

การพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายบนมาตรฐานไออีซี 61850



นายศิโรช ศรีสดีไส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

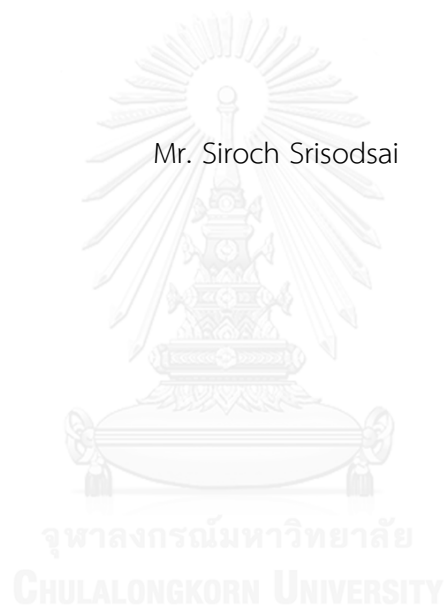
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Prototype Development of Distribution Transformer Monitoring System  
on IEC61850 Standard

Mr. Siroch Srisodsai



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2016  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ
	จำหน่ายบนมาตรฐานไออีซี 61850
โดย	นายศิโรช ศรีสดีใส
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์ พุ่มรินทร์)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา)  
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัมย์)

ศิโรช ศรีสติไส : การพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ  
จำหน่ายบนมาตรฐานไออีซี 61850 (A Prototype Development of Distribution  
Transformer Monitoring System on IEC61850 Standard) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก: ผศ. ดร. วันเฉลิม โปรา, หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายบน  
มาตรฐาน IEC61850 ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารในระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ ที่จะเพิ่มสมรรถนะ  
ของอุปกรณ์ให้สามารถแลกเปลี่ยนและให้บริการข้อมูลกับอุปกรณ์อื่นในโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง  
เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและจัดการข้อมูลอย่างมีระบบ การออกแบบสร้างต้นแบบระบบเฝ้าสังเกต  
ถูกดำเนินการบนคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียว Beaglebone Green และระบบปฏิบัติการฝังตัวลินุกซ์เด  
เบียน ร่วมด้วยโมดูลวัดค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมที่ออกแบบ ประกอบด้วยวงจรรวม STPM34  
และตัวรับรูดาร์ทีดีถูกเลือกใช้อย่างเหมาะสม โครงสร้างของข้อมูลเป็นรูปแบบ Logical node ที่มี  
ลักษณะพารามิเตอร์แบบ Object Oriented ถูกออกแบบโดยใช้ภาษา XML สร้างไฟล์ IED  
Capability Description (ICD) ซึ่งอธิบายโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด  
(Intelligent Electronic Device : IED) ได้อย่างดี และสามารถเฝ้าสังเกตได้ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณ  
และข้อมูลเชิงคุณภาพ ส่วนศูนย์ข้อมูลได้พัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อการเรียกเก็บชุดข้อมูลจากอุปกรณ์  
อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดในโครงข่าย และสร้างเว็บเซิร์ฟเวอร์สำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน รวมถึง  
ประมวลผลจำแนกประเภทความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายในระบบได้  
ความสามารถของการบริหารจัดการเทรต ระบบฐานข้อมูล และโครงข่ายที่มีความปลอดภัย ได้ถูก  
นำมาประยุกต์ใช้ทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดและศูนย์ข้อมูล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า  
ระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายมีความถูกต้องตามที่ออกแบบและสามารถใช้ร่วมกับ  
ซอฟต์แวร์ที่มีอยู่ในท้องตลาดตามมาตรฐาน IEC61850 ที่มีชั้นการสื่อสารแบบ MMS  
(Manufacturing Message Specification) รวมทั้งความสามารถในการวัดค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ  
สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC62053 และ IEC60751 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5770313021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: IEC61850 / MONITORING SYSTEM / DISTRIBUTION TRANSFORMER / INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICE / THREAD MANAGEMENT / EMBEDDED LINUX

SIROCH SRISODSAI: A Prototype Development of Distribution Transformer Monitoring System on IEC61850 Standard. ADVISOR: ASST. PROF. WANCHALERM PORA, Ph.D., pp.

This thesis proposed a prototype development of distribution transformer monitoring system on IEC61850, the modern communication standard in power system. The IEC61850 standard, enables device to exchange and service information with other devices, improves performance with information management. The prototype monitoring system was implemented on embedded Linux Beaglebone Green with monitoring module measuring on electrical and environment parameters. The circuitry consist of STPM34 energy metering IC and RTD sensor which chosen appropriately. The data structures are in IED Capability Description (ICD) file, self-description of Intelligent Electronic Device in XML language, which utilizing logical node. The object oriented format also expresses quantitative value and quality value. As for data center software, the ability to get dataset from IED in the network as well as classify malfunction of distribution transformer in user interface on web server are achieved. In addition, the functionality of security network, database system and thread management are all implemented both IED and data center. Consequently, the test results show that a prototype of distribution transformer monitoring system is in accordance with the design and its communication conforms to the IEC61850 third-party software with Manufacturing Message Specification (MMS) protocol. Furthermore, the electrical and temperature measurement function achieve accuracy specified in IEC62053 standard and IEC60751 standard respectively.

Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การสนับสนุน แนะนำแนวทาง ข้อคิดเห็นต่างๆ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์และงานวิจัยตลอดมา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์ พุ่มรินทร์ และรองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลาธรรม ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบวงจรฝังตัวและวงจรรวมทุกคน สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ รวมทั้งมิตรภาพและความรู้สึกดีๆ ที่มีให้กันเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรัก และพี่ชาย ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างดี ตลอดจนเป็นกำลังใจที่สำคัญให้แก่ข้าพเจ้าในการทำงานวิจัย

ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ระดับปริญญาโท จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย .....	4
1.5 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทย.....	6
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย.....	7
2.2.1 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	7
2.2.2 ระบบระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	9
2.2.3 ประเภทของฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย.....	10
2.2.4 อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	11
2.3 ความสำคัญและเป็นที่ต้องการพัฒนาของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย.....	14
2.3.1 คอมพิวเตอร์บอร์ดเดียว (Single-Board Computer).....	15
2.3.2 ตัวรับรู้และตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้า.....	18

2.3.3 การวัดอุณหภูมิ.....	20
2.3.4 การสื่อสาร .....	21
2.4 มาตรฐานไออีซี 61850 (IEC61850).....	23
2.4.1 จุดประสงค์และประโยชน์ที่ได้รับกับการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC61850 .....	23
2.4.2 รูปแบบการสื่อสารของมาตรฐานไออีซี 61850 .....	24
2.4.3 ชั้นสื่อสารและรูปแบบข้อมูลของมาตรฐานไออีซี 61850 .....	25
2.4.4 ไฟล์ Substation Configuration Language (SCL file) .....	26
2.4.5 การอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented ของมาตรฐานไออีซี 61850.....	27
บทที่ 3 การออกแบบโครงข่ายของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและฮาร์ดแวร์ .....	29
3.1 การออกแบบระบบเครือข่าย .....	29
3.2 โครงสร้างต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (DTMS Structure) .....	30
3.3 ฮาร์ดแวร์.....	32
3.3.1 คอมพิวเตอร์บอร์ดเดียว Beaglebone Green.....	32
3.3.2 ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 .....	34
3.3.3 ตัวรับรู้อุณหภูมิ PT100.....	40
บทที่ 4 การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	44
4.1 การออกแบบ SCL ไฟล์ สำหรับ DTMS.....	44
4.1.1 ประเภทข้อมูลของ Logical node.....	45
4.1.2 การออกแบบ Logical node .....	46
4.1.3 การออกแบบชุดข้อมูล (Dataset Design) .....	49
4.2 การบริหารจัดการเธรด (Thread Management).....	50
4.3 ซอฟต์แวร์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (DTMS software) .....	52
4.3.1 การออกแบบโปรแกรมส่วนหลัก.....	52



4.3.2 การออกแบบโปรแกรมส่วนการวัด .....	53
4.3.3 การออกแบบโปรแกรมส่วนฐานข้อมูล .....	55
4.3.4 การออกแบบโปรแกรมส่วนเซิร์ฟเวอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาตตาม มาตรฐาน IEC61850 .....	57
4.3.5 การออกแบบโปรแกรมสำหรับรายงานไอพีแอดเดรส.....	59
บทที่ 5 การออกแบบซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูลและโครงสร้างฐานข้อมูล .....	61
5.1 ซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูล (Data Center Software).....	61
5.1.1 การออกแบบโปรแกรมส่วนหลัก.....	61
5.1.2 การออกแบบโปรแกรมส่วนฐานข้อมูล .....	62
5.1.3 การออกแบบโปรแกรมส่วนโคลแอนท์ของศูนย์ข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 .....	64
5.2 ระบบฐานข้อมูล (Database System).....	67
5.2.1 การออกแบบฐานข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาตตาม .....	67
5.2.2 การออกแบบฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูล .....	68
5.3 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานของศูนย์ข้อมูล (Data Center User Interface Design)...	70
5.3.1 โครงสร้าง Codeigniter .....	70
5.3.2 โครงสร้างการแสดงผลเว็บไซต์ศูนย์ข้อมูลของระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบจำหน่าย.....	71
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	72
6.1 การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 .....	72
6.1.1 วิธีการทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850.....	72
6.1.2 การทดสอบระบบตรวจสอบรหัสผ่าน.....	74
6.1.3 การทดสอบโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาตตาม .....	75
6.1.4 การทดสอบชุดข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาตตาม.....	76
6.2 การทดสอบวงจรวัดค่าทางไฟฟ้า.....	80

6.2.1	วิธีการทดสอบวงจรวัดค่าทางไฟฟ้า .....	80
6.2.2	ส่วนทดสอบกระแสไฟฟ้า .....	80
6.2.3	ส่วนทดสอบแรงดันไฟฟ้า.....	85
6.3	การทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิ .....	89
6.3.1	วิธีการทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิ .....	89
6.3.2	ส่วนทดสอบตัวรับรู้สำหรับฉนวนน้ำมัน .....	90
6.3.3	ส่วนทดสอบตัวรับรู้สำหรับสภาพแวดล้อม.....	90
6.4	การทดสอบการใช้กระแสของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	92
6.5	การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับเฝ้าสังเกตของศูนย์ข้อมูล.....	94
บทที่ 7	ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ .....	97
7.1	สรุป .....	97
7.2	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	98
7.3	ข้อเสนอแนะ .....	98
รายการอ้างอิง	.....	99
ภาคผนวก ก	ราคาอุปกรณ์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	.....	105

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียว .....	16
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบไอซีสำหรับประมวลผลค่าทางไฟฟ้า.....	19
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบตัวรับรู้อุณหภูมิ.....	21
ตารางที่ 4 โพรโตคอลการสื่อสารของ STPM34.....	35
ตารางที่ 5 ย่านแรงดันอินพุตของไอซีวัดพลังงาน STPM34 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า.....	36
ตารางที่ 6 ย่านแรงดันอินพุตของไอซีวัดพลังงาน STPM34 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า.....	38
ตารางที่ 7 Common Logical Node class .....	47
ตารางที่ 8 Logical node และ Object ที่เลือกใช้ในด้านแบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	48
ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ลักษณะเชิงคุณภาพ.....	49
ตารางที่ 10 ข้อกำหนดกระแสไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1 .....	80
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1 .....	85
ตารางที่ 12 ข้อกำหนดแรงดันไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1 .....	85
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1 .....	88
ตารางที่ 14 ข้อกำหนดความผิดพลาดของอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC60751.....	89
ตารางที่ 15 ผลการทดสอบอุณหภูมิและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC60751 Class C .....	91
ตารางที่ 16 การใช้กระแสของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย.....	93
ตารางที่ 17 ราคาอุปกรณ์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	104

## สารบัญภาพ

รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดเล็ก.....	7
รูปที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดกลาง .....	8
รูปที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดใหญ่ .....	8
รูปที่ 4 ระบบระบายความร้อนแบบ Oil Natural Air Natural (ONAN).....	10
รูปที่ 5 คุณลักษณะเฉพาะของความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	13
รูปที่ 6 ตัวอย่างโพลดโดยทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	14
รูปที่ 7 ระบบการทำงานของตัวรับรู้และตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้า .....	18
รูปที่ 8 หลักการทำงานของ Two-Party-Application-Association (TPAA).....	24
รูปที่ 9 หลักการทำงานของ Multicast-Application-Association (MCAA).....	24
รูปที่ 10 ชั้นของการสื่อสารบนมาตรฐาน IEC61850 .....	25
รูปที่ 11 ไฟล์ SCL ประเภทต่างๆ ที่ทำหน้าที่อธิบายส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง .....	26
รูปที่ 12 ลักษณะการอ้างอิงชื่อของมาตรฐานไออีซี 61850 .....	27
รูปที่ 13 คำสั่งการเรียกใช้อุปกรณ์การวัด .....	28
รูปที่ 14 คำสั่งการเรียกใช้อุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ .....	28
รูปที่ 15 เครือข่ายต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	29
รูปที่ 16 การออกแบบระบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ .....	30
รูปที่ 17 Beaglebone Green.....	33
รูปที่ 18 ระบบการทำงานภายในไอซีวัดพลังงาน STPM34 .....	35
รูปที่ 19 โพรโตคอลการสื่อสารของ STPM34 .....	35
รูปที่ 20 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า .....	36
รูปที่ 21 วงจรวัดกระแสไฟฟ้า .....	38
รูปที่ 22 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า .....	38

รูปที่ 23 ตัวรับรู้ PT100 สำหรับวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อม.....	40
รูปที่ 24 ตัวรับรู้ PT100 สำหรับวัดอุณหภูมิฉนวนน้ำมัน .....	40
รูปที่ 25 วงจรวิทส์โตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge).....	41
รูปที่ 26 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต.....	42
รูปที่ 27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความไว .....	43
รูปที่ 28 ประเภทข้อมูลของ Logical node.....	45
รูปที่ 29 ผังแสดงหลักการออกแบบและเลือกใช้ Logical node .....	46
รูปที่ 30 ผังการทำงานโปรแกรมส่วนหลักของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด .....	52
รูปที่ 31 ผังการทำงานฟังก์ชันกำหนดค่าเริ่มต้นของ STPM34 .....	53
รูปที่ 32 ผังการทำงานเทรตการวัด.....	54
รูปที่ 33 ฟังก์ชันการสร้างฐานข้อมูลสำหรับต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	55
รูปที่ 34 ผังการทำงานเทรตการเพิ่มข้อมูล .....	56
รูปที่ 35 ผังการทำงานเทรตการลบข้อมูลเก่า .....	56
รูปที่ 36 ผังการทำงานฟังก์ชันการสร้างเซิร์ฟเวอร์ตามมาตรฐาน IEC61850 .....	57
รูปที่ 37 ผังการทำงานฟังก์ชันตรวจสอบรหัสผ่าน .....	58
รูปที่ 38 ผังการทำงานเทรตสำหรับเริ่มต้นการทำงานของเซิร์ฟเวอร์ .....	59
รูปที่ 39 ผังการทำงานเทรตส่งอีเมลล์.....	60
รูปที่ 40 ผังการทำงานโปรแกรมส่วนหลักของศูนย์ข้อมูล .....	61
รูปที่ 41 ผังการทำงานฟังก์ชันกำหนดฐานข้อมูลเริ่มต้น.....	62
รูปที่ 42 ผังการทำงานฟังก์ชันการเรียกข้อมูลไอดีและไอพีแอดเดรส .....	63
รูปที่ 43 ผังการทำงานฟังก์ชันการเพิ่มข้อมูล.....	63
รูปที่ 44 ผังการทำงานเทรตส่วนไคลแอนท์ของศูนย์ข้อมูล .....	64
รูปที่ 45 ผังการทำงานเทรตสำหรับการเช็คข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรส.....	65
รูปที่ 46 ฐานข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด .....	68

รูปที่ 47	ฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูล.....	69
รูปที่ 48	ผังการทำงานของ Codeigniter .....	70
รูปที่ 49	โครงสร้างการแสดงผลเว็บไซต์ศูนย์ข้อมูล.....	71
รูปที่ 50	อินเตอร์เฟซซอฟต์แวร์ IED Explorer.....	73
รูปที่ 51	การตั้งค่าแถบ ISO Connection Parameters.....	73
รูปที่ 52	การเชื่อมต่อตอบสนองจากต้นแบบระบบฝ้าสังเกต .....	74
รูปที่ 53	การเชื่อมต่อถูกปฏิเสธจากต้นแบบระบบฝ้าสังเกต .....	74
รูปที่ 54	โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กจากซอฟต์แวร์ IED Explorer .....	76
รูปที่ 55	ซอฟต์แวร์ IED Explorer ร้องขออ่านชุดข้อมูล.....	77
รูปที่ 56	ต้นแบบระบบฝ้าสังเกตตอบสนองข้อมูลกลับในซอฟต์แวร์ IED Explorer .....	77
รูปที่ 57	ข้อมูล Object ของต้นแบบระบบฝ้าสังเกตที่อ่านได้ในซอฟต์แวร์ IED Explorer.....	78
รูปที่ 58	ข้อมูล Object ของต้นแบบระบบฝ้าสังเกตที่อ่านได้จากซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูล .....	79
รูปที่ 59	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $0.25 \leq I < 0.5$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 .....	81
รูปที่ 60	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $0.5 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 .....	81
รูปที่ 61	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $0.5 \leq I < 1$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 .....	82
รูปที่ 62	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $0.5 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 .....	82
รูปที่ 63	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $1 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 .....	83
รูปที่ 64	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $1 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 .....	83
รูปที่ 65	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $1 \leq I \leq 5$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.25 .....	84
รูปที่ 66	ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง $1 \leq I \leq 5$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 .....	84
รูปที่ 67	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 198 V ช่วงกระแส $0.25 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 .....	86
รูปที่ 68	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 198 V ช่วงกระแส $0.5 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 .....	86

รูปที่ 69 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 242 V ช่วงกระแส $0.25 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลัง เท่ากับ 1 .....	87
รูปที่ 70 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 242 V ช่วงกระแส $0.5 \leq I \leq 10$ และตัวประกอบกำลัง เท่ากับ 0.5 .....	87
รูปที่ 71 การทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิ .....	89
รูปที่ 72 ผลการทดสอบตัวรับรู้สำหรับฉนวนน้ำมัน .....	90
รูปที่ 73 ผลการทดสอบตัวรับรู้สำหรับสภาพแวดล้อม .....	90
รูปที่ 74 ผลกระทบความผิดพลาดของอุณหภูมิต่อค่าตัวประกอบแรงอายุการใช้งาน .....	92
รูปที่ 75 ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	92
รูปที่ 76 ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	94
รูปที่ 77 สถานะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	94
รูปที่ 78 ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะเฉพาะตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย .....	95
รูปที่ 79 ประเภทของความผิดปกติของพารามิเตอร์ .....	96

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันนี้พลังงานไฟฟ้ามีบทบาทกับชีวิตมนุษย์เป็นอย่างมาก มีแนวโน้มความต้องการใช้พลังงานสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งในระบบสาธารณูปโภคหรือโครงสร้างพื้นฐานที่อำนวยความสะดวกและใช้ในการดำเนินชีวิต รวมทั้งการใช้ไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมและภาคธุรกิจที่ส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเจริญก้าวหน้าของประเทศในทุกๆ ด้าน ดังนั้นระบบการบริหารจัดการโครงข่ายไฟฟ้าที่ดีย่อมเป็นการใช้ไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม

ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) เป็นโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและสื่อสารมาบริหารจัดการ ควบคุมการผลิต การส่ง การจ่ายพลังงานไฟฟ้า และระบบบริหารการใช้สินทรัพย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพ มีความมั่นคง ปลอดภัย เชื่อถือได้ มีคุณภาพไฟฟ้าได้มาตรฐานสากล [1] ระบบประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ เช่น โครงสร้างพื้นฐานการวัดขั้นสูง (Advanced Metering Infrastructure : AMI) , เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานสีเขียว (Green Power Generation), หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ (Smart Distribution Transformer) และโครงข่ายระบบการจัดการการจัดจำหน่าย (Distribution Management System) เป็นต้น

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายนับได้ว่าเป็นโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับพลังงานไฟฟ้าจากผู้ผลิตและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า วัตถุประสงค์หนึ่งของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะคือการเพิ่ม “ประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือ” ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง ดังนั้นการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ ให้มีความสามารถสื่อสารกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก (Intelligent Electronic Device : IED) อื่นๆ ในระบบ เช่นระบบตรวจสอบเพื่อให้สามารถควบคุม บำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม



หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องในด้านต่าง อาทิ เช่น กลวิธีการบริหารสินทรัพย์หม้อแปลงไฟฟ้าระบบกำลัง (Techniques for Power Transformer Asset Management) เพื่อการประมวลผลในด้านสภาพ และคุณสมบัติต่างๆ โดยข้อมูลดิบจากตัวรับรู้ (Sensor) หลายๆ ชนิด ร่วมกันใช้กลวิธีประมวลผลสัญญาณและการรู้จำแบบรูป [2] หรือการบูรณาการการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าอัจฉริยะ โดยการเพิ่มตัวรับรู้ เพื่อวัดและควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งอุปกรณ์เชิงไฟฟ้า และอุปกรณ์เชิงกล [3] แต่การพัฒนาเหล่านั้นล้วนแล้วแต่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ โดยมีการเพิ่มตัวรับรู้หลากหลายชนิด เพื่อการประมวลผลข้อมูลที่มีความแม่นยำ และสามารถใช้ในการตัดสินใจในการดำเนินการบำรุงรักษา รวมทั้งคาดการณ์ล่วงหน้าในการใช้พลังงานไฟฟ้าในพื้นที่นั้นๆ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ และโปรโตคอลการสื่อสารที่นำมาใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งเป็นมาตรฐานนานาชาติที่มีความเหมาะสมกับระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติ (Substation Automation) และเป็นทางเลือกใหม่ในระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ซึ่งจะมีผลต่อการพัฒนาอย่างมากในด้านมูลค่าและสมรรถนะ [4]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาด้านแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ที่มีรูปแบบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850
2. พัฒนาเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่แสดงผลการเฝ้าสังเกตอย่างง่าย

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยมีขอบเขตหลักอยู่ด้วยกันสี่ส่วนหลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาระบบหม้อแปลงไฟฟ้าและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
  - ศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
  - ศึกษาประโยชน์ที่จะได้รับจากการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ
  - ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้า
  - ศึกษามาตรฐาน IEC61850 โปรโตคอล MMS และการอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented

- ศึกษาระบบฐานข้อมูล และเว็บเซิร์ฟเวอร์เพื่อการแสดงผลการเฝ้าสังเกต
2. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมชั้นประยุกต์ IEC61850 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
    - พัฒนาโปรแกรมเซิร์ฟเวอร์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก
    - พัฒนาโปรแกรมไคลแอนท์สำหรับศูนย์ข้อมูล
    - รองรับการอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented
    - ใช้ระบบการสื่อสารเครือข่ายแบบ TCP/IP
  3. ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
    - อุปกรณ์ประมวลผลใช้บอร์ด Beaglebone Green ที่มีระบบปฏิบัติการเดเบียน (Debian) เป็นตัวจัดการการทำงานของ ตัวประมวลผล AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8
    - อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าใช้ STPM34 เป็นตัวประมวลผลในการตรวจวัดค่า V, I, kW, Current Phase, Frequency, PF และ kWh โดยสื่อสารกับ Beaglebone Green ผ่าน UART
    - ความถี่ในการเก็บค่าจากการตรวจวัดทุกๆ 5 นาที
    - สามารถเก็บข้อมูลการตรวจวัดในหน่วยความจำภายในได้
    - ตัวรับรู้อุณหภูมิน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil Temperature) และอุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Environment Temperature) โดยใช้ PT100 เป็นตัวรับรู้
    - บริหารจัดการฐานข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ ด้วย MySQL Database
    - ใช้ภาษาซีพลัสพลัสเป็นภาษาหลักในการพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
  4. ศูนย์ข้อมูลสำหรับสื่อสารกับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
    - สามารถเป็นไคลแอนท์สื่อสารกับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และร้องขอการบริการชุดข้อมูลได้ตามมาตรฐาน IEC61850

- บริหารจัดการฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูลด้วย MySQL Database และสร้างเว็บไซต์ด้วย Codeigniter
- ความถี่ในการเก็บค่าจากการต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ในโครงข่ายทุกๆ 1 ชั่วโมง
- ใช้ภาษาซีพลัสพลัสเป็นภาษาหลักในการพัฒนาศูนย์ข้อมูล

#### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งเป็นระยะได้ดังนี้

##### 1. ระยะศึกษา

- ศึกษาไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
- ศึกษาความสามารถที่สำคัญและเป็นที่ต้องการของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ
- ศึกษามาตรฐาน IEC61850 และ MMS (Manufacturing Message Specification)

##### 2. ระยะออกแบบและพัฒนา

- สร้าง SCL (Standard Configuration Language) ไฟล์ และ Object-Oriented
- เขียนโปรแกรมเซิร์ฟเวอร์สำหรับหม้อแปลงที่สื่อสารในมาตรฐาน IEC61850 รวมทั้งระบบการจัดเก็บข้อมูล ในฐานข้อมูลของตัวเอง
- เขียนโปรแกรมสำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และเก็บค่าในฐานข้อมูล โดยมีรูปแบบตามมาตรฐาน IEC61850
- ออกแบบลายวงจรสำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย
- เขียนโปรแกรมโคลแอนท์สำหรับศูนย์ข้อมูล และเว็บไซต์สำหรับเฝ้าสังเกต

##### 3. ระยะทดสอบ

- ทดสอบการทำงานของระบบ
- สรุปผลและเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.5 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท ดังต่อไปนี้ บทที่ 1 บทนำได้กล่าวถึงแนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และวิธีดำเนินการวิจัย บทต่อไปจะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นการทบทวนรวมถึงพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้า ในเชิงโครงสร้าง ความสำคัญและต้องการพัฒนา และมาตรฐานการสื่อสาร IEC61850 บทที่ 3 การออกแบบโครงข่ายของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและฮาร์ดแวร์ กล่าวถึง การออกแบบโครงข่ายสำหรับการสื่อสาร การออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด รวมทั้งวงจรสำหรับการวัดพลังงานและอุณหภูมิ บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับต้นแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด การเลือกโลจิคอลโนด การออกแบบ SCL ไฟล์ และการบริหารจัดการเทรต บทที่ 5 กล่าวถึง การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับศูนย์ข้อมูล การออกแบบระบบฐานข้อมูล และเว็บเซิร์ฟเวอร์เพื่อการเฝ้าสังเกต บทที่ 6 กล่าวถึง ผลการทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 กับซอฟต์แวร์บุคคลที่สาม ผลทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิเทียบกับมาตรฐาน IEC62053-21 และ IEC60751 ตามลำดับ ผลการทดสอบการใช้พลังงานของอุปกรณ์ ผลการทดสอบการใช้งานหน้าเว็บเพื่อเฝ้าสังเกต ส่วนสุดท้าย บทที่ 7 กล่าวถึง ผลสรุปของงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะจากการทำงานวิจัย

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องในการทำวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทย ความสำคัญของการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบจำหน่าย และมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทย

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายมีหน้าที่สำคัญในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างมาก โดยรับไฟฟ้าจากสายส่งที่เป็นแรงดันไฟฟ้าระดับกลาง มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้ไฟฟ้าได้อย่างสะดวก ซึ่งผู้จำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นแบ่งเป็นรายใหญ่ด้วยกัน สองราย คือ

1. การไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority – MEA) มีระบบการจำหน่ายไฟฟ้าที่

- แรงดันระบบจำหน่าย 24 kV หรือ 12/24 kV และแรงดันใช้งาน 416/240V, 3 เฟส
- แรงดันระบบจำหน่าย 24 kV หรือ 12/24 kV และแรงดันใช้งาน 480/240V, 1 เฟส

2. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority – PEA) มีระบบการจำหน่ายไฟฟ้าที่

- แรงดันระบบจำหน่าย 22 kV หรือ 33 kV และแรงดันใช้งาน 400/230V, 3 เฟส
- แรงดันระบบจำหน่าย 22 kV หรือ 19 kV และแรงดันใช้งาน 460/230V, 1 เฟส

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ใช้แรงดันใช้งานที่ 240V ซึ่งสูงกว่าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เนื่องจากประชากรในเขตเมืองมีความหนาแน่นต่อพื้นที่สูง และมีความต้องการใช้พลังงานสูง จึงใช้แรงดันไฟฟ้าใช้งานที่สูงกว่าเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้แรงดันระบบจำหน่ายที่ 33kV ซึ่งสูงกว่าการไฟฟ้านครหลวง เนื่องจากในเขตพื้นที่นอกเมืองหรือชานเมืองมีความหนาแน่นของประชากรที่ต่ำกว่าเขตเมือง ประชากรอาศัยอยู่กันแบบกระจายตัว การใช้แรงดันจำหน่ายที่สูงกว่าเพื่อลดการสูญเสียของการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปในพื้นที่ห่างไกล

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของผู้จำหน่ายไฟฟ้าแต่ละรายมีความแตกต่างกัน ซึ่งถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมตามพื้นที่การให้บริการ และลักษณะการอยู่อาศัยของประชากร

## 2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมีหลายประเภท อาทิเช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจากโรงงานผลิตไฟฟ้าสู่แรงดันจำหน่ายในสถานีไฟฟ้าย่อย และหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าแรงดันจำหน่ายสู่แรงดันใช้งานเพื่อให้ผู้บริโภคสามารถใช้ไฟฟ้าได้อย่างสะดวก เป็นต้น จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวกลางในการส่งผ่านไฟฟ้าหลายระดับแรงดัน วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีปริมาณมากในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือและคุณภาพในการใช้ไฟฟ้า

### 2.2.1 ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย มีขนาดกำลังไฟฟ้า แรงดันการใช้งานหลายแบบซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกัน ถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [5] ดังนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดเล็ก โดยส่วนมากเป็นแบบเฟสเดียว ที่มีช่วงแรงดันระบบจำหน่ายไม่เกิน 35kV และขนาดกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 50-200 kVA หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้เหมาะสมกับพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของประชากรต่ำ สำหรับโครงข่ายที่สอดคล้องเชิงธุรกิจ มีต้นทุนต่ำ และมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเป็นระบบอัตโนมัติที่ดี



รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดเล็ก

2. หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดกลาง เป็นหม้อแปลงสามเฟส ที่ตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระบบระบายความร้อน ซึ่งมีน้ำมันเป็นฉนวนและตัวดูดซับความร้อน ช่วงแรงดันระบบจำหน่ายไม่เกิน 35kV และขนาดกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 200-2,000 kVA หม้อแปลงนี้เหมาะสมสำหรับการกระจายพลังงานในเขตเมืองหรือหมู่บ้านใหญ่ และตอบสนองบริเวณที่มีการเติบโตของการใช้พลังงาน



รูปที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดกลาง

3. หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดใหญ่ เป็นหม้อแปลงสามเฟสที่ขนาดใหญ่ มีระบบระบายความร้อนและคุณภาพการผลิตที่ดีขึ้น รวมทั้งมีระบบการเปลี่ยนโวลต์ (On-Load Tap Changer) เพื่อการปรับแต่งการจ่ายไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานในสถานะโวลต์ที่เปลี่ยนแปลง ช่วงแรงดันด้านปฐมภูมิไม่เกิน 72.5kV และขนาดกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2,000-20,000 kVA หม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งพลังงานแรงดันสูง และส่งต่อสู่ระบบอุตสาหกรรม ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และการเชื่อมโยงโครงข่ายไฟฟ้า



รูปที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดใหญ่

สำหรับต้นแบบระบบเฟืองสเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ผู้วิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์สำหรับการวัดในระบบหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งเหมาะสมกับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดเล็กและขนาดกลาง โดยวัดไฟฟ้าทางด้านแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ หรือแรงดันใช้งานที่ 230-240 V

## 2.2.2 ระบบระบายความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้า

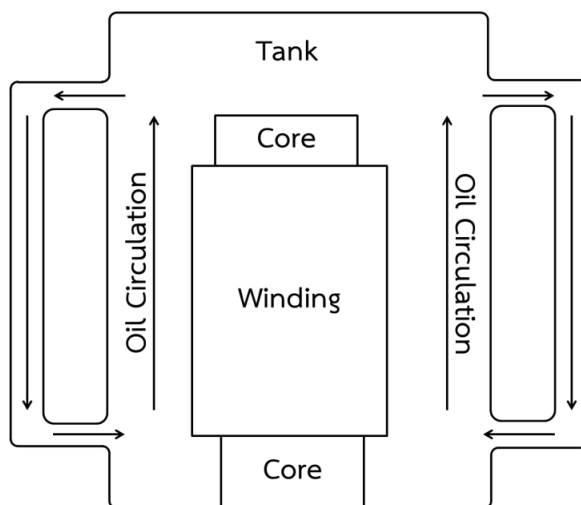
นอกจากส่วนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เป็นหน้าที่หลักของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนระบายความร้อนนับว่าเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่นำพาความร้อนออกจากระบบ เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างปกติ และมีเสถียรภาพที่ดี ซึ่งส่งผลถึงอายุการใช้งานด้วย การระบายความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 6 ประเภท [5] ดังนี้

1. ระบบ Oil Natural Air Natural (ONAN)
2. ระบบ Oil Natural Air Forced (ONAF)
3. ระบบ Oil Forced Air Forced (OFAF)
4. ระบบ Oil Forced Water Forced (OFWF)
5. ระบบ Oil Directed Water Forced (ODAF)
6. ระบบ Oil Directed Water Forced (ODWF)

ระบบระบายความร้อนแต่ละประเภทมีความสามารถในการนำพาความร้อนที่แตกต่างกัน เพื่อให้มีความเหมาะสมกับชนิดของหม้อแปลง ตามสภาพการใช้งาน ซึ่งประสิทธิภาพในการนำพาความร้อนจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึง ระบบ ONAN เนื่องจากเป็นระบบที่มีการใช้อย่างแพร่หลายและนิยมใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนการระบายความร้อนชนิดอื่น ๆ นั้นเหมาะสมกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งต้องการการดูแลบำรุงรักษาระบบระบายความร้อนอย่างใกล้ชิด

ระบบ Oil Natural Air Natural (ONAN) เป็นระบบที่อาศัยหลักการนำพาความร้อน โดยที่นำมันพาความร้อนจากแกนเหล็กและขดลวด โดยน้ำมันที่อุณหภูมิสูงจะไหลสูงด้านบนของถัง และไหลผ่านบริเวณครีบระบายความร้อน ความร้อนในน้ำมันจะถูกกระจายออกสู่บรรยากาศภายนอก และเมื่อน้ำมันมีอุณหภูมิต่ำจะไหลวนสู่บริเวณด้านล่างของถังโดยจะเข้าแทนที่น้ำมันร้อนที่ไหลสู่ด้านบน และระบบจะหมุนเวียนน้ำมันด้วยกระบวนการนี้เพื่อนำความร้อนออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4





รูปที่ 4 ระบบระบายความร้อนแบบ Oil Natural Air Natural (ONAN)

### 2.2.3 ประเภทของฉนวนน้ำมันที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดความร้อนขึ้นเมื่อใช้งาน หรือสภาพอากาศของสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำลง ระบบระบายความร้อนที่ดีจะช่วยยืดอายุ เพิ่มประสิทธิภาพ และลดโอกาสการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนั้นฉนวนน้ำมันจึงถูกนำมาใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี
2. เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ยาก ทำให้น้ำมันไม่เสื่อมสภาพ
3. ทนความร้อนสูงโดยไม่แตกตัวง่าย
4. ไม่เกิดก๊าซไวไฟที่เป็นเหตุทำให้หม้อแปลงระเบิด
5. มีอัตราการระเหยต่ำ ทำให้ไม่สิ้นเปลืองน้ำมัน และมีจุดไหลต่ำ
6. สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี
7. ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบขดลวดทองแดง

ฉนวนน้ำมันที่ถูกเลือกมาใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นน้ำมันแร่ (Mineral Oil) มีสองประเภท คือ

1. น้ำมันพาราฟิน (Paraffin based transformer oil) คือฉนวนน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่มีข้อดีที่อัตราการเกิดออกซิเดชันต่ำ แต่มีข้อเสียที่ซีล (Sludge) ไม่ละลายในน้ำมัน และมีจุดเทหรือจุดไหลที่สูง

2. น้ำมันเนฟทา (Naphtha based transformer oil) คือฉนวนน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่มีข้อดีที่ซีลละลายได้ดีในน้ำมัน และมีจุดเทหรือจุดไหลที่ต่ำ แต่มีข้อเสียที่มีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูง

ดังนั้นการเลือกใช้ฉนวนน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้าย่อมเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งเกี่ยวข้องกับเรื่องการบำรุงรักษา การระบายความร้อน และอายุการใช้งาน ผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าในประเทศไทยเลือกใช้ น้ำมันเนฟทา เนื่องจากซีลละลายได้ดีในน้ำมันทำให้ระบบระบายความร้อนทำงานได้ดีกว่า ทางผู้วิจัยจึงเลือกที่จะใส่ตัวรับรู้อุณหภูมิในอุปกรณ์เฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งอุณหภูมิของฉนวนน้ำมันและสภาพแวดล้อม จะเป็นตัวบ่งชี้ในเรื่องของอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งจะช่วยพัฒนาระบบการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย [6-9]

