิเตอร์ดังกล่าว จากผลการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์แต่ตัวมีผลต่อสมรรถนะการส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายดังนี้

1. ความต้านทานของโหลด

ความต้านทานของโหลดมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย พิจารณาได้ตามสมการที่ (6) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าขาออก เป็นไปตามหลักการ การส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ผลการจำลองจากกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพตามรูปที่ 9-10ได้จากการแทน

ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2 แทนลงในสมการกำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพ โดยกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 250 โวลต์ เปลี่ยนค่าโหลดให้มีขนาดต่างกัน พบว่าขนาดของโหลดมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของระบบส่งผลให้ลักษณะของกราฟแตกต่างกันออกไป จุดที่เห็นได้ชัด คือ ตำแหน่งการเกิดจุดสูงสุดของกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกเกิดขึ้นในตำแหน่งต่างกัน

2. ความเหนี่ยวนำร่วม และอิมพีแดนซ์

ความเหนี่ยวนำร่วมเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขดตัวนำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย พิจารณาได้ตามสมการที่ (6) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าขาออก เป็นไปตามหลักการ การส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3. ความถี่

การปรับค่าความถี่ตามระยะห่างระหว่างขดตัวนำเป็นเทคนิคการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วม การเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วมมีผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์แต่ละระยะห่างต่างกันออกไป การปรับค่าความถี่จึงเป็นการชดเชยผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

การปรับค่าความถี่เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำร่วมมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตามส่งผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าขาออกโดยตรง (เอกชัย ชัยดี และคณะ, 2559)

4. แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

กำลังไฟฟ้าขาออกแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้ายกกำลังสอง พิจารณาได้ตามสมการที่ (4) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสามารถทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นตาม อย่างไรก็ตามการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาเข้าทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องรับภาระมากขึ้นทำให้มีโอกาสเสียหายได้ง่าย จากกราฟรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของ

แรงดันไฟฟ้าขาเข้าซึ่งมีผลโดยตรงต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการวิจัยจากโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน (HRS) ปี 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เอกสารอ้างอิง

- เอกชัย ชัยดี, สุกัลย์ ยะอู่, เอกพจน์ ยศแก้ว และอนนท์ นำอิน. (2559). ผลกระทบทางความถี่ที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. ปีที่26 (ฉบับที่2), 173-182.
- A. Dalal, T.P. Ezhil Reena Joy and P. Kumar. (2015). Mutual Inductance Computation Method for Coils of Different Geometries and Misalignments. **Power & Energy Society General Meeting 2015 IEEE.**, 1-5.
- A. Ong, J. P.K. Sampath, G. F. H. Tan Yenkheng, D. M. Vilathgamuwa, and N. X. Bac. (2014). Analysis of impedance matched circuit for wireless power transfer. In **Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE**, 2965-2970.
- A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith. (2011, February). Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. **IEEE**

- Transactions on Industrial Electronics.** vol.58 (no. 2), 544-554.
- F. Muavi, M. Edington, and W. Eberle. (2012). Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies. **Energy Conversion Congress and Exposition**. (ECCE), 1804-1810.
- H. Jiang, J. Zhang, D.Lan, K.K. Chao, S.Liou, H. Shahnasser, R.Fechter, S.Hirose, M.Harrison, and S.Roy. (2013). A Low-Frequency Versatile Wireless Power Transfer Technology for Biomedical Implants. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 7(no. 4), 526-535.
- H. Kim, C. Song, D.-H. Kim, D. H. Jung, I.-M. Kim, Y.-I. Kim, J. Kim, S. Ahn and J. Kim. (2016, February). Coil Design and Measurements of Automotive Magnetic Resonant Wireless Charging System for High-Efficiency and Low Magnetic Field Leakage. *Microwave Theory and Techniques. IEEE Transactions.* Volume 64 (Issue 2), 383-400).
- J. Kim, S. Kong, H. Kim, I-S. Suh, N. P. Suh, D-H. Cho, J. Kim and S. Ahn. (2013). Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System. **Proceeding of the IEEE.** Volume 101 (Issue 6), 1332-1342.
- J.C. Lin. (2013). Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects. **IEEE Antennas Propagat Mag.** vol. 55 (no. 2), 250-253.
- J.O. Mur-Miranda, G. Fanti, Y.Feng, K. Omanakuttan, R. Ongie, A. Setjoadi, and N. Sharpe. (2010). Wireless Power Transfer using weakly coupled magnetostatic resonators. in **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) IEEE**, 4179-4186.
- N. Y. Kim, K. Y. Kim, and C. W. Kim. (2012, June). Automated frequency tracking system for efficient mid-range magnetic resonance wireless power transfer. **Microwave and Optical Technology Letters.** vol. 54(no.6), 1423-1426.
- S. Jeong, Y. Jes Jang, and D. Kum. (2015). Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle. *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 30 (no.11), 6368-6377.
- S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee. (2014, September). A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. **IEEE Transactions on Power Electronics.** Vol. 29 (no.9), 4500-4511.
- T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, and Y. Hori. (2013, September). Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling. **IEEE Transactions on Industrial Electronics.** vol.60 (no.9), 3689-3698.
- T. C. Beh, T. Imura, M. Kato, and Y. Hori. (2010). Basic study of improving efficiency of wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on impedance matching. In **Industrial Electronics (ISIE)**, IEEE International Symposium, 2011-2016.

T.P. Ezhil Reena Joy, A. Dalal and P. Kumar. (2014) . Accurate Computation of Mutual Inductance of Two Air Core Squar Coils with Lateral and Angular Misalignments in a Flat Planar Surface. **IEEE Trans. Magn.**, vol.50 (no.1).

Y. Lim, S. Lim, and J. Park. (2014, Augus). An adaptive impedance-matching network based on anovel capacitor metrix for wireless power transfer. **IEEE Transaction on Power Electronics**. vol.29 (no.8).

Y. Zhang and Z. Zhao. (2014, March) . Frequency-splitting analysis of two-coil resonant wireless power transfer. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. vol.13, 400-402.

Y. Zhang, Z. Zhao, and K. Chen. (2014, July/August). Frequency-splitting analysis of four-coil resonant wireless power transfer. **IEEE Transactions on Industry Applications**. vol.50 (no.4), 2436-2445.

การทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับควันแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะ

Efficiency Testing of Closed Loop Smoke Detector for Incinerator

วิสูตร อาสนวิจิตร^{1*} และ กรพจน์ มะโนใจ²
Visut Asanavijit^{1*} and Kompod Manojai²

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่

¹ College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna

² Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding author E-mail: iamvisut@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับควันแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควันสำนักงานโดยใช้หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 10 กิโลโวลต์ เลือกใช้เซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ขาออกของตัวตกตะกอนและส่งค่าปริมาณควันที่วัดได้ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ประมวลผลเพื่อไปสั่งปรับสวิตช์ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้เหมาะสมกับปริมาณของควันขาออก ซึ่งได้ทำการทดสอบกับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 19 × 20 × 32 เซนติเมตร และมีลวดเป็นขั้วอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.38 มิลลิเมตร ผลการทดสอบวัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอนขนาด 2.0 เซนติเมตร กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 ถึง 24 กิโลโวลต์ พบว่าค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.026 ถึง 0.332 มิลลิแอมป์ และได้ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคควันจากธูปเบื้องต้น พบว่าเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดทำงานสัมพันธ์กันแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ดี ซึ่งให้ผลเฉลี่ยของอนุภาคควันลดลงได้ 82.2 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: ไฟฟ้าแรงดันสูง การควบคุมแบบวงปิด อนุภาค ตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เตาเผาขยะ

Abstract

The particulate matter collector for official incinerator by using an electrostatic precipitation technique with 10 kV DC high voltage was designed and developed in this paper. The ZX-MQ2 sensor is detecting the smoke concentration at the collector outlet and send signal to Arduino R3 microcontroller evaluate and also send a command to adjust appropriate frequency switch of DC high voltage for smoke concentration. In this study testing electrostatic precipitator in the form of plate sheet amount 6 couple size 19 × 20 × 32 cm. (width x length x high) and the discharge electrode dimension is 0.38 mm. It was found that the distance between the collecting plate and the discharge electrode was about 2 cm and the applied corona voltage in the range of 0 to 24 kV corresponding to the discharge current in the range of 0.026 to 0.332 mA. Finally, the total collection efficiency of the developed electrostatic collector was shown that about 82.2 %.

Keywords: High Voltage, Closed-Loop Control, Particle, Electrostatic Precipitators, Incinerator

บทนำ

ในสถานการณ์ปี 2550 ถึงปัจจุบันจังหวัด เชียงใหม่จะประสบปัญหาด้านการเกิดหมอกควันซึ่งมี ค่าเกิดมาตรฐาน จากรายงานของมณฑล ราชะนาคร. (2553)ในเดือนมีนาคม 2550 กรมควบคุมมลพิษได้ รายงานปริมาณฝุ่นขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 10 ไมครอน (PM 10)ในเขตอำเภอเมืองจังหวัด เชียงใหม่สูงถึง 383 ไมโครกรัมต่อปริมาตรอากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่าระดับมาตรฐานคุณภาพ อากาศของประเทศไทยกำหนดไว้ ถึง 3 เท่าตัว โดย ปัญหาสำคัญคือไฟป่า การเผาในที่โล่งแจ้ง มลพิษจาก ยวดยาน ซึ่งการเผาในที่โล่งแจ้งส่วนใหญ่แต่ละครั้งจะ เผาโดยตรงไม่ผ่านปล่องหรือกระบวนการใดที่จะกรอง หรือบำบัดและกำจัดมลพิษที่ออกมา จึงเกิดฝุ่น ควัน ก๊าซ และสารพิษอื่นจากการเผาไหม้ แพร่กระจายไป ได้ในบรรยากาศ ซึ่งทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกสู่ บรรยากาศ ส่งผลทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ จาก รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2557 การเผาขยะยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยซึ่งทำให้เกิดปัญหา หมอกควันทำให้การขับเคลื่อนพาหนะ ทัศนวิสัยใน การมองเห็นไม่ดี อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุตามมา อาจ สูญเสียทั้งทรัพย์สินและร่างกายได้ อุษณีย์ วิจิเขต คำนวน และคณะ.(2550) จากรายงานทางการแพทย์ พบว่า PM 10 มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ของมนุษย์ ทำให้เกิดการทำลายเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการ เกิดโรคหอบหืด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุม ปริมาณการแพร่กระจาย PM 10 เหล่านี้ เพื่อไม่ให้มี ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์

การใช้เตาเผาในการกำจัดขยะในพื้นที่ชุมชนเป็น การลงทุนที่สูงในระยะแรก โดยต้องมีระบบบำบัด อากาศเสียที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการใช้ ความร้อนในการเผาไหม้ มวลสารที่เกิดขึ้นจากการเผา ไหม้ขยะมูลฝอยชุมชน ประกอบด้วย ฝุ่น และก๊าซ หลายชนิด ซึ่งต้องมีการนำมาบำบัดก่อนระบายออกสู่ บรรยากาศภายนอก พานิช อินต๊ะ. (2548)-

Parker,K.R.(1997) วิธีการกำจัดด้วยเครื่องตกตะกอน เจริงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) หรือ ESP ที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้ สนามไฟฟ้ากำจัดอนุภาคแขวนลอยในอากาศให้ ประสิทธิภาพการตกตะกอนสำหรับอนุภาคสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์โดยไม่มีการสูญเสียของความดัน และสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส

เนื่องจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ติดตั้ง ใช้งานกับเตาเผาขยะในปัจจุบัน พานิช อินต๊ะ.(2553) เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อน อีกทั้งยังต้อง พึ่งพาเทคโนโลยีนำเข้าจากต่างประเทศ ใช้แหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงจ่ายให้กับขั้วดิสชาร์จ (ประมาณ 10 ถึง 100 กิโลโวลต์) ต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้เกิดการใช้กำลังงานไฟฟ้าต่อเนื่องตลอด ซึ่ง ในขณะที่ไม่มีอนุภาคฝุ่นระบบจะทำงานตลอด ส่งผล ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เครื่องตกตะกอนมีอายุ การใช้งานสั้นลง สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และซ่อมบำรุงมากขึ้น

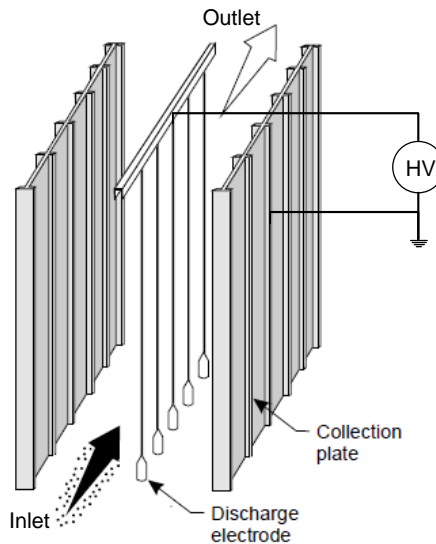
จากปัญหาที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอการศึกษาและทดสอบระบบตรวจจับ ควันแบบวงปิดจากเตาเผาขยะที่ใช้งานร่วมกับ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ระบบ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ตัวตกตะกอน เจริงไฟฟ้าสถิตสำหรับดักจับควันจากการเผาขยะ และมี ระบบที่ตรวจจับควันแบบวงปิดที่ต้องทำการศึกษ เพื่อให้งานของการตรวจจับควันมีประสิทธิภาพ ที่สูงโดยให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้งาน ซึ่ง การศึกษานี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยี สำหรับการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กให้มีประสิทธิภาพ ยิ่งขึ้น โดยในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ต่อเนื่องจากงานวิจัยของ วิสูตร อาสนวิจิตรและคณะ. (2558) โดยจะทำการทดสอบวัดความสัมพันธ์การ ทำงานของระบบร่วมกับตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตใช้ งานที่ได้มีการพัฒนาลักษณะโครงสร้างแบบแผ่นเพลต ขนาดจำนวน 6 คู่

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจะมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงรูปที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ขั้วดีสชาร์จ (Discharge electrode) และขั้วตกตะกอน (Collection electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วดีสชาร์จ โดยที่ขั้วตกตะกอนเป็นกราวด์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) ขึ้นโดยรอบๆ ขั้วดีสชาร์จ จึงทำให้ไอออน (Ions) และอิเล็กตรอน (Electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (Ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่าง

ขั้วดีสชาร์จกับขั้วตกตะกอน เมื่อมีฝุ่นละอองลอยไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน โดยไอออนเกาะติดกับฝุ่นละอองลอยเหล่านั้นเป็นผลทำให้ฝุ่นละอองลอยได้รับประจุ และฝุ่นละอองลอยที่มีประจุ (Charged particulates) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) และถูกสะสมตัวอยู่บนขั้วตกตะกอนโดยฝุ่นละอองลอยที่ตกตะกอนบนขั้วตกตะกอนจะถูกกำจัดออกจากขั้วตกตะกอนโดยการเคาะที่ขั้วตกตะกอนเพื่อให้ฝุ่นหลุดออก พานิช อินตี๊ะ.(2553)



ภาพที่ 1 ตกตะกอนเพลตขนาน IEEE GlobalSpec.(2016)

หลักการสร้างสัญญาณพัลส์

การควบคุมสัญญาณพัลส์ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ TL494 เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม PWM (Pulse width modulation) ควบคุมการทำงานวงจร ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานในโหมดควบคุมจากแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ จะทำงานตามสมการ John, G. et al.(1991) ดังนี้

$$V_{out} = \frac{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times (V_{in} - V_{SAT}) \times t_{ON}}{(T - t_{ON})} - V_D \quad (1)$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงานมอสเฟต t_{ON} คือ ช่วงเวลาที่มอสเฟตนำ กระแส N_p คือ จำนวนรอบปฐมภูมิ N_s คือ จำนวนรอบทุติยภูมิ V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุต V_{in} คือ แรงดันที่อินพุต V_{SAT} คือ แรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่จุดอิ่มตัว V_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด

สนามไฟฟ้าและการไหลของกระแสไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน (Current - Voltage relationship) สามารถอธิบายได้จากสมการของ Maxwell ที่ครอบคลุมสมการ Poisson's ของสนามไฟฟ้า E คือ Parker, K.R. (1997)

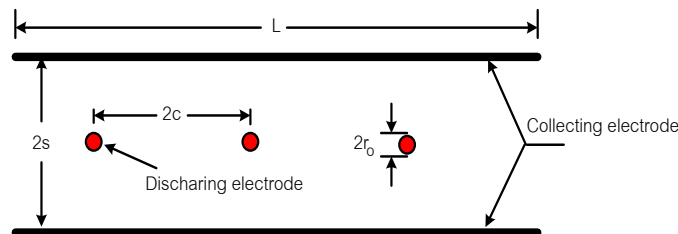
$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของประจุ (C/m^3) และ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง (Free-space permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m ซึ่งสมการนี้ใช้ได้สำหรับแก๊สภายใต้สภาวะปกติ ในการศึกษานี้จะสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากผลของประจุค้างของไอออน (Ion space charge) ในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตลักษณะแบบเส้นลวด-แผ่นบาง (Wire-plate) มีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นค่ากระแสโคโรนาเฉลี่ย (Average corona current) I_c ที่เป็นฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าชั่ว

ติสซาร์จอิเล็กโทรดเครื่องตกตะกอนแบบเส้นลวด-แผ่นบาง Parker, K.R. (1997) ดังรูปที่ 2

$$I_c = \frac{\pi \epsilon_0 Z_i h L}{c s^2 \ln(d/r_o)} V(V - V_c) \quad (3)$$

เมื่อ Z_i คือความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน (Ion electrical mobility) สำหรับในการศึกษานี้จะใช้ไอออนลบ (Negative ion) เนื่องจากจะมีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออนลบที่สูงซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงตามไปด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 2.1×10^{-4} m²/V.s สำหรับไอออนลบในอากาศ d คือรัศมีทรงกระบอกสมมูล (Equivalent cylindrical radius) ($d = 4s/\pi$ สำหรับ $s/c \leq 0.6$) r_o คือรัศมีของขั้วติสซาร์จ h คือความสูงของขั้วตกตะกอน L คือความยาวของขั้วตกตะกอน V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วติสซาร์จอิเล็กโทรด และ V_c คือแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset voltage) หาได้จาก สมการของ Parker, K.R. (1997)



ภาพที่ 2 การจัดวางอิเล็กโทรด พานิช อินตี และคณะ.(2550)

$$V_c = r_o E_c \ln(d/r_o) \quad (4)$$

สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset field) E_c สำหรับโคโรนาลบในอากาศหาได้จาก A. Mizuno. (2000)

$$E_c = \delta \left(32.2 + \frac{0.864 \times 10^5}{\sqrt{r_o \delta}} \right) \quad (5)$$

$$\delta = \frac{298}{(298 + T)} P \quad (6)$$

เมื่อ δ คือความหนาแน่นของแก๊ส (Gas density) T คืออุณหภูมิทำงานของแก๊ส (Operating temperature) P คือความดันทำงาน (Operating pressure)

การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาค

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุ (Particle charging) ด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าและหรือการแพร่เชิงความร้อน (Thermal diffusion) ในการศึกษาจำนวนของประจุที่อยู่บนอนุภาคจะได้มาจากการอัดประจุแบบสนาม (Field charging) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 ไมโครเมตร โดยการประมาณค่าจำนวนประจุอนุภาคนี้ สามารถคำนวณได้จาก สมการของ White, H.J. (1963)

$$n_p = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (7)$$

เมื่อ ε คือค่าคงที่ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (Dielectric constant of particle) E คือสนามไฟฟ้า K_E คือค่าคงที่จากสมการของคูลอมป์ (มีค่าเท่ากับ $9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$) d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ $1.61 \times 10^{-19} \text{ C}$) N_i คือค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (Ion number concentration) และ t คือเวลาในการอัดประจุ (Charging time) สำหรับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่น ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุสามารถหาได้จาก A. Jaworek. et al.(2007) เมื่อ v_0 คือความเร็วของไหล

$$N_i t = \frac{I_c d}{Z_i e v_0 V h} \quad (8)$$

ประสิทธิภาพการตกตะกอน

ประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมด (Overall collection efficiency) $\eta_{overall}$ ของเครื่อง

ตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นบาง พานิชอินตีเซ.(2553), วิสูตร อาสนวิจิตร และคณะ.(2554) ที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 10 กิโลโวลต์ สามารถหาค่าได้จากมวลของอนุภาคที่แผ่นกรองทดสอบซึ่งวัดน้ำหนักได้ทาง ขาเข้าและทางขาออก ทั้งก่อนผ่านและหลังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สามารถคำนวณดังสมการนี้

$$\eta_{overall} = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100\% \quad (9)$$

เมื่อ C_{inlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางเข้า และ C_{outlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นเพลตขนาน

วิธีการทดสอบระบบตรวจจับควันแบบวงปิด

เกณฑ์ในการทดสอบ

ในการทดสอบระบบตรวจจับควันแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควันสำนักงานโดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 10 กิโลโวลต์ โดยได้ทำนาลักษณะการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มมาควบคุมสัญญาณพัลส์สวิตซ์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรพลาสมาคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูง นำเซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ขาออกของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ และส่งค่าปริมาณควันที่วัดได้ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 ประมวลผลเพื่อไปสั่งปรับสวิตซ์ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้เหมาะสมกับปริมาณของควันขาออก ดังนั้นเพื่อให้บรรลุเป้าหมายจึงได้มีการกำหนดรายละเอียดการทดสอบดังตารางที่ 1

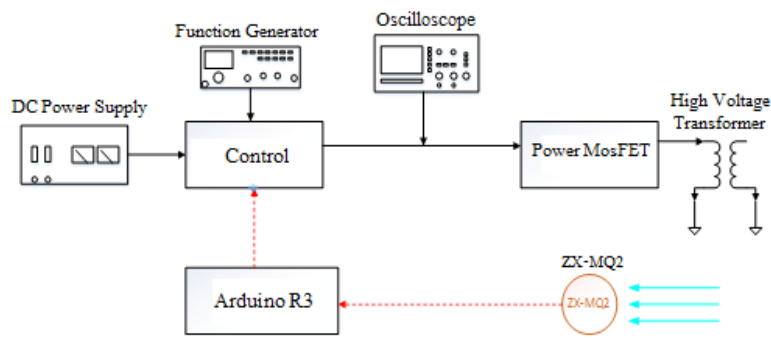
ตารางที่ 1 เกณฑ์ในการทดสอบระบบตรวจจับควัน

เกณฑ์ในการทดสอบ	คุณสมบัติ
ขนาดตัวตตะกอน	ขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) 19 × 20 ×32 เซนติเมตร
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว	ไม่เกิน 25 กิโลโวลต์
ความถี่ใช้งาน	ไม่เกิน 30 กิโลเฮิร์ต
ประจุนภาค	ประจุนวก
ศักย์ไฟฟ้า	ขั้วบวก
อิเล็กทรอนิกส์ใช้งาน	แบบเส้นลวด
อุณหภูมิ	ไม่เกิน 300 องศาเซลเซียส
แรงดันไฟฟ้าอินพุต	220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต
เซนเซอร์ตรวจจับควัน	รุ่น ZX-MQ2
ตัวประมวลผล	MCU Arduino R3

รายละเอียดระบบตรวจจับควัน

เครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควันสำนักงานแสดงในรูปที่ 3(ข) ออกแบบให้มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 12×16×30 เซนติเมตร น้ำหนักโดยรวมประมาณ 1 กิโลกรัม ตตะกอนที่ใช้สำหรับทดสอบได้ออกแบบโดยใช้แผ่นสังกะสีทำหน้าที่เป็นแผ่นเพลตสำหรับตตะกอน และมีเส้นขดลวดเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 19×20×32 เซนติเมตร โครงสร้างต้นแบบได้ออกแบบให้มีการซ่อมบำรุง

