

# การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน

นายภาคภูมิ ทิพย์ประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน

นายภาคภูมิ ทิพย์ประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**

**เรื่อง** การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน

**โดย** นายภาคภูมิ ทิพย์ประเสริฐ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ติกะ บุนนาค)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์สิทธิพร ใหญ่ธนายศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

ชื่อ : นายภาคภูมิ ทิพย์ประเสริฐ
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน
สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ สิทธิพร ใหญ่ธนายศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์
ปีการศึกษา : 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการอนุรักษ์พลังงานในระบบไฟฟ้าผ่านการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อย โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขนาดหน้าตัดตัวนำที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสีย พฤติกรรมทางความร้อน และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ตลอดอายุโครงการ ผ่านกรณีศึกษาการทดสอบสายไฟฟ้าชนิด IEC01 (THW) ใน 2 รูปแบบ คือ กรณีที่ 1 (ภาระโหลด 22.4 แอมแปร์) และกรณีที่ 2 (ภาระโหลด 29.6 แอมแปร์) บนระยะทางติดตั้ง 20 เมตร (ไป-กลับ 40 เมตร) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเลือกขนาดสายไฟฟ้าที่ใหญ่ขึ้นกว่ามาตรฐานขั้นต่ำเพียงหนึ่งลำดับ สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรย่อยลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในกรณีศึกษาที่ 1 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 38.94% และกรณีศึกษาที่ 2 ลดลงได้ 39.58% นอกจากด้านพลังงานแล้ว ยังพบว่าอุณหภูมิสะสมที่เปลือกนอกของสายไฟฟ้าลดลงเฉลี่ย 9.1 - 9.8 °C ซึ่งช่วยลดการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าและเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน ในเชิงเศรษฐศาสตร์ ผลการวิเคราะห์พบว่าการลงทุนในส่วนต่างค่าสายไฟฟ้าสำหรับการอนุรักษ์พลังงานนั้นให้ความคุ้มค่าในระดับสูงมาก โดยกรณีศึกษาที่ 2 ให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงถึง 7,546.91 บาท และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) สูงถึง 193.80% โดยทั้งสองกรณีศึกษามีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ที่รวดเร็วเพียง 5.4 ถึง 6.2 เดือน สรุปผลการวิจัยยืนยันว่าการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยโดยใช้หลักการประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficient Sizing) เป็นวิธีการอนุรักษ์พลังงานที่ทำได้ง่าย แต่ให้ผลตอบแทนทางการเงินที่คุ้มค่าและยั่งยืน เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้าอาคารเพื่อลดต้นทุนการดำเนินงานในระยะยาว

(มีจำนวนทั้งสิ้น 108 หน้า)

คำสำคัญ : วงจรย่อย, การเลือกขนาดสายไฟฟ้า, การอนุรักษ์พลังงาน, มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)




อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Pakpoom Thipprasert
Thesis Title : A study on selecting wire sizes of sub-circuits for energy conservation
Major Field : Energy Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Sittiporn Yaitranayot
Co-Advisor : Associate Professor Dr. Preeda Chantawong
Academic Year : 2025

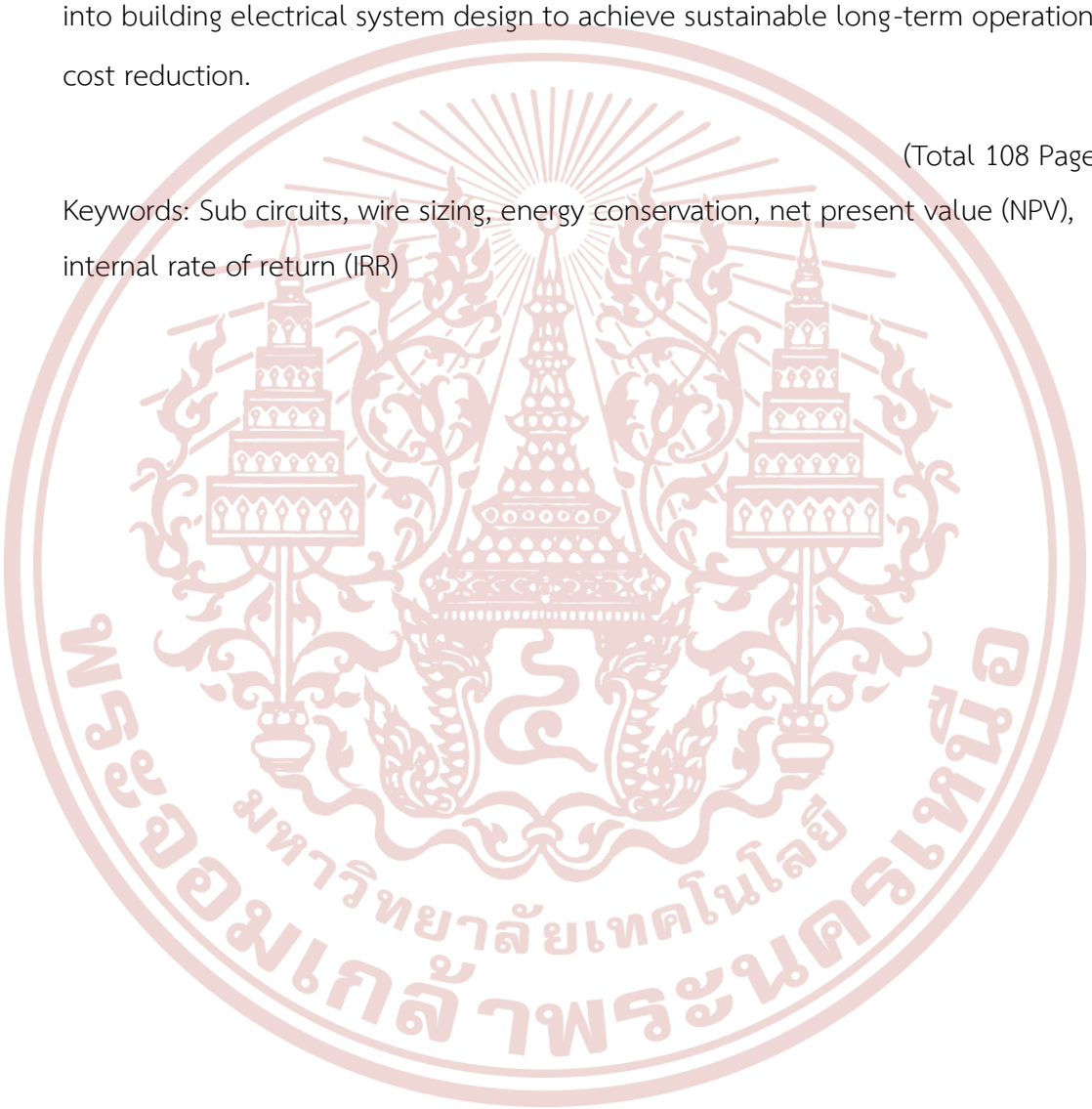
## ABSTRACT

This research presents a practical approach to electrical energy conservation through optimal conductor sizing in branch circuit design. The study systematically evaluates the influence of conductor cross-sectional area (CNA) on power losses, thermal performance, and lifecycle economic feasibility. Experimental case studies were conducted using IEC01 (THW) copper conductors under two load conditions: Case 1 (22.4 A) and Case 2 (29.6 A), with an installation length of 20 m (40 m round-trip conductor length). The results demonstrate that selecting a conductor size one level higher than the minimum requirement specified by electrical standards significantly reduces resistive power losses in branch circuits. Power loss reductions of 38.94% and 39.58% were achieved in Case 1 and Case 2, respectively. In addition to electrical loss mitigation, the average surface temperature of the cable sheath decreased by approximately 9.1–9.8 °C, thereby mitigating insulation thermal stress, reducing degradation rates, and enhancing operational safety. From an economic perspective, lifecycle cost analysis confirms the financial viability of the proposed Energy Efficient Sizing approach. Case 2 exhibited a maximum Net Present Value (NPV) of 7,546.91 THB and an Internal Rate of Return (IRR) of 193.80%. Both case studies demonstrated short payback periods ranging from 5.4 to 6.2 months, indicating strong investment attractiveness. In conclusion, the findings validate that

optimized conductor sizing for branch circuits, based on the Energy Efficient Sizing principle, represents a technically simple yet highly effective energy conservation strategy. The approach offers measurable reductions in energy loss, improved thermal reliability, and favorable economic returns, making it suitable for integration into building electrical system design to achieve sustainable long-term operational cost reduction.

(Total 108 Pages)

Keywords: Sub circuits, wire sizing, energy conservation, net present value (NPV), internal rate of return (IRR)




_____ Advisor

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ สิทธิพร ใหญ่ธนายศ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางที่ถูกต้อง และเอาใจใส่ตรวจทานข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเมตตาเสมอมา จนทำให้งานวิจัยเรื่อง “การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน” เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบงานวิจัยทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและแนะแนวทางในการปรับปรุงเนื้อหาให้มีความถูกต้องตามหลักวิชาการ ขอบคุณ ดร. สุเมธ สถิตบุญอนันต์ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบเก็บข้อมูล รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมชุดทดลองอย่างดียิ่ง

นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนทั้งในด้านกำลังใจและกำลังทรัพย์ในการศึกษาเล่าเรียนเสมอมา ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือในการรวบรวมข้อมูลและจัดทำรายงานเล่มนี้

สุดท้ายนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ออกแบบระบบไฟฟ้า ผู้ประกอบการ และผู้ที่สนใจในด้านการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวมและประเทศชาติต่อไป

ภาคภูมิ ทิพย์ประเสริฐ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ซ

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย ..... 2

1.4 สมมติฐานของการวิจัย ..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 3

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ ..... 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 5

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ..... 5

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 10

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย ..... 13

3.1 การกำหนดตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ..... 13

3.2 ขั้นตอนการทดลองและเก็บข้อมูล ..... 20

3.3 แบบจำลองการคำนวณทางทฤษฎี ..... 28

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ ..... 30

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล ..... 34

4.1 สรุปผลการทดลองและพารามิเตอร์หลัก ..... 35

4.2 การวิเคราะห์ร้อยละการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ..... 38
4.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน ..... 39
4.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิสะสมเชิงเวลา ..... 42
4.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียตามทฤษฎีและจากการทดสอบ ..... 44
4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ..... 46
4.7 สรุปและอภิปรายผลจากการวิเคราะห์ ..... 49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ ..... 51
5.1 สรุปผลการวิจัย ..... 51
5.2 อภิปรายผลการวิจัย ..... 51
5.3 ข้อเสนอแนะ ..... 52
บรรณานุกรม ..... 54
ภาคผนวก ก ..... 55
คุณลักษณะทางเทคนิคและใบรับรองการสอบเทียบของอุปกรณ์เครื่องมือวัด ..... 55
ภาคผนวก ข ..... 90
ข้อกำหนดทางเทคนิคจากผู้ผลิตของสายไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดลอง ..... 90
ภาคผนวก ค ..... 93
ตารางข้อมูลการบันทึกผลจากการทดลอง 8 ชั่วโมง ..... 93
ภาคผนวก ง ..... 98
ตัวอย่างการคำนวณ ..... 98
ภาคผนวก จ ..... 103
ภาพการดำเนินการทดลอง ..... 103
ประวัติผู้เขียน ..... 108

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 แสดงการปรับตั้งกระแสทดสอบของสายไฟฟ้าตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 1..... 23
ตารางที่ 3-2 แสดงการปรับตั้งกระแสทดสอบของสายไฟฟ้าตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 2..... 25
ตารางที่ 4-1 สรุปค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสายไฟฟ้าทุกชุดการทดลอง (ชั่วโมงที่ 6- 8)..... 35
ตารางที่ 4-2 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของผลการทดสอบ..... 37
ตารางที่ 4-3 สรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ (ชั่วโมงที่ 6-8)... 38
ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการทดสอบและจากค่าทางทฤษฎี..... 45
ตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และดัชนีชี้วัดความคุ้มค่า (อายุโครงการ 15 ปี)..... 47

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

# สารบัญรูปภาพ

หน้า


ภาพที่ 2-1 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของการควบคุมแบบ Phase Angle Control..... 8
ภาพที่ 2-2 แผนผังแสดงหลักการทำงานของหม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer)..... 9
ภาพที่ 2-3 รูปแบบซอฟต์แวร์ Metasys..... 10
ภาพที่ 3-1 สายไฟฟ้า IEC01(THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. ที่ใช้ในการทดลอง..... 15
ภาพที่ 3-2 สายไฟฟ้า IEC01(THW) ขนาด 4 ตร.มม. ที่ใช้ในการทดลอง..... 15
ภาพที่ 3-3 สายไฟฟ้า IEC01(THW) ขนาด 6 ตร.มม. ที่ใช้ในการทดลอง..... 15
ภาพที่ 3-4 ชุดเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter) รุ่น PM2200 Schneider..... 16
ภาพที่ 3-5 ชุดอุปกรณ์หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า CT รุ่น MSQ-30 CT Qubix..... 16
ภาพที่ 3-6 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) รุ่น NAE Johnson Controls..... 17
ภาพที่ 3-7 คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ Metasys เวอร์ชั่น 7.0.0.4400..... 17
ภาพที่ 3-8 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นดิจิทัล รุ่น XIAOMI YOUPIN MIIIW..... 18
ภาพที่ 3-9 กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera) รุ่น THT300 HT ITALIA..... 18
ภาพที่ 3-10 โหลดฮีตเตอร์แบบครีบ (Finned Heater) ขนาดพิกัด 10 กิโลวัตต์ 230 โวลต์..... 19
ภาพที่ 3-11 เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (SCR Power Regulator) รุ่น W5SP4V045-24J WATT ขนาดพิกัด 45 แอมแปร์ 230 โวลต์ 1 เฟส..... 19
ภาพที่ 3-12 แผนผังแสดงการต่อวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 20
ภาพที่ 3-13 แสดงการติดตั้งวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 21
ภาพที่ 3-14 แสดงรายละเอียดด้านเทคนิคของสายไฟฟ้าตามที่ผู้ผลิตระบุ..... 22
ภาพที่ 3-15 แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 1..... 24
ภาพที่ 3-16 แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 1..... 24
ภาพที่ 3-17 แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 2..... 25
ภาพที่ 3-18 แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 6 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 2..... 25
ภาพที่ 3-19 แสดงการวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงวัดกระแส (CT) ด้านต้นทาง (CT IN) และด้านปลายทาง (CT OUT)..... 26
ภาพที่ 3-20 แสดงการการทำงานของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter)..... 27
ภาพที่ 3-21 แสดงการบันทึกข้อมูลผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)..... 27

ภาพที่ 3-22 แสดงการบันทึกค่าอุณหภูมิแวดล้อมของบริเวณพื้นที่ทดสอบและการบันทึกค่าอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้าตัวอย่างแต่ละชุดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน..... 28
ภาพที่ 3-23 แสดงการวัดค่า Pin และ Pout จากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า..... 30
ภาพที่ 4-1 แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 2.5 ตร.มม. ที่กระแส 22.4 แอมแปร์..... 40
ภาพที่ 4-2 แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 4 ตร.มม. ที่กระแส 22.4 แอมแปร์..... 40
ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวฉนวนของสายไฟฟ้า ในกรณีศึกษาที่ 1..... 40
ภาพที่ 4-4 แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 4 ตร.มม. ที่กระแส 29.6 แอมแปร์..... 41
ภาพที่ 4-5 แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 6 ตร.มม. ที่กระแส 29.6 แอมแปร์..... 41
ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวฉนวนของสายไฟฟ้า ในกรณีศึกษาที่ 2..... 42
ภาพที่ 4-7 กราฟเปรียบเทียบแนวโน้มกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิสะสมตลอด 8 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 1..... 43
ภาพที่ 4-8 กราฟเปรียบเทียบแนวโน้มกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิสะสมตลอด 8 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 2..... 44

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลกและประเทศไทยมีแนวโน้มพุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามการขยายตัวของภาคเศรษฐกิจและที่อยู่อาศัย ส่งผลให้การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพกลายเป็นประเด็นสำคัญในระดับยุทธศาสตร์ชาติ อย่างไรก็ตาม ในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามักเกิดการสูญเสียพลังงาน (Power Loss) ขึ้นในสายตัวนำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะความสูญเสียในรูปของความร้อนที่เกิดจากความต้านทานภายในตัวนำ หรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์ $(I^2 R_{Loss})$ ซึ่งการสูญเสียนี้ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม แต่ยังหมายถึงการเผาผลาญทรัพยากรธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นในการผลิตไฟฟ้า และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน

ปัญหาสำคัญที่มักพบในการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าในปัจจุบันคือ การเลือกขนาดสายไฟฟ้าโดยมุ่งเน้นเพียง “พิกัดกระแสสูงสุด (Ampacity)” และ “ต้นทุนการติดตั้งเริ่มแรก (Initial Cost)” เพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำความปลอดภัยและประหยัดงบประมาณ แต่ละเลยการพิจารณาถึง “ต้นทุนการสูญเสียพลังงานในระยะยาว (Life Cycle Loss Cost)” เมื่อสายไฟฟ้ามีขนาดเล็กเกินไปแม้จะยังอยู่ในพิกัดความปลอดภัย แต่จะส่งผลให้มีความต้านทานสะสมสูง เกิดความร้อนสะสมในระดับที่อาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของฉนวน และทำให้เกิดแรงดันตก (Voltage Drop) ที่ปลายสาย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ไฟฟ้าและความเสถียรของระบบ

การศึกษานี้จึงเล็งเห็นถึงความสำคัญในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานของสายไฟฟ้าชนิด IEC01 (THW) ซึ่งเป็นสายไฟฟ้าพื้นฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวงจรย่อยของระบบไฟฟ้า ทั้งในภาคที่อยู่อาศัยและพาณิชยกรรม โดยมุ่งเน้นการเปรียบเทียบขนาดหน้าตัด 2.5 ตร.มม., 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. ภายใต้สภาวะโหลดจริง เพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่าการเลือกขนาดสายไฟฟ้าที่เหมาะสม (Oversizing) เหนือกว่ามาตรฐานขั้นต่ำเพียงเล็กน้อย จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิผิวฉนวน ลดหน่วยพลังงานสูญเสีย และสร้างความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้อย่างเป็นรูปธรรม เพื่อรองรับเป้าหมายการเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี พ.ศ. 2593 ในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency) ตั้งเป้าลดความเข้มการใช้พลังงาน (Energy Intensity) ตามแผนพลังงานชาติ (NEP) ของประเทศไทย

**1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาดต่างๆ ภายใต้สภาวะโหลดคงที่ผ่านการทดสอบจริง

2. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงวิศวกรรมระหว่างขนาดหน้าตัดของตัวนำ อุณหภูมิผิวฉนวน และแรงดันตกที่เกิดขึ้นในสภาวะการใช้งานต่อเนื่อง

3. เพื่อประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) และผลตอบแทนจากการลงทุนในการเลือกขนาดสายไฟฟ้าเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

**1.3 ขอบเขตของการวิจัย**

1. ศึกษาเฉพาะสายไฟฟ้าชนิดแกนเดี่ยวเปลือกฉนวน PVC รหัสชนิด IEC01 (THW) ขนาดหน้าตัดตัวนำ 2.5 ตร.มม., 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. ตามมาตรฐาน มอก. 11-2553 เท่านั้น

2. ใช้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 2 สาย แรงดันระบุ 230 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ให้กับโหลดฮีตเตอร์แบบครีบ ขนาดพิกัด 10 กิโลวัตต์

3. กำหนดระดับกระแสไฟฟ้าทดสอบอ้างอิงจาก ร้อยละ 80 ของพิกัดทนกระแสไฟฟ้าจากผู้ผลิตของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาดหน้าตัดตัวนำ 2.5 ตร.มม. และ 4 ตร.มม. ที่ค่าคงที่ 22.4 แอมแปร์ และ 29.6 แอมแปร์ โดยมีความยาวสายไฟฟ้าชุดละ 20 เมตร

4. ทำการบันทึกข้อมูลทางไฟฟ้าและอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อการทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิห้องปกติ

5. วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss) ที่เกิดขึ้นในสายไฟฟ้าตลอดช่วงการทดลอง โดยจากการใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าบันทึกข้อมูลที่วัดได้จริงระหว่างต้นทางและปลายทางของชุดทดลองในสภาวะโหลดคงที่ เพื่อแสดงผลต่างของพลังงานที่ประหยัดได้ในแต่ละขนาดหน้าตัดตัวนำ

6. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวเปลือกนอกของสายไฟฟ้า (Surface Temperature) กับระยะเวลาการใช้งานในสภาวะโหลดต่อเนื่อง โดยจากการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดค่าอุณหภูมิ เพื่อประเมินผลกระทบของความร้อนสะสมที่มีต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าในแต่ละขนาดหน้าตัดตัวนำ

7. วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยอ้างอิงอัตราค่าไฟฟ้าฐานและสูตรการปรับปรุงค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft) สำหรับประเภทกิจการขนาดเล็กหรือที่อยู่อาศัย

**1.4 สมมติฐานของการวิจัย**

การเลือกขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้าที่ใหญ่ขึ้นกว่ามาตรฐานขั้นต่ำ 1 ระดับ แม้จะเพิ่มต้นทุนการติดตั้งเบื้องต้น แต่จะสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปของความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนที่คุ้มค่า และช่วยลดผลกระทบทางความร้อนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐานของระบบไฟฟ้า

**1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ทราบถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและพลังงานสูญเสียจริงในสายไฟฟ้าแต่ละขนาด เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนเชิงเทคนิคในการออกแบบระบบไฟฟ้า

2. สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเลือกขนาดสายไฟฟ้าเพื่อการอนุรักษ์พลังงานและการลดค่าใช้จ่ายในระยะยาว

3. ใช้เป็นข้อมูลในด้านความสูญเสียแผ่งในระบบไฟฟ้าวงจรย่อย ซึ่งส่งผลต่อการอนุรักษ์พลังงานในระดับมหภาค

**1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ**

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกันในการนำเสนอผลการวิจัย จึงได้กำหนดนิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไว้ดังนี้:

1. สายไฟฟ้า IEC01 (THW): หมายถึง สายไฟฟ้าตัวนำทองแดงแกนเดี่ยว หุ้มด้วยฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ทนแรงดันไฟฟ้าได้ไม่เกิน 450/750 โวลต์ และมีอุณหภูมิตัวนำสูงสุดไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน มอก. 11-2553

2. วงจรย่อย (Branch Circuit): หมายถึง ส่วนหนึ่งของระบบการเดินสายไฟฟ้าที่ขยายออกไปจากอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินตัวสุดท้าย (เช่น เบรกเกอร์ในแผงย่อย) จนถึงจุดจ่ายไฟหรือโหลดไฟฟ้า

3. กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($P_{loss}$): หมายถึง พลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานของตัวนำสายไฟฟ้า คำนวณได้จากความต่างของกำลังไฟฟ้าด้านต้นทางและปลายทาง หรือ $I^2R$

4. สภาวะคงตัว (Steady State): หมายถึง สภาวะในการทดลองที่พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิผิวฉนวน หรือแรงดันไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งในการวิจัยนี้อ้างอิง ณ ชั่วโมงที่ 6 ถึง 8 ของการทดสอบ

5. การเลือกขนาดสายไฟฟ้าที่ใหญ่ขึ้น (Oversizing): หมายถึง การเลือกใช้ขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้าที่ใหญ่กว่าขนาดขั้นต่ำที่มาตรฐานความปลอดภัยกำหนดไว้หนึ่งระดับ เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดพลังงานสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

6. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period): หมายถึง ระยะเวลาที่ผลรวมของมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้สะสม มีค่าเท่ากับส่วนต่างของต้นทุนการจัดซื้อสายไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

7. อุณหภูมิผิวฉนวน ($T_{surface}$): หมายถึง อุณหภูมิที่วัดได้บริเวณเปลือกนอกของสายไฟฟ้าขณะใช้งาน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนหรือเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสในการบันทึกผล

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

# บทที่ 2
# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทั้งในด้านทฤษฎีพื้นฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้า มาตรฐานการติดตั้ง และงานวิจัยเชิงวิชาการ เพื่อใช้เป็นกรอบแนวคิดหลักในการวิเคราะห์ผลการทดลองและการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

โดยเนื้อหาในบทนี้จะครอบคลุมประเด็นสำคัญอันประกอบด้วย หัวข้อหลักทางทฤษฎีที่ว่าด้วยความต้านทานไฟฟ้า ผลกระทบของอุณหภูมิต่อตัวนำ และหลักการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ต่อด้วยมาตรฐานการเลือกขนาดสายไฟฟ้าตามเกณฑ์ความปลอดภัยและการอนุรักษ์พลังงาน รวมถึงหลักการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงิน และส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุปประเด็นสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการอภิปรายผลการวิจัยในลำดับต่อไป

## 2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance) ความต้านทานในสายตัวนำไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความสูญเสียในรูปของความร้อน โดยค่าความต้านทาน (R) จะแปรผันตรงกับความยาวของสาย (L) และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด (A) ดังสมการ:

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{2-1}$$

โดยที่ $\rho$ (Rho) คือค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุ (สำหรับทองแดงมีค่าประมาณ 1.72 x $10^{-8}$ $\Omega$.m) ซึ่งความต้านทานนี้เองที่เป็นอุปสรรคต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าและเป็นต้นกำเนิดของพลังงานสูญเสียในระบบ

2. ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทาน (Temperature Coefficient) เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายไฟ จะเกิดความร้อนทำให้อุณหภูมิของตัวนำสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นตามสมการ:

$$R_t = R_{ref} [1 + \alpha (t - t_{ref})] \tag{2-2}$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า $\alpha$ ของทองแดงเท่ากับ 0.00393 เพื่อปรับปรุงค่าความต้านทานขณะทดสอบจริง เนื่องจากในสภาวะการใช้งานจริง อุณหภูมิผิวสายจะสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้ความสูญเสียเพิ่มขึ้นมากกว่าการคำนวณที่อุณหภูมิอ้างอิงปกติ

3. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ($I^2R_{Loss}$) ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส พลังงานจะสูญเสียทั้งในสายเส้นไฟ (Line) และสายนิวทรัล (Neutral) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมคำนวณได้จาก:

$$P_{loss} = 2 \times \boldsymbol{I^2} \times R_{AC} \tag{2-3}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า แม้ความต้านทานจะลดลงเพียงเล็กน้อยจากการเพิ่มขนาดหน้าตัดสาย แต่จะส่งผลต่อการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียอย่างมากเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรยกกำลังสอง

4. ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) ปรากฏการณ์ทางผิวคือสภาวะที่กระแสไฟฟ้าสลับมีความหนาแน่นบริเวณผิวของตัวนำสูงกว่าบริเวณแกนกลาง ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลลดลง และค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับ ($R_{AC}$) มีค่าสูงกว่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าตรง ($R_{DC}$) โดยความลึกของผิวที่กระแสไหล (Skin Depth: $\delta$) สามารถคำนวณได้จาก:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \tag{2-4}$$

โดยที่:

$\rho$ คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ ($\Omega$.m)

$\omega$ คือ ความถี่เชิงมุม ($2\pi f$)

$\mu$ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability)

และอัตราส่วนความต้านทานที่เพิ่มขึ้นสามารถพิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ $\boldsymbol{x_s}$ :

$$R_{AC} = R_{DC}\,(1 + \boldsymbol{y_s}) \tag{2-5}$$

(โดยที่ $\boldsymbol{y_s}$ คือ Skin Effect Factor ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดและความถี่)

หมายเหตุจากการวิเคราะห์: สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้สายไฟฟ้าขนาดเล็ก (ไม่เกิน 6 ตร.มม.) ที่ความถี่ 50Hz ค่า Skin Depth ของทองแดงจะอยู่ที่ประมาณ 8.5 mm ซึ่ง มากกว่า รัศมีของสายไฟฟ้าที่คุณใช้ ดังนั้นผลของ Skin Effect จึงมีค่าน้อยมาก (ใกล้เคียง 1) แต่ผู้วิจัยยังคงเลือกใช้ค่า $R_{AC}$ จากตารางมาตรฐานเพื่อความแม่นยำสูงสุดในการวิเคราะห์พลังงานสูญเสีย

5. มาตรฐานการติดตั้งไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย (วสท. 022001-22) มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) กำหนดพิกัดการทนกระแสของสายไฟฟ้าโดยเน้นที่ความปลอดภัยเพื่อไม่ให้ฉนวนเสียหายจากความร้อนเกิน 70 องศาเซลเซียส สำหรับสาย IEC01 อย่างไรก็ตาม มาตรฐานนี้เป็น "เกณฑ์ขั้นต่ำ" ซึ่งหากมีการใช้งานโหลดต่อเนื่องยาวนาน การเลือกสายขนาดใหญ่กว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะช่วยลดแรงดันตก (Voltage Drop) และเพิ่มประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานได้ดีกว่า

6. แนวคิดการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Engineering Economic Analysis) ในการพิจารณาเลือกขนาดสายไฟฟ้าที่ใหญ่ขึ้นเพื่อลดความสูญเสีย จำเป็นต้องวิเคราะห์ว่า "เงินที่จ่ายเพิ่มในวันนี้" คุ้มค่ากับ "ค่าไฟที่ประหยัดได้ในอนาคต" หรือไม่ โดยใช้ตัวชี้วัดหลักดังนี้:

6.1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือการคำนวณผลรวมของกระแสเงินสด (เงินที่ประหยัดได้) ในแต่ละปี แล้วคิดลด (Discount) กลับมาเป็นมูลค่าปัจจุบัน เพื่อเปรียบเทียบกับเงินลงทุนเบื้องต้น (ส่วนต่างราคาสายไฟ)

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I_0 \qquad (2\text{-}6)$$

โดยที่:

$CF_t$ คือ กระแสเงินสดสุทธิในแต่ละปี (ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้)

$i$ คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) หรืออัตราดอกเบี้ยอ้างอิง

$n$ คือ อายุการใช้งานของระบบไฟฟ้า (เช่น 15-20 ปี)

$I_0$ คือ เงินลงทุนส่วนเพิ่ม (ส่วนต่างราคาจากสาย 2.5 เป็น 4 หรือ 4 เป็น 6)

เกณฑ์ตัดสิน: หาก **NPV > 0** แสดงว่าการลงทุนเพิ่มขนาดสายไฟมีความคุ้มค่า

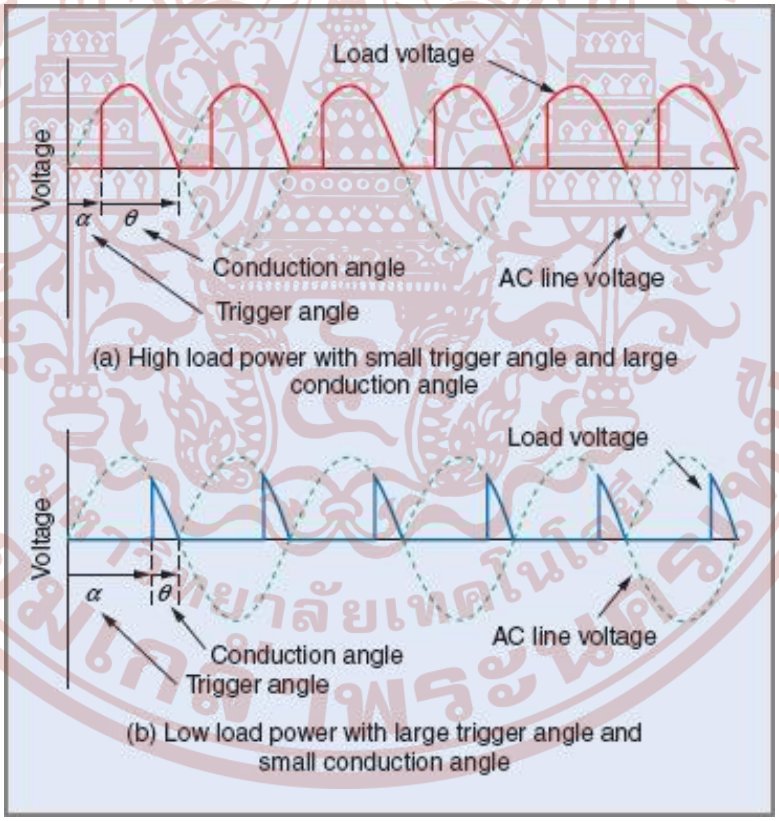
6.2) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คืออัตราคิดลดที่ทำให้ค่า NPV เท่ากับศูนย์ หรือเป็นอัตราผลตอบแทนที่แท้จริงของการลงทุนนี้

$$0 = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - I_0 \qquad (2\text{-}7)$$

เกณฑ์ตัดสิน: หากค่า IRR ที่คำนวณได้ "สูงกว่า" อัตราดอกเบี้ยเงินกู้หรืออัตราผลตอบแทนที่คาดหวัง แสดงว่าการลงทุนนั้นน่าสนใจ

6.3) ระยะเวลาคืนทุนที่คิดลด (Discounted Payback Period) เป็นการหาระยะเวลา (ปี) ที่กระแสเงินสดรับ (ที่คิดมูลค่าปัจจุบันแล้ว) จะเท่ากับเงินลงทุนเบื้องต้น ซึ่งแม่นยำกว่าการคิดแบบ Simple Payback เพราะพิจารณาเรื่องค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money)

7. ทฤษฎีการทำงานของเครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (SCR Phase Control) เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ SCR (Silicon Controlled Rectifier) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำงานด้วยหลักการ การควบคุมมุมจุดชนวน (Phase Angle Control) ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดฮีตเตอร์ โดยการตัดลูกคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในแต่ละไซเคิล

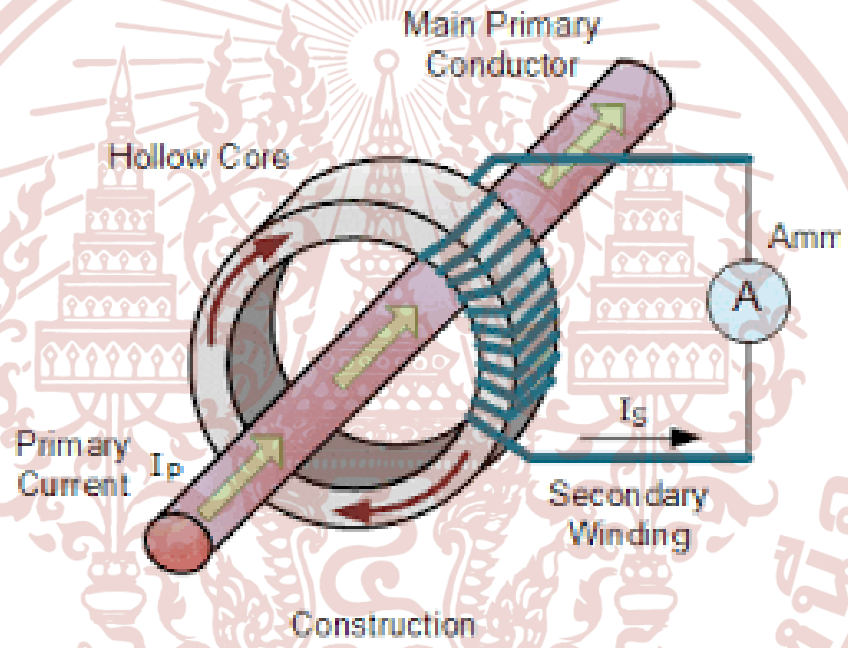



**ภาพที่ 2-1** ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของการควบคุมแบบ Phase Angle Control (Electrical Academia, 2022)

หลักการทำงานคือ SCR จะเริ่มนำกระแสเมื่อได้รับสัญญาณพัลส์ (Gate Trigger) ณ มุมที่กำหนด ($\alpha$) และจะหยุดนำกระแสเมื่อแรงดันลูกคลื่นผ่านจุดศูนย์ (Zero Crossing) การปรับมุม $\alpha$

จะทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ย (RMS Voltage) ที่จ่ายให้กับโหลดเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ให้คงที่ตามที่ต้องการทดสอบได้อย่างละเอียดและแม่นยำ

8. หลักการวัดกระแสด้วยหม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer: CT) หม้อแปลงวัดกระแส (CT) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงในสายตัวนำ (Primary) ให้เป็นกระแสไฟฟ้าค่าต่ำ (Secondary) เพื่อให้เหมาะสมและปลอดภัยต่อการวัดด้วย Digital Power Meter โดยมีหลักการดังนี้:



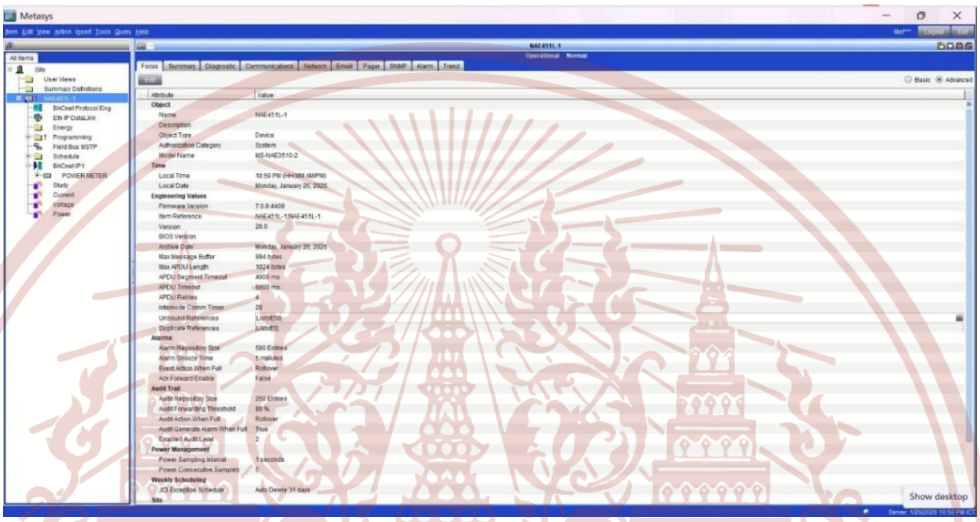

**ภาพที่ 2-2** แผนผังแสดงหลักการทำงานของหม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer) (Electrical Academia, 2022)

8.1) อัตราส่วนการแปลง (Turn Ratio): กระแสทางด้านทุติยภูมิจะแปรผันตามจำนวนรอบของขดลวด เช่น อัตราส่วน 100/5A หมายถึงหากมีกระแสไหลผ่านสายตัวนำ 100A จะมีกระแสออกจาก CT 5A

8.2) ความแม่นยำ (Accuracy Class): ในงานวิจัยนี้พิจารณาใช้ CT ที่มีค่าความผิดพลาดต่ำเพื่อให้ผลต่างของ $P_{in}$ และ $P_{out}$ มีความน่าเชื่อถือที่สุด

8.3) Phase Error: เนื่องจากการวัด Power Loss อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส (Phase Angle) การใช้ CT รุ่นเดียวกันทั้งด้านต้นทางและปลายทางจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนเชิงมุม (Phase Shift) ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า (Watts)

9. ระบบการจัดการข้อมูลและซอฟต์แวร์ Metasys ในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Metasys ซึ่งเป็นระบบการจัดการอาคารอัตโนมัติ (Building Automation System: BAS) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการบริหารจัดการข้อมูล (Data Acquisition) โดยมีบทบาทหลักดังนี้:




**ภาพที่ 2-3** รูปแบบซอฟต์แวร์ Metasys

9.1) การสื่อสารข้อมูล (Integration): Metasys จะเชื่อมต่อกับ Data Logger หรือเครื่องวัดผ่านโปรโตคอลสื่อสารมาตรฐาน (เช่น BACnet หรือ Modbus) เพื่อดึงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจาก Digital Power Meter ทั้งสองชุด

9.2) การบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Trending): ซอฟต์แวร์ถูกตั้งค่าให้บันทึกค่า (Trend Log) กระแส, แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ทุกๆ 5 นาที เพื่อให้เห็นพฤติกรรมความสูญเสียตลอดระยะเวลา 8 ชั่วโมงของการทดสอบ

9.3) การประมวลผลและส่งออกข้อมูล (Data Export): Metasys ช่วยในการจัดระเบียบข้อมูลดิบ (Raw Data) ให้ยงอยู่ในรูปแบบตารางฐานข้อมูล ซึ่งสามารถส่งออก (Export) เป็นไฟล์ .csv หรือ .xlsx เพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติและสร้างกราฟเปรียบเทียบในบทที่ 4 ต่อไป

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2559 - 2569) โดยเรียงลำดับจากอดีตมาจนถึงปัจจุบัน แบ่งเป็นงานวิจัยภายในประเทศและงานวิจัยต่างประเทศ ดังนี้:

สมศักดิ์ และคณะ (2561) ได้ทำการศึกษาการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าภายในอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงาน (Power Quality Analyzer) ตรวจวัดเป็นเวลา 30 วัน ผลการวิจัยพบว่าการใช้สายไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัดกระแสพอดีกับโหลดเกินไป ทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ขั้วต่อสาย (Terminal) และฉนวนสูงถึง 65 °C ซึ่งความร้อนนี้ส่งผลให้ค่าความต้านทานของตัวนำเพิ่มขึ้น และทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($P_{loss}$) สูงกว่าค่าที่คำนวณในสภาวะอุณหภูมิปกติถึงร้อยละ 15 งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิหน้างานมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสูญเสียแฝง

วิชัย (2563) วิจัยเรื่องผลกระทบของแรงดันตกที่มีต่อสมรรถนะของโหลดในวงจรย่อย โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างสายไฟฟ้าขนาดตามมาตรฐานกับสายไฟฟ้าที่เพิ่มขนาดขึ้น 1 ระดับ ผลการทดสอบพบว่าการเพิ่มขนาดสายไม่เพียงแต่ลดความร้อนลง แต่ยังช่วยให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายมีความเสถียรมากขึ้น ลดปัญหาแรงดันตกได้ร้อยละ 5-8 ส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าในวงจรทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและลดอัตราการชำรุดของขดลวดเนื่องจากความร้อนสะสม สรุปได้ว่าการเลือกสายขนาดใหญ่ให้ผลคุ้มค่าทั้งในด้านการอนุรักษ์พลังงานและการบำรุงรักษาอุปกรณ์

ธีรพงษ์ (2565) ศึกษาพฤติกรรมอุณหภูมิของผิวฉนวนสายไฟฟ้าชนิด PVC ภายใต้สภาวะโหลดต่อเนื่อง 8-12 ชั่วโมง พบว่าในชั่วโมงที่ 6 เป็นต้นไป อุณหภูมิผิวสายจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) และหากใช้กระแสใกล้เคียงพิกัดสูงสุด จะเกิดแรงดันตกที่เพิ่มขึ้นเกินกว่าร้อยละ 5 ซึ่งเกินกว่ามาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับการอนุรักษ์พลังงาน งานวิจัยนี้เน้นย้ำว่าการคำนวณขนาดสายไฟฟ้าต้องนำปัจจัยเรื่องระยะทางและเวลาในการใช้งานต่อเนื่องมาพิจารณาร่วมด้วยเสมอ

นิติพงษ์ (2566) ศึกษาการลดหน่วยสูญเสียในสายไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับฟาร์มเกษตรอัจฉริยะ โดยเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งอุปกรณ์ประหยัดพลังงานกับการเปลี่ยนขนาดสายไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้น ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้าให้ค่า NPV (Net Present Value) เป็นบวกมากกว่าการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยประหยัดไฟชนิดอื่น เนื่องจากสายไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 15-20 ปี และไม่มีค่าบำรุงรักษาตลอดอายุโครงการ

ธนวัฒน์ (2567) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณจุดคุ้มทุน (Break-even Point) ของการปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยการเพิ่มขนาดหน้าตัดตัวนำ โดยอ้างอิงจากอัตราค่าไฟฟ้าฐานและค่า Ft ที่ปรับตัวสูงขึ้นในปัจจุบัน ผลการวิเคราะห์ระบุว่าสำหรับโหลดที่ใช้งานมากกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน การลงทุนเพิ่มค่าสายไฟฟ้าจะมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) สั้นลงเหลือเพียง 2.4 ปี และให้ผลตอบแทนการลงทุน (IRR) สูงกว่าร้อยละ 40 ซึ่งเป็นตัวเลขที่จูงใจให้ผู้ประกอบการเปลี่ยนมาใช้เกณฑ์การออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

Garcia et al. (2019) ได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง "Economic Selection of Conductor Size in Distribution Lines" โดยเน้นแนวคิด "Total Life Cycle Cost (TLCC)" งานวิจัยระบุว่าราคาซื้อสายไฟฟ้า (Initial Price) คิดเป็นเพียงร้อยละ 10 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่ค่าพลังงานสูญเสีย (Energy Loss Cost) คิดเป็นร้อยละ 90 ผลสรุปแนะนำว่าการเลือกสายที่ใหญ่กว่ามาตรฐาน 1-2 ระดับ จะช่วยลดต้นทุนรวมตลอด 20 ปี ได้มากกว่าร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับการเลือกสายตามเกณฑ์พิกัดกระแสเพียงอย่างเดียว

Li & Wang (2021) ศึกษาอิทธิพลของกระแสฮาร์มอนิก (Harmonics) ต่อความร้อนในสายไฟฟ้าภายในอาคารพาณิชย์ พบว่าโหลดประเภทคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิด Skin Effect และ Proximity Effect ส่งผลให้ค่าความต้านทานกระแสสลับ ($R_{AC}$) เพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าปกติร้อยละ 10-15 การเลือกขนาดสายไฟฟ้าแบบ Oversizing จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการรองรับโหลดสมัยใหม่เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่มากเกินไป

Santos et al. (2022) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนในตัวนำและความเสื่อมสภาพของฉนวนพอลิเมอร์ พบว่าอุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 10 °C จากการใช้สายขนาดใหญ่ขึ้น จะช่วยชะลอการเกิดกระบวนการ Oxidation ในฉนวน PVC ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นเกือบ 2 เท่า (จาก 15 ปี เป็น 25-30 ปี) ซึ่งถือเป็นความคุ้มค่าแฝงที่ช่วยลดขยะจากสายไฟฟ้าเก่าและลดต้นทุนการเปลี่ยนสายใหม่

Kumar & Singh (2023) ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในระบบวงจรย่อยของโรงงานอุตสาหกรรมด้วยการใช้สายขนาด 6 ตร.มม. แทน 4 ตร.มม. สำหรับโหลดต่อเนื่อง 30 แอมแปร์ ผลการทดสอบเชิงประจักษ์ยืนยันว่าช่วยลด $P_{loss}$ ได้ถึง 15.4 วัตต์ต่อเมตร และมีจุดคุ้มทุนภายใน 1.5 ปี ซึ่งถือเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าที่สุดในบรรดามาตรการประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรม

Miller (2025) ทำการทดลองในระบบ Smart Grid โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิแบบ Real-time พบว่าการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนส่งผลโดยตรงต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2 Emission) งานวิจัยสรุปว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้าทั่วทั้งระบบวงจรย่อยสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 1.2 ตันต่อปีสำหรับอาคารขนาดกลาง สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอาคารสีเขียว (Green Building) ในระดับสากล

# บทที่ 3
# วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน” เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ที่มุ่งเน้นการเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์จากสภาวะการใช้งานจริง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของพฤติกรรมทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างการใช้สายไฟฟ้าตามมาตรฐานความปลอดภัยกับการเลือกใช้สายไฟฟ้าขนาดที่ใหญ่กว่าหนึ่งระดับ (Oversizing) เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

เพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่มีความเที่ยงตรง (Validity) และมีความเชื่อมั่น (Reliability) สูงสุด งานวิจัยนี้ได้กำหนดระเบียบวิธีวิจัยอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการควบคุมตัวแปรในสภาพแวดล้อมจำลอง การคัดเลือกอุปกรณ์วัดที่มีมาตรฐานการสอบเทียบ ไปจนถึงการกำหนดเกณฑ์การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นส่วนหลัก ได้แก่ การกำหนดตัวแปรและอุปกรณ์ การออกแบบผังการทดลอง ขั้นตอนการเก็บข้อมูล และวิธีการวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์:

## 3.1 การกำหนดตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน งานวิจัยนี้ได้กำหนดชุดตัวแปรที่ครอบคลุมปัจจัยทางวิศวกรรมไฟฟ้าที่มีผลต่อความสูญเสีย พร้อมทั้งคัดเลือกเครื่องมือวัดที่มีค่าความละเอียดสูงเพื่อให้ข้อมูลที่บันทึกได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนี้

1. การกำหนดตัวแปรวิจัย: เพื่อให้การทดสอบมีความแม่นยำจะต้องกำหนดตัวแปรดังนี้:

1.1) ตัวแปรต้น (Independent Variable): คือ ปัจจัยที่กำหนดให้แตกต่างกันเพื่อสังเกตผลที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้คือ "ขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้าชนิด IEC01(THW) จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 2.5 ตร.มม., 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. ซึ่งเป็นสายไฟฟ้าทองแดงแกนเดี่ยวหุ้มฉนวน PVC ตามมาตรฐาน มอก. 11-2553 โดยเป็นขนาดของสายไฟฟ้าที่ถูกออกแบบและเลือกใช้งานเป็นอย่างมากในระบบไฟฟ้าวงจรย่อยทั้งในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรมโดยการเลือกขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกันนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของค่าความต้านทาน (R) ที่ลดลงเมื่อขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้น

1.2) ตัวแปรตาม (Dependent Variable): คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น ซึ่งจะทำการวัดและบันทึกค่าในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย:

ค่าความร้อนสะสมในสายไฟฟ้า (Temperature Rise): บันทึกค่าอุณหภูมิที่ผิวของฉนวนสายไฟฟ้า ($T_{surface}$) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

ค่าความต้านทานขณะใช้งานจริง (Actual Resistance): ซึ่งจะแปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะทดสอบ

กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss): ค่าที่ได้จากการคำนวณผ่านผลต่างของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในรูปแบบ $I^2R$ เพื่อหาประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

1.3) ตัวแปรควบคุม (Controlled Variable): คือ ปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าความสูญเสีย ซึ่งต้องควบคุมให้คงที่ตลอดการทดลองเพื่อให้ผลการวิจัยเกิดจากตัวแปรต้นเพียงอย่างเดียว ได้แก่:

ระยะความยาวของสายไฟฟ้า: กำหนดไว้ที่ 20 เมตร เท่ากันทุกชุดทดสอบเพื่อให้ค่าความต้านทานแปรผันตามหน้าตัดเพียงอย่างเดียว

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร: ควบคุมให้คงที่ที่ 22.4 แอมแปร์ และ 29.6 แอมแปร์ ตามชุดการทดสอบ โดยใช้ชุดโหลดจำลองที่เสถียร

อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Ambient Temperature): ทำการทดลองในสภาวะควบคุมและบันทึกค่าอุณหภูมิห้องเพื่อใช้ในการหักลบค่าอุณหภูมิอ้างอิง

แรงดันไฟฟ้าต้นทาง: ควบคุมให้คงที่ที่ 230 โวลต์ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ

2. รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์: เพื่อให้การเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและความร้อนมีความถูกต้องตามหลักวิศวกรรม งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานอุตสาหกรรมและมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ โดยอุปกรณ์แต่ละชนิดมีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบพฤติกรรมของสายไฟฟ้าภายใต้สภาวะโหลดต่อเนื่อง ดังนี้

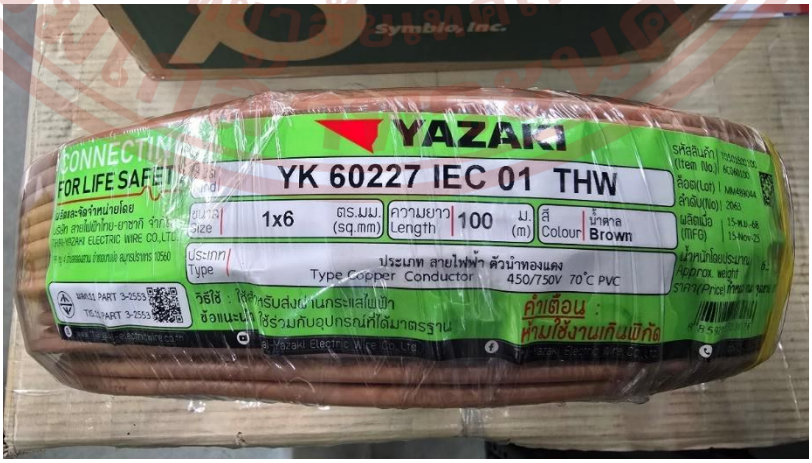
1) สายไฟฟ้า IEC01(THW) (มอก. 11-2553): เป็นตัวแปรหลักในการทดสอบ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้สายไฟฟ้าทองแดงแกนเดี่ยวหุ้มฉนวน PVC ชนิดทนแรงดัน 450/750 โวลต์ ขนาด 2.5 ตร.มม., 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. ยี่ห้อเดียวกันทั้งหมดเพื่อควบคุมคุณภาพวัสดุตัวนำ ซึ่งเป็นสายไฟฟ้ามาตรฐานที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดในวงจรย่อยของอาคาร การเลือกใช้สายที่ได้รับมาตรฐาน มอก. 11-2553 เพื่อให้มั่นใจว่าค่าความต้านทานจำเพาะ ($\rho$) และความหนาของฉนวนเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ทำให้ผลการวัดความร้อนและการสูญเสียพลังงานมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปอ้างอิงกับการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ได้ ดังแสดงอุปกรณ์ในภาพที่ 3-1 ถึง 3-3




**ภาพที่ 3-1** สายไฟฟ้า IEC01(THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. ที่ใช้ในการทดลอง




**ภาพที่ 3-2** สายไฟฟ้า IEC01(THW) ขนาด 4 ตร.มม. ที่ใช้ในการทดลอง




**ภาพที่ 3-3** สายไฟฟ้า IEC01(THW) ขนาด 6 ตร.มม. ที่ใช้ในการทดลอง

2) เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter/Analyzer) และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง: ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดที่มีความสามารถในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าแบบ Real-time ได้แก่ แรงดัน (Voltage), กระแส (Current) และกำลังไฟฟ้า (Active Power) โดยเครื่องมือชนิดนี้จะทำหน้าที่บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าด้านต้นทาง (Pin) และปลายทาง (Pout) เพื่อนำมาหาผลต่าง ซึ่งก็คือ "กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสาย" (Line Loss) การใช้ระบบ Digital Analyzer ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่า (Parallax Error) และสามารถรองรับการวัดค่า True RMS ในกรณีที่โหลดมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นได้ พร้อมกับอุปกรณ์บันทึกและเก็บข้อมูล ดังแสดงอุปกรณ์ในภาพที่ 3-4 ถึง 3-7



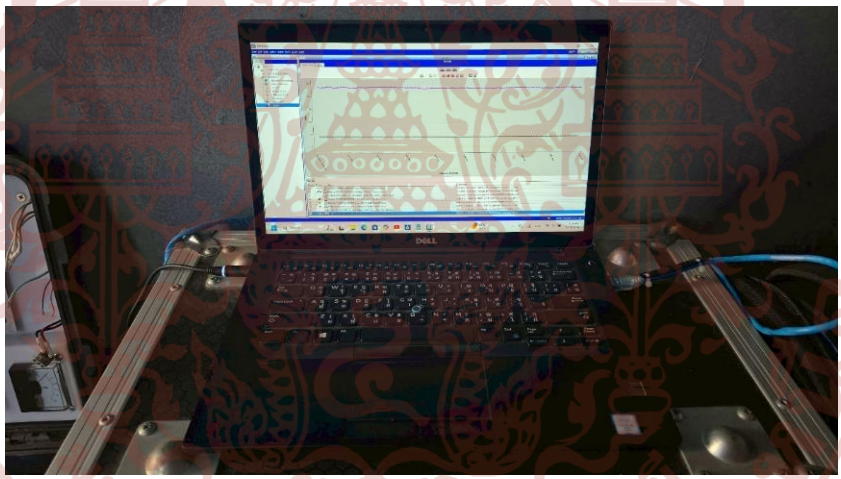

**ภาพที่ 3-4** ชุดเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter) รุ่น PM2200 Schneider



**ภาพที่ 3-5** ชุดอุปกรณ์หม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า CT รุ่น MSQ-30 CT Qubix




**ภาพที่ 3-6** เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) รุ่น NAE Johnson Controls



**ภาพที่ 3-7** คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ Metasys เวอร์ชั่น 7.0.0.4400

3) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer): เนื่องจากอุณหภูมิผิวฉนวนเป็นดัชนีชี้วัดสำคัญของพลังงานสูญเสียในรูปความร้อน ($I^2R_{Loss}$) งานวิจัยนี้จึงใช้เครื่องวัดอุณหภูมิที่มีความแม่นยำสูง โดยมีการใช้ร่วมกันระหว่างดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ (Digital Thermometer) สำหรับวัดอุณหภูมิแวดล้อมบริเวณพื้นที่ทดสอบ และกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera) สำหรับวัดอุณหภูมิผิวสายไฟฟ้า ในการวัดค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง การวัดค่านี้จะช่วยยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามทฤษฎีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ดังแสดงอุปกรณ์ในภาพที่ 3-8 ถึง 3-9

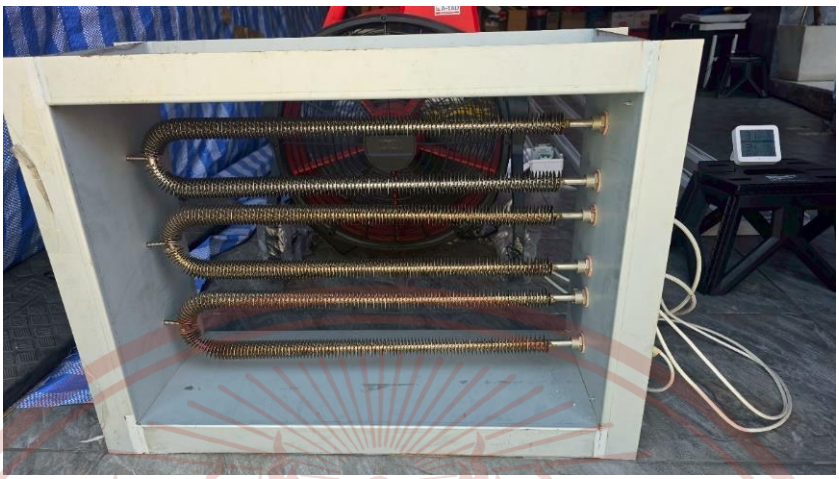



**ภาพที่ 3-8** เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นดิจิทัล รุ่น XIAOMI YOUPIN MIIIW

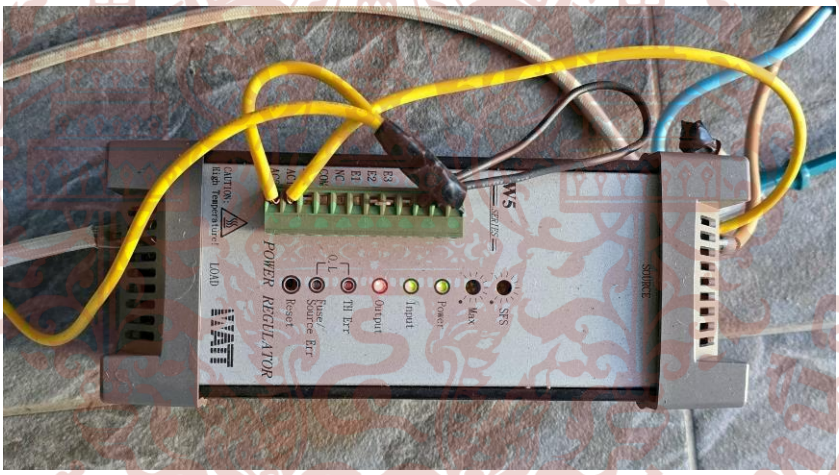



**ภาพที่ 3-9** กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera) รุ่น THT300 HT ITALIA

4) ชุดโหลดจำลอง (Load Bank/Resistive Load): เพื่อให้สภาวะการทดลองมีความคงที่ตลอด 8 ชั่วโมง งานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดโหลดชนิดความต้านทาน (Resistive Load) ที่สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ตามพิกัดที่ต้องการ (22.4 แอมแปร์ และ 29.6 แอมแปร์) โดยใช้เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (SCR Power Regulator) เป็นอุปกรณ์ปรับค่ากระแสไฟฟ้า ข้อดีของการใช้ Resistive Load คือการรักษาค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ให้ใกล้เคียง 1.0 ซึ่งจะช่วยตัดตัวแปรแทรกซ้อนเรื่องกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Reactive Power) ออกไป ทำให้การวิเคราะห์ผลการสูญเสียพลังงานในสายไฟฟ้ามีความชัดเจนและมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ค่าความร้อนในตัวนำเพียงอย่างเดียว ดังแสดงอุปกรณ์ในภาพที่ 3-10 ถึง 3-11



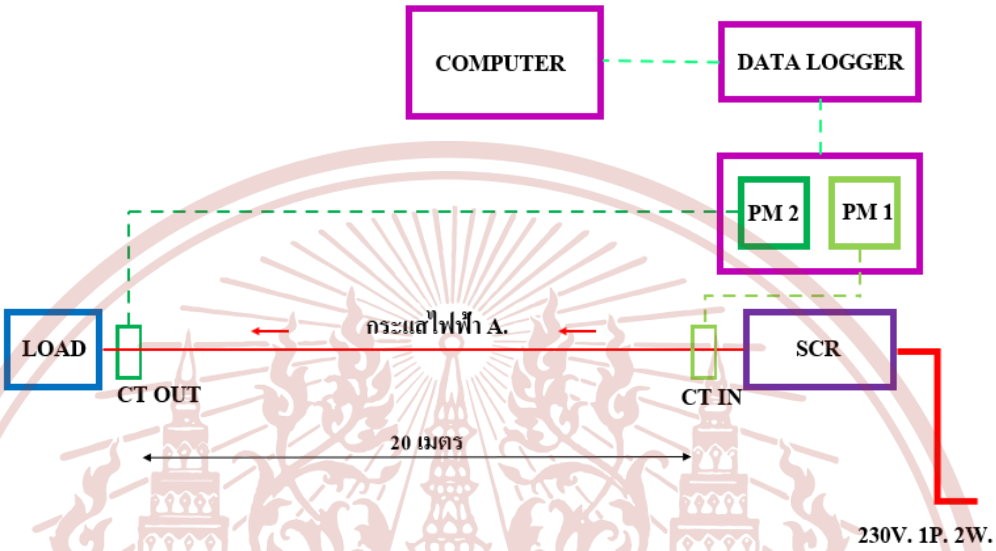
**ภาพที่ 3-10** โหลดฮีตเตอร์แบบครีบ (Finned Heater) ขนาดพิกัด 10 กิโลวัตต์ 230 โวลต์




**ภาพที่ 3-11** เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (SCR Power Regulator) รุ่น W5SP4V045-24J WATT ขนาดพิกัด 45 แอมแปร์ 230 โวลต์ 1 เฟส

"ทั้งนี้ รายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคและใบรับรองการสอบเทียบของอุปกรณ์เครื่องมือวัดทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก"

### 3.2 ขั้นตอนการทดลองและเก็บข้อมูล




**ภาพที่ 3-12** แผนผังแสดงการต่อวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการดำเนินการทดสอบของงานวิจัยนี้ ได้จัดตั้งชุดทดลองเพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงของสายไฟฟ้าภายใต้ภาระโหลดคงที่ โดยทำการทดลองภายในพื้นที่ปิดเพื่อควบคุมปัจจัยด้านกระแสลมที่อาจส่งผลต่อการระบายความร้อนของสายไฟฟ้าตัวอย่าง โดยใช้โครงสร้างระบบตามภาพที่ 3-12 ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานประสานกันของอุปกรณ์ดังนี้:

ระบบเริ่มต้นจากการรับพลังงานไฟฟ้าแรงดัน 230 โวลต์ 1 เฟส ผ่านเข้าสู่เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (SCR Power Regulator) เพื่อทำหน้าที่ปรับค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ตามพิกัดที่กำหนดสำหรับการทดสอบ (22.4 แอมแปร์ และ 29.6 แอมแปร์ ตามลำดับ) โดยพลังงานจะถูกส่งผ่านสายไฟฟ้าตัวอย่างความยาว 20 เมตร ไปยังชุดโหลดฮีตเตอร์แบบครีบ (Finned Heater) ขนาด 10 กิโลวัตต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าเชิงต้านทาน (Resistive Load)

กระบวนการเก็บข้อมูลจะถูกดำเนินการแบบ Real-time โดยใช้หม้อแปลงวัดกระแส (CT) ติดตั้งไว้ 2 จุด คือ ด้านต้นทาง (CT IN) และด้านปลายทาง (CT OUT) ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter) เพื่อประมวลผลค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า จากนั้นข้อมูลจะถูกบันทึกผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) และส่งต่อไปยังซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการจัดเก็บอย่างเป็นระบบ ควบคู่ไปกับการบันทึกค่าอุณหภูมิผิวสายไฟฟ้าด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera) ในทุกๆ 1 ชั่วโมง

โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานอย่างละเอียด ดังนี้:

1. การจัดเตรียมและตรวจสอบระบบ (Pre-test & Calibration Check): ทำการติดตั้งวางตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดให้สอดคล้องกับแผนผัง ดังภาพที่ 3-12 และตรวจสอบจุดต่อสายไฟและสายสัญญาณของอุปกรณ์ต่างๆ ให้มีความเรียบร้อย โดยเฉพาะจุดต่อสายของหม้อแปลงวัดกระแส (CT) ทั้งด้านต้นทางและปลายทางเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการวัด และทำการตรวจสอบความสอดคล้องของเครื่องมือวัด (Zero Check) โดยตรวจสอบค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter) ทั้งด้าน DPM IN และ DPM OUT ในสภาวะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อยืนยันว่าเครื่องมือวัดทั้งสองชุดอ่านค่ากระแสไฟฟ้าได้เป็นศูนย์ (0 แอมแปร์) และมีความพร้อมในการบันทึกข้อมูล

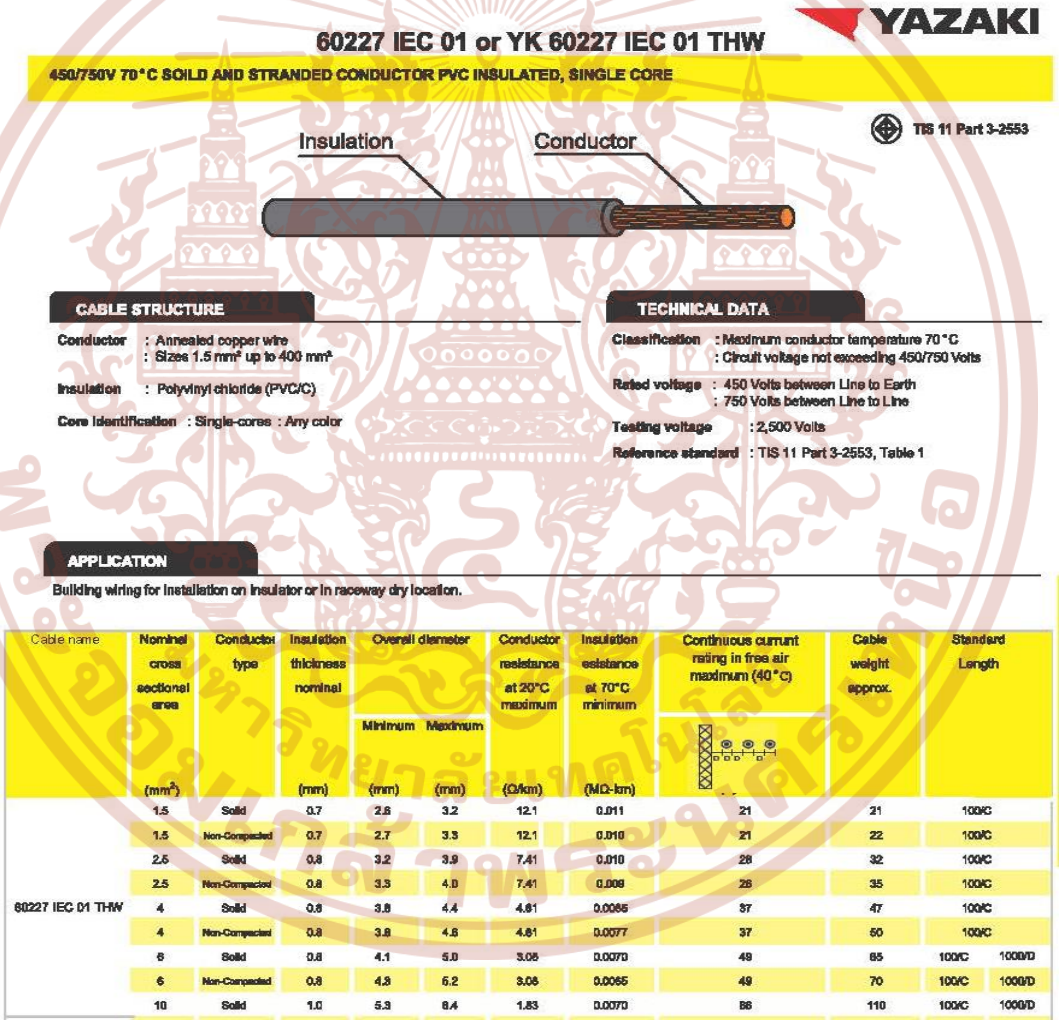


**ภาพที่ 3-13** แสดงการติดตั้งวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 3-13 จะเห็นว่าการติดตั้งสายไฟฟ้าตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะไม่ใช้การเดินสายเป็นเส้นตรงยาว 20 เมตร เนื่องจากว่าต้องการให้สอดคล้องกับการติดตั้งใช้งานสายไฟฟ้าจริง โดยสายไฟฟ้า IEC01(THW) ขนาด 2.5 ตร.มม., 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. นั้นมักจะถูกออกแบบและใช้งานในระบบไฟฟ้าวงจรย่อยเป็นหลัก ซึ่งวิธีการเดินสายนั้นมักจะใช้การเดินร้อยท่อสายไฟหรือเดินในรางสายไฟที่ยึดเกาะกับส่วนประกอบต่างๆของโครงสร้างอาคาร เช่น ผนัง คาน พื้น จึงมักจะต้องมีการเดินท่อสายไฟหรือรางสายไฟเพื่อหักหลบโครงสร้างเหล่านี้อยู่หลายช่วง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้

วิธีการติดตั้งสายไฟฟ้าตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบโดยการเดินในรางสายไฟที่มีการเดินผ่านช่วงหักโค้งเท่ากันทั้งหมด 4 ช่วง เป็นระยะความยาวรวมทั้งหมด 20 เมตร

2. การปรับตั้งกระแสทดสอบ: ในการทดสอบนั้นได้กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับทดสอบออกเป็น 2 พิกัดด้วยกัน ซึ่งจะเป็นการกำหนดกระแสไฟฟ้าทดสอบที่ 80% ของอัตรากระแสไฟฟ้าต่อเนื่องสูงสุดในอากาศเปิด (อุณหภูมิแวดล้อม 40 องศาเซลเซียส °C) หรือพิกัดทนกระแสของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. และ 4 ตร.มม. โดยอ้างอิงจากตารางของผู้ผลิตสายไฟดังภาพที่ 3-14



YAZAKI

**60227 IEC 01 or YK 60227 IEC 01 THW**

**450/750V 70°C SOILD AND STRANDED CONDUCTOR PVC INSULATED, SINGLE CORE**

TIS 11 Part 3-2553

Insulation Conductor

**CABLE STRUCTURE**

Conductor : Annealed copper wire
: Sizes 1.5 mm² up to 400 mm²

Insulation : Polyvinyl chloride (PVC/C)

Core identification : Single-cores : Any color

**TECHNICAL DATA**

Classification : Maximum conductor temperature 70°C
: Circuit voltage not exceeding 450/750 Volts

Rated voltage : 450 Volts between Line to Earth
: 750 Volts between Line to Line

Testing voltage : 2,500 Volts

Reference standard : TIS 11 Part 3-2553, Table 1

**APPLICATION**

Building wiring for installation on insulator or in raceway dry location.