#### 2.2.4 อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นส่วนประกอบหลักหนึ่ง ที่สำคัญและมีจำนวนมาก จึงถือว่าเป็นสัดส่วนที่ใหญ่ของเงินลงทุนในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง ซึ่งอายุการใช้งานเฉลี่ยโดยทั่วไป มีค่าประมาณ 180,000 ชั่วโมง หรือ ประมาณ 20 ปี การเฝ้าสังเกตสภาพ การบำรุงรักษา และการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมกับพื้นที่และการเติบโตของความต้องการใช้ไฟฟ้า จะช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า และใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ามี่ดังนี้

1. กำลังไฟฟ้า เป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อความร้อนที่จะเกิดขึ้นในหม้อแปลง โดยความร้อนเกิดขึ้นเมื่อเริ่มกระบวนการแปลงพลังงานไฟฟ้า ปริมาณความร้อนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของโหลดในขณะนั้น ซึ่งโหลดมากจะเกิดความร้อนสูง ทั้งจากความต้านทานในขดลวดทองแดงและกระแสไหลวน (Eddy Current) ในแกนเหล็ก ความสูญเสียเหล่านี้ล้วนทำให้เกิดความร้อนทั้งสิ้น

หม้อแปลงไฟฟ้าถูกออกแบบมาเพื่อการทำงานในช่วงโหลด 40% ถึง 60% ของค่าระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถรักษาความน่าเชื่อถือของระบบถึงแม้เกิดสภาวะฉุกเฉิน นอกจากนี้การเติบโตของโหลด ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ ทำให้หม้อแปลงต้องทำงานหนักอยู่ตลอดเวลา ดังเป็นเหตุให้เกิดความร้อนสูงเป็นระยะเวลาต่อเนื่องและยาวนาน ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานเสียไปอย่างรวดเร็ว

การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าอย่างถูกต้องตามช่วงโหลดที่ออกแบบ และใช้ขนาดที่เหมาะสมกับโหลดในแต่ละพื้นที่ จะส่งผลที่ดีต่ออายุการใช้งาน และลดปัญหาความเสียหายรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้

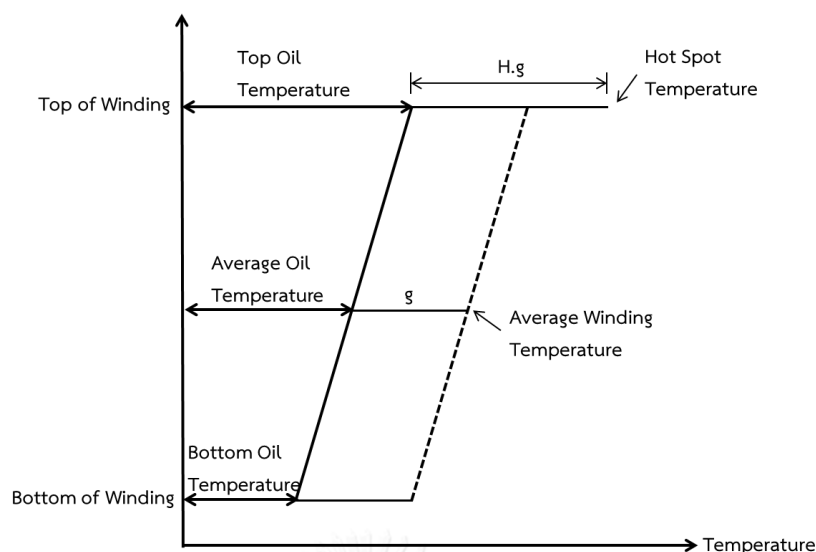
2. ความชื้น เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของฉนวนน้ำมัน โดยปกติหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายจะตั้งอยู่กลางแจ้ง และมีความเสี่ยงต่อฝนหรือความชื้นต่างๆ ที่จะเข้าสู่ถังหม้อแปลง เมื่อฉนวนน้ำมันได้รับความชื้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และด้วยการแตกตัวของโมเลกุลน้ำมันนี้จะเกิดเป็นน้ำมันขี้เถ้า ที่มีลักษณะเหมือนเมือกหรือโคลนที่ละลายอยู่ในฉนวนน้ำมัน ซึ่งจะเกาะตัวและเคลือบอยู่ที่ผิวของกระดาษเซลลูโลส ทำให้ความเป็นฉนวนของกระดาษลดลง และความสามารถในการนำพาความร้อนจากขดลวดสู่น้ำมันแฉ่งด้วย ส่วนน้ำมันก็จะมีคุณภาพต่ำลง ทั้งด้านความเป็นฉนวนและการนำพาความร้อน และถ้าขี้เถ้ามีปริมาณมากขึ้นย่อมส่งผลต่อระบบกระบวนการหมุนเวียนน้ำมัน ซึ่งอาจเกิดการอุดตันในระบบ และระบายความร้อนสู่ภายนอกได้แย่

สารดูดความชื้นในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือที่รู้จักกันในชื่อ ซิลิกาเจล (Silica Gel) จึงเป็นสิ่งที่ถูกนำมาใส่ในระบบเพื่อช่วยลดความชื้นให้น้อยลง และการบำรุงรักษาโดยการกรองน้ำมันและทำให้น้ำมันมีความบริสุทธิ์ ไร้สารเจือปน ก็จะเป็นสิ่งที่ยืดอายุการใช้งานของฉนวนน้ำมันและหม้อแปลงไฟฟ้าได้

3. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะปัจจัยทั้งสองข้อที่กล่าวมาข้างต้น ผลสุดท้ายจะทำให้เกิดความร้อน นอกจากนี้ความร้อนจากสภาพแวดล้อมก็ส่งผลร่วมอีกด้วย ซึ่งล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิทั้งสิ้น

งานวิจัยเกี่ยวกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบัน สามารถใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณและคาดการณ์ผลจากอุณหภูมิที่มีผลต่ออายุการใช้งาน โดยสามารถอธิบายลักษณะอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าได้จากแผนภาพความร้อน (Thermal Diagram) ซึ่งบริเวณส่วนล่างของถังจะมีอุณหภูมิต่ำสุด และมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆแบบเชิงเส้นจนถึงบริเวณส่วนบนของถัง ดังในรูปที่ 5 เส้นที่บแสดงถึงอุณหภูมิของฉนวนน้ำมัน และเส้นที่ประแสดงถึงอุณหภูมิของขดลวด ที่ค่า  $g$  เป็นค่าเกรเดียนต์ของการนำพาอุณหภูมิจากขดลวดสู่น้ำมัน และค่า  $H$  เป็นค่าตัวประกอบที่ใช้ในการคำนวณหาจุดที่ร้อนที่สุดในขดลวด (Hot Spot)

ผลจากอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิฉนวนน้ำมัน อุณหภูมิขดลวด รวมถึงจุดที่ร้อนที่สุด จึงเป็นส่วนที่มีผลต่อการเร่งอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าให้สั้นลง ดังที่ระบุใน มาตรฐานฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าของ IEEE [8] ถ้าเราสามารถจัดการกับอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ค่าตัวประกอบความเร่งอายุการใช้งาน (Aging Acceleration Factor) มีค่าเท่ากับ 1 และทุกๆ 7 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร่งเป็น 2 เท่าโดยประมาณ และถ้ามีการใช้งานกรณีฉุกเฉินที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ค่าความเร่งจะมากกว่าถึง 1723 เท่า



รูปที่ 5 คุณลักษณะเฉพาะของความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับการพิจารณาการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด จะทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวนน้ำมันด้วยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยปกติแล้วจะประเมินค่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของขดลวดที่เพิ่มขึ้นที่ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จะสามารถประมาณอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ตามที่ควาหวัง โดยความเสื่อมไม่มีอัตราเร่ง ตัวอย่างของโหลดที่มีผลต่ออายุการใช้งานฉนวนน้ำมันมี 4 ประเภท แสดงในรูปที่ 6 มีดังนี้

1. โหลดตามปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า คือการใช้งานโหลดภายใต้ขอบเขตของป้ายกำหนดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 110 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าได้ตามอายุการใช้งานปกติ
2. โหลดที่สูงกว่าป้ายกำหนดแบบวางแผน คือการวางแผนใช้งานโหลดที่สูงกว่าขอบเขตของป้ายกำหนดหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นปกติ ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานสั้นเพราะมีการใช้โหลดที่สูงเป็นระยะเวลานานอย่างต่อเนื่อง
3. โหลดฉุกเฉินระยะยาว คือการใช้งานโหลดที่สูงระยะยาวอันเนื่องมาจากเหตุฉุกเฉิน เช่น การเกิดไฟฟ้าดับ หรืออุปกรณ์อื่นในระบบเกิดการเสียหาย ซึ่งอาจจะยาวนานเป็นสัปดาห์กว่าจะแก้ไขเสร็จ จึงต้องนำมาประเมินเพื่อหาอายุการใช้งานที่เสียไป
4. โหลดฉุกเฉินระยะสั้น คือการใช้โหลดที่สูงเกินปกติเป็นอย่างมาก อาจเป็นการเกิดเหตุฉุกเฉิน หรือการเกิดเหตุขัดข้องซ้ำซ้อนถึงขั้นวิกฤติ ถึงแม้เป็นช่วงเวลาสั้นๆ แต่ก็ป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมอายุการใช้งานไปอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 6 ตัวอย่างโหลดโดยทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากปัจจัยทั้งสามส่วนจะเห็นได้ว่าอายุการใช้งาน เป็นผลมาจากการใช้งานและการดูแลรักษา แต่เทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการพัฒนาทำให้หม้อแปลงเป็นระบบปิด ความชื้นภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อยมาก ซึ่งปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อการเร่งอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า จึงเป็นค่าโหลดและอุณหภูมิ สองส่วนนี้จึงเป็นส่วนสำคัญที่จะประเมินอายุการใช้งานได้อย่างแม่นยำ รวมถึงการวางแผนบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพ ย่อมช่วยยืดอายุการใช้งานเพื่อประโยชน์สูงสุดในงบประมาณที่เหมาะสม

## 2.3 ความสำคัญและเป็นที่ต้องการพัฒนาของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

จุดประสงค์ของการพัฒนากริดที่มีอยู่เดิมไปสู่สมาร์ทกริด เพื่อเป็นการให้บริการที่น่าเชื่อถือ มีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายจึงเป็นศูนย์กลางสำคัญที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากผู้ผลิตสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นการพัฒนาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ ย่อมเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาสมาร์ทกริดอย่างแท้จริง [10]

การเพิ่มขีดความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ย่อมส่งผลต่อการพัฒนาสมาร์ทกริด โดยผู้วิจัยได้พิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงสร้างพื้นฐานการวัดขั้นสูง (AMI) งานวิจัยเกี่ยวกับระบบสมาร์ทกริด และงานวิจัยเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับสถานีย่อยไฟฟ้า จากงานวิจัยพบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Device : IED) ล้วนมีความสามารถในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์อื่นในโครงข่าย และมีความสามารถในการรับรู้ค่าต่างๆ ของอุปกรณ์หรือสภาพแวดล้อม

ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาความสามารถสำคัญที่เป็นที่ต้องการของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งประกอบไปด้วย ความสามารถต่างๆ ดังนี้

1. การสื่อสารของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญาณฉลาดในโครงข่าย รวมถึงศูนย์ข้อมูล (Data Center)
2. การทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ในโครงข่ายโดยอุปกรณ์สามารถรองรับมาตรฐานทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง
3. การวัดค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เป็นค่าที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ และประเมินการบำรุงรักษา
4. การจัดการฐานข้อมูล

การออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญาณฉลาด สำหรับการพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย จึงต้องเลือกอุปกรณ์ที่คุณสมบัติและความเหมาะสมกับการใช้งานส่วนประกอบและเทคโนโลยีต่างๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ถูกลำมาพิจารณา ดังนี้

### 2.3.1 คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว (Single-Board Computer)

คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว (Single-Board Computer) คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่สมบูรณ์บนบอร์ดเพียงบอร์ดเดียว ประกอบด้วย ไมโครโปรเซสเซอร์ หน่วยความจำ ช่องสัญญาณสื่อสาร และยังมีขนาดเล็กกระทัดรัด ด้วยความสามารถรวมทั้งคุณสมบัติของคอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว จึงมีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้กับระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) ทำให้สะดวกในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญาณฉลาด ในระบบที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนสูง และระบบการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ผ่านอินเทอร์เน็ต ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด IoT (Internet of Thing)

คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวมีหลายผู้ผลิต ซึ่งมีจุดประสงค์และลักษณะการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวที่มีอยู่ในท้องตลาด[11-16]

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติคอมพิวเตอร์เดี่ยว

Specification \ Board	Beaglebone Green	Beaglebone Black	Raspberry Pi 2 Model B	Raspberry Pi 3 Model B	Raspberry Pi Zero	INTEL Galileo Gen 2	Dragon Board 410C	CHIP	ODROID-C2
CPU Speed	1 GHz	1GHz	900 Mhz Quad core	1.2 GHz Quad core	1 GHz	400 MHz	1.2 GHz Quad core	1 GHz	2 GHz Quad core
Memory	512MB DDR3L	512MB DDR3L	1GB LPDDR2	1GB LPDDR2	512MB LPDDR2	256MB DDR3	1GB LPDDR3	512MB DDR3	2GB DDR3
Int. Storage	4GB eMMC	4GB eMMC	-	-	-	8MB NOR Flash	8GB eMMC	4GB	(Socket)
Ext. Storage	microSD	microSD	microSD	microSD	microSD	microSD	microSD	-	microSD
Networking	10/100Mbit ethernet	10/100Mbit ethernet	10/100Mbit ethernet	10/100Mbit ethernet	-	10/100Mbit ethernet	-	-	10/100/1000Mbit ethernet
Wireless	-	-	-	WiFi	-	-	WiFi	WiFi	-
Bluetooth	-	-	-	BLE	-	-	BLE 4.1	BLE	-
GPIO	65	65	26	26	26	20	12	80	40
Analog Input	7 ch 12bits	7 ch 12bits	-	-	-	6 ch 12bits	-	-	2 ch 10bits
Analog Output	8 PWM	8 PWM	-	-	-	6 PWM	-	1 PWM	2 PWM
UART/SPI/I2C	4/2/2	4/2/2	1/1/1	1/1/1	1/1/1	2/1/1	2/1/4	1/1/1	1/-/1
Video Output	-	Micro-HDMI	HDMI	HDMI	Mini-HDMI	-	HDMI	TRRS to RCA	HDMI
Video Input	-	-	CSI	CSI	-	-	CSI	CSI	-
USB Ports	1/1	1/1	4/1	4/1	1/1	1/1	2/1	1/1	4/1
Audio Output	-	HDMI	Audio/HDMI	Audio/HDMI	HDMI	-	HDMI	Audio	-
Document / Community	Open HW / Large	Open HW / Large	Closed / Very Large	Closed / Very Large	Closed / Very Large	Open HW / Medium	Open HW / Medium	Open HW / Small	Open HW / Small
Operating System	Linux/Window	Linux/Window	Linux/Window	Linux/Window	Linux	Linux	Linux/Window	Linux	Linux
Other	PRU	PRU	-	-	-	-	GPS	-	IR Receiver
Price	39\$	55\$	35\$	35\$	5\$	67\$	75\$	9\$	40\$
Release Date	9/2015	4/2013	2/2015	2/2016	11/2015	4/2014	4/2015	6/2016	3/2016

คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวถูกออกแบบเพื่อใช้ในจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน กลุ่มของบอร์ด Beaglebone มีพอร์ตเอนกประสงค์ (GPIO) รวมถึงพอร์ตสื่อสารอนุกรมจำนวนมากและหลากหลายประเภท เหมาะกับการเชื่อมต่อกับตัวรับรู้จำนวนมาก กลุ่มของบอร์ด Raspberry Pi มีจุดเด่นทางด้านมัลติมีเดีย มีพอร์ตอินพุตต่อกล้องรับภาพและเอาต์พุตของภาพกับเสียง และมีสถาปัตยกรรมของตัวคำนวณที่ประมวลผลสัญญาณภาพได้ดี ส่วนกลุ่มบอร์ดอื่นๆ นั้นจะมีความสามารถพิเศษเพิ่มเติมขึ้น เช่น หน่วยความจำขนาดใหญ่ จีพีเอส การสื่อสารไร้สาย บลูทูธ อินฟราเรด จำนวนพอร์ตต่างๆ และขนาดเล็กกระทัดรัด ซึ่งถูกออกแบบและผลิตขึ้นมาเพื่อรองรับความต้องการที่หลากหลายขึ้นตามลักษณะการใช้งาน

ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ต้องการคอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวที่มีความสามารถในการประมวลผลสูง ความสามารถในการสื่อสารทางอินเทอร์เน็ต หน่วยความจำที่เพียงพอ ส่วนแปลงค่าแอนะล็อกเป็นค่าดิจิทัล พอร์ตสื่อสารอนุกรม ระบบปฏิบัติการที่ช่วยในการบริหารจัดการระบบ และราคาสมเหตุสมผล อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายจะทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์ เฝ้าสังเกตค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อม รวมถึงเก็บในฐานข้อมูล สื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ตกับศูนย์ข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 จึงต้องเลือกคอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวที่มีคุณสมบัติเหมาะสม

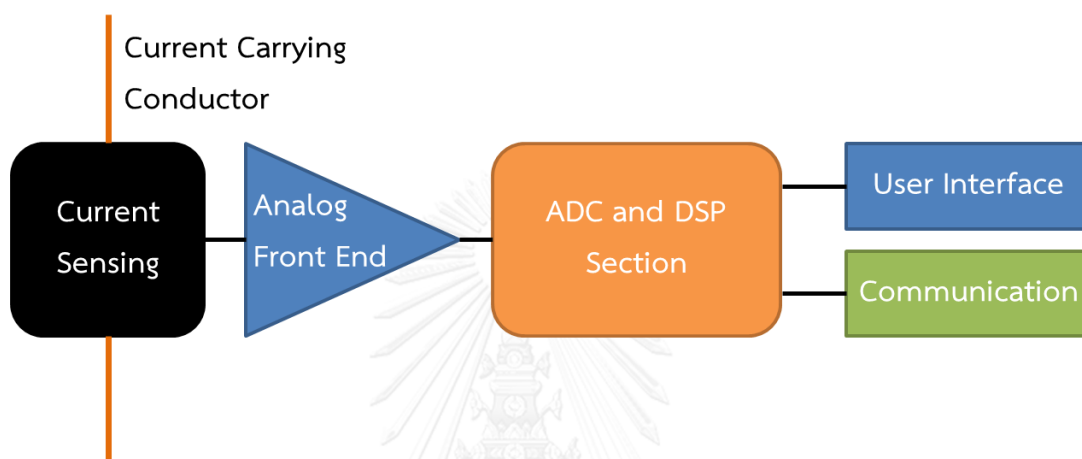
งานวิจัยนี้เลือกใช้ Beaglebone Green เพราะ มีความสามารถในการสื่อสารและพอร์ตต่างๆ อย่างครบครัน สอดคล้องกับตัวรับรู้ที่เลือกใช้ มีระบบปฏิบัติการที่เหมาะสมกับการทำเซิร์ฟเวอร์และฐานข้อมูล รวมทั้งจัดการระบบการทำงานต่างๆ ได้ดี ส่วนแสดงผลภาพได้ถูกตัดออกจากรุ่น Beaglebone Black ซึ่งไม่มีความจำเป็นในงานวิจัยนี้ ทำให้ราคาถูกลง แต่มีความสามารถที่ต้องการอื่นๆ คงเดิม คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวกลุ่ม Beaglebone มีการเปิดเผยข้อมูลทั้งฮาร์ดแวร์และซอร์ฟแวร์ของผลิตภัณฑ์ รวมถึงมีผู้ใช้งานอย่างกว้างขวาง ทำให้เกิดความสะดวกในการวิจัยและพัฒนา

แนวคิด Internet of Thing และอุปกรณ์อัจฉริยะ (Smart Device) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงกว้าง และยังมีแนวโน้มที่จะมีความซับซ้อนในการออกแบบสูงขึ้น เพราะความต้องการของลักษณะการใช้งานที่หลากหลาย คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวก็ได้ถูกพัฒนาเช่นเดียวกัน ซึ่งในอนาคตคาดว่าจะมีความสามารถการประมวลผล การสื่อสาร ที่มากขึ้น รวมทั้งขนาดเล็กลง ราคาถูกลง



### 2.3.2 ตัวรับรู้และตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้า

ตัวรับรู้ (Sensor) และตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้า คือ ตัวรับรู้ทำหน้าที่ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ที่เป็นค่าแอนาล็อก ส่งผ่านไปทีโอซีเพื่อคำนวณค่าทางไฟฟ้าต่างๆ อย่างเช่น ค่า RMS ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า รวมถึงคุณภาพของไฟฟ้า ต่อมาตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้าจะประมวลผลและส่งค่าข้อมูลเป็นดิจิทัลไปยัง ไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อนำไปแสดงผลหรือใช้ประโยชน์จากข้อมูลต่อไป ระบบการทำงานของตัวรับรู้และตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ระบบการทำงานของตัวรับรู้และตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้า

ตัวรับรู้กระแสไฟฟ้ามียุคหลายประเภท รวมถึงวิธีการวัดที่แตกต่างกัน ในปัจจุบันมีตัวต้านทานวัดกระแสและตัวรับรู้กระแสแบบฮอลล์ ที่สามารถวัดกระแสของระบบไฟฟ้ากระแสตรงและสลับ หรือขดลวดโรโกสก็และหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ที่สามารถวัดกระแสของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เพราะใช้หลักการเหนี่ยวนำ จึงต้องมีการเลือกประเภทให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่ต่างกันไป โดยคุณสมบัติของตัวรับรู้กระแสไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท มีดังนี้

1. ตัวต้านทานวัดกระแส (Shunt Resistor) เป็นตัวรับรู้กระแสไฟฟ้าที่นำตัวต้านทานไปต่ออนุกรมกับวงจรที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้า มีจุดเด่นที่ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับตัวรับรู้มีราคาไม่สูง และมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีตลอดช่วงการวัดที่กว้าง แต่ด้วยข้อจำกัดของตัวต้านทาน ทำให้การวัดกระแสกับวงจรที่มีค่าแรงดันต่ำต้องมีการขยายสัญญาณและการกรองสัญญาณที่ดี ทำให้เกิดความยุ่งยากมีค่าใช้จ่ายสูงขึ้นตาม

2. ตัวรับรู้กระแสแบบฮอลล์ (Hall Effect Current Sensor) เป็นตัวรับรู้กระแสไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูง สามารถวัดไฟฟ้ากระแสตรง ที่กระแสมีความซับซ้อน เหมาะสำหรับการวัดเพื่อวิเคราะห์หาฮาร์โมนิกที่ปนอยู่ จุดด้อยคือมีราคาสูงเมื่อเทียบกับตัวรับรู้ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยตัวรับรู้มี

ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และสูญเสียความแม่นยำไปเมื่อมีอายุการใช้งานนาน ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใส่วงจรเพื่อชดเชย แต่ก็เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายและความซับซ้อน

3. ขดลวดโรโกสกี (Rogowski Coil) เป็นตัวรับรู้กระแสไฟฟ้าที่เป็นขดลวดแบบวงเปิด ทำให้สะดวกในการติดตั้งโดยการนำไปคล้องตัวนำกระแสไฟฟ้า เนื่องจากไม่ได้ต่อแทรกไปในวงจรแบบตัวต้านทานวัดกระแสทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องการสูญเสียพลังงาน แต่มีข้อเสียที่อาจจะถูกรบกวนได้จากสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการป้องกันขดลวดให้เหมาะสม

4. หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer : CT) เป็นตัวรับรู้กระแสไฟฟ้าที่รวมหลายจุดเด่นของตัวรับรู้หลายชนิดเข้าด้วยกัน คือ ราคาที่ไม่สูงมาก การสูญเสียพลังงานต่ำ ติดตั้งได้ง่าย และยังคงเสถียรภาพที่ดี แม้มีอายุการใช้งานนานและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ส่วนโครงสร้างก็สามารถป้องกันการรบกวนได้จากสภาพแวดล้อมภายนอก เพราะมีแม่เหล็กที่เป็นวงปิด ต่างจากขดลวดโรโกสกี แต่ในขั้นตอนการออกแบบต้องให้ความสำคัญในการเลือกหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อให้กระแสที่วัดอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้น

ตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยส่วนมากจะทำหน้าที่แปลงค่าแอนาล็อกเป็นค่าดิจิทัล และประมวลผลสัญญาณ รวมทั้งมีการสื่อสารกับโฮสต์ไมโครโพรเซสเซอร์ (Host Microprocessor) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติกับเทคโนโลยีของไอซีที่ผู้ผลิตแต่ละรายได้ปล่อยออกสู่ท้องตลาด [17-19] ดังแสดงในตารางที่ 2 มีจุดเด่นและจุดด้อยดังนี้

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบไอซีสำหรับประมวลผลค่าทางไฟฟ้า

Specification \ Manufacturer	ST Microelectronic	Analog Device	Microchip	Maxim
Part	STPM34	ADE7878	MCP3911	71M651
Accuracy / Dynamic Range	0.1% / 5000:1	0.1% / 1000:1	0.1% / 10000:1	0.1% / 2000:1
ADC channels	4	6	2	6
Interfaces	UART/SPI with CRC	SPI/I2C	SPI	UART
Functional	ADC and DSP	ADC and DSP	ADC and DSP	ADC and DSP
Feature	Calibration Energy Metering Power Quality	Calibration Energy Metering Power Quality	Calibration	Calibration Energy Metering
Sensor	Current Transformer Shunt Resistor Rogowski Coil	Current Transformer Rogowski Coil	Current Transformer Shunt Resistor Rogowski Coil Hall Effect Sensor	Current Transformer Shunt Resistor Rogowski Coil
Supply current	5.9 mA	24.4 mA	4.4 mA	5.1 mA
Price	0.94\$	6.50\$	1.40\$	4.03\$

1. ไอซีของทุกผู้ผลิตมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 0.1% โดยที่ MCP3911 STPM34 71M651 และ ADE7878 ครอบคลุมช่วงการวัดที่กว้างและแคบลง ตามลำดับ

2. ADE7878 และ 71M651 มีช่องวัดสัญญาณถึง 6 ช่อง แต่เมื่อเทียบช่องสัญญาณต่อราคา STPM34 มีราคาต่ำสุด

4. STPM34 และ ADE7878 มีลักษณะเด่นในเพราะมีคุณสมบัติสำหรับมิเตอร์ไฟฟ้าอย่างครบถ้วน

5. ไอซีของทุกผู้ผลิตสามารถรองรับตัวรับรู้แบบหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า และขดลวดโรโกสกี จากการพิจารณาตัวรับรู้และตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้า ผู้วิจัยเลือกใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า เพราะเป็นตัวรับรู้ที่รวมจุดเด่นของตัวรับรู้หลายชนิด มีอายุการใช้งานยาวนานซึ่งสอดคล้องกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และต้องติดตั้งในสภาพแวดล้อมภายนอกซึ่งโครงสร้างนั้นทนทานกว่าชนิดอื่น ส่วนตัวคำนวณค่าทางไฟฟ้าเลือกใช้ STPM34 ของผู้ผลิต ST Microelectronic เพราะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย ครอบคลุมช่วงการวัดที่กว้าง และมีคุณสมบัติสำหรับมิเตอร์ไฟฟ้าอย่างครบครัน ด้วยราคาที่ไม่แพง

### 2.3.3 การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิในระบบอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิ ที่รับค่าอุณหภูมิเป็นอินพุต และให้ค่าเอาต์พุตเป็นค่าไฟฟ้า จากนั้นทำการประมวลผลค่าที่ได้ การวัดอุณหภูมิในหม้อแปลงไฟฟ้า ถือเป็นส่วนสำคัญที่แสดงสถานะภาพ อายุการใช้งาน และประเมินการบำรุงรักษาอย่างทันท่วงที ดังนั้นการตัดสินใจในการเลือกตัววัดอุณหภูมิที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ตัวรับรู้อุณหภูมิที่มีในท้องตลาด อาทิเช่น อาร์ทีดี (RTD) เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) และไอซีรับรู้อุณหภูมิ (Temperature Sensor IC) ได้ถูกนำมาพิจารณา และเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 3 มีจุดเด่นและจุดด้อยดังนี้

1. เทอร์โมคัปเปิ้ลมีย่านการวัดที่กว้างที่สุด ตัวรับรู้อื่นๆมีย่านการวัดแคบกว่า ไม่สามารถรองรับการวัดในบางช่วงอุณหภูมิ

2. อาร์ทีดี เป็นตัวรับรู้ที่มีความเที่ยงตรงสูงสุดที่ระดับ  $\pm 0.01$  °C ทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องสูง

3. ไอซีรับรู้อุณหภูมิ มีความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุด ส่วนอาร์ทีดี เทอร์โมคัปเปิ้ล เทอร์มิสเตอร์ มีความเป็นเชิงเส้นรองลงมาตามลำดับ

4. เทอร์มิสเตอร์มีความไวต่ออุณหภูมิ ทำให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดี
5. อาร์ทีดีและเทอร์โมคัปเปิ้ล มีอายุการใช้งานที่ยาวนานแต่ก็มีราคาสูง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบตัวรับรู้อุณหภูมิ

Type	RTD	Thermocouple	Thermistor	Temperature Sensor IC
Temp Range	-250 to +900 °C	-270 to +2315 °C	-100 to +500 °C	-55 to +200
Accuracy	±0.01 °C	±0.5 °C	±0.1 °C	±1 °C
Linearity	Good	Moderate	Poor	Best
Sensitivity	~2 mV/°C (0.00385 Ω/Ω/°C)	~0.05 mV/°C	~40 mV/°C (Several Ω/Ω/°C)	~10 mV/°C
Long-term Stability	High	High	Low	Medium
Response Time	1 to 10 Secs	< 1 Secs	1 to 5 Secs	4 to 60 Secs
Cost	High	Moderate to High	Low	Low

คุณสมบัติของตัวรับรู้อุณหภูมิที่ต้องการในต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย คือช่วงการวัดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมอยู่ในช่วง 10 °C – 45 °C ส่วนวัดอุณหภูมิของฉนวนน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ที่ 37 °C - 200 °C มีความคงทน ความเที่ยงตรง และความไวต่ออุณหภูมิ

ตัวรับรู้อุณหภูมิอาร์ทีดี จึงมีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้เพราะ ครอบคลุมย่านการวัด ความเที่ยงตรงสูง ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และคงทนสอดคล้องกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ถึงจะมีราคาสูงแต่ไม่เสื่อมคุณภาพในเวลาอันสั้น

#### 2.3.4 การสื่อสาร

การสื่อสารในระบบไฟฟ้ากำลังมีส่วนสำคัญในการช่วยพัฒนาระบบเฝ้าสังเกต ควบคุม และการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพสูงขึ้น ในทางกลับกันก็มีหลายปัจจัยเสี่ยงที่ต้องทำการควบคุม จึงได้มีการสร้างมาตรฐานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดี ลดความผิดพลาดและนำเทคโนโลยีใหม่ๆ ทางด้านการสื่อสารมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน

มาตรฐานสำหรับการสื่อสารในระบบไฟฟ้ากำลัง เหมาะสมที่จะมีคุณสมบัติดังนี้

1. ลดภาระในการติดตั้งและกำหนดค่าต่างๆ
2. มีความยืดหยุ่นและเพิ่มความสามารถตัวอุปกรณ์

3. การทำงานร่วมกันได้กับอุปกรณ์อื่นในระบบ

4. ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

มาตรฐานการสื่อสารหรือโพรโตคอลที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมีหลากหลาย เช่น Modbus DNP3 และ IEC61850 เป็นต้น มาตรฐานเหล่านี้เป็นที่นิยมใช้ในระบบอุตสาหกรรมและระบบไฟฟ้ากำลัง

มาตรฐาน IEC61850 เป็นโพรโตคอลการสื่อสารที่ทันสมัยที่สุด ของการสื่อสารในระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะความสามารถในการอ้างอิงชื่อเชิงวัตถุ การกำหนดลักษณะในการสื่อสารอย่างชัดเจนมีโครงสร้างเป็นระบบ [20] รวมถึงความสามารถที่โดดเด่นของมาตรฐาน IEC61850 เมื่อเทียบกับมาตรฐานอื่น มีข้อได้เปรียบดังนี้

1. สามารถสร้างโลจิคอลโหนด (Logical Node) ที่ลักษณะการใช้งานจำเพาะเจาะจงได้ และมีโลจิคอลโหนดมาตรฐานกว่า 100 ประเภท รวมถึงชื่อเชิงวัตถุและคุณลักษณะกว่า 2000 ข้อมูล
2. รูปแบบการขยายการใช้งานมีความสะดวกและง่ายกว่ามาตรฐานอื่น
3. การอ้างอิงชื่อแบบลำดับชั้น ซึ่งเข้าใจง่ายกว่าการอ้างอิงชื่อแบบดัชนีที่อยู่ (Indexed address)
4. เหมือนกับ DNP3 ที่สนับสนุนการอ้างอิงคุณลักษณะทางคุณภาพ และเวลา
5. สามารถตั้งค่าและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ ซึ่งมาตรฐานอื่นทำได้ไม่มากนัก
6. ผู้ใช้สามารถเรียกดูโครงสร้างทางข้อมูลได้ ซึ่ง DNP3 ไม่สามารถทำได้
7. มีความยืดหยุ่นในการเลือกรายงานข้อมูลได้หลายรูปแบบ
8. กำหนดค่าอุปกรณ์ตามรูปแบบภาษา XML ซึ่งเข้าใจง่ายและผิดพลาดน้อยกว่าการเป็นเอกสาร

แม้ว่ามาตรฐาน IEC61850 จะมีข้อดีเหนือกว่ามาตรฐานอื่นในแง่ของข้อมูล แต่ก็มีข้อเสียคือ ความสิ้นเปลืองของการส่งข้อมูลที่สูงมากกว่า (High Overhead Cost) รวมถึงความซับซ้อนที่มาก ทำให้เวลาในการพัฒนาสูงก่อนที่จะนำมาใช้งาน

งานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบการสื่อสารแบบ Server และ Client ผ่านทางอีเธอร์เน็ต รองรับมาตรฐาน IEC61850 โดยสามารถวัดค่าทางไฟฟ้าผ่านทางไอซี STPM34 วัดอุณหภูมิน้ำมันผ่านตัวรับรู้าร์ทีดี และจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูล MySQL

## 2.4 มาตรฐานไออีซี 61850 (IEC61850)

ระบบสาธารณูปโภคไฟฟ้ากำลัง ในปัจจุบันกำลังประสบปัญหาการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวลตลาดที่ถูกพัฒนาและผลิตมาจากบริษัทที่ต่างกัน ในระยะหลังของการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังจึงพยายามที่จะพัฒนามาตรฐานสากลที่ใช้ร่วมกันได้ เพื่อขจัดปัญหาทางด้าน การสื่อสาร และมีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้กันอยู่ [4, 21]

### 2.4.1 จุดประสงค์และประโยชน์ที่ได้รับกับการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC61850

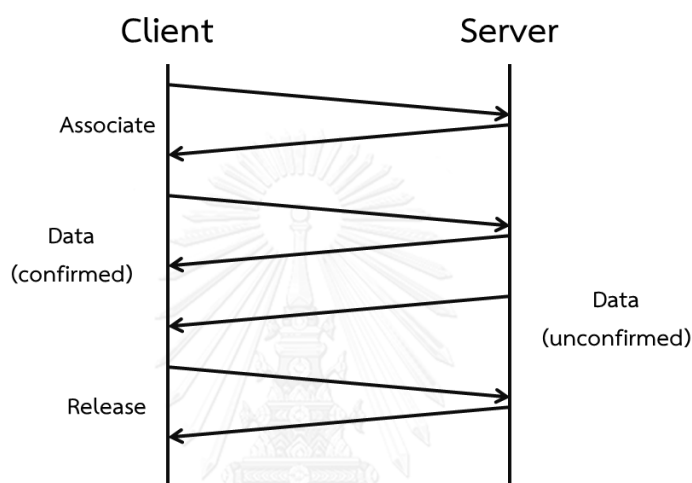
มาตรฐาน IEC61850 จึงเป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมในระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่โดย ประโยชน์ที่จะได้รับเมื่อประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC61850 กับระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

1. การทำงานร่วมกันและการบูรณาการระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถที่จะแลกเปลี่ยนข้อมูล และโต้ตอบกับระหว่างอุปกรณ์อื่นในโครงข่ายระบบไฟฟ้ากำลัง และมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกับ การจัดการกับข้อมูลปริมาณมาก
2. มาตรฐานของชื่อและรูปแบบของข้อมูลแบบ Object-Oriented เป็นที่เข้าใจได้ง่าย สามารถอธิบายโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวลตลาดได้อย่างดี ในบริบทของระบบไฟฟ้า กำลัง
3. ครอบคลุมและสนับสนุนฟังก์ชันการทำงานของสถานีไฟฟ้าย่อย และระบบไฟฟ้ากำลัง
4. ใช้อีเธอร์เน็ตและโพรโตคอล TCP/IP ในการสื่อสาร ทำให้มีความรวดเร็วและสะดวก เพราะเป็นโพรโตคอลมาตรฐานที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย
5. ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง การเดินสายสำหรับการสื่อสาร และการบำรุงรักษา