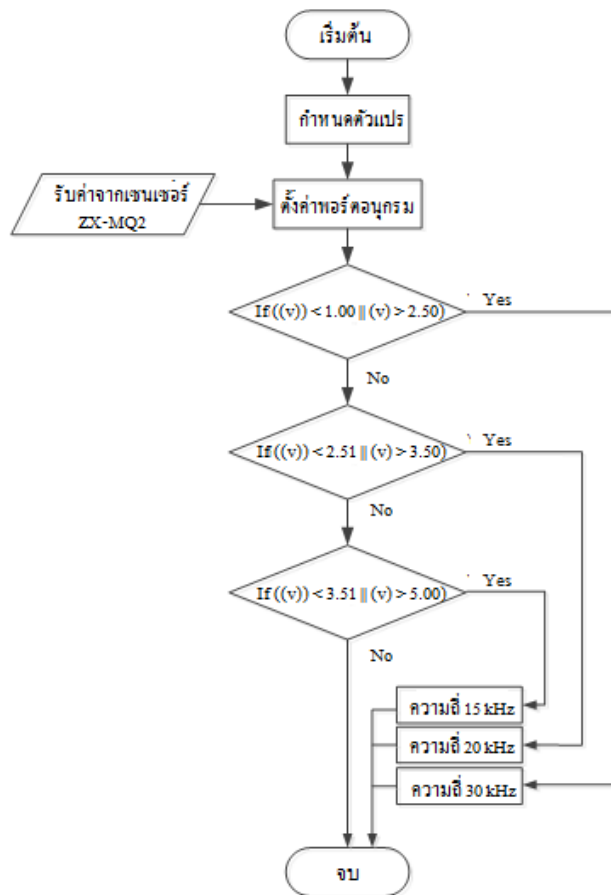
ปรับเปลี่ยนแก้ไขอุปกรณ์ได้ง่าย วงจรของเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดจากเตาเผาขยะไร้ควันสำหรับสำนักงานจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage Power Supply) ตัวสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง (Pulse Generator) มอสเฟตกำลัง (Power MosFET) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Transformer) ไดโอดเรียงแรงดันสูง (High Voltage Diode) ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino R3 และเซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 ดังแสดงตามไดอะแกรมรูปที่ 3



ภาพที่ 3 ไดอะแกรมการทำงาน Close loop control

หลักการทำงานของ Close loop control คือ การวัดปริมาณของควันทางด้านขาออกของเตาเผาขยะไร้ควันโดยมีเซนเซอร์ตรวจจับควัน ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ออกมา แล้วส่งค่าของควันไปที่

Arduino R3 จากนั้นจะประมวลผลที่ได้ออกมาเป็นแรงดันตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์เพื่อไปสั่งปรับสวิตซ์ความถี่ที่เหมาะสมกับปริมาณของควันเพื่อให้ประสิทธิภาพของการทำงานสูงที่สุดดังรูปที่ 4



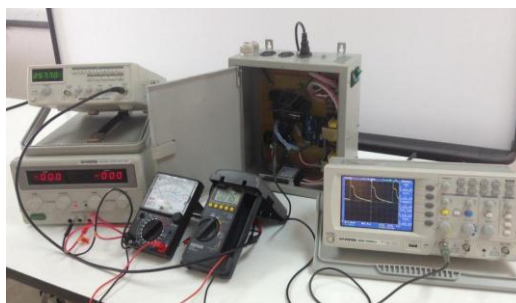
ภาพที่ 4 ไตอะแกรมลำดับขั้นการประมวลผลและแสดงผล

ลำดับขั้นการประมวลผลและแสดงผลข้อมูลที่ใช้กับ Arduinouno R3 ดังแสดงในรูปที่ 4 เริ่มต้นการทำงานจะต้องมีการกำหนดค่าของตัวแปรก่อนและรับค่าจากเซนเซอร์ ZX-MQ2 โดยต้องมีการตั้งค่าให้เข้ากับพอร์ตอนุกรมเมื่อรับค่าจากเซนเซอร์แล้วมีเงื่อนไขการทำงานตามคำสั่งของโปรแกรมซึ่งกำหนดให้ค่าระหว่าง 1.00 ถึง 2.50 โวลต์ ปรับให้ R_{adjust} ตัวที่ 1 ทำงานที่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ถ้าไม่ได้อยู่ในช่วงค่านี้ให้จบการทำงาน ค่าระหว่าง 2.51 ถึง 3.50 โวลต์ ปรับให้ R_{adjust} ตัวที่ 2 ทำงานที่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถ้าไม่ได้อยู่ในช่วงค่านี้ให้จบการทำงานและค่าระหว่าง 3.51 ถึง 5.00 โวลต์ ปรับให้ R_{adjust} ตัวที่ 3 ทำงานที่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ถ้าไม่ได้อยู่ในช่วงค่านี้ให้จบการทำงาน

อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ความถี่และแรงดันเอาต์พุต

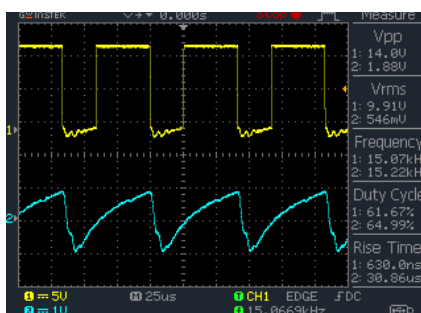
ในการทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันเอาต์พุต ได้นำหลักวิธีการของพัลส์วิดท์มอดูเลชันมาใช้ ซึ่งเป็นการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกันคือสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากขาที่ 3 ของไอซีเบอร์ TL494 ซึ่งสามารถปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ได้จากการปรับค่าความต้านทาน R_{adjust} ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 5 กิโลโอห์ม ในการออกแบบได้ใช้ความต้านทานปรับค่า 10 กิโลโอห์ม โดยทดสอบที่ความถี่ 15, 20 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์



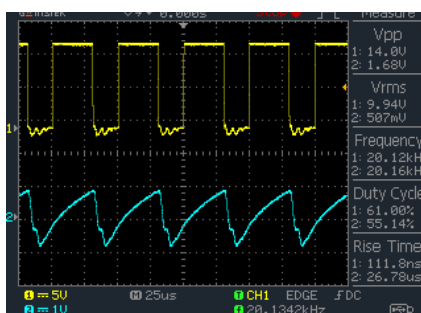
ภาพที่ 5 อุปกรณ์การวัดทดสอบความถี่และแรงดันเอาต์พุต

จากนั้นทำการวัดสัญญาณพัลส์ที่ขา 9 และขา 10 ของไอซีเบอร์ TL494 ดังแสดงในรูป 5 ด้วยออสซิลโลสโคปของ Digital Oscilloscope (ยี่ห้อ GW Instek รุ่น GD5-1052-U) บันทึกข้อมูลของสัญญาณรูปคลื่นพัลส์ ที่ได้จากการทดสอบปรับความต้านทาน R_{adjust} จากการทดสอบปรับรอบการทำงาน

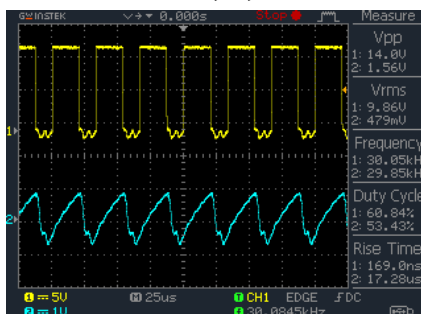
(Duty cycle) ตั้งแต่ 25 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่ารอบการทำงานที่ 60 เปอร์เซ็นต์ เป็นจุดทำงานที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ไม่ทำให้อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตกำลังเกิดความร้อน และสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 10 กิโลโวลต์อย่างต่อเนื่อง



(ก) ความถี่ 15 kHz, Duty cycle ที่ 60 เปอร์เซ็นต์



(ข) ความถี่ 20 kHz, Duty cycle ที่ 60 เปอร์เซ็นต์



(ค) ความถี่ 30 kHz, Duty cycle ที่ 60 เปอร์เซ็นต์

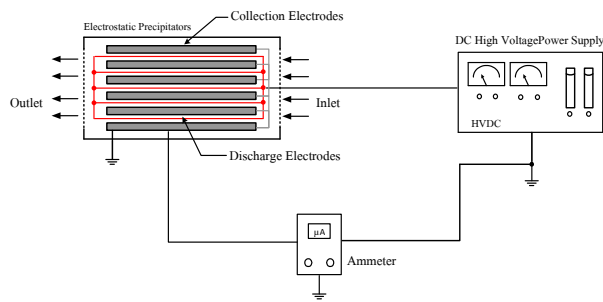
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของรอบการทำงานและความถี่ใช้งาน

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของรอบการทำงานและความถี่ใช้งานโดยการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้กำหนดให้มีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ เท่ากับ 10 กิโลโวลต์ พบว่าที่รอบทำงาน 60 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 15, 20 และ 30 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าแรงดันไฟฟ้า V_{pp} เท่ากับ 18.8, 16.8 และ 15.6 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

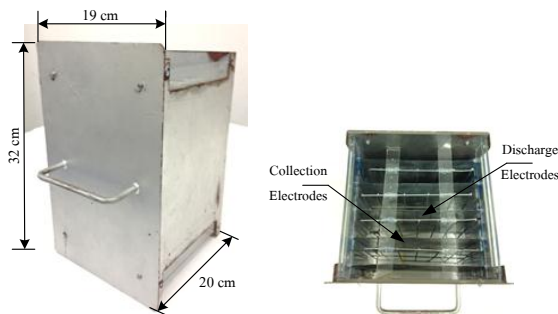
การศึกษาคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าใช้งาน

การทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (Current -Voltage Characteristics)

โดยมีไดอะแกรมอุปกรณ์และการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับเครื่องต้นแบบดักจับกลุ่มควันและการทำงานของระบบตรวจจับควันแบบวงปิด ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันโดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่ากระแสดีสชาร์จ (Discharge Current) จากขั้วดีสชาร์จและขั้วตกตะกอน



(ก) ไดอะแกรมของอุปกรณ์การวัดทดสอบ



(ข) ลักษณะโครงสร้างตัวตกตะกอนสำหรับวัดทดสอบ

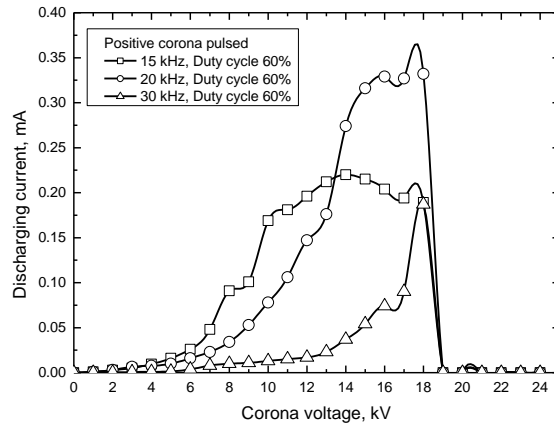
ภาพที่ 7 วงจรทดสอบและโครงสร้างตัวตกตะกอนแบบเพลต

ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดีสชาร์จที่ขั้วดีสชาร์จของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานมีขนาดรวมเป็นขั้วดีสชาร์จ จะถูกวัดโดยตรงด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลผ่านขั้วตกตะกอน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วดีสชาร์จต่อการเกิดโคโรนาดีสชาร์จภายในตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลต

ขนานจำนวน 6 คู่ โดยกำหนดให้ขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก (Outer Electrode) มีความยาว 320 มิลลิเมตร และขั้วอิเล็กโทรดด้านใน (Inner Electrode) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.38 มิลลิเมตร โดยขั้วดีสชาร์จและขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกจะถูกแยกจากกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ด้วยฉนวน ดังแสดงรูปที่ 7 (ข) สำหรับอุปกรณ์และไดอะแกรมการทดสอบ

ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วดิสชาร์จในช่วง 0 ถึง 24 กิโลโวลต์ เพื่อสร้างโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) เพื่อ

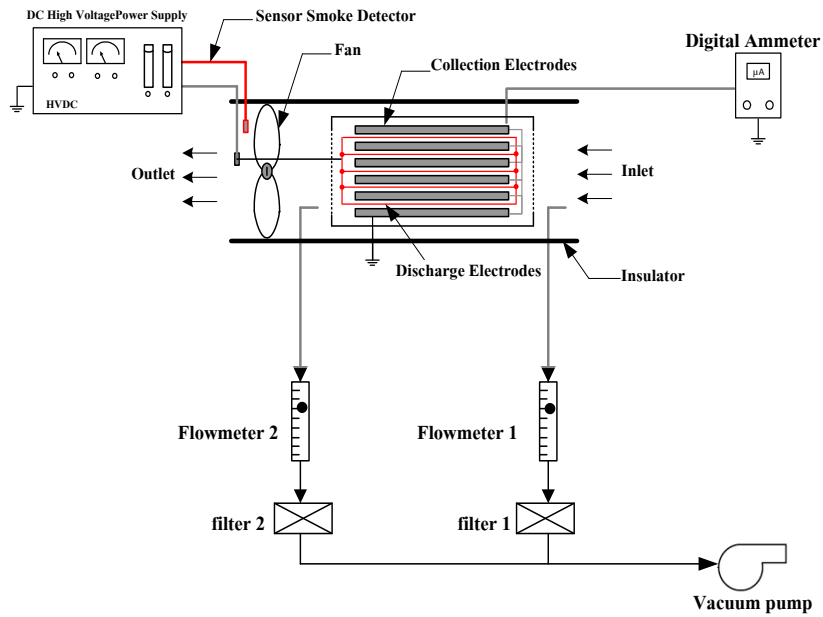
หาตำแหน่งของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่รอบทำงาน 60 เปอร์เซ็นต์ ในความถี่ 15, 20 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

ผลการทดสอบเบื้องต้นวัดค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอน เท่ากับ 2.0 เซนติเมตร ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 24 กิโลโวลต์ ด้วยมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลผ่านขั้วตกตะกอนของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ พบว่าค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จที่ได้อยู่ในช่วง 0.026 ถึง 0.332 มิลลิแอมป์ เมื่อพิจารณาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ สำหรับนำมาใช้งาน พบว่าค่ากระแสดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันอินพุตที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่ 15,

20 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จเท่ากับ 0.169 มิลลิแอมป์ 0.078 มิลลิแอมป์ และ 0.013 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ ซึ่งที่รอบการทำงาน 60 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ค่ากระแสโคโรนาดิสชาร์จที่สูงกับเครื่องต้นแบบมากที่สุด ผลจากการทดสอบสามารถนำมาใช้กำหนดการทำงานของโปรแกรมตามเงื่อนไขการทำงานของความถี่ทั้งสามได้ เพื่อให้ทำงานสัมพันธ์กับควันทงด้านขาออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 9 ไดอะแกรมและอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอน

การทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคควัน

ในการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคควันจากรูปแสดงในรูปที่ 9 ประกอบด้วยเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดจากเตาเผาขยะเซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 10 กิโลโวลต์ ตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 19×20×32 เซนติเมตร พัดลมดูดอากาศ มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ชุดปรับและวัดอัตราการไหล แผ่นกรองฝุ่นละอองขนาดอนุภาคและปั๊มสุญญากาศ ขั้นตอนทดสอบจะทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 ไว้ที่ทางขาออกของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนาน มีพัดลมดูดอากาศติดตั้งทางขาออกเพื่อดูควันรูปออกมาด้วยความเร็วอย่างสม่ำเสมอ มีมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 วัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จเพื่อตรวจเช็คการเบรคดาวระหว่างการทดสอบ เริ่มทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้กับขั้วดีสชาร์จที่มีขนาดขนาด 10 กิโลโวลต์ และต่อกราวด์ให้กับแผ่นเพลตที่ทำหน้าที่เป็น

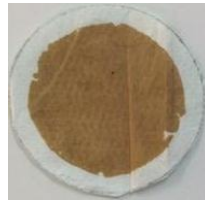
ส่วนเก็บอนุภาคควันจากนั้นนำควันที่ได้จากควันรูปจำนวน 20 ก้าน เข้าสู่ตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนาน และจึงเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้กับระบบ ตรวจเช็คระบบว่ามีจุดรั่วไหลของควันหรือเกิดการเบรคดาวในระบบ หากพบต้องปรับแก้ไขให้เรียบร้อยก่อนเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงทำการสุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ซึ่งมีการทดสอบเก็บตัวอย่างซ้ำจำนวน 4 ครั้ง บริเวณทางเข้าและทางออกของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานด้วยวิธีการกรองอนุภาคจากแผ่นกรองฝุ่นละอองขนาดเฉลี่ย 3 ไมครอน โดยมีปั๊มสุญญากาศดูดอนุภาควินผ่านชุดปรับและวัดอัตราการไหล เข้าสู่แผ่นกรองฝุ่นละออง ซึ่งในขณะทำการทดสอบจะจดบันทึกผลของกระแสโคโรนาดีสชาร์จผ่านมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล True RMS Multimeter ของ Fluke โมเดล 289 ซึ่งพบว่าจะมีการทำงานสัมพันธ์กับการตรวจจับควันขาออกที่เซนเซอร์ทำการตรวจจับและนำไปประมวลผลเพื่อปรับความถี่ใช้งาน จากนั้นจึงนำตัวอย่างอนุภาคควันไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนและทำการบันทึกผลการทดสอบสำหรับนำมาวิเคราะห์

ตารางที่ 2 น้ำหนักอนุภาคก่อนและหลังผ่านเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิด

เวลาใช้ ทดสอบ	น้ำหนักแผ่นกรอง (มิลลิกรัม)						ประสิทธิภาพการ ตกตะกอนทั้งหมด $\eta_{overall}$ (%)
	แผ่น	ก่อนเข้า	มวลอนุภาค	แผ่น	หลังผ่าน	มวลอนุภาค	
	เปล่า	เข้า(C_{inlet})	เข้า(C_{inlet})	เปล่า	ออก(C_{outlet})	ออก(C_{outlet})	
15 นาที	47.8	56.1	8.3	45.2	46.4	1.2	85.5
30 นาที	49.7	64.5	14.8	47.2	49.8	2.6	82.4
45 นาที	47.9	64.4	16.5	47.5	50.7	3.2	80.6
60 นาที	47.2	67.0	19.8	45.9	49.8	3.9	80.3
ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคเฉลี่ย (Average)							82.2

ผลการชั่งน้ำหนักตัวอย่างอนุภาคก่อนและหลังผ่านเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิด แสดงในตารางที่ 2 โดยนำสมการที่ (9) มาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมด พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนที่เวลาทดสอบ 15, 30, 45 และ 60 นาที เท่ากับ 85.5, 82.4, 80.6 และ 80.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนเฉลี่ย 82.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลอนุภาคที่แผ่นกรองก่อนผ่านมีตะกอนสะสมมากกว่าหลังผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 10 กิโลโวลต์ และแผ่นกรองก่อนผ่านจะมีการสะสมตะกอนควันธูปมากกว่าแผ่นกรองหลังผ่านการทำงานของตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 19 × 20 × 32 เซนติเมตร ดังแสดงรูปที่ 10

เนื่องจากอนุภาคควันได้ถูกอัดประจุให้เป็นประจุบวก ในบริเวณช่องว่างระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอนขนาด 2.0 เซนติเมตร ที่ถูกสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มข้นสูงจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และอนุภาคควันจะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บแบบแผ่นเพลตขนาน (Collection electrodes) ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ และเกาะติดอยู่กับขั้วเก็บแบบแผ่นเพลตขนานความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาขั้วเก็บนี้ เรียกว่า Migration velocity ซึ่งขึ้นกับแรงไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาค และแรงลาก (Drag force) ที่เกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังขั้วเก็บนอก จากนี้เมื่ออนุภาคเกาะติดกับขั้วเก็บแบบแผ่นเพลตขนานแล้วจะค่อยๆ ถ่ายเทประจุบวกสู่ขั้วเก็บ ทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคกับขั้วเก็บลดลง

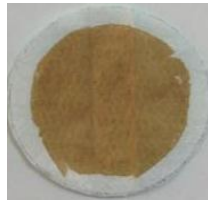


15 นาที



(ก) ก่อนผ่านตัวตตะกอน

(ข) หลังผ่านตัวตตะกอน

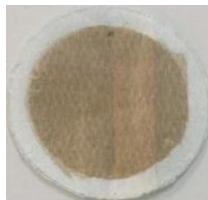


30 นาที



(ก) ก่อนผ่านตัวตตะกอน

(ข) หลังผ่านตัวตตะกอน

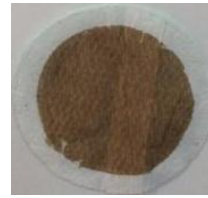


45 นาที



(ก) ก่อนผ่านตัวตตะกอน

(ข) หลังผ่านตัวตตะกอน



60 นาที



(ก) ก่อนผ่านตัวตตะกอน

(ข) หลังผ่านตัวตตะกอน

ภาพที่ 10 ตัวอย่างอนุภาคควินบนแผ่นกรองจากการสุ่มเก็บ

และยังพบว่าเครื่องต้นแบบตรวจจับควินแบบวงปิดสามารถทำงานสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ดี มีการตรวจจับควินขาออกและส่งไปที่ Arduino R3 และประมวลผลปรับแรงดันให้เหมาะสมกับควินขาออกได้ดี

วิจารณ์และสรุปผล

ในบทความนี้ได้นำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับควินแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะโดยใช้หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด 10 กิโลโวลต์

ใช้งานกับตัวตตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง × ยาว × สูง) เท่ากับ 19 × 20 × 32 เซนติเมตร มีลวดเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.38 มิลลิเมตร จากการทดสอบความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันเอาต์พุต พบว่าที่รอบทำงาน 60 เฮอร์เซ็นต์เป็นจุดทำงานที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่ไม่ทำให้อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตกำลังเกิดความร้อน และสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 10 กิโลโวลต์ อย่างต่อเนื่องและทดสอบที่ความถี่ 15, 20 และ 30 กิโลเฮิรตซ์ มีค่า

แรงดันไฟฟ้า V_{pp} เท่ากับ 18.8, 16.8 และ 15.6 กิโลโวลต์ ตามลำดับ สำหรับการทดสอบวัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอนขนาด 2.0 เซนติเมตรกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 ถึง 24 กิโลโวลต์ พบว่าค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.026 ถึง 0.332 มิลลิแอมป์ และได้ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาคควันจากควันรูปเบื้องต้น พบว่าผลเฉลี่ยของอนุภาคควันลดลงได้ 82.2 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าระบบตรวจจับควันแบบวงปิดสามารถทำงานสัมพันธ์กันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงได้ดี ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบในสภาวะที่ควันน้อยระบบจะทำงานจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงน้อย และหากเซนเซอร์ตรวจจับควันมีปริมาณมากระบบจะส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับตัวตกตะกอนมากขึ้นตาม

ในการวิจัยต่อไปคณะผู้วิจัยจะได้ศึกษาผลกระทบตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ให้เหมาะสมเพื่อปรับแก้ไขและศึกษาวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ของเครื่องตรวจจับควันแบบวงปิดต้นแบบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 10 กิโลโวลต์ เพื่อจะวิเคราะห์ถึงพลังงานที่ใช้ไปต่อชั่วโมงการทำงานเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ออกแบบตัวตกตะกอนและการปรับปรุงแก้ไขให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นได้ และสามารถนำไปใช้งานในการทดสอบกับเตาเผาขยะไร้ควันสำหรับสำนักงานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน ชื่อทุน HRS (Hands-on Researcher (Small)) รหัสทุน 58-HRS1-246 งบประมาณปี พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาพื้นที่ดอยสะเก็ด

เอกสารอ้างอิง

- พานิช อินต๊ะ และ ญัฐวุฒิ ดุษฎี. (2550). การทำนายประสิทธิภาพการตกตะกอนรวมของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสาย-แผ่นสำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นจากเตาเผาชีวมวล. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21**. 17-19 ตุลาคม 2550. จังหวัดชลบุรี.
- พานิช อินต๊ะ. (2548). เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการควบคุมมลภาวะทางอากาศจากอุตสาหกรรม. **วารสารTechnic Magazine**. ปีที่ 22 (ฉบับที่252), 109-122.
- พานิช อินต๊ะ.(2553). **ระบบทางไฟฟ้าสถิตเพื่ออากาศสะอาด**. โครงการเครือข่าย สวทช. ภาคเหนือ.
- มงคล รายนาค. (2553). หมอกควันและมลพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.).
- รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี2557**. (2558). กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- วิสูตร อาสนวิจิตร, วรจักร เมื่องใจ และพานิช อินต๊ะ. (2558). การพัฒนาระบบตรวจสอบควันแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควันสำนักงานโดยใช้หลักการ ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแรงสูง. ใน **การประชุมวิชาการระดับชาติ**. พะเยาวิจัย. ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยพะเยา. หอประชุมพญาเมือง. จังหวัดพะเยา.
- วิสูตร อาสนวิจิตร, วสันต์ จาปา, นาวัน พรหมสิกร, และกิตติศักดิ์ ศรีสวัสดิ์. (2557). การพัฒนาเครื่องสำหรับดักจับกลุ่มควันจากการประกอบอาหารโดยหลักการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต. ใน **การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 6 (6th RMUTNC) เทคโนโลยีและนวัตกรรมสู่อาเซียน**. จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิศูนย์หันตรา.