| Cable name | Nominal cross sectional area (mm²) | Conductor type | Insulation thickness nominal (mm) | Overall diameter Minimum (mm) | Overall diameter Maximum (mm) | Conductor resistance at 20°C maximum (Ω/km) | Insulation resistance at 70°C minimum (MΩ-km) | Continuous current rating in free air maximum (40°C) | Cable weight approx. | Standard Length | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60227 IEC 01 THW | 1.5 | Solid | 0.7 | 2.6 | 3.2 | 12.1 | 0.011 | 21 | 21 | 100/C | |
| | 1.5 | Non-Compacted | 0.7 | 2.7 | 3.3 | 12.1 | 0.010 | 21 | 22 | 100/C | |
| | 2.5 | Solid | 0.8 | 3.2 | 3.9 | 7.41 | 0.010 | 28 | 32 | 100/C | |
| | 2.5 | Non-Compacted | 0.8 | 3.3 | 4.0 | 7.41 | 0.009 | 28 | 35 | 100/C | |
| | 4 | Solid | 0.8 | 3.8 | 4.4 | 4.61 | 0.0065 | 37 | 47 | 100/C | |
| | 4 | Non-Compacted | 0.8 | 3.8 | 4.5 | 4.61 | 0.0077 | 37 | 50 | 100/C | |
| | 6 | Solid | 0.8 | 4.1 | 5.0 | 3.08 | 0.0070 | 49 | 65 | 100/C | 1000/D |
| | 6 | Non-Compacted | 0.8 | 4.8 | 5.2 | 3.08 | 0.0065 | 49 | 70 | 100/C | 1000/D |
| | 10 | Solid | 1.0 | 5.3 | 6.4 | 1.83 | 0.0070 | 66 | 110 | 100/C | 1000/D |

**ภาพที่ 3-14** แสดงรายละเอียดด้านเทคนิคของสายไฟฟ้าตามที่ผู้ผลิตระบุ

โดยการกำหนดกระแสไฟฟ้าทดสอบที่ 80% ของอัตรากระแสไฟฟ้าต่อเนื่องสูงสุดในอากาศเปิด (อุณหภูมิแวดล้อม 40 องศาเซลเซียส °C) หรือพิกัดทนกระแสของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. และ 4 ตร.มม. นั้นเพื่อต้องการให้สอดคล้องกับการใช้งานสายไฟฟ้าจริง ซึ่งโดยทั่วไปหาก

วิศวกรผู้ออกแบบวงจรไฟฟ้าทำการคำนวณโหลดและกำหนดขนาดพิกัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ในวงจรเรียบร้อยแล้ว มักจะเลือกใช้ขนาดสายไฟฟ้าที่มีพิกัดทนกระแสไฟฟ้า(จากคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ตามลักษณะการติดตั้งสายไฟฟ้าแล้ว)ได้มากกว่าหรือใกล้เคียงกับพิกัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในวงจรนั้นไม่มากนัก ซึ่งเป็นการใช้งานสายไฟฟ้าที่ปลอดภัยและเหมาะสมตามหลักวิศวกรรม แต่ถ้าหากคำนึงถึงเรื่องพลังงานสูญเสียในสายไฟฟ้าด้วยแล้วการเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าขึ้นไปอีกหนึ่งขนาดจากมาตรฐานนั้น จะช่วยลดพลังงานสูญเสียในสายไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด จะคุ้มค่ากับการลงทุนหรือไม่ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับตั้งกระแสทดสอบเปรียบเทียบดังนี้

ในกรณีศึกษาที่ 1 จะเป็นการกำหนดกระแสไฟฟ้าทดสอบที่ 80% ของพิกัดทนกระแสของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. ซึ่งจากภาพที่ 3-14 พิกัดทนกระแสของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. จากผู้ผลิตจะอยู่ที่ 28 แอมแปร์ โดยกระแสไฟฟ้าทดสอบ 80% จะอยู่ที่ 22.4 แอมแปร์ จึงได้ทำการเปิดระบบและปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (SCR Power Regulator) จ่ายให้กับโหลดฮีตเตอร์แบบครีบ (Finned Heater) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรคงที่ตามที่กำหนด โดยจะใช้พิกัดกระแสทดสอบที่ 22.4 แอมแปร์ นี้กับสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. ทดสอบเปรียบเทียบกับสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. ตามลำดับดังตารางที่ 3-1

**ตารางที่ 3-1** แสดงการปรับตั้งกระแสทดสอบของสายไฟฟ้าตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 1

| ลำดับการทดสอบ | ขนาดสายไฟฟ้า IEC01 (THW) | ความยาวของสายไฟฟ้า | กระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ (230 โวลต์ 1 เฟส) | ช่วงเวลาที่ทดสอบ | รวมระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.5 ตร.มม. | 20 เมตร | 22.4 แอมแปร์ | 9.00 - 17.00น. | 8 ชั่วโมง |
| 2 | 4 ตร.มม. | 20 เมตร | 22.4 แอมแปร์ | 9.00 - 17.00น. | 8 ชั่วโมง |




**ภาพที่ 3-15** แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 2.5 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 1

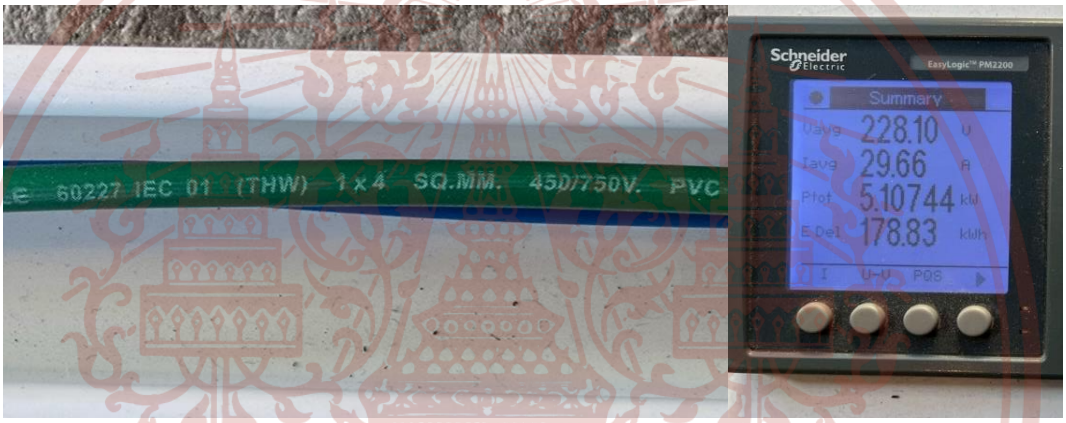



**ภาพที่ 3-16** แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 1

ในกรณีศึกษาที่ 2 จะเป็นการกำหนดกระแสไฟฟ้าทดสอบที่ 80% ของพิกัดทนกระแสของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. ซึ่งจากภาพที่ 3-14 พิกัดทนกระแสของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. จากผู้ผลิตจะอยู่ที่ 37 แอมแปร์ โดยกระแสไฟฟ้าทดสอบ 80% จะอยู่ที่ 29.6 แอมแปร์ จึงได้ทำการเปิดระบบและปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้า (SCR Power Regulator) จ่ายให้กับโหลดฮีตเตอร์แบบครีบ (Finned Heater) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรคงที่ตามที่กำหนด โดยจะใช้พิกัดกระแสทดสอบที่ 29.6 แอมแปร์ นี้กับสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. ทดสอบเปรียบเทียบกับสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 6 ตร.มม. ตามลำดับดังตารางที่ 3-2

**ตารางที่ 3-2** แสดงการปรับตั้งกระแสทดสอบของสายไฟฟ้าตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 2

| ลำดับการทดสอบ | ขนาดสายไฟฟ้า IEC01 (THW) | ความยาวของสายไฟฟ้า | กระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ (230 โวลต์ 1 เฟส) | ช่วงเวลาที่ทดสอบ | รวมระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 ตร.มม. | 20 เมตร | 29.6 แอมแปร์ | 9.00 - 17.00น. | 8 ชั่วโมง |
| 2 | 6 ตร.มม. | 20 เมตร | 29.6 แอมแปร์ | 9.00 - 17.00น. | 8 ชั่วโมง |

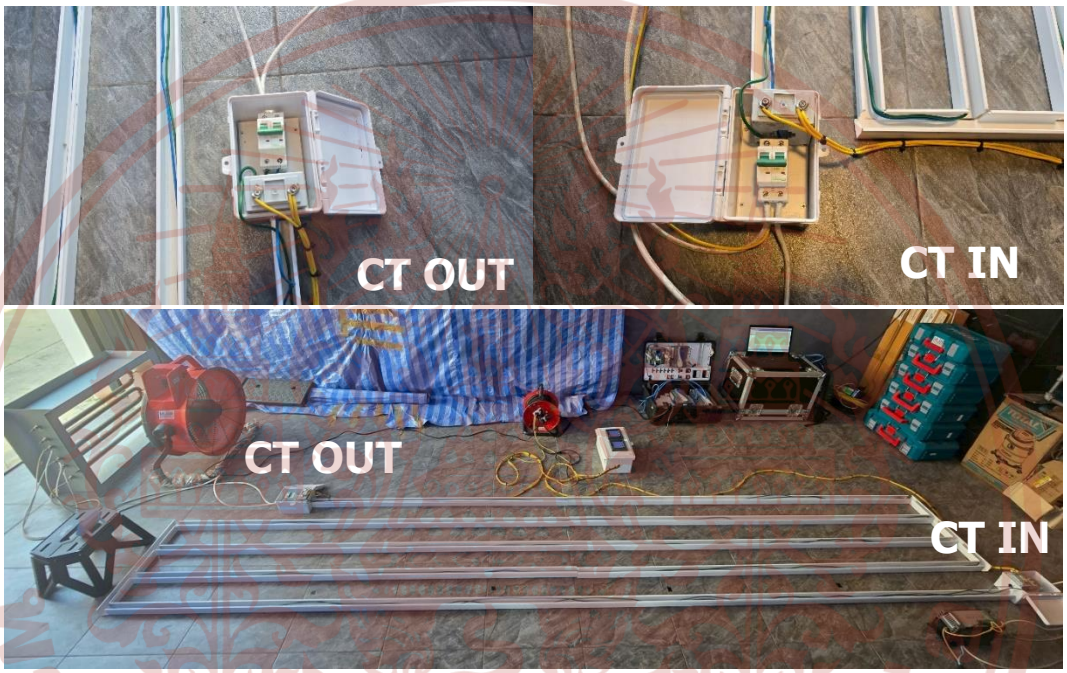



**ภาพที่ 3-17** แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 4 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 2




**ภาพที่ 3-18** แสดงการทดสอบสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ขนาด 6 ตร.มม. ในกรณีศึกษาที่ 2

3. การบันทึกผลและการทำซ้ำ (Recording & Replication): จากการเดินระบบเพื่อทดสอบสายไฟฟ้าตัวอย่างแต่ละชุดดังรายละเอียดตามตารางที่ 3-1 และตารางที่ 3-2 ได้ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงวัดกระแส (CT) ติดตั้งไว้ 2 จุด คือ ด้านต้นทาง (CT IN) และด้านปลายทาง (CT OUT) ดังภาพที่ 3-19




**ภาพที่ 3-19** แสดงการวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงวัดกระแส (CT) ด้านต้นทาง (CT IN) และด้านปลายทาง (CT OUT)

ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าจากหม้อแปลงวัดกระแส (CT) ทั้ง 2 ชุด จะถูกส่งไปยังเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter) ทั้ง 2 ชุดเช่นกัน เพื่อประมวลผลค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของด้านต้นทาง (DPM IN) และด้านปลายทาง (DPM OUT) เพื่อวิเคราะห์พลังงานสูญเสียในสายไฟฟ้าตัวอย่างแต่ละชุดทดสอบ โดยการเก็บข้อมูลจะถูกดำเนินการแบบ Real-time ดังภาพที่ 3-20




**ภาพที่ 3-20** แสดงการการทำงานของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter)

จากนั้นข้อมูลจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Digital Power Meter) ทั้ง 2 ชุด จะถูกบันทึกผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) โดยกำหนดให้บันทึกค่าต่างๆ ทางไฟฟ้าในทุกๆ 5 นาที และส่งต่อไปยังซอฟต์แวร์ Metasys บนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการจัดเก็บอย่างเป็นระบบ ดังภาพที่ 3-21



**ภาพที่ 3-21** แสดงการบันทึกข้อมูลผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)

โดยจะควบคู่ไปกับการบันทึกค่าอุณหภูมิแวดล้อมของบริเวณพื้นที่ทดสอบและการบันทึกค่าอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้าตัวอย่างแต่ละชุดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera) ในทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบกำหนดของเวลาทดสอบต่อเนื่องรวม 8 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3-22




**ภาพที่ 3-22** แสดงการบันทึกค่าอุณหภูมิแวดล้อมของบริเวณพื้นที่ทดสอบและการบันทึกค่าอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้าตัวอย่างแต่ละชุดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือและลดความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีการทดสอบสายไฟฟ้าตัวอย่างแต่ละชุดดังรายละเอียดตามตารางที่ 3-1 และตารางที่ 3-2 และทำการบันทึกผลซ้ำชุดละ 3 ครั้ง (3 Replications)

### 3.3 แบบจำลองการคำนวณทางทฤษฎี

เพื่อให้การวิเคราะห์ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ งานวิจัยนี้ได้จัดทำแบบจำลองการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลเปรียบเทียบ (Reference) กับค่าที่วัดได้จริงจากชุดทดสอบ โดยแบบจำลองนี้อ้างอิงหลักการทางฟิสิกส์และวิศวกรรมไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของตัวนำทองแดงเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งจะเริ่มจากการปรับค่าความต้านทานตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง นำไปสู่การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสภาวะอุดมคติ และเปรียบเทียบกับค่าที่สูญเสียจริงจากการวัดค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าด้านรับและด้านจ่าย ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การคำนวณค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

เนื่องจากในสภาวะการใช้งานจริง สายไฟฟ้าจะเกิดความร้อนสะสมจากการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลโดยตรงต่อการสั่นสะเทือนของอะตอมในตัวนำทองแดง ทำให้ขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอนหรือเกิดความต้านทานไฟฟ้าที่สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้อง

คำนวณค่าความต้านทานที่สภาวะอุณหภูมิใช้งาน ($R_t$) เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำกว่าการใช้ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง โดยคำนวณตามสมการดังนี้:

$$R_t = R_{ref} [1 + \alpha (t - t_{ref})] \times L \times 2 \quad (3\text{-}1)$$

โดยที่:

$R_t$ คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิขณะใช้งานจริง ($\Omega$)

$R_{ref}$ คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง (20 °C หรือ 25 °C ตามมาตรฐานผู้ผลิต)

$\alpha$ คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน (ทองแดงมีค่าประมาณ 0.00393)

$t$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้จริงขณะทดสอบ (°C)

$t_{ref}$ คือ อุณหภูมิอ้างอิง (°C)

L คือ ความยาวสาย (20 เมตร) และคูณด้วย 2 สำหรับสายเส้นไฟและสายนิวทรัล

2. การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทางทฤษฎี

เมื่อทราบค่าความต้านทานที่ปรับปรุงตามอุณหภูมิใช้งานแล้ว จึงนำค่านั้นมาคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนรูปมาจากพลังงานไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า Joule Heating ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียหลักในสายตัวนำ โดยการคำนวณทางทฤษฎีนี้จะช่วยให้ทราบว่า ในสภาวะที่ไม่มีปัจจัยรบกวนภายนอก สายไฟฟ้าแต่ละขนาดควรมีค่าสูญเสียเท่าใดตามความสัมพันธ์ของกระแสและตัวนำ โดยใช้สมการ

$$P_{loss_theory} = I^2 \times R_t \quad (3\text{-}2)$$

โดยที่:

$P_{loss_theory}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียทางทฤษฎี (W)

$I$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟฟ้า (A) (ตามกรณีศึกษา)

$R_t$ คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิใช้งานซึ่งคำนวณได้จากข้อ 3.3.1 ($\Omega$)

3. การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการวัดจริง

แม้ว่าการคำนวณทางทฤษฎีจะให้ค่าที่แม่นยำในระดับหนึ่ง แต่ในทางปฏิบัติอาจมีปัจจัยแทรกซ้อน เช่น ความต้านทานที่จุดต่อ (Contact Resistance) หรือความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านต้นทางและปลายทางผ่านเครื่องวิเคราะห์พลังงาน

ไฟฟ้า (Power Analyzer) เพื่อหาค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจริงในระบบ (System Loss) โดยผลต่างที่ได้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่แท้จริง ดังสมการ:

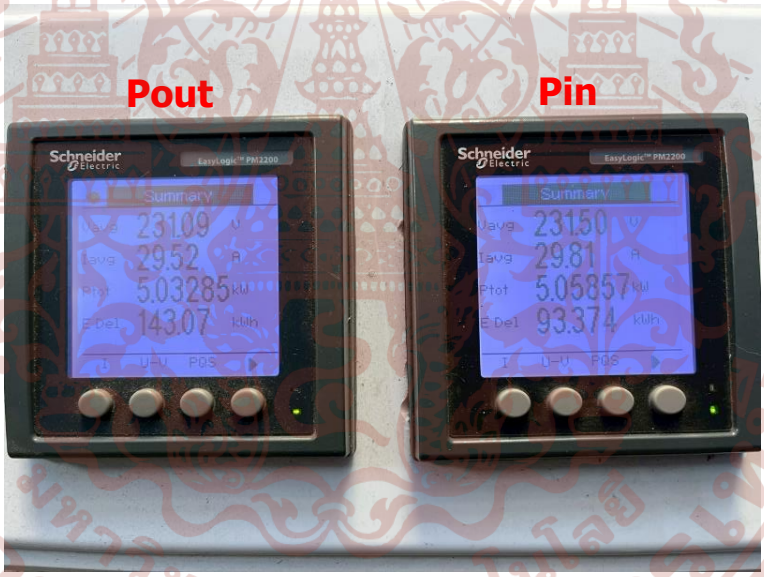
$$P_{loss_meas} = P_{in} - P_{out} \quad (3\text{-}3)$$

โดยที่:

$P_{loss_meas}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่วัดได้จริงจากเครื่องมือวัด (W)

$P_{in}$ คือ กำลังไฟฟ้าด้านต้นทางก่อนเข้าสายไฟฟ้าทดสอบ (W)

$P_{out}$ คือ กำลังไฟฟ้าด้านปลายทางที่จ่ายให้กับโหลด (W)




**ภาพที่ 3-23** แสดงการวัดค่า $P_{in}$ และ $P_{out}$ จากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์

ภายหลังจากการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและความร้อนในขั้นตอนการทดลอง จากนั้นจะนำข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($P_{loss}$) ที่วัดได้จริงมาวิเคราะห์ต่อในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เนื่องจากลำพังเพียงข้อมูลด้านวิศวกรรม (อุณหภูมิและวัตต์ที่ลดลง) อาจไม่เพียงพอต่อการตัดสินใจในระดับบริหารหรือการวางแผนการเงินในระยะยาว

กระบวนการวิเคราะห์ในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นการเปลี่ยนค่าพลังงานที่สูญเสียไปเป็น 'มูลค่าตัวเงิน' โดยใช้ตัวชี้วัดที่เป็นสากล ได้แก่ การคำนวณพลังงานที่ประหยัดได้สะสม การหาค่าเงินปัจจุบันสุทธิ

(NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่าการเลือกขนาดสายไฟฟ้าที่เหมาะสมคือการลงทุนที่ให้ผลตอบแทนคุ้มค่าตลอดอายุการใช้งานของระบบไฟฟ้า

1. การคำนวณพลังงานที่ประหยัดได้ต่อปี

ในขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ต้องทำการแปลงค่า "กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แตกต่างกัน" ระหว่างสายไฟฟ้าขนาดเล็กและสายไฟฟ้าขนาดที่ใหญ่ขึ้น ให้กลายเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าสะสมรายปี (Unit) เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการคำนวณกระแสเงินสดรับ โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้:

$$\text{Energy_Saving} = \frac{\left(P_{loss_small} - P_{loss_large}\right) x\ Hour\ x\ Day}{1{,}000} \quad \text{(3-4)}$$

โดยที่:

$\text{Energy_Saving}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้สะสมต่อปี (kWh หรือ หน่วย)

$P_{loss_small}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยที่วัดได้จากสายไฟฟ้าขนาดปกติ (W)

$P_{loss_large}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยที่วัดได้จากสายไฟฟ้าขนาดที่ใหญ่ขึ้น (W)

$Hour$ คือ จำนวนชั่วโมงการใช้งานเฉลี่ยต่อวัน (กำหนดที่ 8 ชั่วโมง)

$Day$ คือ จำนวนวันที่ใช้งานต่อปี (ในงานวิจัยนี้กำหนดที่ 365 วัน)

$1{,}000$ คือ ตัวเลขที่ใช้ในการเปลี่ยนหน่วยจาก วัตต์ (W) เป็น กิโลวัตต์ (kW)

เมื่อได้ค่าพลังงานที่ประหยัดได้แล้ว จึงนำมาคูณกับอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย (บาทต่อหน่วย) เพื่อหา "กระแสเงินสดรับสุทธิรายปี" ($CF_t$) ซึ่งจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ถูกนำไปใช้ในหัวข้อ 2 การคำนวณค่า NPV และหัวข้ออื่นๆ ต่อไป

2. การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

ในการประเมินความคุ้มค่าของการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้า งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาเพียงแค่ผลต่างของราคาค่าไฟฟ้าที่ลดลงในแต่ละปีเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึง "มูลค่าของเงินตามเวลา" (Time Value of Money) เนื่องจากเงินในอนาคตจะมีมูลค่าลดลงตามอัตราเงินเฟ้อหรือค่าเสียโอกาส ดังนั้นการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) จึงเป็นการนำกระแสเงินสดรับที่ประหยัดได้ตลอดอายุโครงการ มาคิดลด (Discount) กลับมาเป็นมูลค่าในปัจจุบันเพื่อเปรียบเทียบกับเงินลงทุนเริ่มแรกที่จ่ายไป โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้:

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I_{investment} \quad (3\text{-}5)$$

โดยที่:

*NPV* คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)

$CF_t$ คือ กระแสเงินสดสุทธิ หรือมูลค่าค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ในแต่ละปี (t) (บาท)

$i$ คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) (กำหนดที่ร้อยละ 5 ต่อปี)

$n$ คือ อายุการใช้งานหรือระยะเวลาที่พิจารณาโครงการ (กำหนดที่ 15 ปี)

$I_{investment}$ คือ เงินลงทุนส่วนเพิ่ม ณ จุดเริ่มต้น (ปีที่ 0) ซึ่งคำนวณจากราคาซื้อสายไฟฟ้าขนาดใหญ่ ลบด้วยราคาซื้อสายไฟฟ้าขนาดปกติ (บาท)

เกณฑ์การตัดสินใจ:

2.1) หากค่า NPV เป็นบวก (NPV > 0): แสดงว่าการลงทุนเพิ่มเพื่อขยายขนาดสายไฟฟ้านั้นให้ผลตอบแทนคุ้มค่ามากกว่าต้นทุนของเงินทุน และให้กำไรสุทธิส่วนเกินตลอดอายุโครงการ

2.2) หากค่า NPV เป็นลบ (NPV < 0): แสดงว่าการลงทุนนั้นไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากมูลค่าประหยัดที่ได้ไม่ครอบคลุมถึงเงินลงทุนเริ่มแรกและค่าเสียโอกาส

3. การคำนวณอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)

นอกจากการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) แล้ว งานวิจัยนี้ยังได้นำเกณฑ์อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มาใช้เป็นเครื่องมือชี้วัดความสามารถในการทำกำไรของเงินลงทุนส่วนเพิ่ม (Incremental Investment) ที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้า โดยค่า IRR คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิ (ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้) มีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนเริ่มแรกพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่าที่ทำให้ค่า NPV = 0 ตามสมการดังนี้:

$$0 = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - I_{investment} \quad (3\text{-}6)$$

โดยที่:

$IRR$ คือ อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (ร้อยละต่อปี)

$CF_t$ คือ กระแสเงินสดสุทธิ หรือมูลค่าค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ในแต่ละปี (บาท)

$I_{\text{investment}}$ คือ เงินลงทุนส่วนเพิ่ม (ส่วนต่างราคาซื้อสายไฟ)

$n$ คือ อายุการใช้งานที่นำมาพิจารณา (15 ปี)

เกณฑ์การตัดสินใจ: ในการวิจัยครั้งนี้ จะถือว่าการเพิ่มขนาดสายไฟฟ้ามีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อค่า IRR ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยอ้างอิงหรือต้นทุนทางการเงิน (Cost of Capital) ของผู้ประกอบการ/เจ้าของอาคาร ซึ่งโดยทั่วไปจะอ้างอิงที่ร้อยละ 5-7 ต่อปี หากค่า IRR ยิ่งสูง แสดงว่าการเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าจะให้ผลตอบแทนคืนกลับมาในรูปแบบของการลดค่าไฟได้รวดเร็วและคุ้มค่ากว่าการนำเงินจำนวนเดียวกันไปลงทุนในรูปแบบอื่น

4. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

นอกจากการวัดประสิทธิภาพของการลงทุนในเชิงร้อยละ (IRR) และมูลค่ารวม (NPV) แล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ใช้เกณฑ์ระยะเวลาคืนทุนเพื่อพิจารณาระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับสุทธิ (มูลค่าค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี) จะมีมูลค่าเท่ากับเงินลงทุนส่วนเพิ่มพอดี ซึ่งระยะเวลาคืนทุนที่สั้นจะแสดงถึงสภาพคล่องและความเสี่ยงที่ต่ำกว่าของโครงการลงทุน โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้:

$$PB = \frac{I_{\text{investment}}}{Annual_\text{Saving}} \tag{3-7}$$

โดยที่:

$PB$ คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี)

$I_{\text{investment}}$ คือ เงินลงทุนส่วนเพิ่ม (ส่วนต่างราคาซื้อสายไฟ) (บาท)

$Annual_\text{Saving}$ คือ มูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท/ปี)

เกณฑ์การตัดสินใจ: ในการวิจัยนี้กำหนดเกณฑ์ความคุ้มค่าเบื้องต้นหากระยะเวลาคืนทุนไม่เกิน 5 ปี ซึ่งถือว่าเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงระบบไฟฟ้าในอาคาร เนื่องจากสายไฟฟ้ามีอายุการใช้งานยาวนานกว่าระยะเวลาคืนทุนหลายเท่าตัว

# บทที่ 4
# ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยเรื่อง “การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน” มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการเพิ่มขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปของความร้อน ในบทนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการทดสอบเชิงเปรียบเทียบเพื่อหาขนาดตัวนำที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของวิศวกรรมเพื่อลดพลังงานสูญเสียในสายไฟฟ้าและในแง่ของเศรษฐศาสตร์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณีศึกษาหลัก ได้แก่

(1) การเปรียบเทียบสายไฟฟ้าขนาด 2.5 ตร.มม. และ 4 ตร.มม. ที่กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์

(2) การเปรียบเทียบสายไฟฟ้าขนาด 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. ที่กระแสทดสอบ 29.6 แอมแปร์

เพื่อวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนในการเพิ่มขนาดหน้าตัดตัวนำของงานวิจัยนี้ จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์ในสภาวะการใช้งานจริง โดยแบ่งการนำเสนอผลออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้:

ส่วนที่ 1: ผลการทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าและความร้อน เป็นการนำเสนอข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดได้จริง ประกอบด้วยค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิผิวของฉนวนสายไฟฟ้าในแต่ละกรณีศึกษา เพื่อแสดงให้เห็นพฤติกรรมทางความร้อนที่แตกต่างกันเมื่อขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป

ส่วนที่ 2: การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss Analysis) เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลต่างของกำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างสายไฟฟ้าขนาดที่กำหนดตามมาตรฐานความปลอดภัยกับสายไฟฟ้าขนาดที่ใหญ่ขึ้นหนึ่งระดับ เพื่อหาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้จริงในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง (Units)

ส่วนที่ 3: การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Evaluation) เป็นการนำค่าพลังงานที่ประหยัดได้มาคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) โดยอ้างอิงจากต้นทุนส่วนเพิ่มของราคาซื้อสายไฟฟ้าและอัตราค่าไฟฟ้าในปัจจุบัน เพื่อสรุปหาขนาดหน้าตัดที่ให้ผลตอบแทนคุ้มค่าที่สุดตลอดอายุโครงการ

โดยข้อมูลทั้งหมดที่นำเสนอในบทนี้ ได้ผ่านกระบวนการคัดกรองข้อมูลในสภาวะคงตัว (Steady State) และใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำและตรวจสอบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้สูงสุด ดังรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

**4.1 สรุปผลการทดลองและพารามิเตอร์หลัก**

เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของตัวแปรทางไฟฟ้าและอุณหภูมิสะสมในสภาวะการทำงานจริง จึงได้ทำการบันทึกข้อมูลลงในตารางบันทึกข้อมูลดิบ (Raw Data) จากชุดทดลองอย่างต่อเนื่องทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบระยะเวลา 8 ชั่วโมงของการทดสอบ โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง (Trials) เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่มีความเสถียรที่สุด เพื่อให้ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือและลดอิทธิพลของข้อมูลที่คลาดเคลื่อนในช่วงเริ่มต้นการจ่ายไฟ (Transient State) จึงได้กำหนดวิธีการคัดเลือกและหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้:

1. การคัดเลือกข้อมูลในช่วงสภาวะสมดุล (Steady State Selection): เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องจะส่งผลให้อุณหภูมิของสายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและค่อยๆ คงที่เมื่อถึงเวลาหนึ่ง จึงเลือกใช้ข้อมูลในช่วงชั่วโมงที่ 6 ถึงชั่วโมงที่ 8 ของการทดสอบ ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิผิวของฉนวนและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ามีความเสถียร (Steady State) มากที่สุดมาใช้ในการคำนวณ

2. การหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำ (Averaging from Replications): ข้อมูลแต่ละค่าในตารางเป็นผลจากการนำค่าที่บันทึกได้จากการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ของแต่ละชุดการทดลอง (Replications) (ภาคผนวก ค) มาทำการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตและตรวจสอบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อให้เป็นค่าตัวแทนของกรณีศึกษานั้นๆ โดยกระบวนการหาค่าเฉลี่ยดังกล่าวถูกนำไปใช้กับพารามิเตอร์อื่นๆ ทั้งหมด ได้แก่ แรงดัน, กระแส, อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าด้านจ่าย เพื่อให้ได้ชุดข้อมูลที่สมบูรณ์ดังแสดงในตารางที่ 4-1

**ตารางที่ 4-1** สรุปค่าเฉลี่ยผลการทดสอบสายไฟฟ้าทุกชุดการทดลอง (ชั่วโมงที่ 6- 8)

| ชุดที่ | ขนาดสาย (ตร.มม.) | กระแสทดสอบ (แอมแปร์) | $V_{in}$ (โวลต์) | $V_{out}$ (โวลต์) | $I_{avg}$ (แอมแปร์) | $P_{in}$ (วัตต์) | $P_{out}$ (วัตต์) | $T_{surf}$ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.5 | 22.4 | 232.7 | 228.0 | 23.18 | 3,159.33 | 3,038.67 | 54.8 |
| 2 | 4 | 22.4 | 231.7 | 229.2 | 22.68 | 2,949.89 | 2,876.22 | 45.7 |
| 3 | 4 | 29.6 | 228.9 | 225.2 | 30.00 | 5,150.22 | 5,003.11 | 54.5 |
| 4 | 6 | 29.6 | 231.8 | 230.3 | 30.20 | 5,170.44 | 5,081.56 | 44.7 |

หมายเหตุ: รายละเอียดตารางบันทึกข้อมูลดิบรายชั่วโมงและข้อมูลการทดสอบซ้ำทั้ง 3 ครั้ง พร้อมกับการตรวจสอบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของค่าเฉลี่ยผลการทดสอบทั้งหมด ได้แสดงไว้อย่างละเอียดใน ภาคผนวก ค

จากตารางที่ 4-1 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady State) สามารถวิเคราะห์ประเด็นสำคัญที่ส่งผลต่อการประหยัดพลังงานได้ดังนี้:

การลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss Reduction) เมื่อพิจารณาค่าผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านต้นทาง ($P_{in}$) และปลายทาง $P_{out}$) พบว่าสายไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถลดการสูญเสียพลังงานได้อย่างชัดเจน:

กรณีศึกษาที่ 1 (กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์):เมื่อเปลี่ยนจากสาย 2.5ตร.มม. เป็น 4 ตร.มม. กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงจาก 120.66 วัตต์ เหลือเพียง 73.67 วัตต์ (ลดการสูญเสียได้ถึง 46.99 วัตต์)

กรณีศึกษาที่ 2 (กระแสทดสอบ 29.6 แอมแปร์): เมื่อเปลี่ยนจากสาย 4 ตร.มม. เป็น 6 ตร.มม. กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงจาก 147.11 วัตต์ เหลือเพียง 88.88 วัตต์ (ลดการสูญเสียได้ถึง 58.23 วัตต์)

จะเห็นได้ว่าในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งมีการใช้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้น (29.6 แอมแปร์) ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนจะมีค่าสูงกว่ากรณีแรกอย่างมาก การเพิ่มขนาดหน้าตัดจึงมีผลในการ "กู้คืน" พลังงานที่สูญเสียไปได้ในปริมาณที่สูงกว่า (58.23 วัตต์ เทียบกับ 46.99 วัตต์) ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อความคุ้มค่าในเชิงตัวเงิน

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวนำและแรงดันตก (Voltage Drop Analysis): ระดับแรงดันไฟฟ้าปลายทาง ($V_{out}$) ในตารางที่ 4-1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้นในพิกัดกระแสที่เท่ากัน ค่าแรงดันตกคร่อมสาย ($\Delta V = V_{in} - V_{out}$) มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยในชุดการทดลองที่ 1 (สาย 2.5 ตร.มม. ที่ 22.4 แอมแปร์) มีแรงดันตกสูงถึง 4.6 โวลต์ แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นสายขนาด 4 ตร.มม. ในชุดที่ 2 แรงดันตกลดลงเหลือเพียง 2.5 โวลต์ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนการลดลงของแรงดันตกถึง 46.8% เช่นเดียวกับกรณีของกระแสทดสอบที่ 29.6 แอมแปร์ ที่การเปลี่ยนจากสาย 4.0 ตร.มม. เป็น 6 ตร.มม. ช่วยลดแรงดันตกจาก 3.7 โวลต์ เหลือเพียง 1.4 โวลต์ ซึ่งสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ได้ดีกว่า ซึ่งช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและลดภาระการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าปลายทาง

พฤติกรรมด้านอุณหภูมิและความร้อนสะสม (Thermal Analysis) จากการเปรียบเทียบในทั้ง 2 กรณีศึกษา พบว่าการเลือกใช้ขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นมีผลโดยตรงต่อการลดอุณหภูมิสะสมที่ผิวฉนวนสายไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ดังนี้:

กรณีศึกษาที่ 1 (กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์): เมื่อเปลี่ยนสาย 2.5 ตร.มม. เป็น 4 ตร.มม. อุณหภูมิลดลงจาก 54.8°C เหลือ 45.7°C (ลดลง 9.1°C)

กรณีศึกษาที่ 2 (กระแสทดสอบ 29.6 แอมแปร์): เมื่อเปลี่ยนจากสาย 4 ตร.มม. เป็น 6 ตร.มม. อุณหภูมิลดลงจาก 54.5°C เหลือ 44.7°C (ลดลงถึง 9.8°C)

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดสายช่วยลดความร้อนสะสมได้อย่างมีนัยสำคัญเกือบ 10 องศาเซลเซียสในทั้งสองกรณี ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดค่าความต้านทานที่แปรผันตามอุณหภูมิ ($R_t$) แต่ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของฉนวนสายไฟฟ้า (PVC) ไม่ให้เสื่อมสภาพเร็วจากความร้อนที่สูงเกินไป

3. การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของข้อมูล

เพื่อให้แน่ใจว่าค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและอุณหภูมิที่บันทึกได้จากการทดลองมีความแม่นยำและเที่ยงตรง (Precision and Reliability) ก่อนนำไปวิเคราะห์ผลในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ จึงได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ในแต่ละกรณีศึกษาภายใต้สภาวะควบคุมเดียวกัน เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4-2

**ตารางที่ 4-2** การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของผลการทดสอบ

| กรณีศึกษา / ตัวแปรที่วัด | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย (Mean) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) | ค่าความเชื่อมั่น (CV%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **กรณีที่ 1 (กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์)** | | | | | | |
| $P_{loss}$ สายไฟ 2.5 ตร.มม.**(วัตต์)** | 121.00 | 120.67 | 120.33 | **120.66** | 0.33 | 0.27% |
| $P_{loss}$ สายไฟ 4 ตร.มม.**(วัตต์)** | 73.33 | 74.00 | 73.67 | **73.67** | 0.33 | 0.44% |
| $T_{surf}$ สายไฟ 2.5 ตร.มม. **(°C)** | 54.8 | 54.6 | 54.7 | **54.8** | 0.11 | 0.20% |
| $T_{surf}$ สายไฟ 4 ตร.มม. **(°C)** | 46.0 | 45.6 | 45.6 | **45.7** | 0.19 | 0.41% |
| **กรณีที่ 2 (กระแสทดสอบ 29.6 แอมแปร์)** | | | | | | |
| $P_{loss}$ สายไฟ 4 ตร.มม.**(วัตต์)** | 147.00 | 147.33 | 147.00 | **147.11** | 0.19 | 0.12% |
| $P_{loss}$ สายไฟ 6 ตร.มม.**(วัตต์)** | 88.67 | 89.00 | 89.00 | **88.88** | 0.19 | 0.21% |
| $T_{surf}$ สายไฟ 4 ตร.มม. **(°C)** | 54.6 | 54.4 | 54.6 | **54.5** | 0.13 | 0.23% |
| $T_{surf}$ สายไฟ 6 ตร.มม. **(°C)** | 44.5 | 45.0 | 44.6 | **44.7** | 0.08 | 0.17% |

ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากการทดลองทั้ง 3 ครั้งมีความใกล้เคียงกันอย่างมาก โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) อยู่ในระดับต่ำ และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (CV%) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.12 ถึง

0.44 ซึ่งแสดงถึงความเสถียรของข้อมูลและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม ข้อมูลเหล่านี้จึงถูกนำมาสรุปเป็นค่าตัวแทน (Representative Data) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน ดังตารางที่ 4-2

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงจากการปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัดตัวนำ พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกกรณีศึกษา จึงได้นำค่าเฉลี่ยเหล่านี้มาวิเคราะห์ ร้อยละการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เพื่อชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการอนุรักษ์พลังงานในวงจรย่อยต่อไป

## 4.2 การวิเคราะห์ร้อยละการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ประสิทธิภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าถูกกำหนดด้วยความสามารถในการจัดการกับความร้อนสะสมและการลดแรงดันตก (Voltage Drop) ในสายไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่มีความต้านทานจะเกิดความร้อนตามความสัมพันธ์ $Q = I^2Rt$ การเพิ่มขนาดหน้าตัดเพียง 1 ระดับมาตรฐานอาจส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อทั้งความปลอดภัย (อุณหภูมิผิวฉนวน) และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (Watts Loss)

โดยจากข้อมูลในตารางที่ 4-1 และ 4-2 สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานเมื่อมีการเพิ่มขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้าในแต่ละกรณีศึกษา เพื่อให้เห็นภาพรวมของพลังงานที่ประหยัดได้ในรูปแบบร้อยละ ดังแสดงในตารางที่ 4-3

**ตารางที่ 4-3** สรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ (ชั่วโมงที่ 6-8)

| กรณีศึกษา | ขนาดสาย (ตร.มม.) | กระแสทดสอบ (แอมแปร์) | $P_{loss}$ (วัตต์) | $V_{drop}$ (โวลต์) | $T_{surf}$ (°C) | % การลดลงของ Ploss |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **กรณีที่ 1** | 2.5 | 22.4 | 120.66 | 4.64 | 54.8 | |
| | **4** | **22.4** | **73.76** | **2.55** | **45.7** | **38.94 %** |
| **กรณีที่ 2** | 4 | 29.6 | 147.11 | 3.72 | 54.5 | |
| | **6** | **29.6** | **88.88** | **1.41** | **44.7** | **39.58 %** |

จากการเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียในตารางที่ 4-3 สามารถวิเคราะห์ประเด็นเชิงวิศวกรรมไฟฟ้าและความคุ้มค่าเบื้องต้นได้ดังนี้:

ประสิทธิภาพการลดพลังงาน (Efficiency Enhancement): ในกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดสายไฟฟ้าจาก 2.5 ตร.มม. เป็น 4 ตร.มม. พบว่าสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลงได้ถึง 38.94% และในกรณีศึกษาที่ 2 เมื่อเปลี่ยนจาก 4 ตร.มม. เป็น 6 ตร.มม. สามารถลดลงได้ถึง 39.58% ซึ่งถือว่า

เป็นสัดส่วนที่สูงมากและมีความสอดคล้องกันในทั้งสองกรณีศึกษา แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้าเพียงหนึ่งลำดับมาตรฐาน (Step) สามารถลดความสูญเสียในสายได้เกือบ 40% ของความสูญเสียเดิม

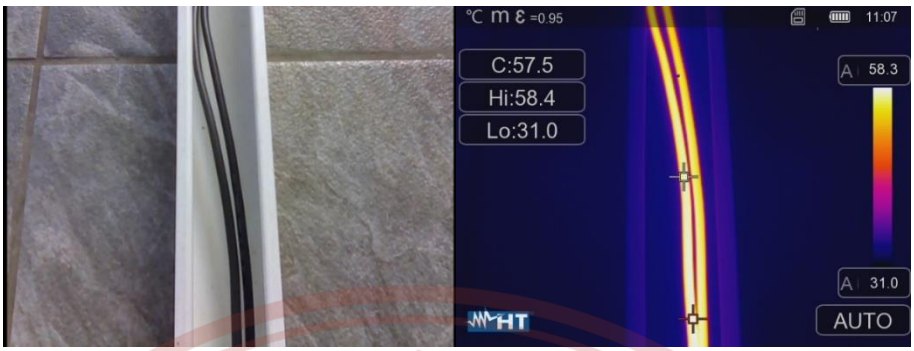
ความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของกระแส (Current Density): ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า แม้ในกรณีที่ 2 จะมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น (29.6 แอมแปร์) แต่เมื่อขยับไปใช้สายขนาด 6 ตร.มม. พลังงานที่ประหยัดได้ (58.23 วัตต์) กลับมีค่ามากกว่าพลังงานที่ประหยัดได้ในกรณีที่ 1 (46.99 วัตต์) ทั้งในแง่ของปริมาณวัตต์และร้อยละ สิ่งนี้บ่งชี้ว่าในระบบที่มีภาระโหลดสูง (High Load) การเลือกใช้สายขนาดใหญ่จะยิ่งส่งผลดีต่อการอนุรักษ์พลังงานในสัดส่วนที่ทวีคูณขึ้น

นัยสำคัญต่อการออกแบบระบบไฟฟ้า: ข้อมูลร้อยละการลดลงที่ระดับประมาณ 39-40% นี้เป็นหลักฐานสำคัญที่ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบระบบไฟฟ้าโดยพิจารณาเพียงแค่ "พิกัดการทนกระแส (Ampacity)" ตามมาตรฐานขั้นต่ำเพียงอย่างเดียว อาจไม่เพียงพอในแง่ของการจัดการพลังงานที่ยั่งยืน การพิจารณาขนาดสายที่ใหญ่ขึ้นเพื่อลดค่า $I^2RLoss$ จะเป็นปัจจัยหลักในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในระยะยาวของอาคาร

**4.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน**

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนจะพบว่าภายใต้สภาวะการทำงานต่อเนื่อง (Continuous Duty) สายไฟฟ้าจะเผชิญกับปรากฏการณ์ความร้อนสะสมที่เกิดจากความต้านทานภายในตัวนำ ($I^2RLoss$) การวิเคราะห์ในส่วนนี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับขนาดของหน้าตัดตัวนำ โดยอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 4-2 เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างการใช้สายไฟฟ้าขนาดมาตรฐานกับการเพิ่มขนาดสายไฟฟ้า (Oversizing) ว่าส่งผลต่อการลดความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) อย่างไร

กรณีศึกษาที่ 1: เปรียบเทียบสายไฟฟ้าขนาด 2.5 ตร.มม. และ 4 ตร.มม. ที่กระแส 22.4 แอมแปร์ จากการทดลองพบว่าสายไฟฟ้าขนาด 2.5 ตร.มม. มีอุณหภูมิผิวฉนวนเฉลี่ยสูงถึง 54.8 °C ในขณะที่การเปลี่ยนมาใช้สายขนาด 4 ตร.มม. ช่วยให้อุณหภูมิลดลงเหลือเพียง 45.7 °C (ลดลง 9.1 °C)

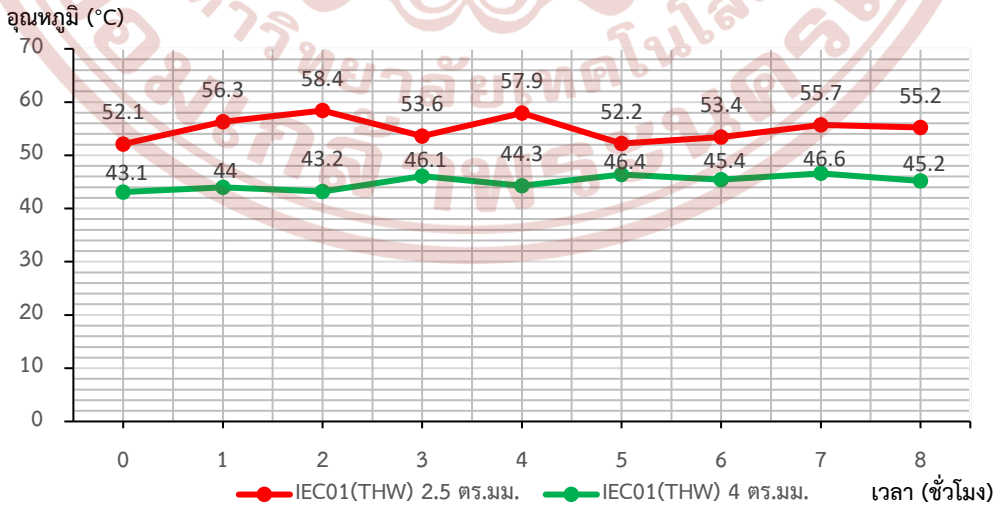



**ภาพที่ 4-1** แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 2.5 ตร.มม. ที่กระแส 22.4 แอมแปร์




**ภาพที่ 4-2** แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 4 ตร.มม. ที่กระแส 22.4 แอมแปร์

ซึ่งจากกราฟดังภาพที่ 4-3 ด้านล่างนี้จะแสดงให้เห็นว่าที่กระแสเดียวกัน สายไฟขนาดเล็กจะมีอัตราการสะสมความร้อนที่สูงกว่าและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าอย่างชัดเจน



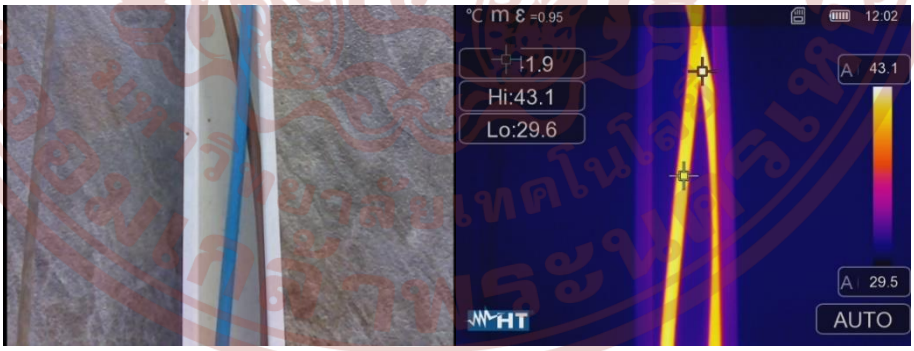

**ภาพที่ 4-3** กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวฉนวนของสายไฟฟ้า ในกรณีศึกษาที่ 1

จากภาพที่ 4-3 จะสังเกตุได้ว่าตลอดระยะเวลาการทดสอบ 8 ชั่วโมง พบว่าในช่วง 2 ชั่วโมงแรก อุณหภูมิของสายทั้งสองขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสายขนาด 2.5 ตร.มม. มีความชันของกราฟสูงกว่า และเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ชั่วโมงที่ 6 ณ อุณหภูมิเฉลี่ย 54.8 °C ในขณะที่สายขนาด 4 ตร.มม. สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงตัวได้ต่ำกว่าถึงร้อยละ 16.6

กรณีศึกษาที่ 2: เปรียบเทียบสายไฟฟ้าขนาด 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. ที่กระแส 29.6 แอมแปร์ ในกรณีที่พิกัดกระแสสูงขึ้น การใช้สายขนาด 4 ตร.มม. ทำให้อุณหภูมิขยับสูงขึ้นเป็น 54.5 °C แต่เมื่อพิจารณาการใช้สายขนาด 6 ตร.มม. พบว่าอุณหภูมิคงตัวอยู่ที่เพียง 44.7 °C เท่านั้น ซึ่งช่วยป้องกันความร้อนไม่ให้เข้าใกล้ขีดจำกัดของฉนวน PVC

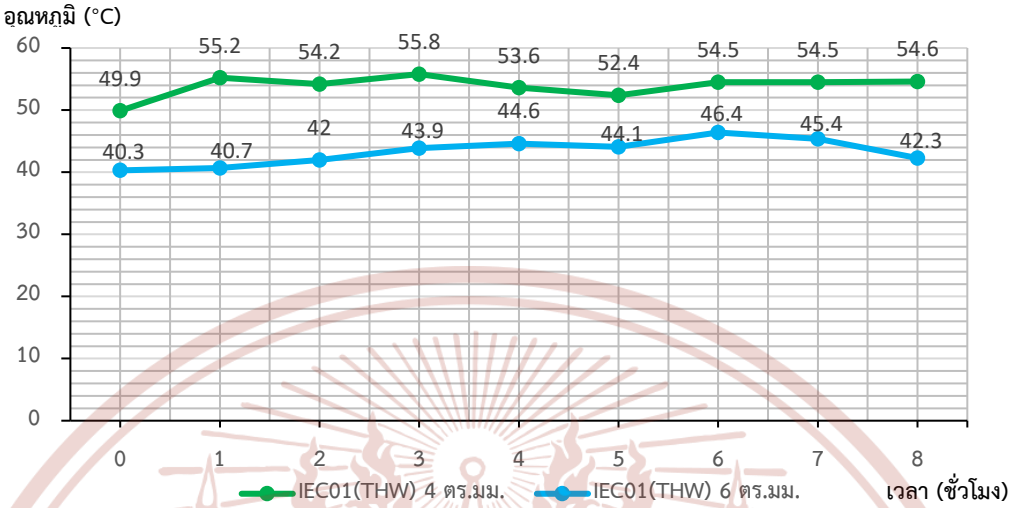



**ภาพที่ 4-4** แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 4 ตร.มม. ที่กระแส 29.6 แอมแปร์




**ภาพที่ 4-5** แสดงอุณหภูมิผิวของสายไฟฟ้า ขนาด 6 ตร.มม. ที่กระแส 29.6 แอมแปร์

ซึ่งจากกราฟดังภาพที่ 4-6 นี้มีความสำคัญมาก เพราะเป็นการแสดงพฤติกรรมที่กระแสสูงเกือบเต็มพิกัดของสายไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการ "Oversizing" เป็นสาย 6 ตร.มม. ช่วยให้สายไฟทำงานในสภาวะ "ไม่เครียด" (Low Thermal Stress)



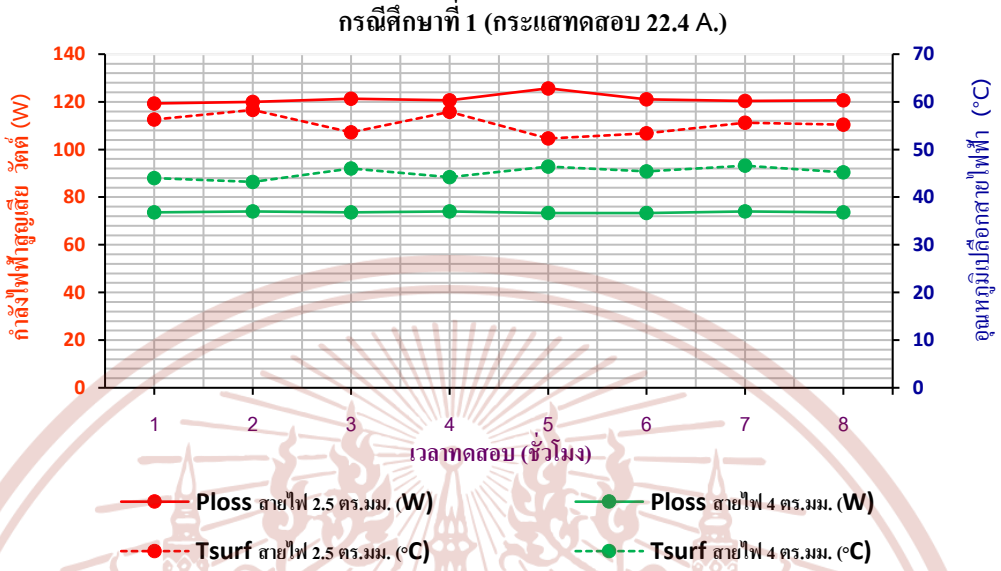

**ภาพที่ 4-6** กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวฉนวนของสายไฟฟ้า ในกรณีศึกษาที่ 2

จากภาพที่ 4-6 แสดงแนวโน้มความร้อนสะสมเมื่อใช้กระแสโหลด 29.6 แอมแปร์ โดยพบว่าสายขนาด 4 ตร.มม. มีอุณหภูมิพุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและคงตัวที่ 54.5 °C ซึ่งถือเป็นภาระความร้อนที่สูงสำหรับฉนวน PVC ในระยะยาว อย่างไรก็ตาม เมื่อเปลี่ยนมาใช้สายขนาด 6 ตร.มม. อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้กลับต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีอุณหภูมิคงตัวเพียง 44.7 °C ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของฉนวนและลดความเสี่ยงจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

### 4.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิสะสมเชิงเวลา

เพื่อให้เห็นภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในเชิงพลศาสตร์ (Dynamic) ตลอดระยะเวลาการทดสอบ 8 ชั่วโมง จึงได้ทำการนำผลการวัดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีศึกษามาจัดทำเป็นกราฟวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบแกนร่วม (Dual Y-Axis Analysis) การแสดงผลในรูปแบบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลของความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า และการเข้าสู่สภาวะคงตัวทางความร้อน (Thermal Steady State) ของสายไฟฟ้าแต่ละขนาด ภายใต้สภาวะภาระโหลดที่กำหนด ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9

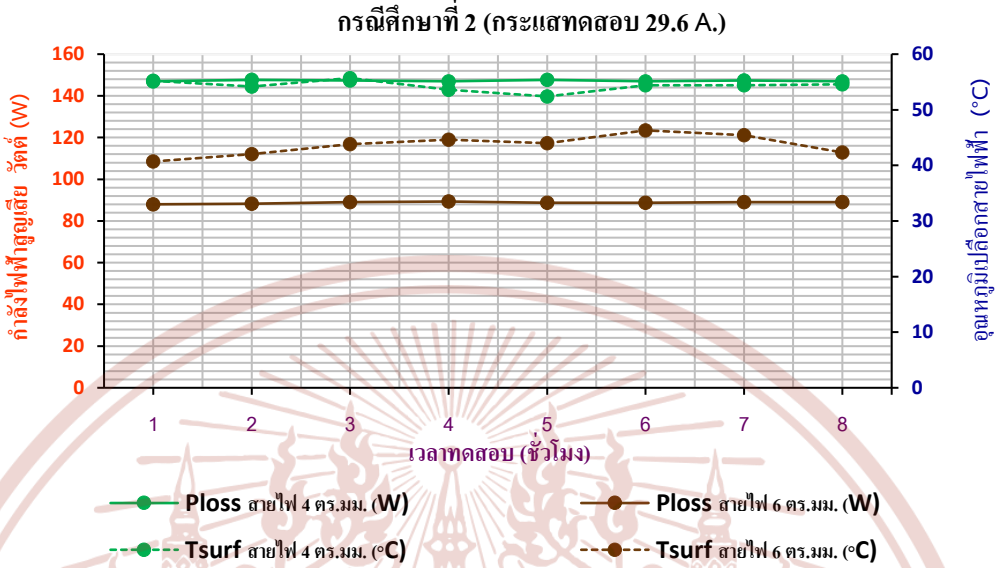
กรณีศึกษาที่ 1: การเปรียบเทียบพฤติกรรมสายไฟฟ้าขนาด 2.5 ตร.มม. และ 4 ตร.มม. ที่กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์




**ภาพที่ 4-7** กราฟเปรียบเทียบแนวโน้มกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิสะสมตลอด 8 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 1

วิเคราะห์ผลจากรูปที่ 4-7: จากการพิจารณาเส้นกราฟเชิงซ้อนในกรณีศึกษาที่ 1 พบว่าพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (เส้นกราฟด้านซ้าย) และอุณหภูมิสะสม (เส้นกราฟด้านขวา) มีความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยในช่วง 120 นาทีแรก (Transient State) อุณหภูมิของสายขนาด 2.5 ตร.มม. ปรับตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ $P_{loss}$ ขยับสูงขึ้นตามลำดับเนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน ในขณะที่สายขนาด 4 ตร.มม. (Upsizing) สามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าได้ตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยมีส่วนต่างของอุณหภูมิ ($\Delta T$) เฉลี่ยประมาณ 9.1 °C และส่วนต่างของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($\Delta P$) ที่ลดลงอย่างคงที่เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 4 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการระบายความร้อนที่เหนือกว่าและความต้านทานตัวนำที่ต่ำกว่าอย่างถาวรในสภาวะการใช้งานต่อเนื่อง

กรณีศึกษาที่ 2: การเปรียบเทียบพฤติกรรมสายไฟฟ้าขนาด 4 ตร.มม. และ 6 ตร.มม. ที่กระแสทดสอบ 29.6 แอมแปร์




**ภาพที่ 4-8** กราฟเปรียบเทียบแนวโน้มกำลังไฟฟ้าสูญเสียและอุณหภูมิสะสมตลอด 8 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 2

วิเคราะห์ผลจากรูปที่ 4-8: ในกรณีที่ 2 ซึ่งมีการใช้ภาระโหลดสูงขึ้นที่ 29.6 แอมแปร์ พบพฤติกรรมเชิงลึกที่เด่นชัดขึ้น โดยสายไฟฟ้าขนาด 4 ตร.มม. แสดงค่าอุณหภูมิสะสมที่สูงเกือบแตะพิกัดอุณหภูมิใช้งานต่อเนื่อง ส่งผลให้เส้นกราฟกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีความชันในช่วงต้นมากกว่าปกติ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเป็นสายขนาด 6 ตร.มม. พบว่าเส้นกราฟทั้งสองพารามิเตอร์มีการกดลดลงอย่างเห็นได้ชัด (Offset Reduction) โดยความร้อนสะสมลดลงเฉลี่ย 9.8 °C และสามารถลด $P_{loss}$ ลงได้ถึงร้อยละ 39.57 การที่กราฟทั้งสองพารามิเตอร์คงที่ (Plateaulike) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 5 เป็นต้นไป ยืนยันว่าการ Upsizing ไม่เพียงแต่ช่วยลดการสูญเสียพลังงาน แต่ยังสร้าง "Thermal Margin" หรือขีดความสามารถในการรองรับความร้อนที่ปลอดภัยกว่าให้กับระบบไฟฟ้าอย่างยั่งยืน

### 4.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียตามทฤษฎีและจากการทดสอบ

ในการประเมินความถูกต้องแม่นยำของผลการทดลองของงานวิจัยนี้ ได้นำค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่วัดได้จริงจากเครื่องวิเคราะห์พลังงาน ($P_{loss(Measured)}$) มาทำการเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทางทฤษฎี ($P_{loss(Theoretical)}$) ซึ่งคำนวณตามมาตรฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้า โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของตัวนำไฟฟ้าภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน เพื่อวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนและยืนยันความสมเหตุสมผลของข้อมูล

หลักการคำนวณและแหล่งที่มาของตัวแปร การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทางทฤษฎีอ้างอิงกฎของจูล (Joule's Law) สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย ซึ่งมีองค์ประกอบของตัวแปรดังนี้:

กระแสไฟฟ้า ( $I$ ): ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้จริงจากชุดการทดลอง ( $I_{measured}$)

ความต้านทานตัวนำ ( $R$ ): อ้างอิงค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดที่ 20°C จากมาตรฐานผู้ผลิตสายไฟฟ้า (Standard Resistance) ภาพที่ 3-14

ระยะทาง ( $L$ ): คิดระยะทางรวมของวงจรไฟฟ้า (รวมสายเส้นไฟและสายนิวทรัล) เท่ากับ 40 เมตร (ไป-กลับ)

ค่า $P_{loss}$ ทางทฤษฎีนี้เป็นค่าในอุดมคติที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C ซึ่งจะนำไปใช้เป็นบรรทัดฐานในการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงในสภาวะแวดล้อมการทำงาน ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในทุกชุดการทดลองในตารางที่ 4-4

**ตารางที่ 4-4** เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการทดสอบและจากค่าทางทฤษฎี

| ชุดที่ | ขนาดสาย (ตร.มม.) | กระแสวัดจริง (แอมแปร์) | $P_{loss}$ ทฤษฎี (วัตต์) | $P_{loss}$ วัดจริง (วัตต์) | ส่วนต่าง (วัตต์) | ความคลาดเคลื่อน (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.5 | 23.18 | **159.26** | 120.66 | 38.60 | 24.24% |
| 2 | 4 | 22.68 | **94.85** | 73.67 | 21.18 | 22.33% |
| 3 | 4 | 30.00 | **165.96** | 147.11 | 18.85 | 11.36% |
| 4 | 6 | 30.20 | **112.36** | 88.88 | 23.48 | 20.90% |

จากการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทางทฤษฎีและจากการทดสอบจริง ดังข้อมูลในตารางที่ 4-4 สามารถวิเคราะห์ผลในเชิงวิศวกรรมได้ดังนี้:

ความสอดคล้องของผลการทดลอง: ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ระหว่างค่าทางทฤษฎีและค่าจากการทดสอบจริงมีค่าอยู่ระหว่าง 11.36% ถึง 24.24% ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่ยอมรับได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากการคำนวณทางทฤษฎีใช้ค่าความต้านทานอ้างอิงที่ 20°C แต่ในขณะทำการทดสอบจริงสายไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้น (ประมาณ 44-54°C) ซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านทานและการระบายความร้อนของสายไฟฟ้าในสภาวะติดตั้งจริง

แนวโน้มของค่าความสูญเสีย: ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ค่า $P_{loss}$ จากการทดสอบจริงมีค่า "ต่ำกว่า" ค่าทางทฤษฎีในทุกกรณีศึกษา ซึ่งเป็นประเด็นที่ดีต่อผลงานวิจัย เนื่องจากแสดงให้เห็นว่าสายไฟฟ้าที่นำมาทดสอบมีคุณภาพในการนำกระแสสูงกว่าค่าความต้านทานสูงสุดที่มาตรฐาน

กำหนดไว้ และยืนยันได้ว่าการเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้จริงทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

ความแม่นยำและความสอดคล้องตามตัวแปรผกผัน (Inverse Correlation Accuracy): ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่น่าเชื่อถือ โดยเมื่อกระแสไฟฟ้า ( $\boldsymbol{I}$ ) เพิ่มขึ้นจากประมาณ 22 แอมแปร์ เป็น 30 แอมแปร์ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติมีการขยับตัวสูงขึ้นในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระบบ และเมื่อขนาดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่า Loss ก็ลดลงในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกาะกลุ่มกันอยู่ในช่วงประมาณ 11 - 24% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนนี้ไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) แต่เกิดจากค่าคงที่ของสภาพแวดล้อม เช่น ความแม่นยำของอุปกรณ์วัดและการสูญเสียแฝงในจุดต่อ

การวิเคราะห์จุดวิกฤตและความคลาดเคลื่อนต่ำสุด (Critical Point Analysis): เป็นที่น่าสังเกตว่าในชุดการทดลองที่ 3 (สาย 4 ตร.มม. ที่กระแสทดสอบ 30 แอมแปร์) มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเพียง 11.36% ซึ่งเป็นจุดที่สายไฟฟ้าทำงานใกล้เคียงกับพิกัดกระแสสูงสุด (Rated Capacity) มากที่สุด ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าเครื่องมือวัดพลังงานจะมีความแม่นยำสูงขึ้นเมื่อระบบทำงานในสภาวะโหลดสูง (Heavy Load) เนื่องจากสัดส่วนของสัญญาณไฟฟ้าต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) มีค่ามากขึ้น ทำให้การวัดส่วนต่างของ $P_{in}$ และ $P_{out}$ มีความเสถียรมากกว่าในช่วงที่โหลดน้อย

การยืนยันความสมเหตุสมผลของการออกแบบ (Design Validation): ความแตกต่างของ $P_{loss}$ ระหว่างขนาดสาย 2.5 ตร.มม. และ 4 ตร.มม. ที่กระแส 22.4 แอมแปร์ (ชุดที่ 1 และ 2) พบว่าลดลงไปประมาณ 46.99 วัตต์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางทางทฤษฎีที่ระบุว่าการลดลงควรอยู่ที่ประมาณ 64.41 W แม้ตัวเลขจะไม่เท่ากัน แต่ทิศทางและขนาดของผลต่าง (Magnitude) มีความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลนี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลที่มั่นคงในการวิเคราะห์ผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์และการคืนทุนในหัวข้อถัดไป

**4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์**

การวิเคราะห์ในส่วนนี้เป็นการประเมินความคุ้มค่าของการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่าง "เงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น (Incremental Investment)" กับ "ผลตอบแทนจากการประหยัดพลังงาน (Energy Saving Return)" ภายใต้กรอบระยะเวลาโครงการ 15 ปี

สมมติฐานและการกำหนดตัวแปรในการคำนวณ เพื่อให้การประเมินโครงการมีความแม่นยำ จึงได้กำหนดตัวแปรอ้างอิงดังนี้:

เวลาในการใช้งาน: 8 ชั่วโมงต่อวัน และ 365 วันต่อปี (รวม 2,920 ชั่วโมง/ปี)

อัตราค่าไฟฟ้า: 4.50 บาทต่อหน่วย (kWh)

ระยะเวลาวิเคราะห์โครงการ ($n$): 15 ปี

อัตราคิดลด (Discount Rate, r): 5% ต่อปี

ต้นทุนสายไฟฟ้า (อ้างอิงระยะทาง 40 เมตร):

ขนาด 2.5 ตร.มม. (12.01 บาท/เมตร) = 480.40 บาท

ขนาด 4 ตร.มม. (18.93 บาท/เมตร) = 757.20 บาท (ส่วนต่างจาก 2.5 ตร.มม. $C_o$ = 276.80 บาท)

ขนาด 6 ตร.มม. (28.80 บาท/เมตร) = 1,152.00 บาท (ส่วนต่างจาก 4 ตร.มม. $C_o$ = 394.80 บาท)

เพื่อให้เห็นภาพเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างการเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าในพิกัดกระแสที่แตกต่างกัน จึงได้รวบรวมและสรุปดัชนีชี้วัดความคุ้มค่าของทุกกรณีศึกษาตลอดอายุโครงการ 15 ปี เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมและการบริหารจัดการพลังงาน ดังรายละเอียดที่ปรากฏในตารางที่ 4-5

**ตารางที่ 4-5** ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และดัชนีชี้วัดความคุ้มค่า (อายุโครงการ 15 ปี)

| รายการวิเคราะห์ | กรณีเปลี่ยน 2.5 เป็น 4 ตร.มม. | กรณีเปลี่ยน 4 เป็น 6 ตร.มม. |
|---|---|---|
| กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (วัตต์) | 46.99 วัตต์ | 58.23 วัตต์ |
| พลังงานที่ประหยัดได้ต่อปี (kWh) | 137.21 kWh | 170.03 kWh |
| ผลประหยัดต่อปี (Cash Inflow) | 617.45 บาท | 765.14 บาท |
| ส่วนต่างเงินลงทุน ($C_o$) | 276.80 บาท | 394.80 บาท |
| ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) | 0.45 ปี (5.4 เดือน) | 0.52 ปี (6.2 เดือน) |
| มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) | 6,132.13 บาท | 7,546.91 บาท |
| อัตราผลตอบแทน (IRR) | 223.06% | 193.80% |

บทวิเคราะห์สรุปความคุ้มค่าทางการเงินและวิศวกรรม เมื่อพิจารณาข้อมูลเปรียบเทียบจากตารางที่ 4-5 สามารถวิเคราะห์ประเด็นสำคัญที่เชื่อมโยงระหว่างเทคนิคทางวิศวกรรมและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ได้ดังนี้:

วิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนและสภาพคล่องของโครงการ (Payback Period Analysis): ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการลงทุนเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าให้ผลตอบแทนที่รวดเร็วอย่างมาก โดยมีระยะเวลา

คืนทุนเฉลี่ยเพียง 5.4 ถึง 6.2 เดือน ซึ่งในทางเศรษฐศาสตร์ถือเป็นการลงทุนที่มีความเสี่ยงต่ำที่สุด (Low Risk) เนื่องจากระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่า 1 ปี ข้อมูลนี้ยืนยันว่า "ส่วนต่างเงินลงทุน" ที่จ่ายเพิ่มไปนั้น จะได้รับคืนกลับมาในรูปแบบของผลประหยัดค่าไฟฟ้าภายในระยะเวลาไม่ถึงหนึ่งรอบปีงบประมาณ ทำให้โครงการมีสภาพคล่องทางการเงินสูง

มูลค่าเพิ่มสุทธิและการสะสมความมั่งคั่ง (NPV & Value Creation): เมื่อพิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) พบว่าทั้งสองกรณีศึกษามีค่าเป็นบวกอย่างมหาศาล โดยกรณีที่ 2 มีค่า NPV สูงถึง 7,546.91 บาท ซึ่งหมายความว่าหากพิจารณาค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money) การตัดสินใจเปลี่ยนสายจากขนาด 4 เป็น 6 ตร.มม. จะสร้างมูลค่ากำไรสุทธิให้กับผู้ใช้งานสูงกว่าเงินลงทุนเบื้องต้นถึง 19.1 เท่า ตลอดอายุโครงการ 15 ปี สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ขนาดสายที่ใหญ่ขึ้นคือการบริหารสินทรัพย์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดผลกำไรระยะยาว

อัตราผลตอบแทนภายในและการเปรียบเทียบการลงทุน (IRR Perspective): ค่า IRR ที่สูงเกินกว่า 190% ในทุกกรณีศึกษา เป็นดัชนีที่ยืนยันประสิทธิภาพของการจัดการพลังงานได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราดอกเบี้ยเงินฝากหรือต้นทุนทางการเงิน (WACC) ขององค์กรทั่วไป การลงทุนในขนาดสายไฟฟ้าให้ผลตอบแทนที่สูงกว่าการลงทุนทั่วไปในตลาดหลายเท่าตัว เนื่องจากเป็นการลด "ความสูญเสียถาวร" ในระบบที่เกิดขึ้นทุกวินาทีที่มีการใช้งานโหลด

ผลกระทบเชิงวิศวกรรมที่สัมพันธ์กับความคุ้มค่า (Engineering-Economic Linkage): จากตารางพบว่า แม้กรณีที่ 2 จะมีต้นทุนสายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (394.80 บาท) เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 (276.80 บาท) แต่ด้วยค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงกว่า (30 แอมแปร์) ทำให้พลังงานที่ประหยัดได้ต่อปีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (170.03 kWh/ปี) ข้อมูลนี้สะท้อนให้เห็นถึงกฎ Economy of Scale ในระบบไฟฟ้า ว่ายิ่งระบบมีภาระโหลดสูง การเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าจะยิ่งทวีความคุ้มค่าและให้มูลค่า NPV ที่สูงกว่ากรณีโหลดต่ำอย่างมีนัยสำคัญ

บทสรุปเชิงนโยบายและการออกแบบ (Strategic Conclusion): ข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ 4-5 เป็นเครื่องพิสูจน์ว่า การออกแบบระบบไฟฟ้าโดยอาศัยเพียง "มาตรฐานการทนกระแสขั้นต่ำ" ไม่ใช่ทางเลือกที่คุ้มค่าที่สุดในปัจจุบัน การเลือกใช้ขนาดตัวนำที่ใหญ่ขึ้น 1-2 ระดับ (Upsizing) ตามหลัก Energy Efficient Design ไม่เพียงแต่ช่วยลดอุณหภูมิสะสมในสายไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัย แต่ยังเป็นการตัดสินใจทางการเงินที่ให้ผลตอบแทนสูงและยั่งยืนตลอดอายุการใช้งานของอาคาร

**4.7 สรุปและอภิปรายผลจากการวิเคราะห์**

จากการดำเนินงานทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลในบทที่ 4 ทั้งในด้านพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ความร้อน และความคุ้มค่าทางการเงิน สามารถสรุปและอภิปรายผลในประเด็นสำคัญได้ดังนี้:

สรุปพฤติกรรมทางไฟฟ้าและการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย การเพิ่มขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ($P_{loss}$) อย่างมีนัยสำคัญ โดยในกรณีศึกษาที่ 1 (กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์) การเปลี่ยนจากสาย 2.5 เป็น 4 ตร.มม. สามารถลดค่า $P_{loss}$ ได้ 38.94% และในกรณีศึกษาที่ 2 (กระแสทดสอบ 29.6 แอมแปร์) การเปลี่ยนจากสาย 4 เป็น 6 ตร.มม. สามารถลดลงได้ถึง 39.58% ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้ขนาดตัวนำที่ใหญ่ขึ้นเพียงหนึ่งลำดับมาตรฐานให้ประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานที่คงที่และชัดเจนแม้ในสภาวะโหลดที่ต่างกัน

อภิปรายพฤติกรรมทางความร้อนและอุณหภูมิสะสม (Thermal Behavior) ประเด็นด้านความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ยืนยันถึงความปลอดภัยและอายุการใช้งานของสายไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการขยายขนาดหน้าตัดสายไฟฟ้า อุณหภูมิสะสมที่เปลือกนอกของสายไฟฟ้าจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด:

ในชุดการทดลองที่โหลด 22.4 แอมแปร์ การเพิ่มขนาดสายจาก 2.5 เป็น 4 ตร.มม. ช่วยลดอุณหภูมิลงได้ 9.1 °C (จาก 54.8 °C เหลือ 45.7 °C)

ในชุดการทดลองที่โหลด 29.6 แอมแปร์ การเพิ่มขนาดสายจาก 4 เป็น 6 ตร.มม. ช่วยลดอุณหภูมิลงได้ถึง 9.8 °C (จาก 54.5 °C เหลือ 44.7 °C)

การที่อุณหภูมิลดลงเกือบ 10 °C นี้ส่งผลบวกอย่างมากต่อความสามารถในการคงสภาพของฉนวนไฟฟ้า (PVC Insulation) เนื่องจากความร้อนที่ลดลงจะช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของโมเลกุลพลาสติก ซึ่งตามหลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้า การลดอุณหภูมิทำงานลงเพียงเล็กน้อยสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของสายไฟฟ้าออกไปได้นานขึ้นหลายปี

อภิปรายความสอดคล้องระหว่างทฤษฎีและผลการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบค่า $P_{loss}$ จากการวัดจริงกับค่าทางทฤษฎี พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 11.36% ถึง 24.24% โดยค่าจากการวัดจริงต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีในทุกกรณี สาเหตุสำคัญเกิดจากวัสดุตัวนำทองแดงที่ใช้ในการทดสอบมีคุณภาพการนำไฟฟ้าดีกว่าค่าสูงสุดที่มาตรฐานกำหนด (Maximum Resistance) อีกทั้งการจัดเรียงสายไฟฟ้าในพื้นที่เปิดขณะทดลองช่วยให้การระบายความร้อนทำได้ดี ส่งผลให้ความต้านทานขณะใช้งานจริงไม่พุ่งสูงเกินกว่าพิกัดที่คำนวณไว้

อภิปรายผลประโยชน์เชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมการเงิน ในด้านความคุ้มค่า การวิเคราะห์แสดงดัชนีชี้วัดที่โดดเด่นมาก โดยมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยเพียง 5-6 เดือน และมีอัตราผลตอบแทน

ภายใน (IRR) สูงกว่า 190% ตลอดอายุโครงการ 15 ปี โดยเฉพาะในกรณีศึกษาที่ 2 ที่มีภาระโหลดสูง จะให้ค่า NPV สูงถึง 7,546.91 บาท ต่อหนึ่งจุดติดตั้ง ยืนยันว่าการเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าคือการลงทุนที่ให้ผลตอบแทนสูงกว่าความผันผวนของอัตราดอกเบี้ยในตลาด และเป็นการเปลี่ยนค่าพลังงานที่สูญเสียเปล่าให้กลับมาเป็นผลกำไรในรูปแบบของเงินออมค่าไฟฟ้า

สรุปภาพรวมความสำคัญของการออกแบบระบบไฟฟ้า สรุปได้ว่าการพิจารณาขนาดสายไฟฟ้าโดยมุ่งเน้นเพียงมาตรฐานการทนกระแสขั้นต่ำ (Minimum Ampacity) ไม่ใช่ทางเลือกที่ยั่งยืน การใช้แนวคิด Energy Efficient Sizing (การเพิ่มขนาดสายเพื่อประสิทธิภาพ) ไม่เพียงแต่ช่วยลดอุณหภูมิสะสมเพื่อความปลอดภัยสูงสุดและยืดอายุการใช้งานวัสดุ แต่ยังให้ผลตอบแทนทางการเงินที่คุ้มค่าอย่างรวดเร็ว ถือเป็นกลยุทธ์สำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารประหยัดพลังงานในอนาคต

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่อง การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานและความคุ้มค่าจากการเพิ่มขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้า IEC01 (THW) ในวงจรย่อย เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดหน้าตัดตัวนำต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss) พฤติกรรมทางความร้อน และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ตลอดอายุโครงการ และเพื่อสร้างแนวทางในการออกแบบวงจรย่อยที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถสรุปผลการดำเนินงาน อภิปรายผล และให้ข้อเสนอแนะได้ดังนี้

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล สรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้:

ด้านการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรย่อย: การเพิ่มขนาดสายไฟฟ้าขึ้น 1 ลำดับมาตรฐาน (Upsizing) สำหรับวงจรย่อย สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยในกรณีศึกษาที่ 1 เปลี่ยนจาก 2.5 เป็น 4 ตร.มม. ลดลง 38.94% และในกรณีศึกษาที่ 2 เปลี่ยนจาก 4 เป็น 6 ตร.มม. ลดลง 39.58%

ด้านพฤติกรรมทางความร้อน: การขยายขนาดสายช่วยลดอุณหภูมิสะสมที่เปลือกนอกของสายไฟฟ้าลงได้เฉลี่ย 9.1 - 9.8 °C ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการยืดอายุการใช้งานของฉนวนและเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบไฟฟ้า

ด้านเศรษฐศาสตร์: การอนุรักษ์พลังงานด้วยวิธีการนี้ให้ผลตอบแทนทางการเงินที่โดดเด่น โดยมี ระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยเพียง 5.4 - 6.2 เดือน และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) สูงกว่า 190% ซึ่งยืนยันว่าส่วนต่างของเงินลงทุนเพิ่มนั้นมีมูลค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาครั้งนี้ มีประเด็นที่ควรนำมาอภิปรายเพื่อความเข้าใจเชิงวิชาการดังนี้:

1. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวนำและความร้อน: ผลการทดลองยืนยันว่าการลดความต้านทาน ( $R$) โดยการเพิ่มขนาดหน้าตัดตัวนำ ไม่เพียงแต่ลด $P_{loss}$ ตามสมการ $P = I^2R$ แต่ยังส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากผลของจูล (Joule Heating) ลดลงด้วย อุณหภูมิที่ลดลงนี้ช่วยให้ความต้านทานของทองแดงไม่เพิ่มสูงขึ้นเกินจำเป็นขณะใช้งานจริง ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากกว่าการใช้สายขนาดเล็ก

2. ความแม่นยำของทฤษฎีเทียบกับการทดสอบ: ค่าความคลาดเคลื่อนที่พบ (11-24%) โดยที่ค่าจริงต่ำกว่าทฤษฎี ชี้ให้เห็นว่ามาตรฐานการผลิตสายไฟฟ้าในปัจจุบันมีคุณภาพสูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำที่ใช้ในการคำนวณ (Safety Margin) ซึ่งถือเป็นกำไรแฝงของผู้บริโภคในด้านประสิทธิภาพพลังงาน

3. ประสิทธิภาพของการอนุรักษ์พลังงานในวงจรย่อย: ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าวงจรย่อยที่มีภาระโหลดต่อเนื่อง (Continuous Load) เป็นจุดที่มีศักยภาพสูงในการอนุรักษ์พลังงาน การลดค่าความต้านทาน ($R$) เพียงเล็กน้อยจากการเพิ่มขนาดหน้าตัด ส่งผลให้ค่าพลังงานสูญเสียสะสมลดลงอย่างมากเมื่อพิจารณาตลอดอายุการใช้งาน

4. ความสอดคล้องเชิงวิศวกรรมและความปลอดภัย: อุณหภูมิที่ลดลงเกือบ 10 °C จากการเพิ่มขนาดสาย เป็นการยืนยันว่าการอนุรักษ์พลังงานด้วยวิธีนี้ไม่ได้ให้ผลดีแค่เรื่องตัวเงิน แต่ยังช่วยลดความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) ของสายไฟฟ้า ทำให้ระบบวงจรย่อยมีความเสถียรและปลอดภัยสูงขึ้น

5. การเปลี่ยนแนวคิดการออกแบบ: ผลกำไรจาก IRR ที่สูงมากสะท้อนให้เห็นว่า "ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้" มีมูลค่าสูงกว่า "ราคาค่าสายไฟฟ้าที่จ่ายเพิ่ม" อย่างมหาศาล การออกแบบระบบไฟฟ้าในอนาคตจึงควรเปลี่ยนจากแนวคิด Minimum Cost Design (เน้นประหยัดค่าของ) มาเป็น Life Cycle Cost Design (เน้นประหยัดระยะยาว)

6. การตัดสินใจลงทุนบนพื้นฐานกรณีศึกษา: ค่า NPV ที่สูงถึง 7,546.91 บาท ในกรณีศึกษาที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ยิ่งวงจรย่อยมีปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าสูง การเลือกขนาดสายตามหลักประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficient Sizing) จะยิ่งทวีความคุ้มค่ามากขึ้น

**5.3 ข้อเสนอแนะ**

1. ข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้งาน

1.1) การออกแบบวงจรย่อย: ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าควรพิจารณาเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยที่ใช้งานหนัก (เช่น วงจรแอร์, วงจรปลั๊กสำหรับอุปกรณ์สำนักงาน) ให้ใหญ่กว่าพิกัดขั้นต่ำตามมาตรฐาน 1 ระดับ เพื่อประโยชน์สูงสุดในการอนุรักษ์พลังงาน

1.2) สำหรับผู้ติดตั้งสายไฟฟ้าใหม่: ในวงจรที่มีภาระโหลดต่อเนื่องยาวนาน (เช่น เครื่องปรับอากาศ, เครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า หรือระบบแสงสว่างในอาคารพาณิชย์) ควรพิจารณาเพิ่มขนาดสายขึ้น 1 ระดับจากมาตรฐานขั้นต่ำเสมอ เนื่องจากจะคืนทุนได้ภายในไม่กี่เดือน

1.3) การเลือกใช้วัสดุ: ควรเลือกใช้สายไฟฟ้าที่ได้รับมาตรฐาน มอก. และมีค่าความบริสุทธิ์ของทองแดงสูง เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานต่ำตามผลการทดลอง

1.4) การวิเคราะห์ความคุ้มค่า: ควรนำดัชนีชี้วัด NPV และ IRR มาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณาเลือกเกรดวัสดุและขนาดสายไฟฟ้า แทนการพิจารณาเพียงแค่ราคาต้นทุนเบื้องต้น (Initial Cost)

2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

2.1) การทดสอบกับโหลดประเภทอื่น: ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมกับโหลดที่เป็น Harmonic (Non-linear Load) เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก เพื่อดูผลกระทบของ Skin Effect และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในมิติที่ซับซ้อนขึ้น

2.2) การศึกษาในระยะยาว: ควรมีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพของฉนวนในระยะเวลา 1-3 ปี เพื่อยืนยันอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม

2.3) การเก็บข้อมูลผ่านระบบ Monitoring: ในงานวิจัยถัดไปอาจติดตั้งระบบบันทึกข้อมูลพลังงานแบบ Real-time เพื่อดูความผันแปรของผลประหยัดในสภาวะโหลดที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลาจริง (Dynamic Load)

2.4) ความหลากหลายของชนิดสาย: ควรเพิ่มการทดลองกับสายประเภทอื่นๆ เช่น สาย XLPE ที่ทนความร้อนได้สูงกว่า เพื่อเปรียบเทียบในแง่ความคุ้มค่าและการระบายความร้อน

# บรรณานุกรม


คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย: มาตรฐาน วสท. 022001-22.** กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.), 2564.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **มอก. 11-2553: สายไฟฟ้าหุ้มฉนวนพอลิไวนิลคลอไรด์ แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไม่เกิน 450/750 โวลต์.** กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553.

ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. **การออกแบบระบบไฟฟ้า (Electrical System Design)**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2554.

ศิริชัย เทพา. **การจัดการและการอนุรักษ์พลังงานในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม.** กรุงเทพฯ: ท้อป, 2554.

สุรพงศ์ จิระรัตนานนท์. (2550). **การจัดการพลังงาน (Energy Management)**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

กัมปนาท ถาวรวงษ์. "การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในสายตัวนำเนื่องจากผลของความร้อน". **วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี**, ปีที่ 11(2560 ฉบับที่ 2) : 45-58.

ธนากร แสงศรี. "แนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าเพื่อความคุ้มค่าตลอดอายุการใช้งาน". **วารสารวิชาการพลังงานทดแทน**, ปีที่ 5(2563 ฉบับที่ 1) : 12-25.

การไฟฟ้านครหลวง. (2566). อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับการใช้ไฟฟ้าประเภทต่างๆ. สืบค้นเมื่อ 1 ตุลาคม 2568, จาก https://www.mea.or.th/profile/109/111.

International Electrotechnical Commission. (2020). IEC 60287: Electric cables - Calculation of the current rating. Retrieved from https://www.iec.ch.

# ภาคผนวก ก

คุณลักษณะทางเทคนิคและใบรับรองการสอบเทียบของอุปกรณ์เครื่องมือวัด

# Product datasheet

Specifications



## EasyLogic PM2230, Power & Energy meter, up to the 31st harmonic, LCD display, RS485, class 0.5S

METSEPM2230

## Main

| | |
|---|---|
| **Range** | EasyLogic |
| **product name** | EasyLogic PM2200 |
| **Device short name** | PM2230 |
| **Product or component type** | Power meter |

## Complementary

| | |
|---|---|
| **Device application** | Power monitoring<br>Sub billing |
| **Power quality analysis** | total harmonic distortion<br>up to the 31st harmonic |
| **Type of measurement** | Apparent power min/max, total<br>Active and reactive power min/max, total<br>Current min/max, avg<br>Voltage min/max, avg<br>Frequency min/max, avg<br>Total current harmonic distortion THD (I) per phase<br>Total voltage harmonic distortion THD (U) per phase<br>Power factor min/max, avg<br>Apparent energy total<br>Active and reactive energy total |
| **Metering type** | Calculated neutral current<br>Active power P, P1, P2, P3<br>Current I, I1, I2, I3<br>Peak demand power PM, QM, SM<br>Voltage U, U21, U32, U13, V, V1, V2, V3<br>Peak demand currents<br>Reactive power Q, Q1, Q2, Q3<br>Demand power P, Q, S<br>Unbalance current<br>Active, reactive, apparent energy (signed, four quadrant)<br>Apparent power S, S1, S2, S3 |
| **Accuracy class** | Class 1 reactive energy conforming to IEC 62053-24<br>Class 0.5S active energy conforming to IEC 62053-22<br>Class 5 harmonic distorsion (I THD & U THD) |
| **Measurement accuracy** | Apparent power +/- 0.5 %<br>Active energy +/- 0.5 %<br>Reactive energy +/- 1 %<br>Active power +/- 0.5 %<br>Voltage +/- 0.5 %<br>Power factor +/- 0.01<br>Current +/- 0.5 %<br>Frequency +/- 0.05 % |
| **Measurement current** | 5…6000 mA |
| **Measurement voltage** | 35…480 V AC 50/60 Hz between phases<br>20…277 V AC 50/60 Hz between phase and neutral<br>480…999000 V AC 50/60 Hz with external VT |
| **Frequency measurement range** | 45…65 Hz |

Disclaimer: This documentation is not intended as a substitute for and is not to be used for determining suitability or reliability of these products for specific user applications

| | |
|---|---|
| **[Us] rated supply voltage** | 80...277 V AC 45...65 Hz +/- 10 %<br>100...277 V DC +/- 10 % |
| **Network frequency** | 60 Hz<br>50 Hz |
| **Ride-through time** | 50 ms 120 V AC typical<br>50 ms 230 V AC typical<br>50 ms 125 V DC typical |
| **[In] rated current** | 5 A<br>1 A |
| **Maximum power consumption in VA** | 8 VA at 277 V AC |
| **Maximum power consumption in W** | 3.3 W (power lines (AC))<br>3.3 W at 277 V (power lines (DC)) |
| **input impedance** | Current (impedance <= 0.3 mOhm)<br>Voltage (impedance > 5 MOhm) |
| **Tamperproof of settings** | Protected by access code |
| **Display type** | Backlit LCD |
| **Display colour** | Monochrome |
| **Display resolution** | 128 x 128 pixels |
| **Demand intervals** | Configurable from 1 to 60 min |
| **Information displayed** | Demand current (past value)<br>Demand current (present value)<br>Demand power (past value)<br>Demand power (present value)<br>Voltage<br>Current<br>Frequency<br>Energy consumption<br>Harmonic distortion<br>Power factor<br>Active power<br>Apparent power<br>Reactive power<br>Unbalanced in %<br>Harmonic amplitude |
| **Control type** | 4 x button |
| **Local signalling** | Red LED: output signal 1...9999000 pulse/ k_h (kWh, kVAh, kVARh)<br>Green LED: module operation and integrated communication |
| **Number of inputs** | 0 |
| **Number of outputs** | 0 |
| **Communication port protocol** | Modbus RTU at 4800 bps, 9600 bps, 19200 bps, 38.4 Kbps even/odd or none - 2 wires, insulation 2500 V |
| **Communication port support** | Screw terminal block: RS485 |
| **Data recording** | Energy consumption logs<br>Power logs<br>Time stamping<br>Min/max for 8 parameters |
| **Function available** | Real time clock |
| **Sampling rate** | 64 samples/cycle |
| **Cybersecurity** | Enable/disable communication ports |
| **Communication service** | Remote monitoring |

| | |
|---|---|
| **User language** | Russian<br>French<br>Portuguese<br>English<br>Spanish<br>Chinese<br>German |
| **Product certifications** | CE conforming to IEC 61010-1<br>CULus conforming to UL 61010-1<br>CULus conforming to CSA C22.2 No 61010-1<br>RCM<br>EAC<br>C-Tick |
| **Mounting mode** | Clip-on |
| **Mounting position** | Vertical |
| **Mounting support** | Framework |
| **Provided equipment** | 1 x installation guide |
| **Measurement category** | Category III 480 V<br>Category II 480...600 V |
| **Electrical insulation class** | Double insulation<br>Class II |
| **Flame retardance** | V-0 conforming to UL 94 |
| **Connections - terminals** | Current transformer: screw connection (bottom) 6<br>Voltage inputs: screw connection (top) 4 |
| **Material** | Polycarbonate |
| **Width** | 96 mm |
| **Depth** | Total : 76.09 mm<br>Embedded : 61.64 mm |
| **Height** | 96 mm |
| **Product weight** | 300 g |
| **Compatibility code** | PM2230 |

## Environment

| | |
|---|---|
| **service life** | 7 year(s) |
| **IP degree of protection** | IP54 front: conforming to IEC 60529<br>IP30 body: conforming to IEC 60529 |
| **Relative humidity** | 5...95 % at 50 °C |
| **Pollution degree** | 2 |
| **Ambient air temperature for operation** | -10...60 °C |
| **Ambient air temperature for storage** | -25...70 °C |
| **Operating altitude** | <= 2000 m |
| **Electromagnetic compatibility** | Electrostatic discharge conforming to IEC 61000-4-2<br>Radiated radio-frequency electromagnetic field immunity test conforming to IEC 61000-4-3<br>Electrical fast transient/burst immunity test conforming to IEC 61000-4-4<br>Surge immunity test conforming to IEC 61000-4-5<br>Conducted RF disturbances conforming to IEC 61000-4-6<br>Magnetic field at power frequency conforming to IEC 61000-4-8<br>Voltage dips and interruptions immunity test conforming to IEC 61000-4-11<br>Emission tests conforming to FCC part 15 class A |
| **overvoltage category** | III |

## Packing Units

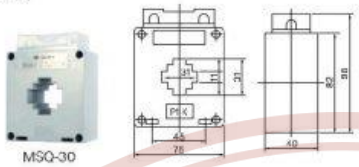
| | |
|---|---|
| **Unit Type of Package 1** | PCE |
| **Number of Units in Package 1** | 1 |
| **Package 1 Height** | 12.500 cm |
| **Package 1 Width** | 9.000 cm |
| **Package 1 Length** | 12.000 cm |
| **Package 1 Weight** | 355.000 g |
| **Unit Type of Package 2** | S03 |
| **Number of Units in Package 2** | 18 |
| **Package 2 Height** | 30.000 cm |
| **Package 2 Width** | 30.000 cm |
| **Package 2 Length** | 40.000 cm |
| **Package 2 Weight** | 7.025 kg |

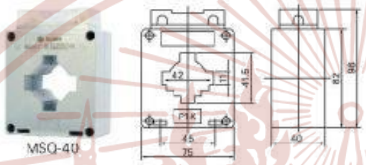
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

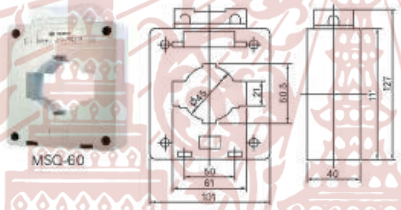
# หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า
Current Transformers

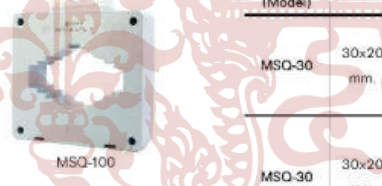
QUBIX

CE


MSQ-30


MSQ-40


MSQ-60


MSQ-100

SPECIFICATIONS:

| | | |
|---|---|---|
| • Standard | : | IEC 600185 |
| • Rated Voltage | : | 600Vac |
| • Isolation Test | : | 3KV / 1 minute |
| • Primary Current | : | 30A-5000A |
| • Secondary Current | : | 5A |
| • Operating Frequency | : | 50/60 Hz |
| • Instrument Security Factory | : | FS<5 |
| • Rated Temperature | : | -10°C - 45°C |
| • Case | : | PC |




**MSQ-Series** — Class 1.0

| รุ่น (Model) | Window | Burden Output | Current (A) Primary/Secondary | Through No.(Turns) | Packing Pcs/Ctns | ราคา ฿ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MSQ-30 | 30x20 mm. | 2.5VA | 30/5A | 1 | 60 | 210.- |
| | | | 40/5A | 1 | 60 | 210.- |
| | | | 50/5A | 1 | 60 | 210.- |
| | | | 60/5A | 1 | 60 | 210.- |
| MSQ-30 | 30x20 mm. | 5VA | 80/5A | 1 | 60 | 220.- |
| | | | 100/5A | 1 | 60 | 220.- |
| | | | 125/5A | 1 | 60 | 220.- |
| | | | 150/5A | 1 | 60 | 220.- |
| | | | 160/5A | 1 | 60 | 220.- |
| MSQ-40 | 40x10 mm. | 5VA | 200/5A | 1 | 60 | 230.- |
| | | | 250/5A | 1 | 60 | 230.- |
| | | | 300/5A | 1 | 60 | 230.- |
| | | | 400/5A | 1 | 60 | 230.- |
| MSQ-60 | 60x20 mm. | 10VA | 400/5A | 1 | 40 | 360.- |
| | | | 500/5A | 1 | 40 | 360.- |
| | | | 600/5A | 1 | 40 | 360.- |
| | | | 800/5A | 1 | 40 | 380.- |
| MSQ-100 | 100x30 mm. | 15VA | 1000/5A | 1 | 20 | 510.- |
| | | | 1500/5A | 1 | 20 | 610.- |
| | | | 2000/5A | 1 | 20 | 760.- |
| | | | 2500/5A | 1 | 20 | 990.- |

* ราคาสินค้าอาจเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้า *

# Network Automation Engine

## Product Bulletin

MS-NAE35xx-xxx, MS-NAE45xx-xxx
MS-NAE55xx-xxx, MS-NAE85xx-xxx

**Code No. LIT-1201160**
**Software Release 2.2**
**Issued March 27, 2007**
*Supersedes September 29, 2006*

The Network Automation Engine (NAE) brings an entirely new generation of technology into the Metasys® Building Automation System (BAS). The NAE is an automation engine that manages facilities using information and Internet technology.

The NAE uses the communication technologies of the building automation industry, including BACnet® protocol, LONWORKS® network, and the N2 Bus to monitor and supervise Heating, Ventilating, and Air Conditioning (HVAC) equipment, lighting, security, fire, and access control. The NAE55 supports a comprehensive set of supervisory features and functions for large facilities and technically advanced buildings and complexes. The NAE45 and NAE35 extend the power of the NAE to smaller buildings and enable the wider distribution of supervisory functions in larger facilities. The NAE85 is a high-capacity NAE. This device allows the integration of large BACnet systems and can take the place of multiple NAEs.

A single NAE or a network of multiple NAE devices within a building provide monitoring and control, alarm and event management, data exchange, trending, energy management, scheduling, and data storage.

The NAE has an embedded user interface and supports concurrently connected Web browsers with password access control and the security protection technology of the Information Technology (IT) industry.

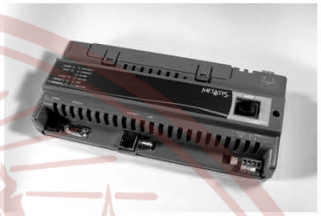


**Figure 1: NAE45xx and NAE35xx**

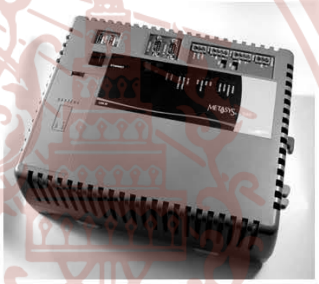


**Figure 2: NAE55xx**

**Table 1: Features and Benefits (Part 1 of 2)**

| Features | Benefits |
|---|---|
| **Communication Using Commonly Accepted IT Standards at the Automation and Enterprise Level** | Allows you to install the system on the existing IT infrastructure within a building or enterprise and use standard IT communication services over the company intranet, Wide Area Network (WAN), or public Internet with firewall protection |
| **Web-Based User Interface** | Allows you to access system data in the NAEs from any supported Web browser device connected to the network including remote users connected by dial-up telephone or an Internet Service Provider (ISP) |
| **Site Director Function** | Allows you to access all data on one site through one device. The device designated as the Site Director coordinates the display of data from multiple NAE devices for easy navigation through the entire site. |
| **Support for Web Services at the Automation Network Level** | Allows you to develop facility-specific advanced data interfaces and applications |
| **User Interface and Online System Configuration Software Embedded in NAE** | Allows configuration, commissioning, data archiving, monitoring, commanding, and system diagnosis from any device with Web browser software and does not require separate workstation software |

Table 1: Features and Benefits (Part 2 of 2)

| Features | Benefits |
|---|---|
| **Supervision of Field Controller Networks Including N2 Bus, LONWORKS Network, and BACnet MS/TP Enabled Devices** | Supports connectivity to open network standards for complete flexibility in the selection of field devices. Supported protocols include BACnet Master-Slave/ Token-Passing (MS/TP), LONWORKS, and N2. |
| **Multiple Connection Options for Data Access** | Allows connection of a Web browser via the Internet Protocol (IP) network using the Ethernet port or directly to an RS-232 serial port. For a dial-up connection, use the optional internal or external modem. |



Figure 3: NAE85 (Rack Mount)

## NAE Networking

NAEs have multiple connection port options that allow you to build an extremely flexible network at the automation and enterprise level of your system, as well as at the field controller and data acquisition levels.

### *Web Browser Access*

You access building systems through the NAE with a standard Web browser on a desktop or laptop computer. The computer does not require any special workstation software other than the browser and a standard Java® plug-in. The Web browser accesses the NAE directly over the IP network, or via the Internet or public telephone service.

### *IP Ethernet Network*

The NAE connects directly to an IP Ethernet network running at 10 or 100 Mbps. Multiple NAEs communicate with each other over the network, and one NAE can act as the Site Director. The Site Director controls the point of access to the network on the site from a user interface device. The data transmission on the network uses standard IT protocols, services, and formats.

Networks in different buildings may be interconnected using standard WAN technologies and network service providers. The speed of transmission depends on the technology used.

### *Remote NAE*

The NAE can be accessed remotely over standard WAN infrastructures, the Internet using an ISP line, or over the public telephone network using a modem and the Point-to-Point Protocol (PPP). The NAE offers an optional internal modem or supports an external modem.

### *Application and Data Server (ADS)/ Extended Application and Data Server (ADX)*

The ADS/ADX is an optional software package running on a computing platform that provides a location for storage of the system configuration database, trend logs, alarm logs, and audit trails. Also, the ADS/ADX can be configured as the Site Director to coordinate access to all components on a site via a Web browser connected over the network, Internet, or telephone line via dial-up communication. The software supports standard IT firewall technologies for protection against unauthorized access.

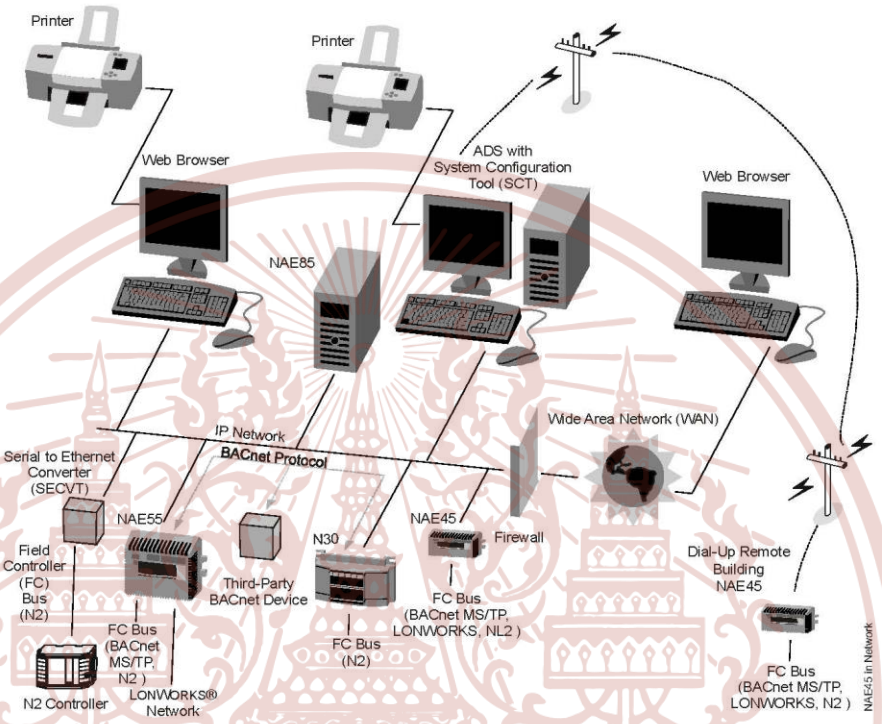



**Figure 4: Metasys Network with Multiple NAEs**

## Field Networks and Protocols

The NAE offers the ability to pass data from one field network to another and transmit data from the field network to the enterprise and automation level of the network. This allows your system to operate as one virtual control network. For specific information on protocol support for each of the engines, please see Table 2.

### *Automation Level Communication*

NAEs communicate internal system data using peer-to-peer messaging over the IP Ethernet network. Thus each NAE device shares data and has access to information on all other NAE nodes on the network to coordinate the overall functions of the building controls.

### *BACnet Protocol*

The automation level communication also supports the BACnet protocol and facilitates the network integration of other systems and devices that use this protocol standard. The Johnson Controls® N30 Supervisory Controller can also be integrated into the NAE network at the automation level using BACnet services.

The NAE supports the BACnet services and objects typically used by a workstation and a field controller device, including BACnet alarm and event services. See the *NAE Protocol Implementation Conformance Statement Technical Bulletin (LIT-1201532)* for detailed information on BACnet conformance and the supported BACnet Interoperability Building Blocks.

## The BACnet MS/TP Hardware Field Equipment Controllers (FECs)

The MS/TP bus is based on BACnet standard protocol SSPC-135, Clause 9.

The MS/TP bus is a peer-to-peer, multiple-master protocol in which each master device takes turns originating messages to pass to any other device on the bus. Slave devices can also be on the bus. A slave device does not get the token and only communicates on the bus when data is requested from it by a master device.

With the addition of an MS/TP to Ethernet Converter (MS-MECVT-0), remote MS/TP devices can be connected to the NAE551x models over an IP network. This MS/TP tunneling capability provides greater flexibility in product applications. For more information, refer to the *MECVT Technical Bulletin (LIT-12011214)*.

## The N2 Bus

The N2 Bus is the Johnson Controls field communications trunk that links Application Specific Controllers (ASCs) to a supervisory controller. ASCs include the DX-9100, Air Handling Unit (AHU), Unitary (UNT) controller, Variable Air Volume (VAV) controllers, and VAV Modular Assembly (VMA) devices.

The N2 Bus supports Metasys system compatible devices from other manufacturers and the Metasys Integrator® system. The Metasys Integrator system includes an extensive series of software drivers for the integration of other manufacturers' control devices, including HVAC equipment, power monitoring devices, lighting panels, security, and fire detection systems.

The NAE5512 and NAE5513 models can route communication over an IP network from an ASC or N2-compatible device to the NAE providing greater flexibility in product applications. These models allow you to connect remote N2 devices and the NAE using N2 Tunneling over Ethernet applications. For more information, refer to the *SECVT Technical Bulletin (LIT-1201790)*.

### *LonWorks Enabled Devices*

The NAE family includes models that can supervise LonWorks devices. LonWorks devices are supported if the network interface follows current LonMark® guidelines, preferably with the LonMark certification, and uses the Free Topology Transceiver FTT10.

The LonWorks network interface in the NAE supports all current LonMark certified devices including devices from Johnson Controls such as the LN Series Controllers, the NexSys® controller line, and the LonWorks enabled programmable Flexible System Controller (FSC).

## Software for Efficient Building Operation

### *System Security*

The NAE recognizes legitimate users through the entry of a user ID and a password at the Web browser user interface. User access data are encrypted in the transmission and in the NAE database. The security administrator manages user profiles and accounts at a site or system level. The authorization levels range from configuring the complete system to only viewing one section of the system or site. The system administrator assigns a user ID, password, and specific NAE data access privileges in each user account.

### *Metasys System User Interface*

The embedded NAE user interface provides formatted data and graphic screens to any connected Web browser. Authorized users simply log on to the NAE device from the Web browser to access the user interface. This embedded user interface is ideal for smaller networks and remote locations where a dedicated computer platform to support a user interface is not required.

If an NAE or ADS/ADX has been defined as the Site Director, it provides access to all other NAEs or ADSs/ADXs on the same network and combines data for presentation on a single screen on the connected Web browser. In larger installations, an NAE can pass its data to an ADS/ADX on the network that acts as Site Director. You can access data from an NAE or ADS/ADX at any point in the network with a Web browser.

### *Basic Access*

Basic Access is a mode of operation allowing users with Basic Access user accounts access to a subset of the standard user interface capabilities based on their assigned permissions. Basic Access user accounts are created by Metasys system administrators using the Security Administrator system. Basic Access meets the user interface requirements for most building operators. Basic Access is provided on all of the Metasys system engines and servers but is the primary user interface in the NAE3514, NAE3515, NAE3524, and NAE3525 controllers.

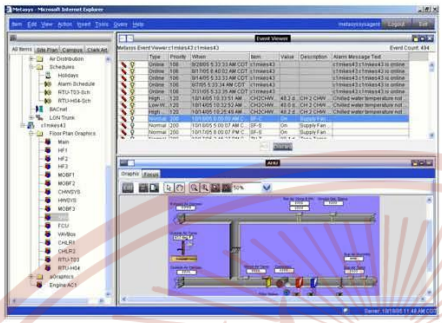


**Figure 5: Metasys User Interface Screen**

### *Monitoring and Control*

The NAE software is specifically designed to meet the needs of building owners and managers to efficiently monitor and control all the mechanical and electrical systems in a typical building such as:

- HVAC units
- central equipment including chillers and boilers
- lighting and electrical distribution
- power generation and energy monitoring equipment
- interfaces to security and fire detection systems

The NAE monitors equipment by collecting data from the field control devices, then coordinating the required commands and sending them to the equipment at the required priority.

You can access information via a navigation tree that represents the logical grouping of network devices and point data names defined when configuring the system. You can also navigate using graphic images or create a customized tree with groups and names based on device location in the building or on system groups.