## 2.4.2 รูปแบบการสื่อสารของมาตรฐานไออีซี 61850

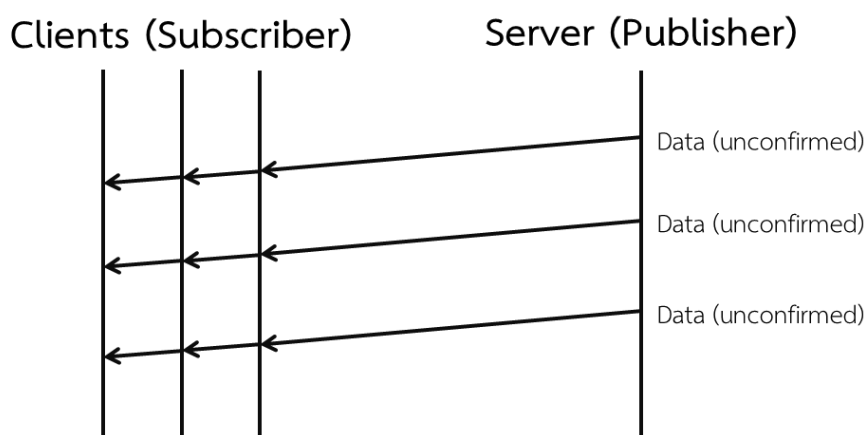
รูปแบบการสื่อสารของมาตรฐาน IEC61850 เป็นการสื่อสารแบบ Server และ Client มีด้วยกันสองประเภท [22] ดังนี้

1. Two-Party-Application-Association (TPAA) เป็นการสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบสองทาง ทำให้มีความน่าเชื่อถือและสามารถควบคุมการสื่อสารระหว่าง Server และ Client ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 หลักการทำงานของ Two-Party-Application-Association (TPAA)

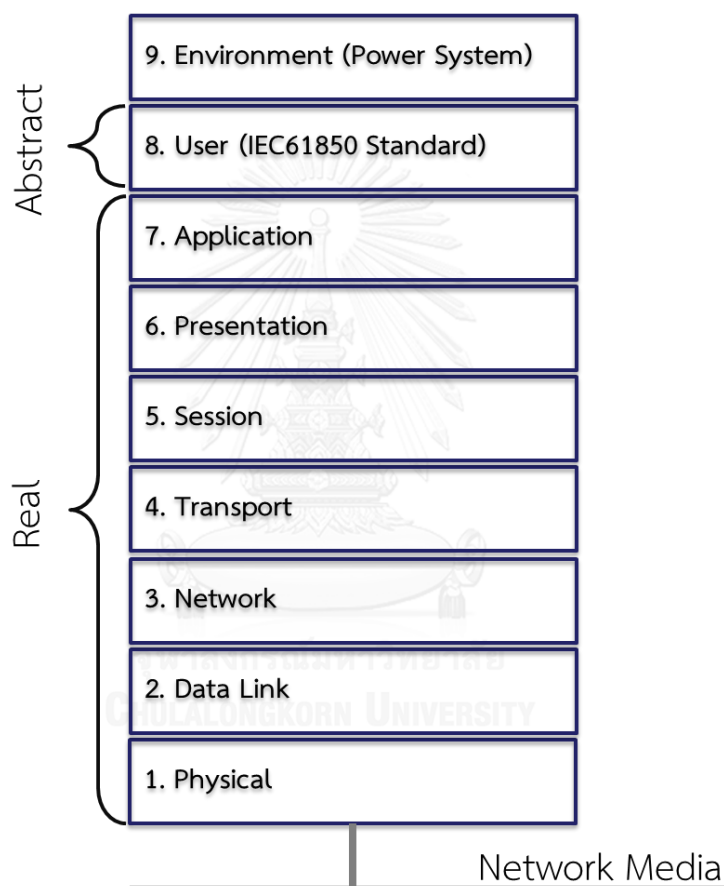
2. Multicast-Application-Association (MCAA) เป็นการสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบทางเดียว จากผู้กระจายสาร (Publisher) แหล่งเดียว สู่ผู้รับสาร (Subscriber) หลายแหล่ง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 หลักการทำงานของ Multicast-Application-Association (MCAA)

### 2.4.3 ชั้นสื่อสารและรูปแบบข้อมูลของมาตรฐานไออีซี 61850

มาตรฐาน IEC61850 มีชั้นสื่อสารชั้นที่ 1 ถึง 7 เป็นชั้นสื่อสารจริง (Real Communication Layer) ตามรูปแบบโอเอสไอ (OSI model) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้โพรโตคอลแบบ Manufacturing Message Specification (MMS) ใช้ร่วมกับมาตรฐาน IEC61850 ในชั้นที่ 8 ซึ่งเป็นชั้นนามธรรม (Abstract Layer) ที่มีมาตรฐานของชื่อและรูปแบบของข้อมูลแบบ Object-Oriented สอดคล้องกับระบบไฟฟ้ากำลังในส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์จริง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ชั้นของการสื่อสารบนมาตรฐาน IEC61850

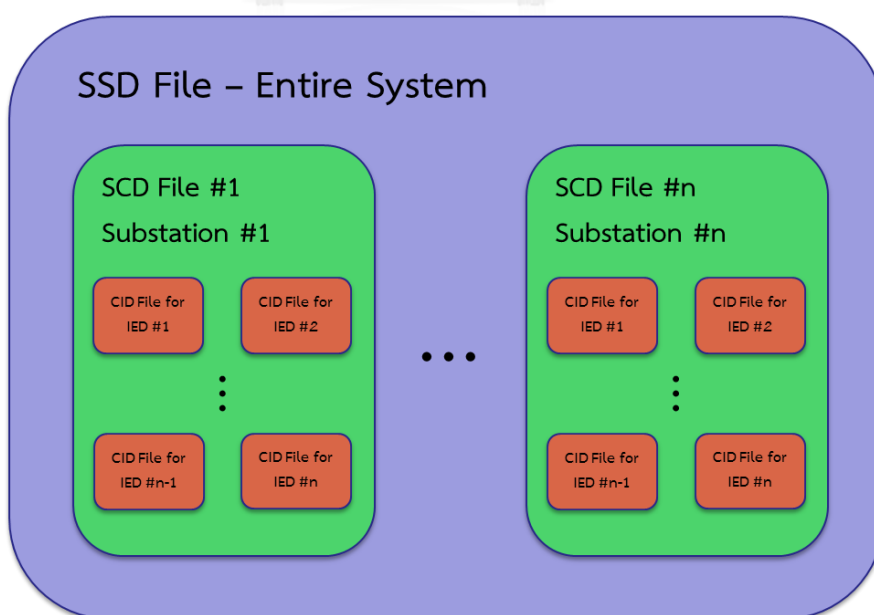


#### 2.4.4 ไฟล์ Substation Configuration Language (SCL file)

การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังบนมาตรฐาน IEC61850 นั้นใช้ ไฟล์ Substation Configuration Language (SCL file) เป็นสิ่งที่อธิบายส่วนประกอบและโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ภาษา XML (EXtensible Markup Language) ด้วยโครงสร้างของภาษาที่มีความคล้ายคลึงกับระบบการตั้งชื่อของมาตรฐานนี้ และสามารถใช้ร่วมกันได้กับระบบปฏิบัติการที่ต่างกััน

ไฟล์ SCL สามารถใช้งานได้หลายรูปแบบในระบบไฟฟ้ากำลังขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการออกแบบ ซึ่งมีประเภทของไฟล์ดังนี้

1. ไฟล์ System Specification Description (SSD file) คือไฟล์ที่อธิบายส่วนประกอบทั้งหมดของระบบไฟฟ้า
2. ไฟล์ Substation Configuration Description (SCD file) คือไฟล์ที่อธิบายโครงสร้างของสถานีไฟฟ้าย่อย
3. ไฟล์ IED Capability Description (ICD file) คือไฟล์ที่อธิบายโครงสร้าง รวมทั้งความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด
4. ไฟล์ Configured IED Description (CID file) คือไฟล์ที่อธิบายการกำหนดค่าหรือส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดที่ใช้ในระบบ ซึ่งเป็นเซทย่อยของ ICD ไฟล์

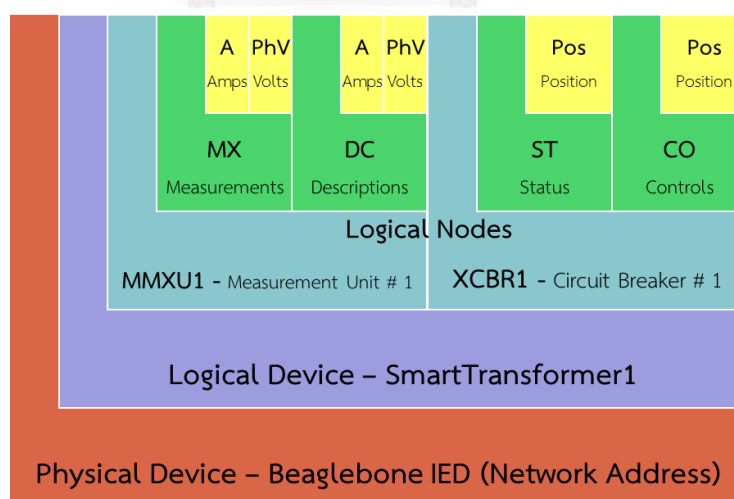


รูปที่ 11 ไฟล์ SCL ประเภทต่างๆ ที่ทำหน้าที่อธิบายส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง

#### 2.4.5 การอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented ของมาตรฐานไออีซี 61850

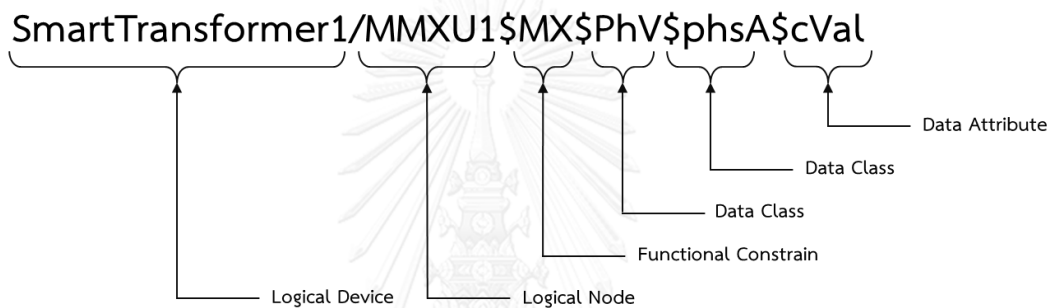
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กหลายส่วนในระบบไฟฟ้ากำลังมีส่วนประกอบและค่าพารามิเตอร์มากมาย ผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC61850 จะช่วยให้เราเข้าใจโครงสร้าง การทำงาน และส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังได้ง่ายขึ้นและชัดเจน รวมทั้งสามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็วถูกต้อง ส่วนนี้คือชั้นสื่อสารชั้นที่ 8 ที่เป็นชั้นนามธรรมที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยการอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented [23] ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยมีลักษณะดังนี้

1. ส่วน Physical Device เป็นส่วนของเน็ตเวิร์คแอดเดรส (Network Address) เชื่อมต่อกับชั้นสื่อสารจริง (ส่วนสีแดง)
2. ส่วน Logical Device เป็นส่วนที่แสดงถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นชั้นที่รวบรวมอุปกรณ์ส่วนต่างๆเอาไว้ (ส่วนสีม่วง)
3. ส่วน Logical Node เป็นส่วนที่แสดงถึงหน่วยอุปกรณ์ ซึ่งอาจจะเป็นอุปกรณ์การวัด (MMXU) เซอร์กิตเบรกเกอร์ (XCBR) และอุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลังอื่นๆ (ส่วนสีฟ้า)
4. ส่วน Functional Constrain เป็นส่วนซึ่งแสดงคุณสมบัติการทำงานของฟังก์ชัน (ส่วนสีเขียว)
5. ส่วน Data Class เป็นส่วนที่แสดงลักษณะของข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ โดยสามารถย่อยลงไปเป็น ส่วน Data Attribute ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บข้อมูล (ส่วนสีเหลือง)

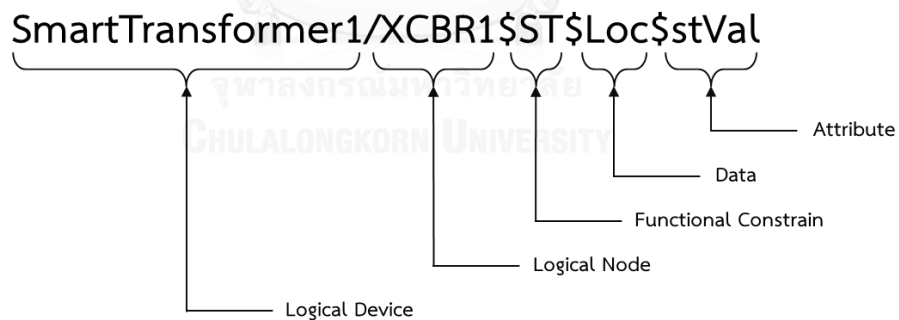


รูปที่ 12 ลักษณะการอ้างอิงชื่อของมาตรฐานไออีซี 61850

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวจีนจะประกอบด้วยไฟล์ ICD ที่ถูกออกแบบให้มีความครอบคลุมฮาร์ดแวร์ในตัวอุปกรณ์ รวมทั้งสามารถควบคุม หรือตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ได้อย่างมีระบบ โดยมีโครงสร้างเป็นลำดับชั้น และมีลักษณะภาษาในการอ้างอิงแบบ Object-Oriented ที่สอดคล้องกับระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การเรียกใช้อุปกรณ์ SmartTransformer1 ในส่วนที่เป็นอุปกรณ์การวัด (MMXU) และเลือกใช้ส่วนของฟังก์ชันการวัด (MX) โดยวัดค่า แรงดันไฟฟ้าของเฟสเอเทียบกับกราวด์ (PhV – Voltage Phase to Ground ,phsA – Phase A ,cVal – Complex Value) หรือ การตรวจสอบสถานะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ว่าถูกควบคุมโดยตัวอุปกรณ์เองหรือควบคุมระยะไกล (XCBR – Circuit Breaker, ST – Status, Loc - Local Control, stVal – Status Value) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14



รูปที่ 13 คำสั่งการเรียกใช้อุปกรณ์การวัด



รูปที่ 14 คำสั่งการเรียกใช้อุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์

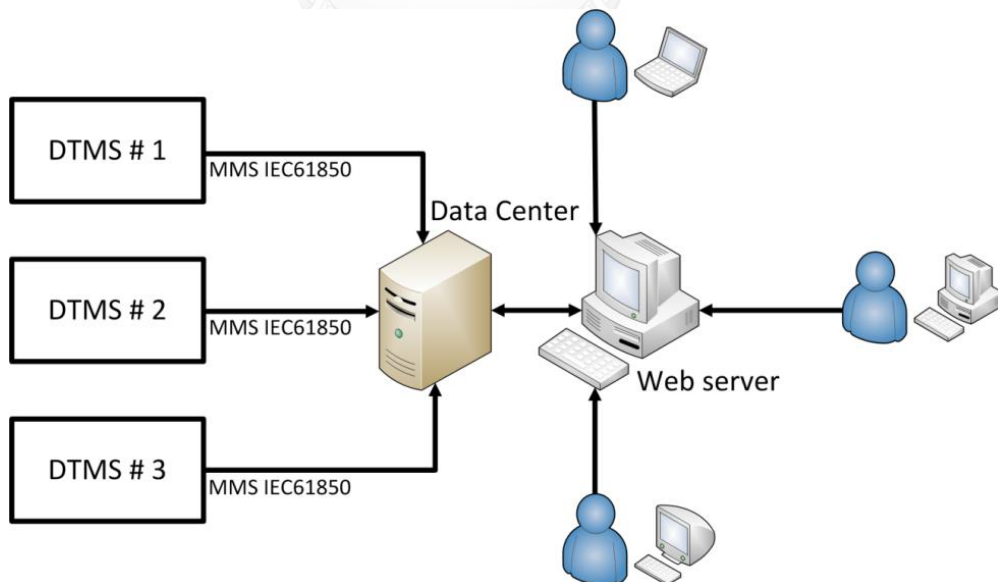
### บทที่ 3

#### การออกแบบโครงข่ายของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและฮาร์ดแวร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEC61850 และฮาร์ดแวร์ที่เลือกใช้ รวมถึงโครงข่ายการสื่อสารระหว่างตัวต้นแบบกับศูนย์ข้อมูลที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 3.1 การออกแบบระบบเครือข่าย

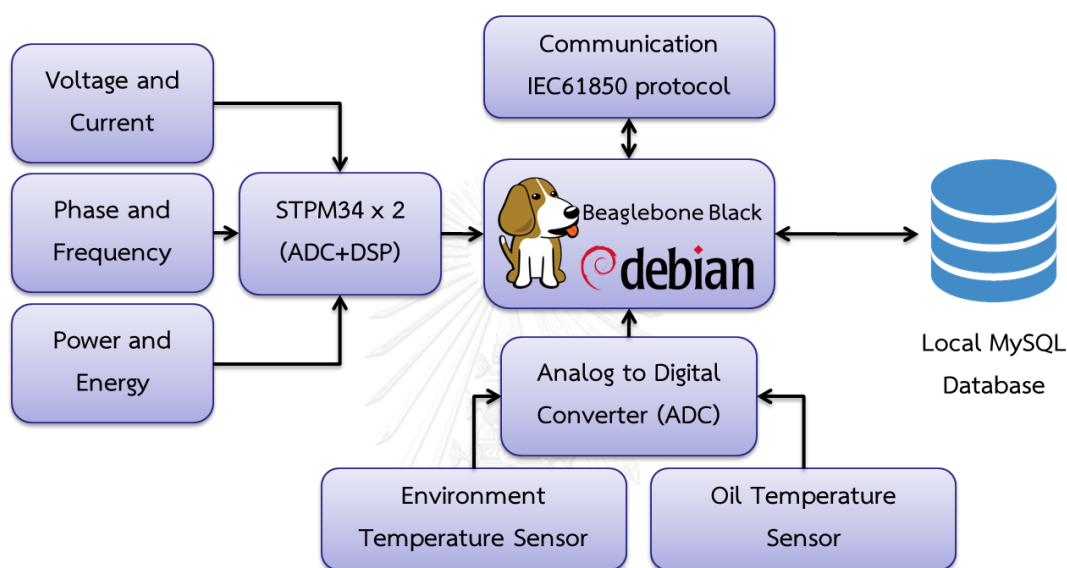
ความสามารถในการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้การบริหารจัดการระบบพลังงานได้ดีขึ้น สามารถควบคุมอุปกรณ์ เข้าถึงข้อมูล ส่งการแจ้งเตือนและรายงานสู่ศูนย์ข้อมูลได้ การสร้างความปลอดภัยของการสื่อสารในเครือข่าย (Cybersecurity) จึงเป็นส่วนสำคัญ ผู้วิจัยจึงพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีความสามารถในการตรวจสอบรหัสผ่าน เพื่อที่จะจำกัดการเข้าถึงข้อมูลรวมถึงการปรับแต่งและควบคุมอุปกรณ์ ส่วนด้านศูนย์ข้อมูลเครือข่ายถูกออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเฝ้าสังเกตข้อมูลสถานะทางเว็บไซต์แต่ไม่สามารถเข้าถึงตัวอุปกรณ์ได้ การแบ่งแยกระหว่างโครงข่ายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก และส่วนผู้ใช้งานเว็บไซต์ [24] ดังแสดงในรูปที่ 15 เป็นผลให้อุปกรณ์มีความปลอดภัย รักษาข้อมูลได้ดีและระบบมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น



รูปที่ 15 เครือข่ายต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

### 3.2 โครงสร้างต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (DTMS Structure)

งานวิจัยนี้เลือกใช้ Beaglebone Green ที่มีระบบปฏิบัติการเดเบียนลินุกซ์เป็น host microprocessor ของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยแบ่งโครงสร้างโปรแกรมและฟังก์ชันการทำงานออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการวัด ระบบฐานข้อมูล ส่วนเซิร์ฟเวอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดตามมาตรฐาน IEC61850 และส่วนการอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented [24] ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 16 การออกแบบระบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอัจฉริยะ

1. ด้านการวัด Beaglebone Green ติดต่อกับ STPM34 สองชุดผ่านพอร์ตการสื่อสาร UART เพื่อทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางด้านไฟฟ้าแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Line to Neutral ทำให้สามารถรองรับหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแบบสามเฟส สี่สาย ซึ่งครอบคลุมการวัดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสคู่ (Dual phase) หรือเฟสเดียว (Single phase) ส่วนการวัดค่าอุณหภูมิน้ำมันและสภาพแวดล้อม ใช้ส่วนการแปลงค่าแอนาล็อกเป็นดิจิทัลบนบอร์ด Beaglebone Green ในการวัดจากตัวรับรู้ PT100 ร่วมกับตัวต้านทานที่มีความแม่นยำสูง และต่อวงจร Wheatstone Bridge เพื่อให้ได้ค่าความไวในการวัด (Sensitivity) ที่ดี การทำงานของระบบการวัดจะเริ่มต้นจากการวัดค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และใช้การอ้างอิงเวลาจาก NTP เพื่อใช้เป็น Time Stamp

2. ด้านระบบฐานข้อมูล ซอร์ฟแวร์ mySQL ถูกนำมาใช้ในระบบบริหารจัดการฐานข้อมูล โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลที่ได้สร้างไว้ภายในหน่วยความจำของ Beaglebone Green ซึ่งตารางฐานข้อมูลที่สร้าง มีความสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่วัด ทำให้สามารถเก็บข้อมูลประวัติของหม้อแปลงเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้

3. ด้านเซิร์ฟเวอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดตามมาตรฐาน IEC61850 ผู้วิจัยเลือกการสื่อสารแบบ Two-Party-Application-Association (TPAA) ผ่านพอร์ตการสื่อสารอีเธอร์เน็ต ซึ่งตัวอุปกรณ์จะเป็นเซิร์ฟเวอร์ที่พร้อมตอบสนองการเชื่อมต่อจากศูนย์ข้อมูล รวมทั้งมีการตรวจสอบรหัสผ่านเพื่อเพิ่มความปลอดภัย ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ได้

4. ด้านการอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented ตามมาตรฐาน IEC61850 ผู้วิจัยออกแบบไฟล์ ICD และเลือกใช้ Logical node ที่มีความเหมาะสมกับความสามารถที่ออกแบบไว้ของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย



### 3.3 ฮาร์ดแวร์

ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ถูกออกแบบให้มีความสามารถในการสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ต การทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆในโครงข่ายด้วยมาตรฐาน IEC61850 รวมทั้งความสามารถในการวัดค่าทางไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย จึงเลือกใช้ฮาร์ดแวร์ต่างๆ ในการวิจัยและทำอุปกรณ์ต้นแบบดังนี้

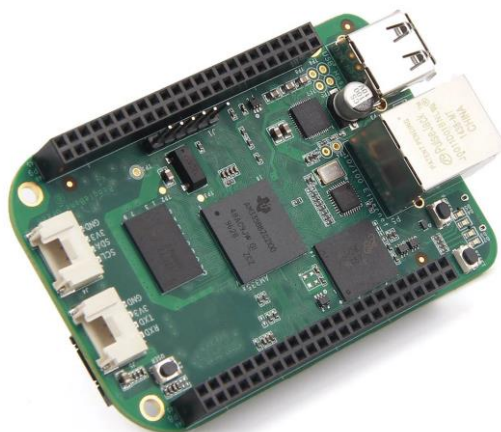
#### 3.3.1 คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว Beaglebone Green

คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยวในท้องตลาดที่มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1 จากการพิจารณาพบว่า Beaglebone Green ความเหมาะสมกับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว Beaglebone Green สามารถพัฒนาบนระบบปฏิบัติการฝังตัวลินุกซ์ (Embedded Linux Development Board) มีขนาดเล็กเทียบเท่ากับบัตรเครดิตเอ็ม มีความเร็วของการประมวลผลที่สูง และมีราคาที่เหมาะสม [25] โดยมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

1. คุณสมบัติด้านฮาร์ดแวร์ของ Beaglebone Green
  - โปรเซสเซอร์ Sitara AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8
  - หน่วยความจำ DDR3 RAM ขนาด 512MB
  - หน่วยความจำ eMMC ชนิดแฟลชบนตัวบอร์ด ขนาด 4GB
  - ช่องสำหรับใส่หน่วยความจำภายนอก Micro SD card
  - พอร์ตเอนกประสงค์ (GPIO) จำนวน 65 พอร์ต
  - หน่วยเร่งการประมวลผลเลขทศนิยม NEON
  - หน่วยควบคุมชนิดเรียลไทม์ Programmable Real-Time Unit (PRU) 2 หน่วย
  - แอนาล็อกอินพุต ADC แบบ 12 บิต จำนวน 7 ช่องสัญญาณ
  - แอนาล็อกเอาต์พุต PWM จำนวน 8 ช่องสัญญาณ

2. คุณสมบัติด้านการเชื่อมต่อของ Beaglebone Green
  - USB Client สำหรับการสื่อสารและจ่ายไฟให้กับบอร์ด 1 พอร์ต
  - USB Host 1 พอร์ต
  - อีเธอร์เน็ต 1 พอร์ต
  - พอร์ตสื่อสารอนุกรมแบบ UART SPI และ I2C จำนวน 4 ช่อง 2 ช่อง และ 2 ช่องตามลำดับ
  - พิน เฮดเดอร์ สำหรับการเชื่อมต่อกับตัวโปรเซสเซอร์แบบ 46 ช่อง 2 ชุด
3. ระบบปฏิบัติการที่รองรับ มีหลายประเภทให้เลือกใช้ตามวัตถุประสงค์ เช่น ลินุกซ์ (Linux) แอนดรอยด์ (Android) และวินโดวส์ (Windows) เป็นต้น



รูปที่ 17 Beaglebone Green

ผู้วิจัยเลือกใช้บอร์ด Beaglebone Green ในการพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย อันเนื่องมาจากความสามารถในการประมวลผลสูง มีหน่วยความจำบนตัวบอร์ดรองรับการสื่อสารหลายประเภท และมีส่วนแปลงค่าแอนาล็อกเป็นค่าดิจิทัล ส่วนระบบปฏิบัติการเลือกใช้ ลินุกซ์ เดเบียน (Linux Debian) เพราะเป็นระบบปฏิบัติการที่มีคุณภาพที่ดี เสถียรภาพสูง สามารถบริหารจัดการระบบได้ดี และมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

คุณสมบัติด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เป็นผลให้ Beaglebone Green มีความเหมาะสมที่ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นเซิร์ฟเวอร์ จัดการเหตุการณ์ทำงานต่างๆ เชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล รวมทั้งไฟล์ต่างๆของระบบ และความเร็วในการประมวลผลที่สูง จึงสามารถประมวลผลได้หลายงานในเวลาเดียวกัน (Multitasking)



### 3.3.2 ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34

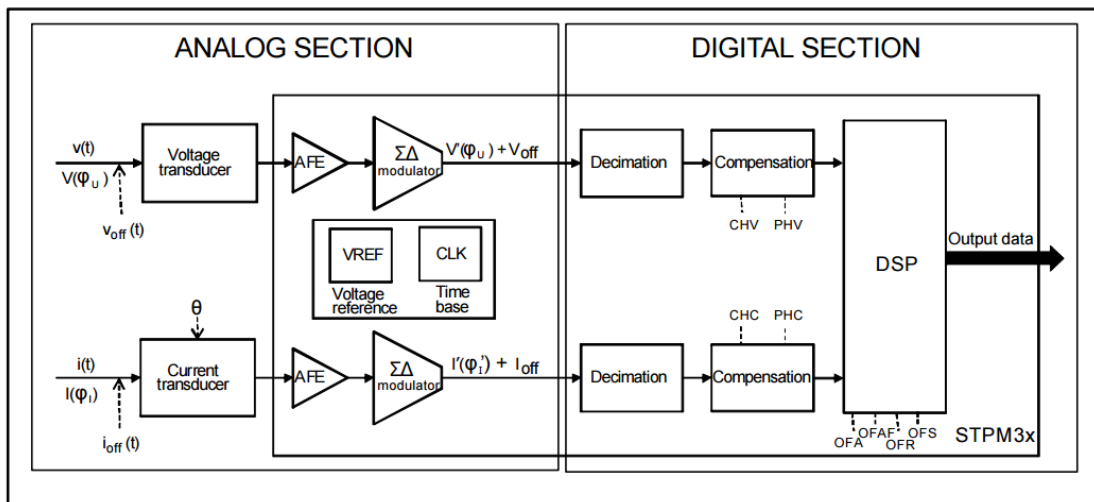
STPM34 [19] เป็นไอซีสัญญาณผสม (Mixed Signal IC) ทำหน้าที่แปลงค่าแอนาล็อกเป็นค่าดิจิทัลและประมวลผลสัญญาณ มีความแม่นยำในการวัดค่าทางไฟฟ้า สามารถกำหนดโครงสร้างของระบบ (System Configuration) ค่าอ้างอิง ค่าการสอบเทียบตัววัด และสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์อื่นๆ โดยมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

- วัดค่า RMS ของแรงดันและกระแส ค่าพลังงานไฟฟ้าจริง ค่าพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ และค่าพลังงานไฟฟ้าปรากฏ
- สัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่แสดงปริมาณการใช้พลังงาน
- การวัดกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มีความแม่นยำการวัดในระดับ 0.1%
- สามารถสื่อสารผ่านทางพอร์ต SPI และ UART โดยมีการตรวจสอบแบบซีอาร์ซี
- สะดวกและรวดเร็วในการสอบเทียบแบบดิจิทัล โดยใช้จุดสอบเทียบเพียงหนึ่งจุด
- สามารถเลือกส่วนขยายสัญญาณที่เหมาะสมกับกระแสที่ต้องการวัด
- ช่องสัญญาณแปลงค่าแอนาล็อกเป็นค่าดิจิทัลแบบ 24 บิต เดลต้าซิกมา จำนวน 4 ช่อง
- รองรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 50 - 60 เฮิรท์ซ์ ตามมาตรฐาน EN 50470-x IEC 62053-2x และ ANSI12.2x
- สามารถใช้ร่วมกับวงจรถูกกำเนิดความถี่แบบ Crystal หรือวงจรถูกกำเนิดความถี่ภายนอก
- วงจรอ้างอิงแรงดันที่เที่ยงตรงและสามารถปรับค่าได้

ระบบการทำงานภายในไอซีวัดพลังงาน STPM34 จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ดังแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนแอนาล็อกประกอบด้วย ส่วนอ้างอิงแรงดัน ส่วนอ้างอิงเวลา ตัวแปลงค่าแอนาล็อกเป็นดิจิทัลแบบเดลต้าซิกมา และตัวขยายสำหรับการวัดกระแส ซึ่งส่วนแอนาล็อกนี้จะมีตัวรับรู้แรงดันและกระแสในการวัดค่าทางไฟฟ้า จากนั้นมีการขยายและปรับปรุงสัญญาณ และทำการแปลงค่าเป็นกระแสข้อมูลไบนารี (Binary Stream) โดยอ้างอิงแรงดันกับเวลาภายใน จากนั้นส่งสู่ส่วนดิจิทัล

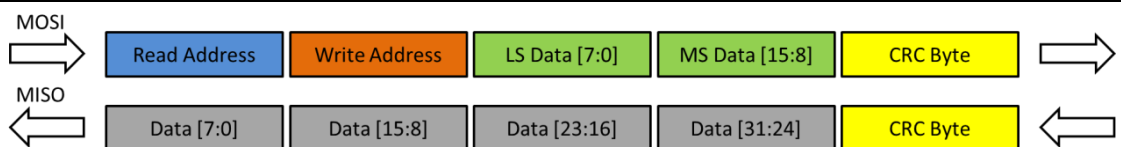
2. ส่วนดิจิทัลประกอบด้วย เดซิเมชันและตัวกรองดิจิทัล (Decimation and Digital filter) ส่วนชดเชย (Compensation) ส่วนการสอบเทียบ และส่วนประมวลผลสัญญาณ ซึ่งส่วนดิจิทัลนี้จะรับกระแสข้อมูลไบนารีจากส่วนแอนะล็อก ทำการกรองข้อมูลและแปลงข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัล และนำสัญญาณไปประมวลผลด้านดิจิทัลเพื่อทำให้ข้อมูลพร้อมสำหรับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 18 ระบบการทำงานภายในไอซีวัดพลังงาน STPM34

ระบบการสื่อสารของไอซีวัดพลังงาน STPM34 เป็นการสื่อสารอนุกรม มีสองแบบคือ แบบ UART และ SPI โดยมีโปรโตคอลการสื่อสารเฉพาะตัว แต่ละเซสชันจะประกอบด้วย 5 ไบต์ เป็นแบบสื่อสารสองทางเต็มอัตรา (Full Duplex Communication) โดยมีรูปแบบดังตารางที่ 4 และรูปที่ 19

Byte	Master-side transmitted data	Slave-side transmitted data
1	ADDRESS for 32-bit register to be read	Previously requested data byte LSB
2	ADDRESS for 16-bit register to be written	Previously requested data byte 2 out of 4
3	DATA for 16-bit register to be written, LSB	Previously requested data byte 3 out of 4
4	DATA for 16-bit register to be written, MSB	Previously requested data byte MSB
5	Master CRC verification packet	Slave CRC verification packet

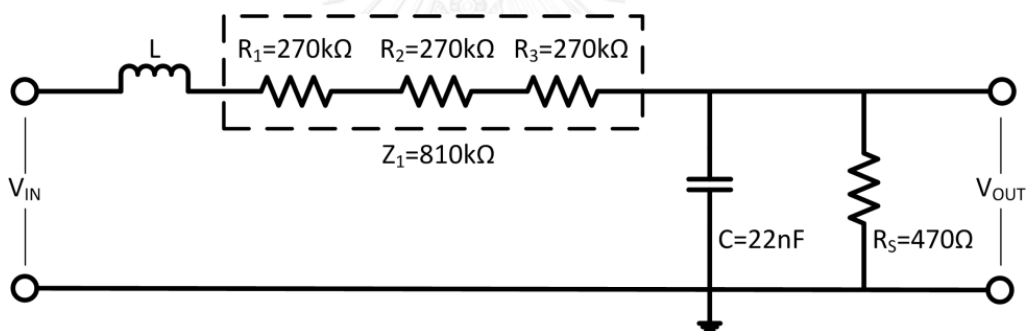


รูปที่ 19 โปรโตคอลการสื่อสารของ STPM34

จากตารางและรูปภาพข้างต้น ข้อมูลที่ส่งแบบ Master Output Slave Input (MOSI) ซึ่ง Master จะส่งข้อมูลรีจิสเตอร์เก็บตำแหน่ง (Address Register) ที่ต้องการจะอ่านและเขียนต่อด้วย ข้อมูลที่จะเขียน ส่วน Master Input Slave Output (MISO) ซึ่ง Slave จะส่งข้อมูลที่ Master ร้องขอจากเซสชันก่อนหน้านั้น โดยทั้งสองกระแสข้อมูลจะส่งข้อมูลไบนารีสุดท้ายเป็นซีอาร์ซีโคด (Cyclic Redundancy Check : CRC) เพื่อเป็นส่วนตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของข้อมูล โดยทั้งสองกระแสข้อมูลเกิดขึ้นในหนึ่งเซสชันการสื่อสาร

### การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าได้ถูกออกแบบให้ใช้ความต้านทานรวม  $Z_1$  มีค่า 810 k $\Omega$  ต่อขนานกับตัวต้านทาน  $R_5$  ที่มีค่า 470  $\Omega$  เพื่อเป็นการลดระดับแรงดันไฟฟ้าตามสมการ ( 2 )  $Z_1$  ถูกประกอบด้วยตัวต้านทาน  $R_1$   $R_2$  และ  $R_3$  ที่แต่ละตัวต้านทานมีค่า 270 k $\Omega$  ต่ออนุกรมกัน เพื่อเป็นการป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเกินที่ตัวต้านทานจะรับไหว ส่วนตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ต่ออนุกรม และตัวเก็บประจุ  $C$  ต่อขนาน ที่รวมในวงจรทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวน และบายพาสสัญญาณความถี่สูง ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

อัตราขยายของช่องวัดแรงดันไฟฟ้าในไอซีวัดพลังงาน STPM34 มีค่าอัตราขยาย X2 ดังนั้นค่าเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรแบ่งแรงดันจะมีย่านการวัดอยู่ในช่วง  $\pm 300$  mV ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ย่านแรงดันอินพุตของไอซีวัดพลังงาน STPM34 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า

Voltage Channel	
Gain	Differential Input
X2	$\pm 300$ mV

ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังสมการต่อไปนี้

ค่าความต้านทาน  $Z_1$

$$Z_1 = (R_1 + R_2 + R_3) = 810k\Omega \quad (1)$$

สมการแรงดันเอาต์พุต  $V_{OUT}$

$$V_{OUT} = \left( \frac{R_S}{R_S + Z_1} \right) V_{IN} \quad (2)$$

ค่าแรงดันเอาต์พุตสำหรับระบบของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

$$V_{IN} = 240\sqrt{2}, V_{OUT} = 0.197V \quad (3)$$

ค่าแรงดันเอาต์พุตสำหรับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

$$V_{IN} = 230\sqrt{2}, V_{OUT} = 0.189V \quad (4)$$

กำหนด  $V_{OUT(PEAK)}$  เท่ากับ 300 mV ตามตารางที่ 5

ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ไอซีวัดพลังงาน STPM34 สามารถวัดได้

$$V_{IN(PEAK)} = \left( \frac{R_S + Z_1}{R_S} \right) V_{OUT(PEAK)} = 517.32V \quad (5)$$