- วิสูตร อาสนวิจิตร, สุทธิชัย เปรมฤดีปริญญา, อาทิตย์ ยาวุทธิ และพานิช อินต๊ะ. (2554). ลักษณะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบพัลส์โคโรนาบวก. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9. จังหวัดภูเก็ต.
- อุษณีย์ วิณิชเขตคานวณ อีระ ชิโวนรินทร์ และณรงค์ พันธุ์ นุรัมย์. (2550). การทำลายดีเอ็นเอของเซลล์ถูกขจัดจากการออกซิไดส์ด้วยสารสกัดจากฝุ่นขนาดเล็ก PM 2.5 และ PM 10 ในอากาศเชียงใหม่และลำพูน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- A. Jaworek, A. Krupa and T. Czech. (2007). Modern Electrostatic Devices and Methods for Exhaust Gas Cleaning: A Brief Review. **Journal of Electrostatics**. (Vol.65). 133–135.
- A. Mizuno. (2000). Electrostatic Precipitation. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**. (Vol.7, No.5). 615–624.
- Chang, J., Kelly, A.J., and Crowley, J.M. (1995). **Handbook of Electrostatic Processes**. Marcel Dekker. Inc. New York. USA.
- Engineering 360 Powered by IEEE
GlobalSpec: http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/electrostatic_precipitators.
- Haslerm P. and Nussbaumer, T.H. (1999). Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. **Biomass & Bioenergy**. (Vol. 16). 385-395.
- John, G., Martin, F. and George, C. (1991). **Principles of Power Electronics**. Massachusetts Institute of Technology. Addison-Wesley Publishing Company. Inc.
- McLean, K.J. (1988). Electrostatic precipitators. **Physical Science. Measurement and Instrumentation. Management and Education – Reviews. IEE Proceedings A**. (Vol. 135, No. 6). 347-361.
- Melcher, J.R., Sachar, K.S. and Warren, E.P. (1977). Overview of electrostatic devices for control of submicrometer particles. **Proceedings of the IEEE**. (Vol. 65, No. 12). 1659- 1669.
- Parker, K.R. (1997). **Applied Electrostatic Precipitation**. Blackie Academic & Professional. New York.
- White, H.J. (1963). **Industrial Electrostatic Precipitation**. Addison-Wesley. Reading. Massachusetts.

การพัฒนาเครื่องวัดบันทึก และแสดงผลข้อมูลภูมิอากาศที่ทำงานผ่านระบบสื่อสารไร้สายซิกบี

A Weather Condition Data Logging and Monitoring via Zigbee Wireless

เกรียงไกร รุกคำ¹, กิตติพันธ์ คำเรือน² และ นพพร พัชรประทีติ^{3*}
Kriangkrai Rukkhom¹, Kittiphan Khamruean² and Nopporn Patcharaprakiti^{3*}

^{1,2,3} สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

*Corresponding author E-mail: pnopporn@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องวัดบันทึกและแสดงผลข้อมูลภูมิอากาศที่ทำงานผ่านระบบสื่อสารไร้สายซิกบี และระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ เพื่อที่จะใช้ในการตรวจวัดสภาวะภูมิอากาศ ฝ้าติดตามสภาพอากาศในปัจจุบันและเก็บข้อมูลสถิติไว้ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและเกษตรกรรม โดยเครื่องบันทึกและแสดงผลข้อมูลประกอบด้วยเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์ ตรวจจับน้ำฝน ซึ่งจะแปลงข้อมูลเป็นค่าสัญญาณทางไฟฟ้าและส่งข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าผ่านระบบเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE Zigbee 802.15.4 และเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ในการบันทึกข้อมูลลงแผ่นบันทึกหน่วยความจำ และส่งผ่านข้อมูลไปยังระบบแสดงผลทางคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือพกพาที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Android สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานจะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 20 วัตต์ และแบตเตอรี่สำรองพลังงานขนาด 12 โวลต์ 7.6 Ah เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดสอบข้อมูลพบว่า มีความถูกต้องแม่นยำ และมีความผิดพลาดอยู่ในระดับไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งระบบนี้จะสามารถทำงานตรวจวัดและเก็บข้อมูลสภาวะอากาศได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร

คำสำคัญ: ระบบ Android, เครือข่ายไร้สาย, เครื่องวัดบันทึกและแสดงผลข้อมูลภูมิอากาศ

Abstract

This paper presents the development of weather condition data measurement, data recording and monitoring via the ZigBee wireless standard and Android system. In order to measure the climate information, it is collected and used in research on energy statistics, including the monitoring current weather by networking IEEE Zigbee 802.15.4 wireless standard for data transmission. This system can work both inside and outside of the building with consuming less energy. Considering the results of measurement, one found that the accuracy of data logging has more than 95%. Moreover, the monitoring system can display information through computers and mobile phone with Android system.

Keywords: Android System, Wireless Network, Measure record and display weather data

บทนำ

ปัจจุบันในประเทศไทยเริ่มมีการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพอากาศแบบอัตโนมัติเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะเก็บข้อมูลของสภาพอากาศในปัจจุบันเช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฝน และลม ฯลฯ เพื่อที่จะนำข้อมูลมาใช้ในการพยากรณ์สภาพอากาศในอนาคต หรือเพื่อการแจ้งเตือนทางภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น แผ่นดินไหว น้ำท่วม ไฟป่า เป็นต้น และนอกจากนี้แล้วยังสามารถนำข้อมูลที่เก็บได้มาช่วยในการเลือกพื้นที่ก่อสร้างติดตั้งเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน ไม่ว่าจะเป็นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมโดยเฉพาะ

ข้อมูลของความเข้มแสงของดวงอาทิตย์และความแรงของลมจำเป็นอย่างมากที่ต้องนำมาประมวลผลการมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าว่ามีมากน้อยแค่ไหน (ไชยยันต์ บุญมี และคณะ, 2558) และนอกจากนี้แล้วยังมีการนำสถานีตรวจวัดอากาศไปใช้ในด้าน การเกษตรเช่น งานฟาร์มและเกษตรกรรมอย่าง กว้างขวางและแปลง เกษตรชนิดอื่นๆ รวมทั้งในสถานีวิจัยการเกษตร [1,4] ในสถานีตรวจวัดอากาศในปัจจุบันโดยทั่วไปมี 2 ลักษณะ คือ แบบมีสาย และแบบไร้สาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสถานที่ติดตั้งในโครงการ (ไชยยันต์ บุญมี และคณะ, 2558)

ในสถานีตรวจวัดอากาศที่มีในปัจจุบันค่อนข้างมีราคาแพงและอุปกรณ์บางชิ้นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ในบทความนี้ทำเครื่องวัดบันทึกและแสดงผลข้อมูลภูมิอากาศที่ทำงานผ่านระบบสื่อสารไร้สายซิกบี ซึ่งมีต้นทุนที่ถูกกว่าที่มีใช้ในปัจจุบัน โดยทางผู้จัดทำได้นำโซล่าเซลล์ขนาด 20 W และแบตเตอรี่ขนาด 12 V 7.6 AH มาเป็นพลังงานจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆที่ทำการตรวจวัด และได้นำโมดูล Zigbee มาเป็นโมดูลรับส่งข้อมูลแบบไร้สายเพื่อเพิ่มความสะดวกในการติดตั้งและสามารถเคลื่อนย้ายเสาตรวจอากาศไปตรวจวัดที่ตำแหน่งใดๆก็ได้ในระยะที่รับส่งข้อมูลได้ และก็นำบอร์ด Arduino UNO R3 มา

เป็นตัวหลักในการควบคุมทำงานต่างๆ ซึ่งมีราคาถูกและยังรองรับเซ็นเซอร์ได้หลากหลาย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเครื่องวัดบันทึกและแสดงผลข้อมูลภูมิอากาศ ด้วยบอร์ด Arduino UNO R3
2. เพื่อทดสอบการรับส่งข้อมูลไร้สายมาตรฐาน Zigbee และระบบปฏิบัติการ Android
3. เพื่อเปรียบเทียบเครื่องวัดอัจฉริยะและเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย เซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าสภาวะอากาศ มาตรฐานการรับส่งข้อมูล Zigbee บอร์ดบันทึกและเก็บข้อมูล Arduino และระบบแสดงผลขึ้นฐานข้อมูล Thinkspeak

เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิความชื้น ได้เลือกใช้ DHT22 ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ -40-80 องศาเซลเซียส และสามารถวัดความชื้นได้ 0-100 %
2. เซ็นเซอร์วัดความเร็วลม ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดลมแบบ 3 ถ้วย Wind speed sensor voltage signal 0-5 V สามารถวัดได้ 0-30 m/s
3. เซ็นเซอร์ตรวจจับน้ำฝน ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับน้ำฝน ที่ใช้สัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตออกมา 0-1023
4. เซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง ได้เลือกใช้ BH1750 ซึ่งสามารถวัดแสงได้ 0-54612 lux และสามารถแปลงเป็นค่า W/m^2 ได้มาใช้ในการทดลอง



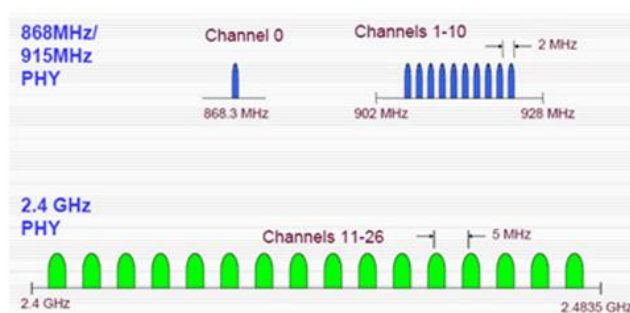
ภาพที่ 1 เซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าสภาวะภูมิอากาศ

มาตรฐาน ZigBee (IEEE 802.15.4)

ZigBee เป็นมาตรฐานสากลอยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เป็นมาตรฐานการสื่อสารแบบไร้สายที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลหลายระดับ ใช้พลังงานต่ำ ราคาถูก จุดประสงค์เพื่อให้สามารถสร้างระบบที่เรียกว่า Wireless Sensor Network ได้ ซึ่งระบบนี้จะสามารถทำงานในร่ม กลางแจ้ง ทนแดด ทนฝน และใช้พลังงานเพียงเล็กน้อย เหมาะสำหรับงานเฝ้าติดตามต่าง ๆ (สถาปัตยกรรม กิลาโซ, 2553)

Zigbee กำหนด ย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานไว้ 3 ย่านความถี่ คือ

1. ย่านความถี่ 2.4 Ghz มี 16 ช่องสัญญาณ อัตราการรับส่งข้อมูล 250 Kbps
2. ย่านความถี่ 915 Ghz มี 10 ช่องสัญญาณ อัตราการรับส่งข้อมูล 40 Kbps
3. ย่านความถี่ 868 Ghz มี 1 ช่องสัญญาณ อัตราการรับส่งข้อมูล 20 Kbps



ภาพที่ 2 ย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐาน (สถาปัตยกรรม กิลาโซ, 2553)

โพรโทคอล ZigBee ถูกออกแบบมาเฉพาะในส่วนของ Application layer, Application support layer และ Network layer เท่านั้นแต่ใช้ MAC layer และ Physical layer ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

โดยใช้ความถี่ 2.4 GHz มี 16 ช่องสัญญาณ อัตราการรับส่งข้อมูล 250 Kbps ซึ่งแบ่งชนิดอุปกรณ์ในเครือข่ายออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. FFD (Full Function Device) หมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ทุกอย่างในเครือข่าย

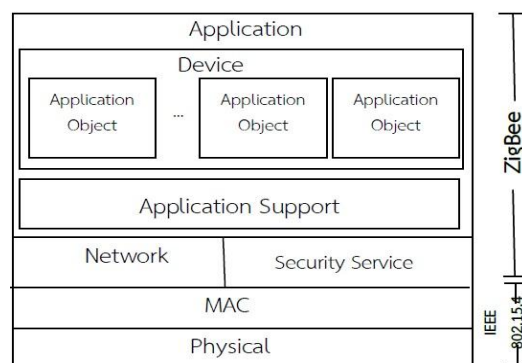
2. RFD (Reduce Function Device) หมายถึง อุปกรณ์ที่ถูกลดความสามารถการทำงานในเครือข่าย การแบ่งชนิดของอุปกรณ์ยังได้แบ่งตามลักษณะการทำงาน คือ

1. Coordinator เป็นอุปกรณ์ประเภท FFD ทำหน้าที่สร้างระบบเครือข่าย กำหนด Network Address ให้กับ device ที่อยู่ในระบบเครือข่ายไม่ให้ซ้ำกัน

2. End Device เป็นอุปกรณ์ปลายทาง สามารถเป็นอุปกรณ์ประเภท FFD หรือ RFD ก็ได้ ทำหน้าที่ตรวจสอบและควบคุมการทำงานต่าง ๆ

3. Router เป็นอุปกรณ์ประเภท FFD ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลในเส้นทางต่าง ๆ ของเครือข่าย ตรวจสอบและควบคุมการทำงานต่าง ๆ ได้เหมือนกับ End device อีกทั้งยังทำหน้าที่เพิ่มระยะให้กับระบบเครือข่าย และเพิ่มจำนวนของจุดเชื่อมต่อ

อุปกรณ์โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายซิกบี ได้นำชั้นกายภาพ (Physical layer) และชั้นควบคุมการเข้าถึง (MAC layer) ของ IEEE 802.15.4 ซึ่งเป็นมาตรฐานการกำหนดการสื่อสารไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area network: WPAN) มาทำงานในระดับชั้นที่ต่ำกว่า (2 ระดับชั้นล่างสุด) เช่น เรื่องของระดับกำลังสัญญาณ คุณภาพ การควบคุม ความปลอดภัย ฯลฯ แต่ในระดับชั้นถัดไปจะเป็นรูปแบบของ Zigbee Stack



ภาพที่ 3 รูปแบบของ ZigBee Stack (สถาปัตยกรรม, 2553)

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) คือ การใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์เล็กๆ จำนวนมากเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมที่น่าสนใจและประมวลผลข้อมูลเหล่านั้น (สถาปัตยกรรม, 2553)

1. กลุ่มส่วนประกอบหลัก

ก) เซ็นเซอร์ (sensor) ทำหน้าที่วัดค่าต่างๆ จากสภาพแวดล้อมตามแต่ชนิดของเซ็นเซอร์ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเข้มแสง คว้น ความเร่ง

แรงสั่นสะเทือน ความเคลื่อนไหว ความลึก ความเป็นกรดหรือด่าง เป็นต้น

ข) หน่วยรับ-ส่งข้อมูลไร้สาย (transceiver unit) ทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายในย่านความถี่อุตสาหกรรม (ISM band) เพื่อรับ-ส่งข้อมูลระหว่างหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ข้างเคียง

ค) หน่วยประมวลผล (processing unit) ติดต่อกับเซ็นเซอร์เพื่อสั่งงานหรือรับข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูล จัดเก็บลงในหน่วยความจำ รอกการร้องขอข้อมูลหรืออาจส่งข้อมูลทันทีผ่านทางหน่วยรับ-ส่งข้อมูลไร้สาย หน่วย

ประมวลผลกลางอาจรับข้อมูลจากระบบระบุตำแหน่ง เพื่อช่วยในการประมวลผลต่างๆ หรือหน่วยประมวลผลกลางอาจทำหน้าที่ควบคุม การเคลื่อนที่ของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ผ่านทางระบบเคลื่อนที่ นอกจากนี้หน่วยประมวลผลกลางยังทำหน้าที่ประมวลผลเครือข่ายและหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์

ง) แหล่งพลังงาน (power unit) เก็บสะสมพลังงานและให้พลังงานกับทุกส่วนประกอบบนหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ แหล่งพลังงานจะรับพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานหากหน่วยร่วมเซ็นเซอร์มีแหล่งกำเนิดพลังงาน

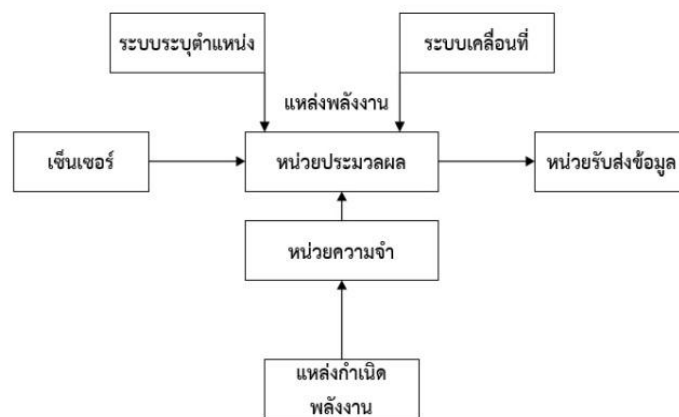
2. กลุ่มส่วนประกอบเพิ่มเติม

ก) ระบบระบุตำแหน่ง (positioning unit) เป็นหน่วยระบุตำแหน่งของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์โดยใช้ GPS

เพื่อนำข้อมูลตำแหน่งไปใช้ประมวลผล เช่น หาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูล หาตำแหน่งสำหรับการเคลื่อนที่ของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ เป็นต้น

ข) ระบบเคลื่อนที่ (mobilizing unit) ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายตำแหน่งของเซ็นเซอร์ เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น จัดรูปแบบโครงสร้างเครือข่าย ติดตามวัตถุเคลื่อนที่ที่สำคัญงานสื่อสาร เป็นต้น

ค) แหล่งกำเนิดพลังงาน(power generator unit) ทำหน้าที่กำเนิดพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานลม ความร้อน การสั่นสะเทือน เป็นต้น ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อเก็บสะสมและใช้ต่อไป เพื่อชดเชยพลังงานที่ถูกใช้ไป ทำให้ตัวเซ็นเซอร์ไร้สายทำงานได้เป็นเวลานาน (วณพันธ์ วิญูฒิ, 2555)



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของหน่วยร่วมเซ็นเซอร์ (วณพันธ์ วิญูฒิ, 2555)

ทฤษฎีสมองกลอัจฉริยะด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ระบบฝังตัว หรือ สมองกลฝังตัว เป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ฝังไว้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และเครื่องเล่นอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพื่อเพิ่มความฉลาด ความสามารถให้กับอุปกรณ์เหล่านั้นผ่านซอฟต์แวร์คำว่าระบบฝังตัว เกิดจากการที่ระบบนี้เป็นระบบประมวลผลเช่นเดียวกับระบบคอมพิวเตอร์ แต่

ว่าระบบนี้จะฝังตัวลงในอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ไม่ใช่เครื่องคอมพิวเตอร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Board) Arduino Uno R3 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Open-source บนแพลตฟอร์ม Arduino ของแท้จากผู้ผลิต arduino.cc ประเทศอิตาลี ออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ใช้ชิพ ATmega328 เป็นแบบ PDIP เมื่อมีการเสียบก็สามารถ

ถอดออก และเปลี่ยนใหม่ได้ มี Digital Input/Output 14 พอร์ต สามารถทำงานแบบ PWM (pulse width modulate) ทั้งหมด 6 พอร์ต มีส่วนแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter) ทั้งหมด 6 พอร์ต บนบอร์ดติดตั้งสัญญาณนาฬิกาภายนอก ความถี่ 16 MHz พร้อมด้วยพอร์ต USB และ หัวเสียบไฟเลี้ยงบอร์ด บนบอร์ดยัง

สามารถดาวน์โหลดโปรแกรมโดยตรงได้ โดยผ่านหัวเสียบ ICSP และยังมีปุ่ม Reset ให้บนบอร์ดอีกด้วย บนบอร์ดติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega16U เพื่อช่วยในการส่งข้อมูลแบบอนุกรมผ่านทาง USB (Usb to Serial Converter) การส่งผ่านข้อมูลสามารถทำได้รวดเร็ว(วณพันธ์ วิยวุฒิ, 2555)

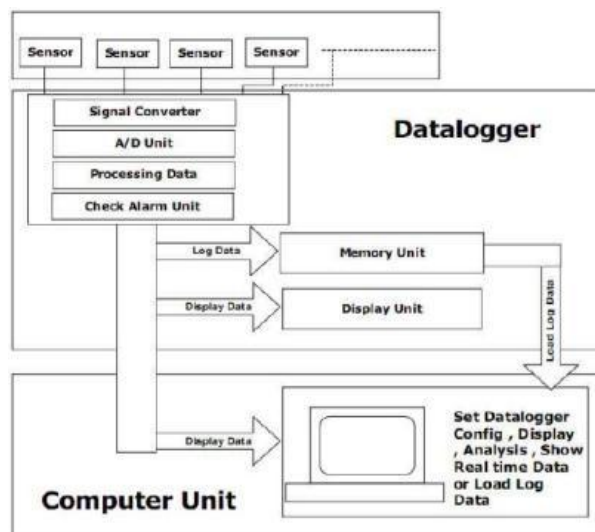


ภาพที่ 5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 (ศิริวรรณ เอี่ยมบัณฑิต, 2557)

เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)

Data logger คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลที่เป็นสัญญาณชนิดต่างๆ โดย Data Logger จะมี Memory สำหรับเก็บค่าที่วัดได้ของ

สัญญาณ ตามช่วงเวลาการบันทึกที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ และใช้คอมพิวเตอร์ในการเรียกอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ ของ Data Logger



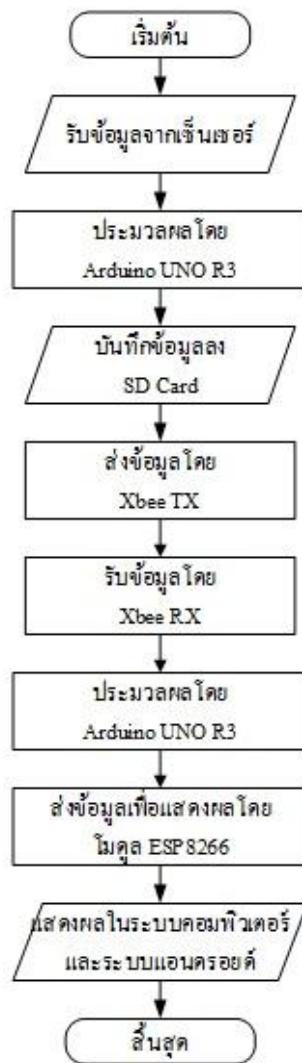
ภาพที่ 6 ฟังก์ชันการทำงานของ Data Logger (ธนากร แสงเรืองรอบ และคณะ , 2553)