### *Global Search*

This enhanced search feature allows you to search the Metasys system for multiple objects that meet specific criteria based on naming and object type. The global search provides you with the ability to manage lists of objects, which can be used by other features for commanding, trending, reporting, and object selection.

### *Global Command*

This additional command feature allows you to send a single command to multiple objects, and view a log of the command results.

### *Transaction Recording*

All user actions performed through the NAE, including logon and logoff, commands to equipment, changes to parameters, and changes to the system configuration are recorded in the NAE audit trail log.

### *Alarm and Event Processing*

When a value exceeds a defined limit or changes to an off-normal state, the NAE sends alarm or event messages to online Web browsers, pagers, e-mail servers, and serial printers. The message routing depends on the source, time, and type of the event. The information is also stored immediately in a local log file on the NAE, later transmitted to a site log file on an ADS/ADX, and can be viewed at a later time from a Web browser to trace the history of alarms and events on the site.

The alarm and event information may include a predefined message to facilitate a fast response to the system problem. If you have the appropriate password authority and you acknowledge or clear an alarm, the site log file is updated.

You may also request a summary of all current alarms in the NAE or review a history of recent events.

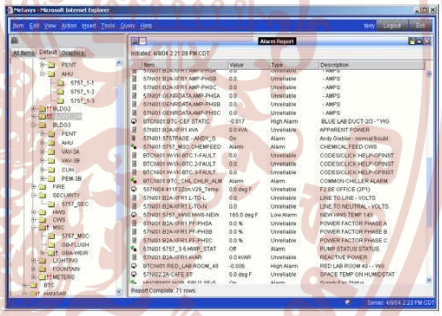


**Figure 6: Alarm and Event Screen**




**Figure 7: Trend Screen**

### *Historical Trend Data*

The NAE supports trending of any monitored value at user-defined periods ranging from a few seconds to one week. Alternatively, trending may be configured based on Change-of-Value (COV) sampling. Initially trend logs are stored in the NAE. Trend log information can be transferred to a historical database on the ADS/ADX at user-defined intervals or when the NAE files are nearly full.

Trend logs are useful for analyzing the performance of building control systems and locating the source of system problems. Historical trend data records are required in many industries, such as pharmaceutical and food processing plants, to document the ambient conditions during manufacture.

### *Totalization Data*

Analog and pulse totalization features in the NAE monitor the use of energy and other consumables. You can generate reports for cost allocation within a facility or to support energy and cost reduction programs.

Event and runtime totalization features, including the number of times specific events occur and how long equipment has been in operation, provide data for servicing and maintenance programs and for early identification of possible system problems.

### *Trend Viewer for Ad Hoc Trends*

This enhanced trend feature allows you to view multiple trend extensions based on the ad hoc selection of items from the results of a global search or from the navigation tree. This trend feature provides another option in trending.

### *Scheduling*

The scheduling feature allows you to define building occupancy periods and the start and stop times for mechanical or electrical equipment. Operating parameters such as temperature setpoints and power consumption limits can be set according to the time of day.

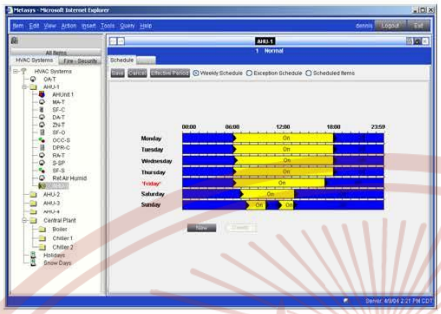


**Figure 8: Schedule Screen**

You can schedule an event for one or more days of the week, for a holiday, or for particular calendar dates. Schedules can be defined in one NAE for the whole site or for just the equipment controlled by that NAE. Each NAE uses a graphical user interface to simplify setting up the schedules from a Web browser.

### *Network-Wide System Interlocking*

Interlocking enables the NAE to take information from one or more field controllers, make logical comparisons, and issue a set of control instructions to other field controllers anywhere on the network. Interlocking also facilitates sharing analog or binary data between controllers. For example, interlocking can be used to eliminate the need for wiring an outside air temperature sensor to each controller, saving hardware and installation costs.

### *Optimal Start*

Optimal Start automatically determines the correct time to start heating and cooling systems to ensure that the facility is ready for occupants at the scheduled time. It adjusts to seasonal variations and minimizes the energy used.

## Database Configuration Management

You can define the database online through a Web browser directly connected to an NAE device, or connected from a remote location via a WAN. Using the System Configuration Tool (SCT), you can define the system configuration and database offline for later download to the NAE over the network. In either case, the database is normally archived on the SCT or ADS/ADX.

All the software required for database configuration resides on the NAE or SCT. You do not need to have a local copy of the database on the Web browser to make authorized changes.

The configuration data for application specific N2 controllers on the field networks can be downloaded through the NAE without affecting system operations.

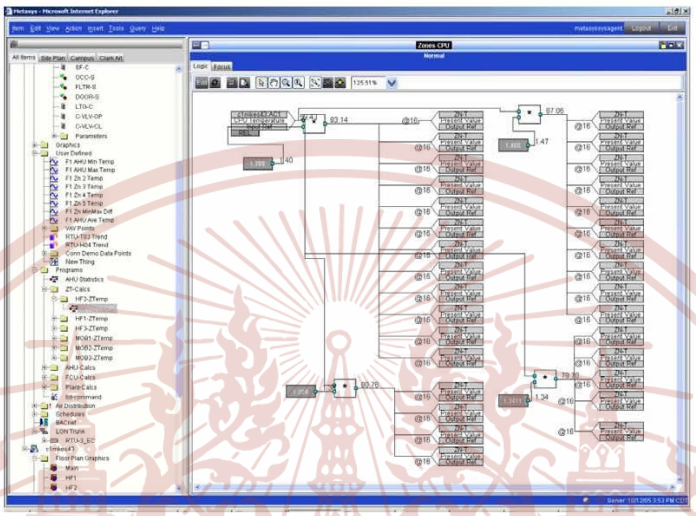


**Figure 9: SCT Screen**

## Hardware Features

### *NAE35, NAE45, and NAE55*

The NAE35, NAE45, and NAE55 provide the following features for the building controls market:

- industrial Single Board Computer (SBC)
- nonvolatile solid-state Flash memory to store all programs and data
- standard Universal Serial Bus (USB) connections
- battery backup to save data from Dynamic Random Access Memory (DRAM) into Flash memory when primary power to the NAE is interrupted
- real-time clock with battery backup
- Light-Emitting Diodes (LEDs) to indicate power, communications, and fault, to allow easy servicing
- optional internal modem
- removable screw terminals for 24 VAC power and N2 Bus network connections
- standard 9-pin sub-D connectors for RS-232-C serial ports
- RJ-11 telephone line connector for internal modem
- RJ-45 connector for Ethernet connection

### *NAE85*

The NAE85 has most of the same functions and capabilities as the NAE35, NAE45, and NAE55, and features a scalable design. The NAE85 is available on two platform configurations:

- 1U rack-mount chassis
- tower desktop chassis

The NAE85 does **not** support:

- BACnet MS/TP Field Controllers
- N2 networks
- LONWORKS networks
- dial-out to an ADS/ADX
- device Reset command in the Metasys system User Interface (UI)
- upgrade using the NAE/NIE Update Tool

## NAE Model Comparison

Table 2 contains a brief comparison of the features of the different NAE models.

**Table 2: Comparison of Features for NAE Models**

| Feature | NAE85 | NAE55 | NAE45 | NAE35 |
|---|---|---|---|---|
| Number of N2 or BACnet MS/TP Trunks (Defined in UI) | None | 2 | 1 | 1 |
| Number of N2 or BACnet MS/TP Devices per Trunk | None | 100 | 100 | 50 |
| Maximum Number of Objects | 25,000[1] | 5,000 | 2,500 | 2,500 |
| Model with Internal Modem | No | Available | Available | Available |
| RS-232-C Serial Ports | None | 2 | 1 or 2 | 1 or 2 |
| USB Serial Ports | 2 or 3 | 2 | 1 | 1 |
| RS-485 Ports | None | 2 | 1 | Available |
| Ethernet Ports | 2 | 1 | 1 | 1 |
| LONWORKS Network Support (Number of Devices) | No | Available (255) | Available (127) | Available (64) |
| Smoke Control Applications | No | Available | No | No |
| N2 Tunneling Over Ethernet Applications | No | Available | No | No |
| MS/TP Tunneling Over Ethernet Applications | No | Available | No | No |

1. Standard is 10,000 objects; 15,000 object upgrade available.

## Conclusion

The NAE affirms Johnson Controls position as a leader in the BAS industry and as an innovator of solutions for the complete management of buildings. The integration of Information Technology and Internet standards into the NAE platform, as well as the use of open protocols for field networks, bring the benefits of the global communications and control industries into one system. Web browser-based access from any location is a key to the effective use of the automation network.

The Metasys system continues to be the integrating network within buildings and has now been extended to bridge the gap between traditional control systems and the business and communication network systems of the enterprise. The Metasys Network Automation Engine and Metasys Web-enabled network are wise investments that will yield returns to the building owner and operator far into the future.

## Ordering Information

Contact the nearest Johnson Controls representative to order an NAE. Specify the desired product code from Table 3 for the NAE35, Table 4 for the NAE45, Table 5 for the NAE55, Table 6 for the NAE85, and Table 7 for accessories.

**Table 3: NAE35 Ordering Information (Part 1 of 2)**

| Product Code Number[1] | Description |
|---|---|
| MS-NAE35xx-xxx (Base features of each NAE35) | NAE35 Network Automation Engines: Requires a 24 VAC power supply. Each model includes one RS-232-C serial port, one USB serial port, one Ethernet port, and an MS-BAT1020-0 Data Protection Battery. |
| MS-NAE3510-2 | Supports one N2 or BACnet MS/TP trunk (RS-485 port); includes an additional RS-232-C serial port for optional external modem; supports up to 50 devices on the RS-485 port. |
| MS-NAE3511-2 | Supports one N2 or BACnet MS/TP trunk (RS-485 port); includes an internal modem; supports up to 50 devices on the N2 or BACnet MS/TP trunk. |
| MS-NAE3514-2 | Supports one N2 or BACnet MS/TP trunk (RS-485 port); features Basic Access support; includes an additional RS-232-C serial port for optional external modem; supports up to 50 devices on the N2 or BACnet MS/TP trunk. |

**Table 3: NAE35 Ordering Information (Part 2 of 2)**

| Product Code Number[1] | Description |
|---|---|
| MS-NAE3515-2 | Supports one N2 or BACnet MS/TP trunk (RS-485 port); features Basic Access support; includes an internal modem; supports up to 50 devices on the N2 or BACnet MS/TP trunk. |
| MS-NAE3520-2 | Includes a LONWORKS port and supports one LONWORKS trunk, includes an additional RS-232-C serial port for optional external modem. Supports up to 64 devices on the LONWORKS port. |
| MS-NAE3521-2 | Includes a LONWORKS port and supports one LONWORKS trunk, includes an internal modem. Supports up to 64 devices on the LONWORKS port. |
| MS-NAE3524-2 | Includes a LONWORKS port and supports one LONWORKS trunk, features Basic Access support, and includes an additional RS-232-C serial port for optional external modem. Supports up to 64 devices on the LONWORKS port. |
| MS-NAE3525-2 | Includes a LONWORKS port and supports one LONWORKS trunk, features Basic Access support, and includes an internal modem. Supports up to 64 devices on the LONWORKS port. |

1. All models are also available in a Buy American version (add a G after the code number). For the European version, add an E after the code number. For repair parts, add -701 after the code number.

**Table 4: NAE45 Ordering Information**

| Product Code Number[1] | Description |
|---|---|
| MS-NAE45xx-xxx (Base features of each NAE45) | NAE45 Network Automation Engines: Requires a 24 VAC power supply. Each model includes one RS-232-C serial port, one USB serial port, one Ethernet port, and an MS-BAT1020-0 Data Protection Battery. |
| MS-NAE4510-2 | Supports one N2 or BACnet MS/TP trunk (RS-485 port); includes an additional RS-232-C serial port for optional external modem; supports up to 100 devices on the N2 or BACnet MS/TP trunk. |
| MS-NAE4511-2 | Supports one N2 or BACnet MS/TP trunk (RS-485 port); includes an internal modem; supports up to 100 devices on the N2 or BACnet MS/TP trunk. |
| MS-NAE4520-2 | Includes a LONWORKS port and supports one LONWORKS trunk, includes an additional RS-232-C serial port for optional external modem; supports up to 127 devices on the LONWORKS port. |
| MS-NAE4521-2 | Includes a LONWORKS port and supports one LONWORKS trunk, includes an internal modem; supports up to 127 devices on the LONWORKS port. |

1. All models are also available in a Buy American version (add a G after the code number). For the European version, add an E after the code number. For repair parts, add -701 after the code number.

**Table 5: NAE55 Ordering Information (Part 1 of 2)**

| Product Code Number[1] | Description |
|---|---|
| MS-NAE55xx-xxx (Base features of each NAE55) | NAE55 Network Automation Engines: Requires a 24 VAC power supply. Each model includes two RS-232-C serial ports, two USB serial ports, two RS-485 ports, one Ethernet port, and one MS-BAT1010-0 Data Protection Battery. Supports up to 100 devices on each N2 or BACnet MS/TP trunk. |
| MS-NAE5510-1 | Simultaneously supports two N2 or two BACnet MS/TP trunks, or one of each trunk. |
| MS-NAE5510-0U | Simultaneously supports two N2 or two BACnet MS/TP trunks, or one of each trunk.<br>**Note:** This is the only NAE model UL 864 Listed for smoke control applications. |

**Table 5: NAE55 Ordering Information (Part 2 of 2)**

| | |
|---|---|
| **MS-NAE5511-1** | Simultaneously supports two N2 or two BACnet MS/TP trunks, or one of each trunk; includes an internal modem. |
| **MS-NAE5512-1** | MS-NAE5512-1 simultaneously supports two N2 or two BACnet MS/TP trunks, or one of each trunk; to support N2 Tunneling, do not configure both trunks for BACnet MS/TP. |
| **MS-NAE5513-1** | SMS-NAE5513-1 simultaneously supports two N2 or two BACnet MS/TP trunks, or one of each trunk; to support N2 Tunneling, do not configure both trunks for BACnet MS/TP; includes an internal modem. |
| **MS-NAE5520-1** | Includes a LONWORKS port and simultaneously supports two N2 or two BACnet MS/TP trunks, or one of each trunk, and a LONWORKS trunk. Supports up to 255 devices on the LONWORKS port. |
| **MS-NAE5521-1** | Includes a LONWORKS port and simultaneously supports two N2 or two BACnet MS/TP trunks, or one of each trunk, and a LONWORKS trunk, includes an internal modem. Supports up to 255 devices on the LONWORKS port. |
| **MS-NAETUNL-8** | ToggleTunnel utility for converting an NAE55/NIE55 to an NAE55 model with the N2 Tunneling and Wireless N2 Field Bus features enabled. Not for use with MS-NAE5510-0U or MS-NIE5510-0U. |

1. All models are also available in a Buy American version (add a G after the code number). For the European version, add an E after the code number. For repair parts, add -701 after the code number.

**Table 6: NAE85 Ordering Information**

| Product Code Number | Description |
|---|---|
| **MS-NAE85xx-xxx (Base features of each NAE85)** | NAE85 Network Automation Engine: Supports up to 25,000 objects[1]. |
| **MS-NAE8500-0** | NAE85 model with 1U chassis |
| **MS-NAE8500-1** | NAE85 model with tower chassis |

1. Standard is 10,000 objects; upgrade is available to 15,000 objects (see Table 7).

**Table 7: NAE Accessories Ordering Information**

| Product Code Number | Description |
|---|---|
| **MS-SECVT-0** | Serial to Ethernet Converter (SECVT) for N2 Tunneling over Ethernet Applications |
| **MS-SWCVT-0** | Serial to Wireless Converter (SWCVT) for N2 Tunneling over Ethernet Applications |
| **MS-MECVT-0** | MS/TP to Ethernet Converter (MECVT) for MS/TP Tunneling over Ethernet Applications |
| **MS-BAT1010-0** | Replacement data protection battery for NAE55 and NIE55. Rechargeable gel cell battery: 12 V, 1.2 Ah, with a typical life of 3 to 5 years at 21°C (70°F) |
| **MS-BAT1020-0** | Replacement data protection battery for NAE35 and NAE45. Rechargeable NiMH battery: 3.6 V 500 mAh, with a typical life of 10 years at 21°C (70°F) |
| **MS-15KUPG-0** | 15,000 object upgrade for NAE85/NIE85 |
| **POWAP-003A** | Uninterruptible Power Supply (UPS) for NAE85/NIE85 |
| **AS-XFR100-1** | Power transformer (Class 2, 24 VAC, 92 VA maximum output), with enclosure |
| **AS-XFR010-1** | Power transformer (Class 2, 24 VAC, 92 VA maximum output), no enclosure |

## Technical Specifications

***NAE35 and NAE45***

| | | |
|---|---|---|
| **Product Codes** | | MS-NAE35xx-xxx and MS-NAE45xx-xxx |
| **Power Requirement** | | Dedicated nominal 24 VAC, Class 2 power supply (North America), Safety Extra Low Voltage (SELV) power supply (Europe), at 50/60 Hz (20 VAC minimum to 30 VAC maximum) |
| **Power Consumption** | | 25 VA maximum |
| **Ambient Operating Temperature** | | 0 to 50°C (32 to 122°F) |
| **Ambient Operating Conditions** | | 10 to 90% RH, 30°C (86°F) maximum dew point |
| **Ambient Storage Temperature** | | -40 to 70°C (-40 to 158°F) |
| **Ambient Storage Conditions** | | 5 to 95% RH, 30°C (86°F) maximum dew point |
| **Data Protection/Clock Battery** | | Supports data protection on power failure and maintains real-time clock through a power failure. Rechargeable NiMH battery: 3.6 V 500 mAh, with a typical life of 10 years at 21°C (70°F); product code number: MS-BAT1020-0 |
| **Processor** | | 192 MHz Renesas™ SH4 7760 RISC processor |
| **Memory** | | 128 MB Flash nonvolatile memory for operating system, configuration data, and operations data storage and backup<br>128 MB Synchronous Dynamic Random Access Memory (SDRAM) for operations data dynamic memory |
| **Operating System** | | Microsoft® Windows® CE embedded |
| **Network and Serial Interfaces** | | One Ethernet port; 10/100 Mbps; 8-pin RJ-45 connector<br>One optically isolated RS-485, N2, or BACnet MS/TP port (9,600, 19.2K, 38.4K, or 76.8K baud); pluggable and keyed 4-position terminal block<br>One RS-232-C serial port with standard 9-pin sub-D connectors that support all standard baud rates<br>(A second serial port [only] on models without an optional internal modem supports an optional, user-supplied external modem.)<br>One USB serial port with standard USB connector<br>Options: One telephone port for internal modem; up to 56 Kbps; 6-pin RJ-11 connector (Models with an optional internal modem have one RS-232-C serial port only.) |
| **Housing** | | Plastic housing<br>Plastic material: ABS + polycarbonate UL94-5VB<br>Protection: IP20 (IEC 60529) |
| **Mounting** | | On flat surface with screws on three mounting feet or single DIN rail |
| **Compliance** | **United States** | UL Listed, File E107041, CCN PAZX, UL 916, Energy Management Equipment<br>FCC Compliant to CFR47, Part 15, Subpart B, Class A |
| | **Canada** | UL Listed, File E107041, CCN PAZX7, CAN/CSA C22.2 No. 205, Signal Equipment<br>Industry Canada Compliant, ICES-003 |
| | **Europe** | CE Mark, EMC Directive 89/336/EEC, in accordance with EN 61000-6-3 (2001) Generic Emission Standard for Residential and Light Industry and EN 61000-6-2 (2001) Generic Immunity Standard for Heavy Industrial Environment |
| | **Australia and New Zealand** | C-Tick Mark, Australia/NZ Emissions Compliant |
| **Dimensions (Height x Width x Depth)** | | 131 x 270 x 62 mm (5.2 x 10.6 x 2.5 in.)<br>Minimum space for mounting NAE45: 210 x 350 x 110 mm (8.3 x 13.8 x 4.3 in.) |
| **Shipping Weight** | | 1.2 kg (2.7 lb) |

***NAE55 (Part 1 of 2)***

| | | |
|---|---|---|
| **Product Code** | | MS-NAE55xx-xxx |
| **Power Requirement** | | Dedicated nominal 24 VAC, Class 2 power supply (North America), Safety Extra Low Voltage (SELV) power supply (Europe), at 50/60 Hz (20 VAC minimum to 30 VAC maximum) |
| **Power Consumption** | | 50 VA maximum |
| **Ambient Operating Temperature** | | 0 to 50°C (32 to 122°F) |
| **Ambient Operating Conditions** | | 10 to 90% RH, 30°C (86°F) maximum dew point |
| **Ambient Storage Temperature** | | -40 to 70°C (-40 to 158°F) |
| **Ambient Storage Conditions** | | 5 to 95% RH, 30°C (86°F) maximum dew point |
| **Data Protection Battery** | | Supports data protection on power failure. Rechargeable gel cell battery: 12 V, 1.2 Ah, with a typical life of 3 to 5 years at 21°C (70°F); product code number: MS-BAT1010-0 |
| **Clock Battery** | | Maintains real-time clock through a power failure. On board cell; typical life 10 years at 21°C (70°F) |
| **Processor** | | 300 MHz Pentium® class Geode® GX1 MMX enhanced processor for MS-NAE5510-0U and MS-NIE5510-0U<br>400 MHz Geode GX533 processor for MS-NAE55xx-1 and MS-NIE55xx-1 models |
| **Memory** | | 256 MB Flash nonvolatile memory for operating system, configuration data, and operations data storage and backup for MS-NAE5510-0U and MS-NIE5510-0U<br>512 MB Flash nonvolatile memory for operating system, configuration data, and operations data storage and backup for MS-NAE55xx-1 and MS-NIE55xx-1 models<br>256 MB Synchronous Dynamic Random Access Memory (DRAM) for operations data dynamic memory for all models |
| **Operating System** | | Microsoft Windows XP embedded |
| **Network and Serial Interfaces** | | One Ethernet port; 10/100 Mbps; 8-pin RJ-45 connector<br>Two optically isolated RS-485, N2, or BACnet MS/TP port (9,600, 19.2k, or 38.4k baud); pluggable and keyed 4-position terminal blocks<br>Two RS-232-C serial ports with standard 9-pin sub-D connectors that support all standard baud rates<br>Two USB serial ports, standard USB connectors<br>Options:<br>One telephone port for internal modem; up to 56 Kbps; 6-pin RJ-11 connector<br>One LONWORKS port; FTT10 78 Kbps; pluggable, keyed 3-position terminal block (LONWORKS port available on NAE552x-xxx models only). |
| **Housing** | | Plastic housing with internal metal shield<br>Plastic material: ABS + polycarbonate UL94-5VB<br>Protection: IP20 (IEC 60529) |
| **Mounting** | | On flat surface with screws on four mounting feet or on dual DIN rail |
| **Compliance** | **United States** | UL Listed, File E107041, CCN PAZX, UL 916, Energy Management Equipment<br>FCC Compliant to CFR47, Part 15, Subpart B, Class A<br>UL Listed, File S4977, CCN UUKL, UL 864, Control Units and Accessories for Fire Alarm Systems (only for Product Code Number MS-NAE5510-0U, also PAZX Listing) |
| | **Canada** | UL Listed, File E107041, CCN PAZX7, CAN/CSA C22.2 No. 205, Signal Equipment<br>Industry Canada Compliant, ICES-003 |
| | **Europe** | CE Mark, EMC Directive 89/336/EEC, in accordance with EN 61000-6-3 (2001) Generic Emission Standard for Residential and Light Industry and EN 61000-6-2 (2001) Generic Immunity Standard for Heavy Industrial Environment |
| | **Australia and New Zealand** | C-Tick Mark, Australia/NZ Emissions Compliant |

***NAE55 (Part 2 of 2)***

| | |
|---|---|
| **Dimensions (Height x Width x Depth)** | 226 x 332 x 96.5 mm (9 x 13.5 x 3.8 in.) including mounting feet<br>Minimum space for mounting NAE55: 303 x 408 x 148 mm (12 x 16.1 x 5.9 in.) |
| **Shipping Weight** | 2.9 kg (6.4 lb) |

***NAE85***

| | |
|---|---|
| **Product Code** | MS-NAE85xx-xxx |
| **Computer Type** | Entry-level Server Class Computer, Intel® SR1325TP1-E |
| **Power Requirement** | 110-120 VAC |
| **Power Consumption** | 1U Server Rack model: 5 A<br>Desktop Tower model: 5 A |
| **Ambient Operating Temperature** | 10 to 35°C (50 to 95°F) |
| **Ambient Operating Conditions** | 10 to 90% RH |
| **Ambient Storage Temperature** | -40 to 70°C (-40 to 158°F) |
| **Ambient Storage Conditions** | 95% RH, Noncondensing at 35°C (95°F) |
| **Data Protection** | User supplied UPS: APC® PowerStack 450 (recommended) |
| **Clock Battery** | CR2032 Lithium Ion |
| **Processor** | 2.6 GHz Intel Pentium® 4 processor |
| **Memory** | 1GB ECC SDRAM |
| **Hard Drive** | RAID 1, 2 ATA, 80 GB |
| **Operating System** | Microsoft Windows 2003 Server Web Edition |
| **Network and Serial Interfaces** | Two RJ-45 Ethernet Ports<br>• Port 1 is a 1 GB Ethernet Port for communicating with the BAS network<br>• Port 2 is a 100 Mbps Ethernet Port for communicating with an enterprise network<br>One Video port for monitor<br>One 9-pin Serial port<br>3 USB ports |
| **Housing** | 1U Server Rack model: Metal<br>Desktop Tower model: Metal and plastic |
| **Mounting** | 1U Server Rack model: EIA-310D compatible server cabinet<br>Desktop Tower model: Vertical on feet |
| **Dimensions (Height x Width x Depth)** | 1U Server Rack model: 4.3 x 43 x 58 cm (1.7 x 16.9 x 23 in.)<br>Desktop Tower model: 45 x 24 x 66 cm (17.7 x 9.4 x 26 in.) |
| **Shipping Weight** | 18 kg (40 lb) |

*The performance specifications are nominal and conform to acceptable industry standard. For application at conditions beyond these specifications, consult the local Johnson Controls office. Johnson Controls, Inc. shall not be liable for damages resulting from misapplication or misuse of its products.*

*Federal Communication Commission (FCC) Compliance Statement*

*This device complies with Part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) this device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference that may cause undesired operation.*

*This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class A digital device pursuant to Part 15 of FCC rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference when this equipment is operated in a commercial environment. This equipment generates, uses, and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instruction manual, may cause harmful interference to radio communications. Operation of this equipment in a residential area is likely to cause harmful interference, in which case the user will be required to correct the interference at his or her own expense.*

*Canadian Compliance Statement*

*This Class A digital apparatus meets all the requirements of the Canadian Interference-Causing Equipment Regulations. Cet appareil numérique de la Classe A respecte toutes les exigences du Règlement sur le matériel brouilleur du Canada.*


TECHNICAL
DATA
SHEET
HT
THT300
Rel. EN 2-00 - 21/01/22
THT300
PROFESSIONAL IR
CAMERA 384x288pxl
WITH TOUCH-SCREEN
384x288
PIXEL
TEMPERATURE
RANGE
-20°\650°
FUSION
PiP

# THT300

Rel. EN 2-00 - 21/01/22

PROFESSIONAL IR CAMERA
384x288pxl WITH TOUCH-SCREEN





TECHNICAL
DATA SHEET

## 1. IMAGING PERFORMANCE

| | |
|---|---|
| **THERMAL** | |
| Detector type | UFPA |
| Spectral range | 8 ÷14µm |
| Risolution / Pxl size | 384 x 288 pxl / 17µm |
| Thermal sensitivity/NETD | <0.05°C @ 30°C / 50mK |
| Field of View (FOV) | 41.5° x 31.1° |
| Focal lens / F-number | 9mm / 1.0 |
| Minimum focal distance | 0.5m |
| IFOV | 1.89mrad |
| Focusing | Manual on lens |
| Image frequency | 50Hz |
| Color palettes | 8 Standard + 4 Isotherms |
| **VISIBLE** | |
| Integrated camera | 2Mpxl, FOV 65° |

## 2. IMAGING/IR VIDEO DISPLAY

| | |
|---|---|
| Display type | 3.5" TFT color, capacitive touch-screen, high brightness |
| Image mode | IR, Visible, Fusion PiP, Auto Fusion |
| IR Video | Recording and saving MP4 format |
| Electronic zoom | x1 ÷ x32 in continuous way |

## 3. TEMPERATURE MEASUREMENT

| RANGE | RESOLUTION | ACCURACY (*) |
|---|---|---|
| -20°C ÷ 650.0°C | 0.1°C | ±2%rdg or ±2°C (higher value) |
| -4.0°F ÷1202.0°F | 0.1°F | ±2%rdg or ±3.6°F (higher value) |

(*) Ambient temperature: 10°C ÷ 35°C, Object temperature: >0°C

## 4. TEMPERATURE MEASUREMENT SCREENING MODE

| RANGE | RESOLUTION | ACCURACY |
|---|---|---|
| 32.0°C ÷ 42.0°C | 0.1°C | ±0.5°C |
| 89.6°F ÷ 107.6°F | 0.1°F | ±0.9°F |

# THT300



Rel. EN 2-00 - 21/01/22

PROFESSIONAL IR CAMERA
384x288pxl WITH TOUCH-SCREEN



TECHNICAL
DATA SHEET

## 5. GENERAL SPECIFICATIONS

| | |
|---|---|
| Measurement cursors | 4 (1 fixed central + 3 freely positionable on image) |
| Measurement modes | Automatic / Manual / Histogram |
| Emissivity correction | 0.01 ÷ 1.00 + internal table with common materials |
| Measurement functions | Automatic correction based on distance, relative humidity, ambient temperature, reflexed temperature, offset |
| Advanced analysis | Spots (max3), Lines (max 2), Areas (max 3), "Hot/Cold" points, Face mode temperature detection (max 10 persons) |
| Alarm on temperature | Associated to measurements spots |
| Temp. Compensation | only Screening mode |
| Operating temperature | -15°C ÷ 50°C |
| Operating humidity | 10%RH ÷ 90%RH |
| Storage temperature | -40°C ÷ 70°C |
| Storage humidity | 10%RH ÷ 90%RH |
| Encapsulation | IP54 according with IEC529 |
| Shock | 25G, according with IEC60068-2-29 |
| Vibrations / Drop test | 2G, according with IEC60068-2-6 / 2m |
| Dimensions (L x W x H) | 240 x 100 x 110mm |
| Weight(battery included) | 535g |

## 6. IMAGE STORAGE AND EXTERNAL INTERFACE

| | |
|---|---|
| Memory | Internal memory (3.4GB) + Micro SD card 16GB (max 32GB) |
| File format | JPEG standard (snapshots), HIR (radiometric) |
| Memory size | 1000 pics/45min video (internal memory), >6000 pics (micro SD) |
| Textual annotation | With internal virtual keyboard |
| PC interface | USB-C (download IR images/videos to PC) |
| WiFi connection | For connection to mobile devices through HTProCamera APP |

## 7. POWER SUPPLY

| | |
|---|---|
| Battery type | Rechargeable Li-ION, 3.7V 2600mAh |
| Charging system | In camera |
| Battery life | Approx. 4 hours (stand-by and WiFi off) |
| External power | External adapter 100/240VAC (50/60Hz)/5VDC, 2400mA |

**This instrument complies with European Directive EMC 2014/35/EU and at requirements of European Directives 2011/65/EU (RoHS) and 2012/19/EU (WEEE)**

**HT ITALIA S.R.L.** Via della Boaria, 40 48018 Faenza (RA) Italy
**T** +39 0546 621002 | **F** +39 0546 621144 | **M** export@ht-instruments.com
**ht-instruments.com**

**HT ITALIA SRL**
Via della Boaria, 40
48018 – Faenza (RA)
ITALY

Tel.: +39 0546 621002
Fax.: +39 0546 621144
Web: www.ht-instruments.com
E-mail: ht@htitalia.it

# Calibration Certificate 2412123620

Model: THT300 Infrared Camera
Serial number: 2412123620
Date of release: 20-10-2025
Request: _____
Date of place in service: _____
Due Date (*): _____

(*) The due date must be established (by the customer). HT recommend a 12 months calibration interval from the place in service date

| FUNCTIONS | REFERENCE VALUES | | CHECK | | | RESULT |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Outlook | Good, tidy & slick outlook | | ✓ | | | Passed |
| | Crisp LCD & view finder display | | ✓ | | | |
| | Good & reliable bottoms with clear label | | ✓ | | | |
| | Reliable wire (power and signal) connection | | ✓ | | | |
| Basic Functions | Crisp thermal, visual imaging & correct functionality | | ✓ | | | Passed |
| | Correct functionality of focusing, save, replay and recording functions | | ✓ | | | |
| | Normal temp-measurement & analysis operation in live, frozen & saved images & recording | | ✓ | | | |
| | Functionality of visible and audio alarms | | ✓ | | | |
| Temperature Measurement | Temperature range: -20°C ÷ +150°C ; 0°C ÷ +650°C | | | | | |
| | Temperature accuracy under basic environment | | Nominal value | Read value | Uncertainty | |
| | | ± 2°C or ±2rdg [-20°C≤X<150°C] | -15°C | -15.1 | ±2.0°C | Passed |
| | | | 0°C | 0.4 | ±2.0°C | Passed |
| | | | 30°C | 29.9 | ±2.0°C | Passed |
| | | | 140°C | 140.2 | ±2.8°C | Passed |
| | | ± 2°C or ±2rdg [0°C≤X<650°C] | 0°C | 0.2 | ±2.0°C | Passed |
| | | | 30°C | 30.2 | ±2.0°C | Passed |
| | | | 140°C | 139.6 | ±2.8°C | Passed |
| | | | 400°C | 399.6 | ±8.0°C | Passed |
| | | | 630°C | 630.7 | ±12.6°C | Passed |
| | Temperature range of Screening function: 32.0°C ÷ 42.0°C | | | | | |
| | Temperature point | | 37.0°C | 37.2 | ±0.5°C | Passed |

**REFERENCE CONDITIONS**

| Environment temperature/humidity | Emissivity value | Distance from the source |
|---|---|---|
| 25°C ± 1°C / 60%RH | 0.95 | 1m |

**REFERENCE INSTRUMENTS**

| Model | Calibration certificate |
|---|---|
| FLUKE 4180 S/N: C04326 | NVLAP JL2402944561 of 07/03/2025 |
| FLUKE 4181 S/N: B29803 | NVLAP JL2402471231 of 26/02/2025 |
| FLUKE 1502A S/N:B18889 | NVLAP JL2419363471 of 10/12/2024 |
| MIKRON M330 S/N: M0016068 | NVLAP JL2418458731 of 15/11/2024 |

Tests were carried out according to the test procedure: IOP_THTCameras_V1-00

Quality Assurance Manager: Li Mengfang Date: 20-10-2025

Release 1.02 – 19/07/23

# THYRISTOR
# POWER REGULATOR



W5 SERIES CE

ElectroWebStore
Electrical, Electronics & Automation Solutions

Marketed By:

**SHAH ENTERPRISE**

Tel.: 022-66337192 / 93 / +91-7021014510 ● Email: sales@electrowebstore.com

**Sales & Correspondence Address:**
605 Niranjan, 6th Floor, 99 Marine Drive,
Mumbai - 400002. Maharashtra INDIA

**Registered Office:**
293 Princess Street, #S/3 Sopariwala House,
Mumbai - 400002. Maharashtra INDIA.

**Websites:**
www.ElectroWebStore.com
www.BaumerDistributors.com
www.ExpressFuses.com

**Authorized Indian Distributor of: Baumer Group** (Hübner-Berlin; Baumer Electric; Thalheim; IVO)

SHAH ENTERPRISE

## Product features



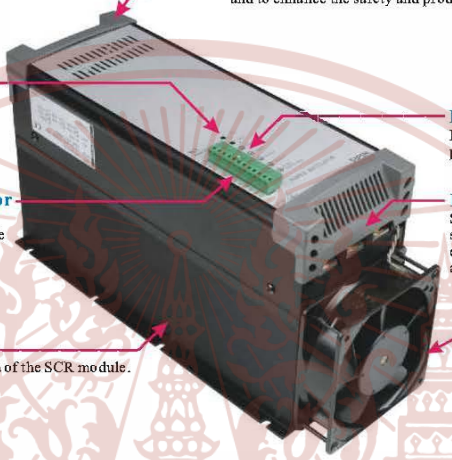
- Independent adjustment of Max and BIAS.
- Down-opened Panel, easy for fuse replacement.
- VR of Max and SFS are installed in the front panel, easy for adjustment.
- Multi-LED display panel makes the operating condition clear.
- The auxiliary powers (AC1, AC2) are independently controlled for all models.
- Build-in buffering output adjustment (SFS VR), adjusting range 1~22 seconds. (Only for the phase control product)
- Top & bottom shielding covers are designed for safety and fashion out looking, also easy for wiring installation.
- In case of 0.5 Hz sudden power losses, system output can be switched off immediately. Once the power is restored, the system will buffer the output to prevent the voltage surge for fuse burn-down.
- Main power is one spec. Design for 200~480VAC.
- Automatic power frequency detection for 50~60 Hz. No need for selection or switch.
- Automatic detection and display for power out-of-phase, SCR overheating, and fuse burn-down with one set of alarm dry contact output.
- In cases of SCR overheating or fuse burn-down, the system output is stopped immediately. Once the malfunction is eliminated and power is restored, the system will buffer the output to prevent the fuse burn-down.
- 4~20mA, 1~5VDC, 2~10VDC, 0~20mA, 0~5 VDC, 0~10VDC, dry contact points, etc. and all control signals are ready to use.
- Triggering circuit and the main board are designed separately to avoid the main board damage when main circuit malfunctions.
- Using European detachable control signal connector for easy replacement without re-wiring installation.