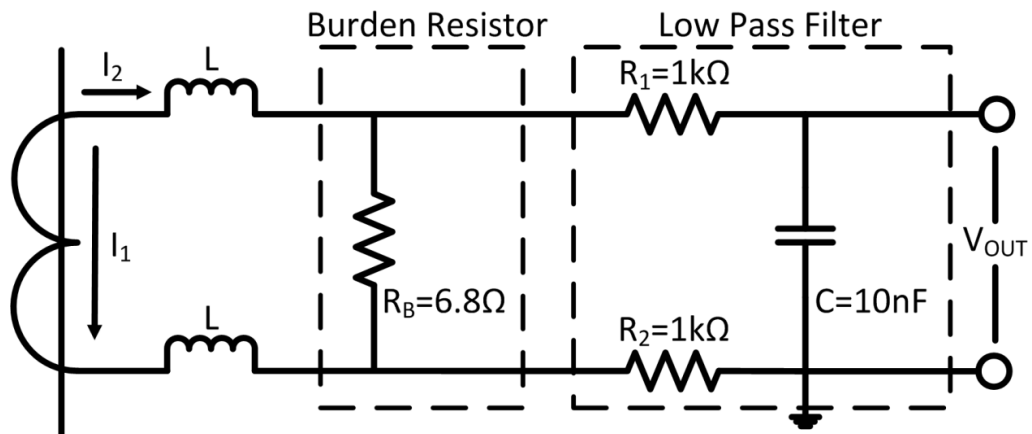
ค่าแรงดันไฟฟ้า RMS ที่ไอซีวัดพลังงาน STPM34 สามารถวัดได้

$$V_{IN(RMS)} = \frac{V_{IN(PEAK)}}{\sqrt{2}} = 365.80V \quad (6)$$

วงจรที่ออกแบบสามารถรองรับการวัดหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายด้านแรงดันต่ำ ทั้งระบบจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยค่าแรงดันสูงสุดที่รองรับได้มีค่า 517.32 V

### การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า

วงจรวัดกระแสไฟฟ้าได้ถูกออกแบบให้ใช้ร่วมกับหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นตัววัดกระแสไฟฟ้าในสายตัวนำ ที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ 3000:1 ซึ่งถ้ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ( $I_1$ ) 3000 A จะมีกระแสไฟฟ้าไหลที่ขดลวดทุติยภูมิ ( $I_2$ ) 1 A และมีตัวต้านทาน Burden ( $R_B$ ) ต่อขนานกับหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า เพื่อรับกระแสไฟฟ้าจากนั้นแปลงเป็นแรงดันเอาต์พุต ( $V_{OUT}$ ) ส่วนตัวเหนี่ยวนำ L และวงจรกรองโลพาส (Low Pass Filter : LPF) ประกอบด้วย  $R_1$   $R_2$  และ C ที่ร่วมในวงจรทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนและกรองสัญญาณความถี่สูง ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 วงจรวัดกระแสไฟฟ้า

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบถอดห่วงได้ (Split Core Current Transformer) ดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

อัตราขยายและย่านแรงดันอินพุตของช่องวัดกระแสไฟฟ้าในไอซีวัดพลังงาน STPM34 มีหลายย่านดังแสดงในตารางที่ 6 ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าอัตราขยาย X2 ดังนั้นค่าเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรวัดกระแสไฟฟ้าจะมีย่านการวัดอยู่ในช่วง  $\pm 300$  mV

ตารางที่ 6 ย่านแรงดันอินพุตของไอซีวัดพลังงาน STPM34 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า

Current Channel	
Gain	Differential Input
X2	$\pm 300$ mV
X4	$\pm 150$ mV
X8	$\pm 75$ mV
X16	$\pm 37.5$ mV

ค่าความสัมพันธ์ของกระแสและเอาต์พุตแสดงดังสมการต่อไปนี้

อัตราส่วนระหว่างกระแส  $I_1$  และ  $I_2$

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (7)$$

แรงดันเอาต์พุต  $V_{OUT}$

$$V_{OUT} = I_2 R_B = \frac{N_1}{N_2} I_1 R_B \quad (8)$$

กำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ( $I_1$ ) เท่ากับ 10 A และตัวต้านทาน Burden ( $R_B$ )

เท่ากับ 6.8  $\Omega$

$$V_{OUT} = \frac{1}{3000} \times 10 \times 6.8 = 22.67mV \quad (9)$$

กำหนด  $V_{OUT(PEAK)}$  เท่ากับ 300 mV ตามอัตราขยาย X2 ที่ออกแบบ

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไอซีวัดพลังงาน STPM34 สามารถวัดได้

$$I_{1(PEAK)} = \frac{V_{OUT(PEAK)}}{R_B} \times \frac{N_2}{N_1} = 132.35A \quad (10)$$

ค่ากระแสไฟฟ้า RMS ที่ไอซีวัดพลังงาน STPM34 สามารถวัดได้

$$I_{1(RMS)} = \frac{I_{1(PEAK)}}{\sqrt{2}} = 93.59A \quad (11)$$

วงจรที่ออกแบบสามารถรองรับการวัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 132.35 A และกระแสไฟฟ้า RMS เท่ากับ 93.59 A ซึ่งรองรับการวัดหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายขนาดเล็ก การเปลี่ยนหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าให้มีอัตราส่วนจำนวนรอบสูงขึ้นและตัวต้านทาน Burden ที่มีความต้านทานต่ำลงสามารถขยายย่านในการวัดได้

ไอซีวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 เป็นไอซีที่มีความแม่นยำในการวัดค่าทางไฟฟ้าสูง สะดวกและง่ายต่อการสอบเทียบ มีช่องทางการสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์อื่นได้ โดยส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ช่วยลดภาระการประมวลผลของ Beaglebone Green

### 3.3.3 ตัวรับรู้อุณหภูมิ PT100

ตัวรับรู้อุณหภูมิ PT100 เป็นอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Resistance Temperature Detector : RTD) โดยนำลวดโลหะมาพันรอบแท่งเซรามิกหรือแท่งแก้ว และสวมปลอกเหล็กเพื่อป้องกันตัววัดเสียหาย วัสดุที่ใช้ในการผลิตอาร์ทีดีมีหลายชนิดแต่ที่นิยมคือแพลททินัม เพราะมีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยที่อุณหภูมิ 0 °C จะมีความต้านทานเท่ากับ 100 Ω เมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าของความต้านทานเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งมีค่า 0.385 Ω/°C ซึ่งไวต่อการเปลี่ยนของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับตัวรับรู้อุณหภูมิประเภทอื่น ตัวรับรู้อุณหภูมิ PT100 ที่เลือกใช้ในงานวิจัยมีคุณสมบัติดังนี้

- ความเที่ยงตรงระดับ Class A ตามมาตรฐาน IEC60751
- ขดลวดแพลททินัมนำมาใช้เป็นตัวรับรู้อุณหภูมิ
- หัวโพรบ (Probe) ทำด้วยสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร
- สายซิลิโคนสแตนเลส และหัวกะโหลก (Housing) แบบมีเกลียว

วิทยานิพนธ์นี้ ใช้ตัวรับรู้ PT100 2 ตัว เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิฉนวนน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 23 และรูปที่ 24



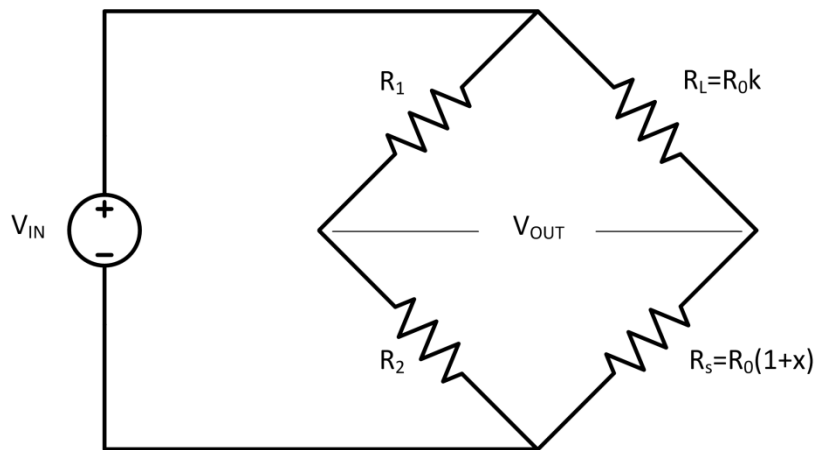
รูปที่ 23 ตัวรับรู้ PT100 สำหรับวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อม



รูปที่ 24 ตัวรับรู้ PT100 สำหรับวัดอุณหภูมิฉนวนน้ำมัน

### การออกแบบวงจรวัดอุณหภูมิ

วงจรวัดอุณหภูมิได้ถูกออกแบบเพื่อใช้ร่วมกับตัวรับรู้ PT100 ( $R_s$ ) โดยมีตัวต้านทาน  $R_1$   $R_2$  และ  $R_L$  ต่อรวมเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) ดังแสดงในรูปที่ 25 ตัวต้านทานโหลด ( $R_L$ ) ถูกแสดงเป็นจำนวน  $k$  เท่าของตัวต้านทาน PT100 และ  $x$  คือค่าเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทาน PT100 ซึ่งวงจรวีทสโตนบริดจ์ สามารถช่วยกำจัดความผันผวนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 25 วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge)

ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$V_{OUT} = V_{IN} \left( \frac{R_0(1+x)}{R_0k + R_0(1+x)} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (12)$$

กำหนดให้  $R_1 = R_L$  และ  $R_2 = R_0$  เพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุล

$$V_{OUT} = V_{IN} \left( \frac{(1+x)}{k+(1+x)} - \frac{1}{k+1} \right) \quad (13)$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \left( \frac{kx}{(1+k)(1+k+x)} \right) \quad (14)$$

ความไว (Sensitivity) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต หรือค่าที่แสดงถึงความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเครื่องมือวัดได้รับสัญญาณอินพุต

ค่าความไวของวงจรแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{dV_{OUT}}{dx} = V_{IN} \frac{d}{dx} \left( \frac{kx}{(1+k)(1+k+x)} \right) \quad (15)$$



$$S = V_{IN} \left( \frac{k(1+k)(1+k+x) - kx(1-k)}{(1+k)^2(1+k+x)^2} \right) \quad (16)$$

$$S = V_{IN} \frac{k}{(1+k+x)^2} \quad (17)$$

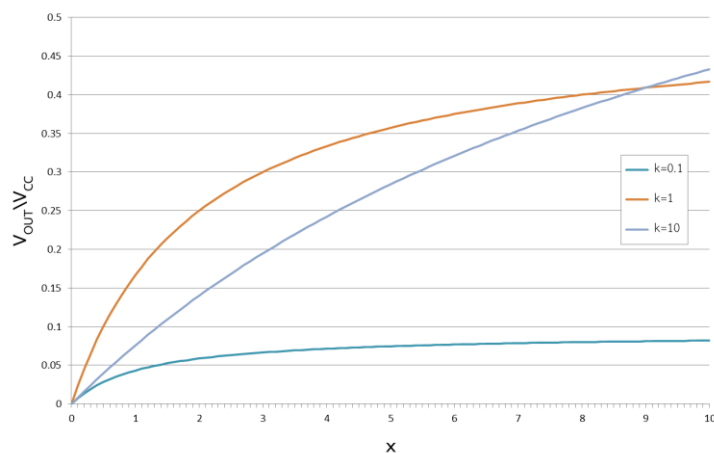
ค่าความไวสูงสุดของวงจรแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{dS}{dk} = \frac{d}{dk} \left( V_{IN} \frac{k}{(1+k+x)^2} \right) = 0 \quad (18)$$

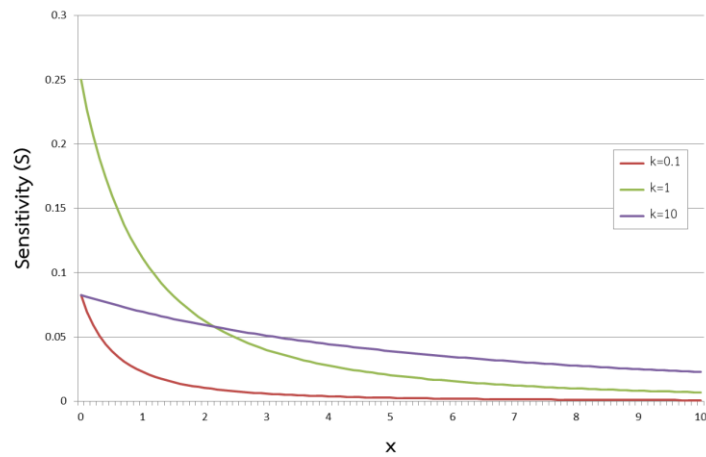
$$k = 1 + x \quad (19)$$

จากสมการ ( 17 ) จะได้ค่าความไวสูงสุดเมื่อตัวต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับตัวต้านทาน  $R_S$  รวมทั้ง  $R_1$  และ  $R_2$  ก็มีค่าความต้านทานเท่ากัน เพื่อให้เกิดความสมดุลแก่วงจร ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวต้านทานความเที่ยงตรงสูง (High Precision Resistor) ที่ประกอบในวงจรวิทส์โตนบรีดจ์ทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 100  $\Omega$

วงจรที่ออกแบบจึงมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่ดีกว่าความต้านทานค่าอื่น ในช่วงที่ตัวรับรู้ PT100 มีความต้านทานเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 900  $\Omega$  ดังแสดงในรูปที่ 26 และมีค่าความไวที่ดีเมื่อตัวรับรู้ PT100 ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 216  $\Omega$  ดังแสดงในรูปที่ 27 ซึ่งครอบคลุมย่านของการวัดอุณหภูมิที่ต้องการ



รูปที่ 26 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความไว

ตัวรับรู้อุณหภูมิ PT100 และวงจรวางจรวิศโตนบริดจ์ ที่นำมาใช้ร่วมกับตัวแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลบนบอร์ด Beaglebone Green มีความเหมาะสมกับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

## บทที่ 4

### การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งอธิบายโครงสร้างไฟล์ SCL การพิจารณาเลือกใช้ Logical node และชุดข้อมูล (Dataset) ที่เหมาะสมตามมาตรฐาน IEC61850 รวมถึงการออกแบบซอฟต์แวร์ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบที่ใช้การบริหารจัดการเธรด (Thread management) ประกอบไปด้วยซอฟต์แวร์ส่วนหลัก ส่วนการวัด ส่วนจัดการข้อมูล และส่วนเซิร์ฟเวอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด ของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (DTMS) โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การออกแบบ SCL ไฟล์ สำหรับ DTMS

มาตรฐาน IEC 61850 ใช้ไฟล์ SCL ในการอธิบายส่วนประกอบและโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ภาษาเอ็กซ์เอ็มแอล (XML) ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูลแบบลำดับชั้น สอดคล้องกับการอ้างอิงชื่อแบบเชิงวัตถุ โดยไฟล์ SCL มีส่วนประกอบ 5 ส่วน ทำหน้าที่ดังนี้

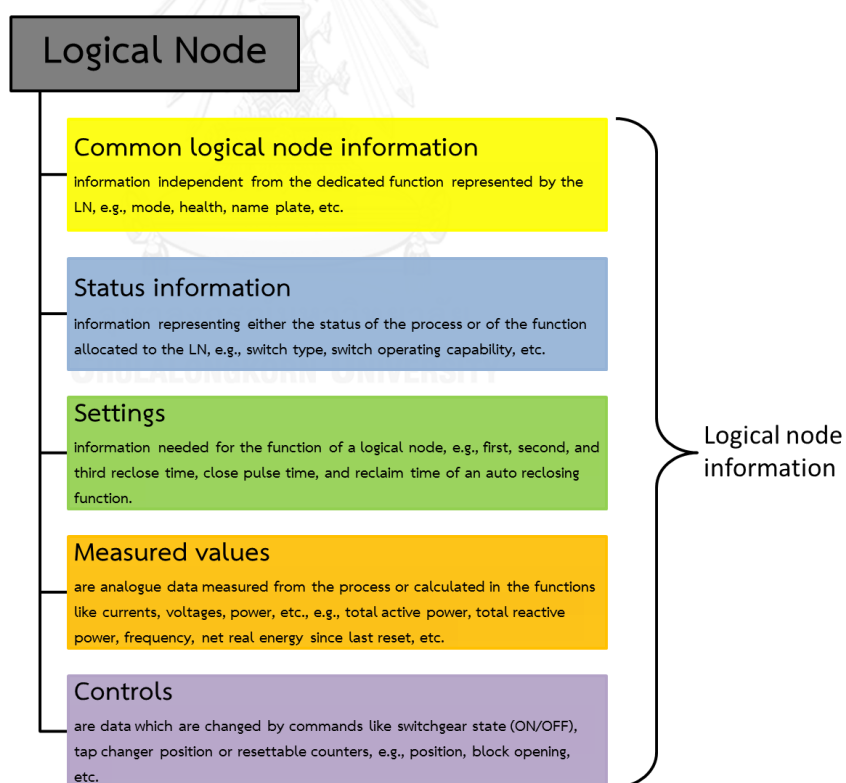
1. ส่วน Header ทำหน้าที่ระบุรุ่น และข้อมูลพื้นฐานอื่นๆ ของการตั้งค่าไฟล์ SCL
2. ส่วน Substation ทำหน้าที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์และหน้าที่ของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้ง หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เบรกเกอร์ และอุปกรณ์ต่างๆ
3. ส่วน Communication ทำหน้าที่จัดสรรการสื่อสาร ของเครือข่ายย่อย (Subnetwork) และจุดเชื่อมต่อ (Access points) เพื่อที่จะเข้าถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดแต่ละตัวในสถานีไฟฟ้าย่อย
4. ส่วน IED ทำหน้าที่อธิบายส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด ซึ่งแต่ละตัวจะมีจุดเชื่อมต่อ การกำหนดโครงสร้างของ Logical node ส่วนการควบคุมรายงาน และชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน
5. ส่วน DataTypeTemplates ทำหน้าที่กำหนดรายละเอียดของ Logical node และข้อมูลชนิดต่างๆ โดยแยกย่อยออกเป็นประเภท เช่น LNodeType DOType DAType และ EnumType เพื่อระบุโครงสร้างและคุณสมบัติได้อย่างชัดเจนเหมาะสมตามมาตรฐาน

ประเภทไฟล์ SCL ที่ใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด คือ ไฟล์ ICD ซึ่งไฟล์อธิบายโครงสร้าง รวมทั้งความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด โดยมีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ Header Communication IED และ DataTypeTemplates

#### 4.1.1 ประเภทข้อมูลของ Logical node

Logical node เป็นส่วนที่อธิบายโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังและความสามารถของอุปกรณ์แต่ละส่วน ซึ่งข้อมูลที่เราได้รับจาก Logical node ย่อมมีความแตกต่างกันเนื่องจากความหลากหลายของอุปกรณ์ [21] โดยข้อมูลถูกแบ่งให้เหมาะสมออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

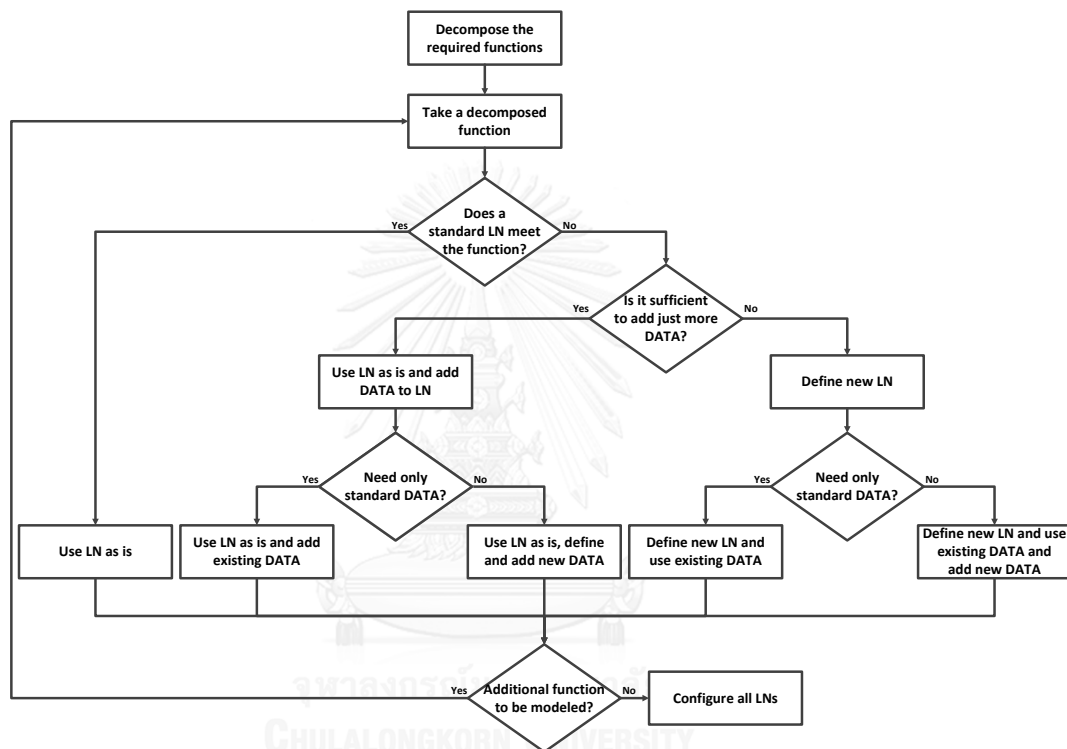
1. ข้อมูลทั่วไป เป็นส่วนแสดงโหมดการทำงาน สภาวะ และป้ายชื่อ เป็นต้น
2. ข้อมูลสถานะ เป็นส่วนแสดงสถานะการทำงาน การรายงาน และการควบคุม เป็นต้น
3. ข้อมูลการตั้งค่า เป็นส่วนแสดงการตั้งค่าจำกัดย่านการวัด และค่าการตัดไฟของเบรกเกอร์ เป็นต้น
4. ข้อมูลการวัด เป็นส่วนแสดงค่าการวัด เช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า เป็นต้น
5. ข้อมูลการควบคุม เป็นส่วนแสดงการเปิดปิดของสวิตช์ และการเปลี่ยนตำแหน่งแทป เป็นต้น



รูปที่ 28 ประเภทข้อมูลของ Logical node

#### 4.1.2 การออกแบบ Logical node

หลักการเลือกหรือออกแบบ เริ่มต้นด้วยการระบุความสามารถของระบบ เลือกฟังก์ชันการทำงานของ Logical node และประเภทข้อมูลที่เหมาะสมและตรงกับความต้องการตามมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งอาจจะมีการเพิ่มและลดจำนวนข้อมูลหรือประเภทของข้อมูล หรือแม้แต่การออกแบบ Logical node และข้อมูลชนิดใหม่ เพื่อให้มีความสอดคล้องกับระบบที่ออกแบบทำให้เข้าใจได้อย่างชัดเจน โดยมีหลักการดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 แสดงหลักการออกแบบและเลือกใช้ Logical node

ฟังก์ชันการทำงานของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เป็นการวัดค่าและเฝ้าสังเกตสถานะของ แรงดัน กระแส กำลังงานไฟฟ้า รวมถึงอุณหภูมิน้ำมันและอุณหภูมิอากาศ ซึ่งการเลือกประเภทข้อมูลและ Logical node ที่เหมาะสมกับการทำงานจึงเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยอธิบายการทำงานและบ่งบอกถึงสถานะของหม้อแปลงไฟฟ้า โดย Logical node ส่วนใหญ่จะมีส่วนโครงสร้างพื้นฐานของข้อมูลที่ถอดแบบมาจาก Common Logical Node class ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 Common Logical Node class

Common Logical Node class		
Attr. Name	Attr. Type	Explanation
LNName		Shall be inherited from Logical-Node Class
<b>Data</b>		
<b>Mandatory Logical Node Information (Shall be inherited by ALL LN but LPHD)</b>		
Mod	INC	Mode
Beh	INS	Behaviour
Health	INS	Health
Namplt	LPL	Name plate
<b>Data Sets</b>		
<b>Control Blocks</b>		
<b>Services</b>		

งานวิจัยนี้พิจารณาเลือกใช้ Logical node ที่เหมาะสมตามมาตรฐาน IEC61850 ดังนี้

1. Logical node zero (LLN0) เป็นส่วนที่แสดงโหนดการทำงาน และสถานะโดยรวมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด

2. Physical device information (LPHD) เป็นส่วนที่แสดงคุณลักษณะทางกายภาพของฮาร์ดแวร์ เช่นป้ายชื่อ รุ่น และยี่ห้อ เป็นต้น

3. Measurement (MMXU) เป็นส่วนที่เก็บค่าที่ได้จากการวัด CT และ VT ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในการบริหารจัดการระบบ รวมถึงวิเคราะห์และประเมินการทำงานได้

4. Metering (MMTR) เป็นส่วนที่เก็บค่าที่ได้จากการวัดเช่นกัน แต่ในส่วนนี้มีจุดประสงค์ในเชิงพาณิชย์ เพื่อเก็บค่าปริมาณพลังงาน และใช้ในการออกบิล

5. Cooling group control (CCGR) เป็นส่วนที่เก็บค่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม รวมถึงฝ้าสังเกตระบบทำความเย็น

6. Insulation medium supervision liquid (SIML) เป็นส่วนที่เก็บค่าอุณหภูมิของตัวกลางฉนวนที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ต้นแบบระบบฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ที่มีส่วนประกอบของ Logical node ที่เลือกใช้ 6 ชนิด ตามมาตรฐาน IEC61850-7-4 [26] ทำให้สามารถเก็บค่าจากการวัดรวมทั้งสามารถฝ้าสังเกตสถานะแต่ละส่วนและสถานะโดยรวมของระบบ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 Logical node และ Object ที่เลือกใช้ในด้านแบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

Attr. Name	Attr. Type	Explanation
<b>LLN0 - Logical node zero</b>		
<b>LPHD – Logical node Physical device information</b>		
PhyNam	DPL	Physical device name plate
PhyHealth	INS	Physical device health
Proxy	SPS	Indicates if this LN is a proxy
<b>MMXU - Logical node Measurement</b>		
TotW	MV	Total Active Power (Total P)
TotVAr	MV	Total Reactive Power (Total Q)
TotVA	MV	Total Apparent Power (Total S)
TotPF	MV	Average Power factor (Total PF)
Hz	MV	Frequency
PhV	WYE	Phase to ground voltages (VL1ER, ...)
A	WYE	Phase currents (IL1, IL2, IL3)
W	WYE	Phase active power (P)
VAr	WYE	Phase reactive power (Q)
VA	WYE	Phase apparent power (S)
PF	WYE	Phase power factor
<b>MMTR - Logical node Metering</b>		
TotVAh	BCR	Net apparent energy since last reset
TotWh	BCR	Net Real energy since last reset
TotVARh	BCR	Net Reactive energy since last reset
<b>CCGR – Logical node Cooling group control</b>		
EnvTmp	MV	Temperature of environment
<b>SIML – Logical node Insulation medium supervision (liquid)</b>		
Tmp	MV	Insulation liquid temperature

พารามิเตอร์แต่ละตัวจะมีส่วนแสดงค่าเชิงปริมาณ (Quantitative attribute) และส่วนแสดงลักษณะเชิงคุณภาพ (Quality Attribute) ซึ่งสามารถทำให้เข้าใจสถานะและปัญหาที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์แต่ละส่วนได้อย่างชัดเจนแม่นยำ สามารถระบุและแก้ส่วนที่เสียหายได้อย่างถูกต้องและทันท่วงที [27] ตารางแสดงสถานะและจำแนกอาการผิดปกติแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ลักษณะเชิงคุณภาพ

Quality type definition				
Attribute name		Attribute type	Value : value range	
Quality		PACKED LIST		
	Validity		CODED ENUM	
	good   invalid   reserved   questionable			
	detailQual		PACKED LIST	
	overflow		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	outOfRange		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	badReference		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	oscillatory		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	failure		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	oldData		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	inconsistent		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	inaccurate		BOOLEAN	DEFAULT FALSE : TRUE   FALSE
	source		CODED ENUM	DEFAULT process : process   substituted
	test		BOOLEAN	DEFAULT FALSE
operatorBlocked		BOOLEAN	DEFAULT FALSE	

#### 4.1.3 การออกแบบชุดข้อมูล (Dataset Design)

พารามิเตอร์จำนวนมากสามารถอธิบายระบบและส่วนต่างๆได้ดีและถูกต้อง แต่ก็ทำให้มีข้อมูลจำนวนมากที่ต้องทำการเข้าถึงและยากแก่การเฝ้าสังเกตที่ละส่วน การเข้าถึงข้อมูลแบบเป็นกลุ่มจะทำให้เกิดความสับสนและรวดเร็วขึ้น ดังนั้นการทำชุดข้อมูลจึงเป็นการกำหนดค่าที่เราต้องการเฝ้าสังเกตและให้ความสนใจ รวมถึงการกำหนดค่าตั้งต้นกระบวนการบริการและรายงานของตัวอุปกรณ์ในไฟล์ SCL เป็นการลดเวลาในการตั้งค่าทุกครั้งที่ทำกรเชื่อมต่อระหว่างต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและศูนย์ข้อมูล

งานวิจัยนี้จึงเลือกพารามิเตอร์ในชุดข้อมูลที่บ่งบอกสถานะและค่าที่สามารถนำมาวิเคราะห์ต่อได้ เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับศูนย์ข้อมูลในการประเมินและวางแผนการบริการ บำรุงรักษา และทดแทนอุปกรณ์เก่าในระบบไฟฟ้า ซึ่งทำให้เห็นภาพรวมของระบบและแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดของข้อมูลจะกล่าวอีกครั้งในส่วนของการออกแบบฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูล



## 4.2 การบริหารจัดการเธรด (Thread Management)

ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายและศูนย์ข้อมูล มีส่วนการประมวลผลข้อมูลและลักษณะการทำงานหลายรูปแบบ รวมทั้งต้องตอบสนองในเวลาเดียวกัน การออกแบบระบบเพื่อให้มีการทำงานที่ถูกต้อง รวดเร็ว และสามารถบริหารจัดการภาระงานต่างๆได้ดี ย่อมมีความสำคัญอย่างยิ่ง

การทำงานของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายถูกออกแบบให้เป็นเซิร์ฟเวอร์ เพื่อรองรับการติดต่อจากไคลแอนท์ มีการสื่อสารกับไอซีวีด์พลังงาน STPM34 เพื่อการประมวลผลค่าทางไฟฟ้า และสร้างระบบฐานข้อมูล เก็บค่าเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป ส่วนการทำงานของศูนย์ข้อมูล ต้องจัดการกับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กหลายตัว เก็บข้อมูลจำนวนมาก และเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่แสดงผลเพื่อการเฝ้าสังเกตสถานะการทำงานทั้งหมดของอุปกรณ์

การทำงานที่หลากหลายและซับซ้อนเหล่านี้ ทำให้การทำงานแบบมัลติเธรด (Multithreading) ที่ส่วนมากจะพบในระบบปฏิบัติการ จึงมีความเหมาะสมกับระบบที่ออกแบบ ซึ่งระบบปฏิบัติการฝังตัวลินุกซ์เดเบียน (Debian Embedded Linux) บน Beaglebone Green เป็นระบบปฏิบัติการที่ช่วยในการบริหารจัดการเธรด ทำให้เธรดแต่ละตัวสามารถทำงานร่วมกันได้ในโปรเซสเดียวกัน ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ยังสามารถทำงานในส่วนของแต่ละตัวได้อย่างมีอิสระ ซึ่งคุณสมบัติเด่นของการใช้มัลติเธรดมีดังนี้

1. การตอบสนองรวดเร็ว: โปรแกรมทั่วไปถ้ามีงานใดงานหนึ่งใช้เวลาประมวลผลนาน จะทำให้โปรแกรมไม่สามารถตอบสนองผู้ใช้ได้รวดเร็ว แต่การทำงานแบบมัลติเธรดเป็นการทำงานหลายเธรดพร้อมกัน เธรดที่ประมวลผลนานก็จะทำงานอยู่เบื้องหลัง ส่วนเธรดที่ทำหน้าที่ตอบสนองกับผู้ใช้ก็ยังคงทำงานได้ในเวลาเดียวกัน
2. ประหยัดทรัพยากร: การทำงานแบบมัลติเธรดในระบบเซิร์ฟเวอร์ สามารถจะบริการหลายไคลแอนท์ได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งประหยัดทรัพยากรมากกว่าการทำงานแบบโปรเซส ซึ่งการทำงานในคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวการบริหารการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าย่อมส่งผลที่ดีกับระบบโดยรวม
3. การใช้ระบบให้เกิดประโยชน์สูงขึ้น: ระบบสามารถประมวลผลได้เร็วขึ้น ถ้ามีภาระงานที่ต้องสื่อสารกับฮาร์ดแวร์ที่ต้องใช้เวลา รอ ตัวประมวลผลจะสลับทำงานเธรดส่วนอื่นทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

4. สะดวกในการสื่อสารระหว่างเทรตการทำงาน: เทรตจะทำงานในโปรเซสเดียวกันเมื่อมีการส่งข้อมูลหรือสื่อสารข้อมูลระหว่างเทรต ย่อมทำได้ง่ายตายและรวดเร็ว เพราะข้อมูลและไฟล์ได้ใช้ร่วมกันอยู่แล้ว

ประเภทการทำงานแบบเทรตมี 2 แบบ คือ ระดับผู้ใช้งาน (User level threads) และระดับระบบปฏิบัติการ (Kernel level threads) ซึ่งจะเหมาะสมกับแบบหน่วยประมวลผลที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แบบหน่วยประมวลผลเดี่ยว (Single core) การประมวลของเทรตใช้การแบ่งช่วงเวลา (Time slice) ส่วนแบบประมวลผลหลายหน่วย (Multiple core) การประมวลผลต้องใช้การจัดการด้านระบบปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้เลือกใช้เทรตในระดับผู้ใช้งานเนื่องด้วยความเร็วในการสร้างและบริหารจัดการเทรต ความสะดวกในเขียนโปรแกรมเพราะมีคลังโปรแกรม (library) เทรตที่สร้างขึ้นเป็นรูปแบบทั่วไปสามารถใช้ได้หลายระบบปฏิบัติการ และด้วยระบบสถาปัตยกรรมหน่วยประมวลผลของ Beaglebone Green เป็นแบบหน่วยประมวลผลเดี่ยว เทรตที่ทำงานในระดับผู้ใช้งานจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

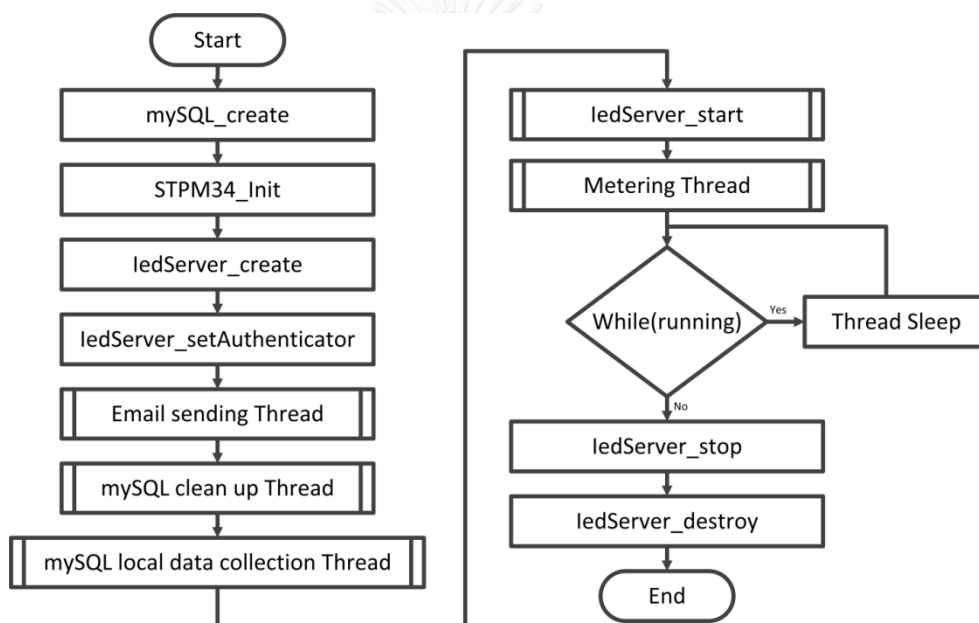
ส่วนต่อไปจะกล่าวถึงฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งแต่ละส่วนมีการบริหารจัดการเทรต ฟังก์ชันและรายละเอียดในการทำงานดังนี้

### 4.3 ซอร์ฟแวร์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (DTMS software)

ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย มีส่วนของซอร์ฟแวร์หลักอยู่ 5 ส่วน คือ ส่วนหลักของโปรแกรม ส่วนการวัด ส่วนฐานข้อมูล ส่วนเซิร์ฟเวอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดตามมาตรฐาน IEC61850 และส่วนการรายงานไอพีแอดเดรส โดยแต่ละส่วนมีการออกแบบและระบบการทำงานดังนี้

#### 4.3.1 การออกแบบโปรแกรมส่วนหลัก

โปรแกรมส่วนหลักทำหน้าที่เชื่อมโยงฟังก์ชันการทำงานในส่วนต่างให้ทำงานร่วมกันได้อย่างเหมาะสม กำหนดค่าเริ่มต้น สร้างเซิร์ฟเวอร์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด รวมทั้งสร้างและบริหารจัดการเทรดต่างๆ ซึ่งส่วนหลักของโปรแกรมมีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 30

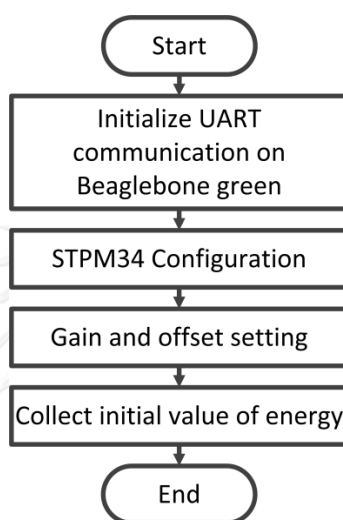


รูปที่ 30 ผังการทำงานโปรแกรมส่วนหลักของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด

การทำงานจะเริ่มต้นจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของฐานข้อมูล และไอซีวัตพลังงาน จากนั้นทำการสร้างเซิร์ฟเวอร์ที่มีการอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented ตามมาตรฐาน IEC61850 ที่ได้จากการออกแบบไฟล์ SCL และสร้างระบบตรวจสอบรหัสผ่าน เมื่อทำการกำหนดค่าส่วนประกอบเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะสร้างเทรดเพื่อบริหารจัดการระบบทำงาน โดยสร้างเทรดสำหรับส่งค่าไอพีแอดเดรส (IP Address) เทรดสำหรับเก็บและลบข้อมูลในฐานข้อมูล เทรดสำหรับวัดพลังงานไฟฟ้า เมื่อเริ่มต้นการทำงานเซิร์ฟเวอร์ของ DTMS เซิร์ฟเวอร์จะคอยรับการติดต่อจากผู้ขอใช้บริการ เมื่อไม่มีการติดต่อส่วนของเซิร์ฟเวอร์จะเข้าสู่โหมด Sleep เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน เมื่อโปรแกรมหยุดทำงาน โปรแกรมจะทำการคืนทรัพยากรที่ใช้ในการประมวลผลแก่ระบบปฏิบัติการ

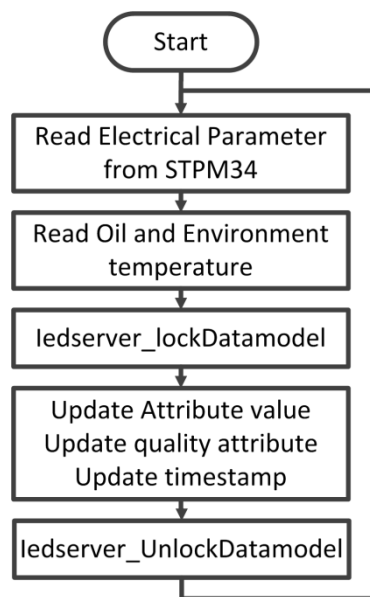
#### 4.3.2 การออกแบบโปรแกรมส่วนการวัด

โปรแกรมส่วนการวัดพลังงานจะเป็นส่วนที่เป็นการวัดค่าทางไฟฟ้าผ่านวงจรวัดกระแสและแรงดัน โดยมีไอซีวัดพลังงาน STPM34 เป็นตัวช่วยในการวัดค่า ส่วนการวัดอุณหภูมิจะใช้วงจรวิสโตนบริดจ์และส่วนแปลงค่าแอนาล็อกเป็นค่าดิจิทัลบนบอร์ด Beaglebone Green โปรแกรมที่ออกแบบในส่วนการวัดเพื่อสนับสนุนการทำงานของฮาร์ดแวร์เหล่านี้ มีส่วนประกอบเป็นฟังก์ชัน กำหนดค่าเริ่มต้น และส่วนเทรคการวัดพลังงานซึ่งทำข้อมูลให้ทันสมัยอยู่เสมอ ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณ และข้อมูลเชิงคุณภาพ



รูปที่ 31 ผังการทำงานฟังก์ชันกำหนดค่าเริ่มต้นของ STPM34

ฟังก์ชันกำหนดค่าเริ่มต้น (STPM34\_Init) ของการวัดพลังงานไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 31 เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าพอร์ตสื่อสารอนุกรม (Universal asynchronous receiver/transmitter : UART) บนบอร์ด Beaglebone Green และทำการตั้งค่า STPM34 ทั้งสองตัวบนบอร์ดที่ออกแบบ โดยการตั้งค่าเริ่มต้นของไอซี มีสองส่วนคือ ค่าด้านการปฏิบัติการ เช่น อัตราพัลส์ของพลังงานแรงดันอ้างอิง และการตั้งค่าอัตราความเร็วในการสื่อสาร ส่วนค่าด้านการวัด มีการตั้งย่านในการวัดความถี่ การใช้วงจรกรองภายใน ค่าอัตราการขยาย และค่าการสอบเทียบของการวัด ส่วนสุดท้ายทำการเก็บค่าเริ่มต้นของไอซีวัดพลังงานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในการคำนวณต่อไป



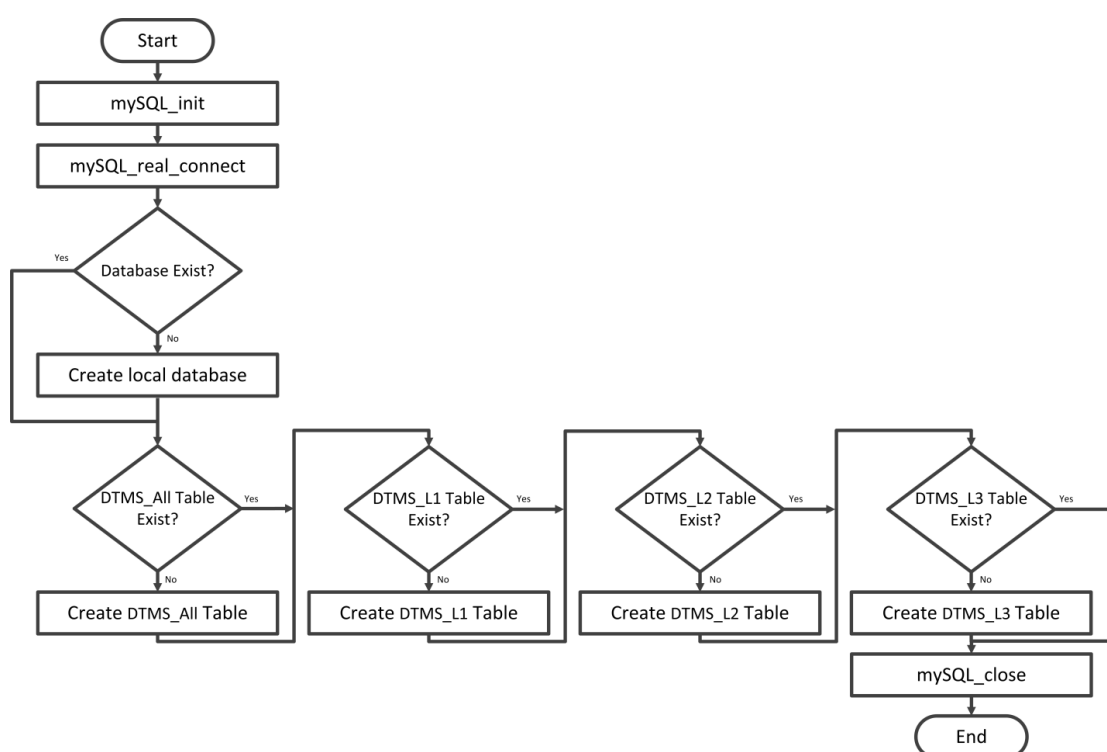
รูปที่ 32 ผังการทำงานเทรดการวัด

เทรดการวัด (Metering thread) แสดงในรูปที่ 32 เริ่มต้นการทำงานด้วยการอ่านค่าจาก STPM34 โดยมีการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของข้อมูลทั้งการส่งและรับด้วยซีอาร์ซีโคด ค่าทางไฟฟ้าพื้นฐานที่วัดได้จะนำมาประมวลผลเพื่อหาเป็นพลังงานที่ใช้สะสม หรือตัวประกอบกำลัง ส่วนของการวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิฉนวนน้ำมัน ใช้การแปลงค่าแอนาล็อกเป็นค่าดิจิทัลบนบอร์ด Beaglebone Green และประมวลผลค่าของอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส ส่วนสุดท้ายเป็นการนำข้อมูลเชิงปริมาณ มาพิจารณาคุณภาพ สถานะ รวมทั้งเวลาล่าสุดในการวัด และใช้การอ้างอิงชื่อแบบ Object-Oriented ในตัวต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่ออกแบบตามมาตรฐาน IEC61850 ให้มีความทันสมัย ซึ่งก่อนจะใส่ข้อมูลล่าสุดในเซิร์ฟเวอร์จะต้องมีการล็อคข้อมูล Object-Oriented ที่ใช้อ้างอิง เมื่อดำเนินการเสร็จก็ทำการปลดล็อค ให้ผู้ขอใช้บริการสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ตามปกติ

เทรดการวัดถูกออกแบบให้ทำการวัดค่าและใส่ข้อมูลใหม่แก่เซิร์ฟเวอร์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้สามารถเฝ้าสังเกตความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ โดยช่วงการวัดใช้เวลาน้อยกว่า 100 มิลลิวินาที

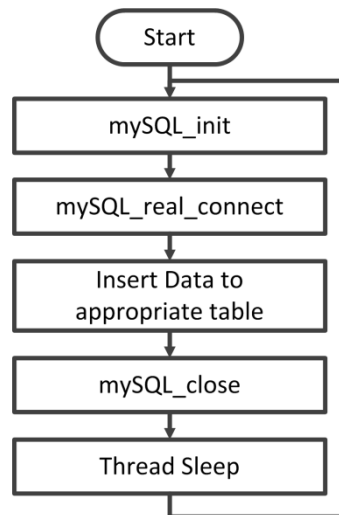
#### 4.3.3 การออกแบบโปรแกรมส่วนฐานข้อมูล

โปรแกรมส่วนฐานข้อมูลจะเป็นส่วนที่เป็นการบริหารจัดการข้อมูลที่ได้จากการวัด ซึ่งฐานข้อมูลเป็นเซิร์ฟเวอร์ที่สามารถทำให้ผู้ใช้งานเพิ่มลดหรือแสดงผลข้อมูล โปรแกรมที่ออกแบบในส่วนฐานข้อมูลเพื่อสนับสนุนการทำงานของฐานข้อมูลให้มีประสิทธิภาพ มีส่วนประกอบเป็นฟังก์ชันการสร้างฐานข้อมูลที่เหมาะสมกับความสามารถในการประมวลของบอร์ด Beaglebone Green ส่วนเทรตของโปรแกรมฐานข้อมูล มีเทรตสำหรับการเพิ่มข้อมูลใหม่และเทรตการลดข้อมูลเก่าออกจากระบบ



รูปที่ 33 ฟังก์ชันการสร้างฐานข้อมูลสำหรับต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

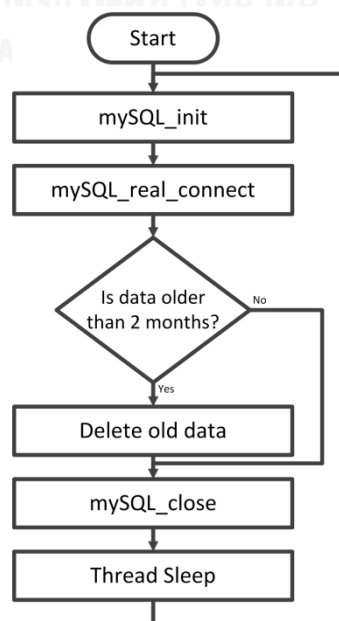
ฟังก์ชันการสร้างฐานข้อมูล (mysql\_create) แสดงในรูปที่ 33 จะเริ่มต้นด้วยการจัดสรรและกำหนดค่าเริ่มต้น ด้วยการสร้าง Object รวมถึงที่อยู่ ส่วนต่อมาเป็นการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล โดยกำหนดเซิร์ฟเวอร์ ชื่อผู้ใช้งาน และรหัสผ่าน เมื่อการเชื่อมต่อสำเร็จ โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่ามีฐานข้อมูลหรือมีตารางที่ถูกสร้างไว้หรือไม่ ถ้าไม่มีอยู่จะสร้างฐานข้อมูลและตารางตามที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนสุดท้ายจะเป็นการสิ้นสุดการเชื่อมต่อซึ่งเป็นการคืนทรัพยากรหน่วยความจำแก่ระบบปฏิบัติการ



รูปที่ 34 ผังการทำงานเธรดการเพิ่มข้อมูล

เธรดการเพิ่มข้อมูล (mysql\_data\_collection thread) แสดงในรูปที่ 34 เริ่มต้นการทำงานด้วยการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้จากเธรดการวัดค่า มีข้อมูลค่าทางไฟฟ้า ข้อมูลค่าอุณหภูมิ ข้อมูลคุณภาพสถานะ และข้อมูลเวลาจัดเก็บ ใส่ในฐานข้อมูลและตารางที่เหมาะสม เมื่อดำเนินงานเสร็จ ส่วนสุดท้ายเป็นการสิ้นสุดการเชื่อมต่อ

เธรดการเพิ่มข้อมูลถูกออกแบบให้จัดเก็บข้อมูลประวัติและสถานะของการทำงาน เมื่อเกิดปัญหาความเสียหายหรือต้องการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลง ข้อมูลที่มีความละเอียดเพียงพอสามารถนำมาวิเคราะห์ผลและแนวโน้มที่น่าไปใช้ได้ แต่ต้องสอดคล้องกับสมรรถนะของบอร์ด Beaglebone Green เช่นกัน จึงได้เลือกช่วงเวลาการจัดเก็บข้อมูลทุก 5 นาที



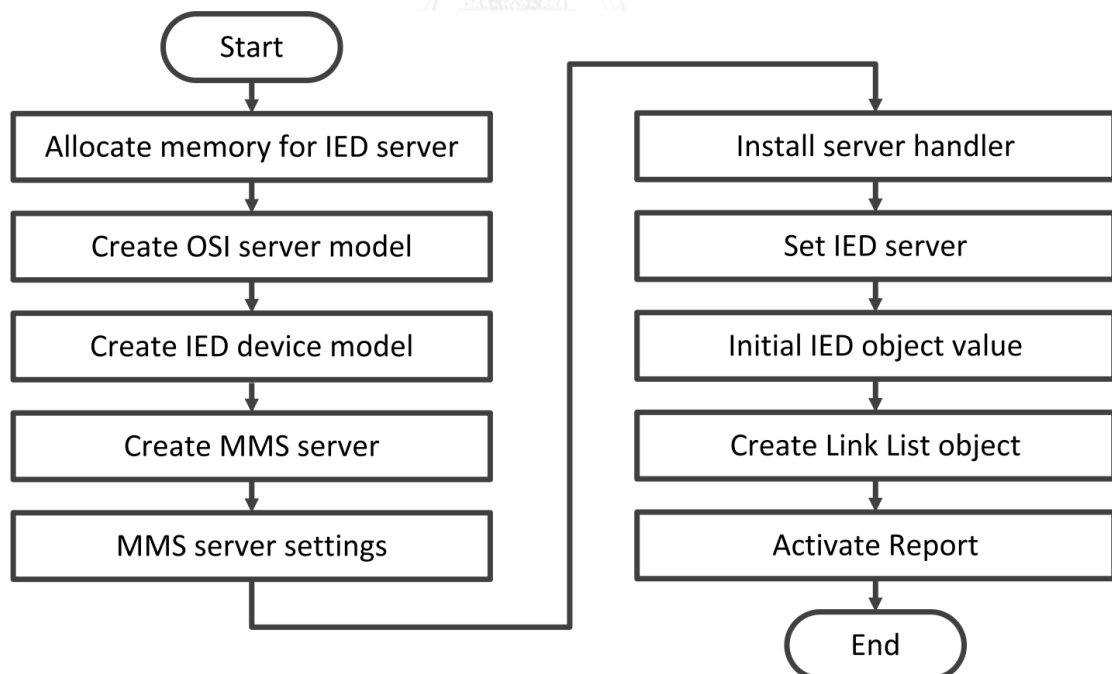
รูปที่ 35 ผังการทำงานเธรดการลบข้อมูลเก่า

เทรตการลบข้อมูลเก่า (mysql\_cleanup thread) แสดงในรูปที่ 35 เริ่มต้นด้วยการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล และทำการตรวจสอบว่ามีเรคคอร์ดข้อมูลที่เก่าเกินกว่าระยะเวลาที่กำหนด ถ้าข้อมูลเก่ากว่ากำหนดจะทำการลบข้อมูลออก ส่วนสุดท้ายเป็นการสิ้นสุดการเชื่อมต่อ

เทรตการลบข้อมูลเก่าถูกออกแบบ เพื่อวัตถุประสงค์ให้ลบข้อมูลเก่าเกินกว่า 60 วัน เพราะข้อมูลถูกเก็บด้วยความถี่ทำให้ข้อมูลมีปริมาณมากถึง 17280 เรคคอร์ด เพื่อเป็นการบริหารจัดการหน่วยความจำและลดภาระในการเรียกดูข้อมูล ซึ่งข้อมูลในระบบฐานข้อมูลจะถูกตรวจสอบและลบทุกๆ 6 ชั่วโมง

#### 4.3.4 การออกแบบโปรแกรมส่วนเซิร์ฟเวอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์ตามมาตรฐาน IEC61850

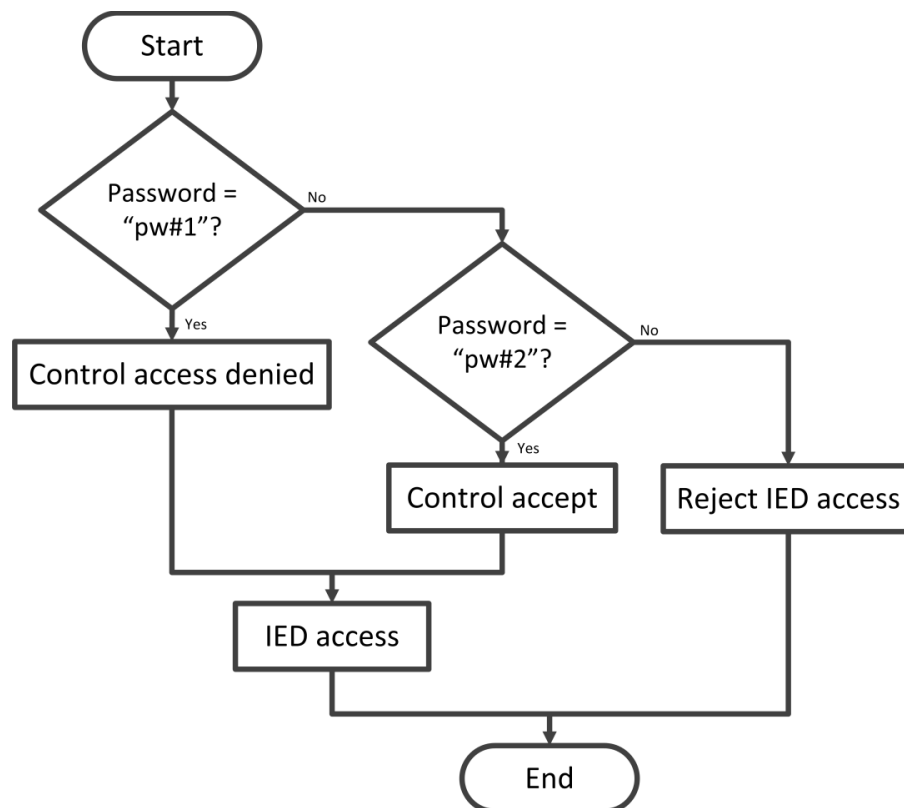
โปรแกรมส่วนเซิร์ฟเวอร์ของต้นแบบระบบไฟฟ้าส่งแกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เป็นส่วนที่สร้างและบริหารจัดการเซิร์ฟเวอร์รวมทั้งทรัพยากร ให้สามารถสนับสนุนการเชื่อมต่อระหว่างผู้ขอใช้งาน มีส่วนประกอบเป็นฟังก์ชันการสร้างเซิร์ฟเวอร์ตามมาตรฐาน IEC61850 ฟังก์ชันตรวจสอบรหัสผ่าน ฟังก์ชันหยุดการทำงานของเซิร์ฟเวอร์ และฟังก์ชันคืนทรัพยากรแก่ระบบ ส่วนเทรตของโปรแกรมส่วนเซิร์ฟเวอร์ มีเทรตสำหรับเริ่มต้นการทำงานของเซิร์ฟเวอร์เพื่อรอรับการเชื่อมต่อ



รูปที่ 36 ผังการทำงานฟังก์ชันการสร้างเซิร์ฟเวอร์ตามมาตรฐาน IEC61850



ฟังก์ชันการสร้างเซิร์ฟเวอร์ตามมาตรฐาน IEC61850 (ledServer\_create) แสดงในรูปที่ 36 เริ่มต้นด้วยการจัดสรรทรัพยากรและหน่วยความจำ ส่วนต่อมาเป็นการสร้าง MMS เซิร์ฟเวอร์ โดยนำโครงสร้าง OSI เซิร์ฟเวอร์ กับโครงสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดมารวมกันสร้าง และตั้งค่าเริ่มต้นเซิร์ฟเวอร์ MMS รวมทั้งการทำงานเพื่อรองรับการอ่าน เขียน และการเชื่อมต่อ ส่วนต่อมาทำการตั้งค่าเซิร์ฟเวอร์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด กำหนดค่าเริ่มต้นข้อมูลใน Object และสร้าง Link List ของข้อมูล เพื่อใช้ในการรายงานข้อมูลของเซิร์ฟเวอร์และการให้บริการแก่ผู้ขอข้อมูล

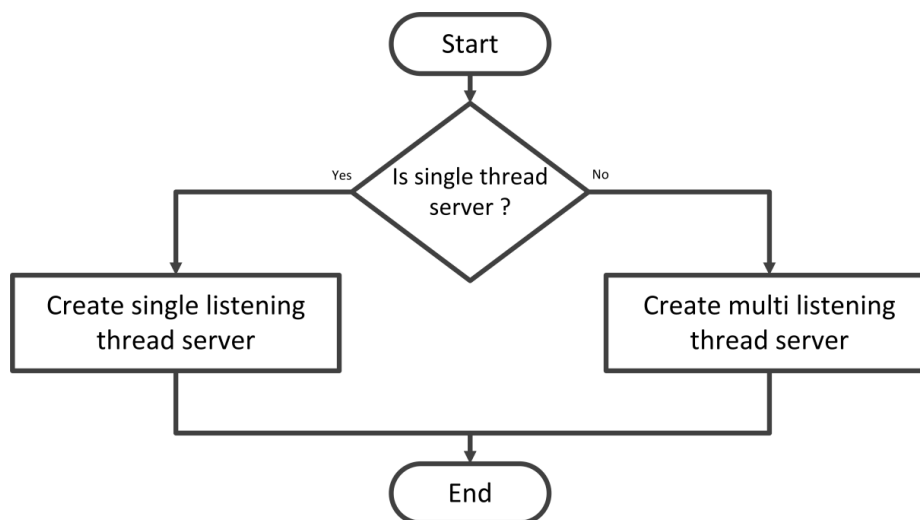


รูปที่ 37 ผังการทำงานฟังก์ชันตรวจสอบรหัสผ่าน

ฟังก์ชันตรวจสอบรหัสผ่าน (ledServer\_SetAuthenticator) แสดงในรูปที่ 37 เมื่อมีการเชื่อมต่อจากใช้งาน เซิร์ฟเวอร์จะทำการรองรับการเชื่อมต่อและตรวจสอบรหัสผ่าน มีระดับในการเข้าถึงข้อมูล 2 แบบ ซึ่งแบบแรกอนุญาตให้เชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์และสามารถเข้าถึงและเรียกดูข้อมูลได้ ส่วนแบบที่สองอนุญาตให้เชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์เช่นกัน แต่มีอำนาจสูงกว่าจึงสามารถเข้าถึง เรียกดู และควบคุมปรับค่าข้อมูลได้ ในกรณีที่รหัสผ่านไม่ถูกต้องจะถูกปฏิเสธการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์

ฟังก์ชันหยุดการทำงานของเซิร์ฟเวอร์ (ledServer\_Stop) มีหน้าที่ในการหยุดการทำงานของเซิร์ฟเวอร์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดทั้งหมด โดยการปิดช่อง TCP ของเซิร์ฟเวอร์และช่อง TCP ของใช้งาน

ฟังก์ชันคืนทรัพยากรแก่ระบบ (ledServer\_Destroy) มีหน้าที่หยุดการทำงานของเธรดต่างๆ ต่อมาจะทำการคืนทรัพยากรและหน่วยความจำที่ใช้ในการสร้างเซิร์ฟเวอร์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวนฉลาด รวมทั้งช่องทางการติดต่อแก่ระบบ



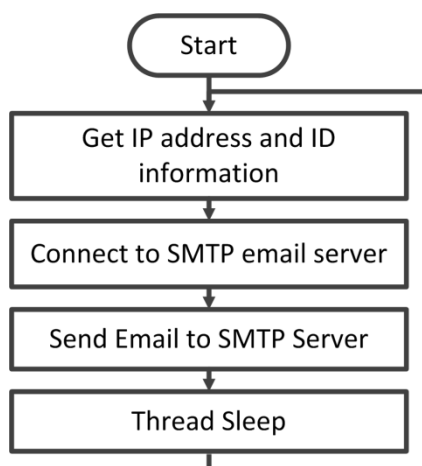
รูปที่ 38 ผังการทำงานของเธรดสำหรับเริ่มต้นการทำงานของเซิร์ฟเวอร์

เธรดสำหรับเริ่มต้นการทำงานของเซิร์ฟเวอร์ (ledServer\_Start) แสดงในรูปที่ 38 เป็นเธรดที่เริ่มต้นการทำงานของเซิร์ฟเวอร์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวนฉลาด ที่ได้สร้างไว้จากฟังก์ชัน ledServer\_create เมื่อมีการเริ่มต้นทำงาน เธรดจะตรวจสอบค่าที่ตั้งไว้ว่าเป็นชนิดที่รองรับการเชื่อมต่อแบบเดี่ยว หรือการเชื่อมต่อแบบหลายผู้ใช้ และเริ่มทำงานเซิร์ฟเวอร์เพื่อรองรับการขอใช้งาน

เธรดสำหรับเริ่มต้นการทำงานของเซิร์ฟเวอร์ มีวัตถุประสงค์การรองรับการเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งจะเข้าสู่โหมด Sleep ทุกๆ 100 มิลลิวินาที เพื่อการประหยัดพลังงาน แต่ยังสามารถรับการเชื่อมต่อรายใหม่ที่ขอใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวนฉลาดได้

#### 4.3.5 การออกแบบโปรแกรมสำหรับรายงานไอพีแอดเดรส

โปรแกรมสำหรับการสื่อสาร เป็นโปรแกรมที่ออกแบบให้ศูนย์ข้อมูลสามารถเข้าถึงตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวนฉลาด เพื่อให้สามารถเฝ้าสังเกตอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบได้ มีเธรดส่งอีเมลล์ ทำหน้าที่ส่งไอพีแอดเดรส (IP address) และหมายเลขเครื่องไปที่เซิร์ฟเวอร์อีเมลล์



รูปที่ 39 ผังการทำงานของเธรดส่งอีเมลล์

เธรดส่งอีเมลล์ (Email\_Sending) แสดงในรูปที่ 39 เธรดเริ่มต้นการทำงานด้วยการตรวจสอบข้อมูลไอพีแอดเดรส รวมทั้งหมายเลขเครื่อง และทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์อีเมลล์แบบ SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) ที่เป็นโพรโตคอลมาตรฐานที่ใช้ในการส่งอีเมลล์ ผ่าน TCP พอร์ต 587 และเพิ่มความปลอดภัยด้วยการเข้ารหัสในชั้นทรานสปอร์ต (Transport Layer Security : TLS) จากนั้นทำการส่งอีเมลล์ไปที่เซิร์ฟเวอร์ SMTP ซึ่งเธรดส่งอีเมลล์ จะถูกส่งทุกครั้งที่มีการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตหรือทุก 30 นาที

## บทที่ 5

### การออกแบบซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูลและโครงสร้างฐานข้อมูล

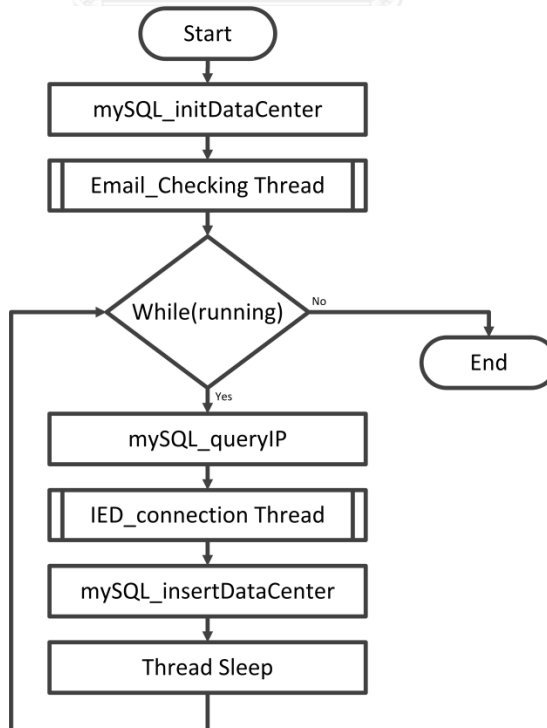
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับศูนย์ข้อมูล ซึ่งอธิบายการออกแบบซอฟต์แวร์ส่วนประกอบต่างๆของระบบ ประกอบไปด้วยซอฟต์แวร์ส่วนหลัก ส่วนฐานข้อมูล และส่วนขอบริการจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก (Service request) รวมทั้งการออกแบบฐานข้อมูล และการออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานของศูนย์ข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.1 ซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูล (Data Center Software)

ศูนย์ข้อมูล มีส่วนของซอฟต์แวร์หลักอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนหลักของโปรแกรม ส่วนระบบฐานข้อมูล และส่วนไคลเอนต์ของศูนย์ข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 โดยแต่ละส่วนมีการออกแบบและระบบการทำงานดังนี้

##### 5.1.1 การออกแบบโปรแกรมส่วนหลัก

โปรแกรมส่วนหลักทำหน้าที่เชื่อมโยงฟังก์ชันการทำงานภายในศูนย์ข้อมูลให้ทำงานร่วมกัน กำหนดค่าเริ่มต้นฐานข้อมูลและส่วนไคลเอนต์เพื่อสร้างการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก รวมทั้งสร้างและบริหารจัดการเทร็ด ซึ่งส่วนหลักของโปรแกรมมีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 40

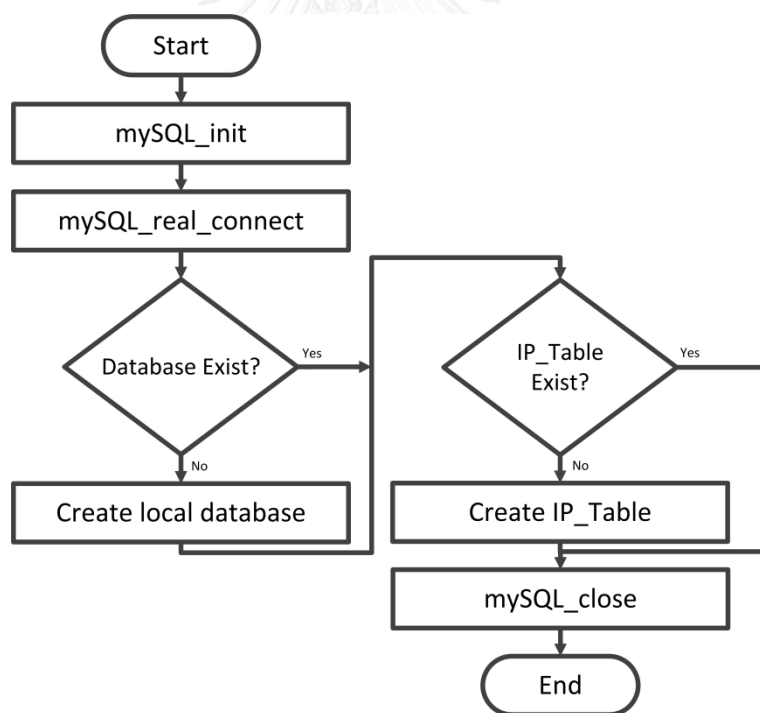


รูปที่ 40 ผังการทำงานโปรแกรมส่วนหลักของศูนย์ข้อมูล

การทำงานของโปรแกรมศูนย์ข้อมูลเริ่มต้นจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของฐานข้อมูล จากนั้นสร้างเทรตสำหรับการตรวจสอบข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กจากอีเมลล์ ส่วนต่อมาทำการเรียกข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรสทั้งหมดจากฐานข้อมูล และทำการสร้างเทรตเพื่อเชื่อมต่อกับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ชุดข้อมูลที่อ่านได้จะถูกเก็บในฐานข้อมูล เมื่อการติดต่อกับ DTMS ทั้งหมดเสร็จสิ้น โปรแกรมจะเข้าสู่โหมด Sleep เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและรอคาบเวลาใหม่ในการเก็บข้อมูลอีกครั้ง

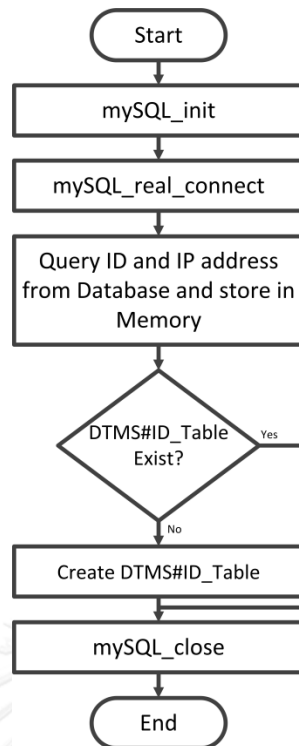
### 5.1.2 การออกแบบโปรแกรมส่วนฐานข้อมูล

โปรแกรมส่วนฐานข้อมูลจะเป็นส่วนที่บริหารจัดการข้อมูลที่ได้รับการอ่านจากต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายภายในโครงข่าย ซึ่งค่าที่วัดได้และสถานะของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกเก็บในฐานข้อมูล เพื่อนำไปแสดงผลแก่ผู้ใช้งานสำหรับเฝ้าสังเกตที่ศูนย์ข้อมูล มีส่วนประกอบเป็นฟังก์ชันกำหนดฐานข้อมูลกับตารางที่เหมาะสม ฟังก์ชันการเรียกข้อมูลไอดีและไอพีแอดเดรส และฟังก์ชันการเพิ่มข้อมูลใหม่



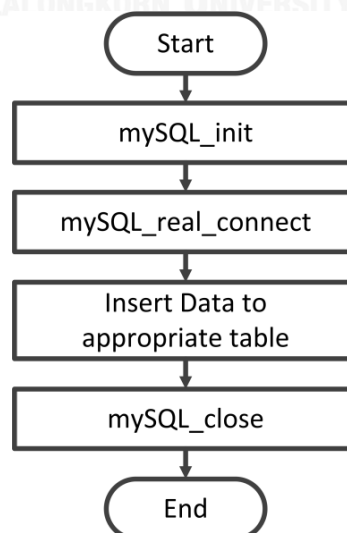
รูปที่ 41 ฟังก์ชันการทำงานฟังก์ชันกำหนดฐานข้อมูลเริ่มต้น

ฟังก์ชันกำหนดฐานข้อมูลเริ่มต้น (mysql\_initDataCenter) แสดงในรูปที่ 41 เริ่มต้นการทำงานด้วยการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล และตรวจสอบว่ามีฐานข้อมูลหรือตารางไอพีแอดเดรสที่ถูกสร้างไว้หรือไม่ และทำการสร้าง ซึ่งตารางไอพีแอดเดรสจะกำหนดค่าคีย์หลัก (Primary key) เพื่อระบุค่าไอดีที่ไม่เหมือนกันเพื่อป้องกันความซ้ำซ้อน ส่วนสุดท้ายเป็นการสิ้นสุดการเชื่อมต่อ



รูปที่ 42 ผังการทำงานฟังก์ชันการเรียกข้อมูลไอดีและไอพีแอดเดรส

ฟังก์ชันการเรียกข้อมูลไอดีและไอพีแอดเดรส (mysql\_queryIP) แสดงในรูปที่ 42 เริ่มต้นการทำงานด้วยการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล เรียกข้อมูลไอดีและไอพีแอดเดรส และเก็บข้อมูลลงในหน่วยความจำของโปรแกรมส่วนหลักเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับเชื่อมต่อกับต้นแบบระบบฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแต่ละตัวในโครงข่าย จากนั้นตรวจสอบและสร้างตารางของแต่ละไอดี ส่วนสุดท้ายเป็นการสิ้นสุดการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล

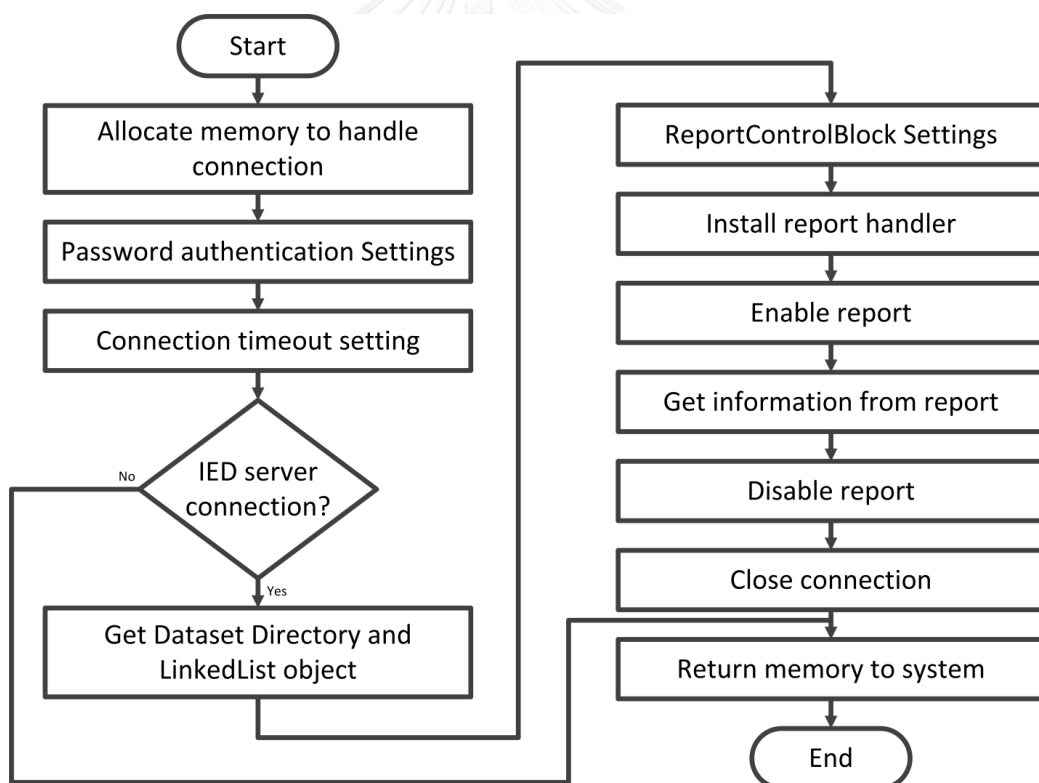


รูปที่ 43 ผังการทำงานฟังก์ชันการเพิ่มข้อมูล

ฟังก์ชันการเพิ่มข้อมูล (mysql\_insertDataCenter) แสดงในรูปที่ 43 เริ่มต้นการทำงานด้วยการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้จากการอ่านชุดข้อมูลของต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งมีข้อมูลค่าทางไฟฟ้า ข้อมูลค่าอุณหภูมิ ข้อมูลคุณภาพสถานะ และข้อมูลเวลาจัดเก็บ ใส่ในฐานข้อมูลและตารางตามไอดี ส่วนสุดท้ายเป็นการสิ้นสุดการเชื่อมต่อ

### 5.1.3 การออกแบบโปรแกรมส่วนโคลแอนท์ของศูนย์ข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

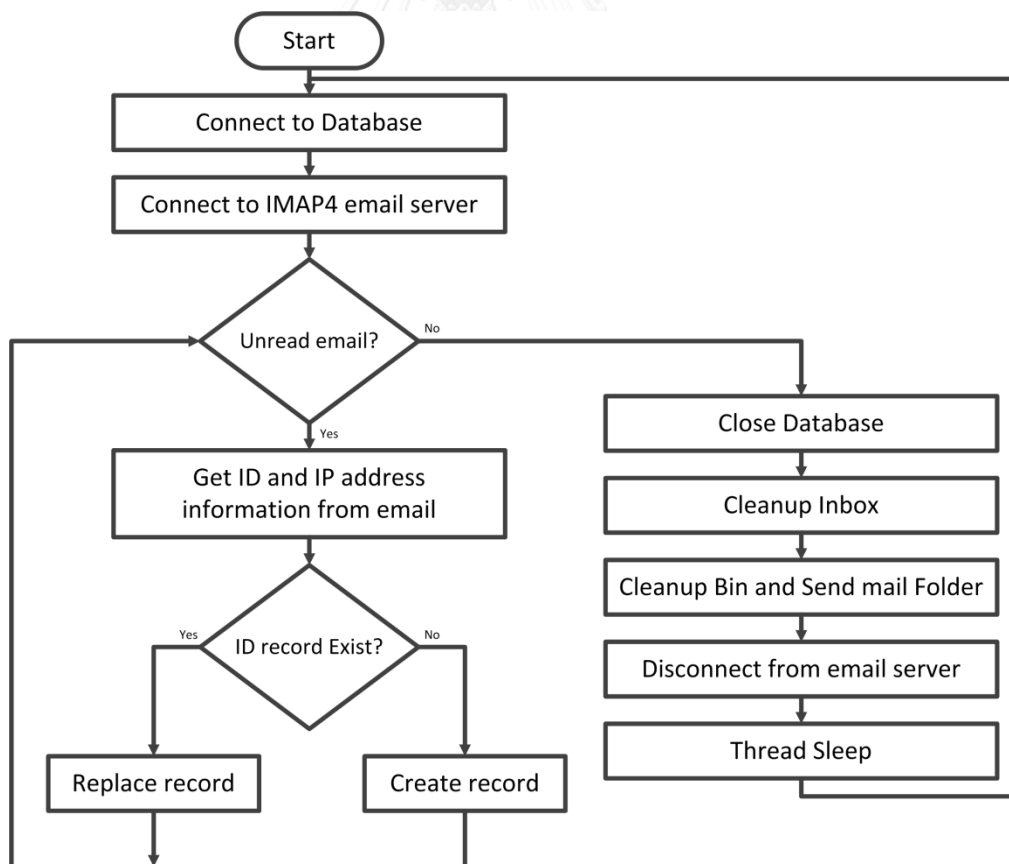
โปรแกรมส่วนโคลแอนท์ของศูนย์ข้อมูล เป็นส่วนที่บริหารจัดการโคลแอนท์เพื่อเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ การอ่านและจัดการกับชุดข้อมูล และสนับสนุนการตรวจสอบไอพีแอดเดรส รวมถึงบริหารจัดการอีเมลล์ เพื่อให้การเชื่อมต่อเป็นไปอย่างราบรื่น โดยมีเทรตของโปรแกรมส่วนโคลแอนท์ตามมาตรฐาน IEC61850 และเทรตสำหรับการตรวจสอบข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดกลางจากอีเมลล์



รูปที่ 44 ฟังก์การทำงานเทรตส่วนโคลแอนท์ของศูนย์ข้อมูล

เทรตส่วนโคลแอนท์ของศูนย์ข้อมูล (IED\_connection) แสดงในรูปที่ 44 เป็นเทรตที่เริ่มต้นการทำงานด้วยการจัดสรรหน่วยความจำเพื่อรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด ส่วนต่อมาทำการตั้งค่ารหัสผ่านและระยะเวลาในการเชื่อมต่อ จากนั้นเริ่มทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ถ้าเชื่อมต่อล้มเหลว จะคืนหน่วยความจำและจบเทรตสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์นี้ ถ้าการเชื่อมต่อสำเร็จ จะทำการเรียกรายชื่อ object ทั้งหมดที่อยู่ในชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการอ้างอิง ต่อมาตั้งค่าส่วนควบคุมและจัดการรายงาน รวมทั้งทำการรับรายงานชุดข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ เมื่อเสร็จสิ้นจะทำการสิ้นสุดการเชื่อมต่อและคืนหน่วยความจำแก่ระบบปฏิบัติการและจบการทำงาน

เทรตส่วนโคลแอนท์ของศูนย์ข้อมูล มีวัตถุประสงค์ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดเพื่อเก็บรายงานชุดข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์แต่ละรายและนำมาใส่ในฐานข้อมูล ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยมีการเรียกเก็บข้อมูลทุก 1 ชั่วโมง เพื่อให้ข้อมูลเพียงพอในการวิเคราะห์และไม่สร้างภาระแก่ศูนย์ข้อมูลจนเกินไป ในการสื่อสารกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดจำนวนมาก



รูปที่ 45 ผังการทำงานเทรตสำหรับการเช็คข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรส



เทรตสำหรับการเช็คข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรส (mail\_check) แสดงในรูปที่ 45 เป็นเทรตที่เริ่มต้นด้วยการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล และเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์อีเมลล์แบบ IMAP4 (Internet Message Access Protocol) ที่เป็นโพรโตคอลมาตรฐานที่ใช้ทำข้อมูลของอีเมลล์ให้สอดคล้องกัน (Synchronization) จากนั้นเลือกเช็คข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรสจากอีเมลล์ที่ยังไม่ได้อ่าน ถ้าไอดีที่อ่านได้มีอยู่ในระบบฐานข้อมูลให้ทำการแทนที่ด้วยข้อมูลไอพีแอดเดรสใหม่ ถ้าไม่มีให้สร้างเรคคอร์ดขึ้นมาใหม่ตามค่าไอดีและไอพีแอดเดรส จนอีเมลล์ที่ยังไม่ได้อ่านหมดไป ต่อมาจะทำการสิ้นสุดการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล และลบอีเมลล์เก่าในถาดเข้า ถาดออกรวมทั้งถังขยะ ส่วนสุดท้ายจะทำการสิ้นสุดการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์อีเมลล์

เทรตสำหรับการเช็คข้อมูลค่าไอดีและไอพีแอดเดรส ถูกออกแบบให้ตรวจสอบอีเมลล์เพื่อปรับปรุงค่าไอดีและไอพีแอดเดรสให้ทันสมัยอยู่เสมอ จึงมีการตรวจสอบอีเมลล์ทุก 5 นาที หรือถี่กว่านั้นถ้ามีปริมาณอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดจำนวนมากในระบบ



## 5.2 ระบบฐานข้อมูล (Database System)

ข้อมูลจำนวนมากของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ถูกวัดและรายงานไม่ว่าจะเป็นข้อมูลค่าทางไฟฟ้า สภาพแวดล้อม และสถานะเชิงคุณภาพ การบริหารจัดการข้อมูลจึงมีความสำคัญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อวัตถุประสงค์ในการเฝ้าสังเกตสถานะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า และนำไปวิเคราะห์เพื่อวางแผนในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุด ด้วยเหตุนี้ระบบฐานข้อมูลถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญาณฉลาดและศูนย์ข้อมูล เพื่อให้การเก็บข้อมูลเป็นไปอย่างมีระบบ และสามารถนำข้อมูลไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้เลือก MySQL เป็นระบบฐานข้อมูล โดยมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

1. การประมวลผลที่ไม่สูงมาก สามารถใช้ได้ในระบบที่มีทรัพยากรจำกัด
2. รองรับทั้งระบบปฏิบัติการวินโดวส์และลินุกซ์
3. การบริหารจัดการหน่วยความจำที่ดี และเก็บข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ
4. สนับสนุนการเชื่อมต่อกับภาษาที่ใช้พัฒนาหลายประเภท
5. ซอร์ฟแวร์ Open source

### 5.2.1 การออกแบบฐานข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญาณฉลาด

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญาณฉลาดจะมีการจัดเก็บข้อมูลสถานะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายทุก 5 นาที เพื่อให้ข้อมูลสามารถบอกลักษณะและวิเคราะห์สถานะได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ข้อมูลมีปริมาณมาก ใช้ทรัพยากรสูง ซึ่ง Beaglebone Green มีความสามารถในการประมวลผลที่จำกัด จึงส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเรียกดูข้อมูลในตารางที่มีขนาดใหญ่

งานวิจัยนี้ออกแบบฐานข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญาณฉลาดโดยแบ่งเป็นตาราง 2 แบบ คือตารางข้อมูลสถานะโดยรวม และตารางค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 46 มีลักษณะของข้อมูลดังนี้

1. ตารางข้อมูลสถานะโดยรวม เก็บข้อมูลเวลาในการจัดเก็บ สถานะของอุปกรณ์ ค่ากำลังไฟฟ้ารวม ค่าความถี่ ค่าพลังงานรวม ค่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและฉนวนน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วยค่าเชิงปริมาณและคุณภาพ
2. ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแต่ละเฟส เก็บข้อมูลเวลาในการจัดเก็บ ค่าแรงดัน ค่ากระแส ค่ากำลังไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง ซึ่งประกอบทั้งค่าเชิงปริมาณและคุณภาพ

## DTMS IED Database Model

DTMS_All	DTMS_L1	DTMS_L2	DTMS_L3
MeasTime	MeasTime	MeasTime	MeasTime
HealthStVal	VRMS	VRMS	VRMS
TotW	VRMS_Q	VRMS_Q	VRMS_Q
TotW_Q	IRMS	IRMS	IRMS
TotVAr	IRMS_Q	IRMS_Q	IRMS_Q
TotVAr_Q	W	W	W
TotVA	W_Q	W_Q	W_Q
TotVA_Q	VAr	VAr	VAr
TotPF	VAr_Q	VAr_Q	VAr_Q
TotPF_Q	VA	VA	VA
Hz	VA_Q	VA_Q	VA_Q
Hz_Q	PF	PF	PF
TotWh	PF_Q	PF_Q	PF_Q
TotWh_Q			
TotVArh			
TotVArh_Q			
TotVAh			
TotVAh_Q			
EnvTemp			
EnvTemp_Q			
OilTemp			
OilTemp_Q			

รูปที่ 46 ฐานข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวลวด

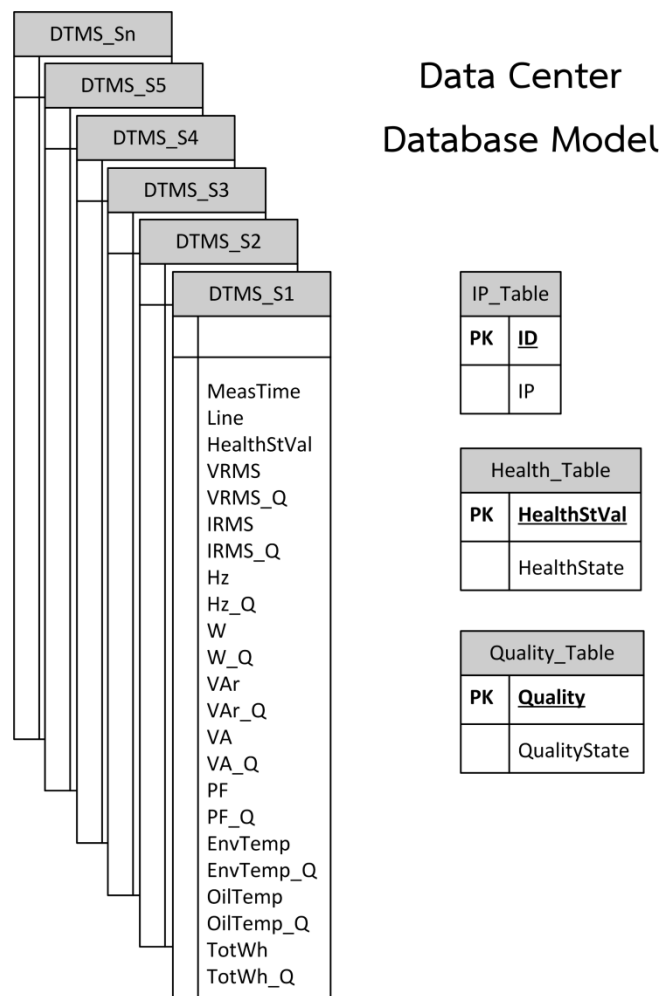
### 5.2.2 การออกแบบฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูล

ศูนย์ข้อมูลจะทำการเชื่อมต่อและเก็บข้อมูลสถานะจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวลวดในระบบทั้งหมดทุก 1 ชั่วโมง และใช้ในการแสดงผล ข้อมูลที่ต้องการเป็นลักษณะการเฝ้าสังเกตและสามารถบ่งบอกสถานะโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบได้ เพื่อให้เข้าใจง่าย เกิดความสะดวกรวดเร็วในการแสดงผลต่อผู้ใช้งาน จึงสร้างตารางข้อมูลต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละอัน เพื่อความยืดหยุ่นที่จะสร้างตารางเพิ่มขึ้นได้ตามจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ

งานวิจัยนี้ออกแบบฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูลโดยแบ่งเป็นตาราง 4 แบบ คือตารางข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ตารางอ้างอิงไอดีและไอพีแอดเดรส ตารางอ้างอิงสถานะ และตารางอ้างอิงลักษณะเชิงคุณภาพ ดังแสดงในรูปที่ 47 มีลักษณะของข้อมูลดังนี้

1. ตารางข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า เก็บข้อมูลเวลาในการจัดเก็บ เฟส สถานะของอุปกรณ์ ค่าแรงดัน ค่ากระแส ค่าความถี่ ค่ากำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง ค่าพลังงานรวม ค่าอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมและฉนวนน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วยค่าเชิงปริมาณและคุณภาพ

2. ตารางอ้างอิงไอดีและไอพีแอดเดรส เก็บข้อมูลสำหรับการอ้างอิงในการเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ รวมถึงหมายเลขประจำเครื่อง
3. ตารางอ้างอิงสถานะ เก็บข้อมูลสำหรับการอ้างอิงสถานะเพื่อการแปลผลที่ได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดแก่ผู้ใช้งาน
4. ตารางอ้างอิงลักษณะเชิงคุณภาพ เก็บข้อมูลสำหรับการอ้างอิงเชิงคุณภาพของพารามิเตอร์แต่ละค่าเพื่อแปลผลและระบุประเภทของความบกพร่อง



รูปที่ 47 ฐานข้อมูลของศูนย์ข้อมูล

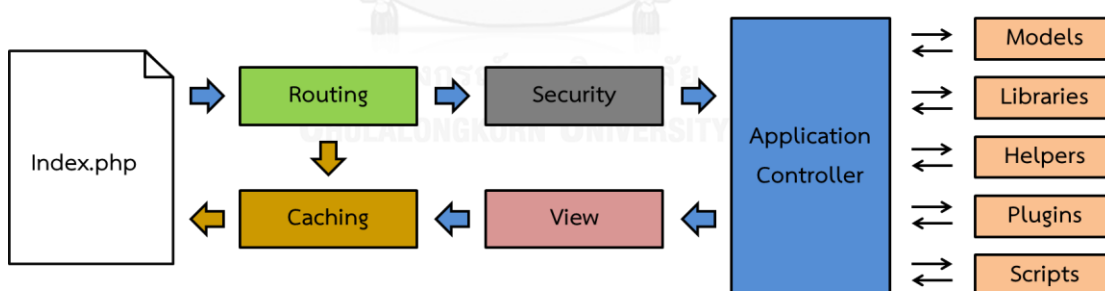
### 5.3 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานของศูนย์ข้อมูล (Data Center User Interface Design)

ศูนย์ข้อมูลถูกออกแบบโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือส่วนแรกเป็นการจัดการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กในระบบที่ได้กล่าวไปข้างต้น ส่วนที่สองทำหน้าที่จัดการติดต่อกับผู้ใช้งานศูนย์ข้อมูลโดยใช้เว็บไซต์ในการแสดงผล การพัฒนาศูนย์ข้อมูลในส่วนแสดงผลและติดต่อกับผู้ใช้งานของศูนย์ข้อมูลใช้ LAMP (Linux Apache MySQL and PHP) ซึ่งสามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ มี Apache สำหรับเว็บเซิร์ฟเวอร์ส่วนตัวเชื่อมต่อได้กับฐานข้อมูล MySQL รองรับภาษา PHP ที่เลือกใช้ในการสร้างเว็บไซต์

งานวิจัยนี้เลือกใช้ PHPMyAdmin และ Codeigniter เป็นอุปกรณ์เพิ่มเติมที่ช่วยในการพัฒนาเว็บไซต์ ซึ่ง PHPMyAdmin สามารถติดต่อกับฐานข้อมูล MySQL ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ทำให้สะดวกแก่การจัดการข้อมูลในศูนย์ข้อมูล ส่วน Codeigniter เป็นโครงร่างสำหรับพัฒนาเว็บไซต์ที่เป็นส่วนติดต่อและแสดงผลกับผู้ใช้งาน

#### 5.3.1 โครงสร้าง Codeigniter

Codeigniter คือโครงร่างสำหรับพัฒนาเว็บไซต์โดยใช้ภาษา PHP (Hypertext Preprocessor) รวมทั้งสนับสนุนด้วยไลบรารีที่หลากหลายและสามารถเข้าใจได้ง่าย ลดภาระในการเขียนโค้ดโปรแกรมได้มาก และมีประสิทธิภาพที่ดี ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการพัฒนาส่วนแสดงผลสำหรับศูนย์ข้อมูล ซึ่งมีหลักการทำงานแสดงในรูปที่ 48 [28] ดังนี้



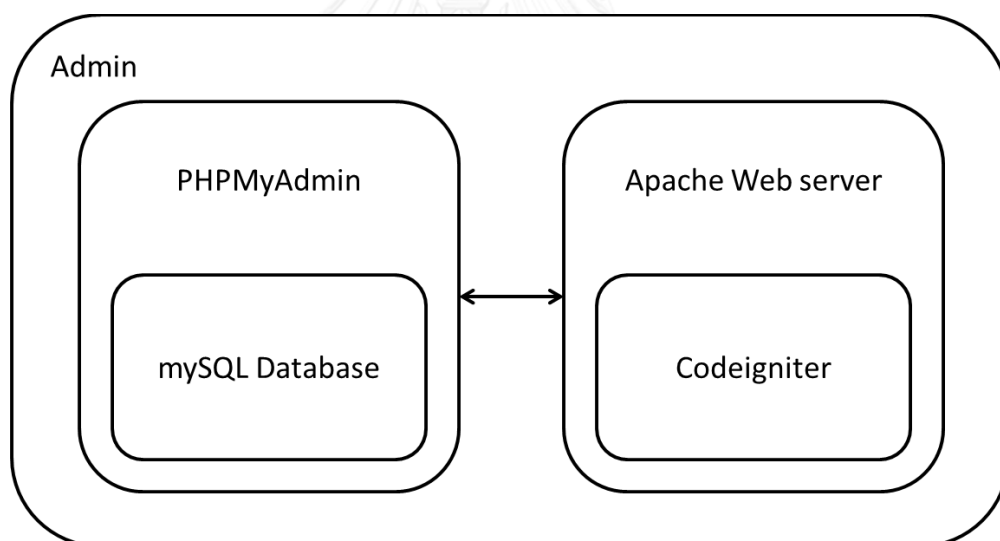
รูปที่ 48 ผังการทำงานของ Codeigniter

1. ส่วน index.php เป็นส่วนการควบคุมระหว่างผู้ใช้งานกับโปรแกรม ทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้น
2. ส่วน Routing เป็นส่วนที่ตรวจสอบคำขอ HTTP และกำหนดเส้นทางการทำงาน
3. ส่วน Cache เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลของเว็บไซต์ ถ้ามีอยู่ก็จะแสดงผลให้กับผู้ใช้งานโดยข้ามการทำงานปกติ

4. ส่วน Security เป็นส่วนความปลอดภัยทำหน้าที่กรองข้อมูลคำขอ HTTP ก่อนที่จะเข้าสู่ส่วน Controller
5. ส่วน Controller เป็นส่วนที่ประมวลผลและเชื่อมต่อกับไลบรารีส่วนต่างๆ เพื่อใช้ในการประมวลผลการร้องขอจากผู้ใช้
6. ส่วน View เป็นส่วนที่รับข้อมูลจาก Controller เพื่อนำไปประมวลผลและแสดงที่เว็บเบราว์เซอร์

### 5.3.2 โครงสร้างการแสดงผลเว็บไซต์ศูนย์ข้อมูลของระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

การแสดงผลเว็บไซต์เป็นการนำข้อมูลมาย่อและแสดงผลให้เกิดความเข้าใจที่ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างระบบฐานข้อมูล MySQL และเว็บเซิร์ฟเวอร์ Apache ส่วนเว็บไซต์ที่สร้างขึ้นใช้โครงสร้างของ Codeigniter ในการพัฒนาบนภาษา PHP สำหรับผู้ดูแลระบบสามารถเข้าถึงฐานข้อมูลได้ผ่าน PHPMyAdmin เพื่อสามารถบริหารจัดการฐานข้อมูลได้สะดวก แต่สำหรับผู้ใช้ทั่วไปสามารถเข้าถึงข้อมูลทางหน้าเว็บเพียงทางเดียว ทำให้ข้อมูลมีความปลอดภัยและน่าเชื่อถือ



รูปที่ 49 โครงสร้างการแสดงผลเว็บไซต์ศูนย์ข้อมูล

หน้าเว็บไซต์ออกแบบสำหรับระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่แสดงหม้อแปลงทั้งหมดในระบบและโหนดสถานะ เป็นข้อมูลเชิงกว้างเพื่อเฝ้าสังเกตระบบ ส่วนที่สองแสดงข้อมูลรายตัวของหม้อแปลงไฟฟ้ามีทั้งค่าเชิงปริมาณและคุณภาพรวมถึงข้อมูลกราฟย้อนหลัง เป็นการแสดงข้อมูลเชิงลึกของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวที่สามารถระบุปัญหาความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ เมื่อใช้ข้อมูลทั้งหมดร่วมกันจะช่วยให้ประสิทธิภาพของการทำงานของผู้ดูแลและอุปกรณ์สูงขึ้น

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งอุปกรณ์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และศูนย์ข้อมูล ประกอบด้วย การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 วงจรวัดค่าทางไฟฟ้า วงจรวัดอุณหภูมิ การใช้กระแสของอุปกรณ์ต้นแบบ และระบบเฝ้าสังเกตของศูนย์ข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 6.1 การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850

มาตรฐาน IEC61850 เป็นการนำเทคโนโลยีการสื่อสารมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้อุปกรณ์ในระบบสามารถใช้ร่วมกันได้ ซึ่งมาตรฐานระบบสารสนเทศที่นำมาใช้ล้วนเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น ภาษาเอ็กซ์เอ็มแอล (XML) ระบบอีเธอร์เน็ต มาตรฐาน MMS และ โพรโตคอล TCP/IP ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีต่างมีซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน แต่มาตรฐาน IEC61860 เป็นการบูรณาการเทคโนโลยีสารสนเทศหลายๆ ประเภทเข้าด้วยกัน

การทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 จึงต้องการซอฟต์แวร์เฉพาะที่เป็นการผสมผสานมาตรฐานหลายประเภท อันเนื่องด้วยเป็นมาตรฐานที่แพร่หลายในระบบไฟฟ้ากำลัง ผู้พัฒนาหลายรายจึงได้ออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อให้สามารถทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด เช่น IED Explorer [29] IED Scout (Omicron) IEC Browser (Siemens) และ IET600 (ABB) เป็นต้น ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ทำให้สามารถทดสอบการทำงาน ความถูกต้อง และการออกแบบ ว่ามีความสอดคล้องกับมาตรฐาน IEC61850 อย่างไม่มีข้อบกพร่อง

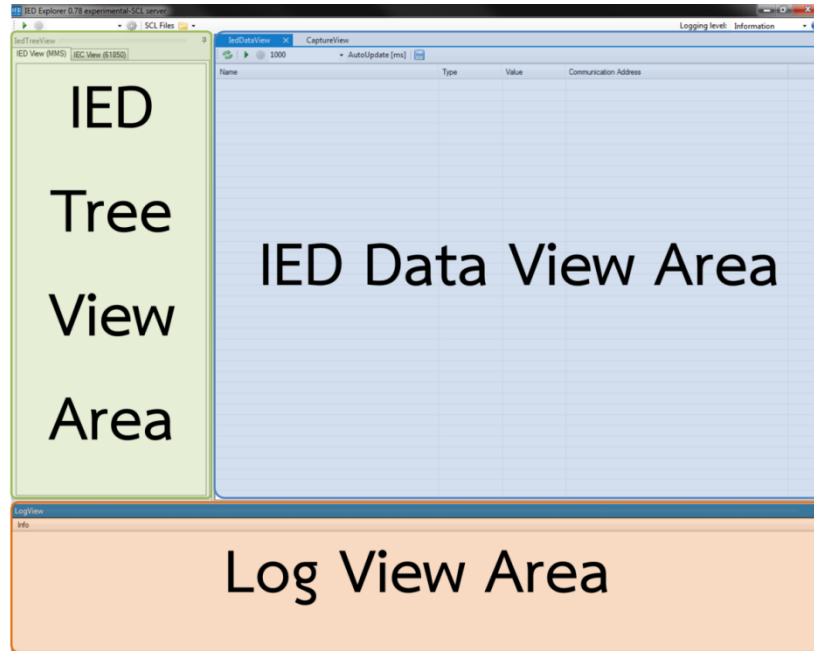
##### 6.1.1 วิธีการทดสอบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ IED Explorer เป็นซอฟต์แวร์สำหรับทดสอบการทำงานของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สซึ่งสะดวกแก่การทดสอบ และมีฟังก์ชันสนับสนุนที่ครอบคลุมการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดที่ออกแบบโดยมีส่วนประกอบของอินเตอร์เฟซ ส่วนหลัก 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 50 มีรายละเอียดดังนี้

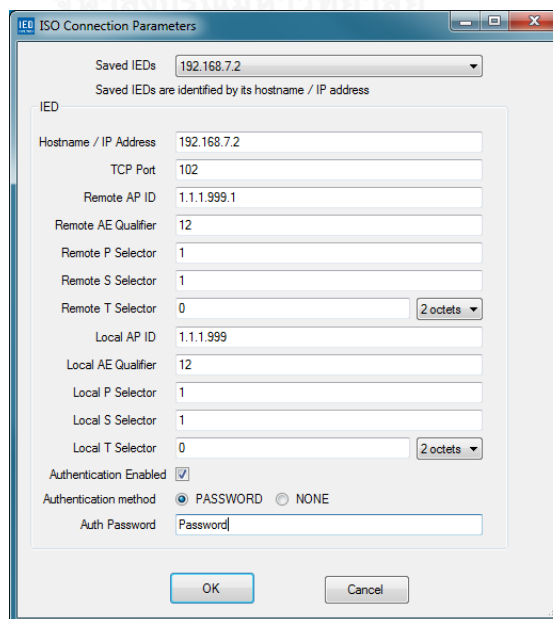
1. IED Tree View เป็นส่วนที่แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดแบบลำดับชั้น (Hierarchy) โดยมีมุมมอง 2 แบบ คือ IED View (MMS) และ IEC View (IEC61850)

2. IED Data View เป็นส่วนที่แสดงข้อมูลที่อ่านได้จาก Object ภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด

3. Log View เป็นส่วนที่แสดงสถานะการเชื่อมต่อระหว่างซอฟต์แวร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด



รูปที่ 50 อินเทอร์เน็ตซอฟต์แวร์ IED Explorer การทดสอบเริ่มต้นด้วยการตั้งค่าแถบ ISO Connection Parameters ซึ่งมีค่าไอพีแอดเดรส พอร์ตการสื่อสาร 102 รหัสผ่าน และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด ดังแสดงในรูปที่ 51



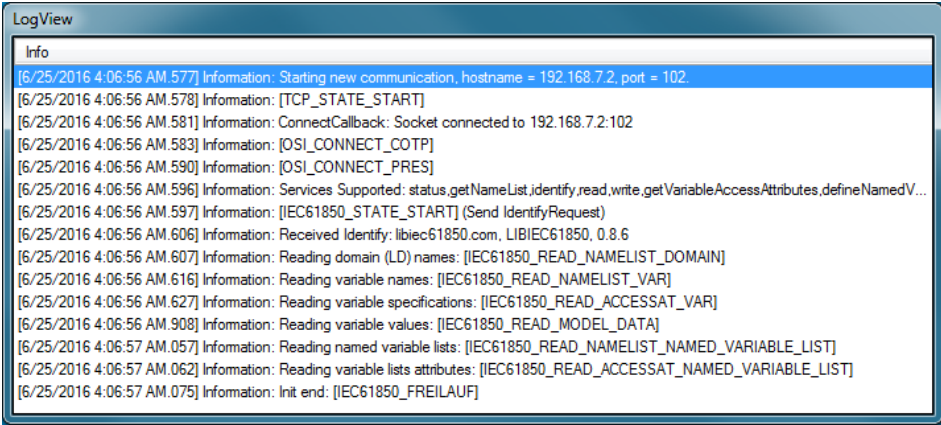
รูปที่ 51 การตั้งค่าแถบ ISO Connection Parameters



## 6.1.2 การทดสอบระบบตรวจสอบรหัสผ่าน

การทดสอบระบบตรวจสอบรหัสผ่าน (Password Authentication) ดำเนินการโดยตั้งค่าเริ่มต้นของซอฟต์แวร์ IED Explorer และทำการเชื่อมต่อกับตัวต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งทดสอบการเชื่อมต่อโดยใช้รหัสผ่านถูกต้องและรหัสผ่านไม่ถูกต้อง มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบการเชื่อมต่อโดยใช้รหัสผ่านถูกต้อง ซอฟต์แวร์ IED Explorer สามารถเชื่อมต่อกับต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายได้ สนับสนุนและตอบสนองการบริการ และสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 52

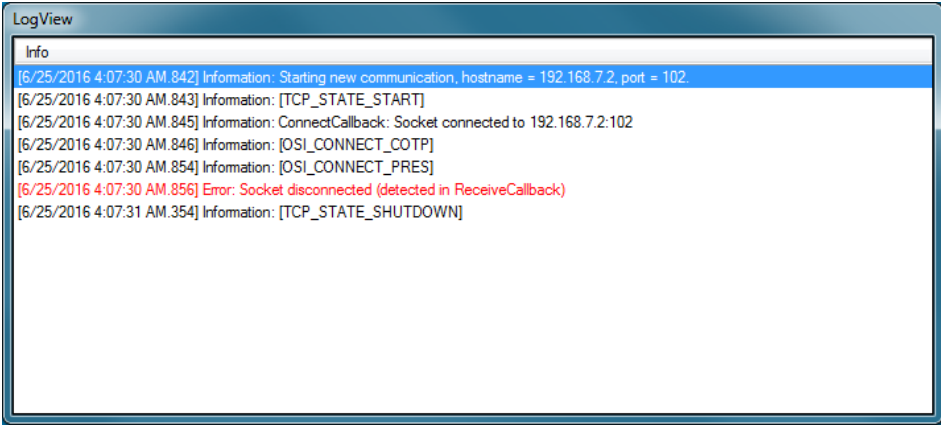


```

LogView
Info
[6/25/2016 4:06:56 AM.577] Information: Starting new communication, hostname = 192.168.7.2, port = 102.
[6/25/2016 4:06:56 AM.578] Information: [TCP_STATE_START]
[6/25/2016 4:06:56 AM.581] Information: ConnectCallback: Socket connected to 192.168.7.2:102
[6/25/2016 4:06:56 AM.583] Information: [OSI_CONNECT_COTP]
[6/25/2016 4:06:56 AM.590] Information: [OSI_CONNECT_PRES]
[6/25/2016 4:06:56 AM.596] Information: Services Supported: status.getNameList,identify.read,write.getVariableAccessAttributes,defineNamedV...
[6/25/2016 4:06:56 AM.597] Information: [IEC61850_STATE_START] (Send IdentifyRequest)
[6/25/2016 4:06:56 AM.606] Information: Received Identify: libiec61850.com, LIBIEC61850, 0.8.6
[6/25/2016 4:06:56 AM.607] Information: Reading domain (LD) names: [IEC61850_READ_NAMELIST_DOMAIN]
[6/25/2016 4:06:56 AM.616] Information: Reading variable names: [IEC61850_READ_NAMELIST_VAR]
[6/25/2016 4:06:56 AM.627] Information: Reading variable specifications: [IEC61850_READ_ACCESSAT_VAR]
[6/25/2016 4:06:56 AM.908] Information: Reading variable values: [IEC61850_READ_MODEL_DATA]
[6/25/2016 4:06:57 AM.057] Information: Reading named variable lists: [IEC61850_READ_NAMELIST_NAMED_VARIABLE_LIST]
[6/25/2016 4:06:57 AM.062] Information: Reading variable lists attributes: [IEC61850_READ_ACCESSAT_NAMED_VARIABLE_LIST]
[6/25/2016 4:06:57 AM.075] Information: Init end: [IEC61850_FREILAUF]
  
```

รูปที่ 52 การเชื่อมต่อตอบสนองจากต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกต

2. ผลการทดสอบการเชื่อมต่อโดยใช้รหัสผ่านไม่ถูกต้อง ซอฟต์แวร์ IED Explorer ไม่สามารถเชื่อมต่อกับตัวต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายได้ รหัสผ่านไม่ถูกยอมรับ จึงถูกปฏิเสธการเชื่อมต่อ และไม่มีการให้บริการใดๆเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 53



```

LogView
Info
[6/25/2016 4:07:30 AM.842] Information: Starting new communication, hostname = 192.168.7.2, port = 102.
[6/25/2016 4:07:30 AM.843] Information: [TCP_STATE_START]
[6/25/2016 4:07:30 AM.845] Information: ConnectCallback: Socket connected to 192.168.7.2:102
[6/25/2016 4:07:30 AM.846] Information: [OSI_CONNECT_COTP]
[6/25/2016 4:07:30 AM.854] Information: [OSI_CONNECT_PRES]
[6/25/2016 4:07:30 AM.856] Error: Socket disconnected (detected in ReceiveCallback)
[6/25/2016 4:07:31 AM.354] Information: [TCP_STATE_SHUTDOWN]
  
```

รูปที่ 53 การเชื่อมต่อถูกปฏิเสธจากต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกต

ระบบตรวจสอบรหัสผ่านของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายสามารถคัดกรองผู้ใช้งานได้ โดยสนับสนุนการให้บริการแก่ผู้ได้รับอนุญาต และปิดกั้นการเชื่อมต่อได้ ทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยเพิ่มขึ้น

### 6.1.3 การทดสอบโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด

การทดสอบโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด ดำเนินการโดยเชื่อมต่อซอฟต์แวร์ IED Explorer เข้ากับอุปกรณ์ จากนั้นเรียกดูโครงสร้าง ฟังก์ชันการทำงาน ประเภทของข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน IEC61850 และไฟล์ SCL ที่ออกแบบ มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาด ดังแสดงในรูปที่ 54 มุมมองที่เรียกดูมี 2 แบบ คือ

- IED Tree View เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดในมุมมองมาตรฐาน MMS โดยโครงสร้างข้อมูลแบ่งออกเป็น Logical node และแยกย่อยออกเป็น Functional Constraint (FC) ซึ่งเป็นการระบุโครงสร้างแบบแบ่งตามหน้าที่การทำงาน ซึ่งมีความสอดคล้องกับ มาตรฐาน IEC61850-7-2
- IEC Tree View เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดในมุมมองมาตรฐาน IEC61850 โดยโครงสร้างข้อมูลแบ่งออกเป็น Logical node และแยกย่อยออกเป็นข้อมูลเชิงวัตถุ (Data Object : DO) และข้อมูลเชิงลักษณะ (Data Attribute : DA) ซึ่งมีความสอดคล้องกับ มาตรฐาน IEC61850-7-4

โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาณฉลาดที่เรียกดูจากซอฟต์แวร์ IED Explorer มีประเภทของข้อมูล (Data Type) การเก็บข้อมูล (Variable Path) และฟังก์ชันการทำงาน ที่มีความสอดคล้องกับมาตรฐาน IEC61850 และไฟล์ SCL ของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย



รูปที่ 54 โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดจากซอฟต์แวร์ IED Explorer

#### 6.1.4 การทดสอบชุดข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด

การทดสอบชุดข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด ดำเนินการโดยใช้ IED Explorer และซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูลเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เพื่อร้องขอการเรียกดูชุดข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้องของการทำงาน

ซอฟต์แวร์ IED Explorer ร้องขออ่านชุดข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 55 ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาดตอบสนองข้อมูลในชุดกลับมามาดังแสดงในรูปที่ 56



ชุดข้อมูลที่อุปกรณ์ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายตอบสนองกับซอฟต์แวร์ IED Explorer ถูกแสดงในส่วน IED Data View ซึ่งแสดงข้อมูลชื่อ Object ประเภทของข้อมูล ค่าจากการวัด และที่อยู่ของ Object ภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาวลด แสดงในรูปที่ 57

Name	Type	Value	Communication Address
[Smart Transformer1/LLN0\$Events	IEDExplorer.Nod...		Deletable = False, Defined = True
CHILD NODES			
Smart Transformer1/MMXU1.PhV.phsA.cVal.mag.f	floating_point	233.556	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVPhVphsA.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.PhV.phsB.cVal.mag.f	floating_point	233.485	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVPhVphsB.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.PhV.phsC.cVal.mag.f	floating_point	233.3786	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVPhVphsC.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.A.phsA.cVal.mag.f	floating_point	0.009078338	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSAphsA.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.A.phsB.cVal.mag.f	floating_point	0.009078338	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSAphsB.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.A.phsC.cVal.mag.f	floating_point	0.009078338	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSAphsC.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.Hz.mag.f	floating_point	50	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSHz\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.W.phsA.cVal.mag.f	floating_point	0.9029835	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSWphsA.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.W.phsB.cVal.mag.f	floating_point	0.6668935	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSWphsB.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.W.phsC.cVal.mag.f	floating_point	0.6242999	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSWphsC.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.VAr.phsA.cVal.mag.f	floating_point	0.1594216	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAr.phsA.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.VAr.phsB.cVal.mag.f	floating_point	-0.03772573	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAr.phsB.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.VAr.phsC.cVal.mag.f	floating_point	0.1667234	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAr.phsC.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.VA.phsA.cVal.mag.f	floating_point	3.503625	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAphsA.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.VA.phsB.cVal.mag.f	floating_point	3.022238	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAphsB.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.VA.phsC.cVal.mag.f	floating_point	3.001021	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAphsC.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.PF.phsA.cVal.mag.f	floating_point	0.2577284	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSFPphsA.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.PF.phsB.cVal.mag.f	floating_point	0.2221321	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSFPphsB.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/MMXU1.PF.phsC.cVal.mag.f	floating_point	0.2080292	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSFPphsC.cVal\$mag\$f
Smart Transformer1/CCGR1.Env.Tmp.mag.f	floating_point	26.75725	Dom = Smart Transformer1 Var = CCGR1\$MXSEnv.Tmp\$mag\$f
Smart Transformer1/SIML1.Tmp.mag.f	floating_point	29.00977	Dom = Smart Transformer1 Var = SIML1\$MXSTmp\$mag\$f
Smart Transformer1/MMTR1.TotWh.act.Val.i	integer	0	Dom = Smart Transformer1 Var = MMTR1\$STSTotWh\$act\$Val\$i
Smart Transformer1/MMXU1.PhV.phsA.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVPhVphsA.q
Smart Transformer1/MMXU1.PhV.phsB.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVPhVphsB.q
Smart Transformer1/MMXU1.PhV.phsC.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVPhVphsC.q
Smart Transformer1/MMXU1.A.phsA.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSAphsA.q
Smart Transformer1/MMXU1.A.phsB.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSAphsB.q
Smart Transformer1/MMXU1.A.phsC.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSAphsC.q
Smart Transformer1/MMXU1.Hz.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSHz.q
Smart Transformer1/MMXU1.W.phsA.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSWphsA.q
Smart Transformer1/MMXU1.W.phsB.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSWphsB.q
Smart Transformer1/MMXU1.W.phsC.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSWphsC.q
Smart Transformer1/MMXU1.VAr.phsA.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAr.phsA.q
Smart Transformer1/MMXU1.VAr.phsB.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAr.phsB.q
Smart Transformer1/MMXU1.VAr.phsC.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAr.phsC.q
Smart Transformer1/MMXU1.VA.phsA.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAphsA.q
Smart Transformer1/MMXU1.VA.phsB.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAphsB.q
Smart Transformer1/MMXU1.VA.phsC.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSVAphsC.q
Smart Transformer1/MMXU1.PF.phsA.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSFPphsA.q
Smart Transformer1/MMXU1.PF.phsB.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSFPphsB.q
Smart Transformer1/MMXU1.PF.phsC.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMXU1\$MXSFPphsC.q
Smart Transformer1/CCGR1.Env.Tmp.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = CCGR1\$MXSEnv.Tmp.q
Smart Transformer1/SIML1.Tmp.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = SIML1\$MXSTmp.q
Smart Transformer1/MMTR1.TotWh.q	bit_string	0000000000000...	Dom = Smart Transformer1 Var = MMTR1\$STSTotWh.q

รูปที่ 57 ข้อมูล Object ของต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตที่อ่านได้ในซอฟต์แวร์ IED Explorer

ส่วนซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูลที่ออกแบบและพัฒนาระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ถูกใช้เป็นไคลแอนท์ในการร้องขออ่านชุดข้อมูลจากต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย อุปกรณ์ทั้งสองส่วนสามารถทำงานร่วมกันได้ และมีการรายงานผลของชุดข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 ดังแสดงในรูปที่ 58

```

sirochs@debian: ~/workspace/Data_server/Debug
File Edit View Search Terminal Help
sirochs@debian:~/workspace/Data_server/Debug$ sudo ./Data_server
Retrieving new mail...
Cleaning inbox...
24-Jun-2016
Emptying Bin...
Emptying Sent Mail...
IED ID : 1
IP address : 192.168.7.2:102
received report for SmartTransformer1/LLN0.RP.EventsRCB with rptId Events1
report contains timestamp (1466803393):Sat Jun 25 04:23:13 2016

SmartTransformer1/MMXU1.PhV.phsA.cVal.mag.f[MX] : 233.555984 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PhV.phsB.cVal.mag.f[MX] : 233.485016 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PhV.phsC.cVal.mag.f[MX] : 233.378571 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.A.phsA.cVal.mag.f[MX] : 0.009078 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.A.phsB.cVal.mag.f[MX] : 0.009078 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.A.phsC.cVal.mag.f[MX] : 0.009078 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.Hz.mag.f[MX] : 50.000000 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.W.phsA.cVal.mag.f[MX] : 0.902984 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.W.phsB.cVal.mag.f[MX] : 0.666894 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.W.phsC.cVal.mag.f[MX] : 0.624300 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VAr.phsA.cVal.mag.f[MX] : 0.159422 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VAr.phsB.cVal.mag.f[MX] : -0.037726 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VAr.phsC.cVal.mag.f[MX] : 0.166723 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VA.phsA.cVal.mag.f[MX] : 3.503625 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VA.phsB.cVal.mag.f[MX] : 3.002238 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VA.phsC.cVal.mag.f[MX] : 3.001021 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PF.phsA.cVal.mag.f[MX] : 0.257728 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PF.phsB.cVal.mag.f[MX] : 0.222132 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PF.phsC.cVal.mag.f[MX] : 0.208029 (included for reason 4)
SmartTransformer1/CCGR1.EnvTmp.mag.f[MX] : 26.757248 (included for reason 4)
SmartTransformer1/SIML1.Tmp.mag.f[MX] : 29.009771 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMTRL.TotWh.actVal.i[ST] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PhV.phsA.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PhV.phsB.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PhV.phsC.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.A.phsA.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.A.phsB.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.A.phsC.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.Hz.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.W.phsA.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.W.phsB.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.W.phsC.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VAr.phsA.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VAr.phsB.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VAr.phsC.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VA.phsA.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VA.phsB.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.VA.phsC.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PF.phsA.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PF.phsB.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMXU1.PF.phsC.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/CCGR1.EnvTmp.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/SIML1.Tmp.q[MX] : 0 (included for reason 4)
SmartTransformer1/MMTRL.TotWh.q[ST] : 0 (included for reason 4)

```

รูปที่ 58 ข้อมูล Object ของต้นแบบระบบไฟฟ้าสังเกตที่อ่านได้จากซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูล  
 ผลที่ได้จากการทดสอบระบบสื่อสารระหว่างต้นแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ  
 จำหน่าย กับซอฟต์แวร์ IED Explorer แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ต้นแบบสามารถใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์  
 มาตรฐาน IEC61850 ที่ใช้อยู่ในท้องตลาดได้ และผลที่ได้จากการทดสอบการสื่อสารและร้องขอ  
 บริการชุดข้อมูลมีความถูกต้องสอดคล้องกับมาตรฐานและซอฟต์แวร์ศูนย์ข้อมูลที่ออกแบบ

## 6.2 การทดสอบวงจรวัดค่าทางไฟฟ้า

### 6.2.1 วิธีการทดสอบวงจรวัดค่าทางไฟฟ้า

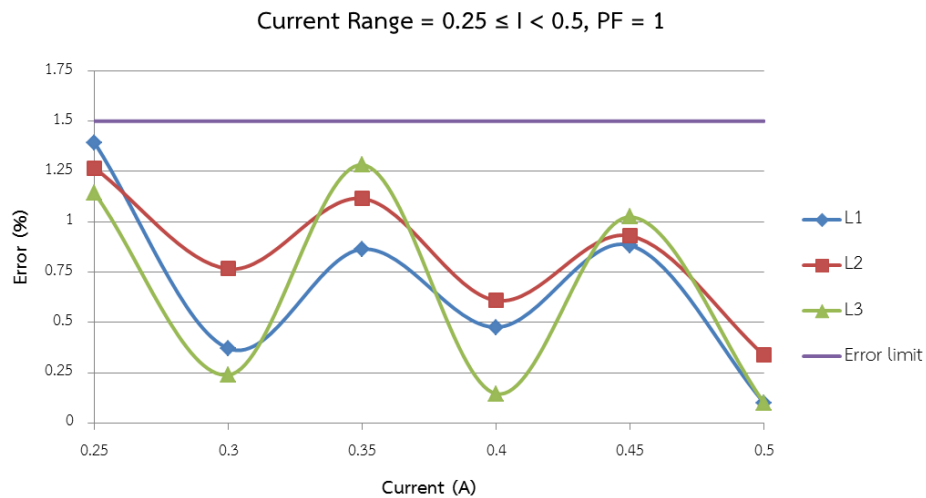
การทดสอบวงจรวัดค่าทางไฟฟ้าใช้เครื่องจ่ายโหลดไฟฟ้าเสมือนที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable Phantom load : MTE CALSOURCE 200) จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่วงจรที่ทำการทดสอบ และใช้มิเตอร์อ้างอิง (Reference Meter : MTE PRS 1.3 class 0.05) เป็นเครื่องวัดเพื่อทำการทดสอบและสอบเทียบอุปกรณ์ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

การทดสอบวงจรวัดค่าทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC62053-21 เป็นข้อกำหนดมาตรฐานในการทดสอบอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า [30] วิทยานิพนธ์นี้แบ่งการทดสอบวงจรวัดค่าทางไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนทดสอบกระแสไฟฟ้า และส่วนทดสอบแรงดันไฟฟ้า มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

### 6.2.2 ส่วนทดสอบกระแสไฟฟ้า

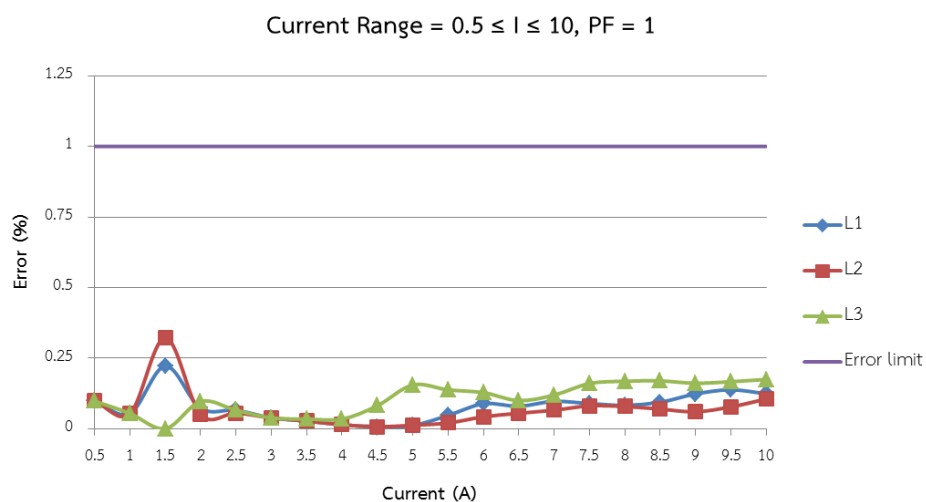
การทดสอบกระแสไฟฟ้าที่กำหนดตามมาตรฐาน IEC62053-21 ใช้ค่ากระแสพื้นฐาน ( $I_b$ ) 5 A ค่ากระแสสูงสุด ( $I_{max}$ ) 10 A ค่าแรงดันไฟฟ้า 220 V และค่าความถี่ 50 Hz ซึ่งมาตรฐาน Class 1 มีข้อกำหนดช่วงกระแสไฟฟ้าในการทดสอบและค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ดังแสดงในตารางที่ 10 ตารางที่ 10 ข้อกำหนดกระแสไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1

Current Range (A)	Power Factor	Class 1 (%)
$0.05I_b \leq I < 0.1I_b$	1	$\pm 1.5$
$0.1I_b \leq I \leq 0.1I_{max}$	1	$\pm 1.0$
$0.1I_b \leq I \leq 0.2I_b$	0.5 inductive	$\pm 1.5$
	0.8 capacitive	$\pm 1.5$
$0.2I_b \leq I \leq I_{max}$	0.5 inductive	$\pm 1.0$
	0.8 capacitive	$\pm 1.0$
$0.2I_b \leq I \leq I_b$	0.25 inductive	$\pm 3.5$
	0.5 capacitive	$\pm 2.5$



รูปที่ 59 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.25 \leq I < 0.5$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

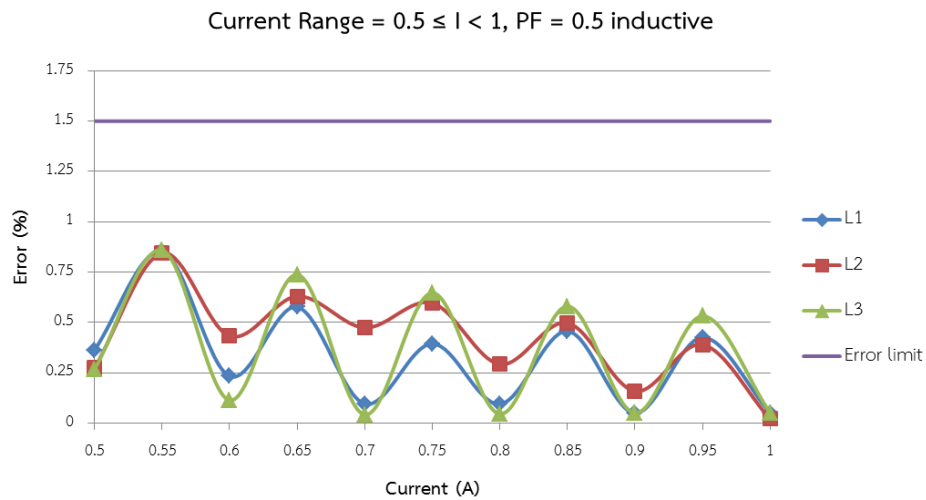
1. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.25 \leq I < 0.5$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 59 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 1.3930% 1.2675% และ 1.2828% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.5\%$



รูปที่ 60 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.5 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

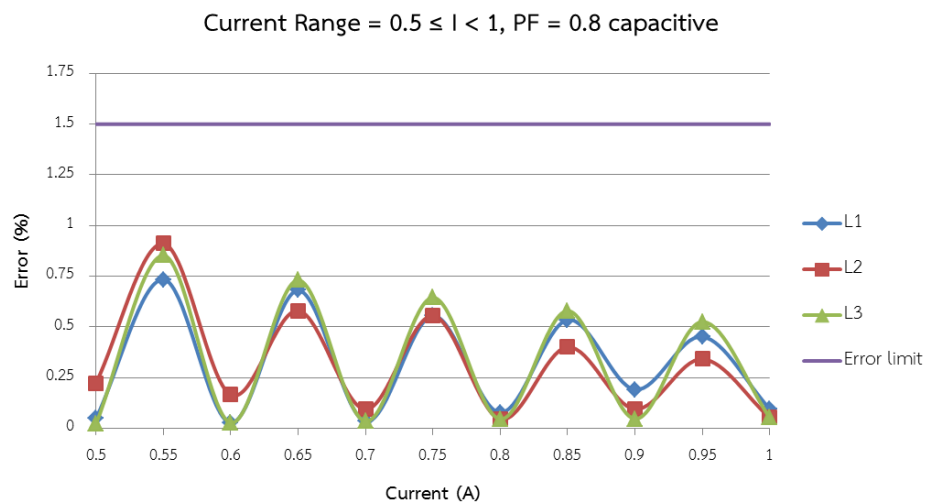
2. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.5 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 60 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.2223% 0.3235% และ 0.1748% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.0\%$





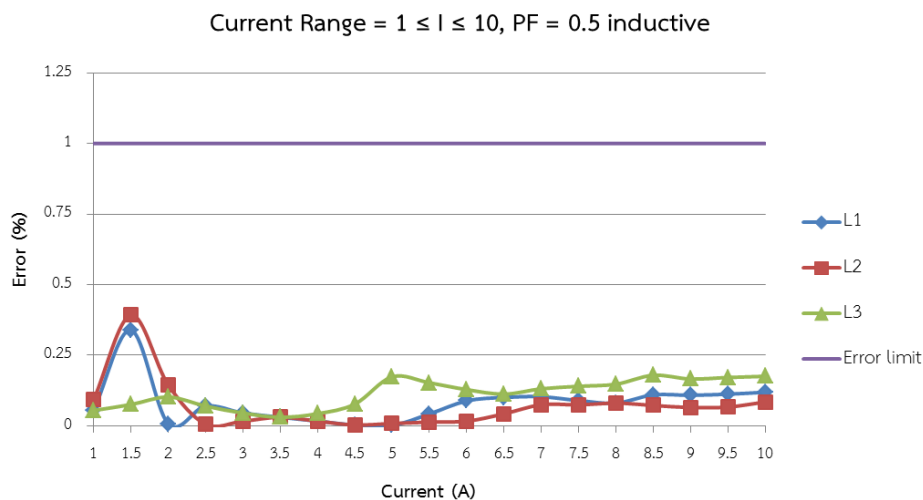
รูปที่ 61 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.5 \leq I < 1$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

3. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.5 \leq I < 1$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 61 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.8519% 0.8447% และ 0.8591% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.5\%$



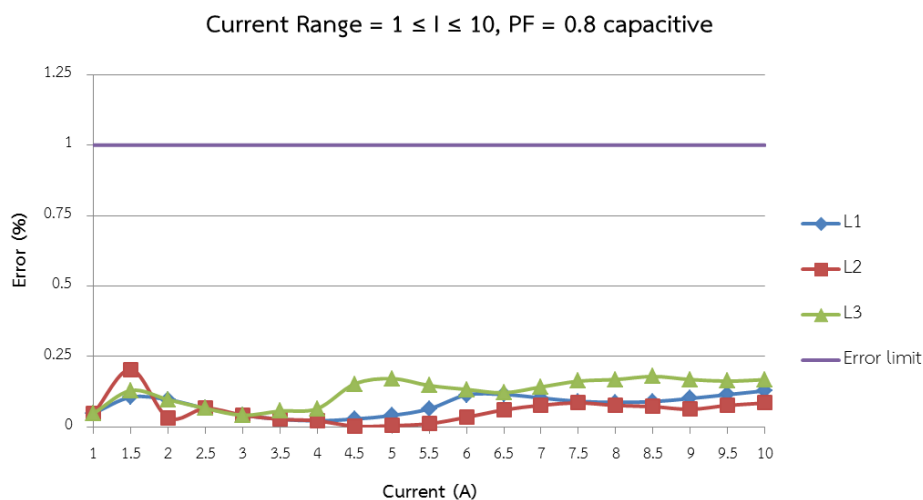
รูปที่ 62 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.5 \leq I < 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8

4. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $0.5 \leq I < 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ดังแสดงในรูปที่ 62 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.7338% 0.9109% และ 0.8519% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.5\%$



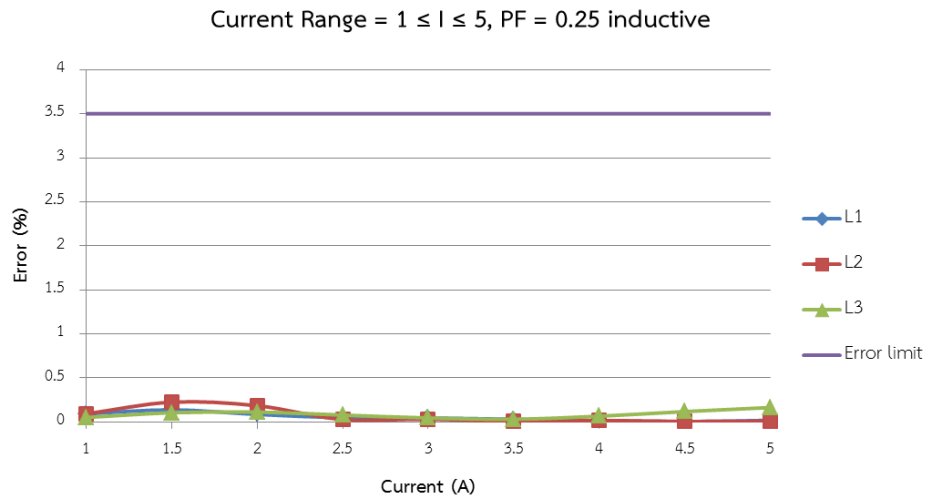
รูปที่ 63 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

5. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 63 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.3393% 0.3921% และ 0.1790% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.0\%$



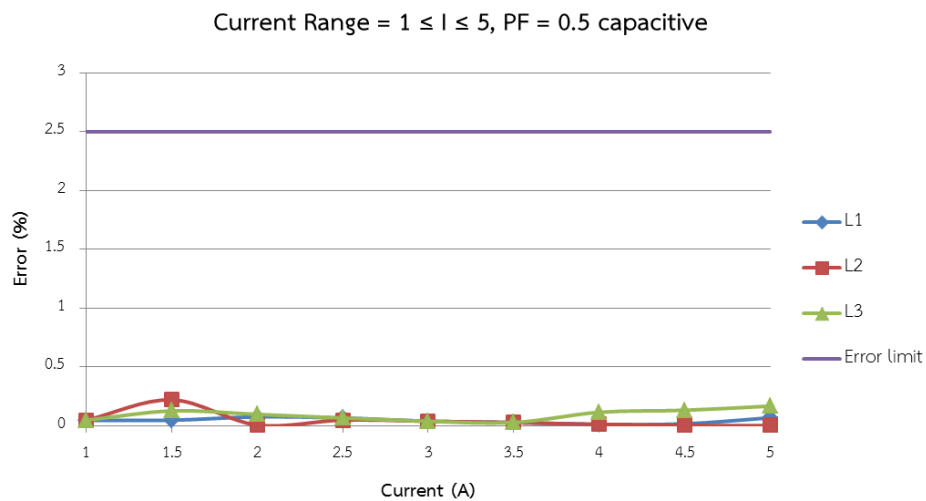
รูปที่ 64 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8

6. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ดังแสดงในรูปที่ 64 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.1285% 0.2036% และ 0.1790% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.0\%$



รูปที่ 65 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 5$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.25

7. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 5$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.25 ดังแสดงในรูปที่ 65 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.1379% 0.2247% และ 0.1642% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 3.5\%$



รูปที่ 66 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 5$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

8. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าช่วง  $1 \leq I \leq 5$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 66 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.0763% 0.2203% และ 0.1675% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 2.5\%$

สรุปผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 11 ผลการทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1

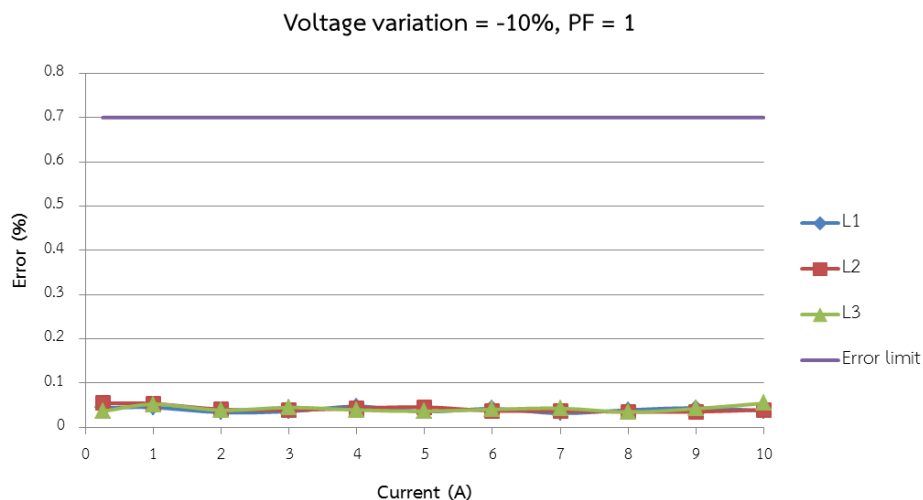
Current (A)	Power Factor	Class 1 (%)	Maximum Error (%)		
			L1	L2	L3
$0.25 \leq I < 0.5$	1	$\pm 1.5$	$\pm 1.3930$	$\pm 1.2675$	$\pm 1.2828$
$0.5 \leq I \leq 10$	1	$\pm 1.0$	$\pm 0.2223$	$\pm 0.3235$	$\pm 0.1748$
$0.5 \leq I < 1$	0.5 inductive	$\pm 1.5$	$\pm 0.8519$	$\pm 0.8447$	$\pm 0.8591$
	0.8 capacitive	$\pm 1.5$	$\pm 0.7338$	$\pm 0.9109$	$\pm 0.8519$
$1 \leq I \leq 10$	0.5 inductive	$\pm 1.0$	$\pm 0.3393$	$\pm 0.3921$	$\pm 0.1790$
	0.8 capacitive	$\pm 1.0$	$\pm 0.1285$	$\pm 0.2036$	$\pm 0.1790$
$1 \leq I \leq 5$	0.25 inductive	$\pm 3.5$	$\pm 0.1379$	$\pm 0.2247$	$\pm 0.1642$
	0.5 capacitive	$\pm 2.5$	$\pm 0.0763$	$\pm 0.2203$	$\pm 0.1675$

### 6.2.3 ส่วนทดสอบแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดตามมาตรฐาน IEC62053-21 ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าพื้นฐาน ( $I_b$ ) 5 A ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{max}$ ) 10 A ค่าแรงดันไฟฟ้า 220 V และค่าความถี่ไฟฟ้า 50 Hz ซึ่งมาตรฐาน Class 1 มีข้อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าแปรปรวนและค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ดังแสดงในตารางที่ 12

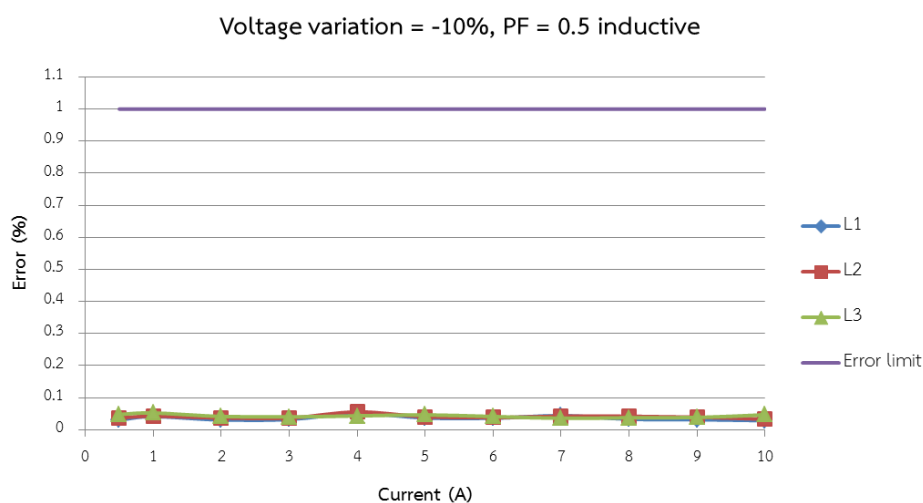
ตารางที่ 12 ข้อกำหนดแรงดันไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1

Voltage Variation (%)	Current Range (A)	Power Factor	Class 1 (%)
-10	$0.05I_b \leq I \leq I_{max}$	1	$\pm 1.5$
	$0.1I_b \leq I \leq I_{max}$	0.5 inductive	$\pm 1.5$
+10	$0.05I_b \leq I \leq I_{max}$	1	$\pm 1.0$
	$0.1I_b \leq I \leq I_{max}$	0.5 inductive	$\pm 1.0$



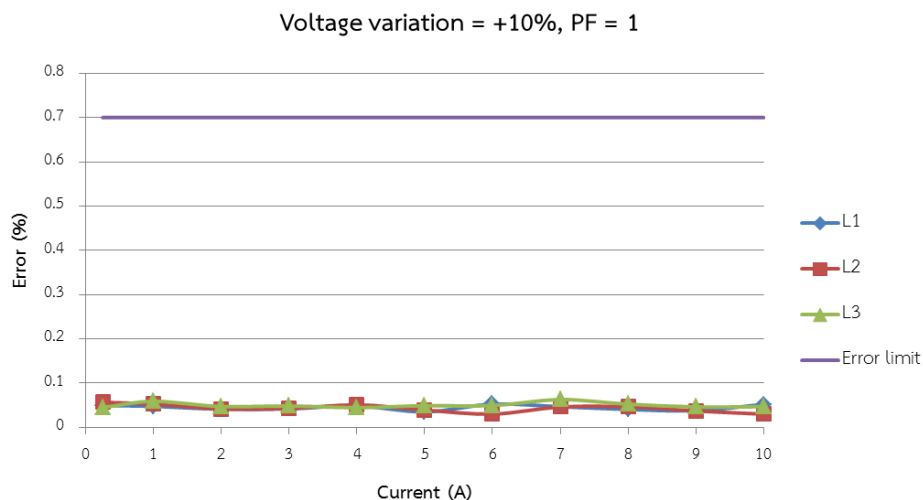
รูปที่ 67 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 198 V ช่วงกระแส  $0.25 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

1. ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 198 V ช่วงกระแส  $0.25 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 67 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.0474% 0.0549% และ 0.0546% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 0.7\%$



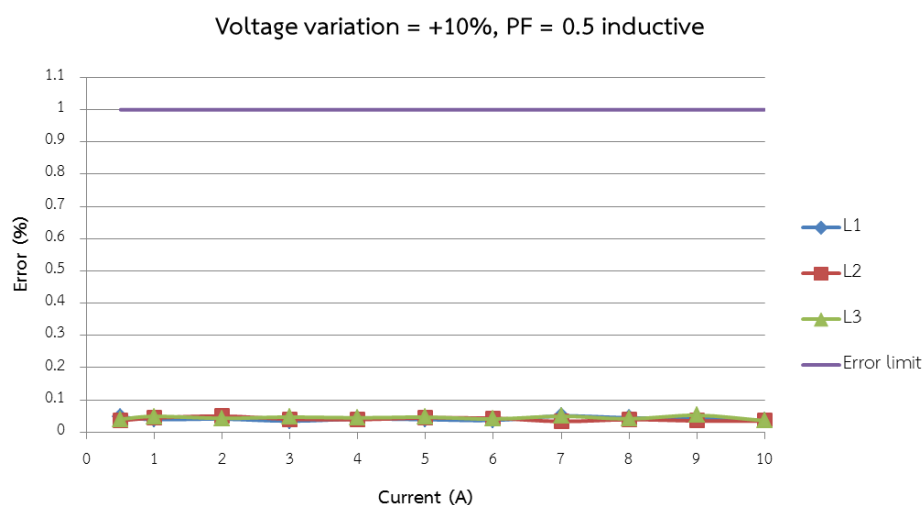
รูปที่ 68 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 198 V ช่วงกระแส  $0.5 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

2. ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 198 V ช่วงกระแส  $0.5 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 68 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.0509% 0.0557% และ 0.0523% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.0\%$



รูปที่ 69 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 242 V ช่วงกระแส  $0.25 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1

3. ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 242 V ช่วงกระแส  $0.25 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 69 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.0526% 0.0567% และ 0.0628% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 0.7\%$



รูปที่ 70 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 242 V ช่วงกระแส  $0.5 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

4. ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 242 V ช่วงกระแส  $0.5 \leq I \leq 10$  และตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 70 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของเฟส L1 L2 และ L3 เท่ากับ 0.0501% 0.0498% และ 0.0524% ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาดคือ  $\pm 1.0\%$

สรุปส่วนการทดสอบแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 13 ผลการทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไข  
อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC62053-21 Class 1

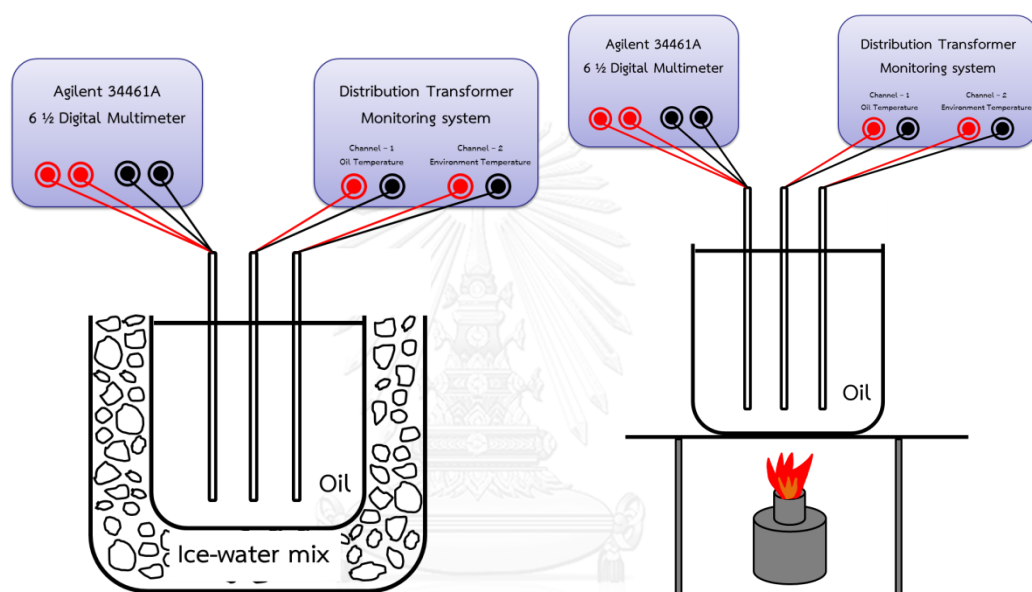
Voltage (V)	Current Range (A)	Power Factor	Class 1 (%)	Maximum Error (%)		
				L1	L2	L3
198	$0.25 \leq I \leq 10$	1	$\pm 0.7$	$\pm 0.0474$	$\pm 0.0549$	$\pm 0.0546$
	$0.5 \leq I \leq 10$	0.5 inductive	$\pm 1.0$	$\pm 0.0509$	$\pm 0.0557$	$\pm 0.0523$
242	$0.25 \leq I \leq 10$	1	$\pm 0.7$	$\pm 0.0526$	$\pm 0.0567$	$\pm 0.0628$
	$0.5 \leq I \leq 10$	0.5 inductive	$\pm 1.0$	$\pm 0.0501$	$\pm 0.0498$	$\pm 0.0524$



### 6.3 การทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิ

#### 6.3.1 วิธีการทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิ

การทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิใช้น้ำมันเป็นตัวกลางในการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้น้ำกับน้ำแข็งและเตาไฟสำหรับสร้างอุณหภูมิทดสอบ ส่วนการวัดอุณหภูมิใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิอาร์ทีดี เทียงตรงสูง (4 Wire PT100 1/10 DIN accuracy: Pico SE012) และดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (6½ Agilent 34451A 4 Wire DMM) เป็นตัวอ้างอิงในการวัดอุณหภูมิและสอบเทียบอุปกรณ์ต้นแบบหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ดังแสดงในรูปที่ 71



รูปที่ 71 การทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิ

การทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC60751 เป็นข้อกำหนดมาตรฐานในการทดสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ [31] มีข้อกำหนดค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ดังแสดงในตารางที่ 14 ตารางที่ 14 ข้อกำหนดความผิดพลาดของอุณหภูมิตามมาตรฐาน IEC60751

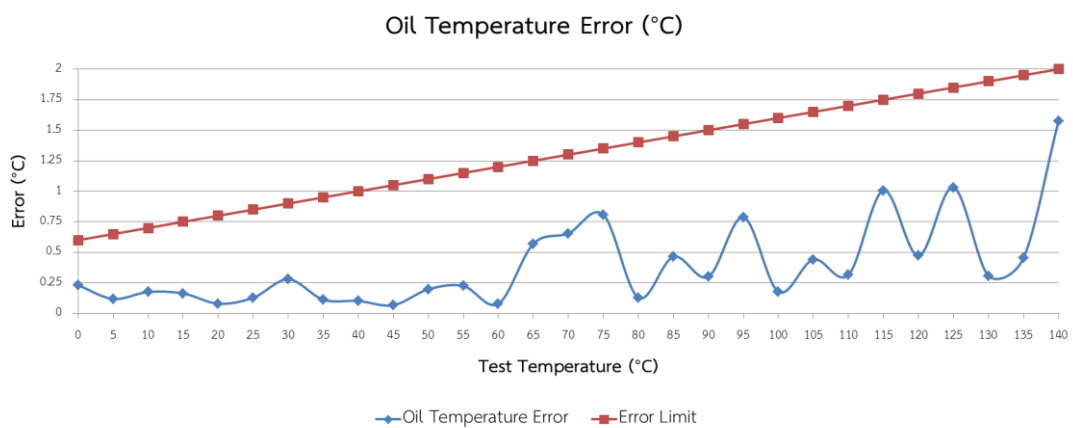
Tolerance class	Tolerance values °C	Tolerance values Ω
1/10 DIN	$\pm(0.03+0.0005 t )$	$\pm(0.0116+0.00019 t )$
1/3 DIN	$\pm(0.1+0.0017 t )$	$\pm(0.0385+0.00064 t )$
A	$\pm(0.15+0.002 t )$	$\pm(0.0578+0.00077 t )$
B	$\pm(0.3+0.005 t )$	$\pm(0.1156+0.00193 t )$
C	$\pm(0.6+0.01 t )$	$\pm(0.2310+0.00385 t )$



วิทยานิพนธ์นี้แบ่งการทดสอบอุณหภูมิออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนตัวรับรู้สำหรับฉนวนน้ำมัน ทดสอบในช่วง 0-140 °C และส่วนตัวรับรู้สำหรับสภาพแวดล้อมทดสอบในช่วง 0-100 °C ซึ่งมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

### 6.3.2 ส่วนทดสอบตัวรับรู้สำหรับฉนวนน้ำมัน

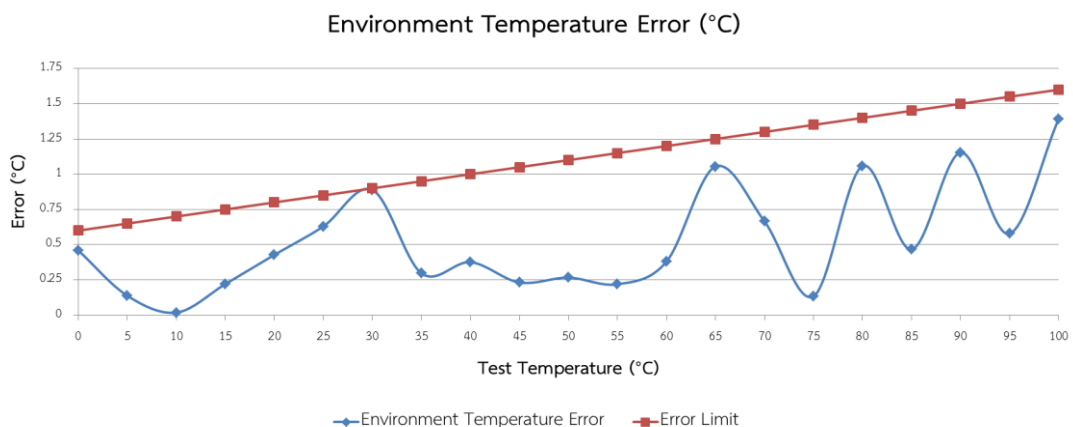
ผลการทดสอบตัวรับรู้สำหรับฉนวนน้ำมันในช่วงอุณหภูมิ 0-140 °C ดังแสดงในรูปที่ 72 มีความผิดพลาดที่ 0 °C และ 140 °C เท่ากับ 0.23042 °C และ 1.57521 °C ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาด Class C คือ  $\pm(0.6+0.01|t|)$  °C



รูปที่ 72 ผลการทดสอบตัวรับรู้สำหรับฉนวนน้ำมัน

### 6.3.3 ส่วนทดสอบตัวรับรู้สำหรับสภาพแวดล้อม

ผลการทดสอบตัวรับรู้สำหรับสภาพแวดล้อมในช่วงอุณหภูมิ 0-100 °C ดังแสดงในรูปที่ 73 มีความผิดพลาดที่ 0 °C และ 100 °C เท่ากับ 0.45946 °C และ 1.39237 °C ตามลำดับ ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดความผิดพลาด Class C คือ  $\pm(0.6+0.01|t|)$  °C



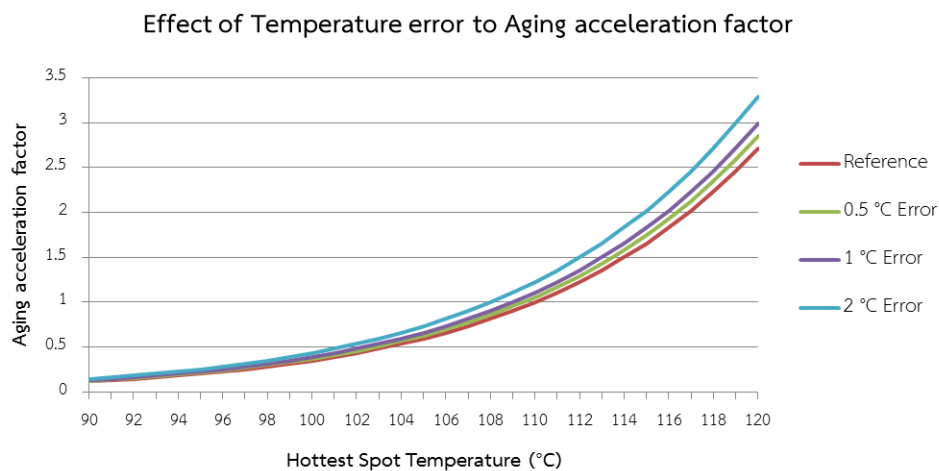
รูปที่ 73 ผลการทดสอบตัวรับรู้สำหรับสภาพแวดล้อม

สรุปผลการทดสอบตัวรับรู้สำหรับฉนวนน้ำมันและสภาพแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 15 ผลการทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60751 Class C

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบอุณหภูมิและความผิดพลาดตามมาตรฐาน IEC60751 Class C

Ref Sensor	Test Temperature Measurement (°C)								Maximum Error (°C)		
	DUT								IEC60751 Class C	Oil Temp	Env Temp
	Oil Sensor				Environment Sensor						
Avg	Min	Max	SD	Avg	Min	Max	SD				
0	0.23	-0.24	0.78	0.06	-0.46	-1.33	0.46	0.29	0.60	0.23	0.46
5	4.88	4.13	5.17	0.06	5.14	4.07	6.16	0.31	0.65	0.12	0.14
10	9.82	9.10	10.69	0.14	10.02	8.79	11.18	0.43	0.70	0.18	0.02
15	14.84	14.16	15.78	0.14	14.78	13.60	15.76	0.36	0.75	0.16	0.22
20	19.92	19.05	20.70	0.13	19.57	18.49	20.69	0.28	0.80	0.08	0.43
25	24.87	24.03	25.43	0.09	24.37	22.92	26.00	0.36	0.85	0.13	0.63
30	29.72	28.82	30.82	0.13	29.11	28.27	30.55	0.25	0.90	0.28	0.89
35	34.89	33.98	36.02	0.12	34.70	32.56	36.04	0.34	0.95	0.11	0.30
40	39.90	39.24	40.72	0.14	39.62	37.50	41.05	0.39	1.00	0.10	0.38
45	45.07	43.70	46.11	0.24	45.23	43.49	47.41	0.67	1.05	0.07	0.23
50	49.80	48.84	50.99	0.20	50.27	48.28	53.50	0.69	1.10	0.20	0.27
55	55.23	52.53	55.95	0.20	54.78	52.88	56.31	0.71	1.15	0.23	0.22
60	60.08	59.02	61.26	0.23	59.62	57.53	61.59	0.64	1.20	0.08	0.38
65	64.43	62.22	66.43	0.98	66.06	63.32	68.60	2.01	1.25	0.57	1.06
70	69.35	67.73	70.75	0.62	70.67	68.47	74.37	1.47	1.30	0.65	0.67
75	74.19	72.73	76.07	0.30	74.87	72.06	78.04	2.69	1.35	0.81	0.13
80	79.87	78.77	81.49	0.28	78.94	75.36	83.45	3.95	1.40	0.13	1.06
85	84.54	83.20	85.62	0.46	85.47	82.09	90.36	3.37	1.45	0.46	0.47
90	89.70	87.36	91.57	0.77	88.85	85.79	90.61	0.80	1.50	0.30	1.15
95	94.21	91.57	96.92	0.82	94.75	92.69	98.69	2.38	1.55	0.79	0.25
100	100.18	98.36	101.99	0.59	98.61	95.85	101.20	1.64	1.60	0.18	1.39
105	104.56	102.72	106.78	0.57	-	-	-	-	1.65	0.44	-
110	110.32	107.15	113.15	0.87	-	-	-	-	1.70	0.32	-
115	114.00	111.64	115.43	0.36	-	-	-	-	1.75	1.00	-
120	119.53	118.11	121.21	0.44	-	-	-	-	1.80	0.47	-
125	126.03	123.15	128.67	1.99	-	-	-	-	1.85	1.03	-
130	130.31	127.88	133.48	1.45	-	-	-	-	1.90	0.31	-
135	134.55	131.47	136.31	1.04	-	-	-	-	1.95	0.45	-
140	138.43	135.09	142.47	2.77	-	-	-	-	2.00	1.57	-

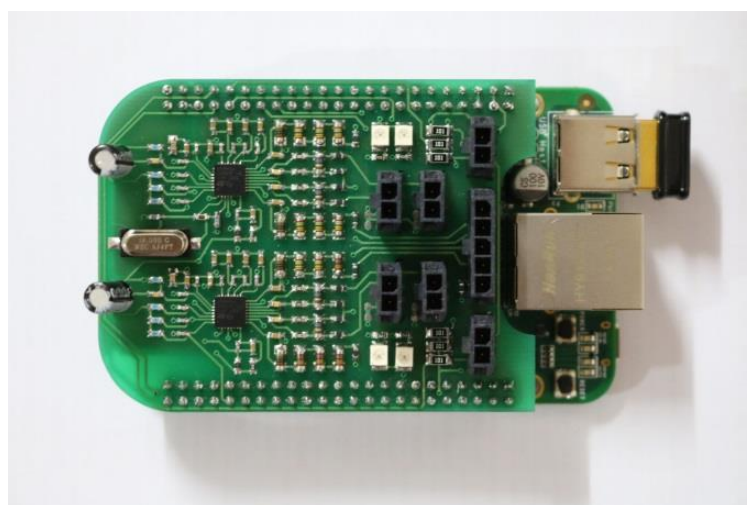
จากการพิจารณาสถานะโพลตามปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่อุณหภูมิสูงสุด 110 °C ตามมาตรฐาน IEC60751 Class C ความคลาดเคลื่อน 1.7°C มีช่วงในการประเมินอายุ -18.95% ถึง 15.98% และจากผลการทดลองความคลาดเคลื่อน 0.32 °C มีช่วงในการประเมินอายุ -3.22% ถึง 3.32%



รูปที่ 74 ผลกระทบความผิดพลาดของอุณหภูมิต่อค่าตัวประกอบเร่งอายุการใช้งาน ความผิดพลาดจากการวัดอุณหภูมิเป็นผลให้ค่าตัวประกอบเร่งอายุการใช้งานคลาดเคลื่อน (Aging acceleration factor) ดังแสดงในรูปที่ 74 จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนสูงจะทำให้การคาดคะเนอายุการใช้งานมีช่วงที่กว้าง ซึ่งอาจจะเป็นการประเมินที่มีการเร่งมากกว่าหรือน้อยกว่าปกติ

#### 6.4 การทดสอบการใช้กระแสของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายมีส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์หลายส่วน เช่น คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว Beaglebone Green กับระบบปฏิบัติการลินุกซ์ เดเบียน เป็น Host microprocessor ส่วนวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 ของวงจรที่ออกแบบ การสื่อสารประเภทต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 75 และซอฟต์แวร์เซิร์ฟเวอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด กระแสไฟฟ้าที่ใช้ ขึ้นอยู่กับการใช้กระแสพื้นฐานสำหรับส่วนบริหารจัดการระบบ ส่วนวงจรการวัด รูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสาร และภาระหน้าที่ในการประมวลผล



รูปที่ 75 ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ผู้วิจัยเลือกใช้งานส่วนของฮาร์ดแวร์ที่จำเป็นสำหรับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และปิดการใช้งานส่วนอื่นเพื่อประหยัดพลังงานส่วนที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ การวัดกระแสใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้า 5V ให้กับ Beaglebone Green และตัวบริหารจัดการพลังงาน (Power Management IC : PMIC) บนบอร์ดจะทำหน้าที่จัดสรรกระแสตามแรงดันที่เหมาะสมให้กับส่วนต่างๆ ซึ่งการใช้กระแสถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การใช้กระแสของต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

Section	Consideration parts	Current Consumption (mA)
Host Microprocessor	Beaglebone Green with Linux OS (Boost)	330
	Beaglebone Green with Linux OS (Idle)	135
Metering	STPM34 Monitoring module	10
Communication	RJ45 LAN Communication port	85
	USB WIFI Communication port	40
IEC61850 IED Server	IEC61850 Server task without Client	10
	IEC61850 Server task with Single client	40

ส่วน Host Microprocessor ในช่วงสถานะเริ่มต้นการทำงานจะใช้กระแสไฟฟ้า 330 mA และกระแสไฟฟ้าจะลดลงเหลือ 135 mA ในช่วงการทำงานปกติ

ส่วน Metering จ่ายกระแสสำหรับวงจรวัดพลังงานไฟฟ้า STPM34 2 ชุด และวงจรวัดอุณหภูมิ ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับโมดูลที่ออกแบบขึ้น 10 mA

ส่วน Communication ใช้การสื่อสารผ่านทางอินเทอร์เน็ตผ่านทางอีเธอร์เน็ตพอร์ตบนบอร์ด Beaglebone Green ใช้กระแส 85 mA และไวไฟผ่านพอร์ต USB (Edimax WIFI dongle) ใช้กระแส 40 mA

ส่วน IEC61850 IED Server ถ้าไม่มีการเชื่อมต่อกับ Client ในโครงข่ายจะใช้กระแสในการประมวลผลเซิร์ฟเวอร์ 10 mA แต่ถ้ามีการเชื่อมต่อเกิดขึ้นก็จะใช้กระแสสูงขึ้น ซึ่งถ้ามีหนึ่งผู้เชื่อมต่อจะใช้กระแส 40 mA

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าถ้าต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย มีการเชื่อมต่อผ่านพอร์ตอีเธอร์เน็ตกับผู้ใช้งานหนึ่งรายจะใช้กระแสในช่วงเริ่มต้นการทำงาน 380 mA และใช้กระแสในช่วงการทำงานปกติ 270 mA หรือคิดเป็นไฟฟ้าจำนวน 12 หน่วยต่อปี

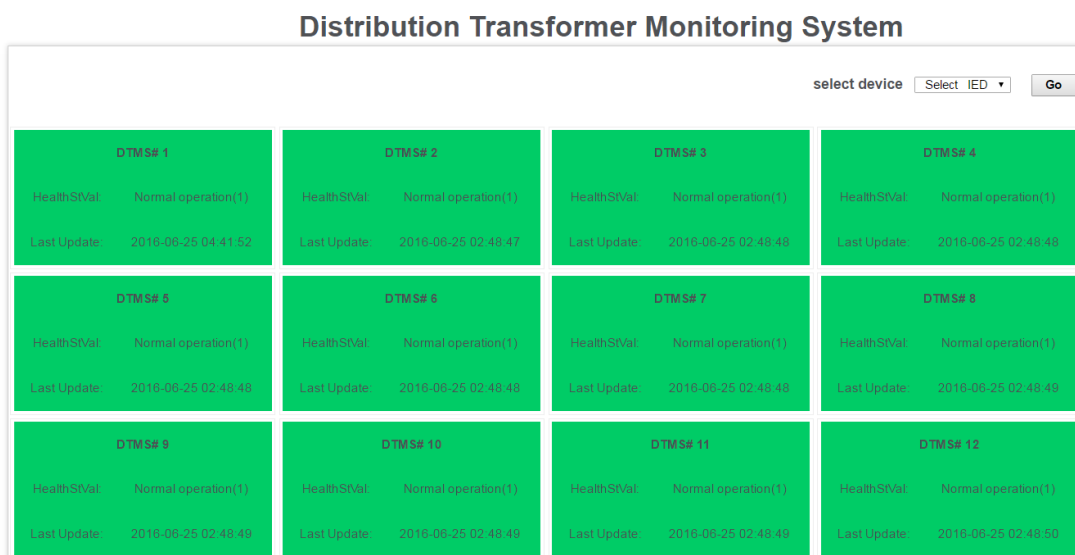
## 6.5 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับเฝ้าสังเกตของศูนย์ข้อมูล

ส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับเฝ้าสังเกตของศูนย์ข้อมูล [32] มีสองส่วนหลักคือ ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะโดยรวม และส่วนเฝ้าสังเกตสถานะเฉพาะตัว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะโดยรวม เป็นส่วนที่แสดงสถานะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายในระบบ (Health stVal) ทำให้สามารถเฝ้าสังเกตภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบและระบุสถานะได้ โดยถูกแบ่งออกเป็นสามสถานะคือ

- Normal Operation (1) แสดงสถานะปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า
- Warning (2) แสดงสถานะระมัดระวังของหม้อแปลงไฟฟ้า
- No Operation or Alarm (3) แสดงสถานะการทำงานผิดปกติหรือแจ้งเตือนของหม้อแปลงไฟฟ้า

ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะโดยรวม ดังแสดงในรูปที่ 76 จะแสดงหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายทั้งหมดในระบบ สามารถเฝ้าสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสถานะได้ง่ายและเห็นภาพรวมของระบบ ซึ่งสถานะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายถูกแบ่งออกเป็นสีเขียว เหลือง และแดง เพื่อให้สะดวกในการจำแนกสถานะมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 77

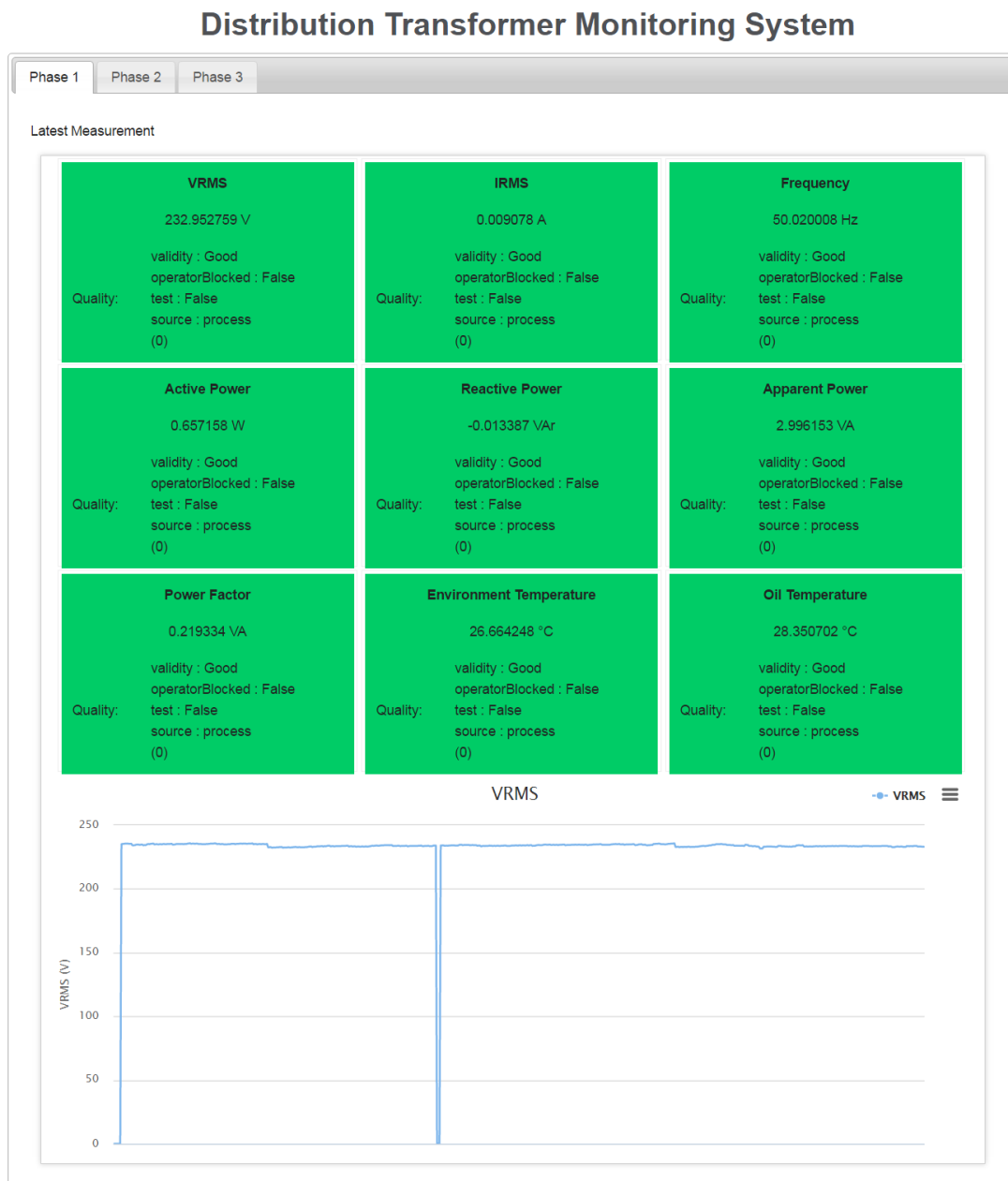


รูปที่ 76 ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย



รูปที่ 77 สถานะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

2. ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะเฉพาะตัว เป็นส่วนที่แสดงข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัว โดยแบ่งข้อมูลแยกเป็นเฟส ซึ่งแต่ละเฟสประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ทำให้สามารถเฝ้าสังเกตสถานะเฉพาะตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยมีค่า Quality Attribute เป็นส่วนระบุประเภทของความผิดปกติของข้อมูล ส่วนล่างจะเป็นส่วนแสดงกราฟข้อมูลย้อนหลัง ดังแสดงในรูปที่ 78



รูปที่ 78 ส่วนเฝ้าสังเกตสถานะเฉพาะตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ประเภทของความผิดปกติของพารามิเตอร์ ได้ถูกเก็บเป็นค่าตัวเลขไบนารี ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับเฝ้าสังเกตของศูนย์ข้อมูล จะทำการแปรผลเพื่อบ่งบอกสถานะความผิดปกติและจำแนกตามสี ดังแดงในรูปที่ 79 โดยแบ่งเป็นสามสถานะ คือ

- Good แสดงสถานะปกติของพารามิเตอร์ เป็นสีเขียว
- Questionable แสดงสถานะน่าสงสัยของพารามิเตอร์ เป็นสีเหลือง
- Invalid แสดงสถานะผิดปกติของพารามิเตอร์ เป็นสีแดง

VRMS	Frequency	Power Factor
233.449539 V	53.181381 Hz	0
validity : Good operatorBlocked : False	validity : Questionable - outOfRange operatorBlocked : False	validity : Invalid - overflow operatorBlocked : False
Quality: test : False source : process (0)	Quality: test : False source : process (11)	Quality: test : False source : process (14)

รูปที่ 79 ประเภทของความผิดปกติของพารามิเตอร์

ส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับเฝ้าสังเกตของศูนย์ข้อมูลสามารถเข้าถึงได้ง่ายทางเว็บเบราว์เซอร์ ข้อมูลถูกประมวลผลและจำแนกซึ่งง่ายต่อการเฝ้าสังเกต สามารถประเมินระบบรวมทั้งระบุความผิดปกติได้ ทำให้สามารถดำเนินการแก้ไขหรือบำรุงรักษาได้อย่างทันท่วงที

## บทที่ 7

### ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทสุดท้ายนี้จะกล่าวถึงผลสรุปการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ แนวทางในการพัฒนาต่อยอด และข้อเสนอแนะ จากการทำงานวิจัยนี้

#### 7.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายบนมาตรฐาน IEC61850 ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารในระบบไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบโครงสร้างพื้นฐานการวัดขั้นสูง (AMI) ประกอบไปด้วยต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตและศูนย์ข้อมูล ถูกพัฒนาโดยใช้ภาษา C++ บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ความสามารถของฮาร์ดแวร์และการสื่อสารที่มีอยู่ในปัจจุบันถูกเปรียบเทียบและพิจารณาเลือกใช้อย่างเหมาะสม โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตและเครือข่ายที่เสริมความปลอดภัยให้สูงขึ้น

ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ถูกพัฒนาโดยใช้คอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว Beaglebone Green ร่วมกับโมดูลการวัดที่ออกแบบสามารถวัดค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิได้ ซอร์ฟแวร์บนตัวอุปกรณ์ถูกออกแบบให้มีความสามารถในการสื่อสารและโครงสร้างของ Object สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC61850 มีการเพิ่มความเร็วในการทำงานและความน่าเชื่อถือด้วยระบบชุดข้อมูลและตรวจสอบรหัสผ่าน

ศูนย์ข้อมูล ถูกพัฒนาเป็นไคล์แอนท์ในการเข้าถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชาญฉลาด รวมถึงจัดการกับข้อมูลปริมาณมากโดยใช้การออกแบบฐานข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบได้อย่างสะดวก เว็บเซิร์ฟเวอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งมีการประมวลผลเพิ่มเติมเพื่อจำแนกประเภทของความผิดปกติได้ และเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีทั้งต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตและศูนย์ข้อมูล ได้มีการออกแบบระบบบริหารการเธรด (Thread Management) ที่เหมาะสมกับระบบ

การทดสอบต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย พบว่าการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850 สามารถใช้ร่วมกับซอร์ฟแวร์ที่ใช้อยู่ในท้องตลาดได้ ฟังก์ชันการรับส่งชุดข้อมูล และตรวจสอบรหัสผ่านสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง การทดสอบความผิดพลาดในการวัดพลังงานไฟฟ้าของต้นแบบได้มาตรฐาน IEC62053-21 ระดับ Class 1 ความผิดพลาดในการวัดอุณหภูมิได้มาตรฐาน IEC60751 ระดับ Class C และใช้กระแสในการทำงานที่ไม่สูงมาก ส่วนศูนย์ข้อมูล การใช้งานส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับเฝ้าสังเกต สามารถแสดงค่าเชิงปริมาณและค่าเชิงคุณภาพได้อย่างถูกต้อง



## 7.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่มีรูปแบบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC61850
2. ได้เว็บเซิร์ฟเวอร์ที่แสดงผลการเฝ้าสังเกตและจำแนกประเภทความผิดปกติอย่างง่ายได้
3. ได้โปรแกรมประยุกต์ศูนย์ข้อมูลสำหรับติดต่อกับต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายผ่านการสื่อสารอีเธอร์เน็ตตามมาตรฐาน IEC61850

## 7.3 ข้อเสนอแนะ

1. มาตรฐานการสื่อสาร IEC61850 มีความสิ้นเปลืองการส่งข้อมูลสูง จึงต้องการอินเทอร์เน็ตที่มีเสถียรภาพที่ดีและความเร็วที่เพียงพอ เพื่อให้การรับส่งชุดข้อมูลมีความสมบูรณ์
2. เทคโนโลยีในภายหน้าจะมีการส่งข้อมูลอินเทอร์เน็ตของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สูงขึ้น การประยุกต์ใช้โมเด็มการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของอุปกรณ์ต้นแบบ
3. คอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในอนาคตคาดว่าจะมีความสามารถการประมวลผล การสื่อสาร ที่มากขึ้น รวมทั้งขนาดเล็กลง ราคาถูกลง
4. สามารถพัฒนาซอฟต์แวร์ในการประมวลผลข้อมูลที่ได้ สำหรับวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายอย่างแม่นยำ เพื่อการประเมินการบำรุงรักษามีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด
5. พัฒนาต่อยอดต้นแบบระบบเฝ้าสังเกต ให้สามารถควบคุมการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายได้

## รายการอ้างอิง

- [1] (2015, March). โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (*Smart Grid*). Available: <http://www.ee.eng.chula.ac.th/smartgrids/index.php/smart-grids/80--smart-grids/smartgrid-doc/72>
- [2] H. Ma, T. K. Saha, C. Ekanayake, and D. Martin, "Smart Transformer for Smart Grid ;Intelligent Framework and Techniques for Power Transformer Asset Management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1026-1034, 2015.
- [3] W. Hongjie, H. Xiao, Y. Ning, D. Yanguo, and C. Wenzhi, "A new integrated design of smart transformer," in *Electricity Distribution (CICED), 2014 China International Conference on*, 2014, pp. 314-316.
- [4] R. E. Mackiewicz, "Overview of IEC 61850 and Benefits," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, 2006, pp. 376-383.
- [5] R. Godina, E. Rodrigues, J. Matias, and J. Catalão, "Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges," vol. 8, ed, 2015, pp. 12147-12186.
- [6] M. Srinivasan and A. Krishnan, "Prediction of Transformer Insulation Life with an Effect of Environmental Variables," *International Journal of Computer Applications*, vol. 55, 2012.
- [7] A. Shiri, A. Gholami, and A. Shoulaie, "Investigation of the ambient temperature effects on transformer's insulation life," *Electrical Engineering*, vol. 93, pp. 193-197, 2011.
- [8] "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators - Redline," *IEEE Std C57.91-2011 (Revision of IEEE Std C57.91-1995) - Redline*, pp. 1-172, 2012.
- [9] y. Song, Q. Wang, and D. w. Wang, "Condition monitoring information model based on 61850 and 61970," in *Computer Research and Development (ICCRD), 2011 3rd International Conference on*, 2011, pp. 189-191.

- [10] N. M. Rao, R. Narayanan, B. R. Vasudevamurthy, and S. K. Das, "Performance requirements of present-day distribution transformers for Smart Grid," in *2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 2013, pp. 1-6.
- [11] (2015). *Arduino - IntelGalileo*. Available: <https://www.arduino.cc/en/ArduinoCertified/IntelGalileo>
- [12] (2015). *BeagleBoard.org - bone*. Available: <http://beagleboard.org/bone>
- [13] (2015). *DragonBoard 410c - Low-Cost Product Development Platform*. Available: <http://www.96boards.org/product/dragonboard410c/>
- [14] (2015). *Get C.H.I.P. - The World's First Nine Dollar Computer*. Available: <https://getchip.com/pages/chip>
- [15] (2015). *ODROID | Hardkernel*. Available: [http://www.hardkernel.com/main/products/prdt\\_info.php](http://www.hardkernel.com/main/products/prdt_info.php)
- [16] (2015, August). *Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi*. Available: <https://www.raspberrypi.org/>
- [17] (2014, August). *ADE7878 Datasheet and Product Info | Analog Devices*. Available: <http://www.analog.com/en/products/analog-to-digital-converters/integrated-special-purpose-converters/poly-phase-metering-ics/ade7878.html>
- [18] (2014, August). *MCP3911 - Mixed Signal- Energy Measurement*. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP3911>
- [19] (2014, August). *STPM34 - ASSP for metering applications with up to four independent 24-bit 2nd order sigma-delta ADCs, 4 MHz OSF and 2 embedded PGLNA - STMicroelectronics*. Available: [http://www.st.com/content/st\\_com/en/products/data-converters/metering-ics/stpm34.html](http://www.st.com/content/st_com/en/products/data-converters/metering-ics/stpm34.html)
- [20] S. Mohagheghi, J. Stoupis, and Z. Wang, "Communication protocols and networks for power systems-current status and future trends," in *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*, 2009, pp. 1-9.
- [21] I. E. I. T. International Electrotechnical Commission, "Communication networks and systems in substations – Part 7-1 : Basic communication structure for

- substation and feeder equipment – Principles and models," *IEC Standard IEC61850-7-2:2003(E)*, 2003.
- [22] I. E. I. T. International Electrotechnical Commission, "Communication networks and systems in substations – Part 7-2 : Basic communication structure for substation and feeder equipment –Abstract communication service interface (ACSI)," *IEC Standard IEC61850-7-2:2003(E)*, pp. 1-171, 2003.
- [23] B. Geng, Z. Wang, W. Ge, C. Wang, S. Li, and Q. Gao, "The application of IEC61850 standard in the online monitoring system of the smart substation," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1-6.
- [24] S. Srisodsai and W. Pora, "A development of IEC61850 monitoring system for distribution transformer," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-6.
- [25] D. Molloy, *Exploring BeagleBone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*. New York: Wiley, 2014.
- [26] I. E. T. International Electrotechnical Commission, "Communication networks and systems in substations – Part 7-4 : Basic communication structure for substation and feeder equipment – Compatible logical node classes and data classes," *IEC Standard IEC61850-7-4:2003(E)*, pp. 1-104, 2003.
- [27] I. E. I. T. International Electrotechnical Commission, "Communication networks and systems in substations – Part 7-3 : Basic communication structure for substation and feeder equipment – Common data classes," *IEC Standard IEC61850-7-3:2003(E)*, pp. 1-64, 2003.
- [28] (2014, August). *Application Flow Chart - CodeIgniter 3.1.0 documentation*. Available: [http://www.codeigniter.com/user\\_guide/overview/appflow.html](http://www.codeigniter.com/user_guide/overview/appflow.html)
- [29] (2016, March 2016). *IEDEXplorer download | SourceForge.net*. Available: <https://sourceforge.net/projects/iedexplorer/>
- [30] I. E. International Electrotechnical Commission, "Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements – Part 22 : Static meters for active energy (classes 0,2 S and 0,5 S)," *IEC Standard IEC62053-21-2003(E)*, 2003.

- [31] I. E. International Electrotechnical Commission, "Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors IEC 60751:2008 " *IEC Standard IEC60751-2008*, 2008.
- [32] S. Srisodsai and W. Pora, "An Implementation of IEC61850 Monitoring System for Distribution Transformer," in *The 39th Electrical Engineering Conference (EECON-39)*, 2016, pp. 1-4.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

## ราคาอุปกรณ์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย มีรายละเอียดจำนวนและราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ราคาอุปกรณ์ต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

อุปกรณ์	จำนวน	ราคา (บาท)
บอร์ด Beaglebone Green	1	1,480
อุปกรณ์ Metering Module	1	600
หม้อแปลงกระแส	3	510
PT100 สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำมัน	1	1,660
PT100 สำหรับวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อม	1	1,340
กล่องใส่อุปกรณ์มาตรฐาน IP67	1	950
อุปกรณ์แปลงไฟฟ้า 5V/2A (Power Adapter)	1	200
<b>รวม</b>		<b>6,740</b>

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิโรช ศรีสไตส์ เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2552 จากนั้นเข้าทำงานที่บริษัทไมโครชิพ เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาการออกแบบและประยุกต์วงจรรวม ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2557