จากรูปที่ 6 Data Logger จะรับค่าที่บันทึกจากตัว Sensor นำมาผ่าน Signal Converter เพื่อทำการแปลงสัญญาณที่รับมาให้เป็นสัญญาณที่ A/D ของ Data Logger สามารถนำมาใช้ในการแปลงให้เป็นข้อมูล Digital ได้ หลังจากนั้น Data Logger อาจนำ ข้อมูล Digital นั้นมาประมวลผล หรือนำ

ข้อมูลมาตรวจสอบเพื่อทำการส่งสัญญาณไปเตือนผู้ใช้ว่า ข้อมูล มีค่ามากไปหรือน้อยไปได้ แล้วจึงนำข้อมูลที่ไปเก็บบันทึกใน Memory ของ Data logger หรือบนหน้าจคอมพิวเตอร์ได้ (ธนากร แสงเรืองรอบ และคณะ , 2553)

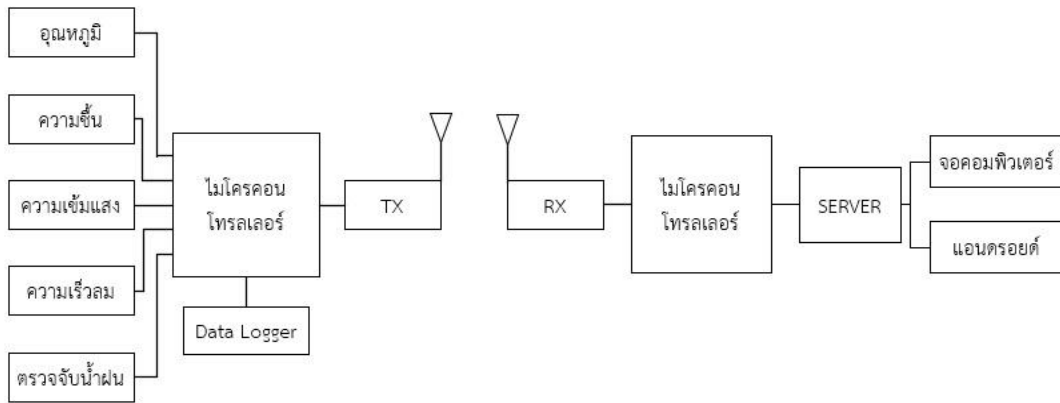
วิธีการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัย มีกระบวนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 7



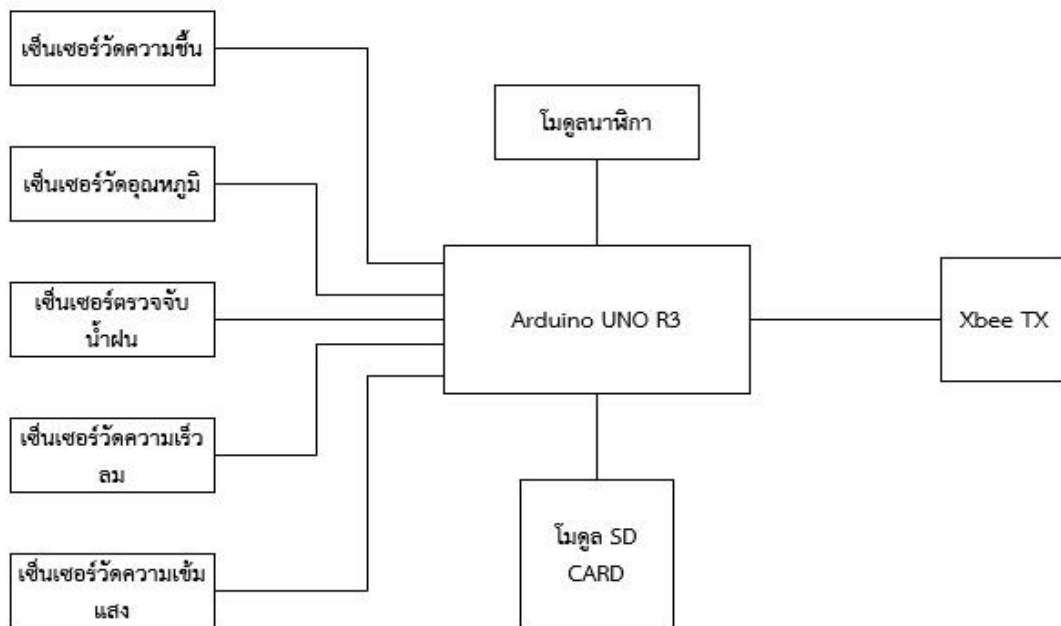
ภาพที่ 7 กระบวนการทำงาน

บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ



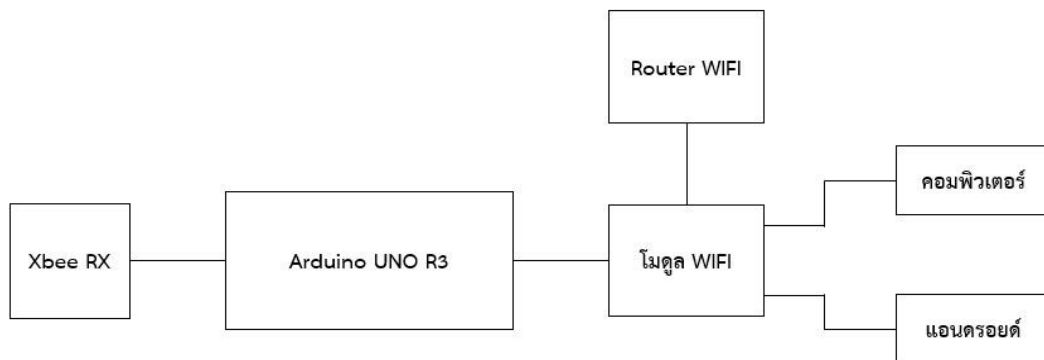
ภาพที่ 8 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ

ภาคส่ง



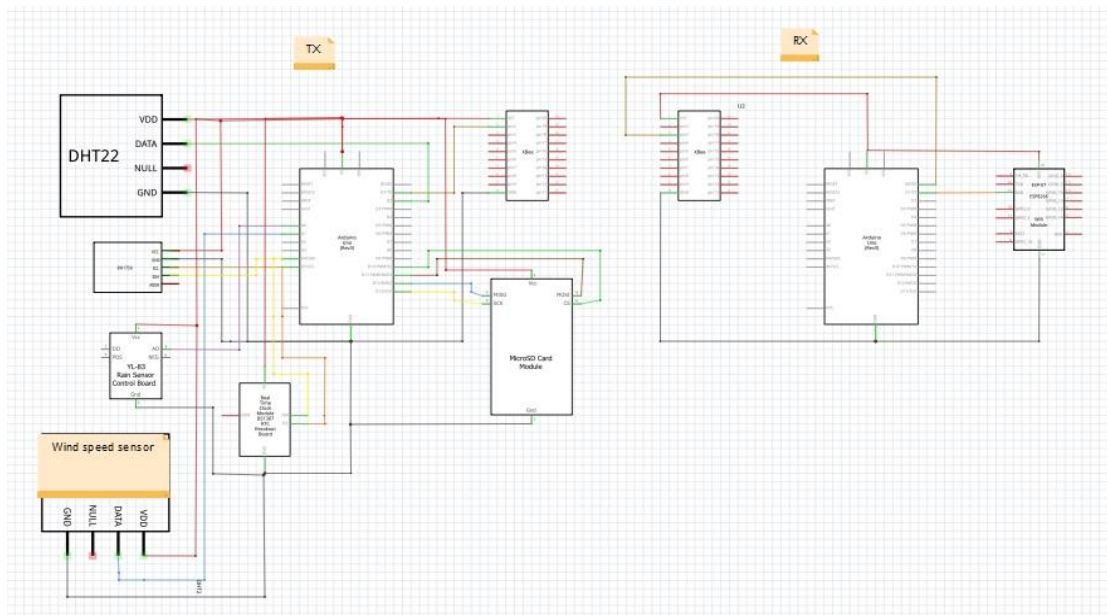
ภาพที่ 9 บล็อกไดอะแกรมภาคส่ง

ภาครับ



ภาพที่ 10 บล็อกไดอะแกรมภาครับ

Wiring Diagrams

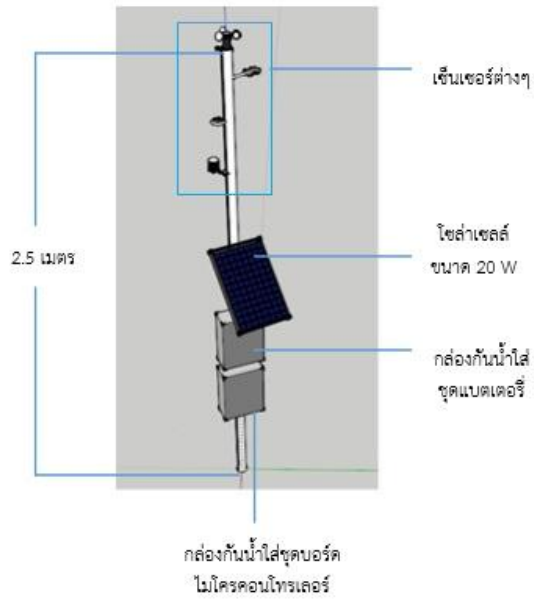


ภาพที่ 11 Wiring Diagrams

ในการทำงานของระบบนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือภาคส่งและภาครับ ภาคส่งจะมีเซ็นเซอร์อยู่ 5 ตัว จากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์มาเพื่อประมวลผลต่างๆและส่งไปบันทึกข้อมูลในส่วน Data Logger ใน SD Card จากนั้นก็ส่งไปยังโมดูลส่งข้อมูลไร้สาย Zigbee เพื่อที่จะส่งข้อมูลไปยังภาครับ

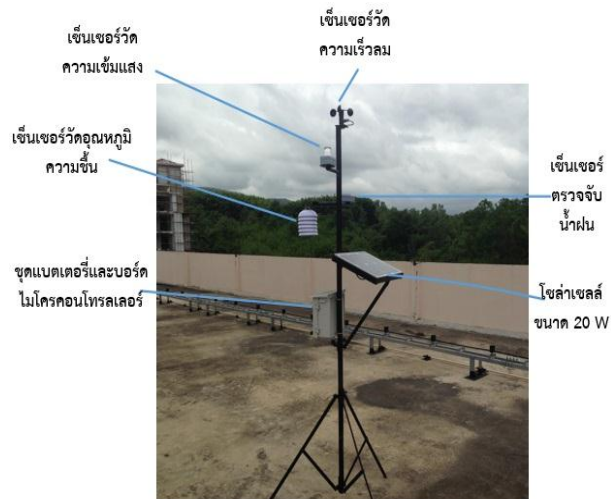
ภาครับเมื่อได้รับข้อมูลก็จะมาทำการประมวลผลในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะมิโมดูลไวไฟอีกหนึ่งตัวโดยที่โมดูลไวไฟจะรับสัญญาณ IP มาจากเราเตอร์เพื่อที่จะส่งข้อมูลเข้าไปยัง Database เพื่อที่จะแสดงข้อมูลในคอมพิวเตอร์และแสดงข้อมูลในมือถือได้

การทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ทดลองระยะในพื้นที่โล่งและทดลองเก็บข้อมูลจริง

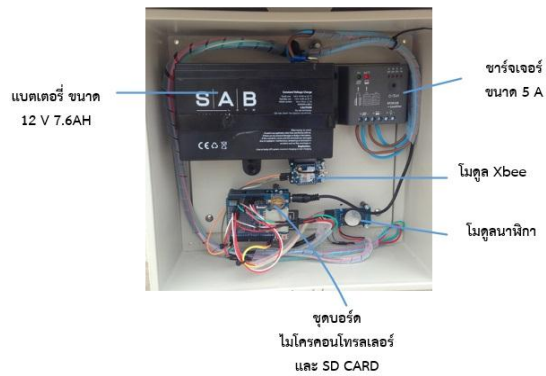


ภาพที่ 12 การออกแบบโครงสร้างของเสาตรวจวัดอากาศ

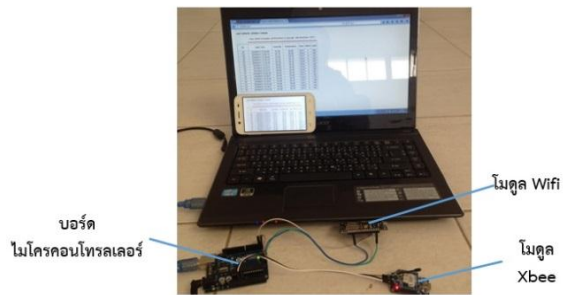
ผลการทดลองและอภิปราย



ภาพที่ 13 เสาตรวจอากาศที่สร้างขึ้นมา



ภาพที่ 14 อุปกรณ์ภายในตู้เสาส่งข้อมูล



ภาพที่ 15 ภาครับข้อมูลในการแสดงผล

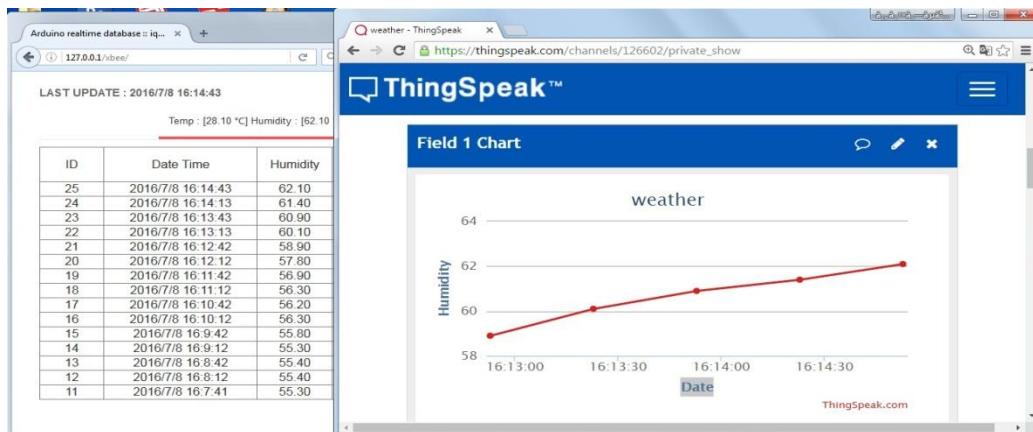
ตารางที่ 1 ผลการทดลองการรับส่งข้อมูลในพื้นที่โล่ง

ระยะทดลอง (เมตร)	การรับส่งข้อมูลไร้สาย
10	ได้
20	ได้
30	ได้
40	ได้
50	ได้
60	ได้
70	ได้
80	ได้
90	ได้
100	ได้
110	ได้
120	ได้
130	ไม่ได้
140	ไม่ได้

ในการทดลองเก็บข้อมูลจริงได้นำเสาตรวจอากาศไปไว้บนตาดฟ้า และทำการทดลองรับส่งข้อมูลภายในตึก ผลปรากฏว่าสามารถรับส่งข้อมูลได้ถึงชั้น 5 ของตึก

การแสดงผลในคอมพิวเตอร์

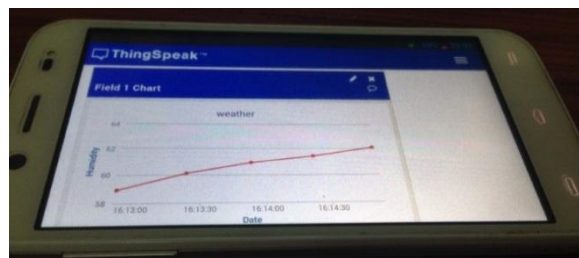
ในส่วนของการแสดงผลในระบบคอมพิวเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ แสดงแบบตารางโดยใช้โปรแกรม Appserv และแสดงแบบกราฟโดยใช้โปรแกรม ThingSpeak



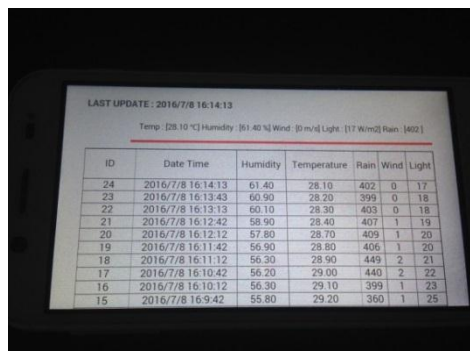
ภาพที่ 16 รูปแบบการแสดงผลในคอมพิวเตอร์

การแสดงผลในระบบแอนดรอยด์

ในส่วนของการแสดงผลในระบบแอนดรอยด์สามารถแสดงโดยแอปพลิเคชันหรือแสดงโดยโปรแกรม ThingSpeak



ภาพที่ 17 โปรแกรม ThingSpeak



ภาพที่ 18 แอปพลิเคชันที่สร้างขึ้น

ผลทดลองเทียบค่าผิดพลาด

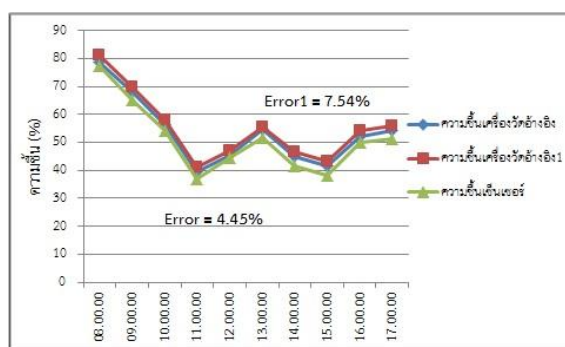
การหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ทำการทดลองเทียบค่าความผิดพลาดของ เครื่องวัดที่สร้างขึ้นและเครื่องวัดที่ใช้งานทั่วไป ทำการ ทดลองในวันที่ 8 กรกฎาคม 2559 โดยเทียบค่า ความชื้น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ความเร็วลม

$$\text{Error} = \frac{\text{ค่าเครื่องวัดอ้างอิง} - \text{ค่าเซ็นเซอร์}}{\text{ค่าเครื่องวัดอ้างอิง}} \times 100 \quad (1)$$

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของความชื้น

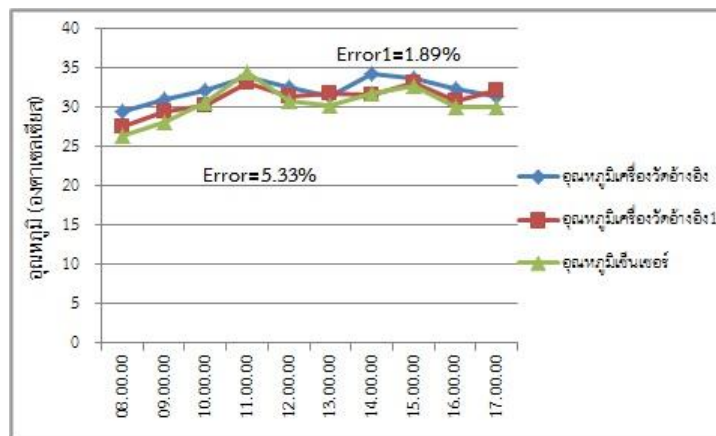
เวลา	ความชื้น เครื่องวัด อ้างอิง (%)	ความชื้น เครื่องวัด อ้างอิง1(%)	ความชื้น เซ็นเซอร์ (%)
08.00	78.5	81.1	77.3
09.00	68.1	69.8	65.2
10.00	56.4	58.2	54.4
11.00	39.6	41.3	37.1
12.00	45.2	47.2	44.6
13.00	54.6	55.6	51.9
14.00	44.8	46.8	41.7
15.00	41.7	43.1	38
16.00	52.3	54.3	50
17.00	54.1	55.8	51.3
% ความผิดพลาด	4.45	7.54	-



ภาพที่ 19 กราฟค่าความผิดพลาดความชื้นระหว่างเครื่องวัดอ้างอิงและเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 3 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของอุณหภูมิ

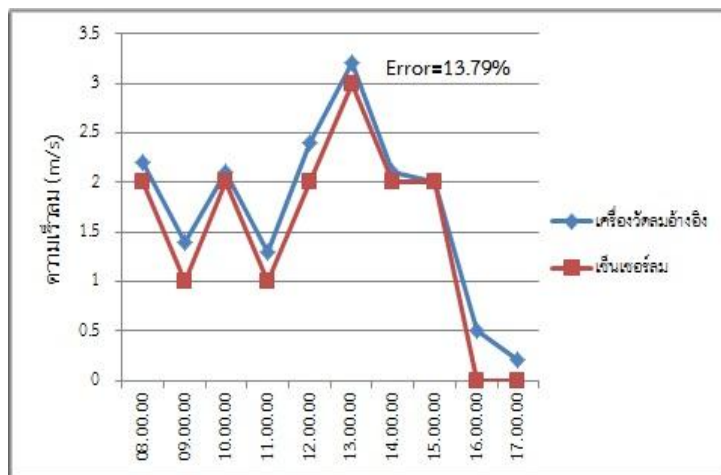
เวลา	อุณหภูมิ เครื่องวัด อ้างอิง (°C)	อุณหภูมิ เครื่องวัด อ้างอิง1(°C)	อุณหภูมิ เซ็นเซอร์ (°C)
08.00	29.5	27.6	26.4
09.00	31.1	29.5	28.2
10.00	32.2	30.2	30.7
11.00	34	33.2	34.4
12.00	32.6	31.4	30.9
13.00	31.5	31.8	30.2
14.00	34.2	31.6	31.8
15.00	33.8	33.1	32.8
16.00	32.4	30.9	30.1
17.00	31.4	32.1	30
% ความ ผิดพลาด	5.33	1.89	-



ภาพที่ 20 กราฟค่าความผิดพลาดอุณหภูมิระหว่างเครื่องวัดอ้างอิงและเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของความเร็วลม

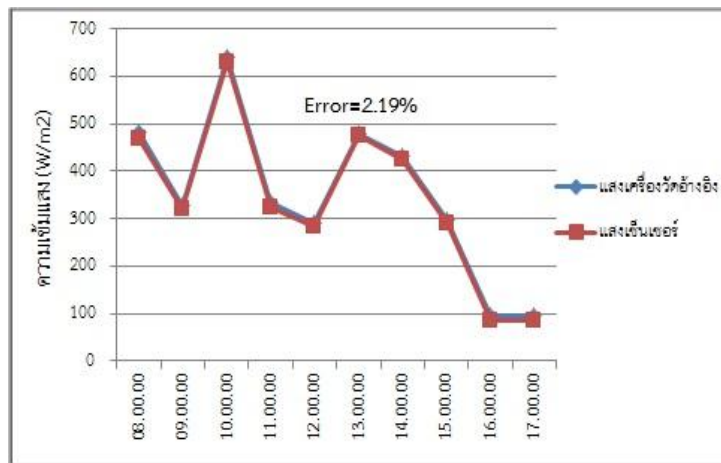
เวลา	เครื่องวัดลม อ้างอิง (m/s)	เซ็นเซอร์ลม (m/s)
08.00	2.2	2
09.00	1.4	1
10.00	2.1	2
11.00	1.3	1
12.00	2.4	2
13.00	3.2	3
14.00	2.1	2
15.00	2	2
16.00	0.05	0
17.00	0.2	0
% ความ ผิดพลาด	13.79	-



ภาพที่ 21 กราฟค่าความผิดพลาดความเร็วลมระหว่างเครื่องวัดอ้างอิงและเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 5 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของ ของความเข้มแสง

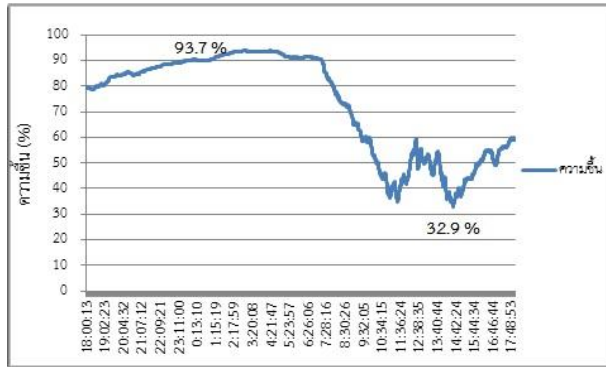
เวลา	เครื่องวัด แสงอ้างอิง (W/m ²)	เซ็นเซอร์ แสง(W/ m ²)
08.00	481	470
09.00	329	322
10.00	639	631
11.00	335	324
12.00	291	285
13.00	480	476
14.00	432	426
15.00	299	292
16.00	94	87
17.00	95	87
% ความ ผิดพลาด	2.19	-



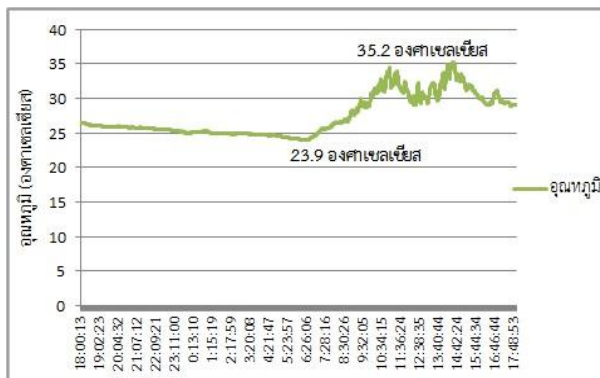
ภาพที่ 22 กราฟค่าความผิดพลาดความเข้มแสงระหว่างเครื่องวัดอ้างอิงและเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

ผลทดลองเก็บข้อมูล 24 ชั่วโมง

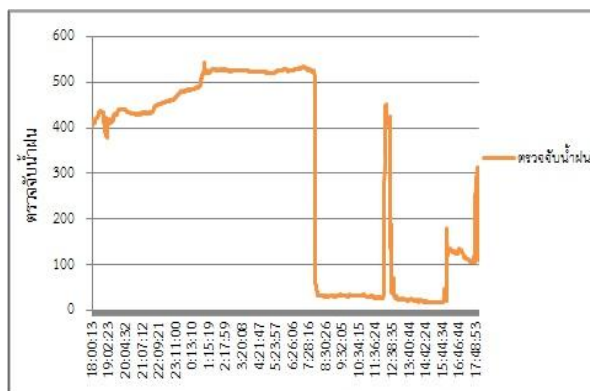
ทำการเก็บค่าทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เวลา 18.00 น. วันที่ 8/7/59 ถึงเวลา 18.00 น. วันที่ 9/7/59



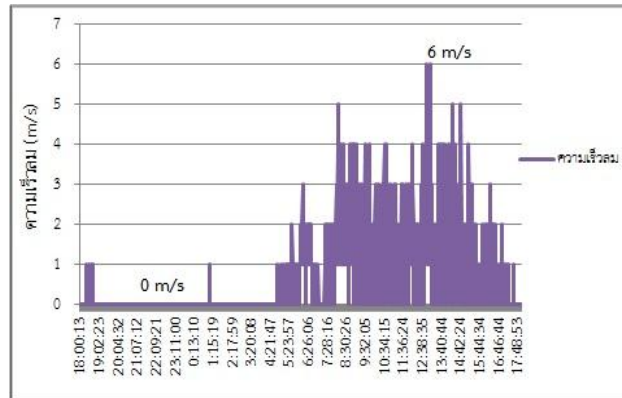
ภาพที่ 23 กราฟข้อมูลความชื้น 24 ชั่วโมง



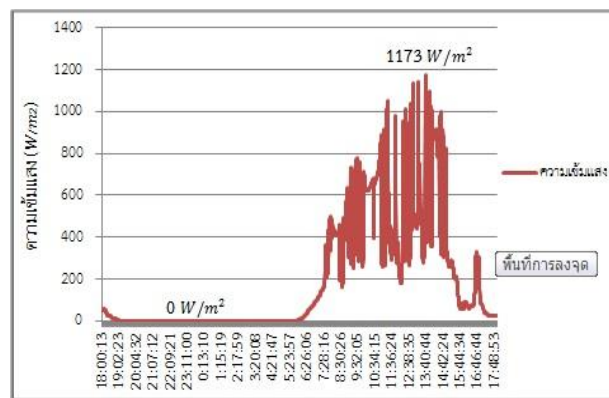
ภาพที่ 24 กราฟข้อมูลอุณหภูมิ 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 25 กราฟข้อมูลตรวจจับน้ำฝน 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 26 กราฟข้อมูลความเร็วลม 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 27 กราฟข้อมูลความเข้มแสง 24 ชั่วโมง

จากการทดลองเบื้องต้นเราได้ทำการเก็บข้อมูล 24 ชั่วโมง แล้วนำมาแสดงผลในรูปแบบกราฟในวันเวลาดังกล่าวจะเห็นผลได้ว่า ความชื้นจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 93.7% ในช่วงเวลาประมาณ 03.00 น. และมีค่าต่ำสุด 32.9% ในช่วงเวลาประมาณ 15.00 น. ค่าอุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 35.2 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาประมาณ 14.00 น. และมีค่าต่ำสุด 23.9 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาประมาณ 07.00 น. ค่าตรวจจับน้ำฝนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากวันที่ทำการทดลองมีฝนตกบางช่วง ค่าความเร็วลมจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 6 m/s ในช่วงเวลาประมาณ 13.00 น. และมีค่าต่ำสุด 0 m/s ค่าความเข้มแสงจะมีค่าสูงสุด

อยู่ที่ 1173 W/m² ในช่วงบ่าย และมีค่าต่ำสุด 0 W/m² ในช่วงเวลากลางคืนและเช้ามืด

สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นได้ว่าการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายใช้ได้จริงและเราใช้โมดูล Zigbee มาเป็นตัวรับส่งข้อมูลได้ไกลสุดในที่โล่ง 120 เมตร และเมื่อนำเสาตรวจอากาศขึ้นไปไว้บนตาดฟ้า การรับส่งข้อมูลได้ไกลสุดถึงชั้น 5 ของตึกอันเนื่องมาจากสิ่งกีดขวางของตัวตึกและสิ่งอื่นๆ ในส่วนการแสดงผลนั้นมีการแสดงแบบตารางโดยใช้โปรแกรม Appserv และแสดงแบบกราฟโดยใช้โปรแกรม ThingSpeak เราได้แสดงผลเป็น 2 ส่วน คือแสดงในระบบคอมพิวเตอร์

ในระบบคอมพิวเตอร์แสดงใน Database ที่สามารถเก็บข้อมูลได้และสามารถดูย้อนหลังได้และได้แสดงแบบ Real time ในทุกๆ 30 วินาที ส่วนการแสดงผลในระบบแอนดรอยด์มีการแสดงแบบ Real time ในการแสดงผลนั้นจะแสดงได้ในระยะ Wifi ที่ปล่อยสัญญาณมาเท่านั้น

จากผลการทดลองใช้เครื่องวัดเทียบอ้างอิงเห็นได้ว่าเสาตรวจอากาศที่สร้างขึ้นนั้นใช้ได้จริงมีค่าใกล้เคียงกันอาจจะมีความผิดพลาดเล็กน้อยเนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาเทียบอ้างอิงนั้นอาจจะเกิดจากการใช้งานอาจจะไม่ตรงกับเซ็นเซอร์ที่นำมาทดลองจึงทำให้มีค่าผิดพลาดอยู่บ้าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงรายที่ได้ให้ทุนอุดหนุนทำโครงการครั้งนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

ไชยยันต์ บุญมี และคณะ. (2558). การออกแบบสถานีวัดอากาศขนาดเล็กราคาประหยัดโดยใช้โปรแกรม Lab VIEW. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

เที่ยง เหมียดไธสง และคณะ. (2556). ระบบตรวจวัดสภาพแวดล้อมด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับพื้นที่เพาะปลูกมะนาว. โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.

ธนากร แสงเรืองรอบ และคณะ. (2553). เครื่องเก็บข้อมูลระยะไกลด้วยตัวรับรู้หลากหลาย. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วณพันธ์ ้วยวุฒิ. (2555). ระบบควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างผ่านเครือข่ายไร้สายอัตราต่ำ. สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

ศิริวรรณ เอี่ยมบัณฑิต. (2557). ระบบบ้านอัจฉริยะควบคุมด้วยเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายเซ็นเซอร์ และแอนดรอยด์แอปพลิเคชันภายใต้แนวคิดอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสิ่ง. สาขาวิชาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สถาปัตยกรรม กิลาส. (2553). ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อแสดงผลสภาพอากาศ. ปัญหาพิเศษ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Abdul Aziz, F.S., Sulaiman, S.I. and Zainuddin, H. (2013). A Prototype of an Integrated Pyranometer for Measuring Multi-Parameters. Malaysia.

Firdaus, Ahriman, Akbar, R. and Nugroho, E. (2014). Wireless Sensor Networks for Microclimate Telemonitoring using ZigBee and WiFi. Indonesia.

Kabir, S., Shorif, M. A. , Li, H. and Yu, Q. (2014). A Study of Secured Wireless Sensor Networks with Xbee and Arduino. Canada.

Manoj Kollam and S. R. Bhagya Shree Shree (2011). Zigbee Wireless Sensor Network for Better Interactive Industrial Automation. India.

Tsai Sung,W. , Ho Chen, J., Li Hsiao, C., and Syun Lin,J. (2014). Multi-Sensors Data Fusion Based on Arduino Board and XBee Module Technology. Taiwan.

ตู้อบแห้งพืชผลทางการเกษตรพลังงานผสมผสานหลอดอินฟราเรด

ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

An Agricultural Crops Drying Oven by Hybrid Infrared Heat and Solar Energy

กฤตวัฒน์ บุญคำ¹, ชาญวิทย์ วิวัฒน์ไพโรสน², ปกรณ์ เสรีเผ่าวงษ์³ และ นพพร พัชรประกิติ^{4*}

Kittawat Boonkum¹, Chanwit Wiwatpaison², Pakorn Sereepulvong³ and Nopporn Patcharaprakiti^{4*}

^{1,2,3,4} สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงราย

^{1,2,3,4} Count of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

* Corresponding author E-mail: kittawat@windowslive.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกระบวนการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพืชผลทางการเกษตรด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรด โดยออกแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรดไฟฟ้า ประกอบด้วยตู้อบชนิดโรงเรือนแสงอาทิตย์ผ่านโดยตรง และ ตู้อบชนิดอบด้วยลมร้อน จากแสงอาทิตย์ผ่านโดยตรงร่วมกับหลอดอินฟราเรดทำด้วยวัสดุโปร่งแสงเป็นการนำกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับหลอดอินฟราเรดเพื่อเป็นตัวช่วยเพิ่มความร้อนเมื่อฝนตกหรือแสงอาทิตย์อ่อน ตู้อบมีขนาดความกว้าง 1 เมตร ยาว 1.36 เมตร สูง 1.4 เมตร มีจำนวนชั้นวาง 5 ชั้น ชั้นละ 1 กิโลกรัม ในการอบหนึ่งครั้งสามารถอบได้ 5 กิโลกรัม ส่วนตู้อบชนิดอบด้วยลมร้อนเป็นเครื่องอบแห้งที่มีเครื่องช่วยให้อากาศเคลื่อนที่หมุนเวียนในทิศทางที่ต้องการ โดยพัดลมจะทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกให้เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์รับความร้อนจากแสงอาทิตย์และความร้อนจากอินฟราเรดมีการถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้เหลือตามต้องการ ตู้อบมีขนาด กว้าง 0.84 เมตร ยาว 0.56 เมตร สูง 0.74 เมตร จำนวนชั้นวาง 5 ชั้น ชั้นละ 1 กิโลกรัม ในการอบหนึ่งครั้งสามารถอบได้ 5 กิโลกรัม การทำงานส่วนของไฟฟ้าหลอดอินฟราเรด คือควบคุมระดับอุณหภูมิของตู้อบโดยมี ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมในการเพิ่มความร้อนและควบคุมมอเตอร์พัดลมในการระบายความชื้นในตู้อบเพื่อให้อัตราการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, หลอดอินฟราเรด, การอบแห้ง

Abstract

This paper proposes a dryers crops oven by solar energy with electricity Develop processes for easy transport and preserved for longer By design dryers that use solar energy in combination with heat from the electric beater Greenhouse solar oven consists of a direct-type oven baked bot air Through direct solar oven type with infrared heater is made of a translucent material is the electricity supplied to the infrared to help heat when the rain or sun Incubators width 1 m long, 1.36 m high, 1.4 m with five floors of shelves per 1 kg in the oven once you have a 5 kg. The type of baking oven with hot air dryers with air to allow air circulation moving in the desired direction The fan draws air from the outside to be served to mobile devices via solar thermal and heat from the infrared heat to the air The air moving through the product used in drying to reduce moisture content to rest as needed. Incubators are 0,84 m long, 0,56 m wide and 0,74 m with a total of 5 sheives of 1 kg class. operation of electric inliaved heater is controlled by the temperature of the oven. The microcontroller controls the heat and fan motor to drain the moisture in the oven so that the drying efficiency.

Keywords: Solar energy, infrared heater, Drying

บทนำ

ปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ในประเทศไทยต้องประสบปัญหาต่างๆหลายด้าน เช่น ผลผลิตได้รับความเสียหายเนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศไม่เอื้ออำนวย ปัญหาด้านโรค และแมลงรบกวน จึงมีการทำผลผลิตทางการเกษตรให้แห้ง เกษตรกรจะใช้วิธีตากแห้ง และผึ่งลม แต่บางครั้งสภาพอากาศมีความชื้นสูง หรือในฤดูฝน การตากแดด และผึ่งลมจะทำได้ไม่ได้นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความไม่สะอาด เนื่องจากฝุ่นละอองในขณะตาก การรบกวนจากสัตว์ และความไม่แน่นอนของแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะในฤดูฝน (จารุวัฒน์ เจริญจิต, 2012) จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งหลายรูปแบบเพื่อลดความชื้นของผลผลิตต่างๆ อาทิ ตู้อบที่ใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซหุงต้มหรือพลังงานแสงอาทิตย์ (ทวีศักดิ์ มหาวรรณ อัจฉรา จันทร์ผิง นิลวรรณ, 2013) การอบแห้งแบบความดันต่ำกว่าบรรยากาศ การอบแห้งด้วยลมร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (ศิริประภา คลังทอง, ศิริวิไล อนุกุลประชา,จาทุงศ์ วาฤทธิ์, ไพรัชต์ ดิฐคณารักษ์กุล และศิวะ อัจฉริยวิริยะ) การอบแห้งด้วยความร้อนจากชีวมวล (ศิริประภา คลังทอง, ศิริวิไล อนุกุลประชา,จาทุงศ์ วาฤทธิ์, ไพรัชต์ ดิฐคณารักษ์กุล และศิวะ อัจฉริยวิริยะ) การอบแห้งแบบผึ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลม

ร้อนและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับวิสาหกิจและกลุ่มสหกรณ์สวนยางพาราขนาดย่อม (อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ทีฆทรัพย์) เป็นต้น ดังนั้นในบทความวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีแต่ละแบบผสมผสานใช้งานร่วมกัน (Bala, B. K. &etal, 2002) ในกระบวนการอบแห้ง เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงที่ราคาแพง และมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

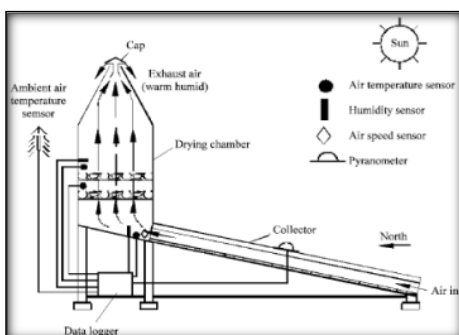
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนารูปแบบตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรด
2. เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะทางเทคนิคและการวิเคราะห์ที่ใช้พลังงานตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งเป็นการกำจัดความชื้น หรือน้ำในผลิตภัณฑ์ให้ลดลงในค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งอาหารหรือผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน

-ศึกษาวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนทางอ้อม และการอบแห้งแบบทางตรงเรือนกระฉาก



ภาพที่ 1 แบบลมร้อนทางอ้อม (Codori, M., Echazu, R. &Saravia, L., 2001)



ภาพที่ 2 แบบโดยตรงเรือนกระจก (Ekechukwu, O.V., 1999)

กระบวนการอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อมๆกันความร้อนที่ทำให้ไอน้ำระเหยออกจากวัสดุส่วนมากแล้วได้รับจากความร้อนสัมผัสของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนจะมีทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน แต่โดยทั่วไปแล้ว จะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเป็นหลัก โดยอัตราการทำให้แห้ง (drying rate) หรืออัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหย ต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง ขึ้นอยู่กับสภาพธรรมชาติของอาหารเริ่มต้นก่อนการทำแห้ง และสภาพแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heater transfer coefficient) เป็นต้น กราฟระหว่างอัตราการทำให้แห้ง (drying rate) และความชื้น โดยค่าความชื้น (Moisture content, M) คือค่าความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือวัสดุแห้งการบอกความความชื้นในวัสดุมี 2 แบบ คือ ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน มักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ เป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ ดังสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \quad (1)$$

ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งและใช้ในบทความนี้ เนื่องจากน้ำหนักแห้งของอาหารจะคงที่ โดยบอกเป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักแห้งของวัสดุ ดังสมการที่ (2)

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \quad (2)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก
 M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง
 w คือ น้ำหนักของวัสดุ (kg)
 d คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ

การถ่ายเทความร้อนในตู้อบ

ความร้อนที่ถ่ายเทจากลมร้อนสู่วัสดุอบถูกควบคุมด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อนหลายรูปแบบดังสมการ

$$q_T = h_v A(T_v - T_i) = h_c A(T_v - T_i) + h_r A(T_v - T_i) + h_v A(T_v - T_i) \quad (3)$$

เมื่อ h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาจากก๊าซสู่ผิวของแข็ง

h_r = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี ระหว่างวัสดุกับผนังของห้องอบ

h_v = สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวหน้าของการอบโดยการพาและการนำความร้อนผ่านชั้นวัสดุสู่ผิวหน้าซึ่งมีภาวะระเหย

T_v, T_i คือ ค่าอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งและอุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและของแข็ง (Simate, I. N., 2002)

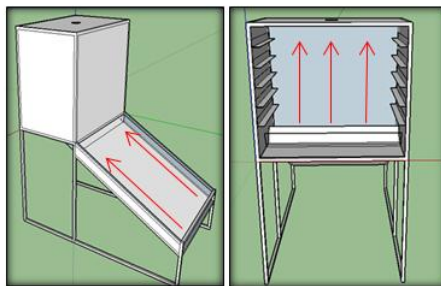
การพัฒนาตู้อบ

ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้เลือกการอบแห้งอยู่ 2 วิธีคือ

1. ตู้อบแบบลมร้อนโดยอ้อม เนื่องจากตู้อบแห้งแบบนี้ทำจากวัสดุที่บดทำให้วัสดุที่จะอบไม่ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงทำให้ลดการเปลี่ยนสีและผลกระทบ

อื่นๆ ของวัสดุแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัสรังสีโดยตรง โดยระบบดังกล่าวจะมีอุปกรณ์ผลิตอากาศร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้ง ที่หุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกภายนอก ภายในห้องอบแห้งจะทำเป็นชั้นวาง มีอยู่ 5 ชั้น เพื่อให้บรรจุวัสดุที่ต้องการอบแห้งแต่ละครั้งสามารถอบได้เป็นจำนวนมาก ลักษณะโครงสร้างของตู้อบแห้งนี้แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ระบบอากาศ (solar air system collector) หรือใช้หลักการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไป ยังแผ่นดุกกลืนรังสีสำหรับผลิตอากาศร้อน

ในการให้ความร้อนกับวัสดุเพื่อระเหยความชื้นออกจากวัสดุโดยหลักการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ระหว่างอากาศร้อน และวัสดุเปียก บนพื้นฐานของความแตกต่างความเข้มข้นของความชื้นระหว่างอากาศที่ใช้ออบแห้งกับความชื้นของอากาศบริเวณผิววัสดุเปียกในส่วนของถ่ายเท โอนความร้อนและมวลจะใช้ร่วมกับหลอดอินฟราเรดในการอบแห้ง ซึ่งทำหน้าที่ส่งคลื่นอินฟราเรดไปยังวัสดุทำวัสดุเกิดการสั่นและเกิดความร้อนที่วัสดุจะทำให้น้ำที่อยู่ในวัสดุระเหยออก

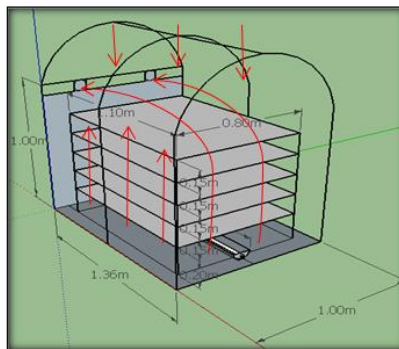


อากาศร้อนจากแสงอาทิตย์ ความร้อนจากหลอดอินฟราเรด

ภาพที่ 3 ตู้อบแบบลมร้อนแบบโดยอ้อม

2. ตู้อบแบบโรงเรือนอบแสงอาทิตย์โดยตรง เนื่องจากตู้อบแห้งแบบนี้ทำจากวัสดุโปร่งแสงทำให้แสงสามารถทะลุผ่านไปยังวัสดุได้การอบแบบนี้จะอบด้วยการรับรังสีอาทิตย์โดยตรงเป็นการอบที่ไม่ได้เน้นที่สีของวัสดุทำให้ได้รับอุณหภูมิจากรังสีอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอและอุณหภูมิในตู้อบจะสูงร่วมกับการให้ความร้อนของหลอดอินฟราเรด ซึ่งทำหน้าที่ส่งคลื่น

อินฟราเรดไปยังวัสดุทำวัสดุเกิดการสั่นและเกิดความร้อนที่วัสดุจะทำให้น้ำที่อยู่ในวัสดุระเหยออกเป็นตู้อบที่หุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกภายนอก ภายในห้องอบแห้งจะทำเป็นชั้นวาง มีอยู่ 5 ชั้น เพื่อให้บรรจุวัสดุที่ต้องการอบแห้งแต่ละครั้งสามารถอบได้เป็นจำนวนมาก ลักษณะโครงสร้างของตู้อบแห้งนี้แสดงดังรูปที่ 4



ความร้อนจากรังสีอาทิตย์และหลอดอินฟราเรด

ภาพที่ 4 ตู้อบแบบโรงเรือน

ขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานออกแบบและสร้างตู้อบ ออกแบบและในการดำเนินออกแบบและพัฒนาตู้อบ แห่งพืชผลทางการเกษตรพลังงานผสมผสาน อินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ได้ทำการ ปรับปรุงตู้อบแบบลมร้อน และทำการออกแบบสร้าง ตู้อบแบบโรงเรือน ดังนี้

1. ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ หลอดอินฟราเรด ตู้อบแบบลมร้อน ในการดำเนินการ

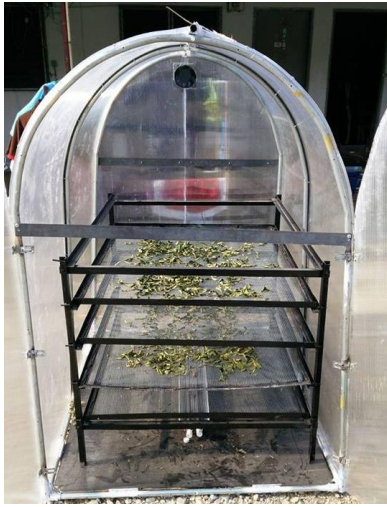
ปรับปรุงตู้อบแบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ หลอดอินฟราเรด สำหรับอบแบบลมร้อนนั้นผู้วิจัยได้ ทำการปรับปรุงตู้เดิมที่ได้มีการสร้างมาก่อนแล้ว แต่ โครงสร้างตู้อบจะทำด้วยกระจกใสทำให้แสงเข้าสู่ข้าง ในตู้อบ โดยผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนให้เป็นแบบทึบเพื่อ ไม่ให้แสงเข้าถึงวัสดุที่ทำการอบแห้ง และทำการเพิ่ม จำนวนชั้นวางวัสดุอบ จากเดิมมีอยู่ 3 ชั้น ได้ทำการ เพิ่มให้เป็น 5 ชั้น เพิ่มปริมาณในการอบแต่ละรอบ สามารถวัสดุได้มาก ดังรูปที่ 5



ภาพที่ 5 ตู้อบที่ได้ทำการปรับปรุงชั้นวางเป็น 5 ชั้น

2. ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ หลอดอินฟราเรด ตู้อบแบบโรงเรือน ในการ ดำเนินการจะเริ่มจากการศึกษาตู้อบของกระทรวง พลังงาน (พพ.1) การออกแบบ และโครงสร้าง ของ กระทรวงพลังงาน มาตรฐาน แบบอบแห้ง พพ.1 ขนาด 6.00x8.20 ม. จากแบบมาตรฐานกระทรวง พลังงาน ตู้อบแบบโรงเรือนระบบขนาดเล็ก มีพื้นที่

$(6 \times 8.2) = 49.2$ ตารางเมตร (พพ.1) ผู้ทำการวิจัยได้ ทำการย่อขนาดลดลงจากขนาดเดิม 1:6 เท่า จาก แบบมาตรฐานกระทรวงพลังงาน ตู้อบแบบโรงเรือน ระบบขนาดเล็ก มีพื้นที่ $(6 \times 8.2) = 49.2$ ตารางเมตร (พพ.1) จากการย่อลง 1:6 เท่า จะได้ขนาดอยู่ที่ $(1 \times 1.37) = 1.37$ ตาราง โครงสร้างของตู้อบ ดังรูปที่ 6



ภาพที่ 6 ตู้อบแบบโรงเรือนที่สร้างเสร็จแล้ว

หลอดอินฟราเรด

หลอดอินฟราเรด (Infrared Heater) เป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี เหมือนกับดวงอาทิตย์ส่งความร้อนมายังโลก จึงมีประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ ประหยัดไฟฟ้าได้ถึง 30-50% สามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อใน จึงทำให้ประหยัดพลังงานได้ถึง 10 เท่า ซึ่งการให้ความร้อน แบบการพาและการนำความร้อน จะทำให้วัตถุร้อนเฉพาะที่ผิว แล้วค่อยๆ ซึมเข้าไปเนื้อใน จึงใช้เวลามากกว่า ขนาดจะมีขนาดเล็กกว่าหลอดแบบทั่วไป ทำให้ประหยัดเนื้อที่

ในการติดตั้ง และการถอดเปลี่ยนเพื่อซ่อมบำรุงง่าย มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากไม่มีเปลวไฟ ตัวเรือนมีความเป็นฉนวนสูง ไฟไม่รั่ว ให้รังสีอยู่ในช่วง 800 nm. ถึง 3,000 nm ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกือบทุกชนิดสามารถดูดซับรังสีได้ดี ในการพิจารณาเลือกใช้หลอดอินฟราเรด พิจารณาจากอุณหภูมิที่เกิดจากการแผ่รังสี ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิได้ด้วยชุดควบคุมให้มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 1,300 วัตต์ จำนวน 2 หลอด



ภาพที่ 7 หลอดอินฟราเรด (รศ.ดร.เสริม จันทร์ฉาย)

สร้างชุดควบคุมอุณหภูมิในตู้อบ
ในชุดควบคุมที่เราได้สร้างจะประกอบด้วย
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A เซนเซอร์

DHT22 จอ LCD16x2 บอร์ด Arduino Uno R3
โมดูล Micro SD Card และ Relay ขนาด 12 A ดัง
รูปที่ 8



ภาพที่ 8 ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

การทำงานของชุดควบคุม คือมีเซนเซอร์ วัดอุณหภูมิ และความชื้น แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นบน จอ LCD 16x2 แล้วนำค่า อุณหภูมิไปสั่งการทำงานของหลอดอินฟราเรด ในการเพิ่มอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิในตู้อบต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส ตัวบอร์ดจะสั่งให้รีเลย์ ON การทำงานของหลอดอินฟราเรด หลอดอินฟราเรดจะทำงานจนอุณหภูมิถึง 65 องศาเซลเซียส ตัวบอร์ดจะสั่งให้รีเลย์ OFF การทำงานของหลอดอินฟราเรด แต่อุณหภูมิจะขึ้นถึงประมาณ 70 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในตู้อบจะอยู่ที่ 50- 70 องศาเซลเซียส โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จะส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นไปยังบอร์ด Arduino Uno R3 จะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ และความชื้น ลงใน SD Card

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการอบแห้ง และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรด ในการทดลองอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร อบแห้งครั้งละ 5 กิโลกรัม ต่อการอบหนึ่งครั้ง และวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการอบ ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งของวัสดุที่ทำ การอบ

ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของพัดลมระบายอากาศ และระยะเวลาในการอบ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อคุณภาพของวัสดุที่ทำ การอบ

ในการทดลอง ได้นำตู้อบแห้งไปตั้งไว้ที่ที่มีแสงแดดส่องถึงตลอดวัน หรือให้แสงแดดเข้าถึงมากและนานที่สุด เพื่อให้อุณหภูมิในตู้อบสูงอยู่เสมอการทำงานในส่วนของการควบคุมการทำงานของหลอดอินฟราเรด คือเมื่ออุณหภูมิในตู้อบต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียสชุดควบคุมจะสั่งให้รีเลย์ ON การทำงานของหลอดอินฟราเรด หลอดอินฟราเรดจะทำงานจนอุณหภูมิถึง 65 องศาเซลเซียส ตัวบอร์ดจะสั่งให้รีเลย์ OFF การทำงานของหลอดอินฟราเรดอุณหภูมิที่อยู่ภายในตู้อบจะอยู่ในช่วง50-70 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการทดลองทดลองดังนี้

1. เตรียมวัสดุที่จะทำการอบแห้งจำนวน 5 กิโลกรัม
2. ในการอบ 1 ครั้งจะวางวัสดุอบไว้ชั้นละ 1 กิโลกรัม
3. บันทึกอุณหภูมิและความชื้นในตู้อบตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง

4. บันทึกความชื้นของวัตถุดิบ แต่ละช่วงจนถึงค่าที่ยอมรับได้

โดยได้ตั้งอุณหภูมิภายในตู้อบในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส ทำการทดลองอบแห้งวัตถุดิบต่างๆ ดังต่อไปนี้

ผลการทดลองและอภิปราย

ผลการทดลองตู้อบแห้งทั้งสองแบบที่ได้เลือกมาทำการทดลองได้แก่ ตู้อบแบบลมร้อน และตู้อบแบบโรงเรือน โดยใช้แหล่งพลังงานได้แก่ พลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

1. ผลการทดลองตู้อบแบบลมร้อน

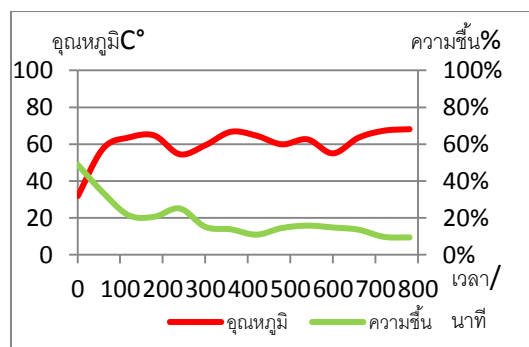
ผลของการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบให้อยู่ในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส ทำการอบแห้งพริกชี้ฟ้าจำนวน 5 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 9



ภาพที่ 9 การอบแห้งพริกชี้ฟ้าแบบลมร้อน

การทดลองที่ 1 ผลการทดลองอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยอินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

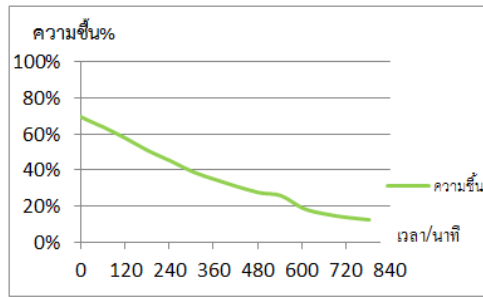
จากรูปที่ 10 และ 11 การวัดอุณหภูมิความชื้นภายในตู้อบ และความชื้นของพริกชี้ฟ้าที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 10 และ 11



ภาพที่ 10 แสดงอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบ

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตู้อบจะทำให้ความชื้นภายในตู้อบจะค่อยๆลดลงอยู่ที่ 10-12% ขนาดที่อุณหภูมิจะขึ้นลงๆ อยู่ที่ 50-

70 องศา ส่วนพัดลมจะทำงานอยู่ที่ 1200 รอบ/นาที จะใช้เวลาในการอบ 14 ชั่วโมง ทำให้ความชื้นของพริกค่อยๆลดลงแสดงดังรูปที่ 11

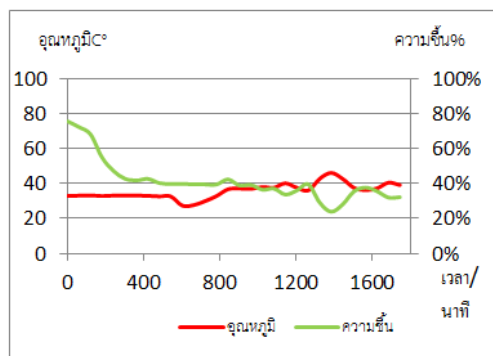


ภาพที่ 11 แสดงความชื้นลดลงของพริกชี้ฟ้า

ผลจากการลดความชื้นของพริกจากความชื้น 70% เมื่อทำการอบผ่านไป 14 ชั่วโมง ผลการระเหยของความชื้นออกจนอยู่ที่ 10% ซึ่งเป็นความชื้นที่อยู่

ในระดับที่ยอมรับได้ และอยู่ระดับที่ความต้องการของผู้บริโภค

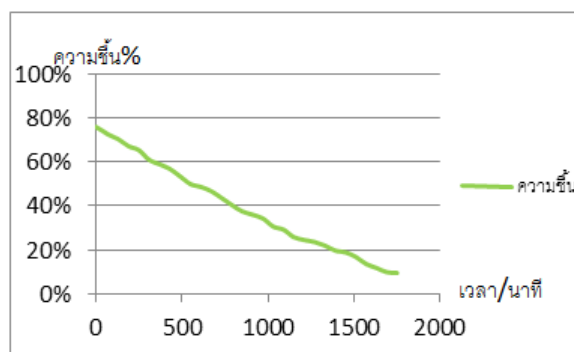
การทดลองที่ 2 ผลการทดลองอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยรังสีอาทิตย์เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 12 แสดงอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบ

จากรูปที่ 12 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว อุณหภูมิภายในตู้อบต่ำอยู่

ที่ 30-45 องศาเซลเซียส ทำให้ต้องใช้เวลาในการอบที่นานถึง 3 วัน วันละ 10 ชั่วโมง



ภาพที่ 13 แสดงความชื้นลดลงของพริกชี้ฟ้า

ผลจากการลดความชื้นของพริกจากความชื้น 65% เมื่อทำการอบผ่านไป 30 ชั่วโมง ใช้เวลา 3 วัน ผลการระเหยของความชื้นจะค่อยๆออกจนอยู่ที่ 15% ซึ่งเป็นความชื้นที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ตามความต้องการของผู้บริโภค

2. ผลการทดลองตู้อบแบบโรงเรือน

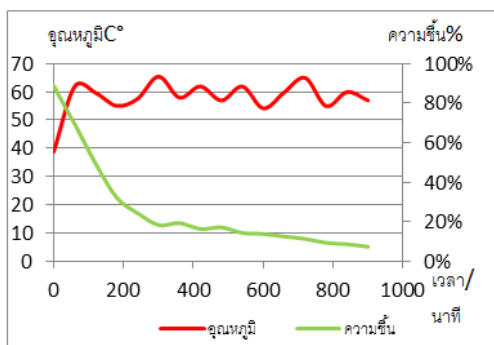
ผลของการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบให้อยู่ในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส ทำการอบแห้งพริกชี้ฟ้า จำนวน 5 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 14



ภาพที่ 14 การอบแห้งพริกชี้ฟ้าแบบโรงเรือน

การทดลองที่ 3 ผลการทดลองอบแห้งพริกชี้ฟ้า ด้วยอินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ จากรูปที่ 11 และ 12 การวัดอุณหภูมิความชื้นภายในตู้อบ และ

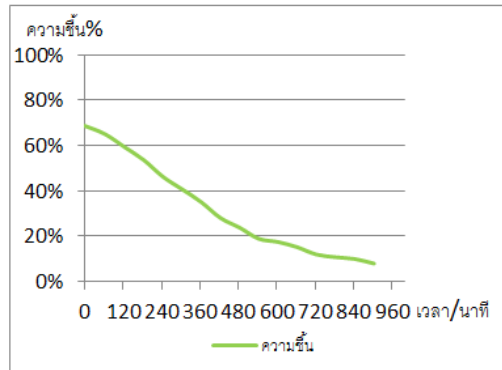
ความชื้นของพริกชี้ฟ้าที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 15 และ 16



ภาพที่ 15 แสดงอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบ

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตู้อบจะทำให้ความชื้นภายในตู้อบจะค่อยๆลดลงอยู่ที่ 10-12% ขนาดที่อุณหภูมิจะขึ้นลงๆ อยู่ที่ 50-

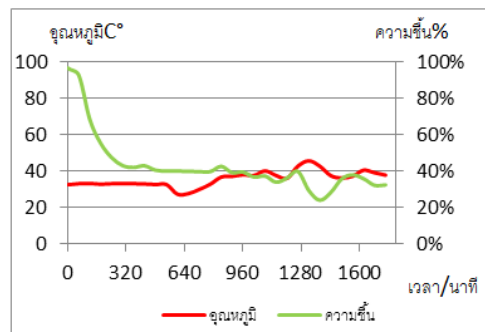
70 องศา ส่วนพัดลมจะทำงานอยู่ที่ 1200 รอบ/นาฬิกา จะใช้เวลาในการอบ 16 ชั่วโมง ทำให้ความชื้นของพริกค่อยๆลดลงแสดงดังรูปที่ 16



ภาพที่ 16 แสดงความชื้นลดลงของพริกชี้ฟ้า

ผลจากการลดความชื้นของพริกจากความชื้น 65% เมื่อทำการอบผ่านไประยะเวลา 16 ชั่วโมง ใช้เวลา ผลการระเหยของความชื้นจะค่อยๆออกจนอยู่ที่ 15% ซึ่งเป็นความชื้นที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ตามความต้องการของผู้บริโภค

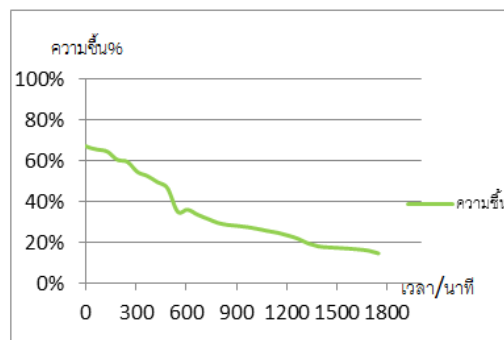
การทดลองที่ 4 ผลการทดลองอบแห้งพริกชี้ฟ้า ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จากกราฟที่ 1.7 และ 1.8 การวัดอุณหภูมิความชื้นภายในตู้อบ และความชื้นของพริกชี้ฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบแห้งครั้งละ 5 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 17 และ 18



ภาพที่ 17 แสดงอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบ

จากรูปที่ 17 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว อุณหภูมิภายในตู้อบจะต่ำ

อยู่ที่ 25-45 องศาเซลเซียส ทำให้ต้องใช้เวลาในการอบที่นานถึง 3 วัน วันละ 10 ชั่วโมง



ภาพที่ 18 แสดงความชื้นลดลงของพริกชี้ฟ้า

จากรูปที่ 18 ผลจากการลดความชื้นของพริก จากความชื้น 75% เมื่อทำการอบผ่านไป 30 ชั่วโมง ใช้เวลา 3 วัน ผลการระเหยของความชื้นจะค่อยๆ ออกจนอยู่ที่ 15% ซึ่งเป็นความชื้นที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ตามความต้องการของผู้บริโภค

ผลที่ได้จากการทดลองตู้อบ ทั้ง 2 แบบการทดลองลดความชื้นของวัตถุดิบทั้ง 2 วิธี พบว่าการลดความชื้นวิธีที่เร็วที่สุดคือ ใช้เครื่องอบแห้งพลังงาน

แสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนหลอดอินฟราเรด เมื่อเทียบกับวิธีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว และสามารถผลิตได้เร็วกว่า ข้อดีของอินฟราเรด คือมีการสูญเสียความร้อนน้อย มีการให้ความร้อนที่สูง การแผ่รังสีจากหลอดอินฟราเรดจะดูดซับรังสีโดยตรง การทะลุทะลวงของรังสีทำได้ดี จึงทำให้น้ำสามารถระเหยออกจากวัตถุดิบที่ทำการอบได้อย่างรวดเร็ว และทำให้วัตถุดิบที่ได้คุณภาพที่ดีขึ้น

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบสมรรถนะของตู้อบ

ตู้อบ	อบแบบ	พลังงานแสงอาทิตย์	พลังงานความร้อนอินฟราเรด	ใช้ไฟฟ้า (หน่วย)	ระยะเวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)
แบบลมร้อน	พลังงานแสงอาทิตย์	ใช่	ไม่ใช่	-	30
	พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด	ใช่	ใช่	15	14-16
แบบโรงเรือน	พลังงานแสงอาทิตย์	ใช่	ไม่ใช่	-	30
	พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด	ใช่	ใช่	15	16

การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

ในการอบแห้งพริกโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดตู้อบแบบลมร้อน จะใช้เวลาในการอบแห้ง 14 - 16 ชั่วโมง เครื่องอบแห้งแบบโดยตรงเรือนกระจกจะใช้เวลาในการอบแห้ง 16 ชั่วโมง และเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนทางอ้อมจะใช้เวลาในการอบแห้ง 14 ชั่วโมงซึ่งจะใช้ไฟฟ้า 15 หน่วยต่อการอบ 1 ครั้ง จะเสียเงินจ่ายค่าไฟฟ้า 80 บาท ซึ่งเทียบกับการอบแห้งพริกใช้แก๊สหุงต้มจะใช้เวลาในการอบแห้ง 16 ชั่วโมง ใช้แก๊สหุงต้ม 16 กิโลกรัม ต่อการอบแห้ง 1 ครั้ง แก๊สหุงต้ม 15 กิโลกรัม ราคาอยู่ที่ 350 บาท(อ้างอิงจาก ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงสะโง๊ะ) จากการเปรียบเทียบการใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด และการใช้ความร้อนแก๊สหุงต้มพบว่า การใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด จะประหยัดกว่าใช้แก๊สหุงต้ม

สรุป

ในบทความนี้ได้้นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับหลอดอินฟราเรดในการอบผลผลิตทางการเกษตร ในกระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นได้ใช้กระบวนการเปรียบเทียบ 2 แบบ คือ วิธีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว และวิธีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรด ในการทดลองอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวใช้เวลาถึง 3 วันทำการอบวันละ 10 ชั่วโมง ในการแต่ละครั้งเป็นการใช้เวลาที่นานและอาจมีผลเสียต่อวัตถุดิบที่ทำการอบแห้ง ส่วนการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรด ในการอบแห้งวัตถุดิบจะใช้เวลาเพียง 1 วัน หรือ 14-16 ชั่วโมง ในการแต่ละครั้งเป็นการใช้เวลาไม่นานก็ได้วัตถุดิบที่แห้งตามต้องการ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตู้อบพลังงานอาทิตย์ร่วมกับหลอดอินฟราเรดสามารถทำได้ดีกว่าเนื่องจากการผลิตใช้เวลาน้อยกว่าการอบจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวเป็น 2 เท่า และ

จากการประเมินความคุ้มค่าซึ่งมีปัจจัยขึ้นอยู่กับ ยอดขาย ราคาขายตามท้องตลาดที่เพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์ ต่างๆ แต่โดยภาพรวมพบว่า การใช้ความร้อนจาก พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้ความร้อนจาก หลอดอินฟราเรด จะประหยัดกว่าใช้ความร้อนจาก แก๊สหุงต้มและไม่มีผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และศูนย์พัฒนาโครงการหลวงสะโงะที่ ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ การเกษตรในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

การทำพริกแห้งโดยใช้แก๊สหุงต้มเป็นแหล่งกำเนิด

ความร้อน. (2559). สืบค้น 10 กรกฎาคม 2559 จาก http://kucon.lib.ku.ac.th/cgi-bin/kucon.exe?rec?_id=013432&database=kucon&search_type=link&table=mona&back_path=/agre/mona&lang=thai&format_name=TFMON.

จารุวัฒน์ เจริญจิต. (2012). เทคโนโลยีการอบแห้ง ด้วยรังสีอาทิตย์ และแนวทางการ พัฒนา. *KKU Res J*, 17(1). 110-124.

เถลิงราช นิลเชื้อวงศ์, อนุพงศ์ เอกผล. การอบแห้ง ยางแผ่นผึ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับ วิสาหกิจและกลุ่มสหกรณ์สวนยางพาราขนาด ย่อม. *Burapha Sci. J.* 17(2), 50-59.

ทวีศักดิ์ มหาวรรณ อัจฉรา จันทร์ผิง นิลวรรณ. (2013). ไขหนุการพัฒนาคูอบแห้งหญาหวาน โดยใชแหล่งความร้อนจากกาซหุงต้มและ พลังงานแสงอาทิตย์. *The 14th TSAE National Conference and the 6th TSAE International Conference: TSAE 2013.* 387-392.

รศ.ดร.เสริม จันทร์ฉาย. โครงการศึกษา พัฒนาและ สาธิตโดยจัดทำต้นแบบอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ สำหรับประเทศสาธารณรัฐ ประชาธิปไตยประชาชนลาว. มหาวิทยาลัย ศิลปากร.

วิจิตร ตัณทสุทธิ. (2524). กระบวนการอบแห้ง และ หลักความร้อนจากแสงอาทิตย์. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

ศิริประภา คลังทอง, ศิริวิไล อนุกุลประชา, จาตุพงศ์ วาฤทธิ, ไพรัชต์ ตีฐคณาภิรักษ์กุล และศิวะ อัจฉริยวิริยะ. การอบแห้งใบหอมสับแบบ ไมโครเวฟ-ฟลูอิดไอเซน. ใน การประชุม วิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 3. เบลวิลล์รีสอร์ท. อำเภอดง จังหวัดเชียงใหม่.

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) หลอดอินฟราเรด. (2559). สืบค้น 11 มีนาคม 2559

จาก <http://www.heater-heater.com>

อนิรุทธิ์ ต่ายขาว และสมบัติ ทิมทรัพย์. เครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบ ธรรมชาติและชนิดพาความร้อนแบบบังคับ. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย.* 23-31.

Bala, B. K. &etal. (2002). Solar Drying of Pineapple Using Solar Tunnel Drier. *Renewable Energy.* 28, 183-190.

Codori, M., Echazu, R. &Saravia, L. (2001). Solar drying of pepper and garlic using The tunnel greenhouse drier. *Renewable Energy.* 22, 446-460.

Ekechukwu, O.V. (1999). Review of solar-energy drying system I: An overview of solar drying technology *Energy Conversion and Management.* 40(1999), 593-631.

Simate, I. N. (2002). Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers. *Renewable Energy.* 28, 435-453.

การศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน

A Study of Performance Evaluation of BRUSHLESS DC MOTOR with A Battery/Ultra-Capacitor Hybrid Energy Storage

ราชนันท์ ทองอักษรานนท์¹, วรินทร์ เกตุบุญเรือง² และนพพร พัชรประภคิตี^{3*}

Rachan Tongaugsaranoon¹, Warintorn Ketboonruang² and Nopporn Patcharaprakiti^{3*}

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงราย

^{1,2,3} Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai

*Corresponding author E-mail: pnopporn@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน จะแบ่งการศึกษาได้เป็น 2 ระบบเพื่อเปรียบเทียบกัน ระหว่างระบบที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดควบคู่กับแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับ มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน และระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับ มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ทั้งนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากทั้งสองระบบ เพื่อทำการวิเคราะห์และพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น เพื่อตรวจสอบหลักการ ได้ต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวด ขนาด 40 โวลต์ 18 ฟารัด ถูกต่อเข้ากับระบบเพื่อให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ในการส่งกำลังให้กับโพลมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้ เป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์ ผลการทดสอบขณะเริ่มปล่อยพลังงานออกจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดกระแสที่วัดได้จากมอเตอร์ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่ได้ปล่อยพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด

คำสำคัญ: จักรยานไฟฟ้า, ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

Abstract

This paper aims to study of Performance evaluation of brushless dc motor with a battery/ultra-capacitor hybrid energy storage. That study the study is divided into two systems compare. Between the systems. Ultra-capacitor is used in conjunction with a battery as a power source to the motor. and a system that uses only battery power supply to the motor. This is for performance ability of electrocution from two systems. for analyze and develop a good, efficient motor. to verify the principle continue ultra-capacitor 40 V 18 Farad Is connected to the system for ultra-capacitor is integrated with a battery in the power transmission to the motor which uses a brushless dc motor 36 V 350 watt. test result When starting the release of energy from the ultra-capacitor the measured currents from motor to increase drastically compared to when they did not release the energy from the ultra-capacitor.

Keywords: Electric Bicycle, Ultra-Capacitor, Brushless DC Motor

บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้านทั้งในด้านการขนส่งและงานอุตสาหกรรม อย่างแพร่หลายเช่นรถจักรยานไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้า และรถไฟไฟฟ้า ในส่วนอุตสาหกรรมเช่น เครื่องเป่า ปัม เครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือน และดิสก์ไดรฟ์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นการใช้พลังงานน้ำมันเป็นจำนวนมากและใช้พลังงานโดยสิ้นเปลือง ซึ่งเป็นกรสร้างปัญหาหลักจากด้านสิ่งแวดล้อม จึงทำให้รถที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเริ่มเป็นที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

(Chan, T.F, Yan, L.T. and Fang, S.Y., 2002) การขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้านั้นจะมีมอเตอร์เป็นเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งแบบเดิมนั้นจะใช้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current motor) โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีอาร์เมเจอร์เป็นตัวหมุน (rotor) และสนามแม่เหล็กเป็นตัวอยู่กับที่ (stator) ซึ่งจะอาศัยแปรงถ่านและซี่คอมมิวเตเตอร์ทำหน้าที่เป็นขบวนการคอมมิวเตชันทางกล มอเตอร์แบบนี้จะมีข้อเสีย เนื่องจากการเสียดสีทำให้เกิดความร้อน การสึกหรอของแปรงถ่าน และเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1-2] แต่ปัจจุบันนิยมนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless dc motor) ซึ่งอาร์เมเจอร์จะเป็นตัวอยู่กับที่ และสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวหมุนและใช้ตัวตรวจจับ (sensor) เพื่อตรวจจับตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์และใช้อินเวอร์เตอร์สำหรับขบวนการคอมมิวเตชันทางระบบอิเล็กทรอนิกส์

ซึ่งลักษณะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จะมีข้อดีคือ ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เนื่องจากว่ามอเตอร์ ชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่าน และยังดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบดั้งเดิม คือมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ในเรื่องคุณสมบัติและคุณลักษณะ แรงบิดกับความเร็ว มีการตอบสนองทางพลวัตเร็ว และประสิทธิภาพการทำงานสูง

จากการศึกษาเกี่ยวกับวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีสมรรถนะของมอเตอร์จักรยานไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์จักรยานไฟฟ้านั้นยังมีข้อบกพร่องอยู่หลายประการอย่างเช่นเมื่อจักรยานออกตัวเกิดการกระตุกเนื่องจากในขณะที่ออกตัวนั้น มอเตอร์จะกินกระแสสูงแล้วแบตเตอรี่นั้นจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ไม่ทันจึงเกิดการกระตุก ในขณะที่ขึ้นทางลาดก็เช่นกัน มอเตอร์มีแรงบิด ที่ต่ำเป็นผลให้จักรยานไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ช้า

(วรวิศ กอปรสิริพัฒน์, 2557) ได้นำเสนออุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก คือ (super capacitor) หรือเรียกอีกชื่อว่า ultra capacitor และในภาษาไทยเรียกว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวด อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจุอื่นๆ หลายเท่า อีกทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายในเวลาอันรวดเร็วเพียง 1-10 วินาที จุดเด่นอีกประการของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือ สามารถที่อัดและคายประจุได้กว่า 500,000 รอบ มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (lead-acid battery) 1,000 - 10,000 เท่า

จากเหตุผลข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยจะนำตัวเก็บประจุยิ่งยวด และแบตเตอรี่ มาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ เนื่องจากว่า การจ่ายพลังงานของ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดยุคนั้นสูงกว่าแบตเตอรี่หลายเท่า ผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดดังกล่าวคือ ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแบตเตอรี่ให้กับมอเตอร์จักรยานไฟฟ้า เพื่อส่งผลให้จักรยานไฟฟ้านั้นจะมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น แรงบิดดีขึ้น ความเร็วรอบสูงขึ้น เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อการศึกษาและพัฒนาสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีแปตเตอร์และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน ทั้งนี้เพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

2. เพื่อให้เข้าใจหลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านรวมถึงระบบต่างที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้

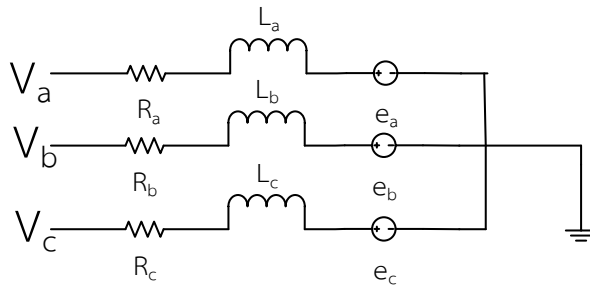
แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีลักษณะตามชื่อ คือ เป็นมอเตอร์ที่ไม่มีแปรงถ่าน สลิปริง และคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งสิ่งเหล่านั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อ

ทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันให้กับขดลวดอาเมเจอร์ที่พันอยู่บนโรเตอร์ มอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีส่วนประกอบที่สำคัญคือส่วนหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวรและส่วนอยู่กับที่เป็นขดลวดอาเมเจอร์ (วิชญู ทองสัมฤทธิ์ และทศพล ทั้งรอด, 2552) หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จะแตกต่างกับการทำงานของมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน จะทำงานแบบง่าย ๆ คือ มีแปรงถ่านเป็นตัวคอยสับเปลี่ยนการจ่ายกระแสไฟให้กับขดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้จึงมีสายเพียง 2 เส้นเท่านั้น แต่ในมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จะมีขดลวดอยู่ 3 ชุด และจะทำงานครั้งละ 2 ชุด สับเปลี่ยนกันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม โดยวงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะแสดงตามรูปที่ (1)



ภาพที่ 1 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

แบบจำลองมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (B. Tibor, V. Fedak and F. Durovskis, 2011)

แบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านในตัวแปรเฟส จะได้สมการของชุดขดลวดสามเฟสในตัวแปรเฟสซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (1), (2) และ (3)

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (2)$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3)$$

เมื่อ

L เป็นค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์

R เป็นค่าความต้านทานสเตเตอร์

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} เป็นแรงดันตกคร่อมสเตเตอร์

i_a, i_b, i_c เป็นกระแสไหลในสเตเตอร์

e_a, e_b, e_c เป็นแรงดันต้านกลับ (Back EMF)

ในมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ชนิด 3 เฟส แรงดันต้านกลับจะสัมพันธ์กับตำแหน่งในส่วน หมุน (Rotor) ซึ่งแรงดัน ต้านกลับ ในแต่ละเฟสจะทำมุมกัน 120° ไฟฟ้า ดังแสดงใน สมการที่ (4) , (5) และ (6)

$$e_a = K_w f(\theta_e) \omega \quad (4)$$

$$e_b = K_w f(\theta_e - 2\pi/3) \omega \quad (5)$$

$$e_c = K_w f(\theta_e + 2\pi/3) \omega \quad (6)$$

เมื่อ

K_w เป็นค่าคงที่ของแรงดันต้านกลับ

θ_e เป็นค่ามุมทางไฟฟ้าของตัวหมุน

ω เป็นความเร็วของตัวหมุน

แรงบิดทางไฟฟ้าที่ได้เป็นการรวมแรงกันในแต่ละเฟสซึ่งอธิบายได้ตามสมการที่ (7)

$$T_e \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (7)$$

เมื่อ

T_e เป็นแรงบิดรวมทางไฟฟ้า

ในส่วนของสมการทางกลอธิบายให้เห็นได้ตามสมการที่ (8)

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (8)$$

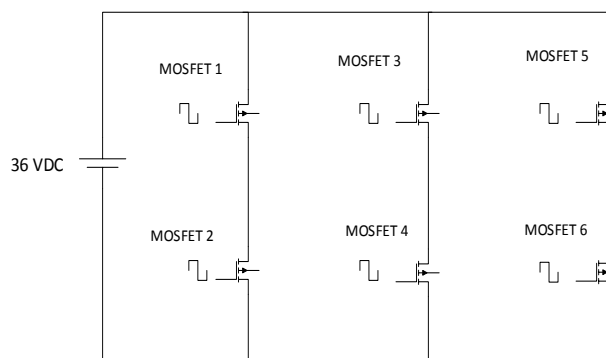
เมื่อ

T_l เป็นแรงบิดที่โหลด

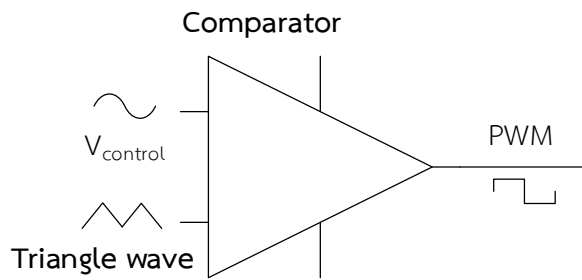
B ค่าแรงเสียดทานความหนืดคงที่

การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

การควบคุมมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านจะถูกใช้งานในโหมดของการสวิตช์ ซึ่งก็หมายความว่าการทำงานของอุปกรณ์ กำลัง (มอสเฟส ไอจีบีที) จะถูกทำงานในลักษณะสวิตช์ไม่เปิดก็ปิดตลอดเวลา ซึ่งสามารถควบคุมโดยการควบคุมอัตราส่วนของเวลา หรือการควบคุมดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) หลักการของการควบคุม แบบ ดิวตี้ไซเคิลคือ ต้องทำการสวิตช์ มอสเฟตกำลังที่ความถี่สูงแล้วควบคุมค่ากระแสเฉลี่ย โดยใช้ความสัมพันธ์ช่วงเวลาเปิดและปิด ซึ่งเราจะเรียก วงจรมอสเฟตกำลัง ที่ใช้สวิตช์นั้นว่า วงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง และใช้โครงสร้างบริดจ์สามเฟสแสดงดังรูปที่ (2) ในส่วนของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น จะควบคุมด้วยสวิตช์ มอสเฟตตัวบนของวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง โดยการควบคุมด้วยสัญญาณพีดับบีวเอ็ม (PWM) ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตสัญญาณสองสัญญาณเข้าด้วยกัน คือสัญญาณฟันเลื่อย (Saw tooth) และสัญญาณควบคุมคลื่น ($V_{control}$) รูปคลื่นไซน์ (Sine wave) แสดงดังรูปที่ (3)



ภาพที่ 2 วงจรบริดจ์ 3 เฟส



ภาพที่ 3 การมอดูเลตเพื่อสร้างสัญญาณพีดับบีวเอ็ม (PWM)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือ Ultra capacitor นี้มีคุณสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า สูงกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่น มากถึง 100-10,000 เท่า อีกทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายใน เวลาอันสั้น เพียง

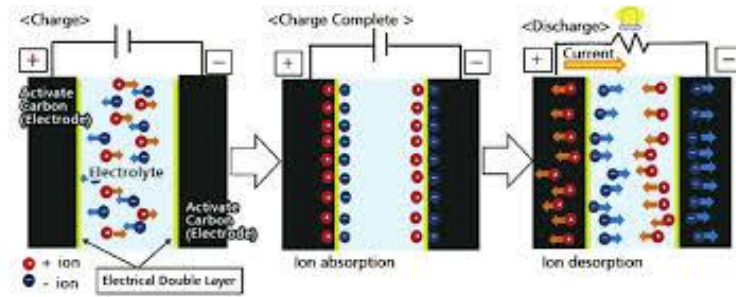
1-10 วินาที เทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนซึ่งต้องใช้ เวลาโดยเฉลี่ย 10-60 นาที และการคายประจุก็สามารถทำได้ภายใน 1 วินาทีเช่นกัน ซึ่งลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด จะแสดงดังรูปที่ (4)



ภาพที่ 4 รูปลักษณะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีส่วนประกอบคือ 1) ขั้วบวกและลบ 2) แผ่นกั้นระหว่างขั้ว 3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อให้ความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง เช่นเมื่อต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับแบตเตอรี่ ประจุที่เป็นบวกภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วลบของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและประจุที่เป็นลบในสารละลายก็จะเข้าไปหา

ขั้วบวก การที่ใช้คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บประจุเนื่องจากประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนได้ จึงมีจุดที่มีการดึงดูดกันระหว่างประจุบวกและลบเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงเสมือนกับการนำตัวเก็บประจุแบบธรรมดา (capacitor) ขนาดเล็กๆ มารวมด้วยกันจำนวนมาก



ภาพที่ 5 ลักษณะการกระจายตัวของประจุขณะกำลังอัดประจุ (ซ้าย) เมื่ออัดประจุจนเต็ม (กลาง) และเมื่อคายประจุ (ขวา) (Kotz, R. and Carlen, M., 2000)

การต่อใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทำได้ 3 แบบคือการต่อแบบอนุกรม การต่อแบบขนาน และการต่อแบบผสมซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9), (10) และ (11) ตามลำดับ

$$\frac{1}{CT} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} \quad (9)$$

$$CT = C1 + C2 + C3 \quad (10)$$

$$CT = \frac{1}{\frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}} + C1 \quad (11)$$

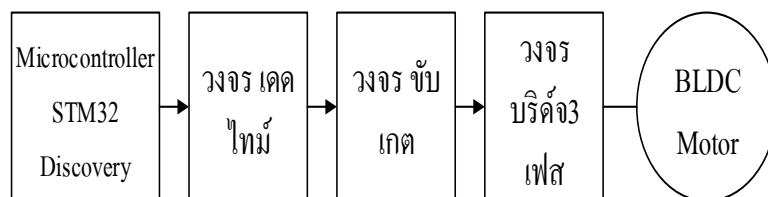
เมื่อ

CT เป็นค่าความจุรวม

$C1, C2, C3$ เป็นค่าความจุแต่ละตัว

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้นจะแยกออกเป็นสองส่วนคือ ทางด้านวงจรถอนิกส์ และทางด้านซอฟต์แวร์ ซึ่งทางด้านวงจรถอนิกส์นั้นจะประกอบไปด้วย วงจรเดดไทม์ วงจรชับเกตวงจร บริดจ์สามเฟส ในส่วนของทางด้านซอฟต์แวร์นั้น จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 discovery เป็นตัวระบบควบคุม โดยภาพรวมของระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน แสดงดังรูป ที่ (6)

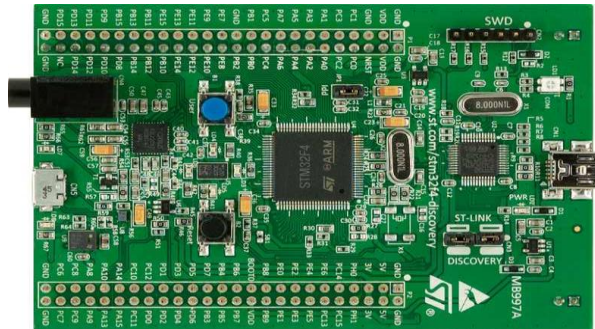


ภาพที่ 6 ระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในส่วนของ การต่อ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับระบบจำเป็นต้องมีวงจรแปรผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูส (Boost Converter) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์

สำหรับดึงพลังงานออกมาจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด ลักษณะการต่อแสดงดังรูปที่ (16)

ไมโครคอนโทรเลอร์ STM32F4 Discovery

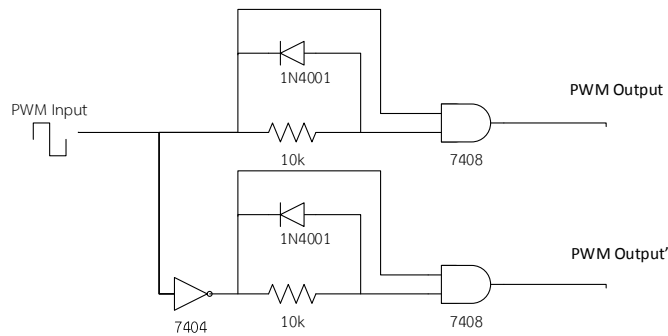


ภาพที่ 7 ไมโครคอนโทรเลอร์ STM32F4 Discovery

จากรูปที่ 8 คือชุดพัฒนาสำหรับผู้ไม่ชำนาญเรื่อง อิเล็กทรอนิกส์หรือการเขียนโปรแกรม สามารถจำลอง การทำงานและแปลงโปรแกรมลักษณะรูปภาพจาก

โปรแกรม แมทเพลลงอุปกรณ์ ฮาร์ดแวร์ใช้งานได้จริง ทันที

วงจรถัดใหม่ (Dead time)



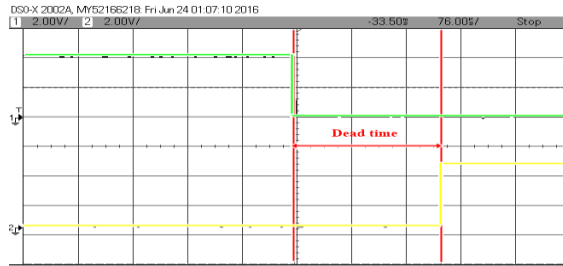
ภาพที่ 8 วงจรถัดใหม่ (Dead time)



ภาพที่ 9 วงจรถัดใหม่ ที่สร้างขึ้น

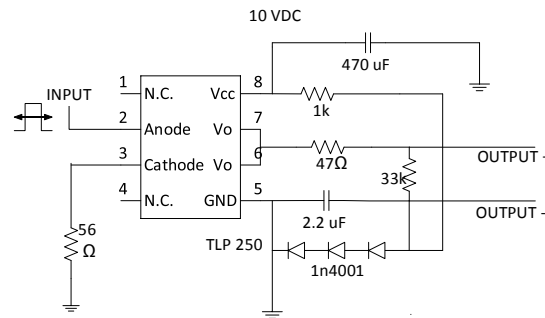
วงจรเดดไทม์ถูกนำมาใช้ในวงจรเพื่อป้องกันไม่ให้มอสเฟตกำลังในวงจรบริดจ์สามเฟสทำงานพร้อมกัน เพราะถ้าเมื่อใดที่มอสเฟตกำลังทำงานพร้อมกัน จะส่งผลเกิดการลัดวงจรและยัง เป็นจุดที่มีการแบ่งสัญญาณ พีดีบีวีเอ็ม ออกเป็น 2 ซีก เป็นสัญญาณที่

ดับบีวีเอ็ม ที่ตรงกันข้ามโดยในวงจรนี้จะมี อุปกรณ์หลัก ๆ อยู่ 2 ตัว คือ แอนเกด7408 และ นอตเกด 7404 ซึ่งจวงจรแสดงดังรูปที่ (8) และรูปคลื่นสัญญาณ ที่ออกมาจากวงจร เดดไทม์จะแสดงตามรูปที่ (10)



ภาพที่ 10 รูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตวงจรเดดไทม์

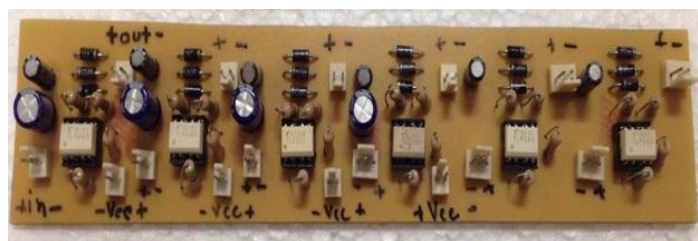
วงจรขับเกต (Gate Drive)



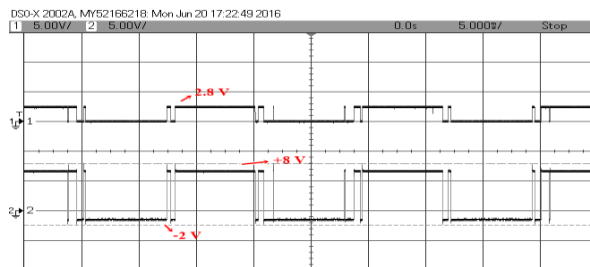
ภาพที่ 11 วงจรขับเกต (Gate Drive)

วงจรขับเกต ออปโต TLP 250 วงจรนี้ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการลัดวงจรจากวงจรภาคกำลัง มาสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เนื่องจากว่า IC TLP 250 จะเป็นตัวแยกกราวด์ (Ground) ระหว่างวงจรภาคกำลังกับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ออกจากกันโดยสิ้นเชิง

และ วงจรขับเกต ออปโต TLP 250 ยังทำหน้าที่ขยายสัญญาณพีดีบีวีเอ็ม ที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มีสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับไปขับขาเกตของมอสเฟต ซึ่งวงจรจะแสดงดังรูปที่ (11) และสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากวงจรขับเกต แสดงดังรูปที่ (13)

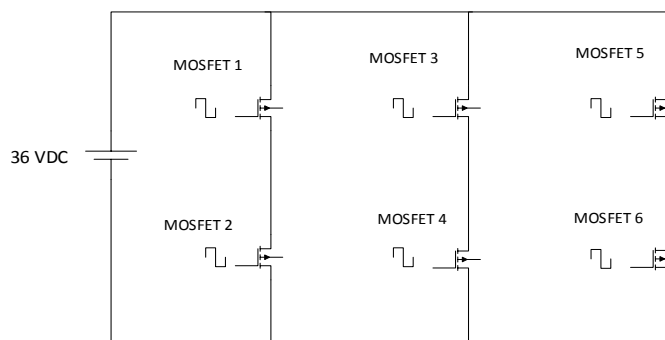


ภาพที่ 12 วงจรขับเกต ออปโต TLP 250 ที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 13 รูปคลื่นสัญญาณอินพุตวงจรขับเคลื่อนเทียบกับคลื่นสัญญาณเอาต์พุต

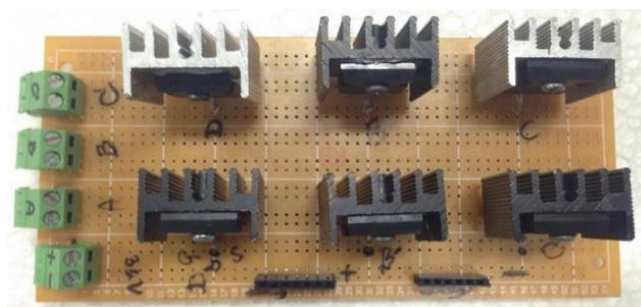
วงจรภาคกำลัง (บริดจ์สามเฟส)



ภาพที่ 14 วงจรภาคกำลัง

ในส่วนของวงจรภาคกำลังจะประกอบด้วย มอสเฟต ทั้งหมดจำนวน 6 ตัว ซึ่งจะนำมอสเฟตมาทำงานเป็นสวิตช์โดยอาศัยการทำให้มอสเฟตนำกระแสและ

หยุดนำกระแสอย่างรวดเร็ว มอสเฟตจะทำงานทีละ 1 คู่แต่จะไม่ทำงานพร้อมกันในแถวเดียวกัน วงจรภาคกำลังจะแสดงดังรูปที่ (14)



ภาพที่ 15 วงจรภาคกำลังที่สร้างขึ้น

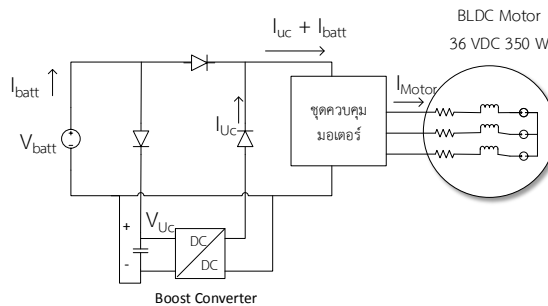
ขั้นตอนสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery ถูกนำมาใช้สำหรับสร้างสัญญาณ พัลส์บวริเอ็ม 3 เฟส เพื่อนำสัญญาณทั้ง 3 เฟส มาควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งสัญญาณ ซึ่ง

สัญญาณในแต่ละเฟส จะมีมิตต่างเฟส 120 องศา สัญญาณที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะต่อเข้าวงจรเดคไทม์ เพื่อให้ได้สัญญาณออกมาเป็น 6 เส้น ได้แก่ สัญญาณพัลส์บวริเอ็ม +A, -A, +B, -B, +C และ -C ซึ่งสัญญาณ พัลส์บวริเอ็ม +A,-A จะมีช่วงเดคไทม์กัน

อยู่ที่ $3 \mu\text{s}$ จากอินพุตของวงจรเดดไทม์จะถูกต่อเข้ากับวงจรขับเคลื่อน เพื่อขยายสัญญาณ ให้มีขนาด +10 โวลต์และ -2 โวลต์ ในที่นี้ ใช้เป็น -2 โวลต์ เพื่อให้มอเตอร์ในวงจรภาคกำลังนั้นหยุดนำกระแสได้สนิท โดยสัญญาณที่ออกมาจากวงจรขับเคลื่อน จะถูกต่อเข้า

กับวงจรภาคกำลัง เพื่อควบคุมการสวิตช์ ของมอเตอร์เฟส และเอาต์พุตของวงจรภาคกำลังจะได้ออกมาเป็น สายสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์จำนวนสามเส้น คือ สายเฟส U, V และ W ตามลำดับ

การต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับระบบควบคุม



ภาพที่ 16 ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดเข้ากับระบบ

ตัวเก็บประจุที่นำมาวิจัยในครั้งนี้จะใช้จำนวน 30 เซลล์ เซลล์ละ 2.7 โวลต์ 120 ฟารัด นำมาต่อแบบอนุกรม กันจำนวน 15 เซลล์ 2 แถว จะได้ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแถวละ 40 โวลต์ 8 ฟารัด และนำแต่ละแถวมาขนานกัน จะได้ 40 โวลต์ 16 ฟารัด ซึ่งสมการการคำนวณจะเป็นไปดังสมการ ที่ (9) และ สมการที่ (10) เหตุผลที่ต้อง ใช้ 40 โวลต์ เนื่องจากว่าต้องการให้ แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีแรงดันมากกว่าหรือเท่ากับแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ถูกต่อเข้ากับแบตเตอรี่โดยตรงเพื่อให้แบตเตอรี่ ประจุเข้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดอยู่ตลอดเวลาในส่วนการคายประจุ ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นจะใช้วงจรแปรผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดบูส (Boost Converter) ดึงพลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดออกมาและการควบคุมการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นจะควบคุมโดยการกดสวิตช์

การทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ การทำทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน ซึ่งมีรูปแบบดังรูปที่ (19) ส่วน

ระบบที่ 2 เป็นการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน แสดงดังรูปที่ (20) มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้เป็นมอเตอร์แบบถ่วงล่อชนิดกระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์ การทดสอบโดยที่ไม่มีโหลดที่แกนเพลลา ลักษณะของมอเตอร์จะแสดงดังรูปที่ (21)

อุปกรณ์ในการทดสอบประกอบด้วย

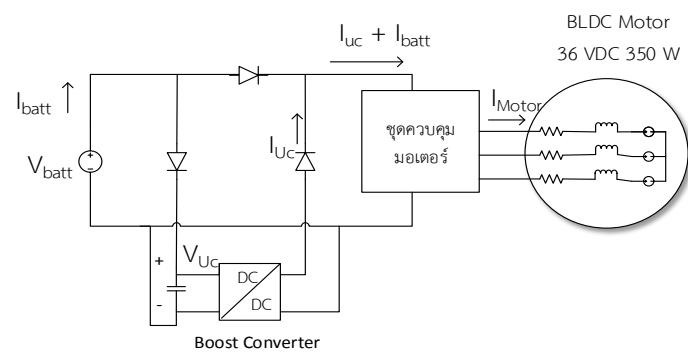
1. แคมป์มิเตอร์ดิจิทัล แบบ TRUE RMS ยี่ห้อ UNI-T 1 เครื่อง คุณสมบัติใช้สำหรับวัดกระแสและแรงดันรวมไปถึง ความต้านทานต่างๆ โดยสามารถวัดกระแสได้สูงสุด 400แอมแปร์ แรงวันที่วัดได้สูงสุด 600 โวลต์
2. ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Agilent Technologies 1 เครื่อง คุณสมบัติใช้สำหรับวัดรูปคลื่นสัญญาณต่างๆ ซึ่งจะสามารถวัดได้ ครั้งละ 2 สัญญาณ



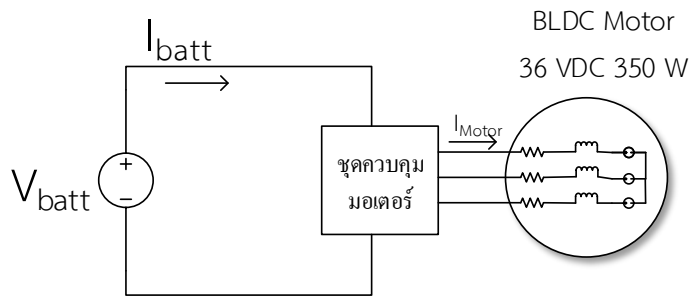
ภาพที่ 17 แคมป์มิเตอร์ ที่ใช้ในการวัด



ภาพที่ 18 ออสซิลโลสโคป ที่ใช้ในการวัด



ภาพที่ 19 ระบบที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน



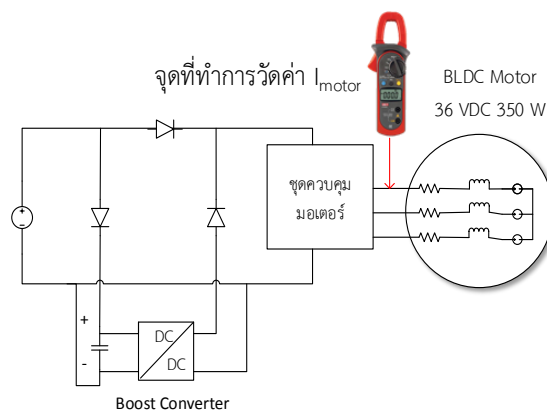
ภาพที่ 20 ระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน



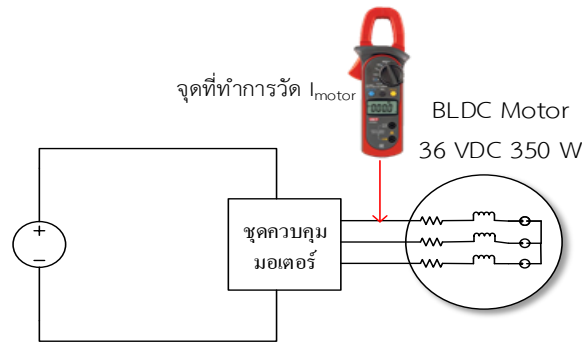
ภาพที่ 21 ลักษณะของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

การวัดค่ากระแสที่มอเตอร์ (I_{motor}) จะวัดที่เอาต์พุตของชุดควบคุมมอเตอร์ที่ต่อไปยังมอเตอร์ ซึ่งจุดที่ทำการวัดจะเป็นไปดังรูปที่ (22) และรูปที่ (23) โดยใช้ แคมป์มิเตอร์ดิจิตอล แบบ TRUE RMS

ยี่ห้อ UNI-T ในการวัดค่ากระแส และใช้ออสซิลโลสโคปสำหรับการเก็บบันทึกรูปคลื่นกระแสของ I_{motor}



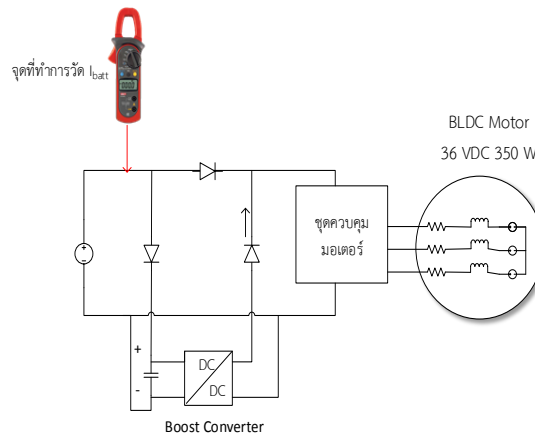
ภาพที่ 22 วงจรการวัดค่ากระแสที่มอเตอร์ (I_{motor}) ระบบที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน



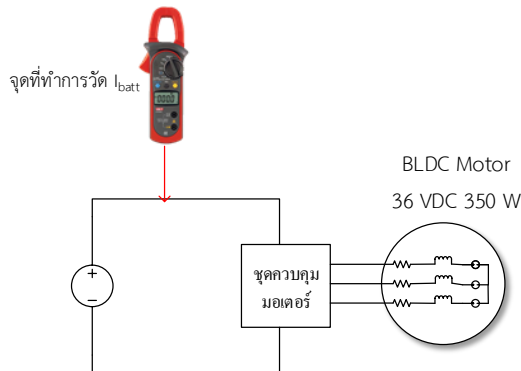
ภาพที่ 23 วงจรการวัดค่ากระแสที่มอเตอร์ (I_{motor}) ระบบที่ใช้แบตเตอรี่
เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน

ในส่วนของการวัดค่ากระแสที่แบตเตอรี่ (I_{batt})
จ่ายออกมาจะวัดที่ระหว่างแหล่งจ่ายแบตเตอรี่กับชุด
ควบคุมมอเตอร์ ซึ่งจุดที่ทำการวัดจะแสดงดังรูปที่
(24) และรูปที่ (25) โดยใช้แอมป์มิเตอร์ดิจิทัล แบบ

TRUE RMS ยี่ห้อ UNI-T ในการวัดค่ากระแส และใช้
ออสซิลโลสโคปสำหรับการเก็บบันทึกรูปคลื่นกระแส
ของ I_{batt}



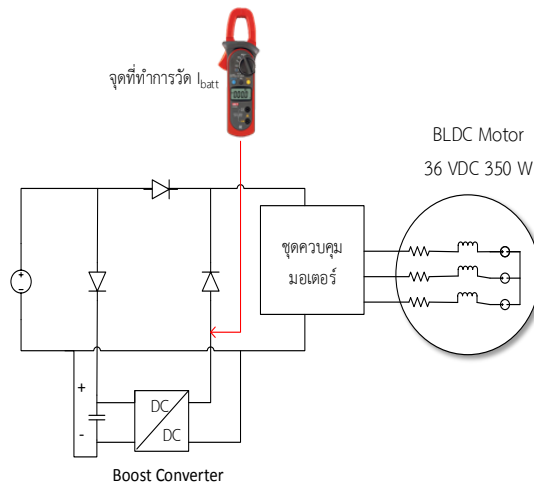
ภาพที่ 24 วงจรการวัดค่ากระแสที่ออกจากแบตเตอรี่ (I_{batt}) ระบบที่ใช้แบตเตอรี่
และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน



ภาพที่ 25 วงจรการวัดค่ากระแสที่ออกจากแบตเตอรี่ (I_{batt}) ระบบที่ใช้แบตเตอรี่
เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน

และในส่วนของการวัดกระแสที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายกระแสออกมา (I_{UC}) จะวัดตรงเอาต์พุตของวงจรแปรผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบบูส (Boost Converter) ซึ่งจุดที่ทำการวัดจะแสดงดังรูปที่ (26)

โดยใช้แอมป์มิเตอร์ดิจิทัล แบบ TRUE RMS ยี่ห้อ UNI-T ในการวัดค่ากระแส และใช้ ออสซิลโลสโคป สำหรับการเก็บบันทึกรูปคลื่นกระแสของ I_{UC}

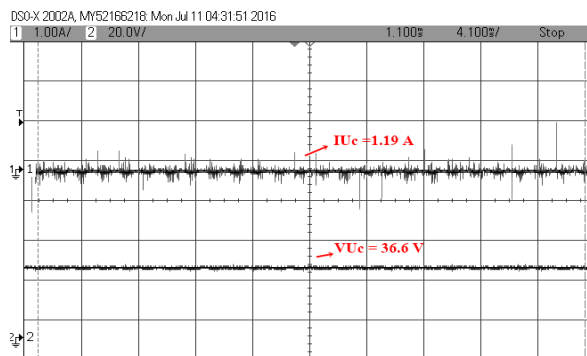


ภาพที่ 26 วงจรการวัดกระแสที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่าย กระแสออกมา (I_{UC})

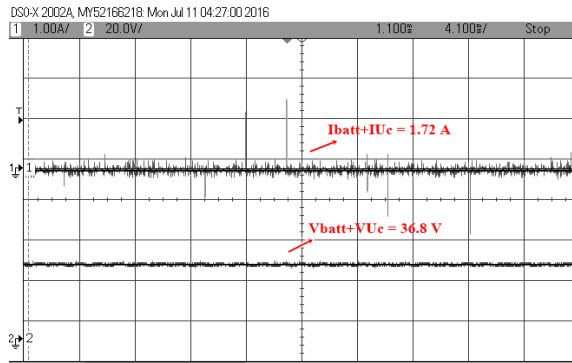
ผลการวิจัย

จากการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงานจะเห็นว่า กระแสขณะตัวเก็บประจุ I_{UC} เริ่มจ่ายพลังงานให้กับระบบจะมีกระแสเท่ากับ 1.72 แอมแปร์ ดูได้จากรูปที่ (28) ในส่วนของการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน โดยกระแสขณะ

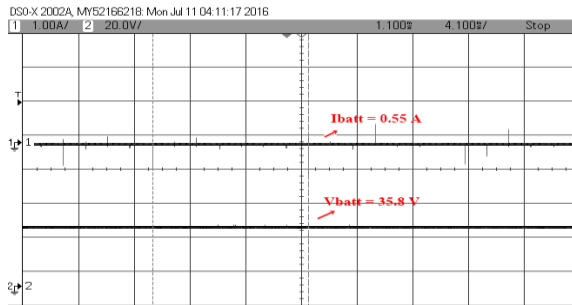
แบตเตอรี่จ่ายพลังงานให้กับระบบ จะมีกระแส I_{batt} เท่ากับ 0.55 แอมแปร์ ดูได้จากรูปที่ (29) ในส่วนการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงานขณะไม่มีโหลด แสดงดัง ตารางการทดลองที่ (1) และ การทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน แสดงดัง ตารางการทดลองที่ (2)



ภาพที่ 27 แรงดันและกระแสขณะตัวเก็บประจุยิ่งยวดเริ่มจ่ายพลังงานให้กับระบบ



ภาพที่ 28 แรงดันและกระแสขณะตัวเก็บประจุและแบตเตอรี่จ่ายพลังงานให้กับระบบ



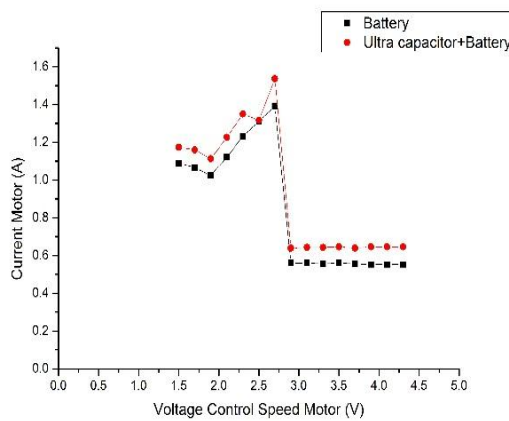
ภาพที่ 29 แรงดันและกระแสขณะแบตเตอรี่จ่ายพลังงานให้กับระบบ

ตารางการทดสอบที่ 1 ทดสอบระบบที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน

$V_{Control}$ (V)	I_{motor} (A)
1.5	1.17
1.7	1.16
1.9	1.11
2.1	1.22
2.3	1.35
2.5	1.31
2.7	1.53
2.9	0.64
3.1	0.64
3.3	0.64
3.5	0.64
3.7	0.64
3.9	0.64
4.1	0.64
4.3	0.64

ตารางทดสอบที่ 2 ทดสอบระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน

$V_{Control}$ (V)	I_{motor} (A)
1.5	1.09
1.7	1.06
1.9	1.02
2.1	1.12
2.3	1.23
2.5	1.31
2.7	1.39
2.9	0.56
3.1	0.56
3.3	0.55
3.5	0.56
3.7	0.55
$V_{Control}$ (V)	I_{motor} (A)
3.9	0.55
4.1	0.55
4.3	0.55



ภาพที่ 30 กราฟเปรียบเทียบกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทั้ง 2 ระบบ

อภิปรายผลการวิจัย

จากการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์ กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ทั้งระบบที่ใช้แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงานและ

ระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน พบว่าระบบที่ใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งเก็บกักพลังงานจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้ดีกว่า ระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็น

แหล่งเก็บกักพลังงาน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีคุณสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า สูงกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่น มากถึง 100-10,000 เท่า อีกทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายใน เวลาอันสั้น เพียง 1-10 วินาที เทียบกับ แบตเตอรี่ทั่วไปซึ่งต้องใช้เวลาโดยเฉลี่ย 2-4 ชั่วโมง และการคายประจุก็สามารถทำได้ภายใน 1 วินาทีเช่นกัน ซึ่งโหลดมอเตอร์เป็นโหลดที่ต้องการพลังงานสูงลำพังแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ได้ทัน เป็นผลให้มอเตอร์เกิดการกระตุก ในขณะที่มีโหลดมากๆ จึงได้มีการนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาทำงานร่วมกับแบตเตอรี่เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากขึ้น

สรุป

จากการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์ ที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งเก็บกักพลังงาน พบว่า กระแสที่วัดได้จากมอเตอร์นั้นค่อนข้างน้อย สามารถดูได้จากตารางทดสอบที่ (2) ซึ่งเมื่อทำการต่อวงจรของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพิ่มเข้าไปในระบบ จะเห็นได้ว่ากระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยสามารถเทียบได้จากตารางทดสอบที่ (1) ซึ่งสังเกตได้ว่ากระแสที่เพิ่มขึ้นจะมีระยะเวลาอยู่ประมาณ 5 วินาที แล้วก็ลดลงมาอยู่ที่กระแสเดิม จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นมีการจ่ายพลังงานที่สูงในระยะเวลาที่รวดเร็ว ช่วยเสริมกระแสขณะที่มอเตอร์สตาร์ทได้เป็นอย่างดี แต่ก็ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้นานซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นแหล่งพลังงานหลักได้ หากต้องการให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงานได้นานยิ่งขึ้น ควรเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุให้มีค่าสูงขึ้น และจะเป็นการทำงานวิจัยในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตเชียงรายที่ได้สนับสนุนการศึกษา และให้สถานที่ในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

วรวิศ กอปรสิริพัฒน์. (2557). **ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**. 1-6.

วิชณู ทองสัมฤทธิ์, ทศพล ทังรอด. (2552).

รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless

DC Motor. ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า. คณะ

ครุศาสตร์อุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

A.K.Wallace and R.Spee. (1990). The effects of motor parameters on the performance of brushless DC drive. **IEEE Transactions on Power Electronics**. January 1990 (vol.5, no.1), 2-8.

B. E. Conway. (1999). **Electrochemical supercapacitors, undamentals and technological applications**.

AcademicPlenum Publisher. New York.

B. Tibor, V. Fedak and F. Durovsk. (2011).

Modelong And Simulation of the

BLDC Motor in MATLAB GUT.

Chan, T.F, Yan, L.T. and Fang, S.Y., (2002).

In- wheel permanent-magnet brushless dc motor drive for an electric bicycle. **IEEE Transactions on energy conversion**.

June 2002 (vol.17, no.2), 229 – 233.

- De Castro, R.; Pnto, C.; Araujo, R.E. (2012). **Optimal Sizing and Energy Management of Hybrid Storage System**. In Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul. Korea. 9–12 October.
- F. A. Burke. (2003). **Ultracapacitors: Present and Future**. Proceedings of the Advanced Capacitor World Summit. Washington. D.C.
- Kahveci, H., Okumus, H.I. and Ekici, M., (2014). Improved brushless DC motor speed controller with digital signal processor. **IET Journals & Magazines**. June 2014 (vol.50, no.12), 864 – 866.
- Kotz, R. and Carlen, M. (2000). **Electrochimica Acta 45**, 2483-2498.
- Lukic, S.M.; Wirasingha, S.G.; Rodrigue, F. (2006). **Power Management of an Ultracapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System in an HEV**. In Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference, Windsor, UK, 6–8 September.
- Ortuzar, M.; Moreno, J.; Dixon, J. (2007). **Ultracapacitor-based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation**. IEEE Trans. Ind. Electron. (54). 2147–2156.
- P.Pillay and R.Krishnan. (1989). Modeling. Simulation and Analysis of Permanent-magnet Motor Drives. part II: The brushless DC Motor Drive. **IEEE Transactions on Industry applications**. march/April. 1989 (vol.25, no.2).