## Outline descriptions



**Main power shielding cover**
Shield the electric part from the operating personnel for electric shock and to enhance the safety and product appearance.

**VR adjustment**
Adjust the maximum voltage output and the voltage rising buffering time.

**LED light indicators**
Make the operating condition of the power regulator clear.

**Control signal connector**
Provide the connection points and alarm output for the outside signals. (temperature gauges, control signals, VR, etc.)

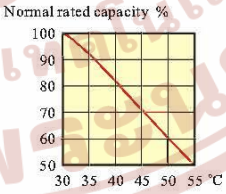
**Loading side shielding cover**
Shield the electric part on the loading side from the operating personnel for electric shock and to enhance the safety and product appearance.

**Heat sink**
Increase the heat radiating area of the SCR module.

**Cooling fan**
Dissipating the heat by wind blow to control the temperature and make the power regulator function normally.

## Installation and ambient conditions

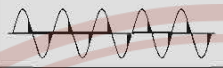
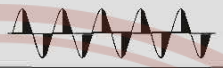
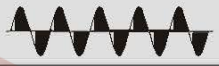
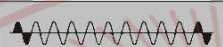
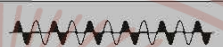
- When the power regulator is operating, the heat will be generated automatically. Please install the system vertically and leave some empty space on two sides to avoid the temperature inside the regulator rising continuously.
- When the product installs, the base must attatch the mounting plates, in order to enhance cooling cycle.
- There must be some ventilation holes on the control box. Please follow the principle of hard air rising to install the ventilation holes or extra cooling fans.
- Please avoid installing the regulator in the place with high temperature or poor ventilation. Otherwise, the maximum operating capacity must be set lower than 70% of the nominal capacity.
- Avoid installing the regulator in the places with heavy water evaporation, acid, alkaline, or corrosive air.
- Ambient humidity: below 90%RH (no condensation)
- Ambient temperature: -10℃~45℃




※ The above numbers are based on the conditions of no erosion, no greasy dirt, and no cover on the heat sink and following the recommended installation guides based on the principle of heat transfer.

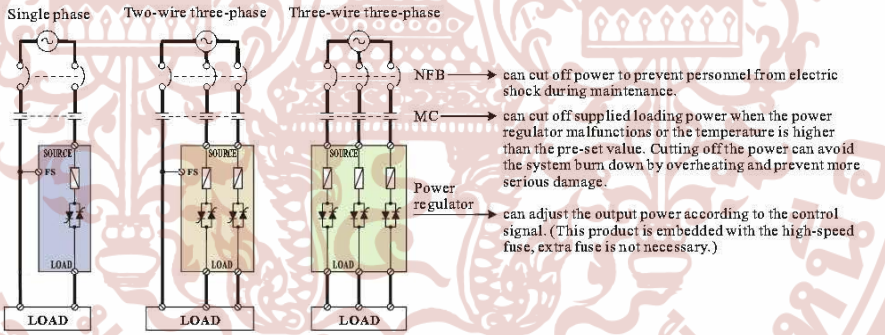


## Control and applied loading

| Output / Control mode | Output wave | | |
|---|---|---|---|
| | 10% Output | 50% Output | 90% Output |
| Phase angle control |  |  |  |
| Zero crossing control |  1 cycle ON and 9 cycle OFF |  1 cycle ON and 1 cycle OFF |  9 cycle ON and 1 cycle OFF |

- Phase angle control: continuous phase angle control, steady output, current gauge reading remains steady. But, every half wave will produce harmonic wave.
  Applicable loading: fixed resistance loading, variable resistance loading, inductive loading, IR light bulb.
- Zero crossing control: distributed zero crossing control, minimum resolution 1 Hz, no harmonic wave, and current gauge reading oscillates.
  Applicable loading: fixed resistance loading.

## Wiring and setup notices

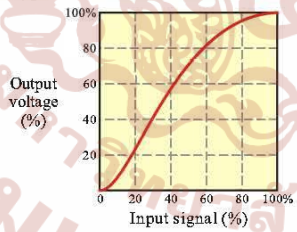



- Standard main circuit setup: main power → molded case circuit breaker →contactors →power regulator →loading.
- The screw must be tightened during the wiring setup to avoid high temperature resulting from bad contact.
- Once the wiring setup is completed, the front panel and safety cover must be properly installed before the system is powered up to avoid the electric shock or short circuit caused by dropped conductive objects.

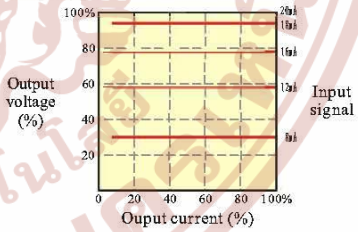
## Model table

| | | |
|---|---|---|
| **Product series** | W5 | W5 series |
| **Control** | SP | Single-phase angle control |
| | SZ | Single-phase zero crossing control |
| | TP | Three-wire three-phase angle control |
| | TN | Four-wire three-phase angle control （Loads with Y connection , neutral point connection N） |
| | TZ | Two-wire three-phase zero crossing control |
| | ZZ | Three-wire three-phase zero crossing control |
| **Main power voltage** | 1V | 50~120VAC |
| | 4V | 200~480VAC |
| **Normal rated current** | 030 | 30A |
| | 045 | 45A |
| | 060 | 60A |
| | 080 | 80A |
| | 100 | 100A |
| | 125 | 125A |
| | 150 | 150A |
| | 180 | 180A |
| | 230 | 230A |
| | 300 | 300A |
| | 380 | 380A |
| | 450 | 450A |
| | 580 | 580A |
| | 720 | 720A |
| **Dash** | – | |
| **Auxiliary power source code** | 1 | 1φ 110VAC |
| | 2 | 1φ 220VAC |
| **Input signal code** | 0 | 0~ 5VDC |
| | 1 | 1~ 5VDC |
| | 2 | 2~10VDC |
| | 3 | 0~10VDC |
| | 4 | 4~20mA |
| | 5 | 0~20mA |
| | M | Manual adjustment |
| | * | Special |
| **Buffering time code** | C | Not have Buffering time (Zero-crossing type of product) |
| | J | Adjustable buffering time, 1~22 seconds (Phase-angle type of product) |
| **Special code** | TF | Inductive reactance type of loading |
| | CV | Constant voltage type |
| | CL | Limited current type (RMS limited current value cannot adjust) |
| | L/C | Limited current type (RMS limited current value can adjust) |
| | C/L | Constant current type (RMS constant current value can adjust) |
| | | Only for phase-angle type of product |

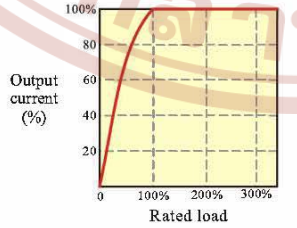
**Standard type**



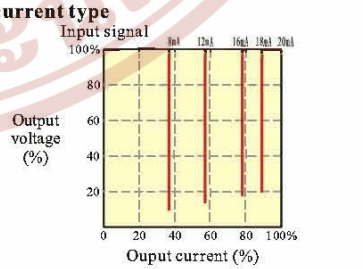

**Constant voltage type**



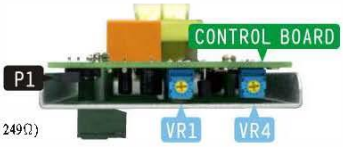

**Limited Current type**




**Constant current type**



## Selection of the input signal




P1 S1 S2 S3

◎ 4~20mA、0~20mA、MANUAL Selection S1 (Input impedance 249Ω)

◎ 1~5VDC、0~5VDC Selection S2 (Input impedance 200KΩ)

◎ 2~10VDC、0~10VDC Selection S3 (Input impedance 18KΩ)




## Functional adjustment

VR1 BIAS：Adjustment of standard output voltage.
(Counter-clockwise adjust the control signal, lower the input will produce the output.)

VR2 SFS ：Adjustment of buffer rising time.
(Adjusting range 1~22 seconds, clockwise adjustment will increase the time. No applicable for zero crossing type product.)
Limited current type/Constant current type : Adjusting range 2~16 seconds.

VR3 Max ：Adjustment of maximum output voltage.
(Adjusting range 0~100%, counter-clockwise adjustment will decrease the output. Set to zero will have no output.)
Limited current type/Constant current type :Current adjustment.(Adjusting range 50~100%, counter-clockwise adjustment will decrease the output.)

VR4 OL SET：Adjustment of Over current.(Adjusting range 60~120%,counter-clockwise adjustment will decrease the output.)

PB1 RESET：Over current RESET.

## Descriptions for LED lights and trouble shooting

| | |
|---|---|
| **L1 Power Power light** | On: Auxiliary power on.<br>Off: 1. Auxiliary power sources have no output → make sure AC1, AC2 auxiliary power sources have power output.<br>2. Control board malfunction → please replace the same spec. control board or send the power regulator for maintenances. |
| **L2 Input Input light** | On: Control input signal is in.<br>Off: 1. Control signal is not in → please check the temperature gauge to see if there is input, check the connection and the wiring.<br>2. Wrong connection on the electrodes of the control board → check the electrodes of the temperature gauge.<br>3. Set to zero on the Max VR of the control board or outside VR → check two VRs to see if any one of them is set to zero.<br>4. Control board malfunction → please replace the same-spec. control board or send the power regulator for Maintenances. |
| **L3 Output Output light** | On: Power regulator is in output ┬ phase angle control. (light and dark based on the output.)<br>└ zero crossing control. (flash based on the output.)<br>Off: 1. If the abnormal light L5 is on. (fuse burn down or main power has no output.) → please refer to ERR (L5).<br>2. If the temperature light L4 is on. (power regulator is overheating.) → please refer to TH (L4).<br>3. If the input light L2 is off. (No input signal.) → please refer to IN (L2).<br>4. If the input light L2 is on. (control board malfunction.) → please replace the same spec. control board or send the power regulator for maintenances. |
| **L4 TH Err Over heating light** | On: 1. Power regulator is over heating → cooling fan is not operating, check the power, fan damage, or if the fan is stuck by any object and get rid off it if necessary.<br>2. Bad ventilation or the ambient temperature is too high → please change the installation place or improve the ventilation.<br>Off: Normal, power regulator is not overheating. |
| **L5 FUSE/ Source Err Power source abnormal light** | On: 1. Main power source have no output or out-of-phase → check the power output and all the abnormal conditions.<br>2. High-speed fuse burn down → please replace the same spec. fuse and check the shortage and the ground of the loading before restoring the power.<br>Off: Normal |
| **L4&L5 O.L Over current light** | L4 and L5 On: Power regulator is over current → please check the shortage and the ground of the loading before press PB1 to reset. (Limited current type/Constant current type of product)<br>Off: Normal |

## Descriptions of the connectors

**Single phase, Single phase zero crossing, Two-wire three-phase zero crossing (SP、SZ、TZ)**

| Connector pin | Connector No. | Description | Notes |
|---|---|---|---|
| TB-01 | FS | Detection of the fuse burn down | The connection from power to loading must be connected back to the FS side. |
| TB-02 | M | +5VDC | Only for this control board, not for other use positive control signal input. |
| TB-03 | + | Positive control signal input | The default setting is 4~20mA when the sticker is not marked. |
| TB-04 | − | Standard analog signal voltage | |
| TB-05 | E3 | Connected to the VR 3rd pin of the outside potentiometer | Adjustable output 0~100%, Please elimi -nate the shorted copper wire between E3 and E2 when using the outside poten- tiometer with VR. (2~10KΩ) |
| TB-06 | E2 | Connected to the VR 2nd pin of the outside potentiometer | |
| TB-07 | E1 | Connected to the VR 1st pin of the outside potentiometer | |
| TB-08 | NC | Alarm connector output (normal close) | Connector capacity 250VAC 2A. 125VAC 2A. 30VAC 2A. |
| TB-09 | COM | Alarm connector output (common point) | |
| TB-10 | NO | Alarm connector output (normal open) | |
| TB-11 | AC1 | Auxiliary power source | Please refer to the stick for the auxiliary power and voltage. |
| TB-12 | AC2 | | |

**Three-wire three-phase angle, Three-wire three-phase zero crossing, Four-wire three-phase angle (TP、ZZ、TN)**

| Connector pin | Connector No. | Description | Notes |
|---|---|---|---|
| TB-01 | • | Empty pin | Do not connect. |
| TB-02 | M | +5VDC | Only for this control board, not for other use positive control signal input. |
| TB-03 | + | Positive control signal input | The default setting is 4~20mA when the sticker is not marked. |
| TB-04 | − | Standard analog signal voltage | |
| TB-05 | E3 | Connected to the VR 3rd pin of the outside potentiometer | Adjustable output 0~100%, Please elimi -nate the shorted copper wire between E3 and E2 when using the outside poten- tiometer with VR. (2~10KΩ) |
| TB-06 | E2 | Connected to the VR 2nd pin of the outside potentiometer | |
| TB-07 | E1 | Connected to the VR 1st pin of the outside potentiometer | |
| TB-08 | NC | Alarm connector output (normal close) | Connector capacity 250VAC 2A. 125VAC 2A. 30VAC 2A. |
| TB-09 | COM | Alarm connector output (common point) | |
| TB-10 | NO | Alarm connector output (normal open) | |
| TB-11 | AC1 | Auxiliary power source | Please refer to the stick for the auxiliary power and voltage. |
| TB-12 | AC2 | | |

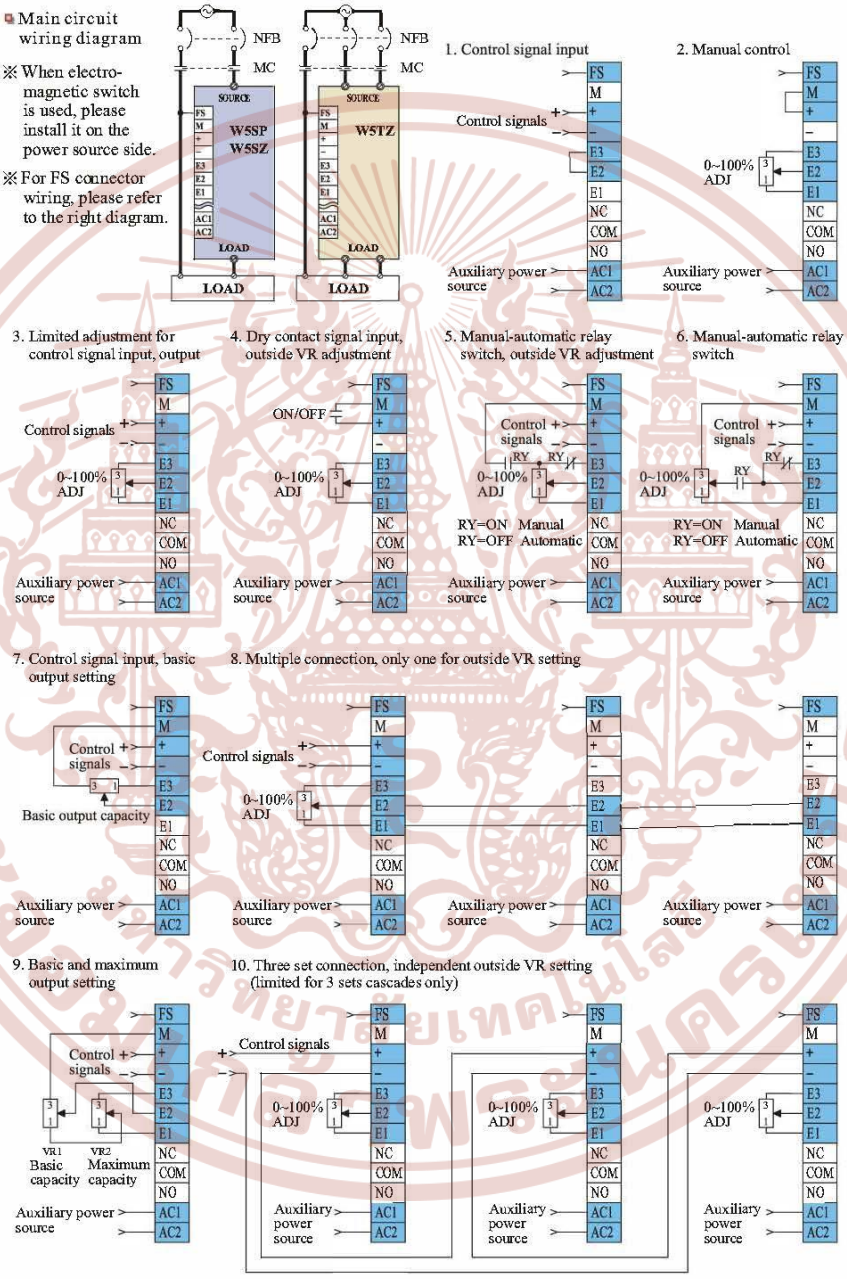
## Applicable high-speed fuse for the power regulator

| Rated current | 30A | 45A | 60A | 80A | 100A |
|---|---|---|---|---|---|
| Fuse | 40ET | 63ET | 80ET 660GH-80 | 660GH-100 | 660GHX125 |
| Brand | Bussmann | Bussmann | Bussmann HINODE | HINODE | HINODE |

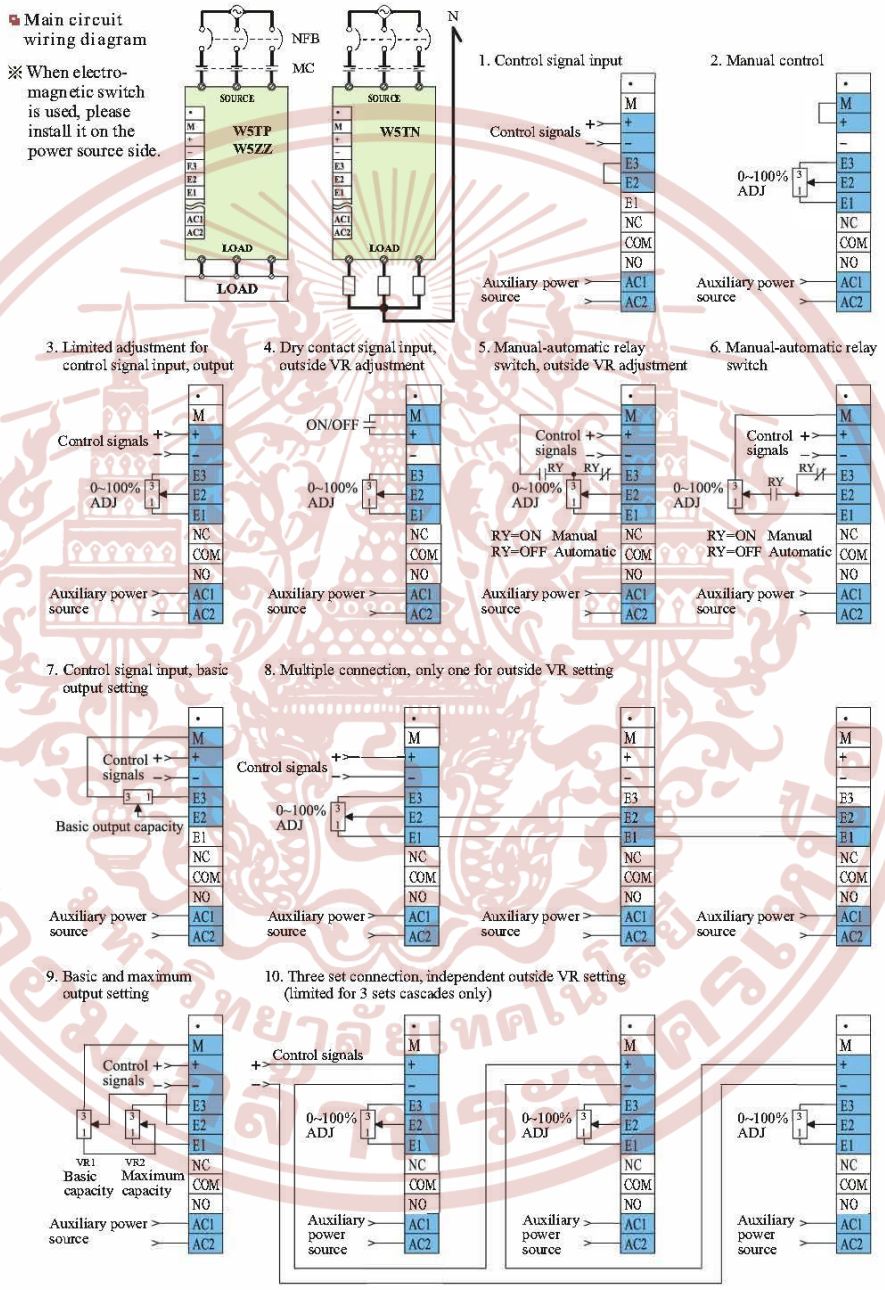
| Rated current | 125A | 150A | 180A | 230A | 300A |
|---|---|---|---|---|---|
| Fuse | 80ET*2 660GH-80*2 | 660GH-100*2 | 660GHX125*2 | 250FM | 315FM |
| Brand | Bussmann HINODE | HINODE | HINODE | Bussmann | Bussmann |

| Rated current | 380A | 450A | 580A | 720A |
|---|---|---|---|---|
| Fuse | 660GH-400 | 250FM*2 | 315FM*2 | 660GH-400*2 |
| Brand | HINODE | Bussmann | Bussmann | HINODE |

## Wiring setup examples for single-phase, Single-phase zero crossing, and Two-wire three-phase zero crossing



## Wiring setup examples for and Three-wire three-phase angle and Three-wire three-phase zero crossing and Four-wire three-phase angle



## The weights and related dimensions of the power regulators

*Single-phase angle and Single-phase zero crossing control (WSSP · WSSZ)*

| Normal rated current | Figure | Outline dimensions (mm) | | | Net weights (Kg) | Packed dimensions (mm) | | | Packed weights (Kg) | Fixed-hole dimensions (mm) | | | | Main power source screw | Way of cooling |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Length | Width | Height | | Length | Width | Height | | L1 | L2 | L3 | W | | |
| 30A | A | 162 | 98 | 133 | 1.2 | 225 | 127 | 166 | 1.5 | 122 | O | O | 90 | M6 | Air-cooling |
| 45A | A | 200 | 98 | 133 | 1.4 | 262 | 127 | 166 | 1.7 | 122 | O | O | 90 | M6 | Air-cooling |
| 60,80A | B | 162 | 112 | 183 | 1.6 | 225 | 140 | 220 | 2.0 | 122 | O | O | 104 | M6 | Air-cooling |
| 100A | C | 189 | 112 | 183 | 1.9 | 250 | 140 | 220 | 2.3 | 122 | O | O | 104 | M6 | Fan-cooling |
| 125,150,180A | C | 275 | 112 | 183 | 2.9 | 336 | 140 | 220 | 3.3 | 122 | 86 | O | 104 | M8 | Fan-cooling |
| 230A | C | 287 | 112 | 188 | 3.3 | 345 | 140 | 220 | 3.7 | 122 | 86 | O | 104 | M10 | Fan-cooling |
| 300,380A | I | 390 | 140 | 248 | 6.2 | 450 | 168 | 277 | 6.8 | 122 | 86 | 94 | 132 | M10 | Fan-cooling |
| 450A | I | 390 | 140 | 248 | 7.0 | 450 | 168 | 277 | 7.6 | 122 | 86 | 94 | 132 | M10*2 | Fan-cooling |
| 580A | I | 460 | 140 | 248 | 8.6 | 590 | 260 | 390 | 10.4 | 122 | 86 | 94 | 132 | M10*2 | Fan-cooling |
| 720A | I | 560 | 140 | 248 | 10.4 | 690 | 260 | 390 | 12.6 | 122 | 86 | 239 | 132 | M10*2 | Fan-cooling |

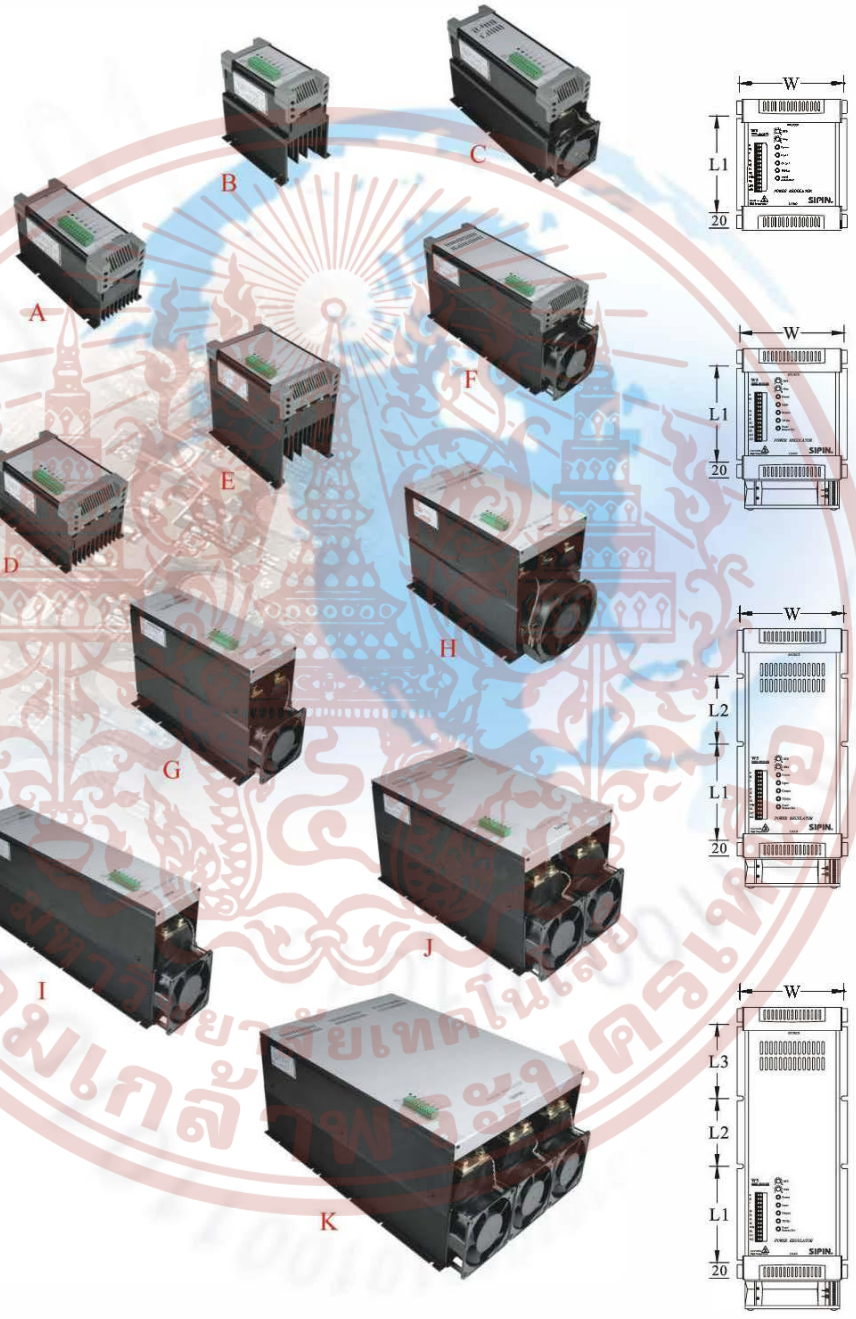
*Two-wire three-phase zero crossing control (WSTZ)*

| Normal rated current | Figure | Outline dimensions (mm) | | | Net weights (Kg) | Packed dimensions (mm) | | | Packed weights (Kg) | Fixed-hole dimensions (mm) | | | | Main power source screw | Way of cooling |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Length | Width | Height | | Length | Width | Height | | L1 | L2 | L3 | W | | |
| 30A | A | 162 | 98 | 133 | 1.5 | 225 | 127 | 166 | 1.7 | 122 | O | O | 90 | M6 | Air-cooling |
| 45A | B | 162 | 112 | 183 | 1.9 | 225 | 140 | 220 | 2.2 | 122 | O | O | 104 | M6 | Air-cooling |
| 60,80,100A | C | 189 | 112 | 183 | 2.2 | 250 | 140 | 220 | 2.5 | 122 | O | O | 104 | M6 | Fan-cooling |
| 125A | C | 275 | 112 | 183 | 3.1 | 336 | 140 | 220 | 3.5 | 122 | 86 | O | 104 | M8 | Fan-cooling |
| 150A | F | 326 | 140 | 205 | 4.5 | 388 | 168 | 245 | 5.0 | 122 | 86 | O | 132 | M8 | Fan-cooling |
| 180A | F | 382 | 140 | 205 | 5.4 | 443 | 168 | 245 | 5.9 | 122 | 86 | 94 | 132 | M8 | Fan-cooling |
| 230A | G | 310 | 155 | 265 | 10.3 | 445 | 260 | 410 | 11.8 | 230 | O | O | 143 | M10 | Fan-cooling |
| 300,380A | G | 390 | 155 | 265 | 13.6 | 525 | 260 | 410 | 15.5 | 230 | 80 | O | 143 | M10 | Fan-cooling |
| 450A | J | 390 | 260 | 248 | 13.0 | 530 | 380 | 390 | 15.3 | 122 | 86 | 94 | 252 | M10*2 | Fan-cooling |
| 580A | J | 460 | 260 | 248 | 16.1 | 590 | 380 | 390 | 18.7 | 122 | 86 | 94 | 252 | M10*2 | Fan-cooling |
| 720A | J | 560 | 260 | 248 | 20.0 | 690 | 380 | 390 | 23.0 | 122 | 86 | 239 | 252 | M10*2 | Fan-cooling |

*Three-wire three-phase angle, Three-wire three-phase zero crossing control, Three-wire three-phase angle (WSTP · WSZZ · WSTN)*

| Normal rated current | Figure | Outline dimensions (mm) | | | Net weights (Kg) | Packed dimensions (mm) | | | Packed weights (Kg) | Fixed-hole dimensions (mm) | | | | Main power source screw | Way of cooling |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Length | Width | Height | | Length | Width | Height | | L1 | L2 | L3 | W | | |
| 30A | D | 200 | 140 | 145 | 2.5 | 262 | 168 | 182 | 2.8 | 122 | O | O | 132 | M6 | Air-cooling |
| 45A | E | 200 | 140 | 205 | 3.0 | 262 | 168 | 245 | 3.4 | 122 | O | O | 132 | M6 | Air-cooling |
| 60,80,100A | F | 202 | 140 | 205 | 3.1 | 262 | 168 | 245 | 3.5 | 122 | O | O | 132 | M6 | Fan-cooling |
| 125A | F | 288 | 140 | 205 | 4.5 | 350 | 168 | 245 | 5.0 | 122 | 86 | O | 132 | M8 | Fan-cooling |
| 150A | F | 326 | 140 | 205 | 4.9 | 388 | 168 | 245 | 5.4 | 122 | 86 | O | 132 | M8 | Fan-cooling |
| 180A | F | 382 | 140 | 205 | 5.8 | 443 | 168 | 245 | 6.3 | 122 | 86 | 94 | 132 | M8 | Fan-cooling |
| 230A | H | 322 | 215 | 265 | 15.3 | 445 | 320 | 400 | 17.2 | 230 | O | O | 203 | M10 | Fan-cooling |
| 300,380A | H | 402 | 215 | 265 | 20.1 | 530 | 320 | 400 | 22.3 | 230 | 80 | O | 203 | M10 | Fan-cooling |
| 450A | K | 390 | 380 | 248 | 19.2 | 515 | 500 | 390 | 22.0 | 122 | 86 | 94 | 372 | M10*2 | Fan-cooling |
| 580A | K | 460 | 380 | 248 | 24.4 | 590 | 500 | 390 | 27.4 | 122 | 86 | 94 | 372 | M10*2 | Fan-cooling |
| 720A | K | 560 | 380 | 248 | 29.5 | 690 | 500 | 390 | 33.2 | 122 | 86 | 239 | 372 | M10*2 | Fan-cooling |

## Outline appearance and fixed dimensions



# ภาคผนวก ข

ข้อกำหนดทางเทคนิคจากผู้ผลิตของสายไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดลอง

YAZAKI

# 60227 IEC 01 or YK 60227 IEC 01 THW

**450/750V 70°C SOILD AND STRANDED CONDUCTOR PVC INSULATED, SINGLE CORE**

TIS 11 Part 3-2553




## CABLE STRUCTURE

**Conductor** : Annealed copper wire
: Sizes 1.5 mm² up to 400 mm²

**Insulation** : Polyvinyl chloride (PVC/C)

**Core Identification** : Single-cores : Any color

## TECHNICAL DATA

**Classification** : Maximum conductor temperature 70 °C
: Circuit voltage not exceeding 450/750 Volts

**Rated voltage** : 450 Volts between Line to Earth
: 750 Volts between Line to Line

**Testing voltage** : 2,500 Volts

**Reference standard** : TIS 11 Part 3-2553, Table 1

## APPLICATION

Building wiring for installation on insulator or in raceway dry location.

B

| Cable name | Nominal cross sectional area | Conductor type | Insulation thickness nominal | Overall diameter | | Conductor resistance at 20°C maximum | Insulation esistance at 70°C minimum | Continuous current rating in free air maximum (40 °C) | Cable weight approx. | Standard Length | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Minimum | Maximum | | | | | | |
| | ($mm^2$) | | (mm) | (mm) | (mm) | (Ω/km) | (MΩ-km) | | | | |
| 60227 IEC 01 THW | 1.5 | Solid | 0.7 | 2.8 | 3.2 | 12.1 | 0.011 | 21 | 21 | 100/C | |
| | 1.5 | Non-Compacted | 0.7 | 2.7 | 3.3 | 12.1 | 0.010 | 21 | 22 | 100/C | |
| | 2.5 | Solid | 0.8 | 3.2 | 3.9 | 7.41 | 0.010 | 28 | 32 | 100/C | |
| | 2.5 | Non-Compacted | 0.8 | 3.3 | 4.0 | 7.41 | 0.009 | 28 | 35 | 100/C | |
| | 4 | Solid | 0.8 | 3.8 | 4.4 | 4.61 | 0.0065 | 37 | 47 | 100/C | |
| | 4 | Non-Compacted | 0.8 | 3.8 | 4.8 | 4.61 | 0.0077 | 37 | 50 | 100/C | |
| | 6 | Solid | 0.8 | 4.1 | 5.0 | 3.08 | 0.0070 | 49 | 65 | 100/C | 1000/D |
| | 6 | Non-Compacted | 0.8 | 4.8 | 5.2 | 3.08 | 0.0065 | 49 | 70 | 100/C | 1000/D |
| | 10 | Solid | 1.0 | 5.3 | 6.4 | 1.83 | 0.0070 | 88 | 110 | 100/C | 1000/D |
| | 10 | Non-Compacted | 1.0 | 5.8 | 6.7 | 1.83 | 0.0065 | 88 | 120 | 100/C | 1000/D |
| | 16 | Compacted | 1.0 | 6.4 | 7.8 | 1.15 | 0.0050 | 91 | 180 | 100/C | 1000/D |
| | 25 | Compacted | 1.2 | 8.1 | 9.7 | 0.727 | 0.0050 | 122 | 280 | 100/C | 1000/D |
| | 35 | Compacted | 1.2 | 9.0 | 10.9 | 0.524 | 0.0043 | 151 | 370 | 100/C | 1000/D |
| | 50 | Compacted | 1.4 | 10.6 | 12.8 | 0.387 | 0.0043 | 184 | 500 | 1000/D | |
| YK 60227 IEC 01 THW | 70 | Compacted | 1.4 | 12.1 | 14.6 | 0.263 | 0.0035 | 234 | 700 | 1000/D | |
| | 95 | Compacted | 1.6 | 14.1 | 17.1 | 0.193 | 0.0035 | 292 | 1000 | 1000/D | |
| | 120 | Compacted | 1.8 | 15.6 | 18.8 | 0.153 | 0.0032 | 341 | 1200 | 1000/D | |
| | 150 | Compacted | 1.8 | 17.3 | 20.9 | 0.124 | 0.0032 | 391 | 1600 | 1000/D | |
| | 185 | Compacted | 2.0 | 19.3 | 23.3 | 0.0991 | 0.0032 | 454 | 1900 | 1000/D | |
| | 240 | Compacted | 2.2 | 22.0 | 26.6 | 0.0754 | 0.0032 | 543 | 2500 | 1000/D | |
| 60227 IEC 01 THW | 300 | Non-Compacted | 2.4 | 24.5 | 29.6 | 0.060 | 0.0030 | 628 | 3,100 | 500/D | |
| | 400 | Non-Compacted | 2.6 | 27.5 | 33.2 | 0.047 | 0.0028 | 736 | 3,900 | 500/D | |

C : Packing in Coil
D : Packing in Drum

# 60227 IEC 01 THW or YK 60227 IEC 01 THW

YAZAKI

**450/750V 70°C SOILD AND STRANDED CONDUCTOR PVC INSULATED, SINGLE CORE**

TIS 11 Part 3-2553




## CABLE STRUCTURE

**Conductor** : Annealed copper wire
: Sizes 1.5 mm² up to 400 mm²

**Insulation** : Polyvinyl chloride (PVC/C)

**Core identification** : Single-cores : Any color

## TECHNICAL DATA

**Classification** : Maximum conductor temperature 70°C
: Circuit voltage not exceeding 450/750 Volts

**Rated voltage** : 450 Volts between Line to Earth
: 750 Volts between Line to Line

**Testing voltage** : 2,500 Volts

**Reference standard** : TIS 11 Part 3-2553, Table 1

## APPLICATION

Building wiring for installation on insulator or in raceway dry location.

**B**

| Cable name | Nominal cross sectional area (mm²) | Conductor type | A.C.Resistance R (Ω/km) | Inductance L (mH/km) | Reactance XL (Ω/km) | Impedance Z (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.5 | Solid | 14.4777 | 0.5259 | 0.1652 | 14.4786 |
| | 1.5 | Non-Compacted | 14.4777 | 0.5276 | 0.1657 | 14.4786 |
| | 2.5 | Solid | 8.8861 | 0.5121 | 0.1608 | 8.8875 |
| | 2.5 | Non-Compacted | 8.8861 | 0.5202 | 0.1634 | 8.8876 |
| 60227 IEC 01 THW | 4 | Solid | 5.5159 | 0.4917 | 0.1545 | 5.5180 |
| | | Non-Compacted | | | | |
| | 6 | Solid | 3.6852 | 0.4742 | 0.1490 | 3.6863 |
| | 6 | Non-Compacted | 3.6852 | 0.5606 | 0.1761 | 3.6894 |
| | 10 | Solid | 2.1896 | 0.4694 | 0.1475 | 2.1946 |
| | 10 | Non-Compacted | 2.1896 | 0.5219 | 0.1639 | 2.1958 |
| | 16 | Compacted | 1.3776 | 0.4842 | 0.1458 | 1.3836 |
| | 25 | Compacted | 0.8700 | 0.4594 | 0.1443 | 0.8819 |
| | 35 | Compacted | 0.6271 | 0.4496 | 0.1413 | 0.6428 |
| | 50 | Compacted | 0.4833 | 0.4477 | 0.1407 | 0.4841 |
| YK 60227 IEC 01 THW | 70 | Compacted | 0.3210 | 0.4354 | 0.1368 | 0.3489 |
| | 95 | Compacted | 0.2314 | 0.4347 | 0.1365 | 0.2587 |
| | 120 | Compacted | 0.1836 | 0.4295 | 0.1349 | 0.2279 |
| | 150 | Compacted | 0.1491 | 0.4292 | 0.1348 | 0.2010 |
| | 185 | Compacted | 0.1194 | 0.4281 | 0.1345 | 0.1799 |
| | 240 | Compacted | 0.0914 | 0.4257 | 0.1337 | 0.1620 |
| 60227 IEC 01 THW | 300 | Non-Compacted | 0.0734 | 0.4177 | 0.1312 | 0.1503 |
| | 400 | Non-Compacted | 0.0581 | 0.4160 | 0.1307 | 0.1430 |

# ภาคผนวก ค

ตารางข้อมูลการบันทึกผลจากการทดลอง 8 ชั่วโมง

ชุดการทดลองที่: 1 ขนาดสาย: 2.5 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าทดสอบ: 22.4 A ครั้งที่: 1

| ขั้วโมดที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 231.57 | 231.14 | 22.55 | 22.31 | 2991 | 2872 | 52.2 | 27.0 |
| 1 | 231.12 | 230.72 | 23.04 | 22.80 | 3122 | 3003 | 56.0 | 29.1 |
| 2 | 230.42 | 229.90 | 23.05 | 22.81 | 3117 | 2996 | 58.4 | 30.2 |
| 3 | 232.50 | 232.43 | 23.08 | 22.85 | 3128 | 3007 | 54.2 | 30.8 |
| 4 | 232.62 | 232.22 | 23.20 | 22.96 | 3166 | 3046 | 58.0 | 31.6 |
| 5 | 230.41 | 229.91 | 22.99 | 22.75 | 3109 | 2990 | 52.4 | 31.7 |
| 6 | 231.51 | 226.89 | 23.04 | 22.80 | 3123 | 2989 | 53.7 | 31.8 |
| 7 | 231.87 | 227.02 | 23.13 | 22.90 | 3146 | 3023 | 55.6 | 31.7 |
| 8 | 233.78 | 228.69 | 23.31 | 23.06 | 3193 | 3087 | 55.3 | 31.2 |
| ค่าเฉลี่ย | 231.76 | 229.88 | 23.04 | 22.80 | 3121.67 | 3001.44 | 55.1 | 30.6 |
| ค่าเฉลี่ยขั้วโมดที่ 6 8 | 232.39 | 227.53 | 23.16 | 22.92 | 3154.00 | 3033.00 | 54.9 | 31.6 |

ชุดการทดลองที่: 1 ขนาดสาย: 2.5 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าทดสอบ: 22.4 A ครั้งที่: 2

| ขั้วโมดที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 231.82 | 231.30 | 22.68 | 22.43 | 3014 | 2894 | 52.1 | 27.2 |
| 1 | 230.78 | 230.36 | 23.02 | 22.78 | 3118 | 2995 | 56.5 | 29.2 |
| 2 | 231.52 | 231.04 | 23.09 | 22.85 | 3130 | 3009 | 58.1 | 30.3 |
| 3 | 232.62 | 232.23 | 23.09 | 22.84 | 3124 | 3003 | 53.0 | 30.9 |
| 4 | 233.63 | 233.19 | 23.25 | 23.01 | 3181 | 3061 | 57.8 | 31.5 |
| 5 | 230.12 | 229.58 | 22.97 | 22.74 | 3103 | 2984 | 52.2 | 31.9 |
| 6 | 231.77 | 227.35 | 23.06 | 22.81 | 3129 | 3015 | 53.3 | 31.5 |
| 7 | 231.79 | 226.87 | 23.13 | 22.88 | 3144 | 3014 | 55.5 | 31.6 |
| 8 | 235.53 | 230.98 | 23.41 | 23.19 | 3227 | 3109 | 55.1 | 31.1 |
| ค่าเฉลี่ย | 232.18 | 230.32 | 23.08 | 22.84 | 3130.00 | 3009.33 | 54.8 | 30.6 |
| ค่าเฉลี่ยขั้วโมดที่ 6 8 | 233.03 | 228.40 | 23.20 | 22.96 | 3166.67 | 3046.00 | 54.6 | 31.4 |

ชุดการทดลองที่: 1 ขนาดสาย: 2.5 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าทดสอบ: 22.4 A ครั้งที่: 3

| ขั้วโมดที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 231.37 | 230.98 | 22.50 | 22.28 | 2980 | 2861 | 51.9 | 27.0 |
| 1 | 232.14 | 231.72 | 23.10 | 22.78 | 3138 | 3020 | 56.4 | 29.0 |
| 2 | 230.76 | 230.26 | 23.09 | 22.85 | 3122 | 3000 | 58.6 | 30.6 |
| 3 | 233.59 | 232.46 | 23.06 | 22.83 | 3136 | 3016 | 53.6 | 31.0 |
| 4 | 231.42 | 230.96 | 23.13 | 22.85 | 3139 | 3002 | 57.9 | 31.6 |
| 5 | 230.60 | 230.07 | 23.04 | 22.77 | 3123 | 3003 | 52.1 | 31.8 |
| 6 | 232.05 | 228.11 | 23.07 | 22.83 | 3130 | 3009 | 53.2 | 31.4 |
| 7 | 232.05 | 227.78 | 23.15 | 22.91 | 3150 | 3036 | 55.9 | 31.8 |
| 8 | 233.61 | 228.54 | 23.30 | 23.06 | 3192 | 3066 | 55.2 | 31.0 |
| ค่าเฉลี่ย | 231.95 | 230.10 | 23.05 | 22.80 | 3123.33 | 3001.44 | 55.0 | 30.6 |
| ค่าเฉลี่ยขั้วโมดที่ 6 8 | 232.57 | 228.14 | 23.17 | 22.93 | 3157.33 | 3037.00 | 54.8 | 31.4 |

ชุดการทดลองที่: 2 ขนาดสาย: 4 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 22.4 A ครั้งที่: 1

| ชั่วโมงที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 234.05 | 231.50 | 22.55 | 22.38 | 2921 | 2847 | 43.1 | 27.0 |
| 1 | 231.70 | 229.15 | 22.18 | 22.01 | 2825 | 2750 | 44.0 | 28.9 |
| 2 | 230.95 | 228.40 | 22.56 | 22.39 | 2917 | 2844 | 43.6 | 30.3 |
| 3 | 231.01 | 228.41 | 22.40 | 22.26 | 2882 | 2808 | 46.2 | 31.5 |
| 4 | 230.36 | 227.76 | 22.57 | 22.37 | 2920 | 2847 | 44.7 | 31.7 |
| 5 | 231.56 | 228.97 | 22.61 | 22.43 | 2933 | 2860 | 46.9 | 32.1 |
| 6 | 231.58 | 229.23 | 22.68 | 22.49 | 2946 | 2878 | 45.8 | 32.3 |
| 7 | 231.83 | 228.77 | 22.64 | 22.44 | 2937 | 2859 | 46.8 | 32.2 |
| 8 | 232.17 | 229.95 | 22.74 | 22.53 | 2955 | 2881 | 45.3 | 31.2 |
| ค่าเฉลี่ย | 231.69 | 229.13 | 22.55 | 22.37 | 2915.11 | 2841.56 | 45.2 | 30.8 |
| ค่าเฉลี่ยชั่วโมงที่ 6 8 | 231.86 | 229.32 | 22.69 | 22.49 | 2946.00 | 2872.67 | 46.0 | 31.9 |

ชุดการทดลองที่: 2 ขนาดสาย: 4 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 22.4 A ครั้งที่: 2

| ชั่วโมงที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 231.74 | 229.34 | 22.62 | 22.45 | 2915 | 2841 | 43.0 | 27.1 |
| 1 | 232.73 | 230.32 | 23.10 | 22.91 | 3054 | 2981 | 44.1 | 29.0 |
| 2 | 231.06 | 228.51 | 22.58 | 22.39 | 2916 | 2842 | 43.3 | 30.0 |
| 3 | 233.24 | 230.69 | 22.55 | 22.38 | 2914 | 2840 | 45.9 | 30.9 |
| 4 | 230.45 | 227.87 | 22.46 | 22.28 | 2887 | 2813 | 44.1 | 31.2 |
| 5 | 231.30 | 228.7 | 22.58 | 22.39 | 2925 | 2849 | 46.5 | 32.0 |
| 6 | 231.27 | 228.68 | 22.68 | 22.49 | 2946 | 2886 | 45.5 | 31.9 |
| 7 | 232.23 | 229.41 | 22.64 | 22.44 | 2937 | 2850 | 46.2 | 31.6 |
| 8 | 232.72 | 229.82 | 22.70 | 22.51 | 2952 | 2877 | 45.2 | 31.1 |
| ค่าเฉลี่ย | 231.86 | 229.26 | 22.66 | 22.47 | 2938.44 | 2864.33 | 44.87 | 30.53 |
| ค่าเฉลี่ยชั่วโมงที่ 6 8 | 232.073333 | 229.30 | 22.673333 | 22.48 | 2945 | 2871 | 45.6 | 31.5 |

ชุดการทดลองที่: 2 ขนาดสาย: 4 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 22.4 A ครั้งที่: 3

| ชั่วโมงที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 233.61 | 231.61 | 22.67 | 22.51 | 2951 | 2878 | 43.2 | 27.2 |
| 1 | 232.47 | 230.17 | 22.58 | 22.40 | 2918 | 2844 | 43.9 | 28.9 |
| 2 | 231.06 | 228.66 | 22.53 | 22.35 | 2910 | 2836 | 42.8 | 29.7 |
| 3 | 233.59 | 231.00 | 22.51 | 22.33 | 2902 | 2828 | 46.1 | 30.9 |
| 4 | 231.52 | 228.97 | 22.57 | 22.36 | 2916 | 2843 | 44.0 | 31.2 |
| 5 | 230.99 | 228.39 | 22.60 | 22.39 | 2929 | 2855 | 45.9 | 31.5 |
| 6 | 229.41 | 226.96 | 22.51 | 22.32 | 2943 | 2872 | 45.0 | 31.5 |
| 7 | 232.22 | 229.99 | 22.66 | 22.46 | 2940 | 2871 | 46.8 | 31.6 |
| 8 | 232.09 | 229.73 | 22.87 | 22.67 | 2993 | 2912 | 45.1 | 31.1 |
| ค่าเฉลี่ย | 231.88 | 229.50 | 22.61 | 22.42 | 2933.56 | 2859.89 | 44.8 | 30.4 |
| ค่าเฉลี่ยชั่วโมงที่ 6 8 | 231.24 | 228.89 | 22.68 | 22.48 | 2958.67 | 2885.00 | 45.6 | 31.4 |

ชุดการทดลองที่: 3 ขนาดสาย: 4 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 29.6 A ครั้งที่: 1

| ขั้วโมดที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 232.09 | 229.09 | 29.81 | 29.53 | 5065 | 4919 | 50.0 | 27.1 |
| 1 | 230.59 | 227.29 | 30.14 | 29.84 | 5179 | 5032 | 55.1 | 28.7 |
| 2 | 230.58 | 227.29 | 30.14 | 29.84 | 5179 | 5030 | 54.0 | 29.8 |
| 3 | 231.12 | 227.62 | 30.04 | 29.75 | 5160 | 5014 | 55.7 | 30.3 |
| 4 | 230.58 | 226.98 | 30.13 | 29.84 | 5189 | 5042 | 53.5 | 31.2 |
| 5 | 227.65 | 223.85 | 29.91 | 29.62 | 5112 | 4964 | 51.8 | 31.1 |
| 6 | 228.98 | 225.75 | 30.00 | 29.70 | 5154 | 5020 | 54.5 | 31.9 |
| 7 | 228.46 | 224.32 | 29.94 | 29.64 | 5135 | 4963 | 54.6 | 32.0 |
| 8 | 229.92 | 225.66 | 30.11 | 29.81 | 5190 | 5055 | 54.7 | 31.3 |
| ค่าเฉลี่ย | 230.00 | 226.43 | 30.02 | 29.73 | 5151.44 | 5004.33 | 53.8 | 30.4 |
| ค่าเฉลี่ยขั้วโมดที่ 6 8 | 229.12 | 225.24 | 30.02 | 29.72 | 5159.67 | 5012.67 | 54.6 | 31.7 |

ชุดการทดลองที่: 3 ขนาดสาย: 4 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 29.6 A ครั้งที่: 2

| ขั้วโมดที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 231.72 | 228.52 | 29.67 | 29.40 | 5017 | 4871 | 49.7 | 27.0 |
| 1 | 230.16 | 226.86 | 30.14 | 29.89 | 5178 | 5030 | 55.5 | 29.1 |
| 2 | 230.28 | 226.88 | 30.00 | 29.72 | 5141 | 4994 | 54.6 | 30.2 |
| 3 | 232.86 | 229.26 | 30.21 | 29.92 | 5225 | 5077 | 55.9 | 30.8 |
| 4 | 230.96 | 227.26 | 30.15 | 29.85 | 5193 | 5046 | 53.8 | 31.6 |
| 5 | 228.11 | 224.41 | 29.84 | 29.56 | 5096 | 4948 | 53.6 | 31.7 |
| 6 | 228.50 | 224.81 | 29.95 | 29.66 | 5136 | 4984 | 54.4 | 31.8 |
| 7 | 228.13 | 224.79 | 29.93 | 29.65 | 5128 | 4986 | 54.2 | 31.7 |
| 8 | 229.28 | 225.88 | 30.06 | 29.78 | 5173 | 5025 | 54.5 | 31.2 |
| ค่าเฉลี่ย | 230.00 | 226.52 | 29.99 | 29.71 | 5143.00 | 4995.67 | 54.0 | 30.6 |
| ค่าเฉลี่ยขั้วโมดที่ 6 8 | 228.64 | 225.16 | 29.98 | 29.70 | 5145.67 | 4998.33 | 54.4 | 31.6 |

ชุดการทดลองที่: 3 ขนาดสาย: 4 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 29.6 A ครั้งที่: 3

| ขั้วโมดที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 231.90 | 228.70 | 29.95 | 29.66 | 5105 | 4960 | 50.0 | 27.2 |
| 1 | 231.02 | 227.82 | 30.20 | 29.90 | 5201 | 5055 | 55.1 | 29.2 |
| 2 | 230.60 | 227.20 | 30.08 | 29.80 | 5175 | 5028 | 54.0 | 30.3 |
| 3 | 231.97 | 228.27 | 30.15 | 29.87 | 5198 | 5050 | 55.7 | 30.9 |
| 4 | 229.28 | 225.48 | 30.01 | 29.71 | 5148 | 5001 | 53.5 | 31.5 |
| 5 | 227.29 | 223.49 | 29.86 | 29.59 | 5100 | 4953 | 51.8 | 31.9 |
| 6 | 227.93 | 223.93 | 29.76 | 29.46 | 5071 | 4929 | 54.5 | 31.5 |
| 7 | 228.39 | 224.65 | 29.93 | 29.64 | 5134 | 4984 | 54.6 | 31.6 |
| 8 | 230.91 | 227.23 | 30.21 | 29.93 | 5231 | 5082 | 54.7 | 31.1 |
| ค่าเฉลี่ย | 229.92 | 226.31 | 30.02 | 29.73 | 5151.44 | 5004.67 | 53.8 | 30.6 |
| ค่าเฉลี่ยขั้วโมดที่ 6 8 | 229.08 | 225.27 | 29.97 | 29.68 | 5145.33 | 4998.33 | 54.6 | 31.4 |

ชุดการทดลองที่: 4 ขนาดสาย: 6 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 29.6 A ครั้งที่: 1

| ชั่วโมงที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 233.44 | 232.34 | 29.77 | 29.51 | 5012 | 4925 | 39.6 | 25.3 |
| 1 | 233.20 | 231.80 | 30.28 | 30.00 | 5183 | 5095 | 40.5 | 26.7 |
| 2 | 231.74 | 230.34 | 30.13 | 29.85 | 5137 | 5050 | 41.8 | 28.3 |
| 3 | 234.16 | 232.76 | 30.39 | 30.09 | 5228 | 5140 | 43.1 | 29.4 |
| 4 | 230.19 | 228.69 | 30.00 | 29.72 | 5094 | 5005 | 44.3 | 29.9 |
| 5 | 229.82 | 228.32 | 29.98 | 29.68 | 5085 | 4997 | 43.8 | 30.4 |
| 6 | 230.70 | 228.63 | 30.05 | 29.77 | 5116 | 5024 | 46.2 | 30.9 |
| 7 | 231.01 | 230.10 | 30.14 | 29.86 | 5145 | 5055 | 45.4 | 30.7 |
| 8 | 234.67 | 232.89 | 30.50 | 30.19 | 5271 | 5187 | 42.2 | 29.9 |
| ค่าเฉลี่ย | 232.10 | 230.65 | 30.14 | 29.85 | 5141.22 | 5053.11 | 43.0 | 29.1 |
| ค่าเฉลี่ยชั่วโมงที่ 6 8 | 232.13 | 230.54 | 30.23 | 29.94 | 5177.33 | 5088.67 | 44.6 | 30.5 |

ชุดการทดลองที่: 4 ขนาดสาย: 6 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 29.6 A ครั้งที่: 2

| ชั่วโมงที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 233.27 | 232.07 | 29.66 | 29.37 | 4963 | 4887 | 40.5 | 26.0 |
| 1 | 232.37 | 230.97 | 30.02 | 29.77 | 5099 | 5012 | 40.7 | 26.9 |
| 2 | 232.06 | 230.66 | 30.19 | 29.90 | 5151 | 5063 | 42.1 | 28.6 |
| 3 | 232.60 | 231.20 | 30.29 | 30.00 | 5185 | 5095 | 44.0 | 30.0 |
| 4 | 231.71 | 230.26 | 30.16 | 29.85 | 5153 | 5064 | 44.4 | 30.0 |
| 5 | 229.48 | 227.98 | 29.93 | 29.65 | 5078 | 4989 | 44.0 | 30.6 |
| 6 | 230.58 | 229.16 | 30.02 | 29.71 | 5112 | 5018 | 46.4 | 31.1 |
| 7 | 230.46 | 228.45 | 30.08 | 29.80 | 5127 | 5035 | 45.5 | 30.8 |
| 8 | 232.24 | 230.51 | 30.35 | 30.07 | 5220 | 5139 | 42.3 | 30.0 |
| ค่าเฉลี่ย | 231.64 | 230.14 | 30.08 | 29.79 | 5120.89 | 5033.56 | 43.3 | 29.3 |
| ค่าเฉลี่ยชั่วโมงที่ 6 8 | 231.09 | 229.37 | 30.15 | 29.86 | 5153.00 | 5064.00 | 44.7 | 30.6 |

ชุดการทดลองที่: 4 ขนาดสาย: 6 ตร.มม. กระแสไฟฟ้าเป้าหมาย: 29.6 A ครั้งที่: 3

| ชั่วโมงที่ | Vin (V) | Vout (V) | Iin (A) | Iout (A) | Pin (W) | Pout (W) | Tsurface (°C) | Tambient (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Start) | 232.23 | 231.03 | 29.75 | 29.49 | 5003 | 4915 | 40.8 | 26.2 |
| 1 | 231.74 | 230.45 | 30.13 | 29.83 | 5133 | 5044 | 40.9 | 27.0 |
| 2 | 231.95 | 230.55 | 30.15 | 29.86 | 5142 | 5052 | 42.2 | 28.8 |
| 3 | 232.62 | 231.22 | 30.25 | 29.96 | 5177 | 5088 | 44.5 | 30.5 |
| 4 | 228.91 | 227.43 | 29.89 | 29.61 | 5052 | 4962 | 45.2 | 30.6 |
| 5 | 230.08 | 228.57 | 30.01 | 29.74 | 5092 | 5003 | 44.4 | 30.8 |
| 6 | 230.57 | 229.62 | 30.07 | 29.76 | 5121 | 5030 | 46.5 | 31.2 |
| 7 | 230.88 | 229.95 | 30.13 | 29.84 | 5142 | 5056 | 45.4 | 30.6 |
| 8 | 234.67 | 233.77 | 30.50 | 30.21 | 5280 | 5190 | 42.4 | 30.0 |
| ค่าเฉลี่ย | 231.52 | 230.29 | 30.10 | 29.81 | 5126.89 | 5037.78 | 43.6 | 29.5 |
| ค่าเฉลี่ยชั่วโมงที่ 6 8 | 232.04 | 231.11 | 30.23 | 29.94 | 5181.00 | 5092.00 | 44.8 | 30.6 |

# ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**หลักการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำ**

ข้อมูลแต่ละค่าในตารางเป็นผลจากการนำค่าที่บันทึกได้จากการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ของแต่ละชุดการทดลอง (Replications) (ภาคผนวก ค) มาทำการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตและตรวจสอบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อให้เป็นค่าตัวแทนของกรณีศึกษานั้นๆ

ตัวอย่างการคำนวณการหาค่าเฉลี่ย (กรณีศึกษาสาย 2.5 ตร.มม. กระแสทดสอบที่ 22.4 แอมแปร์) หากพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าด้านรับ ($P_{in}$) จากการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งในช่วงสภาวะคงตัว ได้ข้อมูลดังนี้:

การทดลองครั้งที่ 1: $P_{in}$ = 3,154.00 วัตต์ (ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงชั่วโมงที่ 6 ถึงชั่วโมงที่ 8 ของการทดสอบ)

การทดลองครั้งที่ 2: $P_{in}$ = 3,166.67 วัตต์ (ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงชั่วโมงที่ 6 ถึงชั่วโมงที่ 8 ของการทดสอบ)

การทดลองครั้งที่ 3: $P_{in}$ = 3,157.33 วัตต์ (ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงชั่วโมงที่ 6 ถึงชั่วโมงที่ 8 ของการทดสอบ)

$$\text{ค่าเฉลี่ย } P_{in} = \frac{3{,}154.00 + 3{,}166.67 + 3{,}157.33}{3} = 3{,}159.33$$

โดยกระบวนการหาค่าเฉลี่ยดังกล่าวถูกนำไปใช้กับพารามิเตอร์อื่นๆ ทั้งหมด ได้แก่ แรงดัน, กระแส, อุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าด้านจ่าย เพื่อให้ได้ชุดข้อมูลที่สมบูรณ์ดังแสดงในตารางที่ 4-1

**หลักการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียตามทฤษฎีและแหล่งที่มาของตัวแปร**

การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทางทฤษฎีอ้างอิงกฎของจูล (Joule's Law) สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย ซึ่งมีองค์ประกอบของตัวแปรดังนี้:

กระแสไฟฟ้า ( $I$ ): ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดได้จริงจากชุดการทดลอง ( $I_{measured}$)

ความต้านทานตัวนำ ( $R$ ): อ้างอิงค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดที่ 20°C จากมาตรฐานผู้ผลิตสายไฟฟ้า (Standard Resistance) ภาพที่ 3-14

ระยะทาง ( $L$ ): คิดระยะทางรวมของวงจรไฟฟ้า (รวมสายเส้นไฟและสายนิวทรัล) เท่ากับ 40 เมตร (ไป-กลับ)

ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณหาค่า $P_{loss}$ ทางทฤษฎี (กรณีศึกษาที่ 1: สายไฟฟ้าขนาด 2.5 ตร.มม. ที่กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์)

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดค่าความต้านทานรวมของวงจร ($R_{total}$)

จากมาตรฐานผู้ผลิต สาย 2.5 ตร.มม. มีค่า $R$ = 7.41 Ω/km

$$R_{total} = 7.41 \times \left(\frac{20 \text{ เมตร} \times 2}{1{,}000}\right) = 0.2964\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยสมการ $P = I^2R$ โดยแทนค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จริงจากตารางที่ 4.1 ($I$ = 23.18 แอมแปร์)

$$P_{loss(Theoretical)} = (23.18)^2 \times 0.2964$$

$$P_{loss(Theoretical)} = 537.31 \times 0.2964 = 159.26 \text{ วัตต์}$$

ค่า $P_{loss}$ ทางทฤษฎีนี้เป็นค่าในอุดมคติที่อุณหภูมิอ้างอิง 20°C ซึ่งจะนำไปใช้เป็นบรรทัดฐานในการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงในสภาวะแวดล้อมการทำงาน ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในทุกชุดการทดลองในตารางที่ 4-4

**หลักการคำนวณความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์**

การคำนวณในส่วนนี้เป็นการประเมินความคุ้มค่าของการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของสายไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่าง "เงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น (Incremental Investment)" กับ "ผลตอบแทนจากการประหยัดพลังงาน (Energy Saving Return)" ภายใต้กรอบระยะเวลาโครงการ 15 ปี

สมมติฐานและการกำหนดตัวแปรในการคำนวณ เพื่อให้การประเมินโครงการมีความแม่นยำ จึงได้กำหนดตัวแปรอ้างอิงดังนี้:

เวลาในการใช้งาน: 8 ชั่วโมงต่อวัน และ 365 วันต่อปี (รวม 2,920 ชั่วโมง/ปี)

อัตราค่าไฟฟ้า: 4.50 บาทต่อหน่วย (kWh)

ระยะเวลาวิเคราะห์โครงการ ($n$): 15 ปี

อัตราคิดลด (Discount Rate, r): 5% ต่อปี

ต้นทุนสายไฟฟ้า (อ้างอิงระยะทาง 40 เมตร):

ขนาด 2.5 ตร.มม. (12.01 บาท/เมตร) = 480.40 บาท

ขนาด 4 ตร.มม. (18.93 บาท/เมตร) = 757.20 บาท (ส่วนต่างจาก 2.5 ตร.มม. $C_o$ = 276.80 บาท)

ขนาด 6 ตร.มม. (28.80 บาท/เมตร) = 1,152.00 บาท (ส่วนต่างจาก 4 ตร.มม. $C_o$ = 394.80 บาท)

ตัวอย่างการคำนวณและที่มาของตัวแปร (กรณีศึกษาที่ 1: การเปลี่ยนจากสาย 2.5 ตร.มม. เป็น 4 ตร.มม. ที่กระแสทดสอบ 22.4 แอมแปร์) พลังงานที่ประหยัดได้ในกรณีศึกษาที่ 1 (46.99 วัตต์)

พลังงานที่ประหยัดได้ต่อปี

$$\Delta E = \left(\frac{46.99 \text{ วัตต์}}{1{,}000}\right) \times 8\ hr \times 365\ day = 137.21\ kWh/Year$$

ผลประหยัดสะสมต่อปี (Cash Inflow)

$$Saving = 137.21\ kWh \times 4.50 \text{ บาท} = 617.45 \text{ บาท}/Year$$

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

$$Payback\ Period = \frac{276.80}{617.45} = 0.45\ Year$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV):

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^{15} \frac{617.45}{(1+0.05)^t} - 276.80 \;=\; (617.45 \times 10.3797) - 276.80 = 6{,}132.13 \text{ บาท}$$

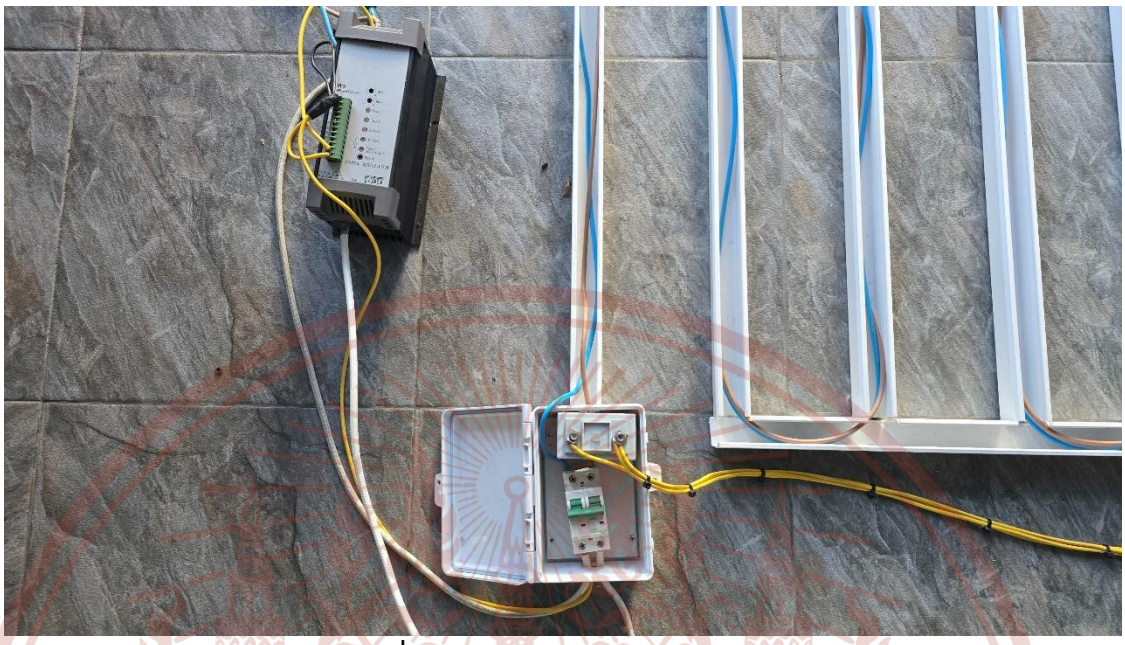
อัตราผลตอบแทน (IRR): คำนวณหาค่า $\mathbf{r}$ ที่ทำให้ $\text{NPV} = 0$

จากตัวอย่างการคำนวณหาค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของกรณีศึกษาที่ 1 จึงได้ทำการคำนวณในวิธีดังกล่าวและสรุปดัชนีชี้วัดความคุ้มค่าของทุกกรณีศึกษาตลอดอายุโครงการ 15 ปี เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมและการบริหารจัดการพลังงาน ดังรายละเอียดที่ปรากฏในตารางที่ 4-5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

# ภาคผนวก จ

ภาพการดำเนินการทดลอง



**ภาพที่ จ-1** แสดงการดำเนินการทดลอง



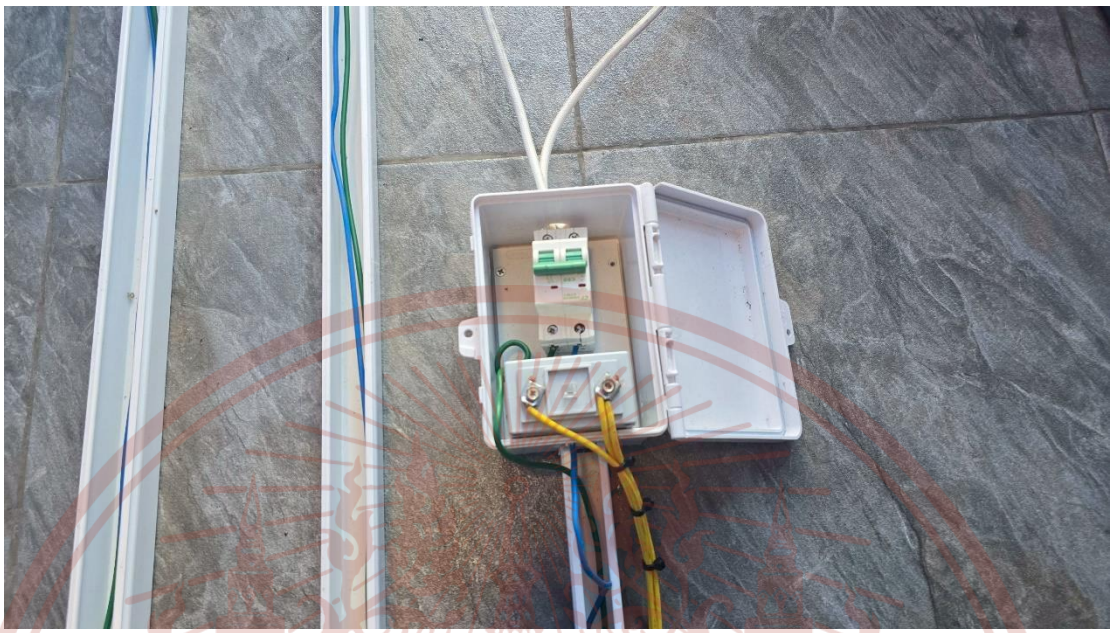
**ภาพที่ จ-2** แสดงการดำเนินการทดลอง



**ภาพที่ จ-3** แสดงการดำเนินการทดลอง



**ภาพที่ จ-4** แสดงการดำเนินการทดลอง



**ภาพที่ จ-5** แสดงการดำเนินการทดลอง



**ภาพที่ จ-6** แสดงการดำเนินการทดลอง



**ภาพที่ จ-7** แสดงการดำเนินการทดลอง




**ภาพที่ จ-8** แสดงการดำเนินการทดลอง

# ประวัติผู้เขียน

**ชื่อ** นายภาคภูมิ ทิพย์ประเสริฐ

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การศึกษาแนวทางการเลือกขนาดสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยเพื่ออนุรักษ์พลังงาน

**สาขาวิชา** เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**ประวัติ**

**การศึกษา**

สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558

สำเร็จการศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ปีการศึกษา 2564

**การทำงาน**

ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรม
บริษัท วิศวกรรมละเอียด จำกัด

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี