

การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF METER ACCESSORY FOR COLLECTION OF CUSTOMER METER DATA  
CAPABLE OF HARMONIC ANALYSIS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

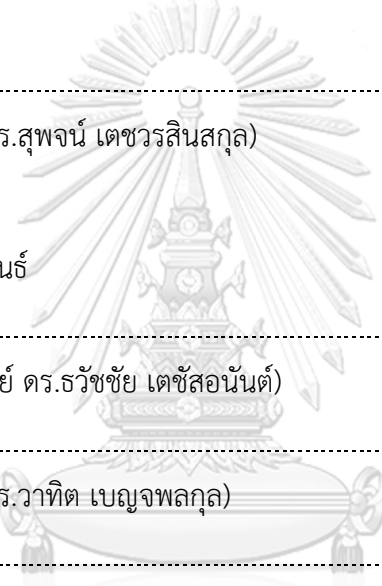
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เพื่อการเก็บข้อมูลที่ สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้
โดย	นายสาธิต เพ็ญรอด
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)
.....	กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาริต เพื่อรอต : การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถ  
วิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้. ( DEVELOPMENT OF METER  
ACCESSORY FOR COLLECTION OF CUSTOMER METER DATA CAPABLE OF  
HARMONIC ANALYSIS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร. วาทีต เบญจพลกุล

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถ  
วิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ เนื่องจากปัจจุบันนั้นมิเตอร์เอเอ็มอาร์ไม่สามารถเก็บข้อมูล  
รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสได้ ซึ่งการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงสถิติจากการ  
วัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ติดตั้งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า โครงสร้างหลักประกอบไปด้วย  
ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S) เป็นตัวควบคุมการทำงานร่วมกับมอดูลวัดค่า  
แรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสตามอัตราการสุ่มข้อมูลต่อ  
หนึ่งรูปคลื่น โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ประมวลผลสัญญาณแรงดันและกระแสเพื่อเก็บ  
ข้อมูลไปยังหน่วยความจำภายนอก (SD Card) และการนำข้อมูลที่บันทึกได้ไปวิเคราะห์ลำดับฮาร์  
มอนิกด้วยกระบวนการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ในโปรแกรม MATLAB ทำให้ลดความยุ่งยาก  
ในการวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเพิ่มเข้าไปใน  
ระบบไฟฟ้า ไม่ต้องติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่มีราคาแพงในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า การ  
แสดงผลผ่านโปรแกรมได้อย่างรวดเร็ว ความแม่นยำ และแนวทางการแก้ไขลำดับฮาร์มอนิกที่ส่งผล  
กระทบต่อระบบไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6070480721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Power Quality AMR Meter Harmonics Electricity Data

Satit Fuangrod : DEVELOPMENT OF METER ACCESSORY FOR COLLECTION OF CUSTOMER METER DATA CAPABLE OF HARMONIC ANALYSIS. Advisor: Prof. WATIT BENJAPOLAKUL, D.Eng.

This research presents the development of meter accessory for collection of customer meter data capable of harmonic analysis. At present, the AMR meters are unable to store voltage and current waveforms data. However Harmonic analysis requires statistical data from electrical quantity measurements from AMR meters for consumers. This research uses ESP32 microcontroller (Node MCU-32S) as a frequency generator to measure the voltage and current signals with a sufficient sampling rate per waveform and processes the signals recorded to external memory for data collection. The harmonic order analysis with the Fast Fourier Transform (FFT) function can reduce complication in Harmonic analysis, unnecessary to install additional equipment in electrical systems and results of harmonic analysis are reliable and immediate



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร. วาทีต เบญจพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆอันเป็นประโยชน์ ต่อ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และให้การสนับสนุนการวิจัยอย่างดีตลอดมา ทำให้รู้สึกเข้าใจทั้งใน ภาคทฤษฎี และ ภาคปฏิบัติอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์ และ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบ ให้คำแนะนำ คำชี้แนะในรายละเอียดของวิทยานิพนธ์อย่างชัดเจน ครบถ้วนทุก ประเด็น และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และความความสามารถใน การนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้านครหลวง กับ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนด้านทุนวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ สำหรับคำแนะนำ คำปรึกษา และความน้ำใจความช่วยเหลือ จนทำให้ผู้วิจัยสามารถทำ วิทยานิพนธ์ได้สำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดามารดาและครอบครัวเป็นอย่างสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และคอยให้กำลังใจตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาธิต เฟื่องรอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	4
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน .....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับมิเตอร์อัจฉริยะ .....	7
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับมิเตอร์อัจฉริยะ.....	7
2.1.1 เทคโนโลยีมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) และมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI).....	9
2.1.2 โครงข่ายระบบสื่อสารของมิเตอร์อัจฉริยะ.....	11
2.1.2.1 โครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารระยะไกล .....	12
2.1.2.2 โครงสร้างพื้นฐานระบบเครือข่ายระยะใกล้.....	13
2.1.3 ระบบการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์อัจฉริยะ.....	14
2.2 รายละเอียดคุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ กฟน.ใช้งาน .....	15

2.2.1	ข้อบกพร่องของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ในการวัดค่าทางไฟฟ้า.....	18
2.2.2	แนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ในการวัดค่าทางไฟฟ้า.....	19
บพที่ 3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	20
3.1	ทฤษฎีการสุ่มข้อมูลของรูปคลื่น.....	20
3.2	การแปลงสัญญาณระหว่างแอนะล็อกกับดิจิทัล.....	22
3.2.1	การแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D).....	23
3.2.2	การแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A).....	23
3.3	ทฤษฎีเกี่ยวกับฮาร์มอนิก.....	23
3.3.1	มาตรฐานและความหมายของฮาร์มอนิก.....	27
3.3.2	มาตรฐานแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย.....	29
3.4	ผลกระทบด้านฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	33
3.5	แนวทางการตรวจวัดเพื่อศึกษาวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิก.....	35
3.5.1	การวัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก.....	35
3.5.2	วิธีการตรวจวัดปริมาณของฮาร์มอนิก.....	37
3.5.3	วิธีการประเมินปริมาณของฮาร์มอนิก.....	37
3.5.4	ผลการวัดและวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิก.....	38
3.6	ทฤษฎีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์.....	38
3.6.1	การแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง.....	39
3.6.2	การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว.....	40
บพที่ 4	รายละเอียดการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	42
4.1	ภาพรวมการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	44
4.2	การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	46
4.2.1	การอ่านและเก็บข้อมูลตามอัตราการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น.....	47
4.2.2	การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น.....	48



4.2.3 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าในการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น .....	49
4.2.4 การบันทึกข้อมูลในการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น .....	49
4.2.5 การแสดงผลการบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูล .....	50
4.3 ฮาร์ดแวร์ภายในอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	51
4.4 รายละเอียดด้านซอฟต์แวร์สำหรับเก็บข้อมูล.....	51
4.5 แนวทางการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก.....	53
4.6 แนวทางการแสดงผลข้อมูลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	54
4.7 ข้อกำหนดการสร้างอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ .....	56
4.8 แนวทางการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ไปใช้งานในระบบไฟฟ้าของ กฟน. ....	56
บทที่ 5 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลและการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก.....	57
5.1 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูล.....	57
5.1.1 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบ R.....	61
5.1.2 ผลการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบ RL .....	67
5.1.3 ผลการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบ RC .....	72
5.1.4 อภิปรายผลการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบต่างๆ.....	77
5.2 การทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก .....	79
5.2.1 การทดสอบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและ กระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส.....	82
5.2.2 การทดสอบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและ กระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส .....	88
5.2.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากการสร้างฮาร์มอนิกตามกรณีต่างๆ .....	93
5.3 การทดสอบความคงทนของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในสภาวะแรงดันเกินชั่วครู่.....	95
5.3.1 คุณสมบัติความคงทนของมอดูลที่ใช้ในการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า .....	96
5.3.2 การทดสอบจ่ายแรงดันเกินชั่วครู่ให้กับอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ .....	96

5.3.3 แนวทางการป้องกันอุปกรณ์ประกอบบิเตอร์ในสภาวะแรงดันเกินชั่วคราว	97
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	98
6.1 สรุปผลงานวิจัย	98
6.2 ข้อดี	100
6.3 ข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม	101
ประวัติผู้เขียน	105



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบมิเตอร์ธรรมดากับมิเตอร์อัจฉริยะ.....	9
ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) กับมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI).....	11
ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ กปน.ใช้งาน.....	18
ตารางที่ 3-1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก.....	27
ตารางที่ 3-2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ในระบบส่งและจำหน่ายของแรงต่ำและแรงกลาง (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV).....	28
ตารางที่ 3-3 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ในระบบแรงสูง (แรงดัน 69,001 V ถึง 161 kV).....	28
ตารางที่ 3-4 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ในระบบมากกว่า 161 kV .....	29
ตารางที่ 3-5 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ.....	32
ตารางที่ 3-6 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงกลาง.....	32
ตารางที่ 3-7 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง.....	33
ตารางที่ 4-1 ความสามารถมิเตอร์เอเอ็มอาร์เดิม และกรณีเพิ่มอุปกรณ์ต่อร่วมมิเตอร์เอเอ็มอาร์.....	43
ตารางที่ 4-2 การประมาณราคาและรายละเอียดอุปกรณ์สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์....	46
ตารางที่ 4-3 การแสดงการวิเคราะห์ค่าคุณภาพไฟฟ้าของเฟส A, B และ C.....	56
ตารางที่ 5-1 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าแบบโหลด R.....	61
ตารางที่ 5-2 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าแบบโหลด R .....	62
ตารางที่ 5-3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบโหลด R..	63
ตารางที่ 5-4 การแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ R.....	66
ตารางที่ 5-5 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าแบบโหลด RL .....	67
ตารางที่ 5-6 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าแบบโหลด RL .....	68

ตารางที่ 5-7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบโหลด RL	69
ตารางที่ 5-8 การแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ RL	71
ตารางที่ 5-9 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าแบบโหลด RC	72
ตารางที่ 5-10 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าแบบโหลด RC	73
ตารางที่ 5-11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบโหลด RC	74
ตารางที่ 5-12 การแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ RC	77
ตารางที่ 5-13 การเปรียบเทียบระดับความแม่นยำของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในการเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้า	78
ตารางที่ 5-14 การเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส	84
ตารางที่ 5-15 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส	85
ตารางที่ 5-16 ผลการวิเคราะห์ค่าคุณภาพไฟฟ้า ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส	86
ตารางที่ 5-17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า %THD <sub>v</sub> , %THD <sub>i</sub> และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก	87
ตารางที่ 5-18 การเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส	90
ตารางที่ 5-19 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส	91
ตารางที่ 5-20 ผลการวิเคราะห์ค่าคุณภาพไฟฟ้า ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส	92
ตารางที่ 5-21 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า %THD <sub>v</sub> , %THD <sub>i</sub> และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก	93

ตารางที่ 5-22 การเปรียบเทียบระดับความแม่นยำในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกด้วยข้อมูลจากอุปกรณ์  
ประกอบมิเตอร์ ..... 94

ตารางที่ 5-23 เปรียบเทียบค่าขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกกับส่วนเบี่ยงเบน  
มาตรฐานของขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก ..... 95

ตารางที่ 5-24 การทดสอบจ่ายแรงดันเกินชั่วคราวให้กับอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ..... 97

ตารางที่ 6-1 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณไฟฟ้าและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาด  
การบันทึกข้อมูล ..... 99

ตารางที่ 6-2 ค่าความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของสัญญาณไฟฟ้าและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
ขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก ..... 99



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 เปรียบเทียบประโยชน์ของมิเตอร์ AMR กับ AMI .....	11
รูปที่ 2-2 องค์ประกอบโครงข่ายระบบสื่อสารของมิเตอร์อัจฉริยะ .....	14
รูปที่ 2-3 ระบบการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์อัจฉริยะ .....	15
รูปที่ 2-4 ผังการทำงานระบบ AMR System ของ กฟน. ....	16
รูปที่ 2-5 คุณสมบัติในการวัดค่าทางไฟฟ้าของมิเตอร์เอเอ็มอาร์รุ่น Elster A1800 Alpha.....	17
รูปที่ 2-6 คุณสมบัติในการวัดค่าทางไฟฟ้าของมิเตอร์เอเอ็มอาร์รุ่น EDMI - Mk10E.....	17
รูปที่ 2-7 แนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	19
รูปที่ 3-1 กระบวนการชักตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา $x(t)$ .....	20
รูปที่ 3-2 ตัวอย่างการสุ่มข้อมูลตามความถี่การชักตัวอย่าง.....	21
รูปที่ 3-3 ปราบกฏการณ์ความผิดพลาดเอเลียสซิง.....	22
รูปที่ 3-4 สัญญาณแอนะล็อกเชื่อมต่อกับระบบดิจิทัล .....	22
รูปที่ 3-5 กระแสไหลผ่านโหลดไม่เชิงเส้น.....	24
รูปที่ 3-6 การบิดเบี้ยวของกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น.....	26
รูปที่ 3-7 การใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์วิเคราะห์รูปคลื่น .....	26
รูปที่ 3-8 ไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992.....	27
รูปที่ 3-9 การไหลของการคำนวณ 8-point DFT ขนาด 8 จุดสุ่มข้อมูล.....	41
รูปที่ 3-10 สัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่.....	41
รูปที่ 4-1 ภาพรวมการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	43
รูปที่ 4-2 การพัฒนาปรับปรุงมิเตอร์เอเอ็มอาร์สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	44
รูปที่ 4-3 ขั้นตอนการพัฒนามิเตอร์เอเอ็มอาร์สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	45
รูปที่ 4-4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S).....	47

รูปที่ 4-5 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S) .....	48
รูปที่ 4-6 มอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Sensor Module).....	48
รูปที่ 4-7 การเชื่อมต่อกับมอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Sensor Module).....	49
รูปที่ 4-8 มอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Sensor Module).....	49
รูปที่ 4-9 มอดูลการอ่านและเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำภายนอก (SD Card).....	50
รูปที่ 4-10 การเชื่อมต่อมอดูลอ่านและเขียนข้อมูลกับไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	50
รูปที่ 4-11 จอแสดงผลแอลซีดีขนาด 20x4 .....	50
รูปที่ 4-12 ฮาร์ดแวร์ภายในอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์.....	51
รูปที่ 4-13 ผังงานการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32.....	52
รูปที่ 4-14 การบันทึกค่าพารามิเตอร์เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า .....	53
รูปที่ 4-15 ผังงานการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม MATLAB.....	54
รูปที่ 4-16 การวิเคราะห์ค่า RMS ของรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A, B และ C.....	55
รูปที่ 4-17 การวิเคราะห์ค่า RMS ของรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส A, B และ C.....	55
รูปที่ 5-1 วงจรการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามสภาวะโหลด .....	57
รูปที่ 5-2 วงจรการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามสภาวะโหลด .....	58
รูปที่ 5-3 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามสภาวะโหลด .....	59
รูปที่ 5-4 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ R .....	64
รูปที่ 5-5 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ R .....	64
รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ R.....	64
รูปที่ 5-7 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ R.....	65
รูปที่ 5-8 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ R .....	65
รูปที่ 5-9 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ R .....	65
รูปที่ 5-10 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RL ...	70
รูปที่ 5-11 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RL ...	70

รูปที่ 5-12 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RL ...	70
รูปที่ 5-13 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RL ...	70
รูปที่ 5-14 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RL ...	71
รูปที่ 5-15 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RL ...	71
รูปที่ 5-16 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RC ...	75
รูปที่ 5-17 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RC ...	75
รูปที่ 5-18 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RC ...	75
รูปที่ 5-19 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RC ...	76
รูปที่ 5-20 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RC ...	76
รูปที่ 5-21 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RC ...	76
รูปที่ 5-22 คุณสมบัติของเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256plus) .....	79
รูปที่ 5-23 วงจรการทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก .....	81
รูปที่ 5-24 การทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก .....	81
รูปที่ 5-25 หน้าจอแสดงผลการกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกจากเครื่องทดสอบไฟฟ้า .....	82
รูปที่ 5-26 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ .....	83
รูปที่ 5-27 การเปรียบเทียบความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า .....	86
รูปที่ 5-28 การเปรียบเทียบความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า .....	86
รูปที่ 5-29 หน้าจอแสดงผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกจากเครื่องทดสอบไฟฟ้า .....	88
รูปที่ 5-30 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ .....	89
รูปที่ 5-31 การเปรียบเทียบข้อมูลความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า .....	92
รูปที่ 5-32 การเปรียบเทียบข้อมูลความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า .....	92
รูปที่ 5-33 คุณสมบัติของมอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตามการกำหนดของผู้ผลิต .....	96
รูปที่ 5-34 คุณสมบัติของมอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้าตามการกำหนดของผู้ผลิต .....	96



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) เป็นรัฐวิสาหกิจมีหน้าที่ดูแลด้านระบบจำหน่ายไฟฟ้าและจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งต้องพัฒนาและขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้มีความเพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า สร้างความมั่นคงและเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าเพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการใช้งานในทุกกรณี ทั้งอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม และหน่วยงานราชการ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) และการติดตั้งมิเตอร์อัจฉริยะ (Smart Meter) ที่สามารถตรวจสอบการใช้ไฟฟ้าได้ตลอดเวลา ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถทราบถึงหน่วยการใช้ไฟฟ้าของตน การประมาณการค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือน และยังสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงานของตนเองเพื่อการปรับลดการใช้ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงความสนใจในคุณภาพไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ามีมากยิ่งขึ้น โดยคำว่า “คุณภาพไฟฟ้า (Power quality)” เป็นคำที่มักถูกกล่าวถึงเกี่ยวกับการรบกวนภายในระบบไฟฟ้าด้านต่างๆ อีกด้วย ซึ่งเป็นปัญหาทำให้ประสิทธิภาพในระบบจำหน่ายไฟฟ้าลดลง

ปัจจุบันมิเตอร์ที่ทางการไฟฟ้านครหลวงติดตั้งให้ลูกค้าที่เป็นผู้ใช้ไฟฟ้ายิ่งใหญ่นั้น เช่น โรงงานอุตสาหกรรม มิเตอร์นี้สามารถแจ้งเตือนข้อมูลมาแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ เช่น มิเตอร์แบบเอเอ็มอาร์ (AMR Meter) โดยที่ AMR ย่อมาจาก Automatic Meter Reading อาศัยระบบการอ่านข้อมูลจากมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติผ่านระบบสื่อสารประเภทต่างๆ และมีซอฟต์แวร์ให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเรียกดูข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของตนเองผ่านอินเทอร์เน็ตได้ ซึ่งข้อมูลที่มีเตอร์สามารถวัดได้และส่งเข้าฐานข้อมูลนั้น ไม่ได้สะท้อนปัญหาไฟฟ้าด้านต่างๆ ข้อมูลที่มีเตอร์สามารถวัดได้ไม่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า โดยมิเตอร์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันที่มีราคาแพงนั้น สามารถบอกได้เพียงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวม ( $THD_V, THD_I$ ) เท่านั้น และไม่สามารถเจาะจงลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ( $V_H, I_H$ ) ที่เป็นปัญหาต่อระบบไฟฟ้าที่แท้จริงได้ ซึ่งถ้าต้องการทราบปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของตนเอง จำเป็นต้องจ้างผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบฮาร์มอนิก ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงในการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกที่ส่งผลเสียต่อระบบไฟฟ้า จึงเป็นเหตุให้ผู้ใช้ไฟฟ้าละเลยการตรวจสอบปัญหาฮาร์มอนิกในส่วนของตนเอง ผลที่ตามมาทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าในบริเวณข้างเคียงที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้ไฟฟ้ายิ่งใหญ่มากยิ่งขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้าอาจเกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายได้ และอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าในภาพรวมของการไฟฟ้าได้

สำหรับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ทาง กฟน. ติดตั้งให้ผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่จำหน่ายของ กฟน. ให้สามารถเก็บข้อมูลไฟฟ้าและสามารถส่งข้อมูลทางไฟฟ้าเข้าโครงสร้างฐานข้อมูลที่เชื่อมต่อกับระบบ RMR (Remote Meter Reading : RMR) ซึ่งทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถอ่านข้อมูลช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าจากมิเตอร์ TOU (Time of Use Rate) ได้โดยตรงจากระยะไกลผ่านระบบสื่อสารประเภทต่างๆ หรือผ่านโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงมายังสำนักงานการไฟฟ้านครหลวงเขต ซึ่งระบบการอ่านข้อมูลเครื่องวัดฯ อัตโนมัติผ่านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารในการวัดและส่งข้อมูลไฟฟ้าจะอาศัยหน้าที่ของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ ทำงานร่วมกับโครงข่ายเพื่อเชื่อมต่อผู้ใช้ไฟฟ้ากับระบบจัดการข้อมูลของระบบมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) ซึ่งถูกเรียกว่าระบบ MDMS (Meter Data Management System) โดยจะติดตั้งที่ศูนย์สั่งการของกรไฟฟ้า ทำหน้าที่ช่วยสนับสนุนการสื่อสารการทำงานระหว่างมิเตอร์เอเอ็มอาร์กับระบบ MDMS ทำให้เกิดการชำระและการออกแบบค่าไฟฟ้าแบบใหม่, การวิเคราะห์การควบคุมการจำหน่ายไฟฟ้า, กระบวนการลูกค้าสัมพันธ์ รวมถึงกระบวนการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลไฟฟ้า โดยนำเอาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารข้อมูลเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้โครงสร้างระบบการอ่านข้อมูลเครื่องวัดฯ ในปัจจุบันจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนตามเทคโนโลยีสารสนเทศข้อมูลและการสื่อสาร ให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยหลักการอ่านข้อมูลเครื่องวัดฯ จากระยะไกล (Remote Meter Reading : RMR) ผ่านโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ร่วมกับระบบการจัดเก็บข้อมูลสำคัญทางไฟฟ้าจากมิเตอร์เอเอ็มอาร์เข้าสู่โครงสร้างฐานข้อมูลระบบฯ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไฟฟ้าที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลด้านอื่นๆ

โดยตัวอย่างข้อมูลไฟฟ้าที่สำคัญในการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์มีดังนี้

- ค่าแรงดันและกระแสทั้ง 3 เฟส
- ค่ามุมของแรงดันและกระแสทั้ง 3 เฟส
- ค่ากิโลวัตต์ต่อชั่วโมง กิโลวาร์ต่อชั่วโมง
- ค่าผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวมทั้ง 3 เฟส

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้าทำให้พบแนวทางการพัฒนาและสร้างอุปกรณ์ในการพัฒนาเครื่องวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่จะนำเสนอวิธีการพัฒนาประยุกต์การวัดคุณภาพไฟฟ้าหรือการวัดฮาร์มอนิก ดังในงานวิจัยของสกลพงษ์ บุรณะวิทย์ [1], คมสัน ภูมาลี [2], ได้พัฒนาประยุกต์โดยสร้างอุปกรณ์สำหรับกรวัดฮาร์มอนิกมาโดยเฉพาะ ไม่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าอื่นๆได้ และยังคงยากในการวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ต้องติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้า โดยทำงานร่วมกับโปรแกรมแสดงผลเพื่อแสดงการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิก ทำให้บางงานวิจัยจำเป็นต้องเดินทางไปเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์จากอุปกรณ์โดยตรงทำให้เกิดความยุ่งยากในการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ในส่วนงานวิจัยของ ชไมพร ตันตติลล [3], ได้สร้าง

อุปกรณ์สำหรับการวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก โดยใช้อุปกรณ์สำเร็จรูปที่มีราคาแพงในการสร้างอุปกรณ์ มีข้อจำกัดด้านการเชื่อมต่อกับระบบสื่อสาร ต้องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยตรงเพื่อแสดงการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก รวมถึงปัญหาด้านต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์ที่มีราคาแพง จึงไม่เหมาะที่จะนำไปต่อร่วมกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ได้ ในส่วนงานวิจัยของ S. Elphick, V. Gosbell, และคณะ [4], S. Ali, K. Wu [5], และคณะ, X. Long, W. Parent, และคณะ [6], ได้พัฒนาประยุกต์สร้างซอฟต์แวร์โปรแกรมหรือแบบจำลองการตรวจสอบอัลกอริทึมสำหรับประเมินข้อมูลเพื่อแสดงการตรวจสอบฮาร์มอนิก ซึ่งการใช้อัลกอริทึมเพื่อการวัดวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า โดยใช้หลักการในการลดความไม่แน่นอนของการประเมินฮาร์มอนิกลงเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์คุณภาพในระบบไฟฟ้าให้มากขึ้น ตัวระบบในการพัฒนามีความยุ่งยากในการติดตั้งและมีราคาค่อนข้างสูงยากต่อการนำไปพัฒนาในระบบมิเตอร์เอเอ็มอาร์ และในส่วนงานวิจัยของ D. Yeolekar และคณะ [7], ได้พัฒนาแนวทางการแจ้งลำดับฮาร์มอนิกผ่านสมาร์ทโฟนนั้น ใช้หลักการส่งข้อมูลแบบไร้สาย เพื่อแจ้งเตือนระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าซึ่งจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดฮาร์มอนิกเพิ่มด้วย และผลลัพธ์ที่ส่งผ่านโปรแกรมไปยังผู้ใช้งานสามารถบอกได้เพียงสถานะฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าว่าเกินมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ โดยแจ้งให้ทราบด้วยรหัสสีเท่านั้น คือรหัสสีเขียว หมายถึง สถานะฮาร์มอนิกปกติ ส่วนรหัสสีแดงหมายถึง สถานะฮาร์มอนิกผิดปกติ ทำให้ผลลัพธ์ไปยังผู้ใช้งานนั้นไม่ละเอียดมากพอ เนื่องจากงานวิจัยไม่สามารถบอกรายละเอียดในส่วนของเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub>) รวมถึงค่าลำดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนองานวิจัยที่สร้างอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อเพิ่มความสามารถให้กับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ในการวัดฮาร์มอนิกเพิ่มเติม โดยอาศัยหลักการเก็บข้อมูลต่อรูปคลื่นเพื่อให้อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ สามารถเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ เพื่อลดความยุ่งยากในการวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้า สามารถแสดงผลผ่านโปรแกรมที่กำหนดไว้ได้อย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์สามารถระบุปัญหาฮาร์มอนิกได้อย่างแม่นยำมาก ซึ่งในปัจจุบันนั้นมิเตอร์เอเอ็มอาร์ส่วนใหญ่ไม่สามารถเก็บข้อมูลรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสได้ โดยหลักการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงสถิติจากการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ติดตั้งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ในการวิเคราะห์ข้อมูลฮาร์มอนิกนั้น จะแสดงข้อมูลขนาดฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแต่ละลำดับฮาร์มอนิก เพื่อเป็นการระบุปัญหาฮาร์มอนิก และการแก้ไขฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งอาจสร้างโอกาสให้ กฟน. สามารถเข้าไปนำเสนอแนวทางการปรับปรุงฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาวิธีการปรับปรุงมิเตอร์เอเอ็มอาร์ โดยมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ กพน. ใช้งานในปัจจุบันไม่สามารถเก็บข้อมูลที่จำเป็นในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเข้าฐานข้อมูลมิเตอร์เอเอ็มอาร์
2. ศึกษาแนวทางการนำข้อมูลจากฐานข้อมูลมิเตอร์เอเอ็มอาร์มาวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก ตั้งแต่ลำดับ 1 ถึงลำดับ 19
3. พัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ สามารถวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกตั้งแต่ลำดับ 1 ถึงลำดับ 19
4. กพน. ทราบถึงลำดับฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อระบบจำหน่ายของ กพน. และแนวทางการให้บริการ การปรับปรุงคุณภาพระบบไฟฟ้าแก่ผู้ใช้ไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าที่อาจมีปัญหาด้านฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งต้องมีการติดตั้งมิเตอร์เอเอ็มอาร์
2. พิจารณาเฉพาะมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่มีอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อเก็บข้อมูลอัตราส่วนข้อมูลต่อรูปคลื่น
3. พัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อสำหรับเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตั้งแต่ลำดับ 1 ถึงลำดับ 19
4. พัฒนาแนวทางการนำข้อมูลจากฐานข้อมูลไปวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก ปริมาณทางไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของ แรงดันและกระแสไฟฟ้า

#### 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ให้สามารถเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก การเกิดปัญหาฮาร์มอนิก และแนวทางการแก้ไข
3. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาวิจัย
4. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ให้สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้
5. ศึกษาโปรแกรมเพื่อนำมาวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากฐานข้อมูลมิเตอร์เอเอ็มอาร์
6. ทดสอบความแม่นยำในการเก็บและส่งอัตราส่วนข้อมูลต่อรูปคลื่น เพื่อให้การวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกที่แม่นยำ
7. สรุปข้อมูลจากการทดสอบความแม่นยำในการใช้ข้อมูลวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก ร้อยละความผิดพลาด การแก้ไขการวิเคราะห์ให้แม่นยำขึ้น และการนำแนวทางการวิเคราะห์นี้ไปใช้กับผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่น
8. สรุปผลการทดสอบ ข้อเสนอแนะ และเรียบเรียงผลงานวิจัยนำเสนอคณะกรรมการ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลลำดับฮาร์มอนิก โดยใช้ฐานข้อมูลมิเตอร์เอเอ็มอาร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าเพื่อหาแนวทางแก้ปัญหาด้านฮาร์มอนิก
2. แนวทางการนำอัตราส่วนข้อมูลต่อรูปคลื่น ของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ด้านอื่น
3. แนวโน้มคุณภาพไฟฟ้าของการไฟฟ้าดีขึ้น เนื่องจากทราบถึงปัญหาฮาร์มอนิกที่แท้จริง ลดผลกระทบด้านฮาร์มอนิกและความสูญเสียในระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าที่เกิดจากปัญหาฮาร์มอนิกภายในระบบไฟฟ้า
4. กปน. มีแนวทางสำหรับการช่วยปรับปรุงลำดับฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้า

## 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทมีเนื้อหา ดังนี้

- บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ โดยส่วนเนื้อหาของวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงในบทต่อไป
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์นี้ เช่น เทคโนโลยีมิเตอร์ AMR และ AMI มาตรฐานโครงข่ายระบบสื่อสารของมิเตอร์อัจฉริยะ รายละเอียดคุณสมบัติมิเตอร์ AMR ข้อบกพร่องและแนวทางการไขข้อบกพร่องของมิเตอร์ AMR
- บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เช่น ทฤษฎีการสุ่มข้อมูลของรูปคลื่น การติดต่อระหว่างแอนะล็อกกับดิจิทัล ทฤษฎีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์เพื่อการวิเคราะห์ ลำดับฮาร์มอนิก และความหมายของคุณภาพไฟฟ้า ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า รวมถึงแนวทางการตรวจวัดปริมาณของฮาร์มอนิก
- บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เช่น รายละเอียดซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ภายในอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ รวมถึงแนวทางในการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก
- บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลและการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก เช่น การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูล และการทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกเพื่อสร้างความมั่นใจต่อตัวอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์
- บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลทดลองข้อดีและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ข้อมูลเกี่ยวกับมิเตอร์อัจฉริยะ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้จะบอกถึงหลักการและข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแนวทางการปรับปรุงมิเตอร์เอเอ็มอาร์เพื่อการเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ การสื่อสารการจัดการข้อมูล เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนามิเตอร์เอเอ็มอาร์ มาตรฐานและแนวทางการตรวจวัดลำดับฮาร์มอนิก การศึกษาวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิก เพื่อใช้เป็นแนวทางเปรียบเทียบค่าการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ของงานวิจัยนี้ให้ตรงตามมาตรฐานสากล สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ชนิดอื่นเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าต่อไป การแสดงข้อมูลขนาดฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแต่ละลำดับฮาร์มอนิก เพื่อแจ้งเตือนให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ทราบถึงปัญหาฮาร์มอนิก และแนวทางการแก้ไขลำดับฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอย่างถูกต้องแม่นยำ รวมถึงแนวทางการปรับปรุงฮาร์มอนิกให้ดียิ่งขึ้น

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับมิเตอร์อัจฉริยะ

มิเตอร์อัจฉริยะ (Smart Meter) [8], [9], มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าแบบใหม่ที่ถูกพัฒนาเพื่อแทนที่มิเตอร์แบบจานหมุน โดยการอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์และส่งข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลไปที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า โดยปกติมิเตอร์อัจฉริยะสามารถติดต่อสื่อสารโดยตรงกับศูนย์ควบคุมได้ตามต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องส่งพนักงานมาเพื่ออ่านค่าหน่วยไฟฟ้าเดือนละครั้งแบบปัจจุบัน ดังนั้นผู้ขายไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าจะสามารถอ่าน หรือคำนวณค่าใช้จ่ายของการใช้พลังงานได้เสมอ ช่องทางการสื่อสารอาจเลือกได้จากหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น รูปแบบการสื่อสารผ่านทางโครงข่ายสื่อสารเคลื่อนที่ หรือ รูปแบบการสื่อสารผ่านคลื่น RF เป็นต้น นอกจากนี้การบำรุงรักษาตัวมิเตอร์สามารถทำได้ง่ายขึ้น เพราะความซับซ้อนทางด้านชิ้นส่วนกลไกมีน้อยลงกว่าแบบเดิมมาก เมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบไฟฟ้า มิเตอร์อัจฉริยะสามารถแจ้งเหตุความผิดปกติทางไฟฟ้า เช่น ไฟตก ไฟดับได้ ดังนั้นจึงตรวจสอบหาต้นเหตุ ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้ไวกว่าเดิมอีกด้วย นอกจากนี้มิเตอร์อัจฉริยะยังสามารถคำนวณค่าไฟฟ้าที่มีวิธีการคิดที่ซับซ้อนได้ เช่น ตามช่วงเวลา หรือตามความต้องการการใช้ไฟฟ้า และมิเตอร์อัจฉริยะยังสนับสนุนการคิดค่าไฟฟ้าแบบจ่ายล่วงหน้า ซึ่งหมายถึงการตัดต่อการให้บริการไฟฟ้าแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถทำได้จากระยะไกล และอาจจะนำมาใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต

การพัฒนาโครงข่ายระบบไฟฟ้า [9], ให้สามารถตอบสนองต่อการให้บริการระบบไฟฟ้าได้อย่างชาญฉลาดหรือมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยใช้ทรัพยากรที่น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับคำนิยามโดยกว้างของระบบโครงข่ายสมาร์ทกริด (Smart Grid) ที่รับรู้และสามารถเข้าใจได้ในทิศทางเดียวกัน ตาม

“แผนแม่บทการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ทกริดของประเทศไทย พ.ศ. 2558 - 2579” ของกระทรวงพลังงาน ได้กำหนด “ยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ทกริดของประเทศไทย” ด้วยกัน 5 ด้าน เพื่อให้การไฟฟ้าทั้ง 3 การไฟฟ้า (กฟผ. กฟน. และกฟภ.) ดำเนินการไปในทิศทางเดียวกัน ดังนี้

1. ด้านการพัฒนาความเชื่อถือได้และคุณภาพของไฟฟ้า
2. ด้านความยั่งยืนและประสิทธิภาพของการผลิตและใช้พลังงาน
3. ด้านการพัฒนาการทำงานและการให้บริการของหน่วยงานการไฟฟ้าฯ
4. ด้านการกำหนดมาตรฐานความเข้ากันได้ของอุปกรณ์ในระบบ
5. ด้านการพัฒนาศักยภาพการแข่งขันทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม

สร้างการสนับสนุนผลักดันให้เกิดระบบสมาร์ทกริดขึ้นโดยอาศัยองค์ประกอบพื้นฐานทางด้านเทคโนโลยี ที่มีคุณสมบัติสามารถตรวจวัด รับส่งสัญญาณข้อมูลและทำงานร่วมกับอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าอื่นๆได้ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในกลุ่มต่างๆ อันประกอบด้วย ระบบ Hardware ระบบ Software และระบบ People ware เช่น

- เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communication Technology, ICT)
- เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้า การส่งจ่ายไฟฟ้า
- เทคโนโลยีการควบคุมโครงข่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ
- เทคโนโลยีสมาร์ทมิเตอร์ (Advanced Metering Infrastructure, AMI), การปรับความต้องการใช้ไฟฟ้า (Demand Response)
- เทคโนโลยีการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า (Energy Management System, EMS) เช่น ภายในบ้าน (Home EMS, HEMS), ภายในอาคาร (Building EMS, BEMS), ภายในโรงงาน (Factory EMS, FEMS) และ ภายในชุมชน (Community EMS, CEMS)

รวมถึงการให้บริการผ่านมิเตอร์อัจฉริยะได้อย่างมีประสิทธิภาพในการควบคุม บริหารจัดการการผลิตไฟฟ้า การจัดเก็บพลังงานและการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ โดยมีเมตอร์นั้นสื่อสารได้ 2 ทิศทาง ทำให้มีคุณสมบัติพื้นฐานรองรับดังนี้

- การตัดต่อมิเตอร์จากระยะไกล (Remote Connection/Disconnection)
- การตรวจสอบการละเมิด (Tamper Detection)
- การตรวจสอบไฟฟ้าดับ (Outage Detection)
- การบ่งชี้คุณภาพไฟฟ้า (Quality of Supply Monitoring)
- การจำกัดการใช้ไฟฟ้า (Demand/Load Limiting)
- การสื่อสารกับอุปกรณ์อื่น หรือการควบคุมการทำงานผ่านระบบอินเทอร์เน็ต
- สามารถนำข้อมูลที่จำเป็นออกสู่ภายนอกได้



- สามารถแก้ไข เปลี่ยนแปลงโปรแกรมเพื่อเปลี่ยนแปลงข้อมูลภายในมิเตอร์ได้ เช่น เปลี่ยนช่วงเวลาการส่งข้อมูล และการจำกัดการใช้ไฟฟ้า เป็นต้น
- สามารถทำงานร่วมกับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านได้ (Home Area Network, HAN) เพื่อควบคุมระบบไฟฟ้าภายในบ้าน
- รองรับบริการแบบการชำระเงินล่วงหน้า หรือ Prepayment

จากข้อความข้างต้น ทำให้เราสามารถเปรียบเทียบมิเตอร์แบบธรรมดา กับ มิเตอร์แบบอัจฉริยะได้ดังแสดงในตารางที่ 2-1 โดยมีความแตกต่างกันดังนี้ [8]

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบมิเตอร์ธรรมดากับมิเตอร์อัจฉริยะ

ความสามารถในการทำงาน	มิเตอร์ธรรมดา	มิเตอร์อัจฉริยะ
วัดค่าพลังงาน	สามารถทำได้	สามารถทำได้
การสื่อสารโดยใช้แสง (optical port)	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
การสื่อสารผ่านรูปแบบ RS485	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
รองรับโครงข่ายอัจฉริยะ	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
ความสามารถในการสื่อสารกับศูนย์ควบคุมแบบไร้สายหรือแบบมีสาย	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
การตรวจจ่ายการโกงค่าไฟฟ้าการโจรกรรมการใช้ไฟฟ้าพร้อมแจ้งเตือนไปยังศูนย์ควบคุม	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้
บันทึกและแจ้งเตือนเหตุการณ์ในระบบไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ	ไม่สามารถทำได้	สามารถทำได้

### 2.1.1 เทคโนโลยีมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) และมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI)

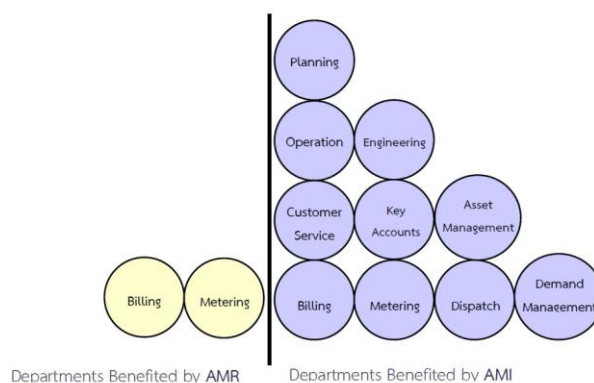
AMR (Automatic Meter Reading) [9], เครื่องวัดและอ่านค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh) ค่าความต้องการ (Demand) และพารามิเตอร์ไฟฟ้า พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ โดยมีการสื่อสารแบบทางเดียว การส่งข้อมูลจากเครื่องวัดไปยังผู้ให้บริการระบบไฟฟ้า วัตถุประสงค์หลักของผู้ให้บริการ ระบบไฟฟ้าในการติดตั้งมิเตอร์เอเอ็มอาร์ คือการนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ามาจัดทำใบแจ้งค่าไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ จะได้รับประโยชน์ที่เรื่องของความถูกต้องของข้อมูล และการลดค่าใช้จ่ายการอ่านเครื่องวัด

AMI (Advance Metering Infrastructure) [9], เครื่องวัดและอ่านค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh) และ ค่าความต้องการ (Demand) และพารามิเตอร์ไฟฟ้าต่างๆ พร้อมทั้งมีการบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ สามารถสื่อสารระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้ากับผู้ให้บริการระบบไฟฟ้า สามารถรองรับความต้องการใช้ทรัพยากรมากขึ้น และการทำงานของระบบก็มีความซับซ้อนมากขึ้น สามารถนำไปต่อยอดในส่วนงานอื่น ได้แก่ การให้บริการผู้ใช้ไฟฟ้า การวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้ผู้ให้บริการระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถอ่านหรือคำนวณค่าใช้จ่ายของการใช้พลังงานได้ เพิ่มช่องทางในการติดต่อสื่อสารได้หลายรูปแบบ โดยความสามารถหลักของเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าอัจฉริยะ ยังสามารถคำนวณค่าไฟฟ้าที่มีวิธีการคิดที่ซับซ้อน ได้แก่ แบบตามช่วงเวลา หรือแบบตามความต้องการการใช้ไฟฟ้าตามการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้ยังสนับสนุนการคิดค่าไฟฟ้าแบบจ่ายล่วงหน้า ซึ่งอาจจะนำมาใช้ในอนาคตอันใกล้นี้ นอกจากนี้การนำเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าอัจฉริยะมาใช้จะสามารถสร้างบริการเสริมอื่นๆ ให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ในอนาคตอีกด้วย

การทำงานของโครงสร้างระบบมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) และมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI) นั้นมีองค์ประกอบต่างกันที่การออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ เพื่อให้มีการสื่อสารแบบทิศทางเดียวหรือการสื่อสารแบบสองทิศทาง โดยมีองค์ประกอบ คือเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เนื่องจากเป็นส่วนที่มีมูลค่าการลงทุนมากที่สุดของระบบ ใช้สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าและปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าหน่วยที่วัดได้เป็นกิโลวัตต์ต่ออวาร์ (kWh) โดยแบ่งออกตามหลักการทำงานได้ดังนี้

- เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าจางหมุน (Electromechanical meters) คือเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้า สร้างขึ้นมาเพื่อวัดปริมาณกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นมิเตอร์ที่มีความทนทาน ใช้งานง่าย
- เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ แบบสแตนด์ออล (Electronic meters) คือเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าที่ใช้หลักการอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถตั้งค่าอัตราค่าไฟฟ้าในรูปแบบ TOU ได้
- เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Meter) เป็นเครื่องวัดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำมาใช้ในระบบมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) และมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI) การอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และส่งข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลไปที่ระบบควบคุม (Control System) สามารถติดต่อสื่อสารโดยตรงได้ตลอดเวลา

ดังนั้นการทำงานของโครงสร้างระบบมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) และมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI) นั้นมีความแตกต่างในด้านความสามารถต่างๆ รวมถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตั้งมิเตอร์แต่ละชนิด โดยเปรียบเทียบความสามารถของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) กับมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และตารางที่ 2-2



รูปที่ 2-1 เปรียบเทียบประโยชน์ของมิเตอร์ AMR กับ AMI

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบมิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR) กับมิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI)

มิเตอร์เอเอ็มไอ (AMI)	มิเตอร์เอเอ็มอาร์ (AMR)
การสื่อสารแบบสองทิศทางเหมาะสำหรับการเก็บข้อมูลจำนวนมาก	การสื่อสารแบบทิศทางเดียวและความเร็วต่ำ
ระบบการวัดและการสื่อสารอยู่ในตัวเครื่องวัดเดียวกัน	เครื่องวัดเป็นแบบดัดแปลง
ขยายความสามารถในการให้บริการกับผู้ใช้ไฟฟ้า	สามารถเฉพาะอ่านเครื่องวัดฯ เท่านั้น
อุปกรณ์ปลดสับระบบไฟฟ้าอยู่ในตู้ตั้งค่าโปรแกรมแบบระยะไกล	ไม่มีอุปกรณ์ปลดสับระบบไฟฟ้า
มีผู้ผลิตเครื่องวัดหลายรายสามารถระบุ Spec ได้ตามที่ลูกค้าต้องการ	ผู้จัดหาเครื่องวัดต้องเป็นรายเดียว
สามารถแปลงเป็น prepay meter ผ่านวิธี Remote	เปลี่ยนเครื่องวัดฯ เป็น Prepay ไม่ได้
เปลี่ยน Tariffs and load profiles ได้ผ่านวิธี Remote	ระบบที่มีอยู่ไม่สามารถทำได้

### 2.1.2 โครงข่ายระบบสื่อสารของมิเตอร์อัจฉริยะ

ระบบสื่อสารของมิเตอร์อัจฉริยะในส่วนของระบบสื่อสารนั้น [10], สามารถแยกส่วนการทำงานได้ดังนี้ คือ ส่วนรวบรวมข้อมูล (Data Concentrator Unit, DCU) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากมิเตอร์อัจฉริยะเพื่อส่งข้อมูลที่รวบรวมนั้นส่งไปให้ส่วนจัดการข้อมูลมิเตอร์ โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าดูแลและควบคุมระบบมิเตอร์ภายในโครงข่าย
- ดูแลสถานะโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ชนิดอื่นที่อยู่ในโครงข่าย

การเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างมิเตอร์อัจฉริยะกับส่วนรวบรวมข้อมูล (DCU) ผ่านโครงข่าย เส้นใยแก้วนำแสงและแบบโครงข่ายไร้สาย และระบบสื่อสารระหว่างส่วนรวบรวมข้อมูล (DCU) กับ ส่วนจัด การข้อมูลมิเตอร์อัจฉริยะนิยมใช้การสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กับเครื่องมือสื่อสารที่มีการรับส่งข้อมูลจำนวนไม่มาก

### 2.1.2.1 โครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารระยะไกล

**โครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสารระยะไกล (Wide Area Network Infrastructure -WAN) [9]**, เป็นระบบสื่อสารตัวกลางในการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างระบบเครือข่าย WAN ของเครื่องวัดกับผู้ใช้บริการระบบไฟฟ้า เพื่อนำข้อมูลไปบริหารจัดการต่อไปในทางกลับกันผู้ใช้บริการไฟฟ้าก็สามารถส่งข้อมูลย้อนกลับไปยังเครื่องวัดหรือผู้ใช้ไฟฟ้าได้เช่นกัน โครงสร้างพื้นฐานระบบสื่อสาร WAN นอกจากใช้กับมิเตอร์อัจฉริยะแล้ว ยังถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบ Smart Grid ด้วย

ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน WAN จึงเป็นการออกแบบสำหรับโครงข่ายการสื่อสารสำหรับระบบ Smart Grid ที่ต้องรองรับการสื่อสารของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ Smart Grid ด้วยโครงข่ายจึงต้องมีความสามารถในการรองรับข้อมูลขนาดใหญ่และครอบคลุมพื้นที่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทั้งนี้สามารถแบ่งกลุ่มของเทคโนโลยีที่ใช้ระบบสื่อสารเป็น 2 กลุ่มคือ เทคโนโลยีที่ใช้สายและเทคโนโลยีไร้สาย

#### กลุ่มเทคโนโลยีใช้สาย (Wired Technologies)

- โครงข่าย Fiber Optic เป็นโครงข่ายสื่อสารที่สามารถรับ-ส่ง ข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ และมี Bandwidth ที่สูง ซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์ต่อร่วมในการเชื่อมต่อกับโครงข่าย สามารถส่งข้อมูลได้ในระยะ ไกล โดยมีสายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable) ซึ่งถือเป็นต้นทุนหลักของการสร้างโครงข่าย เพื่อรองรับระบบมิเตอร์อัจฉริยะ และ Smart Grid ด้วยต้นทุนที่สูงของโครงข่าย Fiber Optic
- xDSL Digital Subscriber Line คือเทคโนโลยีโมเด็มที่ทำให้คู่สายทองแดงธรรมดา กลายเป็นสื่อการสัญญาณแบบดิจิทัล โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล (Modulation) ในย่านความถี่ที่สูงกว่า การใช้งานโทรศัพท์โดยทั่วไป
- ADSL เป็นเทคโนโลยีที่ผู้ใช้บริการเลือกใช้มากที่สุด เพราะเป็นเทคโนโลยีที่มีความเร็วสูงและระยะทางที่ใช้งานได้ค่อนข้างไกล ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันมากที่สุด

- PLC (Power Line Communication) เป็นระบบที่ผู้ให้บริการระบบจำหน่ายไฟฟ้านิยมใช้เพื่อการควบคุมอุปกรณ์อื่น ในระบบไฟฟ้า โดยการส่งสัญญาณผ่านสายไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ซึ่งมีหลากหลายเทคโนโลยีด้วยกัน ได้แก่
  - *Broadband Power Line (BPL)* เป็นการนำมาใช้งานเพื่อเข้าถึงโครงข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงใช้ในการให้บริการด้านโทรคมนาคม
  - *Narrowband PLC* มีการใช้งานในหลายประเทศ มีการใช้งานในหลายรูปแบบ แต่มีความสามารถในการส่งข้อมูลได้ไม่เร็วมาก ส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานในลักษณะของการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ภายในบ้าน

#### กลุ่มเทคโนโลยีไร้สาย (Wireless Technologies)

- Radio Frequency Mesh (RF-Mesh) เป็นการใช้คลื่นวิทยุในการส่งสัญญาณและการเชื่อมต่อนั้นถูกขยายไปด้วย Access Point นั้นเราอาจจะเรียกได้ว่าเป็น node จะติดต่อกับ node ใกล้เคียงโดยอัตโนมัติ ซึ่ง node นั้นจะมีตัวส่งสัญญาณวิทยุเพื่อส่งข้อมูลกับผู้ใช้งานและส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ที่ถูกโปรแกรมให้สื่อสาร โดยเลือกเส้นทางอัตโนมัติที่ส่งข้อมูลได้เร็วที่สุด
- GSM/GPRS (General Packet Radio Service) เป็นการสื่อสารผ่านโครงข่ายของผู้ให้บริการโทรศัพท์ไร้สาย เป็นระบบสื่อสารที่นำมาประยุกต์ใช้ง่ายที่สุด และไม่ต้องลงทุนมาก แต่มีข้อจำกัดของความเร็วที่ไม่สูงมาก
- LTE (Long Term Evolution)/LTE Advanced ระบบสื่อสารของโทรศัพท์มือถือโดยมีเป้าหมายในการออกแบบให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้มากขึ้นและเร็วขึ้น

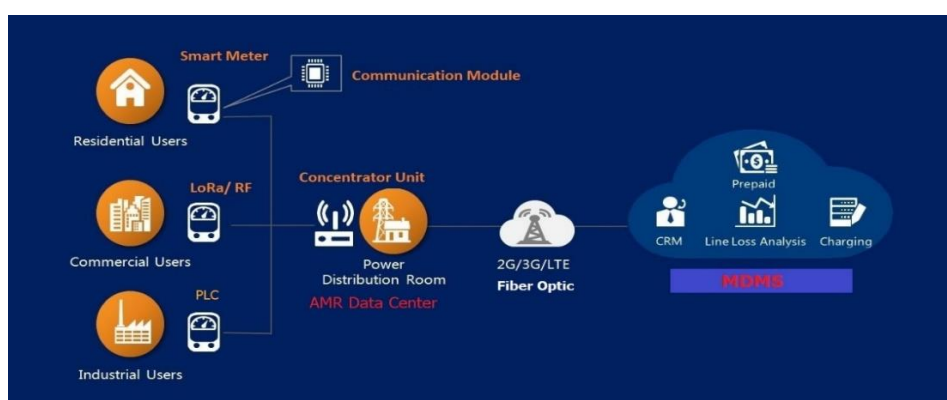
#### 2.1.2.2 โครงสร้างพื้นฐานระบบเครือข่ายระยะใกล้

โครงสร้างพื้นฐานระบบเครือข่ายระยะใกล้ (Local Area Network -LAN) [9], เป็นระบบสื่อสารสำหรับการติดตั้ง Smart Meter ของผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูง การใช้ระบบสื่อสารจากโครงสร้างพื้นฐานโดยตรง อาจไม่คุ้มค่าในการลงทุนระยะสั้น จึงต้องใช้ระบบเครือข่ายท้องถิ่น (Local Area Network-LAN) สำหรับระบบเครือข่ายระยะใกล้นั้นมีรูปแบบส่วนใหญ่ดังนี้ คือ

1. เทคโนโลยีใช้สาย (Wired Technologies) สายสัญญาณที่นิยมใช้ได้แก่
  - UTP (Unshielded Twisted Pair) เป็นสายที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในระบบเครือข่ายโดยสามารถใช้เพื่อรับส่งข้อมูลทั้งแบบเสียง และข้อมูล
  - PLC (Power Line Communication) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลผ่านโครงข่ายสายไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2. เทคโนโลยีไร้สาย (Wireless Technologies) เป็นเครือข่ายไร้สาย ซึ่งให้ความยืดหยุ่น และคล่องตัวสูง เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้คลื่นรับส่งข้อมูลระหว่างกันผ่านทางอากาศ ได้แก่ ZigBee, 6LoWPAN, LoRa, NB-IoT, WiFi (2.4 GHz, 5GHz) เป็นต้น

การเชื่อมต่อสำหรับส่งข้อมูลไปยังระบบโครงสร้างส่วนกลาง สามารถเชื่อมต่อโดยผ่านสื่อกลางในการรับส่งข้อมูลได้หลายชนิด โดยเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสมของพื้นที่และจำนวนเครื่องวัดที่ติดตั้งในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งการส่งสัญญาณข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างเครื่องวัดกับระบบสื่อสารส่วนกลางนั้นสามารถแสดงการรับส่งข้อมูลได้ดังในรูปที่ 2-2 [9].



รูปที่ 2-2 องค์ประกอบโครงข่ายระบบสื่อสารของมิเตอร์อัจฉริยะ

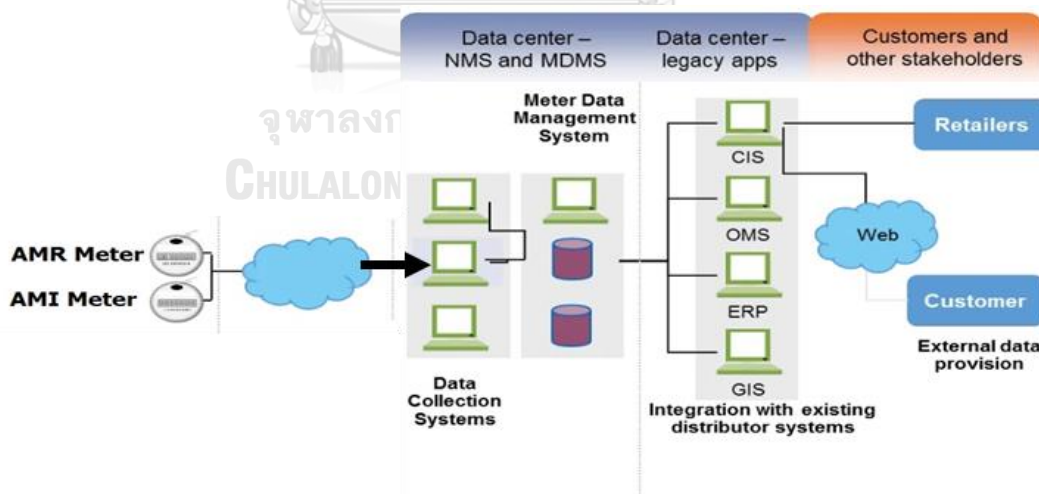
### 2.1.3 ระบบการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์อัจฉริยะ

ระบบการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์อัจฉริยะ (Meter Data Management System - MDMS) [9], เป็นระบบคอมพิวเตอร์และโครงสร้างเครือข่ายโปรแกรมที่ทำงานร่วมกับมิเตอร์แบบ AMR และแบบ AMI มีหน้าที่หลักในการนำข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบฐานข้อมูลกลาง (AMR Data Center) มาบริหารจัดการอย่างเป็นระบบ เพื่อประโยชน์ในการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่างๆ และตอบสนองต่อการเติบโตของความต้องการใช้ไฟฟ้าตามพื้นที่ พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของลูกค้าแต่ละกลุ่ม นอกจากนี้ยังสามารถจัดการในส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ในการแสดงผลข้อมูลให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบและเรียกดูข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของตน ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักอีกประการของการบริหารจัดการ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้า หรือปรับปรุงการให้บริการที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น

ระบบการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์ [10], ในระบบส่วนงานหลักของมิเตอร์อัจฉริยะ นั้นมีหน้าที่บริหารจัดการข้อมูลด้านต่างๆ ที่ได้จากการทำงานของมิเตอร์อัจฉริยะ โดยจะถูกติดตั้งที่จุดศูนย์กลางของระบบควบคุม ซึ่งการจัดการข้อมูลมิเตอร์จะทำงานร่วมกับฐานข้อมูลและระบบงานต่างๆ จะนำข้อมูลจากฐานข้อมูลไปใช้งานตามความต้องการของแต่ละระบบงานโดยการนำข้อมูลที่ถูกจัดเก็บไปใช้กับระบบงานอื่นมีดังนี้

- ระบบจัดการฐานข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้า (Customer Information System, CIS) เป็นระบบจัดเก็บและบริหารข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น ชื่อและที่อยู่ผู้ใช้ไฟฟ้า มิเตอร์ไฟฟ้า พร้อมทั้งข้อมูลการใช้ไฟฟ้าและหมายเลขมิเตอร์ไฟฟ้า
- ระบบคำนวณค่าไฟฟ้า (Billing) ทำหน้าที่คำนวณค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากมิเตอร์อัจฉริยะที่เก็บไว้ในฐานข้อมูล
- ระบบการออกแบบและวางแผนพยากรณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าในอนาคต รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ทำให้สามารถวางแผนการผลิตและระบบจำหน่ายได้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า
- ระบบจัดการเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขัดข้อง (Outage Management System, OMS) ระบบที่ช่วยให้สามารถแก้ไขการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติของระบบไฟฟ้า เนื่องจากมิเตอร์อัจฉริยะ มิเตอร์อัจฉริยะจะส่งข้อมูลให้ส่วนจัดการข้อมูลมิเตอร์ทันที ทำให้ตอบสนองและให้บริการต่อผู้ใช้ไฟฟ้าได้รวดเร็วยิ่งขึ้น
- ระบบควบคุมการทำงานหรือการปลดสับอุปกรณ์ในระบบจำหน่าย (Distribution Management System, DMS) เพื่อให้เกิดการส่งจ่ายระบบไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ความเชื่อถือได้สูง ซึ่งข้อมูลจากส่วนจัดการข้อมูลมิเตอร์มีความสำคัญในการนำข้อมูลไปใช้งานในหลากหลายระบบงานต่อไปได้

โดยแสดงระบบการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์อัจฉริยะได้ดังแสดงในรูปที่ 2-3



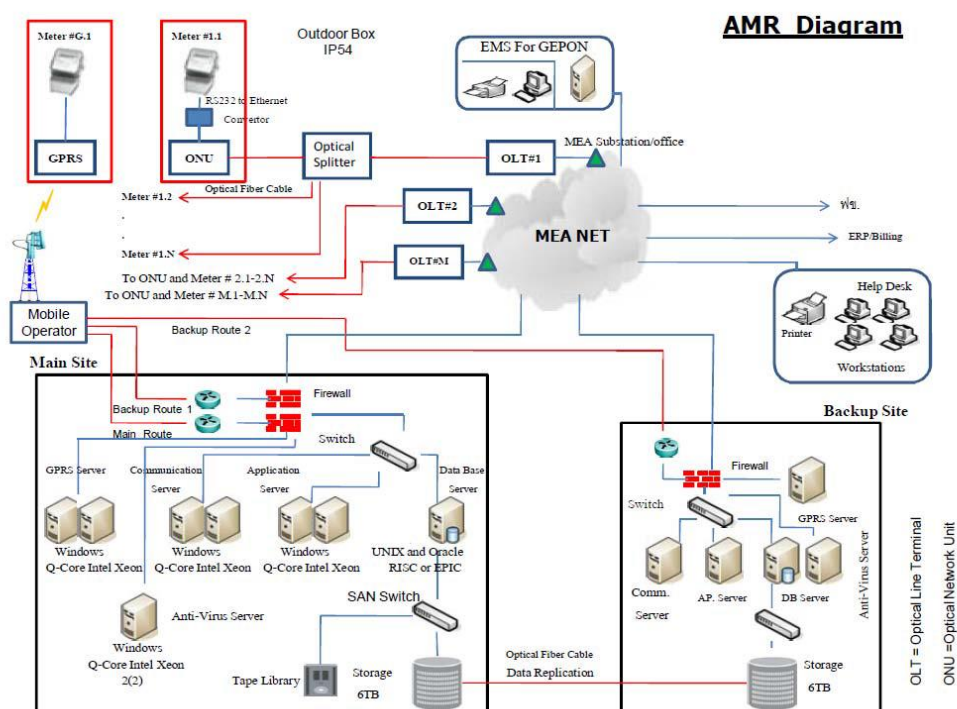
รูปที่ 2-3 ระบบการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์อัจฉริยะ

## 2.2 รายละเอียดคุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ กฟน.ใช้งาน

จากหัวข้อที่ 2.1 ได้กล่าวถึงคุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์และการเชื่อมต่อในเชิงเทคนิค ซึ่งคุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์พื้นฐานที่สำคัญต้องเป็นดังนี้

- สามารถแสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้าทุก 15 นาทีตามช่วงเวลา เช่น รายวัน, รายสัปดาห์, รายเดือน, รายปีและตามช่วงเวลาที่กำหนดในรูปแบบกราฟประเภทต่างๆ
- สามารถปรับค่าเวลาของมิเตอร์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทุกเครื่องโดยอัตโนมัติแสดงข้อมูลเป็นกลุ่มได้ เช่น ข้อมูลแยกตามประเภทธุรกิจ, ข้อมูลแยกตามการไฟฟ้า เป็นต้น
- สามารถเปรียบเทียบข้อมูลการใช้ไฟฟ้า ณ วันเวลาใดเวลาหนึ่งตามที่ต้องการ

ประโยชน์ที่ กฟน.ได้รับจากการติดตั้งมิเตอร์เอเอ็มอาร์ คือ สามารถตรวจสอบข้อมูลการใช้ไฟฟ้าได้ตลอดเวลาที่สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายได้, สรุปรายวัน, รายสัปดาห์, รายเดือนและรายปี หรือเปรียบเทียบข้อมูลการใช้ไฟฟ้า ณ วันเวลาใดเวลาหนึ่ง และสามารถนำข้อมูลการใช้ไฟฟ้า (Load Profile) ของผู้ใช้ไฟฟ้าไปบริหารจัดการ (Demand Side Management) ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จากคุณสมบัติและประโยชน์มิเตอร์เอเอ็มอาร์ทำให้ กฟน.มีความต้องการจัดทำโครงสร้างระบบ AMR System เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการลูกค้า, การเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้า, การจัดเก็บข้อมูลเพื่อการวางแผนทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ได้แก่ การขยายตัวของผู้ใช้ไฟฟ้า การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าผู้ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งต้องใช้เวลาประมวลผลและเก็บข้อมูลจากการอ่านมิเตอร์เอเอ็มอาร์ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดของโครงสร้างระบบ AMR System [10], ได้แสดงตามผัง AMR Diagram ของ กฟน.ดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 ผังการทำงานระบบ AMR System ของ กฟน.



โดยปัจจุบันมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที กฟน.ใช้งานส่วนใหญ่ คือรุ่น Elster A1800 Alpha ซึ่งมีราคาไม่เกินหนึ่งหมื่นบาท โดยมีคุณสมบัติในการวัดค่าทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2-5 [11].

Technical details	Advanced features and functions
<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 62053 accuracy Class 0.2 %, 0.5 %, and 1.0 %</li> <li>• UV-protected, polycarbonate, IP54 enclosure</li> <li>• Wide operating ranges:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltage: 46 V to 528 V</li> <li>• Current: 1 mA to 10 A (CT-connected)</li> <li>• Temperature: -40 °C to +85 °C (inside meter)</li> </ul> </li> <li>• Energy plus demand for kWh, kVARh, and kVAh</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programmable thresholds for TR<sub>ue</sub>Q monitors</li> <li>• Optional 1 MB extended memory</li> <li>• Transformer and line loss compensation</li> <li>• Up to 8 channels of load profile data</li> <li>• Up to 32 channels of instrumentation profile data</li> <li>• External power supply support</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Four-quadrant metering for export-import</li> <li>• Up to 4 tariffs per day for 4 day types</li> <li>• Up to 12 seasons</li> <li>• Nonvolatile memory</li> <li>• Easily replaceable battery located under the terminal cover</li> <li>• Precision internal clock with backup timekeeping provided by super capacitor and long-life battery</li> <li>• 16-segment character LCD with optional backlight</li> <li>• Windows-based software with multi-language support</li> </ul>	<p>Visit the A1800 ALPHA meter product page at <a href="http://www.elstersolutions.com">www.elstersolutions.com</a> for the latest information.</p>

รูปที่ 2-5 คุณสมบัติในการวัดค่าทางไฟฟ้าของมิเตอร์เอเอ็มอาร์รุ่น Elster A1800 Alpha

รวมถึงมิเตอร์เอเอ็มอาร์รุ่นใหม่ที่ กฟน. นำมาใช้งานเพิ่มเติม คือรุ่น EDM1 - Mk10E ซึ่งมีราคาประมาณสองหมื่นบาท โดยมีคุณสมบัติในการวัดค่าทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2-6 [12].

Measurement	Power Quality Indication	Load Survey / Profile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Class 0.5S &amp; Class 1 (MID Class &amp; Class B)</li> <li>• Compliance with IEC 62052-11, 62053-21, 62053-22, 62053-23</li> <li>• Compliance with AS 62052.11, 62053.21, 62053.22, 62053.23</li> <li>• Compliance with EN 50470-1, 50470-3</li> <li>• 3 Phase 3 Wire, 3 Phase 4 Wire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Total Harmonic Distortion (THD)</li> <li>• Sequence Components</li> <li>• Sag / Swell Display</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AMI Ready</li> <li>• Up to 2.1 Megabytes of Non-Volatile Memory</li> <li>• Over 7200 Days (20 Years) Storage (2 Channels, 30-Minute Intervals)</li> <li>• Up to 32 Channels</li> <li>• Intervals Programmable from 1 to 60 Minutes</li> <li>• 2 Independent Surveys</li> <li>• Energy, Instantaneous Readings, Pulsing Inputs as Channel Sources</li> <li>• Ability to Store Average/Minimum/Maximum Values for Interval Duration</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltage &amp; Power Supply               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nominal Voltage: 57.7V – 240V L-N</li> <li>• Operating Limit: 52V – 290V L-N</li> <li>• Burden: &lt;10VA/phase @ V<sub>n</sub> (3 Phase) (IEC 62053-61 Compliant)</li> <li>• Frequency Range: 45Hz – 65Hz</li> <li>• Option for Auxiliary Supply &amp; UPS</li> </ul> </li> <li>• Current               <ul style="list-style-type: none"> <li>• CT Range: 1/4A, 1/10A, 5/20A</li> <li>• CT Limit: 20 times I<sub>max</sub> for 0.5 seconds</li> <li>• WC Range: 5/100A, 10/100A (Class 1 or 2)</li> <li>• WC Limit: 30 times I<sub>max</sub> for 0.5 cycles</li> <li>• Burden: &lt;0.5VA/phase</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sag / Swell               <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 Cycle Resolution</li> <li>• Records Time/Date/Phase/Duration/ Average &amp; Worst Excursion</li> <li>• Programmable Trigger Levels</li> </ul> </li> <li>• Inputs / Outputs Configuration               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Standard Top Row I/O:                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- Up to 4 I/O Total, Independent Common Ground, 4KV Isolation</li> <li>- Options Include: Passive/Active Inputs, 50/BOSFET/Relay Outputs</li> </ul> </li> <li>• Passive Input Voltage: 5V, 12V, 48V, 110V, 240V</li> <li>• Active Input Voltage: 12V</li> <li>• BOSFET Output: 240V, 100mA maximum</li> <li>• SO Output: 27V, 27mA maximum</li> <li>• Relay Output: 240V, 5A/2A</li> <li>• Extended Bottom Row I/O: (Optional)</li> <li>- As per Standard I/O</li> <li>• Output Pulse Width: 1ms to 100ms</li> </ul> </li> <li>• Environmental               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Operating Range: -25°C to +60°C</li> <li>• Limit Range: -40°C to +70°C</li> <li>• Storage Range: -40°C to +80°C</li> <li>• Relative Humidity: Up to 95% non-condensing for 30 days</li> <li>• Ingress Protection: IP54</li> <li>• Salt Spray Resistant (IEC 60068-2-11)</li> </ul> </li> <li>• Large LCD Display               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Large 7-Segment Display</li> <li>• Display Digit Size: 10.7mm (H)</li> <li>• Up to 60 User-Defined Screens of any Meter Parameter</li> <li>• Definable Enunciators</li> <li>• Display Available without Main Power</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Time Clock &amp; Calendar               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Accuracy (internal) within 15 Seconds per Month at 23°C</li> <li>• Backup Time of 10 Years without Power (Lithium Battery)</li> <li>• Mains Synchronised or Internal Crystal Timing (Selectable)</li> <li>• Supports Daylight Saving Time</li> <li>• Supports Gregorian or Persian Calendars</li> </ul> </li> <li>• Time of Use               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Up to 8 Rates plus Unified Rate</li> <li>• Up to 32 Separate Import &amp; Export Registers</li> <li>• Daily, Weekly, Monthly, Yearly &amp; Special</li> <li>• Up to 200 programmable Special Days</li> <li>• Up to 61 Previous Periods plus Period Totals</li> <li>• Block or Rolling Maximum Demand</li> <li>• Energy, Pulsing Inputs</li> <li>• Time of Maximum Demand</li> </ul> </li> <li>• Physical Dimensions               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Standard Version: Approx. 262mm (L) x 175mm (W) x 95mm (D)</li> <li>• Weight: Approx. 2.0 kg</li> </ul> </li> </ul>

รูปที่ 2-6 คุณสมบัติในการวัดค่าทางไฟฟ้าของมิเตอร์เอเอ็มอาร์รุ่น EDM1 - Mk10E

### 2.2.1 ข้อบกพร่องของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ในการวัดค่าทางไฟฟ้า

จากคุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ กปน. ใช้งานนั้น ผู้วิจัยได้สรุปข้อมูลการวัดค่าทางไฟฟ้าของทั้งสองรุ่นนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2-3 พบว่าคุณสมบัติในการวัดค่าทางไฟฟ้านั้นไม่สามารถวัดค่าเกี่ยวกับฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้เลย ซึ่งในส่วนมิเตอร์เอเอ็มอาร์รุ่น Elster A1800 Alpha สามารถวัดได้เพียงค่าพื้นฐานทางไฟฟ้าและคุณสมบัติที่จำเป็นในระบบเอเอ็มอาร์เท่านั้น และในส่วนมิเตอร์เอเอ็มอาร์รุ่น EDMI - Mk10E สามารถวัดค่าพื้นฐานทางไฟฟ้าและสามารถวัดเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวมได้ แต่ไม่สามารถวัดเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของแต่ละลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสได้ โดยปัญหาคุณภาพไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็เป็นปัญหาจากด้านฮาร์มอนิกทั้งนั้นซึ่งปัญหาด้านฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้านี้เป็นที่สนใจของ กปน. เช่นกันในฐานะผู้ให้บริการด้านไฟฟ้า แต่ด้วยราคามิเตอร์ที่สามารถวัดค่าพื้นฐานทางไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถวัดลำดับฮาร์มอนิกได้ด้วยนั้นมีราคาค่อนข้างแพง จึงทำให้การเปลี่ยนมิเตอร์นั้นในระบบไฟฟ้าค่อนข้างน้อยและไม่เพียงพอที่จะสะท้อนปัญหาด้านฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่ทั้งหมดภายในระบบไฟฟ้าของ กปน. ได้

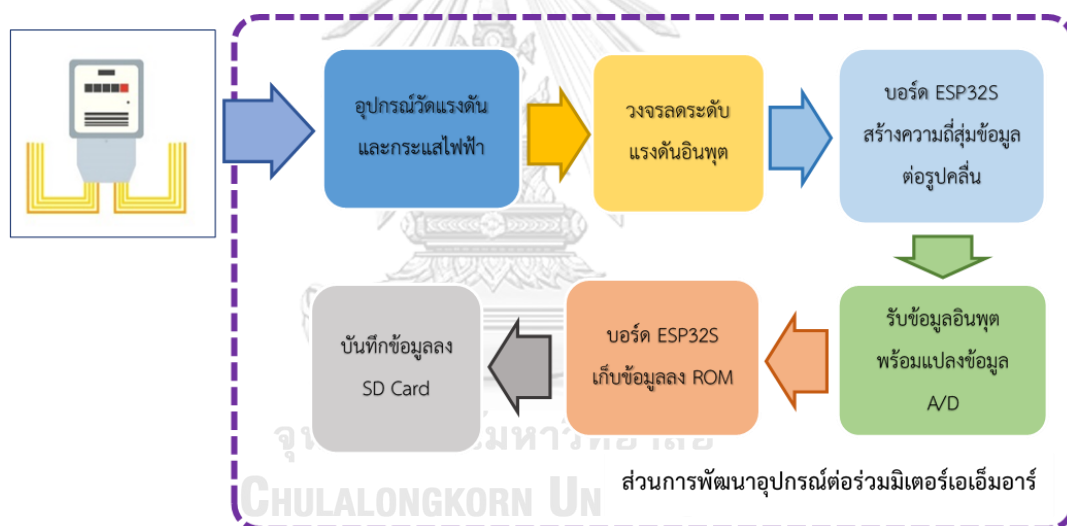
ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ กปน. ใช้งาน

คุณสมบัติมิเตอร์เอเอ็มอาร์ในการวัดข้อมูลทางไฟฟ้า	รุ่นมิเตอร์เอเอ็มอาร์	
	EDMI Mk10E	ELSTER A1800
แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( $V_{3\phi}$ )	✓	✓
กระแสไฟฟ้า 3 เฟส ( $I_{3\phi}$ )	✓	✓
กำลังไฟฟ้าจริง (P)	✓	✓
กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q)	✓	✓
กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)	✓	✓
ตัวประกอบกำลัง (P.F.)	✓	✗
% ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกโดยรวมของแรงดัน ( $THD_V$ )	✓	✗
% ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกโดยรวมของกระแส ( $THD_I$ )	✓	✗
แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 19	✗	✗
กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ถึง 19	✗	✗

## 2.2.2 แนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ในการวัดค่าทางไฟฟ้า

จากข้อบกพร่องของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่ กฟน.ใช้งานดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.1 จึงเป็นเหตุผลในการวิจัยในวิทยานิพนธ์ แต่เนื่องจากเราไม่สามารถปรับปรุงแก้ไขที่ตัวมิเตอร์เอเอ็มอาร์โดยตรง ด้วยเหตุผลของเรื่องการรับประกันและสัญญาในการจัดซื้อ จึงทำให้ต้องพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์แทน โดยผู้วิจัยกำหนดรายละเอียดการทำงานของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เบื้องต้นนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2-7 ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้คือ อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้น สามารถใช้ร่วมกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ได้ทุกรุ่น เพิ่มความสามารถมิเตอร์เอเอ็มอาร์ให้สามารถวัดค่าพื้นฐานทางไฟฟ้า, เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวม และสามารถวัดเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของแต่ละลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญตามความต้องการของ กฟน. ดังที่กล่าวไว้

โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ และรายละเอียดในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้นจะกล่าวถึงในบทที่ 3



รูปที่ 2-7 แนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

### บทที่ 3

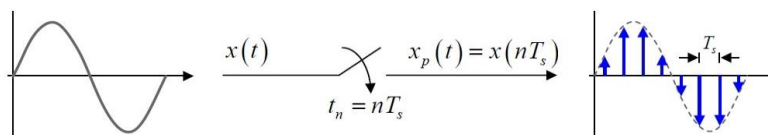
#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

##### 3.1 ทฤษฎีการสุ่มข้อมูลของรูปคลื่น

ทฤษฎีการสุ่มข้อมูลของรูปคลื่น [13], เป็นการประมวลผลสัญญาณต่างๆ นิยมทำในรูปของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาหรือสัญญาณดิจิทัล ทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ข้อมูลในรูปของสัญญาณดิจิทัลมีความสะดวกในการจัดเก็บมากกว่าข้อมูลในรูปของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาหรือสัญญาณแอนะล็อก อย่างไรก็ตามสัญญาณที่ใช้งานส่วนมากจะอยู่ในรูปของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา ดังนั้นกระบวนการแปลงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้อยู่ในรูปของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยไม่มีคามผิดเพี้ยน หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า “กระบวนการสุ่มข้อมูลตัวอย่าง (sampling process)” จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบต่างๆ โดยกระบวนการสุ่มข้อมูลจะชักตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาในทุกช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3-1

โดยกำหนดให้  $t_n = nT_s$  และกำหนดให้  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยที่  $T_s$  คือคาบเวลาการชักตัวอย่าง (sampling period) ให้อยู่ในรูปของสัญญาณ  $X_p(t)$  แสดงได้ดังสมการที่ (3-1)

$$X_p(t) = X(t) \Big|_{t=nT_s} = X(nT_s) \quad (3-1)$$



รูปที่ 3-1 กระบวนการชักตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา  $x(t)$

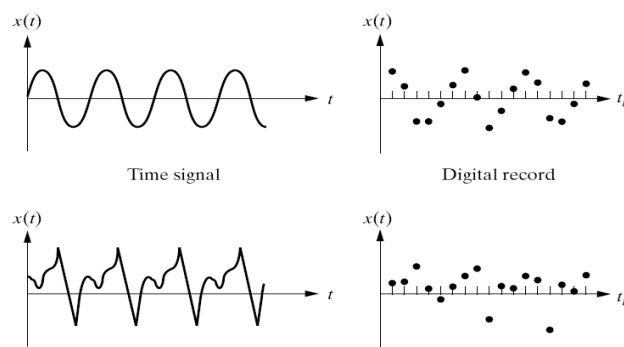
ในทางปฏิบัติสิ่งที่ต้องการจากกระบวนการชักตัวอย่างคือ ต้องการให้ลำดับข้อมูลที่ได้จากการชักตัวอย่างตรงตามข้อมูลเดิม โดยไม่มีการสูญเสียเพื่อจะได้สามารถนำลำดับข้อมูลมาสร้างให้กลับได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามข้อกำหนดนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อกระบวนการชักตัวอย่างสอดคล้องกับทฤษฎีบทการชักตัวอย่างของไนควิสต์ (Nyquist's sampling theorem) มิฉะนั้นแล้วข้อมูลที่ต่อเนื่องทางเวลาหลายข้อมูล เมื่อชักตัวอย่างแล้วอาจทำให้ได้ลำดับข้อมูลไม่เหมือนกับข้อมูลเดิม ในส่วนทฤษฎีบทการชักตัวอย่างของไนควิสต์จะกล่าวถึงเงื่อนไขที่ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการชักตัวอย่างข้อมูลที่ต่อเนื่องทางเวลาโดยไม่มีการสูญเสีย ซึ่งการสุ่มข้อมูลนี้จะสามารถนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาโดยไม่มีคามผิดเพี้ยนของข้อมูลได้

การชักตัวอย่างข้อมูลที่ต่อเนื่องทางเวลาโดยไม่มีการสูญเสียนั้น การชักตัวอย่างจะต้องมีความถี่สุ่มข้อมูลตัวอย่าง (Sampling frequency) [14], มากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่สูงสุด

ของข้อมูลที่ต่อเนื่องทางเวลานั้น โดยช่วงเวลาที่แต่ละจุดข้อมูลห่างกันนั้นสามารถคำนวณได้จากความถี่สุ่มข้อมูลดังสมการที่ (3-2)

$$T_s = \frac{1}{\text{Sampling Frequency}} \quad (3-2)$$

หากใช้ความถี่สุ่มข้อมูลมากขึ้นก็จะทำให้วัดสัญญาณได้ตรงกับลักษณะสัญญาณเดิมเหมือนจริงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3-2 อย่างไรก็ตามหากใช้ความถี่สุ่มสัญญาณสูงมากเกินไปก็จะส่งผลต่อจำนวนข้อมูลที่จัดเก็บและดำเนินการต่อมากขึ้นเกินกว่าความจำเป็น และจะส่งผลต่อจำนวนข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลที่มากขึ้นจนเกินกว่าความจำเป็น อาจได้ความแม่นยำของข้อมูลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ในทางกลับกันหากใช้ความถี่สุ่มข้อมูลน้อยเกินไปแล้ว อาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เอเลียสซิง (Aliasing) ขึ้นได้

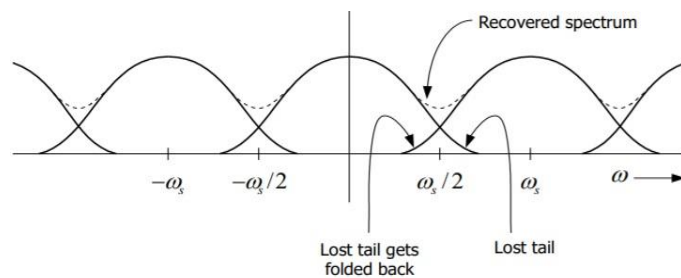


รูปที่ 3-2 ตัวอย่างการสุ่มข้อมูลตามความถี่การซิกตัวอย่าง

**การเกิดความผิดพลาดเอเลียสซิง** [15], คือสัญญาณข้อมูลที่ถูกสุ่มด้วยอัตราที่ต่ำกว่าอัตราการสุ่มของไนควิสต์ ทำให้มีส่วนที่ทับกัน ในกรณีเช่นนี้การจะนำเอาสัญญาณที่ถูกสุ่มข้อมูลกลับมา ไม่สามารถที่จะทำได้เพราะสัญญาณที่ถูกสุ่มมีสัญญาณไม่เหมือนกับสัญญาณเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเกิดความผิดพลาดเอเลียสซิง (aliasing error) ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่ไม่ต้องการ และพบว่าการสุ่มสัญญาณมีความถี่การสุ่มต่ำเกินไป เมื่อนำข้อมูลที่สุ่มได้มาสร้างสัญญาณใหม่จึงได้สัญญาณที่ไม่ถูกต้อง และมีความถี่ต่ำกว่าความถี่สัญญาณจริง

อย่างไรก็ตามสัญญาณที่ใช้จริงในทางปฏิบัติเป็นสัญญาณที่เป็นแบบจำกัดทางเวลา ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่จำกัดทางความถี่ (Non Bandlimited Signal) ซึ่งไม่สามารถที่จะสุ่มสัญญาณได้ครบ แต่ปัญหาตรงนี้สามารถที่จะแก้ไขได้ โดยสามารถจำกัดแบนด์วิดท์ให้อยู่ในช่วงเวลาหนึ่งได้ เนื่องจากสัญญาณที่มีองค์ประกอบทางความถี่สูงขึ้น และมีค่าลดลงต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณผ่านตัวกรองผ่านความถี่ต่ำก่อน เพื่อจำกัดความถี่ของสัญญาณให้เหมาะสมกับความถี่ที่ต้องการสุ่ม

ซึ่งการแก้ปัญหาการเกิด Aliasing [14], ดังแสดงในรูปที่ 3-3 นี้ อาจทำได้โดยเลือกความถี่ สุ่มข้อมูลให้มากกว่าความถี่ที่สนใจไม่น้อยกว่า 2.5 เท่า ดังนั้นนอกจากการเลือกความถี่สุ่มข้อมูลให้เหมาะสมแล้ว ก็อาจให้สัญญาณที่จะสุ่มข้อมูลผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ Antialiasing filter ซึ่งเป็น Low-pass filter แบบหนึ่งซึ่งจะตัดความถี่ที่สูงเกินกว่าที่สนใจออกไป



รูปที่ 3-3 ปรากฏการณ์ความผิดพลาดเอเลียสซิง

### 3.2 การแปลงสัญญาณระหว่างแอนะล็อกกับดิจิทัล

การแปลงสัญญาณระหว่างแอนะล็อกกับดิจิทัล [16], ในระบบการวัดข้อมูลทางไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดข้อมูลให้ปริมาณสัญญาณไฟฟ้าออกมา ซึ่งอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้าให้ผลลัพธ์การวัดเป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าในย่านที่อุปกรณ์กำหนด ในรูปแบบสัญญาณแอนะล็อกตามปริมาณที่ตรวจจับได้ของสัญญาณต้นแบบ ตามปริมาณทางฟิสิกส์ของอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้าที่ตรวจจับสัญญาณนั้น การเชื่อมโยงกันระหว่างอุปกรณ์วัดสัญญาณทางไฟฟ้าจะต้องมีการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อให้ระบบประมวลผลสามารถประมวลผลข้อมูลได้ และเมื่อประมวลผลแล้วหากต้องการส่งสัญญาณกลับออกมาเป็นสัญญาณแอนะล็อก จำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าให้ผลลัพธ์เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าในย่าน 0-5V นำมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และส่งสัญญาณดิจิทัลเข้าวงจรประมวลผลด้วยระบบดิจิทัล (Digital processing unit) เมื่อประมวลผลแล้ว จำเป็นต้องการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ด้วยวงจรตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เพื่อให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าตามสัญญาณที่ทำการวัด ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 สัญญาณแอนะล็อกเชื่อมต่อกับระบบดิจิทัล

### 3.2.1 การแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D)

การแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ Ramp ด้านอินพุตของวงจรรับแรงดันแอนะล็อก ทำหน้าที่แปลงแรงดันขนาด 4 บิต ค่าแรงดันต่ำสุดจะได้รหัสดิจิทัลเอาต์พุต 4 บิต เท่ากับ 0000 และที่ค่าแรงดันอินพุตสูงสุด จะได้รหัสดิจิทัลเอาต์พุต 4 บิต เท่ากับ 1111

การแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ Parallel Comparator เป็นวงจรการแปลงสัญญาณที่มีความเร็วสูงกว่า A/D แบบ Ramp รองรับจำนวนบิตเอาต์พุตที่มาก ขนาดของวงจรใหญ่กว่าแบบอื่น เช่น A/D แบบ Flash ขนาด 8 บิต ต้องใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันถึง  $255 (2^8 - 1)$  ตัวเป็นต้น เพราะต้องใช้ตัวเปรียบเทียบแรงดัน 1 บิตต่อ 1 ตัว หรือ A/D แบบแฟลชขนาด 10 บิต ต้องใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดัน  $1023 (2^{10} - 1)$  จะใช้เวลาในการแปลงระหว่างแรงดันแอนะล็อกเป็นรหัสดิจิทัลน้อยมาก เนื่องจากความไวของออปแอมป์และตัวเข้ารหัสแปลงแรงดันแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 8 บิต มีความเร็วของเวลาในการแปลงน้อยกว่า 10 nS

### 3.2.2 การแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A)

การแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก หมายถึง การแปลงน้ำหนักของรหัสตัวเลขฐานสองผ่านวงจรแปลงให้เป็นแรงดันแอนะล็อก เรียกว่าวงจรแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก โดยวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล 4 บิต ให้เป็นแรงดันแอนะล็อก เช่น ตัวเลขฐานสองให้เป็นแรงดันในอัตราส่วน 1:1 เช่น รหัส 0000 = 0 โวลต์ และรหัส 1000 = 8 โวลต์ เป็นต้น

การแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกแบบโครงข่ายตัวต้านทาน ซึ่งพื้นฐานของการแปลงประกอบไปด้วยวงจร 2 ส่วน คือโครงข่ายตัวต้านทานและวงจรขยายผลรวมสำหรับวงจรขยายรวมจะใช้วงจรรวมออปแอมป์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการทำงาน ประกอบไปด้วยอินพุตแบบวงจรถกลับเฟส และวงจรไม่กลับเฟส

การแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกแบบ R/2R แลตเตอรั เป็นวงจรแปลงดิจิทัลเป็นขนาด 12 บิต ทำให้เกิดปัญหาเรื่องค่าความต้านทานที่ LSB จะมีค่าสูงมากประมาณ  $2 \text{ M}\Omega$  ซึ่งมีปัญหาในการหาค่าความต้านทานค่าต่างๆ ที่แตกต่างกันถึง 12 ค่า จึงมีการออกแบบวงจรที่ใช้ค่าความต้านทานน้อยลง ซึ่งใช้ตัวต้านทานเพียง 2 ค่า ทำให้ออกแบบและสร้างวงจรแปลง D/A ได้ง่ายยิ่งขึ้น

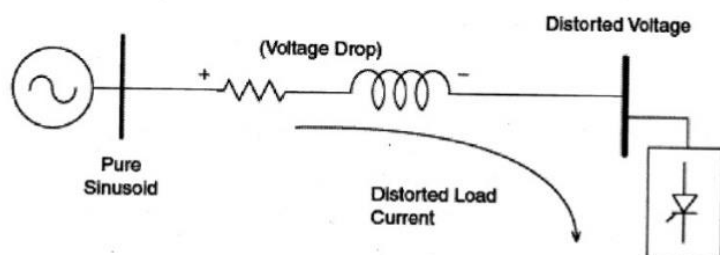
### 3.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

มาตรฐานสากล IEC และ IEEE [17],[18], ให้ความหมายของคุณภาพกำลังไฟฟ้าคือคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหาย ซึ่งปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้านั้น สาเหตุหลักที่ทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบมีความผิดเพี้ยนไปจากปกติ เนื่องมาจากปัญหาฮาร์มอนิกที่อยู่ในระบบไฟฟ้าโดยมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าบางประเภท หรือจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆ

**ฮาร์มอนิก** [19], คือรูปคลื่นไซน์ของแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าและเป็นเลขจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน ซึ่งรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนนี้สามารถแยกออกเป็นผลรวมของความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์มอนิกได้ เนื่องจากอุปกรณ์หรือโหลดแบบไม่เชิงเส้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งความรุนแรงของฮาร์มอนิก อธิบายได้โดยใช้สเปกตรัมฮาร์มอนิก ซึ่งประกอบด้วยขนาด และมุมของฮาร์มอนิกแต่ละค่า โดยค่าที่บอกระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิก คือ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total harmonic distortion, THD) ในบางกรณีมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม อันเนื่องจากโหลดบางชนิดอาจมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูงมากในขณะที่ใช้งาน แต่ไม่ได้สร้างความเสียหายให้กับระบบเพราะกระแสไหลดมีค่าน้อยมาก ถึงแม้ว่าความผิดเพี้ยนจะมีค่าสูงก็ตาม ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าที่ใช้ อธิบายการผิดเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นมาโดยมาตรฐานได้กำหนดค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total demand distortion, TDD) ค่านี้คล้ายกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมแตกต่างกันที่การหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์จะใช้เทียบกับค่ากระแสพิกัดของโหลด

**ความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแส** [17], กรณีจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสฮาร์มอนิกที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3-5 [17], ทำให้การผิดเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากกระแสไหลผ่านโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น การเกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันจะมีค่าขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์และกระแสที่ไหลผ่าน ซึ่งการควบคุมฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน IEEE Standard 519-1992 สามารถทำได้ดังนี้

- 1) การควบคุมปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่เกิดจากโหลดของผู้ใช้ไฟ
- 2) กรณีฮาร์มอนิกอยู่ในข้อจำกัดการควบคุมจะกระทำโดยการไฟฟ้า



รูปที่ 3-5 กระแสไหลผ่านโหลดไม่เชิงเส้น

**ฮาร์มอนิกกับสถานะชั่วคราว** เกิดจากการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยการบันทึกเหตุการณ์ที่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น และมีองค์ประกอบความถี่สูง ในบางครั้งเกิดความเข้าใจผิดและพิจารณาเป็นการเกิดฮาร์มอนิก ซึ่งในความเป็นจริงเหตุการณ์นี้เป็นการเกิดสถานะชั่วคราวของฮาร์มอนิกและสถานะชั่วคราวมีความแตกต่างกันดังนี้



สภาวะชั่วคราว มีรูปคลื่นที่มีความถี่สูงในช่วงเวลาสั้นและหลังจากที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดในระบบไฟฟ้า โดยความถี่นี้ไม่จำเป็นต้องเป็นความถี่ฮาร์มอนิก ทำให้ไม่มีความสัมพันธ์กับความถี่มูลฐาน โดยสภาวะชั่วคราวอาจเกิดจากการสวิตช์ของตัวเก็บประจุเกิดขึ้นได้ในเวลา 2-3 รูปคลื่น ฮาร์มอนิก เกิดขึ้นในช่วงสภาวะคงที่และมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานโดยรูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยนจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือเกิดต่อเนื่องกันเป็นเวลาหลายวินาที โดยเกิดจากการทำงานอย่างต่อเนื่องของโหลด

### กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current)

กระแสฮาร์มอนิก เกิดจากฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในสายในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ เนื่องจากในอดีตไม่มีการศึกษาฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เพราะอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อยทำให้เกิดผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีค่าน้อย แต่ในปัจจุบันมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องขยายตัวมากขึ้น ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกตามมาอย่างมากมาด้วยเช่นกัน

### แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage)

แรงดันฮาร์มอนิก เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เช่น รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังและแรงดันไฟฟ้าให้ดีขึ้นทำให้เกิดความเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันอันต่อเนื่องมาจากค่ารีแอกแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (3-3)

$$V_n = Z_n I_n \quad (3-3)$$

โดยที่

$$V_n = \text{แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ } n$$

$$Z_n = \text{ค่าอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสลำดับที่ } n$$

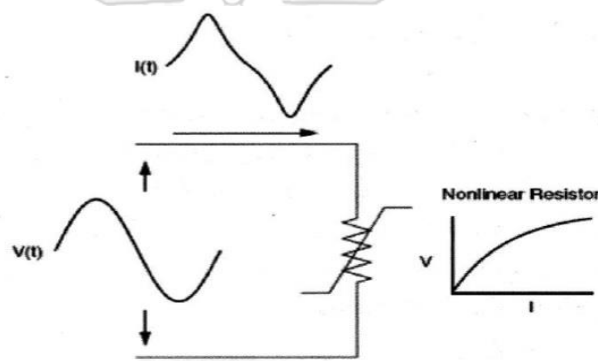
$$I_n = \text{กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ } n$$

กรณีที่เราใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานเข้าไปในระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (P.F.) ในระบบไฟฟ้า ทำให้เกิดข้อเสีย คือ การเพิ่มของระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าขึ้นด้วย เนื่องจากตัวเก็บประจุอาจเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจากการต่อวงจรเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้า และอาจทำให้เกิดสภาวะความถี่รีโซแนนซ์แบบขนานระหว่างตัวเก็บประจุกับรีแอกแตนซ์ภายในระบบไฟฟ้าเมื่อพิจารณากรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกด้วย ในสภาวะความถี่รีโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นบนความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิด

กระแสไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบกับรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสที่เกิดจากสภาวะรีโซแนนซ์รวมกับกระแสฮาร์มอนิกของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระบบไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนของแรงดันเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

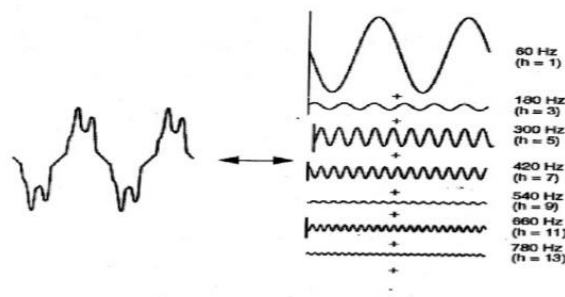
### การผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonics distortion)

การผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก [17], เกิดจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบ โดยอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีค่ากระแสไม่เป็นสัดส่วนกับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3-6 เมื่อแรงดันภายในระบบมีค่าเพิ่มเพียงเล็กน้อยกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากและมีรูปร่างสัญญาณที่ผิดเพี้ยนตามลักษณะของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือเมื่อสัญญาณไฟฟ้าในความถี่หลักมูลเมื่อมีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกผสมเข้าไปจะมีผลทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลเกิดความถี่เพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 3-6 การผิดเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น

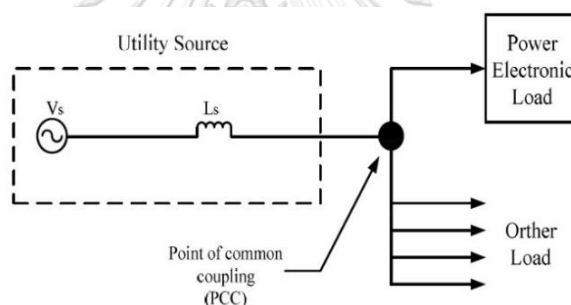
รูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยนในลักษณะเป็นรายคาบ (Periodic) ดังแสดงในรูปที่ 3-7 เกิดจากการรวมของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ ในแต่ละความถี่มีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลัก โดยองค์ประกอบความถี่ที่เกิดขึ้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์ โดยปกติแล้วฮาร์มอนิกอันดับสูงที่มากกว่าอันดับที่ 19 ขึ้นไปจะไม่นำมาวิเคราะห์แต่ฮาร์มอนิกอันดับสูงนั้นอาจระบกวการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงต่ำหรืออุปกรณ์สื่อสารได้



รูปที่ 3-7 การใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์วิเคราะห์รูปคลื่น

### 3.3.1 มาตรฐานและความหมายของฮาร์มอนิก

มาตรฐานที่บ่งบอกถึงขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม [18], สำหรับอ้างอิงในระดับสากลจะใช้การพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling: PCC) ดังแสดงในรูปที่ 3-8 ได้แก่ มาตรฐาน IEEE std. 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในรูปของเปอร์เซ็นต์ทั้งขีดจำกัดความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกและขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC เพื่อกำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของระดับความผิดเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) และระดับความผิดเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Current Distortion) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในระบบไฟฟ้าหลายๆด้าน ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงร่างมาตรฐานเพื่อเป็นกรอบป้องกันและประกาศใช้มาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิก ในการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ามีการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานให้เหมาะสมกับแต่ละประเทศ



รูปที่ 3-8 ไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992

ตามมาตรฐาน IEEE std. 519-1992 [11] ได้กำหนดค่าความเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังไว้ดังตารางที่ 3-1 ดังนี้ [19]

ตารางที่ 3-1 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Harmonic Voltage Distortion (THD <sub>v</sub> ) (%)
≤ 69 kV	3.0	5.0
69,001 kV- 161 kV	1.5	2.5
> 161 kV	1.0	1.5

จากตารางที่ 3-1 แสดงขีดจำกัดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก ที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกจะแบ่งตามระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ เช่น ระบบไฟฟ้า

แรงดันไม่เกิน 69 kV ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของแต่ละลำดับจะต้องไม่เกิน 3% และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THD<sub>v</sub>) ของทุกลำดับจะต้องไม่เกิน 5% โดยกำหนดให้

$THD_i$	คือ	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแส
$THD_v$	คือ	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน
$I_{sc}$	คือ	ค่ากระแสลัดวงจรที่จุดเชื่อมของระบบไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้า
$I_L$	คือ	ค่ากระแสไหลสูงสุดของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน
$h$	คือ	ลำดับฮาร์มอนิก

ตามมาตรฐานได้กำหนดค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังประเภทต่างๆ [19], ไว้ดังตารางที่ 3-2 ถึง 3-4 ดังนี้

ตารางที่ 3-2 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ในระบบส่งและจำหน่ายของแรงต่ำและแรงกลาง (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$ (%)						
$I_{sc} / I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					THD <sub>i</sub> (%)
	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตารางที่ 3-3 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ในระบบแรงสูง (แรงดัน 69,001 V ถึง 161 kV)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$ (%)						
$I_{sc} / I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					THD <sub>i</sub> (%)
	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

ตารางที่ 3-4 ขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกลำดับเลขคี่ในระบบมากกว่า 161 kV

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$ (%)						
$I_{SC} / I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)					THD <sub>i</sub> (%)
	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	
$< 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

จากตารางที่ 3-2 ถึง 3-4 พบว่าค่า  $I_{SC}$  คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC และค่า  $I_L$  คือค่าความต้องการกระแสสูงสุดที่ 50 Hz และ  $h$  คือลำดับฮาร์โมนิกซึ่งการพิจารณาขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกลำดับเลขคี่ของตารางที่ 2-4 ถึง 2-6 จะมีค่าเท่ากับ 25% ของขีดจำกัดค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกลำดับเลขคี่ของแต่ละกรณี จะสังเกตได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกที่ยอมรับได้ ณ จุดต่อรวมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ  $I_{SC} / I_L$  ว่ามีค่าเท่าใด ตัวอย่างเช่นถ้าระบบจำหน่ายมีอยู่ในช่วง 120 V ถึง 69 kV มีค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดต่อรวมเท่ากับ 3000 A และมีความต้องการสูงสุด 100 A ดังนั้นค่าอัตราส่วนของ  $I_{SC} / I_L$  คือ 30 ทำให้กรอบมาตรฐานค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกลำดับ 3, 5, 7, และ 9 จะต้องไม่เกิน 7% และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมแบบ %THD<sub>i</sub> ต้องมีค่าไม่เกิน 8%

### 3.3.2 มาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิกสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย

คณะกรรมการปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า [19], ซึ่งประกอบด้วยผู้แทนจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้พิจารณาเห็นว่าปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) เป็นปัญหาหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันและส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวม ได้แก่ การสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า, การลดอายุการใช้งานของอุปกรณ์, การลดประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์, การเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูญเสียในอุปกรณ์และระบบไฟฟ้า, การทำให้อุปกรณ์ควบคุมและป้องกันในระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาด, การสร้างสัญญาณรบกวนต่อระบบไฟฟ้าสื่อสารซึ่งหากไม่มีการควบคุมฮาร์โมนิกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมก็จะส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ จึงได้จัดทำ “ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม” และ “ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม” ซึ่งได้อ้างอิงจากมาตรฐานสากล โดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ในประเทศไทย

ปัจจุบันเนื่องจากคุณสมบัติของระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากในอดีต ประกอบกับมาตรฐานสากลที่ “ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม” เคยใช้อ้างอิงนั้นได้มีการปรับปรุงแก้ไขให้ทันสมัยขึ้น คณะทำงานศึกษาและปรับปรุง

Power Quality จึงได้ปรับปรุงให้มีความทันสมัยและสอดคล้องกับมาตรฐานสากล โดยได้จัดทำออกมาเป็น “ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมฉบับปี 2551 และได้ नियามคำศัพท์เพื่อให้เข้าใจความหมายที่ตรงกันในการใช้ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมฉบับปี 2551

- ฮาร์มอนิก (Harmonic) ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) สำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทยความถี่หลักมูลมีค่าเท่ากับ 50 Hz ดังนั้น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 100 Hz เรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 2 (Second Harmonic) ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 150 Hz เรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 3 (Third Harmonic) ฮาร์มอนิกเกิดจากการทำงานของโหลดที่ผิดเพี้ยน
- ส่วนประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Component) คือส่วนประกอบของฮาร์มอนิกที่มีอันดับมากกว่าหนึ่งของปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งแสดงในรูปของลำดับ (Order) และค่า RMS ของลำดับนั้น
- ความเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic Distortion) คือการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า (Power Waveform) ไปจากรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยเกิดจากการรวมกันของค่าความถี่หลักมูล (Fundamental) และฮาร์มอนิกอื่นๆ เข้าด้วยกัน
- ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion, THD) คืออัตราส่วนค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Component) กับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ โดยอาจแบ่งเป็นค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ( $THD_V$ ) และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD)
- โหลดผิดเพี้ยน (Distorting Load) คือโหลดซึ่งรับแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Voltage) แต่ดึงกระแสที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ (Non-Sinusoidal Current) สำหรับข้อกำหนดฉบับนี้ โหลดผิดเพี้ยนรวมถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดที่มีการสร้างกระแสหรือแรงดันที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ด้วย
- ระดับวางแผน (Planning Level) คือระดับของแรงดันฮาร์มอนิกที่การไฟฟ้าใช้กำหนดเป็นเป้าหมายเพื่อวางแผนควบคุมมิให้แรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยรวมมีค่าเกินกว่าระดับดังกล่าว เพื่อป้องกันมิให้ฮาร์มอนิกส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยรวม
- จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) คือตำแหน่งในระบบของการไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่สุดซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นอาจต่อร่วมได้

- กำลังไฟฟ้าลัดวงจรต่ำสุด (Minimum Short Circuit Power) คือขนาดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรชนิดสามเฟสต่ำสุดที่จุดต่อร่วมของผู้ใช้ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น MVA
- กำลังไฟฟ้าที่ทำสัญญา (Agreed Power) คือขนาดการขอใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ทำสัญญากับการไฟฟ้า มีหน่วยเป็น MVA
- กำลังจ่ายไฟฟ้ารวม (Total Available Power) คือขนาดกำลังจ่ายไฟฟ้ารวมของระบบที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการจะเชื่อมต่อเช่น ผู้ใช้ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบสายป้อนแรงดันกลาง กำลังจ่ายไฟฟ้ารวมมีค่าเท่ากับขนาดพิกัดของ Power Transformer ในสถานีย่อย Bay ที่จะจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟฟ้านั้น มีหน่วยเป็น MVA
- ค่าสูงสุดที่ 95% (95% Probability Value) การประเมินค่าความรุนแรงของฮาร์มอนิกเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน การพิจารณาข้อมูลจากการวัดอย่างต่อเนื่อง โดยใช้วิธีทางสถิติในการพิจารณาและละเว้นค่าความรุนแรงฮาร์มอนิกสูงสุดออกไปเป็นจำนวน 5% ของข้อมูลทั้งหมด เช่น วัดค่าความรุนแรงของฮาร์มอนิกจำนวน 100 ครั้ง จะละเว้นค่าความรุนแรงของฮาร์มอนิกที่วัดได้สูงสุดจำนวน 5 ครั้งออกไป เนื่องจากค่าดังกล่าวมิได้สะท้อนถึงฮาร์มอนิกจากโหลดในสภาวะการทำงานปกติ แต่เป็นค่าฮาร์มอนิกที่อาจเกิดขึ้นในสภาวะทรานเซียนท์ ส่วนการวัดค่าความรุนแรงของฮาร์มอนิกที่เหลือจำนวน 95 ครั้งจะใช้วิธีทางสถิติในการพิจารณาค่าความรุนแรงฮาร์มอนิกสูงสุดในการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

การไฟฟ้าได้กำหนดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย เพื่อใช้เป็นเป้าหมายในการควบคุมแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยรวมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า และเพื่อใช้เป็นกรอบในการวางแผนเพื่อกำหนดขีดจำกัดสำหรับกระแสฮาร์มอนิกที่สร้างจากผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย [19], ดังแสดงในตารางที่ 3-5, 3-6, และ 3-7

ตารางที่ 3-5 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	4.0	3	4.0	2	1.6
7	4.0	9	1.2	4	1.0
11	3.0	15	0.3	6	0.5
13	2.5	21	0.2	8	0.4
17	1.6	> 21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			> 12	0.2
25	0.7				
> 25	0.2 + 0.5 (25 / h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD <sub>v</sub> ) = 5%					

ตารางที่ 3-6 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงกลาง

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	3.0	3	3.0	2	1.5
7	3.0	9	1.2	4	1.0
11	2.0	15	0.3	6	0.5
13	2.0	21	0.2	8	0.4
17	1.6	> 21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			> 12	0.2
25	0.7				
> 25	0.2 + 0.5 (25 / h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD <sub>v</sub> ) = 4%					



ตารางที่ 3-7 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	2.0	3	2.0	2	1.0
7	2.0	9	1.0	4	0.8
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1.0	> 21	0.2	10	0.4
19	1.0			12	0.2
23	0.7			> 12	0.2
25	0.7				
> 25	$0.2 + 0.5 (25 / h)$				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD <sub>v</sub> ) = 3%					

ในข้อกำหนดฉบับนี้ไม่ได้กำหนดระดับวางแผนสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า นั่นคือการไฟฟ้าฯ ไม่อนุญาตให้มีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าในทุกกรณี

### 3.4 ผลกระทบด้านฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า

ผลกระทบด้านฮาร์มอนิกเป็นหนึ่งในปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้า [17], [20], [21], ตามลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นประจำภายในระบบไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยนิยามของฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของสัญญาณรายคาบใดๆ เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าที่ทำงานในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้รูปคลื่น สัญญาณมีความผิดเพี้ยน ซึ่งความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณจะขึ้นอยู่กับปริมาณของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

**ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง** ทำให้เกิดการขยายตัวขนาดลำดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเนื่องจากเกิดสภาวะความถี่รีโซแนนซ์แบบขนานและแบบอนุกรมทำให้ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์พลังงานไฟฟ้าลดลง และทำให้อนวนเสื่อมสภาพเร็ว มีอายุการใช้งานสั้นลง

**ผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า** ทำให้เกิดการดำเนินงานของอุปกรณ์ผิดพลาด ดังต่อไปนี้

- **คาปาซิเตอร์** ส่งผลกระทบต่อระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าทำให้เกิดเงื่อนไขรีโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ของระบบไฟฟ้า ถ้ารีโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกันกับความถี่ฮาร์มอนิก ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนกระแสและแรงดันมีค่ามากขึ้น
- **เซอร์กิตเบรกเกอร์** เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกมีความถี่สูงมากกว่าความถี่หลักมูลทำให้เกิดความร้อนขึ้น จนเกิดการสูญเสียในขดลวดซึ่งทำให้อุปกรณ์ตัดวงจรด้วยความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น
- **หลอดไฟฟ้าแสงสว่าง** เนื่องจากหลอดไฟจะมีความไวต่อระดับแรงดันที่ใช้งาน ถ้าแรงดันมีค่าสูงกว่าปกติ เนื่องจากความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกจะทำให้มีผลต่ออุณหภูมิของหลอดไฟทำให้อายุการใช้งานสั้นลง
- **รีเลย์ป้องกัน** เนื่องจากรูปคลื่นที่มีความเพี้ยนจะมีผลต่อสมรรถนะของรีเลย์ป้องกัน โดยอาจเป็นสาเหตุให้รีเลย์ทำงานไม่ถูกต้อง ทำให้หม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแสส่งสัญญาณความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบรีเลย์ ดังนั้นความเพี้ยนนี้อาจเป็นสาเหตุให้รีเลย์สั่งตัดวงจรไม่ถูกต้องในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้น
- **หม้อแปลงไฟฟ้า** ผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้ามักมีการเพิ่มความร้อนในรูปแบบของกำลังสูญเสียที่มากขึ้น เช่น กำลังสูญเสียของขดลวด กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวดเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของกระแสโหลดและกำลังสองของความถี่ และกำลังสูญเสียปลิกย่อย เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นตามความถี่เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีความร้อนสูงขึ้นกว่าค่าที่กำหนด
- **เครื่องจักรชนิดหมุน** เนื่องจากแรงดันผิดเพี้ยน ทำให้เกิดความร้อนสูง การสั่นของแรงบิด และกำลังสูญเสียในเครื่องจักรกลเพิ่มขึ้นตามความถี่แรงดันที่จ่ายความผิดเพี้ยนของแรงดัน
- **อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์** ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจสอบแรงดันมีความผิดเพี้ยนทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพลดลง

**ผลกระทบต่อระบบสื่อสาร** เช่น การติดตั้งสายโทรศัพท์บนเสาไฟใกล้กับสายไฟฟ้าจะมี

โอกาสที่สัญญาณรบกวนจากสายไฟฟ้าเข้าไปรบกวนระบบสื่อสารได้ ในกรณีที่มิฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วย ซึ่งความถี่ของฮาร์มอนิกลำดับสูงอื่นๆ อาจสร้างปัญหาได้มากกว่าความถี่หลักมูลปกติในระบบสื่อสารที่ไวต่อการรบกวน จึงเป็นเหตุให้เกิดปัญหาในการรบกวนการสื่อสารได้

### 3.5 แนวทางการตรวจวัดเพื่อศึกษาวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิก

เพื่อศึกษาวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิกและ Load Profile [22], อันเนื่องมาจากการทำงานของอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นภายในระบบไฟฟ้า การตรวจสอบเพื่อวัตถุประสงค์ในการประเมินค่าฮาร์มอนิกสำหรับการต่อเชื่อมโยงเข้ากับระบบของการไฟฟ้า ซึ่งจะต้องตรวจวัดที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling) เป็นตำแหน่งในระบบของการไฟฟ้าที่อยู่ใกล้กับระบบของผู้ใช้ไฟฟ้ามากที่สุดและผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นสามารถต่อร่วมได้

#### 3.5.1 การวัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก

สมการการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าสามารถอธิบายตามทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ (3-4) - (3-5)

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (3-4)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \cos(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (3-5)$$

กำหนดให้	$I_0$	คือ	องค์ประกอบกระแสไฟตรง
	$V_0$	คือ	องค์ประกอบแรงดันไฟตรง
	$I_h$	คือ	ค่า rms ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ $h$
	$V_h$	คือ	ค่า rms ของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ $h$
	$\theta_h$	คือ	มุมของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ $h$
	$\omega_1$	คือ	ความถี่เชิงมุมมูลฐาน ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ )
	$f_1$	คือ	ความถี่มูลฐาน (50 Hz สำหรับประเทศไทย)

การคำนวณค่ารากที่สองของกำลังเฉลี่ย (Root-Mean-Square (RMS) values)

$$RMS \text{ Value} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} \quad (3-6)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_N^2} \quad (3-7)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^N V_h^2} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_N^2} \quad (3-8)$$

การคำนวณค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (Total Harmonic Distortion; THD)

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3-9)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3-10)$$

กำหนดให้  $V_1$  คือ ค่า rms ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน

$I_1$  คือ ค่า rms ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P), กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (3-11)$$

$$P = \sum_{h=1}^N V_{hrms} I_{hrms} \cos(\theta_{V_{hrms}} - \theta_{I_{hrms}}) \quad (3-12)$$

$$Q = \sum_{h=1}^N V_{hrms} I_{hrms} \sin(\theta_{V_{hrms}} - \theta_{I_{hrms}}) \quad (3-13)$$

การคำนวณการประเมินค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของระบบที่มีแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก

การระบุค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF) จะระบุในรูปของ Total Power Factor ดังนี้

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \times \left( \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \right) \quad (3-14)$$

$$PF = PF_{disp} \times PF_{dist} \quad (3-15)$$

Displacement Power Factor

$$PF_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (3-16)$$

Distortion Power Factor

$$PF_{dist} = \left( \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \right) \quad (3-17)$$

กำหนดให้  $S_1$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏมูลฐาน

### 3.5.2 วิธีการตรวจวัดปริมาณของฮาร์มอนิก

วิธีการตรวจวัดปริมาณของฮาร์มอนิก [21], [22], ต้องพิจารณาขั้นตอนการวัดปริมาณของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าตามขั้นตอนดังนี้

- ตำแหน่งที่ตรวจวัดภายในตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าสูงและแรงดันไฟฟ้าต่ำตามจุดที่จะนำไปวิเคราะห์
- ระบบจ่ายไฟภายใน: รับไฟระดับแรงดัน 24 kV แล้วผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดระดับแรงดันลงสู่ระดับแรงดัน 400 V ซึ่งจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทที่ต้องการตรวจสอบฮาร์มอนิก
- ระยะเวลาที่ตรวจวัด: ใช้เวลาในการตรวจสอบทั้งหมด 7 วัน
- เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด: Supply Network Analyzer, Model AR5
- วิธีการเก็บข้อมูลค่าที่ตรวจวัด : เก็บค่าผลการวัดทั้งหมด คำนวณจากการเฉลี่ยค่า real-time RMS ในช่วงเวลา 10 นาที และวิเคราะห์ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแสดงเป็นค่าร้อยละของค่า Fundamental และกระแสฮาร์มอนิกแสดงค่าเป็นแอมแปร์

### 3.5.3 วิธีการประเมินปริมาณของฮาร์มอนิก

วิธีการตรวจการประเมินระดับฮาร์มอนิกภายในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าตามมาตรฐานที่เหมาะสม [22], [23], พิจารณาขั้นตอนประเมินระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าดังนี้

- IEC 61000-2-12 (Compatibility Levels for Low-frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Medium-Voltage Power Supply Systems) ซึ่งกำหนดระดับที่เหมาะสมของการรบกวนทางไฟฟ้าต่างๆ ที่มาตามสายตัวนำไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงดันกลางรวมถึงฮาร์มอนิก
- IEC 61000-2-2 (Compatibility Levels for Low-frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Low-Voltage Power Supply Systems) ซึ่งกำหนดระดับที่เหมาะสมของการรบกวนทางไฟฟ้าต่างๆ ที่มาตามสายตัวนำไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำรวมถึงฮาร์มอนิก

ในการประเมินระดับของฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐานสากล IEC 61000-2-2 และ IEC 61000-2-12 นั้น มีใช้การพิจารณาระดับของฮาร์มอนิกสูงสุดในขณะใดขณะหนึ่งเทียบกับมาตรฐาน แต่เป็นการพิจารณาค่าทางสถิติเทียบกับมาตรฐาน ในการพิจารณาค่าทางสถิตินั้นจะนำข้อมูลผลการวัดที่ต่อเนื่องซึ่งมีจำนวนข้อมูลหลายพันค่ามาใช้วิธีการทางสถิติ โดยตัดค่าระดับฮาร์มอนิกสูงสุดออกไปเป็นจำนวน 5% ของข้อมูลทั้งหมด เนื่องจากค่าดังกล่าวมิได้สะท้อนถึงฮาร์มอนิกจากโหลดในสภาวะการทำงานปกติ แต่เป็นค่าฮาร์มอนิกที่อาจเกิดขึ้นในสภาวะทรานเซียนท์ ค่าสูงสุดของข้อมูล

อีก 95% ที่เหลือจึงเป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการประเมินระดับของฮาร์มอนิก เพื่อให้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบสำหรับปรับปรุงการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและจำกัดปริมาณฮาร์มอนิกไม่ให้มีผลรบกวนกับการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆที่ต่อร่วมอยู่ภายในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าอื่น

### 3.5.4 ผลการวัดและวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิก

การพิจารณาขั้นตอนการวัดและวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิก [22], พิจารณาตามผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิกดังนี้

- ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ Load Profile สรุปผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง Main Incoming ระดับแรงดันที่บัส 22 kV และ ตำแหน่ง Low-Voltage Bus ระดับแรงดัน 380 V โดยพิจารณาความเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาที่ตรวจวัด
- ผลการตรวจวัด Harmonic Profile โดยแยกตามตำแหน่งที่ตรวจวัด เพื่อวิเคราะห์ผลดังนี้ โดยพิจารณาความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD<sub>v</sub>) มีค่าสูงสุดไม่เกิน 95% โดยมีค่าไม่เกินขีดจำกัดตามมาตรฐาน IEC 61000-2-12 ซึ่งกำหนดไว้ที่ 8%
- พิจารณาแรงดันฮาร์มอนิก และกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ ไม่เกินขีดจำกัดฯ โดยพิจารณาได้จาก Harmonic Voltage Spectrum
- การพิจารณาระดับแรงดันฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับมาตรฐานสากล IEC 61000-2-2 และ IEC 61000-2-12 เพื่อวัตถุประสงค์ในการประเมินขั้นต้นเท่านั้น ซึ่งมีได้หมายความว่าระดับฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้นี้จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในทุกกรณีไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายที่มีความแตกต่างกันออกไป

### 3.6 ทฤษฎีการวิเคราะห์ฟูเรียร์

การวิเคราะห์สัญญาณพื้นฐานที่ใช้กันมาก [14], คือการเปลี่ยนสัญญาณในโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier transform) หลักการของการแปลงฟูเรียร์มีหลักการคล้ายคลึงกับการเขียนสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันรายคาบ ให้เป็นผลรวมของฟังก์ชันรูปคลื่นสำหรับฟังก์ชันรูปคลื่นแรงดันหรือกระแสที่เป็นรายคาบที่มีความผิดเพี้ยน สามารถแสดงโดยการใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์ในรูปของสมการเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (3-18)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (3-18)$$

โดยขนาดของสัญญาณหรือสัมประสิทธิ์เกี่ยวกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (3-19) - (3-21)

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) dt \quad (3-19)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (3-20)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (3-21)$$

### 3.6.1 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง

การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform : DFT) [1], โดยนิยามของ DFT เป็นวิธีการแปลงลำดับของตัวเลขทั้งที่เป็นจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อนจำนวน  $N$  จุด ไปอยู่ในรูปของลำดับของตัวเลขเชิงซ้อนจำนวน  $N$  จุดอีกชุดหนึ่ง โดยมีวิธีการแปลงตามสมการที่ (3-22) ซึ่งกำหนดให้  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  เป็นลำดับของตัวเลขจำนวนจริง หรือลำดับของตัวเลขเชิงซ้อน และ  $X(m)$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$  เป็น DFT ของ  $x(n)$

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nm} \quad (3-22)$$

โดย  $W_N \triangleq e^{-j\frac{2\pi}{N}}$

โดยเรียก  $X(m)$  ว่าเป็น DFT ขนาด  $N$  จุด (N-point DFT) ของ  $x$  เพราะจำนวนจุดที่ใช้ในการคำนวณ DFT นั้นมีผลกับการใช้งาน DFT ในการประมาณสเปกตรัมของสัญญาณ จะพบว่าค่าของ DFT หนึ่งจุดคือ  $X(m)$  นั้นได้จากการบวกกันของผลคูณของ  $x(n)$  กับเลขเชิงซ้อนจำนวน  $N^2$  ครั้ง

ในการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกในสัญญาณไฟฟ้าที่สุมเข้ามาซึ่งเป็นสัญญาณที่อ้างอิงบนโดเมนเวลา  $f(n)$  จะต้องเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณที่อ้างอิงบนโดเมนความถี่ โดยใช้กระบวนการ DFT ดังสมการที่ (3-22) และเขียนในรูปสมการเมทริกซ์ ดังสมการที่ (3-24)

$$C(h) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j\frac{2\pi nh}{N}} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) W^{nh} \quad (3-22)$$

โดย  $W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$  (3-23)

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{N-1} \end{bmatrix} = \frac{2}{N} \begin{bmatrix} W^{(0 \times 0)} & W^{(0 \times 1)} & \cdots & W^{(0 \times (N-1))} \\ W^{(1 \times 0)} & W^{(1 \times 1)} & \cdots & W^{(1 \times (N-1))} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W^{((N-1) \times 0)} & W^{((N-1) \times 1)} & \cdots & W^{((N-1) \times (N-1))} \end{bmatrix}_{N \times N} \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ \vdots \\ f[N-1] \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (3-24)$$

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{N-1} \end{bmatrix} = \frac{2}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & W & \cdots & W^{(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W^{(N-1)} & \cdots & W^{(N-1) \times (N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ \vdots \\ f[N-1] \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (3-25)$$

$$= \frac{2}{N} [W] \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ \vdots \\ f[N-1] \end{bmatrix}_{N \times 1}$$

$$[C_h] = \frac{2}{N} [W][f] \quad (3-26)$$

ถ้ากระจายเมทริกซ์  $[W]$  เป็น  $W_1, W_2, \dots, W_L$  โดยที่  $L = \log_2 N$  จะได้ว่า  $W_1, W_2, \dots, W_L$  เป็นเมทริกซ์ที่มีเทอมไม่เป็นศูนย์อยู่สองตัวในแต่ละแถว การคำนวณสมการที่ (3-25) จะเร็วขึ้นกว่าเดิมเรียกอัลกอริทึมนี้ว่าการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform - FFT)

### 3.6.2 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

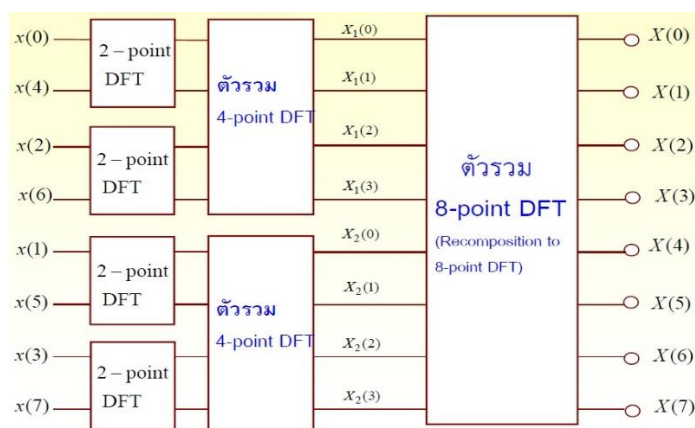
การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) [24], เป็นการแปลงฟูเรียร์ที่มาจากลดขั้นตอนการคำนวณจากการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง Discrete Fourier Transform (DFT) ตามนิยามของ DFT นั้นปริมาณการวิเคราะห์ข้อมูลอินพุตจะแปรผันตามจำนวนข้อมูลอินพุตเป็นกำลังสองของจำนวนข้อมูล คือ  $N^2$  ครั้ง โดยที่  $N$  คือจำนวนข้อมูลอินพุต ซึ่งวิธีการที่ใช้คำนวณยังมีจำนวนของการคูณกันของจำนวนเชิงซ้อนอยู่มาก ดังนั้นจึงได้มีการลดจำนวนการคูณของจำนวนเชิงซ้อนนี้ลง โดยการจัดรูปสมการของ DFT ให้สามารถลดจำนวนการคูณกันของสมการเมทริกซ์ได้ด้วยการแปลงทางฟูเรียร์แบบเร็ว โดยการจัดกลุ่มของเมทริกซ์  $W^k$  ใหม่ซึ่งทำให้การคูณกันของสมการลดลงเหลือเพียง  $N \log_2 N$  ครั้ง กล่าวคือ FFT ก็คือ DFT [25], แต่เป็นการสลับตำแหน่งข้อมูลและเทคนิคการรวมสัญญาณ เพื่อย่อยให้จำนวนการแปลงลดรูปลง วิธีการนี้ เรียกว่า Decimation in



Time (DIT) และเรียกการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วนี้ว่า DIT-FFT ทำให้เหลือการคูณเลขเชิงซ้อนเพียง  $N \log_2 N$  ครั้งจากจำนวน  $N^2$  ครั้ง เมื่อใช้ DFT และอาจจะลดการคูณเลขเชิงซ้อนลงได้อีกเป็น  $(N/2) \log_2 N$  หากใช้การปรับปรุงบัตเตอร์ฟลาย ดังสมการที่ (3-27)

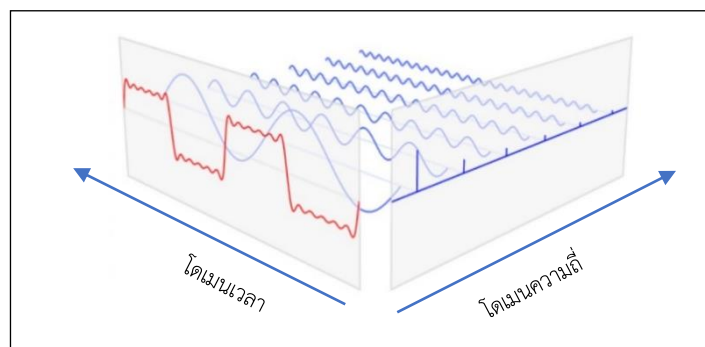
$$[X(f_k)] = \frac{1}{N} [W^{kn}] [x(t_n)] \quad (3-27)$$

ดังนั้นการจำลองข้อมูลครั้งละ 8 จุดสุ่มข้อมูล (กำหนด  $N = 8$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3-9 [25], แล้วนำมาแปลงฟูเรียร์แบบเร็วจะแสดงเป็นขั้นตอนการทำงาน โดยสัญญาณเอาต์พุต  $X(k)$  จะแสดงให้เห็นองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณอินพุต  $x(n)$



รูปที่ 3-9 การไหลของการคำนวณ 8-point DFT ขนาด 8 จุดสุ่มข้อมูล

สำหรับการตรวจสอบลำดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลการวัดในโดเมนเวลาจึงใช้หลักการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วในการแปลงข้อมูลจากความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณในโดเมนเวลากับโดเมนความถี่ เนื่องจากสัญญาณในโดเมนเวลาเป็นฟังก์ชันรูปคลื่น เมื่อแปลงเป็นโดเมนความถี่ จะแสดงด้วยเส้นในแนวตั้ง ซึ่งความสูงของเส้นหมายถึงขนาดของสัญญาณ และในตำแหน่งในแกนนอนหมายถึงความถี่ของสัญญาณ อย่างไรก็ตามสัญญาณเป็นคาบในโดเมนเวลาจะแสดงด้วยเส้นในแนวตั้งที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเกิดจากผลรวมของฟังก์ชันรูปคลื่นหลายความถี่ ซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3-10 [22], ซึ่งค่าที่แสดงจะสอดคล้องกับความถี่ในของลำดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 3-10 สัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

## บทที่ 4

### รายละเอียดการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้นั้น การวัดและบันทึกข้อมูลรูปคลื่นแรงดันและกระแส ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าที่อาจมีปัญหาด้านฮาร์มอนิก เป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้า

ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลด้วยอัตราสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่นให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ข้อมูลมากพอสำหรับไปวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกต่อไป ตามการกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้น ให้สามารถทำงานร่วมกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ได้ กำหนดความสามารถและคุณสมบัติของมอดูลที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ โดยมียุทธศาสตร์และความสามารถของมอดูลต่างๆเบื้องต้นดังนี้

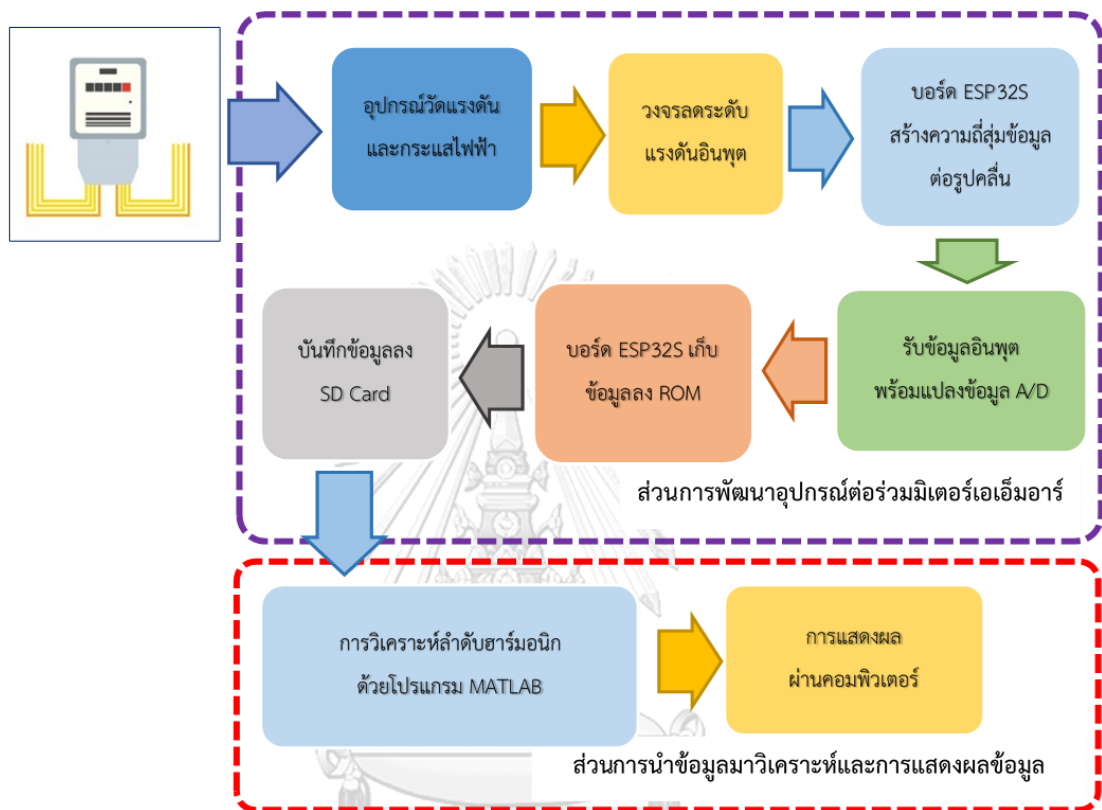
- สามารถรับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส หรือแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส โดยรับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส สูงสุดที่ 440 โวลต์ และมีจำนวนบิตคอนเวอร์เตอร์ A/D เท่ากับ 12 บิต
- สามารถรับกระแสไฟฟ้า 3 เฟส หรือกระแสไฟฟ้า 1 เฟส โดยรับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 20 แอมแปร์ และมีจำนวนบิตคอนเวอร์เตอร์ A/D เท่ากับ 12 บิต
- อัตราสุ่มข้อมูลเท่ากับ 128 ครั้งต่อรูปคลื่น (Samples/Cycle) สามารถปรับค่าได้
- กำหนดความแม่นยำในการวัดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน ( $V_{rms}$ ) และของกระแส ( $I_{rms}$ ) มีความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่  $\pm 1\%$  และ  $\pm 2\%$  ตามลำดับ
- กำหนดความแม่นยำในการสุ่มข้อมูลของแรงดัน มีความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่  $\pm 3\%$  และความแม่นยำในการสุ่มข้อมูลของกระแส มีความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่  $\pm 6\%$
- กำหนดความแม่นยำในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแส มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการวัดไม่เกิน  $\pm 8\%$
- กำหนดความแม่นยำในการวัดค่าแรงดันและกระแสในลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ มีความคลาดเคลื่อน เฉลี่ยจากการวัดไม่เกิน  $\pm 7\%$
- นำข้อมูลไปการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐานสากล IEC 61000-2-2

ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอรายละเอียดและการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกผู้ใช้ไฟฟ้าได้ สำหรับการเก็บอัตราสุ่มข้อมูลของรูป คลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแส ให้สามารถเก็บอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นให้สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ได้ตามกำหนดมาตรฐานมากกว่าหรือเท่ากับลำดับฮาร์มอนิกที่ 19 ซึ่งภาพรวมในการพัฒนาอุปกรณ์



#### 4.1 ภาพรวมการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้นั้น จะเพิ่มเติมในส่วนการนำข้อมูลที่เก็บได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ นำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4-2

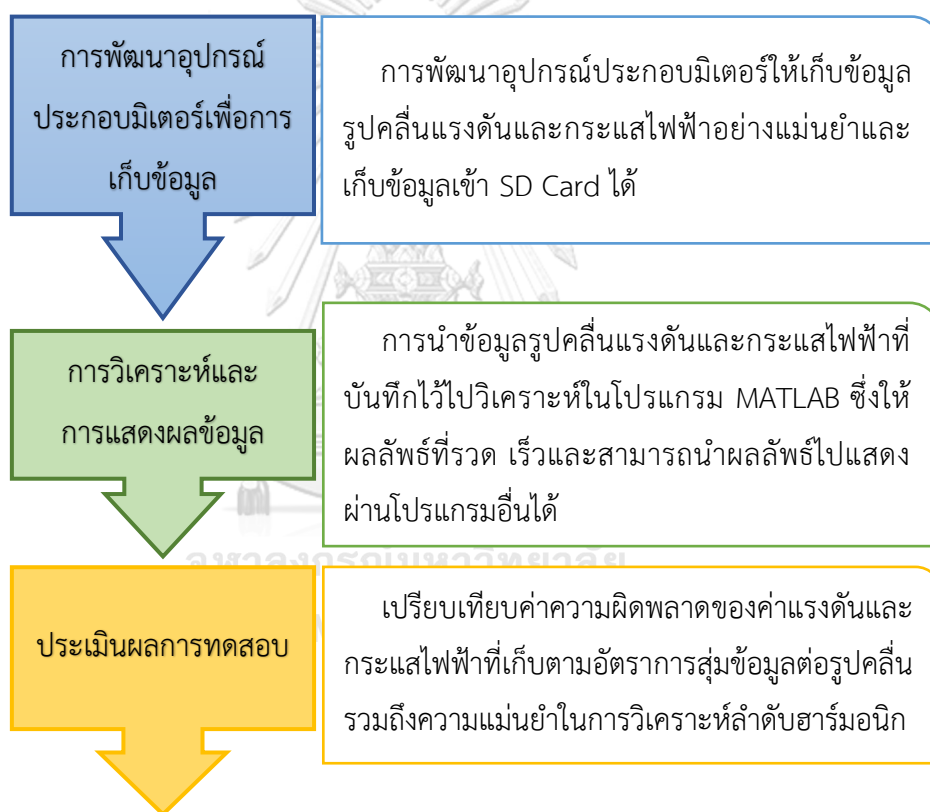


รูปที่ 4-2 การพัฒนาปรับปรุงมิเตอร์เอเอ็มอาร์สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ขั้นตอนการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลในเบื้องต้นนั้น การเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า แบ่งส่วนการดำเนินงานในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เป็น 3 ส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ และนำไปพัฒนาต่อในอนาคต โดยแบ่งส่วนการทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 4-3

- ส่วนการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เพื่อเก็บข้อมูลนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าตามที่ต้องการและสามารถบันทึกข้อมูลรูปลิ้นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส โดยเก็บตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปลิ้นตามกำหนด เพื่อให้สามารถนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

- ส่วนการนำข้อมูลมาวิเคราะห์และการแสดงผลข้อมูล เป็นส่วนการนำเข้าข้อมูลค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามอัตราสุ่มที่กำหนดไว้จากหน่วยความจำ SD Card เข้าสู่การวิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว และสะดวกในการนำข้อมูลผลลัพธ์ไปแสดงผ่านโปรแกรมอื่นได้
- ส่วนการประเมินผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (error) ทดสอบความแม่นยำของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามอัตราการสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นรวมถึงความแม่นยำในการแปลงและส่งข้อมูลค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ทำให้ข้อมูลที่ได้เมื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลฮาร์มอนิกมีความแม่นยำสูงสุด สามารถนำไปใช้เทียบเคียงกับการวัดวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกจากเครื่องวัดที่ความแม่นยำสูงได้



รูปที่ 4-3 ขั้นตอนการพัฒนามิเตอร์เอเอ็มอาร์สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ผลการจำลองอัตราสุ่มข้อมูลพบว่าเมื่ออัตราสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่นยิ่งมาก ยิ่งสามารถวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกได้แม่นยำสูงขึ้น แต่ข้อเสียคือยิ่งเก็บข้อมูลละเอียดมากขึ้น ข้อมูลก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น และข้อมูลที่เก็บอาจจะทำให้ฐานข้อมูลในการใช้เก็บมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ

จากภาพรวมการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้น ตามข้อมูลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นทำให้คุณสมบัติและความสามารถฮาร์ดแวร์ในการสร้างอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ให้สามารถทำงานได้ครบตามคุณสมบัติเบื้องต้นที่ได้กำหนดไว้ และการเพิ่มอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ทำให้ความสามารถในการวัดและบันทึกข้อมูลของมิเตอร์เอเอ็มอาร์เพิ่มขึ้น

#### 4.2 การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ในการเก็บข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ในด้านอื่นต่อไปนั้น ปัจจัยหลักคือการเก็บข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่นที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าจริงให้มากที่สุด เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาด้านฮาร์ดแวร์ที่มีความแม่นยำตามการใช้งานจริง ซึ่งได้วางกรอบคุณสมบัติอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 การประมาณราคาและรายละเอียดอุปกรณ์สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียดอุปกรณ์	จำนวน	ราคารวม
1	ESP32 (Node MCU-32S)	CPU Tensilica LX6 สัญญาณนาฬิกา 240 MHz RAM 512 kB, ROM 16 MB, WiFi 802.11 b/g/n รองรับช่องสัญญาณ ADC 12 ช่อง และการเชื่อมต่อกับ SD-Card	1	200
2	ZMPT101B Voltage Sensor	รองรับแรงดันไฟ AC 3 เฟส ได้ในช่วง $-440 V_{AC}$ ถึง $440 V_{AC}$ รองรับแรงดันไฟ AC 1 เฟส ได้ในช่วง $-250 V_{AC}$ ถึง $250 V_{AC}$ Supply Voltage: $5 V_{DC}$ Signal Output: Analog $0 V_{AC}$ ถึง $5 V_{AC}$	3	450
3	ACS712 Current Sensor	รองรับกระแสไฟ AC ได้ในช่วง $-20 A$ ถึง $20 A$ แบบ Hall Effect, Supply Voltage : $5 V_{DC}$ Signal Output: Analog $0 V_{AC}$ ถึง $5 V_{AC}$	3	240
4	1604 LCD (Blue Screen)	หน้าจอแสดงผล LCD Blue Screen backlight ขนาด 16 ตัวอักษร 4 บรรทัด	1	150
5	SD Card Module	มอดูลนี้จะทำให้ ESP32 สามารถบันทึกข้อมูลลงใน SD Card, Supply Voltage : $3.3 V_{DC}$ ถึง $5 V_{DC}$	1	150
6	อุปกรณ์อื่นๆ	อุปกรณ์ วัสดุอื่นๆ เพื่อประกอบเป็นอุปกรณ์ประกอบ มิเตอร์ และค่าเปลี่ยนอุปกรณ์และมอดูลต่างๆ ในกรณี เกิดความเสียหาย	-	1,000
<b>รวมประมาณราคา</b>				<b>2,190</b>

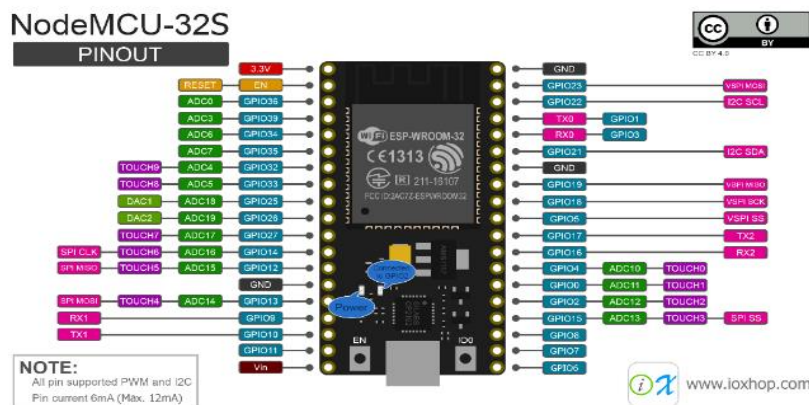
#### 4.2.1 การอ่านและเก็บข้อมูลตามอัตราการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น

การอ่านและเก็บข้อมูลตามอัตราการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่นให้ได้ตามกำหนดนั้น และแปลงสัญญาณข้อมูลจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่ได้รับจากอุปกรณ์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าจนข้อมูลครบตามอัตราการสุ่มข้อมูลที่กำหนดหรือครบตามโปรแกรมที่ตั้งไว้แล้วจะนำข้อมูลที่เก็บไว้ไปพักในหน่วยความจำภายใน หลังจากนั้นคำสั่งโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะนำสัญญาณข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นข้อมูลค่าบิตดิจิทัล 12 บิต (0-4095) เช่น การวัดสัญญาณไฟฟ้าครั้งที่ 1 จะวัดเป็นข้อมูลค่าบิตดิจิทัล (115), การวัดครั้งที่ 2 วัดข้อมูลค่าบิตดิจิทัล (315) จนครบตามกำหนด 128 ครั้ง ซึ่งค่าที่บันทึกไว้เป็นค่าบิตดิจิทัล ทำให้ไม่ทราบข้อมูลที่วัดเป็นค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าว่ามีขนาดเท่าไร จึงต้องแปลงข้อมูลค่าบิตดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเพื่อให้ได้ข้อมูลค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า ที่วัดได้จริงก่อนนำไปบันทึกลงไฟล์ .csv ที่หน่วยความจำภายนอก (SD Card) เพื่อ ให้ง่ายต่อการตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นและนำไปวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกต่อไป

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S) ดังแสดงในรูปที่ 4-4 เนื่องจากคุณสมบัติตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 สามารถรองรับการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลได้สูงถึง 12 ช่องสัญญาณ จึงเหมาะสมในการเป็นช่องรับสัญญาณข้อมูลแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส และข้อมูลกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสได้พร้อมกัน ด้วยตัว Node MCU-32S มีสัญญาณนาฬิกาที่ 240 MHz และหน่วยความจำภายในมาก และรายละเอียดคุณสมบัติ Node MCU-32S อื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประเภทนี้มีประสิทธิภาพสูงในการเป็นตัวกำหนดเวลาในการสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นทุกช่องสัญญาณ ADC ได้พร้อมกัน และยังสามารถนำข้อมูลที่เก็บได้ไปพักในหน่วยความจำภายในก่อนได้ รวมถึงควบคุมการทำงานส่วนอื่นและการนำข้อมูลไปบันทึกยังหน่วยความจำภายนอก จึงเป็นที่นิยมอย่างมาก การใช้งานสามารถพัฒนาได้หลากหลาย มีอุปกรณ์รองรับและมี Library ที่ใช้งานร่วมกับ Node MCU-32S และสามารถเขียนคำสั่งตัวบอร์ดด้วย โปรแกรม Arduino IDE [26], โดยรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบไมเตอร์นี้ เป็นดังนี้



รูปที่ 4-4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S)

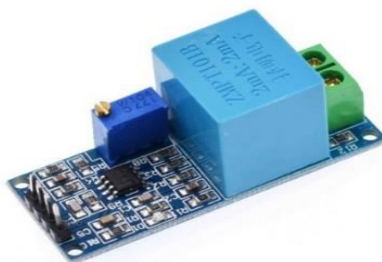


รูปที่ 4-5 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S) มาพร้อมกับ WiFi มาตรฐาน 802.11 b/g/n และบลูทูธเวอร์ชัน 4.2 สามารถแยกการทำงานระหว่างโปรแกรมจัดการ WiFi และแอปพลิเคชันออกจากกัน ทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นมากจากหน่วยความจำภายใน 512 kB พร้อมทั้งช่องแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลจำนวน 12 ช่อง รองรับแรงดันไฟฟ้าในการใช้งานที่ 3.3V สามารถรองรับการพัฒนาผ่านเครื่องมือต่างๆ เช่น Arduino-ESP32 ใช้ ESP-IDF ในแพลตฟอร์ม Arduino สามารถเขียนโปรแกรมด้วย Arduino IDE ได้ และรองรับ Library ของ Arduino และสามารถเขียนคำสั่งด้วยภาษา Lua, Python, และ JavaScript

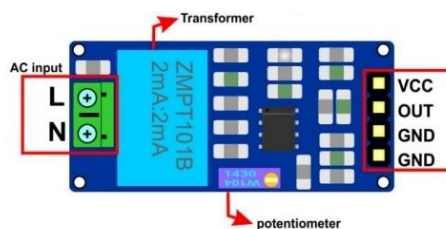
#### 4.2.2 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในการส่งข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น

การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในการส่งข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น จะใช้มอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Sensor Module) [26], ดังแสดงในรูปที่ 4-6 สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส ( $V_{ph}$ ) ในย่าน  $\pm 250 V_{AC}$  และสามารถนำมาต่อขานานกันจำนวน 3 ชุด เพื่อให้สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ( $V_{L-L}$ ) ในย่าน  $\pm 440 V_{AC}$  โดยสัญญาณข้อมูลที่ออกมาจากมอดูลเป็นสัญญาณแอนะล็อกสามารถนำไปต่อเข้ากับขา ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ทันที ดังแสดงในรูปที่ 4-7 และตัวมอดูลมีวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้สามารถปรับขนาดของสัญญาณขาออกได้ตามความต้องการของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละประเภท



รูปที่ 4-6 มอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Sensor Module)





รูปที่ 4-7 การเชื่อมต่อกับมอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Sensor Module)

#### 4.2.3 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าในการส่งข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น

การวัดค่ากระแสไฟฟ้าในการส่งข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น จะใช้มอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Sensor Module) [26], ดังแสดงในรูปที่ 4-8 สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ในย่าน  $-20\text{ A}$  ถึง  $+20\text{ A}$  สามารถวัดได้ทั้งกระแสสลับและกระแสตรง สัญญาณข้อมูลที่ออกจากมอดูลเป็นสัญญาณแอนะล็อก การอ่านค่ากระแสที่ไหลผ่านออสซิลิโตนี ACS712-05 ที่วัดกระแสโดยใช้หลักการของ Hall Effect สามารถนำไปต่อเข้ากับขา ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ทันที มีความไวในการวัดสัญญาณ (Sensitivity) ที่  $100\text{ mV/A}$  และสามารถรองรับความถี่ในการวัดได้ถึง  $80\text{ kHz}$

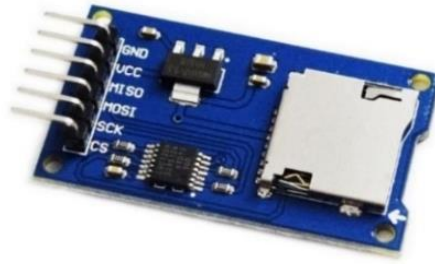


รูปที่ 4-8 มอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Sensor Module)

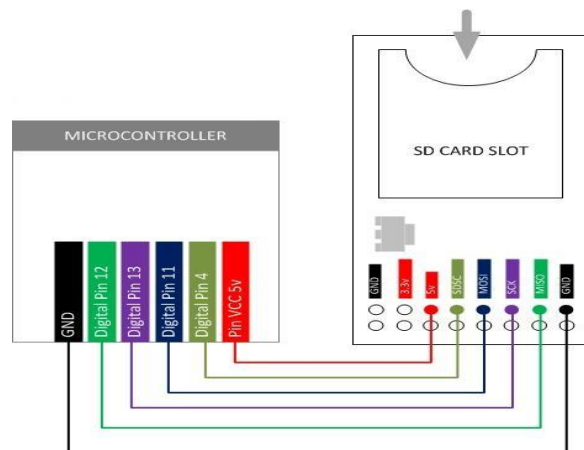
#### 4.2.4 การบันทึกข้อมูลในการส่งข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น

การบันทึกข้อมูลในการส่งข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น จะใช้มอดูลใช้สำหรับการอ่านและเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำภายนอก (SD Card) [26], ดังแสดงในรูปที่ 4-9 สำหรับการเก็บข้อมูลปริมาณมากนั้น จะขึ้นอยู่กับความจุหน่วยความจำในการเก็บข้อมูล ซึ่งมอดูลสามารถใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกรุ่นในการบันทึกข้อมูลที่วัดได้ผ่านหน่วยความจำชนิด SD Card

โดยมอดูลใช้สำหรับการอ่านและเขียนข้อมูลลง SD Card เป็นอุปกรณ์ที่สื่อสารการเก็บข้อมูลโดยใช้ Serial Peripheral Protocol (SPI) สามารถใช้สื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์อื่นได้พร้อมกันหลายหน้าที่ ดังแสดงในรูปที่ 4-10 เช่นติดต่อกับขา ADC, SD Card Module, และอุปกรณ์วัดค่าอื่นๆได้จำเป็นต้องต่อเข้ากับขาอุปกรณ์สื่อสารให้ถูกต้อง เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็น Master และ SD Card Module จะเป็น Slave เพื่อการบันทึกข้อมูล



รูปที่ 4-9 โมดูลการอ่านและเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำภายนอก (SD Card)



รูปที่ 4-10 การเชื่อมต่อมอดูลอ่านและเขียนข้อมูลกับไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 4.2.5 การแสดงผลการบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูล

การแสดงผลการบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูล ใช้มอดูลจอแสดงผลแอลซีดีขนาด 20 ตัวอักษร 4 บรรทัด ไฟเบื้องหลังสีฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4-11 เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ง่ายมีชุดคำสั่งมาตรฐานพร้อมใช้งาน โดยข้อมูลที่หน้าจออุปกรณ์ประกอบมิตอร์นั้น จะแสดงผลบนจอแอลซีดี ดังแสดงในรูปที่ 4-11 (1) และรูปที่ 4-11 (2)

รูปที่ 4-11 (1) แสดงหน้าจอแสดงการเตรียมบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูล

รูปที่ 4-11 (2) แสดงหน้าจอแสดงการบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูลแล้วเสร็จ



(1)



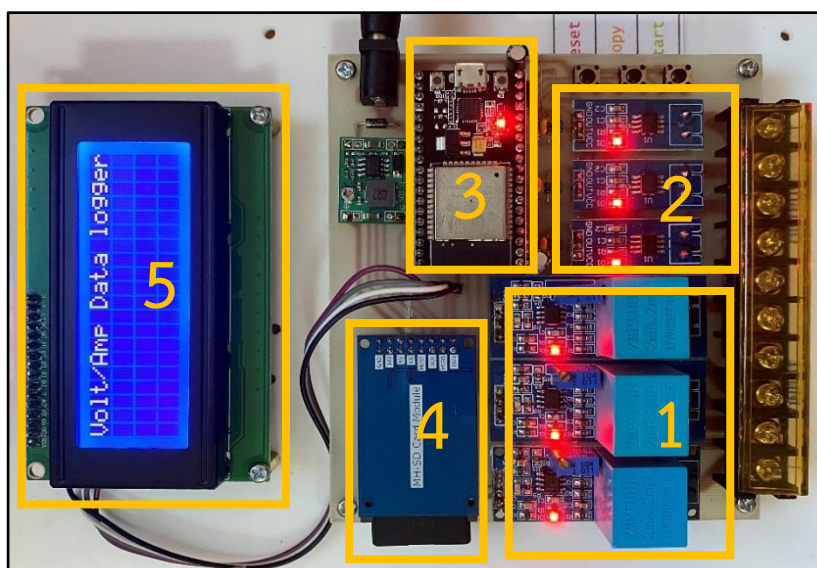
(2)

รูปที่ 4-11 จอแสดงผลแอลซีดีขนาด 20x4

### 4.3 ฮาร์ดแวร์ภายในอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

ฮาร์ดแวร์ภายในอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าในงานวิทยานิพนธ์นี้แสดงในรูปที่ 4-12 ประกอบไปด้วยบอร์ดต่างๆ ดังนี้

1. มอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Sensor Module)
2. มอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Sensor Module)
3. มอดูลไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S)
4. มอดูลการอ่านและเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำภายนอก (SD Card)
5. มอดูลหน้าจอแสดงผลการบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่ม (LCD Blue Screen)



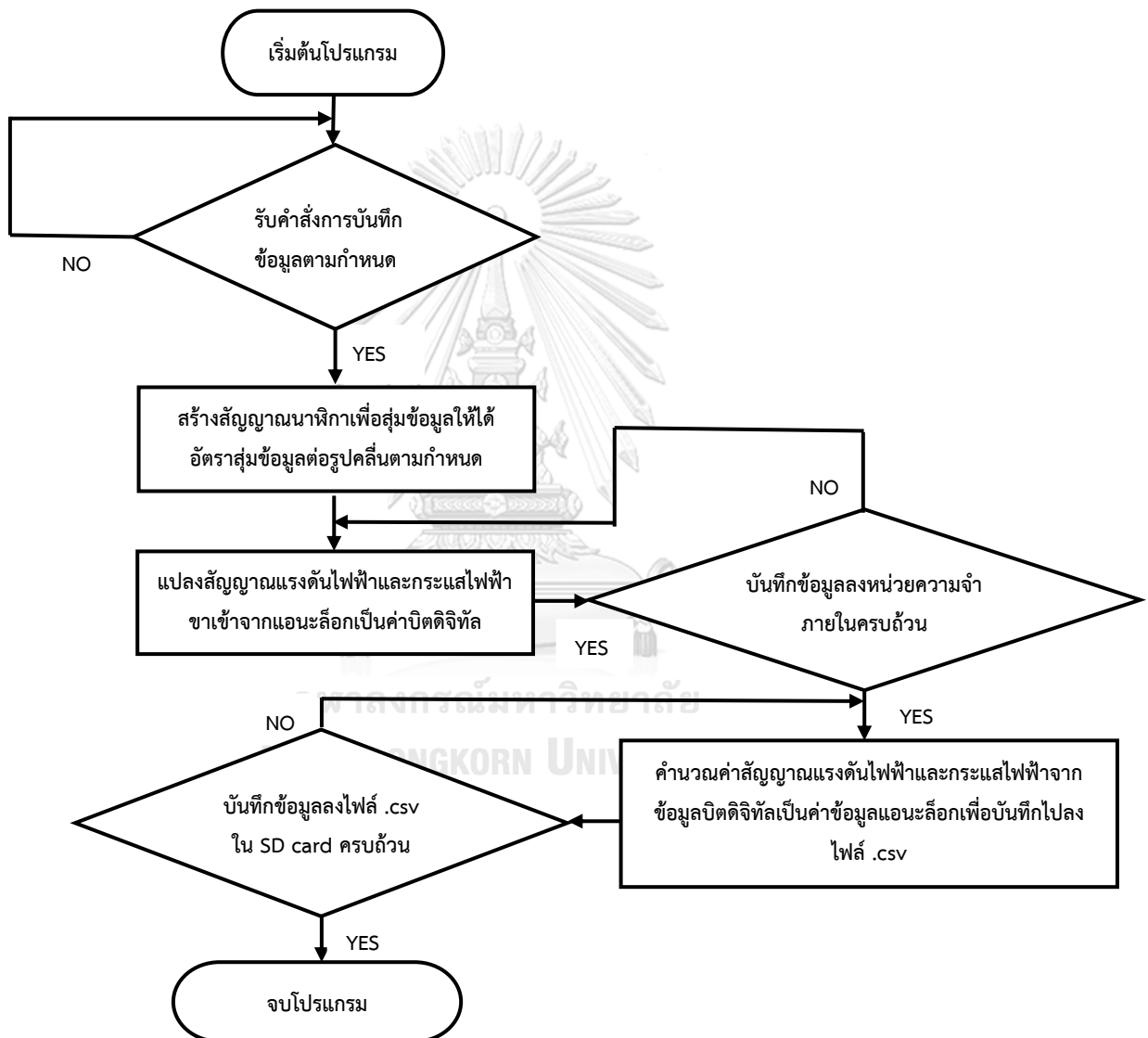
รูปที่ 4-12 ฮาร์ดแวร์ภายในอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

### 4.4 รายละเอียดด้านซอฟต์แวร์สำหรับเก็บข้อมูล

รายละเอียดด้านซอฟต์แวร์สำหรับการเก็บข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นนั้น จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการทำหน้าที่หลัก ได้แก่ การสร้างสัญญาณอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น การแปลงข้อมูลสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล, การเก็บข้อมูลตามอัตราสุ่มต่อรูปคลื่นลงในหน่วยความจำภายใน, การนำสัญญาณข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นข้อมูลค่าบิตดิจิทัล 12 บิต มาแปลงข้อมูลเป็นค่าแอนะล็อกเพื่อสำหรับการบันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจริงที่วัดได้ก่อนนำไปบันทึกลงไฟล์ .csv ที่หน่วยความจำภายนอก (SD Card)

ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จึงมีส่วนสำคัญมากในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ โดยลักษณะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 นั้นจะใช้ซอฟต์แวร์สำหรับการพัฒนาโปรแกรมคือ Arduino IDE ในการเขียนโปรแกรมจะเข้าถึงฟังก์ชันโดย ตรงทำให้สามารถเขียน

โค้ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากกลุ่มผู้พัฒนาโปรแกรมพัฒนาเพื่อรองรับการติดตั้งชุดพัฒนาเฟิร์มแวร์ให้กับบอร์ดอื่น ๆ รองรับการใช้โปรแกรมด้วยภาษา C/C++ สามารถใช้โปรแกรมในการพัฒนาชุดคำสั่ง Library ให้สามารถไปใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอื่นได้ ดังนั้นซอฟต์แวร์สำหรับการเขียนการสั่งงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 สามารถแสดงหลักการทำงานของโปรแกรมในลักษณะผังงาน (Flow chart) ได้ดังแสดงในรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 ผังงานการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

#### 4.5 แนวทางการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม MATLAB ให้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่รวดเร็ว โดยความเร็วขึ้นอยู่กับอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ (สเปกของเครื่องคอมพิวเตอร์) และจำนวนข้อมูล ในการวิเคราะห์ว่ามากน้อยเพียงใด ซึ่งสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกเบื้องต้นนั้น การวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB มีการเขียนคำสั่งโปรแกรมที่ไม่ซับซ้อน เพิ่มความสะดวกในการวิเคราะห์ ข้อมูลในระบบไฟฟ้าได้อย่างดี เช่น การดึงข้อมูลจากแหล่งข้อมูลอื่นมาวิเคราะห์ หรือการนำข้อมูลจากฐานข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมได้ รวมถึงการนำผลลัพธ์ไปแสดงผ่านโปรแกรมอื่นได้ทำให้มีประสิทธิภาพสูง ในการนำไปพัฒนาต่อ

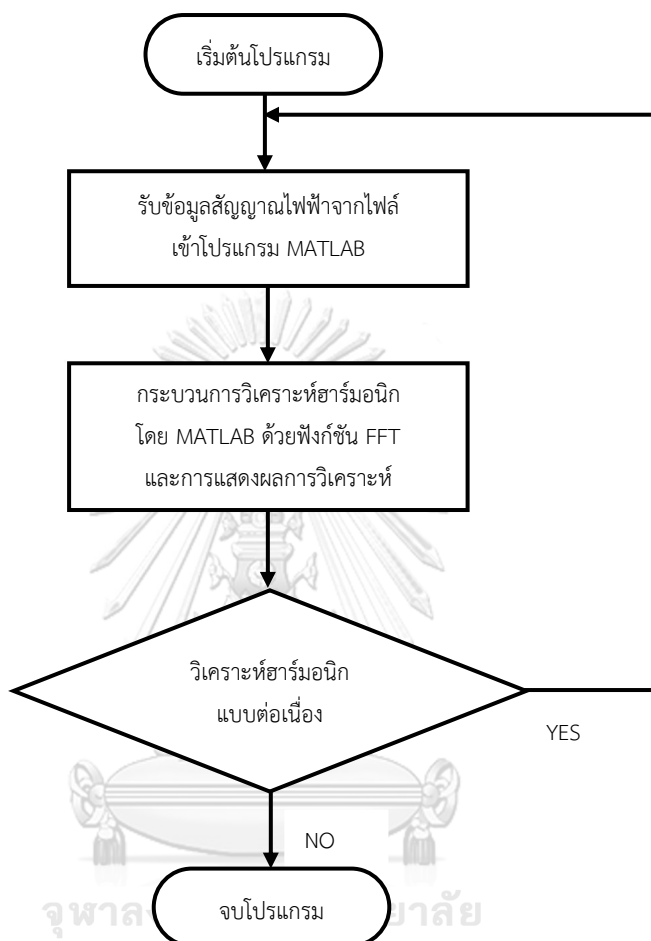
หัวข้อนี้จะนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยหลักการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform - FFT) ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและมีความแม่นยำสูงทำให้ได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่ได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P), ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q), ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (S), ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor), ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก รวม, ค่าลำดับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำกำหนด และในกรณีที่ ต้องการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิกที่มากกว่านั้น สามารถทำได้โดยเพิ่มอัตราการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่นให้มากกว่าเดิม ซึ่งทำให้มีความแม่นยำในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่สูงขึ้นด้วย

โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกนั้น เริ่มจากการนำข้อมูลที่บันทึกได้ในรูปแบบไฟล์ .csv ที่บันทึกได้ตามอัตราการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ในลักษณะที่ได้แสดงดังรูปที่ 4-14 เมื่อนำข้อมูลที่บันทึกได้ไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิก จะได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่สามารถแสดงผลผ่านโปรแกรม MATLAB ได้ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้

	A	B	C	D	E	F	G
1		Voltage A	Current A	Voltage B	Current B	Voltage C	Current C
2	0	-81.7	-0.79	272.9	1.18	-250.2	-0.56
3	1	-63.8	-0.75	267.6	1.2	-259.1	-0.59
4	2	-47.1	-0.73	258.3	1.21	-268.9	-0.62
5	3	-33.3	-0.63	251.8	1.24	-277	-0.71
6	4	-16.6	-0.61	243.6	1.27	-285.1	-0.74
7	5	-0.4	-0.46	238.8	1.27	-292.5	-0.77
8	6	12.6	-0.46	227.4	1.21	-301.8	-0.9
9	7	29.6	-0.4	221.7	1.28	-306.7	-0.89
10	8	44.3	-0.37	214.4	1.19	-310	-0.93
11	9	63	-0.3	206.2	1.19	-314	-0.93
12	10	76	-0.3	191.6	1.21	-319.7	-0.98
13	11	89	-0.2	178.6	1.16	-321.3	-1.05
14	12	104.9	-0.19	165.9	1.11	-323.8	-1.11
15	13	121.6	-0.08	154.5	1.1	-324.6	-1.13
16	14	135	-0.01	141.1	1.02	-324.6	-1.14
17	15	150.9	0.06	126.9	0.96	-326.2	-1.15
18	16	165.1	0.12	113.5	0.99	-324.2	-1.22
19	17	180.2	0.21	102.1	0.92	-321.3	-1.19
20	18	194	0.27	89	0.95	-318.9	-1.19

รูปที่ 4-14 การบันทึกค่าพารามิเตอร์เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

กระบวนการวิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB ด้วยหลักการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform - FFT) โดยแสดงการทำงานของโปรแกรม MATLAB ตามคำสั่งในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในลักษณะผังงาน (Flow chart) ดังแสดงในรูปที่ 4-15

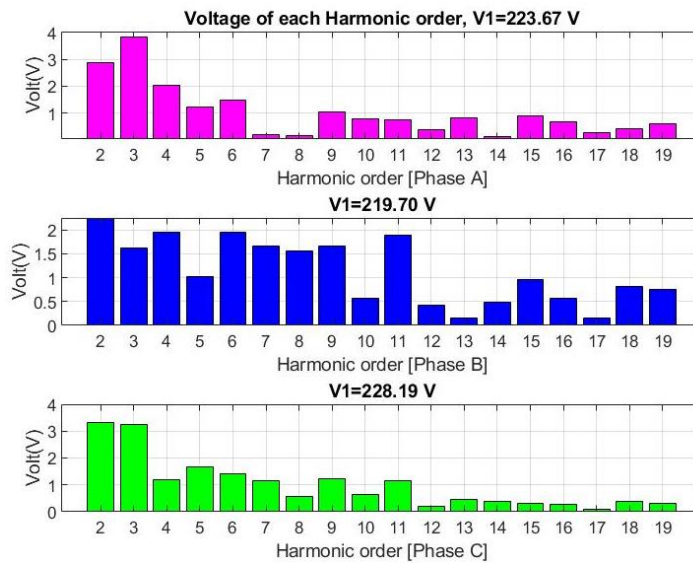


รูปที่ 4-15 ผังงานการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม MATLAB

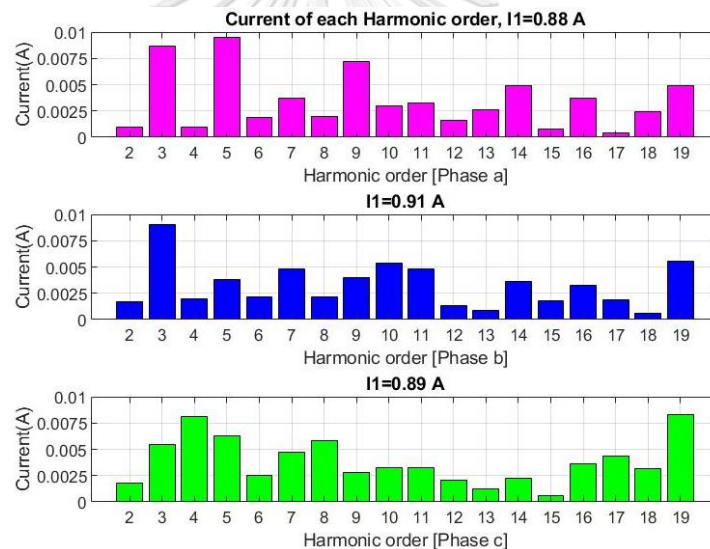
#### 4.6 แนวทางการแสดงผลข้อมูลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ผลลัพธ์ของข้อมูลตามอัตราการสุ่มข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่นที่นำไปวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก โดยแสดงค่าประสิทธิภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในลักษณะของสเปกตรัมแต่ละลำดับฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ลำดับฮาร์มอนิกที่ 1 ถึงลำดับฮาร์มอนิกที่ 19 สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภูมิแท่งได้ดังแสดงในรูปที่ 4-16 และ 4-17 โดยกำหนดให้

- $V1$  คือ ค่าแรงดันประสิทธิภาพของลำดับฮาร์มอนิกที่ 1 หรือค่าแรงดันมูลฐาน  
 $I1$  คือ ค่ากระแสประสิทธิภาพของลำดับฮาร์มอนิกที่ 1 หรือค่ากระแสมูลฐาน



รูปที่ 4-16 การวิเคราะห์ค่า RMS ของรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A, B และ C



รูปที่ 4-17 การวิเคราะห์ค่า RMS ของรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส A, B และ C

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดและบันทึกได้ตามอัตราส่วนข้อมูลต่อหนึ่งรูปคลื่น ผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-3 ได้แก่ ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD<sub>v</sub>), ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD<sub>i</sub>), ค่าตัวประกอบกำลัง (P.F.), ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P), ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q), ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) เป็นต้น

ตารางที่ 4-3 การแสดงการวิเคราะห์ค่าคุณภาพไฟฟ้าของเฟส A, B และ C

Indices	Phase A	Phase B	Phase C
$THD_V(\%)$	2.68	2.54	2.53
$THD_I(\%)$	2.08	1.80	2.11
$P.F.$	0.884	0.859	0.898
$P (W)$	174.707	171.190	182.303
$Q (var)$	92.176	101.614	89.014
$S (VA)$	197.600	199.177	202.941

#### 4.7 ข้อจำกัดการสร้างอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

ความสามารถในการสร้างอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Node MCU-32S) ตัวประมวลผลกลาง (CPU) มีสัญญาณนาฬิกา 240 MHz โดยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดความถี่ 1 MHz เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างฐานเวลาในการกำหนดอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น แต่ด้วยความสามารถของคูตที่สามารถรองรับความถี่ในการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพียง 80 kHz ซึ่งการกำหนดอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นนั้น ต้องสอดคล้องกับทฤษฎีการซิกตัวอย่างของไนควิสต์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความผิดพลาดเอเลียสซิ่งขึ้น ทำให้การคำนวณความถี่ในการกำหนดอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นเหลือเพียง 40 kHz เมื่อหารด้วยความถี่ของระบบไฟฟ้าในประเทศไทยที่ 50 Hz จึงได้ผลลัพธ์ ค่าอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นสูงสุดที่อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์สามารถทำได้คือ 800 ครั้งต่อรูปคลื่น (Samples/Cycle)

#### 4.8 แนวทางการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ไปใช้งานในระบบไฟฟ้าของ กฟน.

แนวทางการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ไปใช้งานในระบบไฟฟ้า เนื่องด้วยราคาที่ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้นมีราคาไม่แพง โดยเป็นราคาต้นทุนของอุปกรณ์และค่าบริการ เมื่อเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งราคาตัวอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์มีราคาที่ถูกกว่ามิเตอร์เอเอ็มอาร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4-1 และด้วยนโยบายของทาง กฟน. ที่มีการสนับสนุนให้ผู้ใช้ไฟฟ้าในเขตจำหน่ายของ กฟน. มีการปรับเปลี่ยนจากมิเตอร์ธรรมดาเป็นมิเตอร์เอเอ็มอาร์แทนนั้น

จึงเป็นโอกาสในการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ไปทดแทนมิเตอร์ธรรมดา หรือการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ไปต่อร่วมกับมิเตอร์ธรรมดา และการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ไปต่อร่วมกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ เพื่อการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์โมนิกที่เป็นข้อบกพร่องของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ รวมถึงรองรับข้อมูลและการให้บริการแก่ผู้ใช้ไฟฟ้า



## บทที่ 5

### การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลและการวิเคราะห์ลำดับฮาร์โมนิก

การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ จะทดสอบการวัดและบันทึกข้อมูลสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น โดยให้เห็นถึงความแม่นยำในการอ่านและบันทึกค่าข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าตามอัตราสุ่ม และการทดสอบข้อมูลที่บันทึกได้นำไปวิเคราะห์ฮาร์โมนิก รวมถึงการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ไปทดสอบสภาวะความทนต่อใช้งานขณะแรงดันสูงชั่วครู่ เพื่อสร้างความมั่นใจในตัวอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์มีความคงทนต่อสภาวะแรงดันเกิน และสร้างความมั่นใจในข้อมูลที่บันทึกว่ามีความแม่นยำ เหมาะสำหรับนำไปใช้วิเคราะห์ฮาร์โมนิก หรือนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในงานอื่นต่อไป

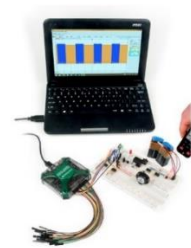
#### 5.1 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูล

จุดประสงค์ในการทดสอบนี้ เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของการบันทึกข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เทียบกับการบันทึกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าจากดิจิทัลออสซิลโลสโคป แบบพกพา แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ (Analog Discovery 2) ในฟังก์ชัน Data Logger โดยนำข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาค่าขนาดความผิดพลาดจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น สาเหตุในการเปรียบเทียบกับ Analog Discovery 2 คือเพื่อสร้างความมั่นใจว่าข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้น มีความถูกต้องแม่นยำเหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์ฮาร์โมนิกต่อไป โดยคุณสมบัติของดิจิทัลออสซิลโลสโคปแบบพกพา [27], ได้แสดงดังในรูปที่ 5-1

**Features:**

- Two-channel USB digital oscilloscope (1M $\Omega$ ,  $\pm$ 25V, differential, 14-bit, 100MS/s, 30MHz+\*)
- Two-channel arbitrary waveform generator ( $\pm$ 5V, 14-bit, 100MS/s, 12MHz+ bandwidth\*)
- 16-channel digital logic analyzer (3.3V CMOS and 1.8V or 5V tolerant, 100MS/s)
- 16-channel pattern generator (3.3V CMOS, 100MS/s)
- 16-channel virtual digital I/O including buttons, switches, displays, and LEDs, which is perfect for logic training applications
- Two input/output digital trigger signals for linking multiple instruments or providing an external trigger source
- Two channel voltmeter
- Network Analyzer with Bode, Nyquist, Nichols transfer diagrams of a circuit. The Network Analyzer has a range of 1Hz to 10MHz
- Spectrum Analyzer capable of power spectrum and spectral measurements (noise floor, SFDR, SNR, THD, etc.)
- Data Logger with exportable data and plot functionality
- Impedance Analyzer for analyzing capacitive and inductive elements
- Protocol Analyzer with SPI, I2C, CAN, AVR, and UART
- Two programmable power supplies (0...+5V, 0...-5V). The maximum available output current and power depend on the Analog Discovery 2 powering choice.
- Stereo audio amplifier to drive external headphones or speakers with replicated Arbitrary Waveform Generator signals
- An available Software Development Kit for programming with Python and C++, and a toolkit for programming with LabVIEW.
- MATLAB support for the Data Acquisition Toolbox
- For more information check out [AnalogDiscovery.com](http://AnalogDiscovery.com)

\*Note: To achieve maximum bandwidth, use of the BNC Adapter for Analog Discovery is required.



รูปที่ 5-1 วงจรการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามสภาวะโหลด

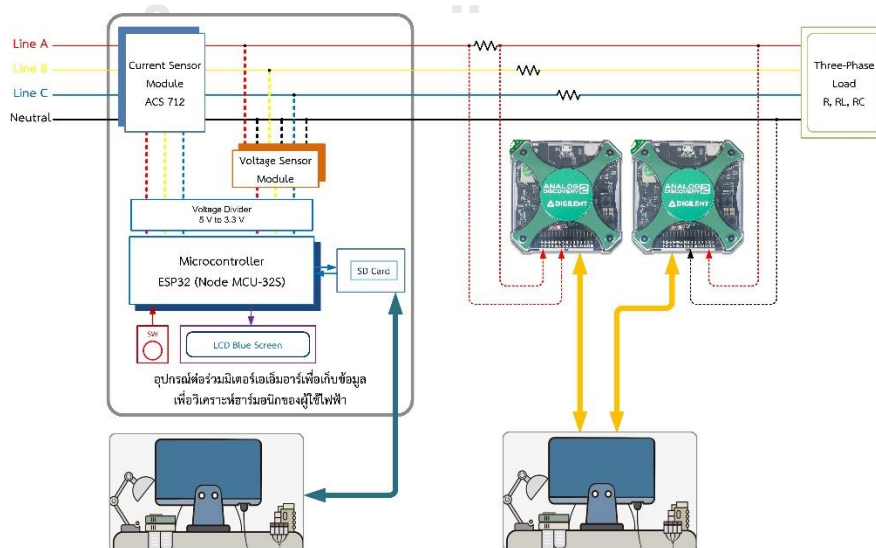
### ขั้นตอนการทดสอบ

1. สร้างเงื่อนไขสำหรับการทดสอบขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ
2. ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อจำลองแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามสภาวะโหลดแบบ R, RL และ RC ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5-2 และ 5-3
3. วัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดอ้างอิง (Analog Discovery 2) ในฟังก์ชัน Data Logger เพื่อเก็บสัญญาณรูปคลื่นตามสภาวะโหลดต่างๆ กำหนดให้บันทึกข้อมูลต่อรูปคลื่นจำนวน 128 ตัวอย่าง โดยแสดงให้เห็นในตารางจำนวน 16 ตัวอย่างแบ่งตามช่วงเวลาเท่ากันทุกจุดตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น
4. วัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าและบันทึก ด้วยอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ จำนวน 128 ข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น โดยแสดงให้เห็นในตารางจำนวน 16 ข้อมูลแบ่งตามช่วงเวลาเท่ากันทุกจุดตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น
5. เปรียบเทียบผลค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าในข้อ 3 และ 4 โดยเทียบข้อมูล ณ เวลาเดียวกัน

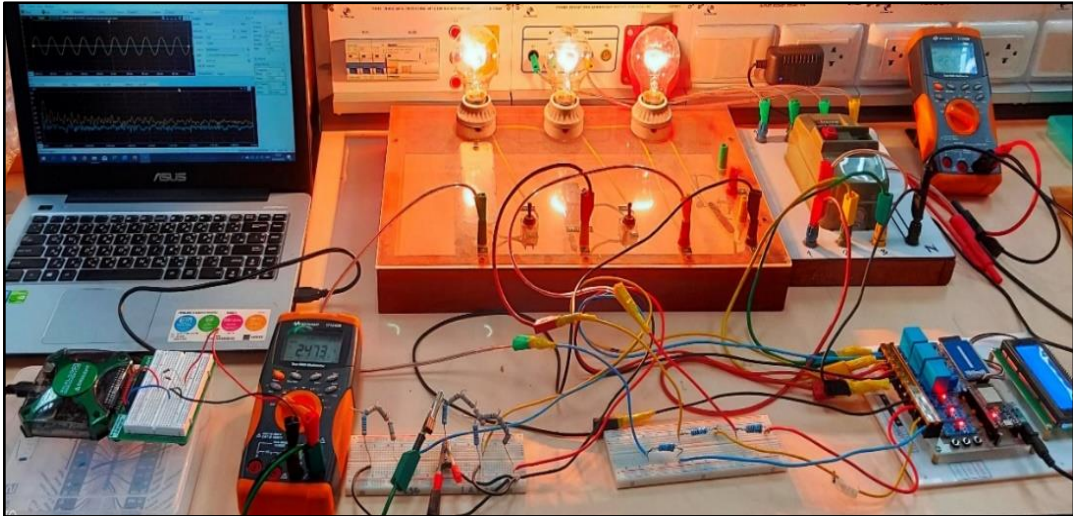
### เครื่องมือในการทดสอบ

1. อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้น
2. ดิจิทัลออสซิลโลสโคปแบบพกพาแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ (Analog Discovery 2)
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าและภาระทางไฟฟ้าประเภทต่างๆ (Load)
4. ค่าความต้านสำหรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าและวัดค่ากระแสไฟฟ้า

### วงจรการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามสภาวะโหลดต่างๆ



รูปที่ 5-2 วงจรการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามสภาวะโหลด



รูปที่ 5-3 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามสภาวะโหลด

การบันทึกข้อมูลจำนวน 128 ตัวอย่าง ตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นนั้น ช่วงเวลาต่อจุดที่บันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นนั้น คิดเป็นคาบเวลาในการสุ่มข้อมูลนี้

$$T_s = \frac{1}{(128 \times 50) \text{ Hz}} = 156.25 \mu\text{s}$$

จากข้อมูลที่บันทึกตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นทั้งหมด 128 ตัวอย่างนั้น สามารถนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณได้ดังสมการที่ (5-1)

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}; N = 128 \quad (5-1)$$

การหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าประสิทธิภาพสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ Analog Discovery 2 มาอ้างอิง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในการหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ดังสมการที่ (5-2)

$$\%error = \left( \left| \frac{X_m - X_{ref}}{X_{ref}} \right| \right) \times 100 \quad (5-2)$$

กำหนดให้	$X$	คือ	ค่าสัญญาณแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าตามอัตราสุ่มข้อมูล
	$X_m$	คือ	ค่าประสิทธิภาพของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์
	$X_{ref}$	คือ	ค่าประสิทธิภาพของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ Analog Discovery 2

ตัวอย่างการคำนวณในการหาค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้าจากข้อมูลของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ใน Phase A ดังนี้

$$VA_{m_{rms}} = \sqrt{\frac{VA_{m_1}^2 + VA_{m_2}^2 + \dots + VA_{m_{128}}^2}{128}} = 223.78 \text{ V}$$

การหาค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้าจากข้อมูลของอุปกรณ์ Analog Discovery 2 ที่ใช้อ้างอิงใน Phase A ดังนี้

$$VA_{ref_{rms}} = \sqrt{\frac{VA_{ref_1}^2 + VA_{ref_2}^2 + \dots + VA_{ref_{128}}^2}{128}} = 225.15 \text{ V}$$

คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\%error = \left| \left( \frac{X_m - X_{ref}}{X_{ref}} \right) \right| \times 100 = \left| \left( \frac{223.78 - 225.15}{225.15} \right) \right| \times 100 = 0.61\%$$

ผลการทดสอบความแม่นยำจากอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นทั้งหมด 128 ตัวอย่าง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้า, ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าประสิทธิภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้า, ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยรวมของการบันทึกข้อมูล รวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงข้อมูลให้เห็นในตารางจำนวน 16 ข้อมูล เพื่อให้เห็นแนวทางการเปรียบเทียบข้อมูล ซึ่งการแสดงผลข้อมูลในตารางให้น้อยลงนั้นทำให้ช่วงเวลาต่อจุดตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 1.25 ms หรือ 1,250  $\mu$ S

### 5.1.1 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบ R

การทดสอบการบันทึกข้อมูลตามกรณีโหลดแบบ R นั้นจะใช้โหลดไส้ 200W จำนวน 3 โหลด เพื่อใช้แทนสภาวะโหลดแบบ R ทั้ง 3 เฟส โดยความต้านทานของโหลดไส้ 200W มีค่าความต้านทาน 242 โอห์ม ทั้ง 3 ชุด เพื่อใช้แทนสภาวะโหลดแบบ R ทั้ง 3 เฟส ตามข้อกำหนดการทดสอบ เพื่อทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า และการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 5-1 ถึงตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-1 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าแบบโหลด R

ลำดับข้อมูล	ช่วงเวลา (mS)	ค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Analog Discovery 2 (Volt)			ค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ประกอบ มิเตอร์ (Volt)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	13.34	6.58	11.31	13.8	6.1	12.2
2	1.25	131.53	118.02	133.55	127.2	112.2	126.6
3	2.50	226.75	220.67	240.93	220.8	222.7	236.2
4	3.75	295.64	279.43	307.12	290.8	288.6	298.7
5	5.00	309.82	289.56	319.27	318.3	296.5	321.8
6	6.25	285.51	282.13	304.42	289	276.2	291.2
7	7.50	216.62	220.67	234.18	214.9	215.4	245.3
8	8.75	122.75	125.45	128.15	127.3	119.8	134.1
9	10.00	-4.22	9.29	4.56	-4.9	8.2	4.8
10	11.25	-137.94	-119.71	-146.05	-127.5	-116.7	-137.8
11	12.50	-232.49	-222.36	-244.65	-235.9	-223.7	-239.2
12	13.75	-297.33	-289.22	-312.86	-303.1	-292.1	-307.8
13	15.00	-311.51	-298.00	-326.37	-307.5	-310.4	-331.3
14	16.25	-286.52	-287.20	-308.81	-281.5	-291.2	-304.5
15	17.50	-237.22	-225.06	-236.54	-229.4	-229.4	-235.5
16	18.75	-127.14	-131.19	-129.16	-126.5	-119.2	-127.7
แรงดัน RMS (Volt)		225.15	217.76	235.71	223.78	220.10	233.08
% ความผิดพลาดแรงดัน RMS					0.61	1.07	1.12

ตารางที่ 5-2 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าแบบโพลต R

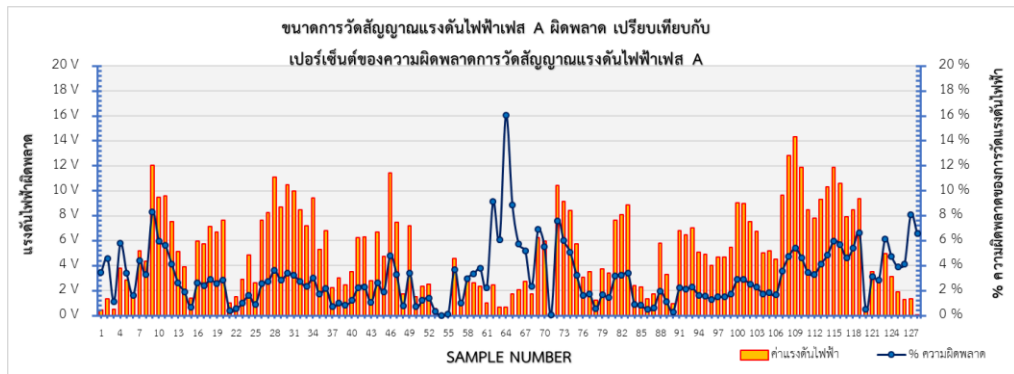
ลำดับ ข้อมูล	ช่วงเวลา (mS)	ค่ากระแสไฟฟ้าจาก Analog Discovery 2 (Amp)			ค่ากระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ประกอบ มิเตอร์ (Amp)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	0.055	0.011	0.014	0.06	0.01	0.01
2	1.25	0.500	0.478	0.463	0.51	0.48	0.45
3	2.50	0.897	0.864	0.875	0.90	0.88	0.83
4	3.75	1.164	1.146	1.153	1.19	1.14	1.16
5	5.00	1.235	1.253	1.242	1.19	1.27	1.21
6	6.25	1.172	1.205	1.205	1.19	1.19	1.18
7	7.50	0.897	0.953	0.934	0.91	0.92	0.92
8	8.75	0.481	0.574	0.541	0.44	0.55	0.51
9	10.00	-0.010	0.081	0.055	-0.01	0.07	0.05
10	11.25	-0.513	-0.443	-0.468	-0.51	-0.4	-0.49
11	12.50	-0.917	-0.873	-0.892	-0.90	-0.9	-0.93
12	13.75	-1.181	-1.155	-1.162	-1.18	-1.16	-1.19
13	15.00	-1.244	-1.259	-1.248	-1.18	-1.3	-1.26
14	16.25	-1.177	-1.214	-1.203	-1.18	-1.25	-1.24
15	17.50	-0.903	-0.962	-0.936	-0.85	-1	-0.93
16	18.75	-0.483	-0.647	-0.539	-0.46	-0.66	-0.56
กระแส RMS (Amp)		0.8949	0.9103	0.9019	0.8835	0.9158	0.8873
% ความผิดพลาดกระแส RMS					1.271	0.600	1.625

ตารางที่ 5-3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบโหลด R

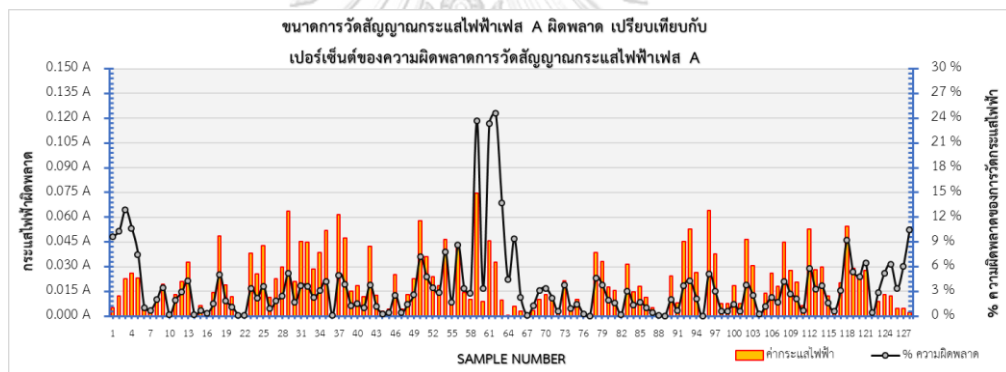
ลำดับ ข้อมูล	ช่วงเวลา (mS)	% ความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า			% ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	3.46	7.36	7.85	9.62	7.35	28.13
2	1.25	3.29	4.93	5.21	2.00	0.47	2.79
3	2.50	2.62	0.92	1.96	0.33	1.89	5.12
4	3.75	1.64	3.28	2.74	2.21	0.50	0.60
5	5.00	2.74	2.40	0.79	3.62	1.33	2.59
6	6.25	1.22	2.10	4.34	1.56	1.25	2.08
7	7.50	0.79	2.39	4.75	1.44	3.44	1.52
8	8.75	3.71	4.50	4.64	8.61	4.22	5.70
9	10.00	16.08	11.70	5.30	4.43	13.27	8.65
10	11.25	7.57	2.51	5.65	0.59	9.61	4.59
11	12.50	1.47	0.60	2.23	1.91	3.10	4.32
12	13.75	1.94	1.00	1.62	0.08	0.44	2.38
13	15.00	1.29	4.16	1.51	5.15	3.27	0.98
14	16.25	1.75	1.39	1.39	0.23	2.94	3.06
15	17.50	3.30	1.93	0.44	5.83	3.95	0.64
16	18.75	0.50	9.14	1.13	4.83	2.07	3.90

## การเปรียบเทียบความแม่นยำและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ R

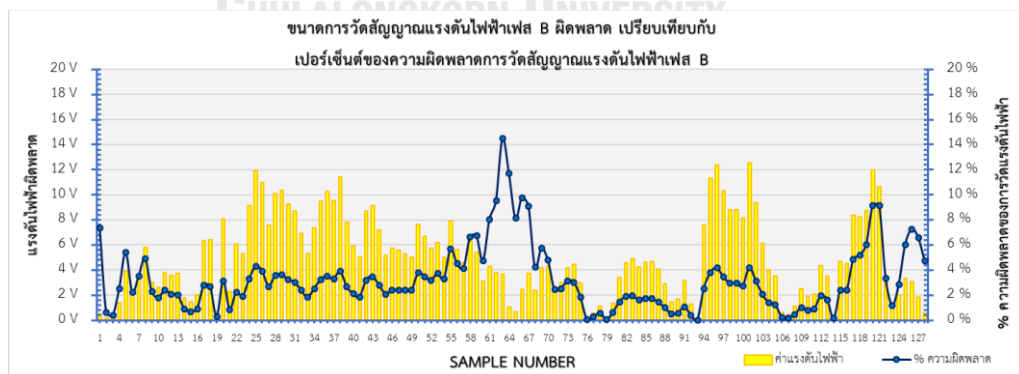
การทดสอบตามการใช้งานจริงกรณีโหลดแบบ R เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำการวัดข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดข้อมูลทั้งหมด 128 ตัวอย่างในแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5-4 ถึงรูปที่ 5-9



รูปที่ 5-4 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ R

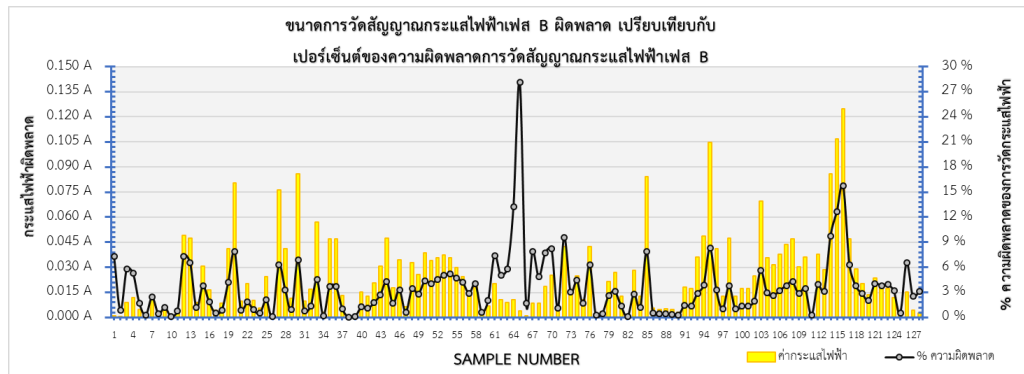


รูปที่ 5-5 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ R

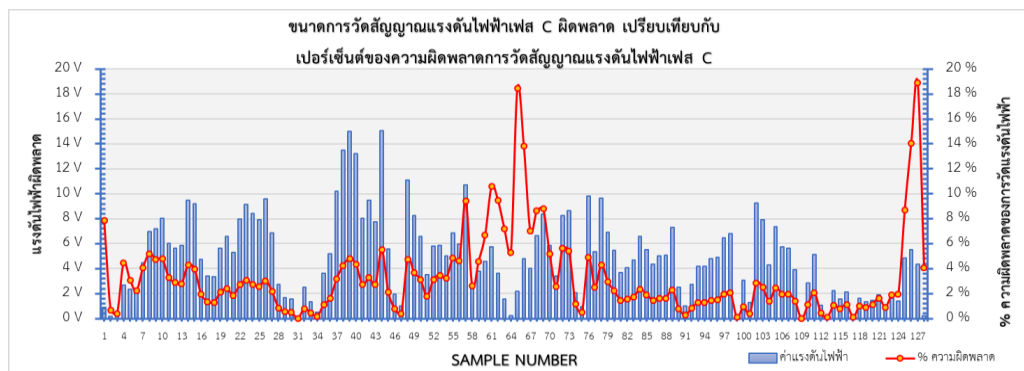


รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ R

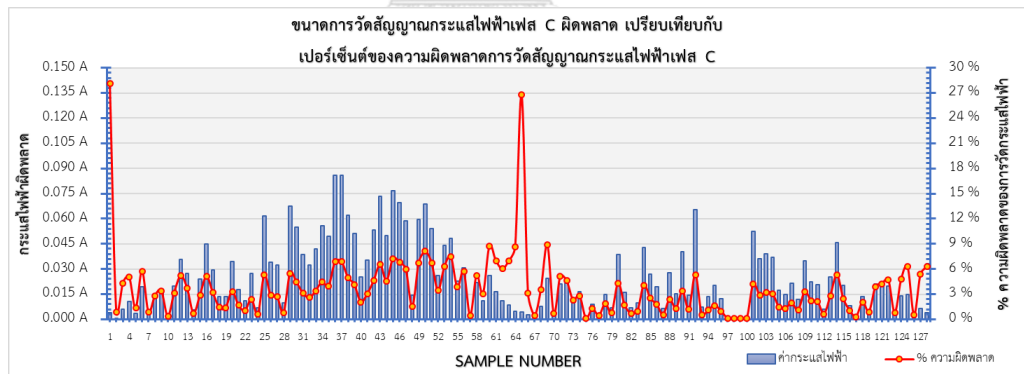




รูปที่ 5-7 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ R



รูปที่ 5-8 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ R



รูปที่ 5-9 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ R

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยรวมของการบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นนั้น เพื่อให้สะท้อนถึงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดรวมต่อรูปคลื่นที่อาจเกิดการผิดพลาดจากการวัดข้อมูลได้โดยใช้หลักการของการหาค่าเฉลี่ยทั่วไป ดังสมการที่ (5-3)

$$error_{Avg} = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} error_i = \frac{error_1 + error_2 + \dots + error_{128}}{128} \quad (5-3)$$

แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ดังที่ได้แสดงตามตารางที่ 5-3 ไม่อาจสะท้อนค่าความผิดพลาดจริงของการวัดและบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มได้ จึงต้องมีการพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (Sample standard deviation ;  $\sigma$ ) ซึ่งเป็นค่าทางสถิติและความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบขนาดความผิดพลาดการวัดและบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มเพิ่มเติม เนื่องจากช่วยอธิบายเรื่องการกระจายตัวของความแม่นยำในการวัดข้อมูลตามอัตราสุ่มต่อรูปคลื่นได้ ซึ่งถ้าค่า  $\sigma$  มีค่าน้อย หรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของข้อมูลแสดงว่าข้อมูลที่วัดได้มีความแม่นยำสูง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-4)

ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยของการวัดและบันทึกข้อมูลกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดการบันทึกข้อมูล ตามสภาวะการใช้งานจริงกรณีโหลดแบบ R เพื่อแสดงความแม่นยำการวัดและบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มต่อรูปคลื่นของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5-4

$$\sigma_{error} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (error_i - error_{Avg})^2} \quad (5-4)$$

$$\sigma_{error} = \sqrt{\frac{(error_1 - error_{Avg})^2 + (error_2 - error_{Avg})^2 + \dots + (error_{128} - error_{Avg})^2}{127}}$$

ตารางที่ 5-4 การแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ R

$error_{Avg}$	ขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยของการบันทึกข้อมูลทั้งหมด 128 ตัวอย่าง					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	5.154	4.943	4.899	0.0205	0.0245	0.0246
$\sigma_{error}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดการบันทึกข้อมูล 128 ตัวอย่าง ต่อ 1 รูปคลื่น					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	3.389	3.246	3.267	0.0172	0.0238	0.0207

### 5.1.2 ผลการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบ RL

การทดสอบการบันทึกข้อมูลตามกรณีโหลดแบบ RL นั้นจะใช้โหลดได้ 200 W ที่มีค่าความต้านทาน 242 โอห์ม และบัลลาสต์ไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 1.54 H จำนวน 3 ชุด เพื่อใช้แทนสภาวะโหลดแบบ RL ทั้ง 3 เฟส ตามข้อกำหนดการทดสอบเพื่อทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า และการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 5-5 ถึงตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-5 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าแบบโหลด RL

ลำดับข้อมูล	ช่วงเวลา (ms)	ค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Analog Discovery 2 (Volt)			ค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ประกอบ มิเตอร์ (Volt)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	10.98	3.98	10.68	14.2	4.4	11.7
2	1.25	124.33	115.68	124.64	121.2	122	118.3
3	2.50	224.85	218.04	228.84	220.9	224.1	226.6
4	3.75	294.91	285.89	297.67	286	294.9	302.2
5	5.00	315.42	310.57	318.67	331.5	315.2	323
6	6.25	300.68	295.22	305.60	299.8	278.2	292.5
7	7.50	231.05	236.95	234.43	244.5	219.2	243.6
8	8.75	125.19	132.62	129.98	128.9	124.8	124.8
9	10.00	3.49	12.46	5.27	3.2	11.7	5
10	11.25	-125.95	-115.08	-125.64	-117.5	-105.3	-118.7
11	12.50	-226.46	-217.87	-230.08	-243.2	-211.9	-229.8
12	13.75	-294.74	-286.27	-298.12	-310.8	-286.8	-301.8
13	15.00	-314.88	-311.26	-318.87	-307.5	-307.5	-320.9
14	16.25	-298.80	-295.97	-304.38	-281.5	-293.7	-300.6
15	17.50	-230.27	-236.41	-233.22	-226.6	-230.6	-240
16	18.75	-124.72	-132.45	-129.38	-121.6	-129.7	-128.1
แรงดัน RMS (Volt)		226.98	223.88	230.20	227.46	220.96	230.41
% ความผิดพลาดแรงดัน RMS					0.21	1.30	0.09

ตารางที่ 5-6 การทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าแบบโพลต RL

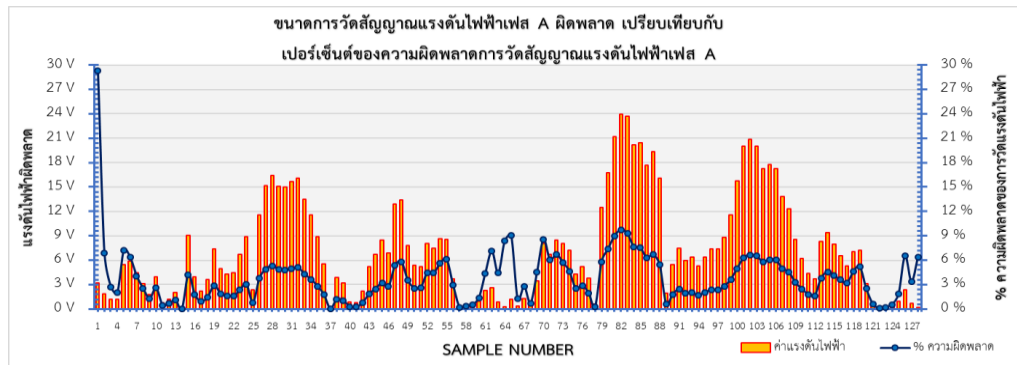
ลำดับ ข้อมูล	ช่วงเวลา (mS)	ค่ากระแสไฟฟ้าจาก Analog Discovery 2 (Amp)			ค่ากระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ประกอบ มิเตอร์ (Amp)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	0.029	0.021	0.013	0.03	0.02	0.01
2	1.25	0.207	0.188	0.181	0.22	0.2	0.17
3	2.50	0.392	0.366	0.374	0.41	0.36	0.4
4	3.75	0.541	0.504	0.526	0.56	0.5	0.52
5	5.00	0.600	0.571	0.600	0.57	0.55	0.61
6	6.25	0.504	0.470	0.530	0.50	0.49	0.57
7	7.50	0.359	0.359	0.392	0.37	0.37	0.42
8	8.75	0.185	0.188	0.218	0.20	0.2	0.21
9	10.00	-0.016	-0.012	0.018	-0.02	-0.01	0.02
10	11.25	-0.216	-0.198	-0.186	-0.21	-0.21	-0.17
11	12.50	-0.402	-0.372	-0.376	-0.40	-0.4	-0.39
12	13.75	-0.546	-0.517	-0.524	-0.51	-0.53	-0.54
13	15.00	-0.602	-0.639	-0.595	-0.62	-0.6	-0.63
14	16.25	-0.509	-0.550	-0.532	-0.52	-0.57	-0.52
15	17.50	-0.365	-0.368	-0.394	-0.39	-0.36	-0.4
16	18.75	-0.190	-0.194	-0.224	-0.20	-0.21	-0.24
กระแส RMS (Amp)		0.4002	0.3939	0.4019	0.4065	0.3997	0.4110
% ความผิดพลาดกระแส RMS					1.580	1.484	2.259

ตารางที่ 5-7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบโหลด RL

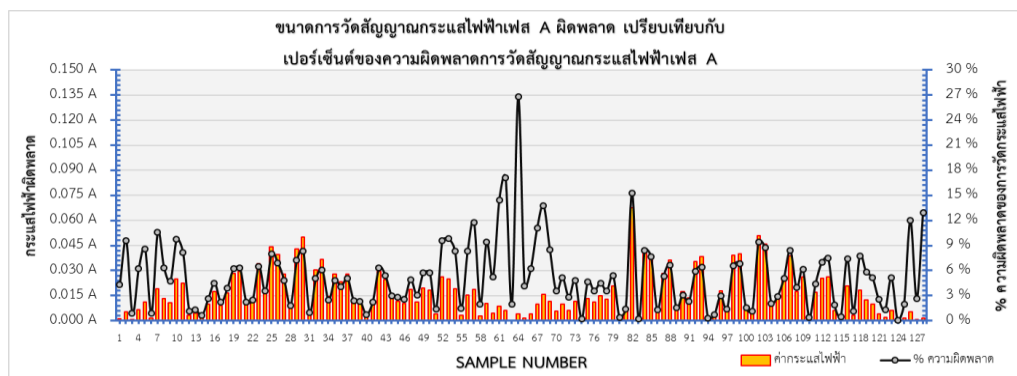
ลำดับ ข้อมูล	ช่วงเวลา (mS)	% ความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า			% ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	29.28	10.45	9.58	4.32	6.26	21.77
2	1.25	2.52	5.47	5.09	6.35	6.20	6.02
3	2.50	1.76	2.78	0.98	4.48	1.76	6.99
4	3.75	3.02	3.15	1.52	3.54	0.74	1.14
5	5.00	5.10	1.49	1.36	5.03	3.60	1.63
6	6.25	0.29	5.76	4.29	0.74	4.18	7.61
7	7.50	5.82	7.49	3.91	3.06	3.06	7.03
8	8.75	2.96	5.90	3.99	8.34	6.20	3.67
9	10.00	8.37	6.08	5.18	26.81	14.08	13.47
10	11.25	6.71	8.50	5.52	2.85	6.28	8.83
11	12.50	7.39	2.74	0.12	0.42	7.53	3.80
12	13.75	5.45	0.19	1.23	6.66	2.57	3.03
13	15.00	2.34	1.21	0.64	2.98	6.13	5.95
14	16.25	5.79	0.77	1.24	2.10	3.61	2.18
15	17.50	1.59	2.46	2.91	6.97	2.25	1.45
16	18.75	2.50	2.08	0.99	5.17	8.31	7.35

## การเปรียบเทียบความแม่นยำและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ RL

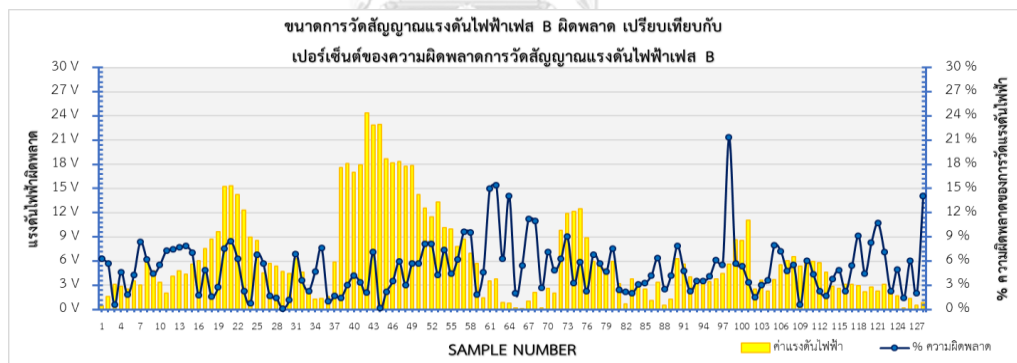
การทดสอบตามการใช้งานจริงกรณีโหลดแบบ RL เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำการวัดข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดข้อมูลทั้งหมด 128 ตัวอย่างในแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5-10 ถึงรูปที่ 5-15



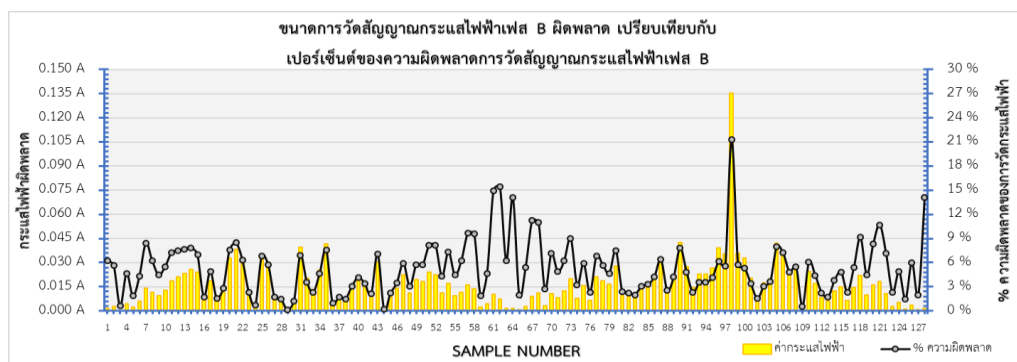
รูปที่ 5-10 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RL



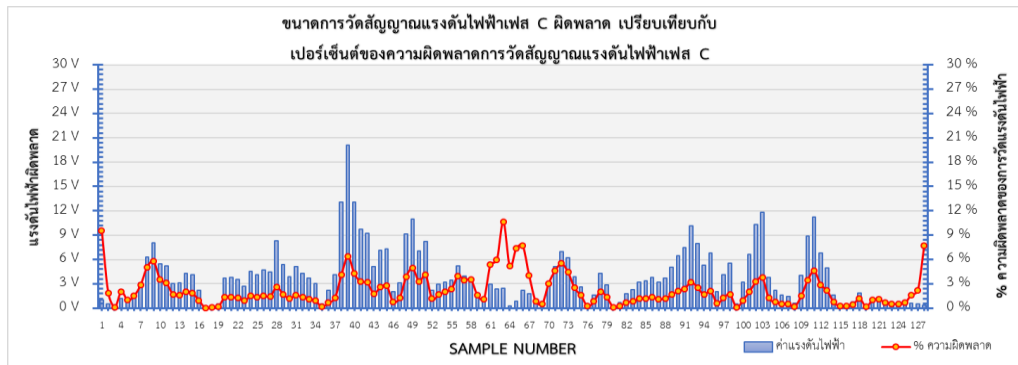
รูปที่ 5-11 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RL



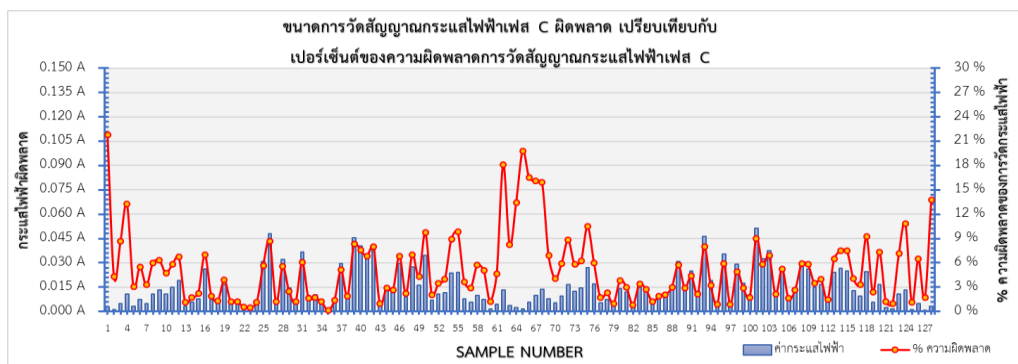
รูปที่ 5-12 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RL



รูปที่ 5-13 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RL



รูปที่ 5-14 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RL



รูปที่ 5-15 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RL

การเปรียบเทียบค่าขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยของการวัดและบันทึกข้อมูลกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดการบันทึกข้อมูล ตามสภาวะการใช้งานจริงกรณีโหลดแบบ RL เพื่อแสดงความแม่นยำการวัดและบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มต่อรูปคลื่นของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5-8

ตารางที่ 5-8 การแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ RL

$error_{Avg}$	ขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยของการบันทึกข้อมูลทั้งหมด 128 ตัวอย่าง					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	7.260	6.365	3.901	0.0160	0.0164	0.0145
$\sigma_{error}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดการบันทึกข้อมูล 128 ตัวอย่าง ต่อ 1 รูปคลื่น					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	6.122	5.495	3.352	0.0133	0.0150	0.0115

### 5.1.3 ผลการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบ RC

การทดสอบการบันทึกข้อมูลตามกรณีโหลดแบบ RC นั้นจะใช้โหลดไส้ 200 W ที่มีค่าความต้านทาน 242 โอห์ม และตัวเก็บประจุที่มีค่า 5.6  $\mu\text{F}$  จำนวน 3 ชุด เพื่อใช้แทนสภาวะโหลดแบบ RC ทั้ง 3 เฟส ตามข้อกำหนดการทดสอบเพื่อทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้า และการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 5-9 ถึงตารางที่ 5-11

ตารางที่ 5-9 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าแบบโหลด RC

ลำดับข้อมูล	ช่วงเวลา (ms)	ค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Analog Discovery 2 (Volt)			ค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ (Volt)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	3.74	4.90	11.11	3.6	5.2	10.5
2	1.25	116.97	115.92	125.32	109.4	113.8	116.3
3	2.50	218.59	217.97	230.01	211.9	224.3	227.4
4	3.75	288.46	285.52	299.15	286.8	289	301.8
5	5.00	311.37	308.30	318.37	327.5	312.8	328.3
6	6.25	298.84	293.99	305.78	302.2	282.9	299.1
7	7.50	236.46	230.56	233.20	246.9	221.9	237.9
8	8.75	133.97	131.95	128.51	135.4	123.5	129.7
9	10.00	12.64	10.19	4.54	12.6	10.8	4.4
10	11.25	-116.98	-118.58	-126.62	-112.7	-112.2	-118.3
11	12.50	-219.71	-220.69	-229.53	-225.3	-208.9	-229.4
12	13.75	-289.34	-286.64	-298.43	-300.2	-283.5	-298.6
13	15.00	-311.08	-308.31	-318.26	-302.6	-306.7	-320.5
14	16.25	-298.30	-291.98	-304.81	-281.5	-292.1	-300.6
15	17.50	-236.23	-229.16	-232.66	-231	-229.8	-242.4
16	18.75	-133.87	-129.94	-128.71	-131.8	-125.3	-131.8
แรงดัน RMS (Volt)		224.99	222.42	230.07	224.89	220.56	230.77
% ความผิดพลาดแรงดัน RMS					0.04	0.84	0.30



ตารางที่ 5-10 การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าแบบโหลด RC

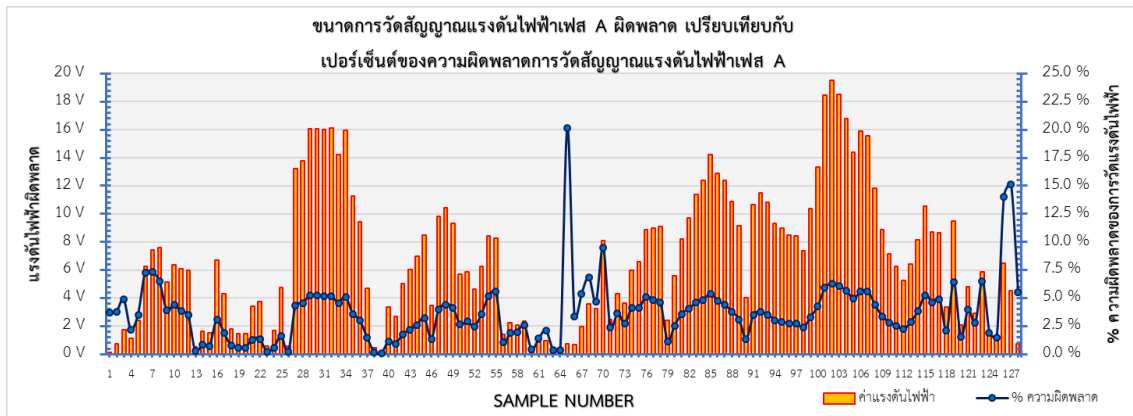
ลำดับ ข้อมูล	ช่วงเวลา (mS)	ค่ากระแสไฟฟ้าจาก Analog Discovery 2 (Amp)			ค่ากระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ประกอบ มิเตอร์ (Amp)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	0.010	0.044	0.029	0.010	0.040	0.030
2	1.25	0.222	0.225	0.222	0.240	0.230	0.210
3	2.50	0.389	0.430	0.396	0.390	0.410	0.400
4	3.75	0.467	0.545	0.478	0.490	0.580	0.500
5	5.00	0.522	0.578	0.526	0.500	0.550	0.490
6	6.25	0.444	0.422	0.444	0.420	0.440	0.440
7	7.50	0.314	0.292	0.307	0.320	0.310	0.310
8	8.75	0.133	0.118	0.118	0.130	0.120	0.110
9	10.00	0.021	0.012	0.014	0.020	0.010	0.010
10	11.25	-0.231	-0.235	-0.220	-0.220	-0.230	-0.210
11	12.50	-0.398	-0.383	-0.398	-0.410	-0.370	-0.400
12	13.75	-0.480	-0.465	-0.480	-0.500	-0.430	-0.460
13	15.00	-0.532	-0.513	-0.532	-0.560	-0.540	-0.570
14	16.25	-0.457	-0.428	-0.450	-0.430	-0.450	-0.430
15	17.50	-0.320	-0.301	-0.309	-0.300	-0.310	-0.320
16	18.75	-0.138	-0.123	-0.127	-0.130	-0.120	-0.140
กระแส RMS (Amp)		0.360	0.360	0.359	0.364	0.367	0.361
% ความผิดพลาดกระแส RMS					1.111	1.911	0.614

ตารางที่ 5-11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบโหลด RC

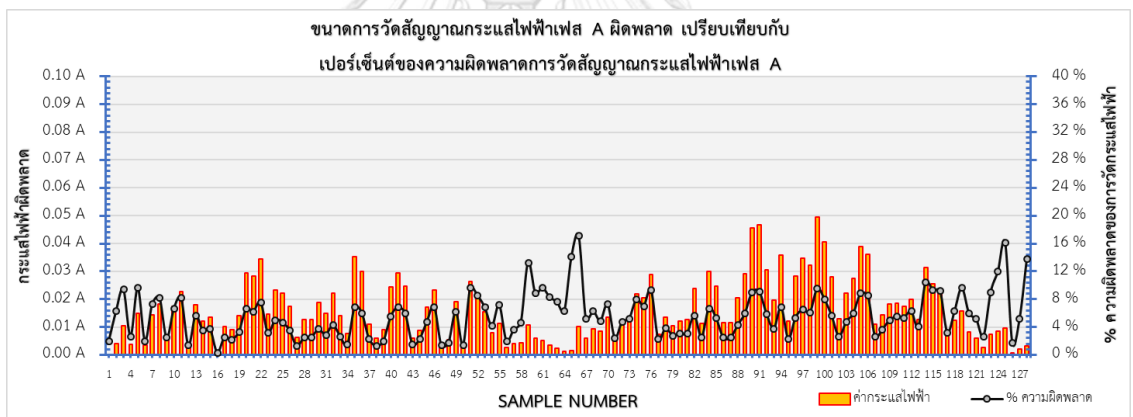
ลำดับ ข้อมูล	ช่วงเวลา (mS)	% ความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า			% ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0.00	3.69	6.02	5.46	2.00	8.26	4.32
2	1.25	6.47	1.83	7.19	8.25	2.03	5.28
3	2.50	3.06	2.90	1.13	0.33	4.54	0.98
4	3.75	0.58	1.22	0.89	5.01	6.51	4.66
5	5.00	5.18	1.46	3.12	4.27	4.84	6.84
6	6.25	1.12	3.77	2.18	5.48	4.24	0.98
7	7.50	4.42	3.76	2.01	1.75	6.08	0.96
8	8.75	1.06	6.40	0.93	2.00	1.85	6.63
9	10.00	0.33	6.03	3.01	6.26	17.09	28.13
10	11.25	3.66	5.38	6.57	4.76	2.00	4.49
11	12.50	2.55	5.34	0.06	3.02	3.43	0.51
12	13.75	3.75	1.09	0.06	4.25	7.48	4.09
13	15.00	2.72	0.52	0.70	5.35	5.26	7.23
14	16.25	5.63	0.04	1.38	5.98	5.22	4.43
15	17.50	2.21	0.28	4.18	6.27	2.82	3.59
16	18.75	1.54	3.57	2.40	5.95	2.74	10.15

## การเปรียบเทียบความแม่นยำและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ RC

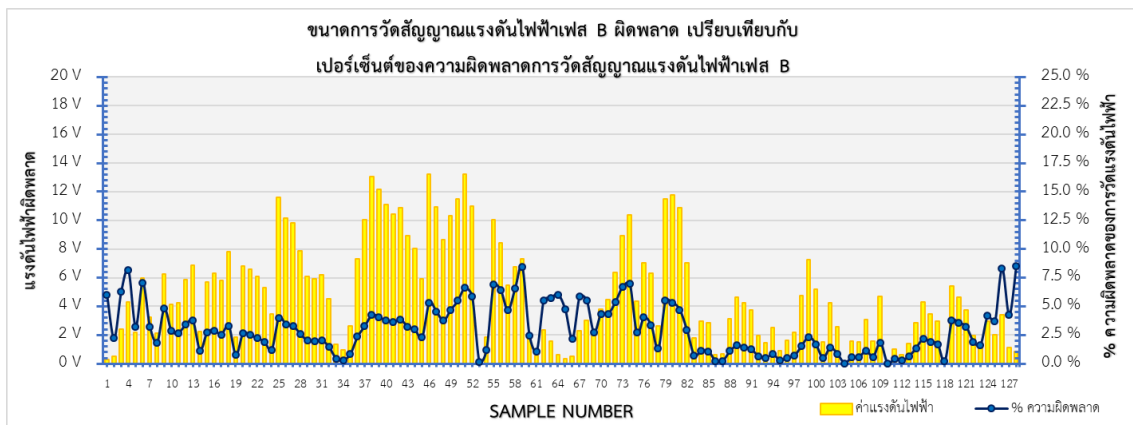
การทดสอบตามการใช้งานจริงกรณีโหลดแบบ RC เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำการวัดข้อมูลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดข้อมูลทั้งหมด 128 ตัวอย่างในแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5-16 ถึงรูปที่ 5-21



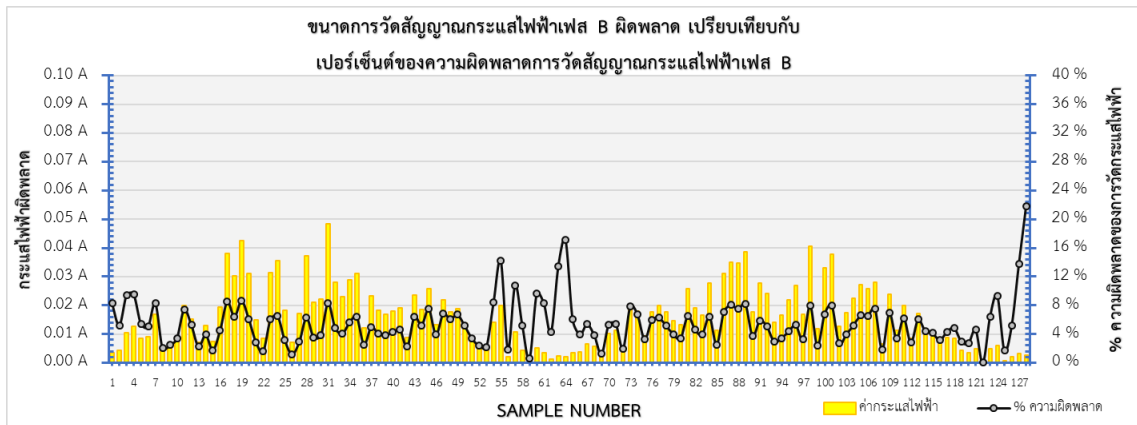
รูปที่ 5-16 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RC



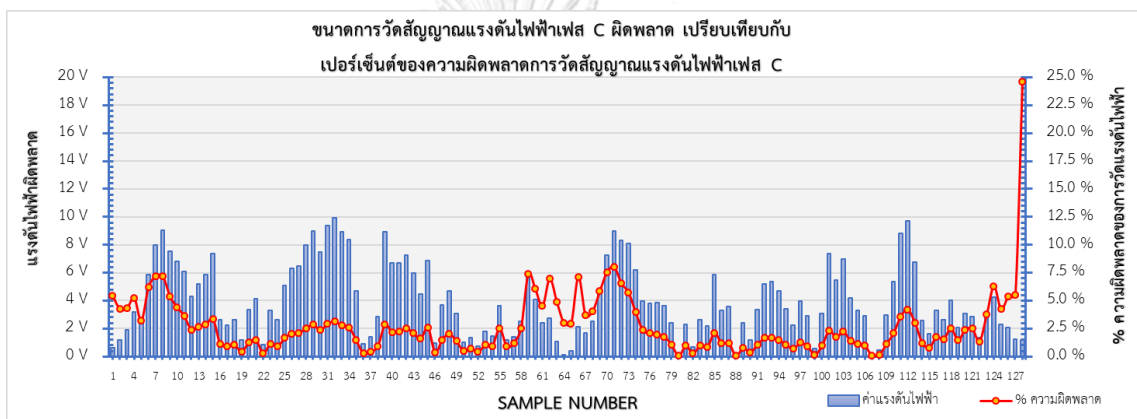
รูปที่ 5-17 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส A โหลดแบบ RC



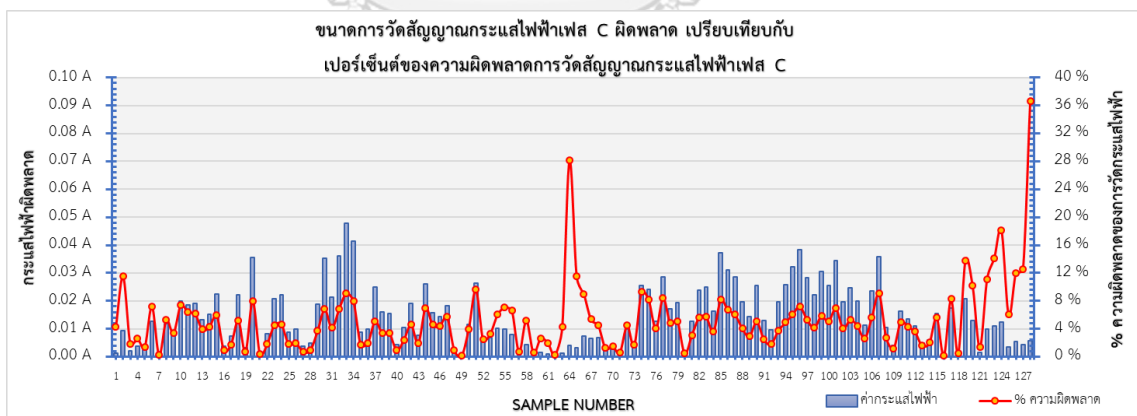
รูปที่ 5-18 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RC



รูปที่ 5-19 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส B โหลดแบบ RC



รูปที่ 5-20 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RC



รูปที่ 5-21 การเปรียบเทียบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าเฟส C โหลดแบบ RC

การเปรียบเทียบค่าขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยของการวัดและบันทึกข้อมูลกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดการบันทึกข้อมูล ตามสภาวะการใช้งานจริงกรณีโหลดแบบ RC เพื่อแสดงความแม่นยำการวัดและบันทึกข้อมูลตามอัตราสุ่มต่อรูปคลื่นของอุปกรณ์ประกอบมีเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5-12

ตารางที่ 5-12 การแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการวัดข้อมูลกรณีโหลดแบบ RC

$error_{Avg}$	ขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยของการบันทึกข้อมูลทั้งหมด 128 ตัวอย่าง					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	6.813	4.833	3.963	0.0160	0.0160	0.0142
$\sigma_{error}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดการบันทึกข้อมูล 128 ตัวอย่าง ต่อ 1 รูปคลื่น					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	4.905	3.552	2.575	0.0108	0.0107	0.0107

#### 5.1.4 อภิปรายผลการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลกรณีโหลดแบบต่างๆ

การทดสอบนี้ เพื่อทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลให้เหมือนการใช้งานจริงที่อาจเกิดขึ้นกรณีนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ไปติดตั้งกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ตามกรณีโหลดที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟ โดยกรณีโหลดแต่ละชนิดสามารถแสดงประเภทการใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทได้ดังนี้

**กรณีโหลดแบบ R** ใช้แสดงประเภทการใช้ไฟฟ้า แบบบ้านเรือนทั่วไป

**กรณีโหลดแบบ RL** ใช้แสดงประเภทการใช้ไฟฟ้า แบบอาคารพาณิชย์ ตึก หรือ โรงงานที่มีการใช้เครื่องจักรต่างๆ

**กรณีโหลดแบบ RC** ใช้แสดงประเภทการใช้ไฟฟ้า แบบอาคารสูง อาคารสำนักงานที่มีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก

จากการทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูล ค่า  $error_{Avg}$  อยู่ในช่วง (3-8 V) ของแรงดันไฟฟ้า และ  $error_{Avg}$  อยู่ในช่วง (0.01-0.02 A) ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งพบว่าในกรณีโหลดแบบต่างๆ นั้น มีค่าขนาดความผิดพลาดเฉลี่ยการบันทึกข้อมูลใกล้เคียงกันทุกกรณี การวัดที่กรณีโหลดแบบต่างๆ ไม่ส่งผลต่อความแม่นยำ ซึ่งขนาดความผิดพลาดนั้นเกิดจากความสามารถของตัวอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการวัดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล ( $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ) ทั้ง 3 เฟส ในกรณีโหลดแบบต่างๆนั้น พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในช่วง (0.04-2.3%) ดังที่แสดงในท้ายตารางที่ 5-1, 5-2, 5-5, 5-6, 5-9, 5-10 สามารถยอมรับค่านี้ได้ เนื่องจากเกณฑ์พื้นฐานของเครื่องวัดนั้น ต้องมีความแม่นยำในการวัดเป็นไปตามข้อกำหนดเบื้องต้นของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยข้อกำหนดเบื้องต้นนั้น ได้เปรียบเทียบระดับความแม่นยำของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ใน

การเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้า ดังตารางที่ 5-13 และการแบ่งระดับความแม่นยำในการวัด ดังนี้

1. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับสูงมาก Class 0.1 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 0.1%)
2. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับสูง Class 2.5 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 2.5%)
3. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับดี Class 5 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 5%)
4. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับพอใช้ Class 10 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 10%)

ตารางที่ 5-13 การเปรียบเทียบระดับความแม่นยำของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในการเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้า

	ความสามารถ	ระดับความแม่นยำ
EDMI Mk10E	<ul style="list-style-type: none"> <li>- แรงดันและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส</li> <li>- กำลังไฟฟ้าจริง (P)</li> <li>- กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q)</li> <li>- กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)</li> <li>- ตัวประกอบกำลัง (P.F.)</li> </ul>	<b>Class 0.5S and Class 1 ตามมาตรฐาน</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 62052-11, 62053-21, *62052-31, 62053-22, 62053-23, *62053-24</li> <li>• AS 62052.11, 62053.21, 62053.22, 62053.23</li> <li>• NMI M6</li> </ul>
ELSTER A1800	<ul style="list-style-type: none"> <li>- แรงดันและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส</li> <li>- กำลังไฟฟ้าจริง (P)</li> <li>- กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q)</li> <li>- กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)</li> </ul>	<b>Class 0.2 %, 0.5 %, and 1.0 %</b> <b>ตามมาตรฐาน IEC 62053</b>
อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- แรงดันและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส</li> <li>- กำลังไฟฟ้าจริง (P)</li> <li>- กำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q)</li> <li>- กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)</li> <li>- ตัวประกอบกำลัง (P.F.)</li> </ul>	<b>เทียบเท่า Class 2.5</b>

โดยอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ มีความคลาดเคลื่อนจากการวัดไม่เกิน 2.3% (Class 2.5) ซึ่งเมื่อเทียบแล้วอยู่ในระดับความแม่นยำสูง ซึ่งมากกว่าเกณฑ์พื้นฐานของเครื่องวัดที่ต้องมีค่าความแม่นยำมากกว่า 90% (%Accuracy > 90%) ตามข้อกำหนดเบื้องต้นของสถาบันมาตรฐานวิทยาแห่งชาติ [28], ซึ่งอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลไม่น้อยกว่า 97.5% (%Accuracy ≥ 97.5%)


## 5.2 การทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

จุดประสงค์ในการทดสอบนี้ เพื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า จากข้อมูลที่บันทึกได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256plus) [29], ในฟังก์ชันการสร้างสัญญาณไฟฟ้าได้ตามกำหนดหลายความถี่ และมีความสามารถในด้านอื่นๆ ได้แก่ การวัดและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในหลายๆด้าน การใช้เป็นเครื่องมืออ้างอิงในการตรวจรับอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าแบบพกพาอีกด้วย

โดยการทดสอบจะเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากอุปกรณ์ทั้งสอง ในการหาค่าความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า เพื่อสร้างความเชื่อมั่นว่าการวัดและเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์มีความถูกต้องแม่นยำตามสัญญาณไฟฟ้าต้นแบบ สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกถูกต้องต่อไป ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องทดสอบไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปที่ 5-22

**CMC 256plus: 6 Phase Current + 4 Phase Voltage Test Set and Universal Calibrator**

<p><b>Protection Relay Test Set</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerical relays</li> <li>• Static relays</li> <li>• IEC 61850 IEDs (GOOSE and Sampled Values)</li> <li>• Electromechanical relays (high burden relays / single phase)</li> <li>• Relay panels</li> <li>• End-to-End testing with GPS or IRIG-B</li> <li>• Busbar protection (up to 22 signal generators)</li> <li>• Wide area protection</li> </ul> <p><b>Power System Simulator</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transient fault simulation</li> <li>• Power swing</li> <li>• CT saturation simulation</li> <li>• CB simulation</li> <li>• Rogowski coil simulation</li> <li>• Compensated network</li> <li>• Transient playback (COMTRADE, PL4 (EMTP), ...)</li> </ul> <p><b>Substation Commissioning</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Checking SCADA annunciations</li> <li>• Burden measurement</li> <li>• CT/VT polarity checker</li> <li>• Wiring checker</li> <li>• Event recording<sup>1</sup></li> </ul> <p><b>Programmable Voltage and Current Source</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Research &amp; development</li> <li>• Production quality assurance</li> </ul>	<p><b>Universal Calibrator</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energy meters, 4 quadrants, class 0.2</li> <li>• Transducers</li> <li>• Power quality measurement devices according to IEC 61000</li> <li>• Phasor Measurement Units (PMU)</li> <li>• SCADA measuring equipment</li> <li>• Protection relays</li> <li>• Transient recorders (incl. time stamp accuracy)</li> <li>• Any measuring equipment for V, I, f, S, P, Q, ...</li> </ul> <p><b>Portable 10-Channel Measurement Device<sup>1</sup></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transient recording (trigger: binary, PQ, GPS)</li> <li>• Multimeter for: I, V, f, S, P, Q, cos φ ...</li> <li>• Trend recording for: I, V, f, S, P, Q</li> <li>• Harmonics analysis</li> </ul>
--	---



รูปที่ 5-22 คุณสมบัติของเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256plus)

### ขั้นตอนการทดสอบ

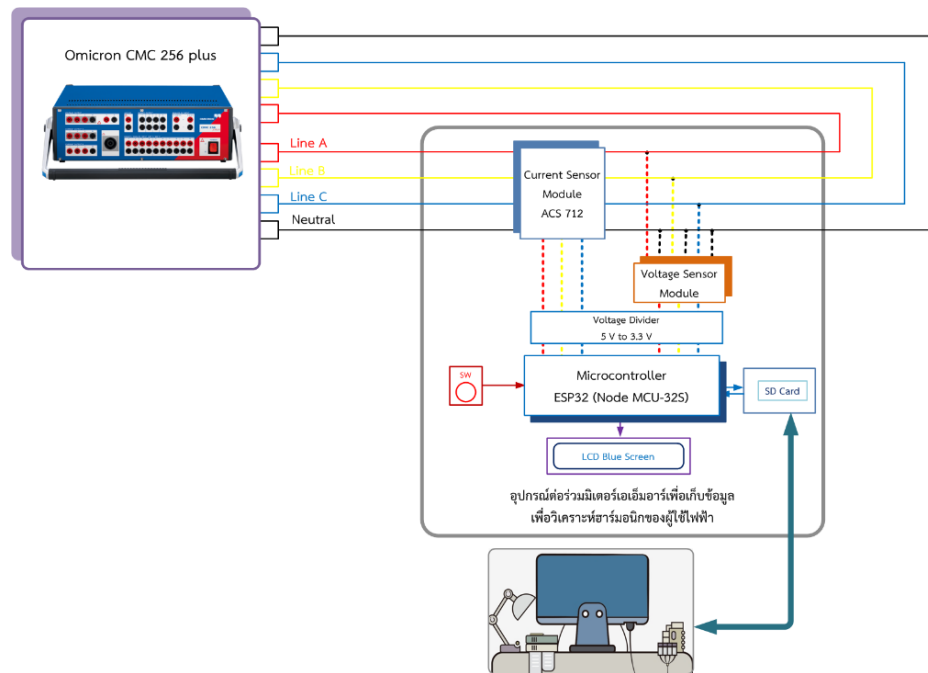
1. สร้างเงื่อนไขสำหรับการทดสอบขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-23 และรูปที่ 5-24
2. สร้างสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าจำลองที่มีขนาดตามลำดับฮาร์มอนิกต่างๆที่แตกต่างกันตามกำหนด หรือกำหนดสัญญาณขาเข้าอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดสอบ
3. บันทึกค่าขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามลำดับฮาร์มอนิกต่างๆที่แตกต่างกันตามกำหนดตามเงื่อนไขการทดสอบ รวมถึงค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวมจากเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256plus)
4. นำข้อมูลค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้ตามอัตราสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่นนำไปวิเคราะห์ขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามลำดับฮาร์มอนิกต่างๆที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว
5. เปรียบเทียบผลค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ขนาดแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามลำดับฮาร์มอนิก และค่า % ความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวมในข้อ 3 และ 4

### เครื่องมือในการทดสอบ

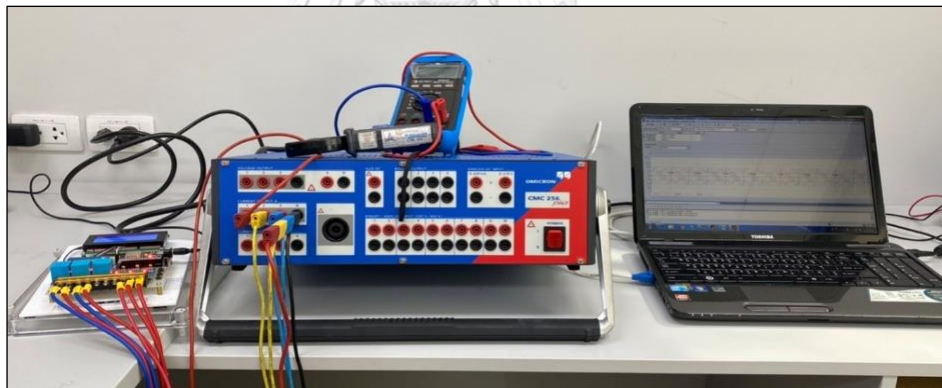
1. อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เพื่อการเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้น
2. เครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256plus)
3. คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม MATLAB สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล



### วงจรการทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก



รูปที่ 5-23 วงจรการทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก



รูปที่ 5-24 การทดสอบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ณ เวลาเดียวกัน ผลการวัดฮาร์มอนิกจากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้านำมาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

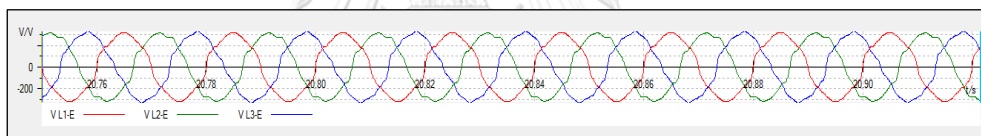
### 5.2.1 การทดสอบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส

การทดสอบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสนั้น เพื่อทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลตามสถานการณ์จริงที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากปัจจุบัน โรงงาน อาคารสำนักงาน มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่เท่ากันทุกเฟส จนทำให้เกิดสถานะโวลต์ไม่สมดุล (Unbalanced Phase) เป็นสาเหตุให้เกิดสถานะฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ในการทดลองจึงจำลองสถานการณ์นี้ขึ้น เพื่อให้เห็นความแม่นยำในการบันทึก และข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

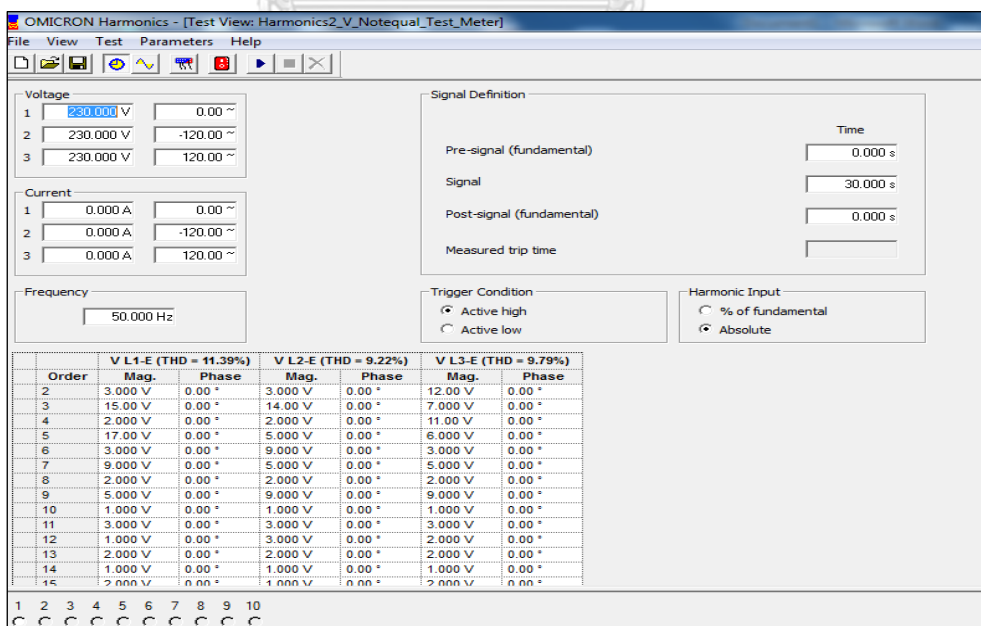
โดยการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก กับการกำหนดฮาร์มอนิกจากเครื่องทดสอบไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงนั้น ในกรณีนี้เปรียบเทียบในลักษณะสัญญาณไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ซึ่งกำหนดสัญญาณไฟฟ้าและฮาร์มอนิก ดังแสดงในรูปที่ 5-25 (1) และรูปที่ 5-25 (2)

รูปที่ 5-25 (1) แสดงรูปสัญญาณไฟฟ้าที่รวมกับฮาร์มอนิกในความถี่ต่างๆ

รูปที่ 5-25 (2) แสดงหน้าจอแสดงผลการกำหนดฮาร์มอนิกรวมในสัญญาณไฟฟ้า



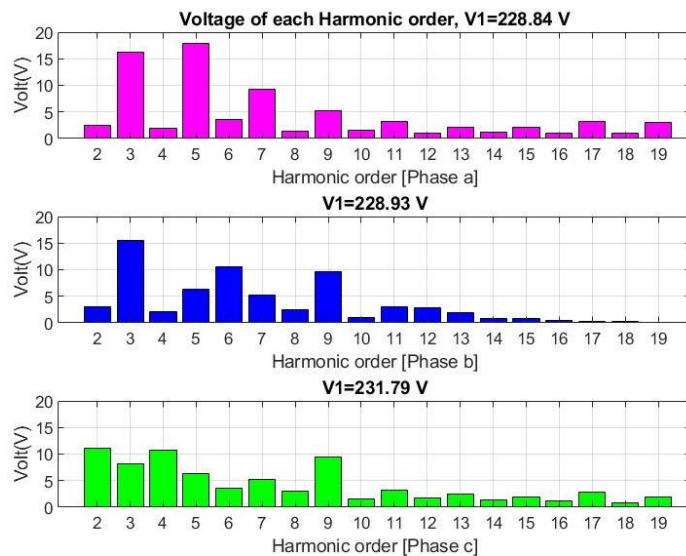
(1)



(2)

รูปที่ 5-25 หน้าจอแสดงผลการกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกจากเครื่องทดสอบไฟฟ้า

การแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ในกรณีที่สร้างฮาร์มอนิกให้กับ สัญญาณไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส โดยนำข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้ตามอัตราสุ่มข้อมูล ต่อรูปคลื่นของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์มาแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน FFT ผ่านโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-26



รูปที่ 5-26 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub>) นั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-9) และ (3-10) โดยแสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^N V_h^2}}{V_1} \times 100 = \left[ \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{19}^2}}{V_1} \right] \times 100 = 11.39\%$$

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 = \left[ \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{19}^2}}{I_1} \right] \times 100 = 84.85\%$$

การทดสอบเพื่อการเปรียบเทียบขนาดฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ ในกรณีที่สร้างฮาร์มอนิกให้กับสัญญาณไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามกำหนด เพื่อเปรียบเทียบค่าการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก, ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ %THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub> ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากข้อมูลอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ โดยเปรียบเทียบตามเงื่อนไขการทดสอบจากเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256 plus) ที่ใช้ในการอ้างอิง โดยการเปรียบเทียบค่าการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ค่าขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก แสดงดังตารางที่ 5-14 และตารางที่ 5-16

ตารางที่ 5-14 การเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า ไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส

ลำดับ ฮาร์มอนิก	ค่าแรงดันที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่กำหนดจากเครื่อง Omicron (Volt)			ค่าแรงดันที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่วัดได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ที่พัฒนาขึ้น (Volt)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	230.00	230.00	230.00	231.69	227.73	228.55
2	3.00	3.00	12.00	2.75	3.11	12.57
3	15.00	14.00	7.00	15.52	14.26	7.22
4	2.00	2.00	11.00	2.19	2.18	10.76
5	17.00	5.00	6.00	17.59	5.27	6.25
6	3.00	9.00	3.00	3.50	9.11	3.32
7	9.00	5.00	5.00	9.29	5.22	5.21
8	2.00	2.00	2.00	1.74	2.26	2.34
9	5.00	9.00	9.00	5.27	9.28	9.30
10	1.00	1.00	1.00	1.20	0.98	1.21
11	3.00	3.00	3.00	3.30	3.04	3.25
12	1.00	3.00	2.00	0.92	2.86	1.79
13	2.00	2.00	2.00	2.12	2.00	2.24
14	1.00	1.00	1.00	1.23	0.91	1.21
15	2.00	1.00	2.00	2.12	0.91	1.92
16	1.00	0.00	1.00	1.10	0.23	1.22
17	3.00	0.00	3.00	3.29	0.14	2.85
18	1.00	0.00	1.00	1.18	0.10	0.92
19	3.00	0.00	2.00	3.21	0.10	2.00
<b>%THD<sub>v</sub></b>	<b>11.39</b>	<b>9.22</b>	<b>9.79</b>	<b>11.74</b>	<b>9.53</b>	<b>10.12</b>
<b>% ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ %THD<sub>v</sub></b>				<b>3.07</b>	<b>3.35</b>	<b>3.39</b>

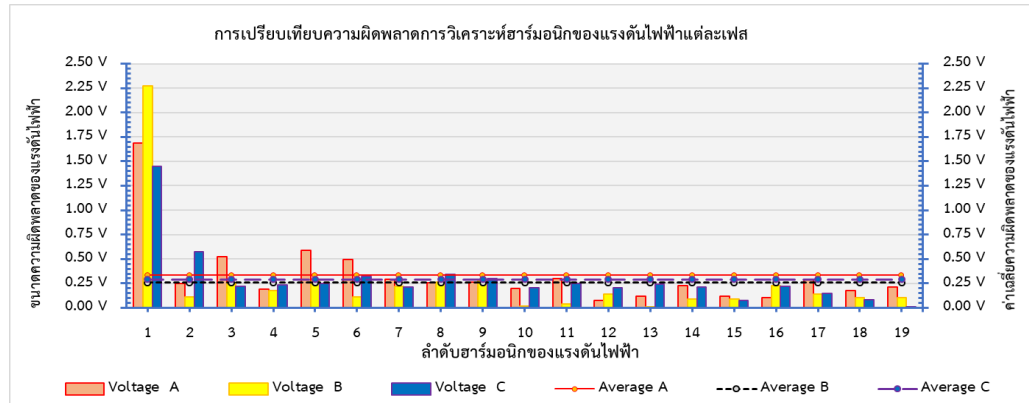
ตารางที่ 5-15 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า  
ไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส

ลำดับ ฮาร์มอนิก	ค่ากระแสที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่กำหนดจากเครื่อง Omicron (Amp)			ค่ากระแสที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่วัดได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ที่พัฒนาขึ้น (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	5.00	5.00	5.00	5.001	5.085	4.956
2	0.00	2.00	2.00	0.017	2.065	2.002
3	3.00	3.00	0.00	2.980	3.123	0.070
4	0.00	0.00	3.00	0.028	0.032	3.020
5	2.00	1.00	0.00	2.001	1.032	0.030
6	0.00	2.00	0.00	0.035	2.054	0.019
7	1.00	1.00	0.00	1.005	1.021	0.012
8	0.00	0.00	1.00	0.026	0.047	0.997
9	2.00	2.00	0.00	1.977	2.084	0.044
10	0.00	0.00	2.00	0.034	0.041	2.017
11	0.00	0.00	0.00	0.010	0.013	0.051
12	0.00	0.00	0.00	0.009	0.007	0.018
13	0.00	0.00	0.00	0.010	0.030	0.028
14	0.00	0.00	0.00	0.010	0.020	0.021
15	0.00	0.00	0.00	0.007	0.009	0.014
16	0.00	0.00	0.00	0.009	0.018	0.014
17	0.00	0.00	0.00	0.012	0.018	0.015
18	0.00	0.00	0.00	0.000	0.008	0.012
19	0.00	0.00	0.00	0.009	0.007	0.011
<b>%THD<sub>i</sub></b>	<b>84.85</b>	<b>95.92</b>	<b>84.85</b>	<b>86.08</b>	<b>97.73</b>	<b>84.38</b>
<b>% ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ %THD<sub>i</sub></b>				<b>0.56</b>	<b>1.89</b>	<b>1.45</b>

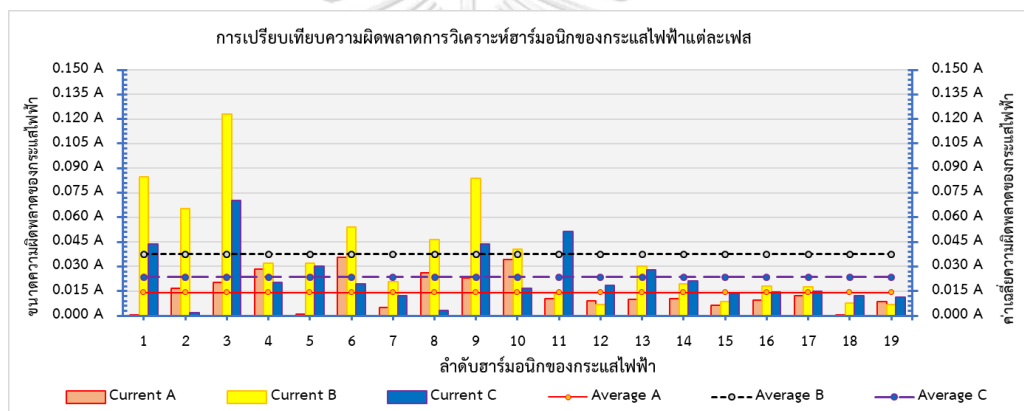
#### การเปรียบเทียบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์กับการใช้ฟังก์ชันในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าเพื่อกำหนดฮาร์มอนิกรูปแบบต่างๆ จากเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256plus) นั้น การเปรียบเทียบขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากข้อมูล

อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ในกรณีนี้เปรียบเทียบในลักษณะการกำหนดฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 5-27 และรูปที่ 5-28



รูปที่ 5-27 การเปรียบเทียบความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5-28 การเปรียบเทียบความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 5-16 ผลการวิเคราะห์ค่าคุณภาพไฟฟ้า ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส

Indices	Phase A	Phase B	Phase C
$THD_V$ (%)	11.74	9.53	10.12
$THD_I$ (%)	84.38	97.73	86.08
$PF_{disp}$	0.81	0.768	0.77
$PF_{dist}$	0.76	0.71	0.75
$P.F.$	0.615	0.545	0.578
$P$ (W)	947.34	884.33	914.42
$Q$ (var)	1,213.25	1,357.93	1,236.64
$S$ (VA)	1,539.3	1,620.5	1,538

จากการพิจารณาเปรียบเทียบพบว่า ขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในกรณีที่สร้างฮาร์มอนิกให้กับสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-27 และรูปที่ 5-28 นั้น อาจไม่เพียงพอต่อความเชื่อมั่นในตัวข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ เนื่องจากการวิเคราะห์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกนั้น ต้องพิจารณาการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า %THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub> ด้วย และการพิจารณาในส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ( $\sigma_{error_H}$ ) ตามหลักการทางสถิติและความน่าจะเป็น รวมถึงการกระจายตัวของข้อมูลขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเพิ่มเติม ดังแสดงตารางที่ 5-17 เนื่องจากข้อมูลทั้งคู่ช่วยบ่งบอกถึงการกระจายตัวของขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก จึงสามารถช่วยยืนยันความแม่นยำในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก โดยที่ใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ได้

ตารางที่ 5-17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า %THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub> และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

%error <sub>%THD</sub>	% ความผิดพลาดของ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดฮาร์มอนิกรวม ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า					
	แรงดันไฟฟ้า			กระแสไฟฟ้า		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	3.07 %	3.35 %	3.39 %	0.556 %	1.888 %	1.449 %
$\sigma_{error_H}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาด จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	0.36	0.49	0.30	0.011	0.032	0.017

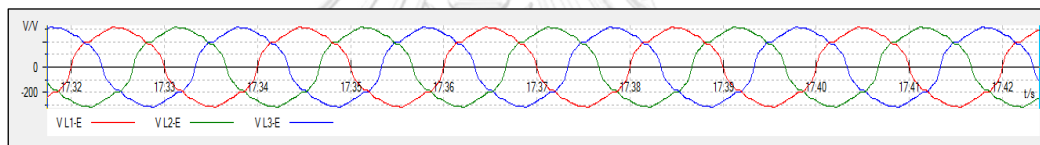
## 5.2.2 การทดสอบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและกระแสไฟฟ้า เท่ากันทั้ง 3 เฟส

การทดสอบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟสนั้น เพื่อทดสอบความแม่นยำในการบันทึกข้อมูลในกรณีการออกแบบระบบไฟฟ้าที่ดี การวางอุปกรณ์ไฟฟ้าเท่ากันทุกเฟส ในสภาวะโหลดสมดุล (Balanced Phase) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานทำให้เกิดสภาวะฮาร์มอนิกแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส การทดสอบจึงจำลองสถานการณ์นี้ขึ้น เพื่อให้เห็นความแม่นยำในการบันทึกและข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

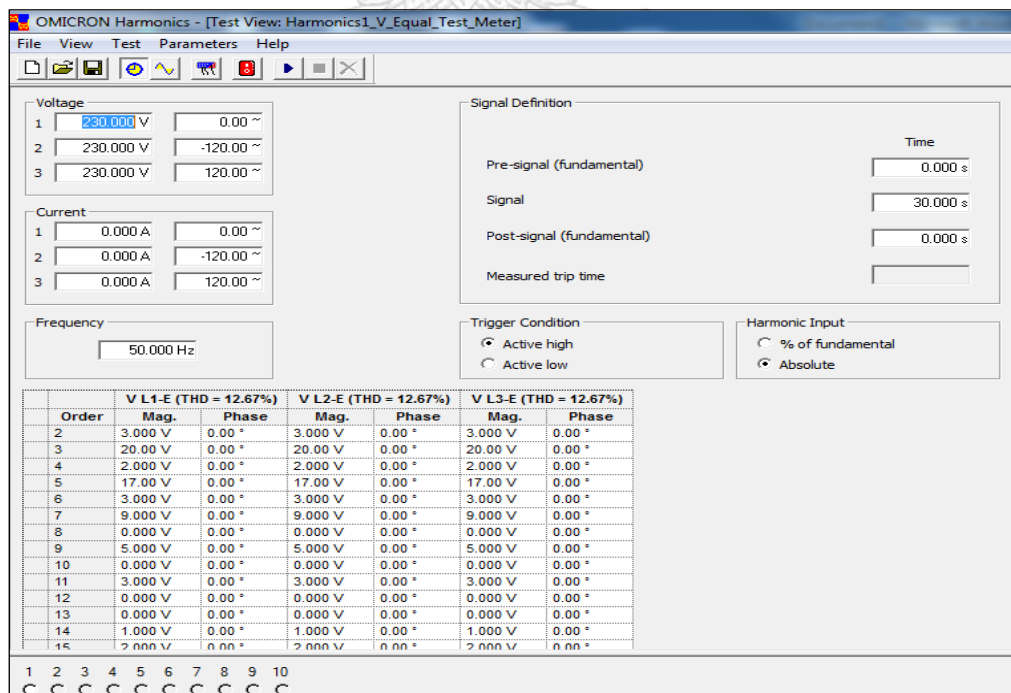
โดยการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก กับการกำหนดฮาร์มอนิกจากเครื่องทดสอบไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงนั้น ในกรณีนี้เปรียบเทียบในลักษณะสัญญาณไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส ซึ่งกำหนดสัญญาณไฟฟ้าและฮาร์มอนิก ดังแสดงในรูปที่ 5-29 (1) และรูปที่ 5-29 (2)

รูปที่ 5-29 (1) แสดงรูปสัญญาณไฟฟ้าที่รวมกับฮาร์มอนิกในความถี่ต่างๆ

รูปที่ 5-29 (2) แสดงหน้าจอแสดงผลการกำหนดฮาร์มอนิกรวมในสัญญาณไฟฟ้า



(1)

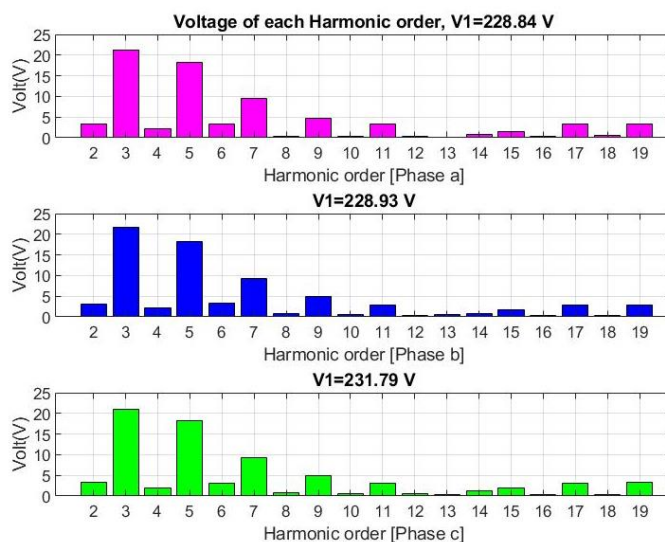


(2)

รูปที่ 5-29 หน้าจอแสดงผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกจากเครื่องทดสอบไฟฟ้า



การแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ในกรณีที่สร้างฮาร์มอนิกให้กับ สัญญาณไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส โดยนำข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้ตามอัตราสุ่มข้อมูล ต่อรูปคลื่นของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์มาแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน FFT ผ่านโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5-30



รูปที่ 5-30 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

การทดสอบเพื่อการเปรียบเทียบค่าการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก, ขนาดความผิดพลาดการ วิเคราะห์ฮาร์มอนิก และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ จาก กรณีที่สร้างฮาร์มอนิกให้กับสัญญาณไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าตามกำหนด ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 5-18 และตารางที่ 5-19

ตารางที่ 5-18 การเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า  
เท่ากันทั้ง 3 เฟส

ลำดับ ฮาร์มอนิก	ค่าแรงดันที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่กำหนดจากเครื่อง Omicron (Volt)			ค่าแรงดันที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่วัดได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ที่พัฒนาขึ้น (Volt)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	230.00	230.00	230.00	228.44	228.93	229.79
2	3.00	3.00	3.00	3.10	3.16	3.23
3	20.00	20.00	20.00	20.61	20.74	20.82
4	2.00	2.00	2.00	2.17	2.12	1.98
5	17.00	17.00	17.00	17.22	17.27	17.32
6	3.00	3.00	3.00	3.30	3.43	3.32
7	9.00	9.00	9.00	9.28	9.31	9.30
8	0.00	0.00	0.00	0.27	0.19	0.22
9	5.00	5.00	5.00	4.74	5.04	5.02
10	0.00	0.00	0.00	0.22	0.19	0.27
11	3.00	3.00	3.00	3.34	2.94	3.27
12	0.00	0.00	0.00	0.25	0.26	0.49
13	0.00	0.00	0.00	0.04	0.12	0.24
14	1.00	1.00	1.00	0.91	0.89	1.01
15	2.00	2.00	2.00	1.76	1.77	1.86
16	0.00	0.00	0.00	0.21	0.25	0.21
17	3.00	3.00	3.00	3.29	2.91	3.05
18	0.00	0.00	0.00	0.12	0.14	0.16
19	3.00	3.00	3.00	3.10	2.78	3.30
<b>%THD<sub>v</sub></b>	<b>12.67</b>	<b>12.67</b>	<b>12.67</b>	<b>13.07</b>	<b>13.07</b>	<b>13.10</b>
<b>% ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ %THD<sub>v</sub></b>				<b>3.14</b>	<b>3.20</b>	<b>3.42</b>

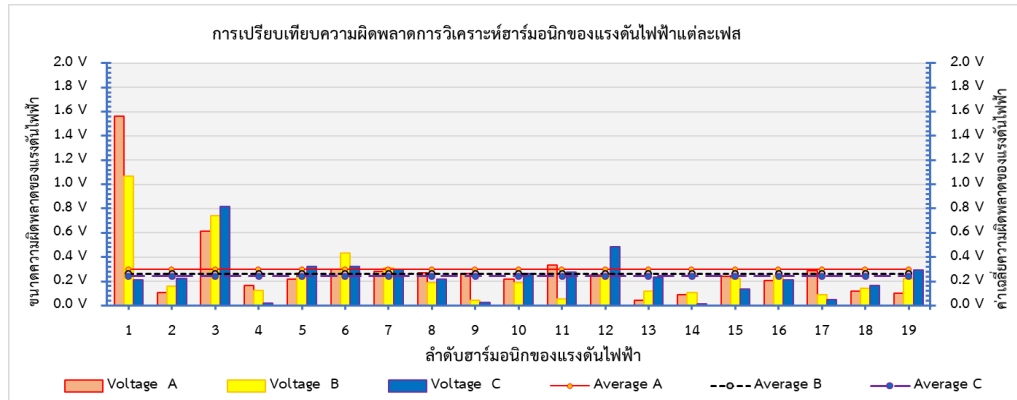
ตารางที่ 5-19 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ กรณีสร้างฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า  
เท่ากันทั้ง 3 เฟส

ลำดับ ฮาร์มอนิก	ค่ากระแสที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่กำหนดจากเครื่อง Omicron (Amp)			ค่ากระแสที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ ที่วัดได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ที่พัฒนาขึ้น (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1	5.00	5.00	5.00	4.942	5.060	4.993
2	0.00	0.00	0.00	0.004	0.014	0.024
3	1.00	1.00	1.00	1.010	1.037	0.985
4	1.00	1.00	1.00	0.973	1.024	1.011
5	2.00	2.00	2.00	1.980	2.037	2.008
6	1.00	1.00	1.00	1.036	1.026	0.981
7	1.00	1.00	1.00	1.002	1.006	0.990
8	0.00	0.00	0.00	0.015	0.030	0.021
9	1.00	1.00	1.00	1.041	1.023	0.983
10	0.00	0.00	0.00	0.022	0.012	0.018
11	0.00	0.00	0.00	0.013	0.004	0.006
12	0.00	0.00	0.00	0.009	0.006	0.012
13	0.00	0.00	0.00	0.005	0.013	0.002
14	0.00	0.00	0.00	0.026	0.022	0.019
15	1.00	1.00	1.00	0.998	1.035	0.993
16	1.00	1.00	1.00	1.015	0.985	0.971
17	0.00	0.00	0.00	0.055	0.024	0.025
18	0.00	0.00	0.00	0.030	0.010	0.013
19	0.00	0.00	0.00	0.022	0.008	0.005
<b>%THD<sub>i</sub></b>	<b>66.33</b>	<b>66.33</b>	<b>66.33</b>	<b>67.35</b>	<b>66.81</b>	<b>66.01</b>
<b>% ความผิดพลาดของการวิเคราะห์ %THD<sub>i</sub></b>				<b>1.53</b>	<b>0.72</b>	<b>0.49</b>

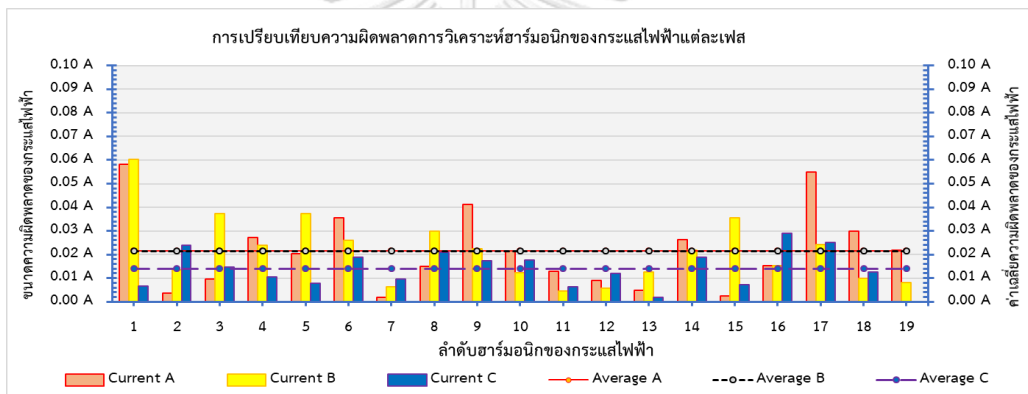
#### การเปรียบเทียบความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์กับการใช้ฟังก์ชันในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าเพื่อกำหนดฮาร์มอนิกในรูปแบบต่างๆ จากเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Omicron CMC 256plus) นั้น จะเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ประกอบ

มิเตอร์ในกรณีนี้เปรียบเทียบในลักษณะกำหนดฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 5-31 และรูปที่ 5-32



รูปที่ 5-31 การเปรียบเทียบข้อมูลความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5-32 การเปรียบเทียบข้อมูลความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 5-20 ผลการวิเคราะห์ค่าคุณภาพไฟฟ้า ในกรณีสร้างฮาร์มอนิกให้กับแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส

Indices	Phase A	Phase B	Phase C
$THD_V(\%)$	13.07	13.07	13.10
$THD_I(\%)$	67.35	66.81	66.01
$PF_{disp}$	0.80	0.82	0.81
$PF_{dist}$	0.82	0.82	0.83
$P.F.$	0.656	0.671	0.672
$P (W)$	932.07	940.76	937.65
$Q (var)$	1,058.66	1,030.45	1,048.49
$S (VA)$	1,410.50	1,395.30	1,406.60

การพิจารณาในกรณีที่สร้างฮาร์มอนิกให้กับสัญญาณไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 3 เฟส ของแรงดัน และกระแสไฟฟ้านั้น ได้เพิ่มเติมการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ %THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub> กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ( $\sigma_{error_H}$ ) ของการกระจายตัวของข้อมูลขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเพิ่มเติม เพื่อช่วยยืนยันความแม่นยำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ได้เพิ่มเติม ดังแสดงตามตารางที่ 5-21

ตารางที่ 5-21 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า %THD<sub>v</sub>, %THD<sub>i</sub> และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ลำดับฮาร์มอนิก

%error <sub>%THD</sub>	% ความผิดพลาดของ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดฮาร์มอนิกรวม ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า					
	แรงดันไฟฟ้า			กระแสไฟฟ้า		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	3.14 %	3.20 %	3.42 %	1.53 %	0.72 %	0.49 %
$\sigma_{error_H}$	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาด จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก					
	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			กระแสไฟฟ้า (Amp)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
	0.33	0.25	0.19	0.017	0.014	0.008

### 5.2.3 อภิปรายผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากการสร้างฮาร์มอนิกตามกรณีต่างๆ

การทดสอบความแม่นยำของการบันทึกข้อมูลแล้วนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ตามสภาวะการใช้งานจริงทั้งสภาวะโหลดสมดุล และสภาวะโหลดไม่สมดุล ที่อาจเกิดขึ้นกรณีนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ไปติดตั้งร่วมกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ของผู้ใช้ไฟ ในการทดสอบความแม่นยำของข้อมูลที้นำไปวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกนั้น พบค่า %error ของค่า %THD (%error<sub>%THD</sub>) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง (0.5% - 3.5%) ทั้ง 3 เฟส ดังที่แสดงในตารางที่ 5-15, 5-18 ซึ่งสามารถยอมรับค่าความผิดพลาดนี้ได้เนื่องจากเกณฑ์พื้นฐานของเครื่องวัดนั้น ต้องมีความแม่นยำในการวัดเป็นไปตามข้อกำหนดเบื้องต้นของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ [28], โดยข้อกำหนดเบื้องต้นนั้นสำหรับเปรียบเทียบระดับความแม่นยำในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยข้อมูลจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ดังตารางที่ 5-22 และการแบ่งระดับความแม่นยำในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ดังนี้

1. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับสูงมาก Class 0.2 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 0.2%)
2. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับสูง Class 2.5 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 2.5%)
3. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับดี Class 5 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 5%)
4. เครื่องวัดมีความแม่นยำระดับพอใช้ Class 10 (ความคลาดเคลื่อนจากการวัด 10%)

ตารางที่ 5-22 การเปรียบเทียบระดับความแม่นยำในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยข้อมูลจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

	ความสามารถ	ระดับความแม่นยำ
EDMI Mk10E	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %THD<sub>v</sub></li> <li>- %THD<sub>i</sub></li> </ul>	<p><b>Class 0.5S and Class 1 ตามมาตรฐาน</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 62052-11, 62053-21, *62052-31, 62053-22, 62053-23, *62053-24</li> <li>• AS 62052.11, 62053.21, 62053.22, 62053.23</li> <li>• NMI M6</li> </ul>
ELSTER A1800	ไม่สามารถวัดได้	-
อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %THD<sub>v</sub></li> <li>- %THD<sub>i</sub></li> <li>- V<sub>H</sub> ลำดับที่ 1 ถึง 19</li> <li>- I<sub>H</sub> ลำดับที่ 1 ถึง 19</li> </ul>	เทียบเท่า Class 5

โดยอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในวิทยานิพนธ์ เมื่อนำข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพบว่า มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 3.5% (Class 5) ซึ่งเมื่อเทียบกับเกณฑ์พื้นฐานของเครื่องวัดแล้วอยู่ในระดับความแม่นยำดี ตามเกณฑ์พื้นฐานที่ความแม่นยำต้องมากกว่า 90% (%Accuracy > 90%) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ( $\sigma_{error_H}$ ) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าประมาณใกล้เคียงกัน คือ  $\sigma_{error_H} \approx \bar{X}_{error_H}$  โดยค่า  $\bar{X}_{error_H} = error_{H_{Avg}}$  ดังแสดงในรูปที่ 5-27, 5-28, 5-31, 5-32 โดยสามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 5-23 ดังนี้

ตารางที่ 5-23 เปรียบเทียบค่าขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

		แรงดันฮาร์มอนิก (Volt)			กระแสฮาร์มอนิก (Amp)		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
สถานะ โหลดไม่สมดุล	$error_{H_{Avg}}$	0.34	0.26	0.29	0.014	0.037 A	0.024
	$\sigma_{error_H}$	0.36	0.49	0.30	0.011	0.032 A	0.017
สถานะ โหลดสมดุล	$error_{H_{Avg}}$	0.30	0.26	0.24	0.022	0.021	0.014
	$\sigma_{error_H}$	0.33	0.25	0.19	0.017	0.014	0.008

จากตารางที่ 5-23 พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกนั้นอยู่ในระดับต่ำ [28], เนื่องจากค่า  $\sigma_{error_H}$  มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ( $error_{H_{Avg}}$ ) แสดงว่าข้อมูลที่บันทึกได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์มีความแม่นยำสูง เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้วิเคราะห์ฮาร์มอนิกจึงมีความใกล้เคียงกัน ทำให้กล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้นมีความแม่นยำมากพอที่จะนำไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าต่างๆ ในระบบไฟฟ้าได้

ซึ่งสรุปได้ว่าอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำมาใช้วัดและบันทึกข้อมูลตามกรณีสถานะโหลดแบบต่างๆ โดยมีความแม่นยำของการวัดและการบันทึกข้อมูลเทียบเท่ากับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ในเชิงพาณิชย์

### 5.3 การทดสอบความคงทนของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในสถานะแรงดันเกินชั่วคราว

จุดประสงค์ในการทดสอบความคงทนของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในสถานะแรงดันเกินชั่วคราว เพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดในช่วงสถานะแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) [30], ซึ่งเป็นแรงดันเกินที่มีช่วงเวลาก่อเกิดคงอยู่นานกว่าในระดับวินาที จนถึง ระดับนาที่ เกิดจากการปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบกะทันหัน เช่น กรณีที่มีการปลด-สับ อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ กรณีแรงดันเกินชั่วคราวจากสภาวะรีโซแนนซ์ และกรณีเกิดความผิดพลาดของลงดินแบบไม่สมดุล ทำให้แรงดันไฟฟ้าเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีแรงดันเกินเท่ากับแรงดันเฟสถึงเฟส ( $V_{LL}$ ) จึงเป็นเหตุให้อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เกิดความเสียหายได้

### 5.3.1 คุณสมบัติความคงทนของมอดูลที่ใช้ในการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า

คุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Dielectric) ของมอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor Module) และ มอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Current Sensor Module) ตามคุณสมบัติของผู้ผลิตที่ได้กำหนดความคงทนของมอดูลต่อสภาวะแรงดันเกินชั่วคราว มีดังนี้

คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าและความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราว ของมอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor Module) ตามที่ผู้ผลิตกำหนดนั้น [31], ดังรูปที่ 5-33

Electrical Specification	
Primary Current	2mA
Secondary Current	2mA
Turns Ratio	1000:1000
Phase Angle Error	$\leq 20'$ (50 $\Omega$ )
Current Range	0 ~ 3mA
Linearity	0.1%
Accuracy Class	0.2
Rated Burden	$\leq 200 \Omega$
Frequency Range	50 ~ 60Hz
Dielectric Level	3000VAC/min
DC Resistance at 20°C	110 $\Omega$

รูปที่ 5-33 คุณสมบัติของมอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตามการกำหนดของผู้ผลิต

คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าและความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราว ของมอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Current Sensor Module) ตามที่ผู้ผลิตกำหนดนั้น [32], ดังรูปที่ 5-33

ISOLATION CHARACTERISTICS				
Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Unit
Dielectric Strength Test Voltage*	$V_{ISO}$	Agency type-tested for 60 seconds per UL standard 60950-1, 1st Edition	2100	VAC
Working Voltage for Basic Isolation	$V_{WFSI}$	For basic (single) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	354	VDC or $V_{pk}$
Working Voltage for Reinforced Isolation	$V_{WRFI}$	For reinforced (double) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	184	VDC or $V_{pk}$

\* Allegro does not conduct 60-second testing. It is done only during the UL certification process.

Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001

รูปที่ 5-34 คุณสมบัติของมอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้าตามการกำหนดของผู้ผลิต

### 5.3.2 การทดสอบจ่ายแรงดันเกินชั่วคราวให้กับอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

จุดประสงค์ในการทดสอบจ่ายแรงดันเกินชั่วคราวให้กับอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้น จะทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Voltage Test) [30], เป็นการทดสอบเพื่อดูวัสดุฉนวน หรือการเป็นฉนวนของอุปกรณ์สามารถทนต่อแรงดันเกินได้หรือไม่ สามารถทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำด้วยระยะเวลาไม่เกินนาที ซึ่งเป็นการเลียนแบบแรงดันที่เกิดจาก



การเปลี่ยนอย่างฉับพลันในระบบไฟฟ้าต่างๆ โดยผลการทดสอบจ่ายแรงดันเกินชั่วคราวให้กับอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้น ดังตารางที่ 5-24

ตารางที่ 5-24 การทดสอบจ่ายแรงดันเกินชั่วคราวให้กับอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์

อุปกรณ์สำหรับทดสอบ จำนวน 5 ครั้ง	ระดับการทดสอบ	
	มอดูลวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage Sensor Module)	0.6 kV (1.5 pu.) ผ่าน
มอดูลวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Current Sensor Module)	30 A (1.5 pu.) ผ่าน	50 A (2.5 pu.) ผ่าน

### 5.3.3 แนวทางการป้องกันอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในสภาวะแรงดันเกินชั่วคราว

การป้องกันอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ในสภาวะแรงดันเกินชั่วคราวนั้นมีความจำเป็นต่ออุปกรณ์ประกอบมิเตอร์อย่างมาก เนื่องจากสภาวะแรงดันเกินชั่วคราวในระบบไฟฟ้า อาจเกิดได้ด้วยหลายปัจจัยดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งเมื่อเกิดสภาวะแรงดันเกินชั่วคราวที่แรงดันเกินคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าของมอดูลวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดความเสียหายได้

เนื่องจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับสภาวะแรงดันเกินชั่วคราวที่มีขนาดแรงดันสูงกว่าขนาดพิกัดเกิน 5 เท่าและระยะเวลาสั้นกว่าหนึ่งนาทีก ทำให้ในการพัฒนาต่อไปจำเป็นต้องมีอุปกรณ์หรือมอดูลป้องกันแรงดันเกินแรงดันกระชาก เพิ่มเข้าไปในอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ด้วยเพื่อป้องกันโอกาสเกิดสภาวะแรงดันเกินชั่วคราวที่อาจส่งผลให้อุปกรณ์ประกอบมิเตอร์เสียหายได้

## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ผลการทดสอบความแม่นยำการวัดข้อมูล การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า จากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบ ได้แก่ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าอ้างอิง (Analog Discovery 2) และเครื่องทดสอบไฟฟ้า(Omicron CMC 256plus) โดยผลลัพธ์จากการทดสอบได้อภิปรายผลการทดสอบแต่ละกรณี แต่ละประเภท ครบถ้วนแล้วในบทที่ 5

การสรุปผลการใช้ข้อมูลอัตราส่วนข้อมูลต่อรูปคลื่นที่บันทึกได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ มาวิเคราะห์ฮาร์มอนิกนั้น ต้องพิจารณาถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดสัญญาณ ไฟฟ้าตามอัตราส่วนข้อมูลต่อรูปคลื่น ต้องมีความแม่นยำในการวัดและบันทึกข้อมูล เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกอย่างแม่นยำ มีประสิทธิภาพเชื่อถือได้ ได้แก่ ค่าขนาดฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในแต่ละลำดับ, ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า โดยที่ผลลัพธ์การวิเคราะห์นั้น สามารถใช้อ้างอิงในการประเมินฮาร์มอนิกเบื้องต้นได้ ซึ่งจะนำไปสู่การแก้ปัญหาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า รวมถึงเป็นฐานข้อมูลสำหรับใช้เป็นแนวทางในการนำข้อมูลไปวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าด้านอื่นๆ

#### 6.1 สรุปผลงานวิจัย

การทดสอบความแม่นยำการบันทึกข้อมูลตามอัตราส่วนข้อมูลต่อรูปคลื่นจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ พบว่าค่าขนาดความผิดพลาดการวัดเฉลี่ยของการบันทึกข้อมูล และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดการสุ่มข้อมูลต่อรูปคลื่น โดยเปรียบเทียบกับการบันทึกข้อมูลสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าจาก Analog Discovery 2 ที่ใช้อ้างอิงตามกรณีโหลดแบบต่างๆ นั้น ผลลัพธ์ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ มีความแม่นยำมากกว่าเกณฑ์พื้นฐานของเครื่องวัดที่มีค่าความแม่นยำมากกว่า 90% (%Accuracy > 90%) ซึ่งได้สรุปผลลัพธ์การทดสอบตามกรณีโหลดแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6-1

การทดสอบความแม่นยำในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก โดยกำหนดเงื่อนไขกรณีโหลดแบบต่างๆ ภายในตัวเครื่อง Omicron CMC 256 plus ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าโดยกำหนดฮาร์มอนิกในสัญญาณไฟฟ้าได้ตามต้องการ ซึ่งได้สรุปผลลัพธ์การทดสอบตามกรณีสภาวะโหลดแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6-2

ตารางที่ 6-1 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณไฟฟ้าและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดความผิดพลาด  
การบันทึกข้อมูล

ตารางนี้เป็นการสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบความแม่นยำการวัดและบันทึกข้อมูล  
เพื่อให้ภาพรวมของผลลัพธ์ต่างๆ โดยเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ในกรณีโหลดแบบต่างๆ

กรณีโหลด 3 เฟส		แรงดันไฟฟ้า			กระแสไฟฟ้า		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
R Load	$\%error_{rms}$	0.61 %	1.07 %	1.12 %	1.271 %	0.600 %	1.625 %
	$error_{Avg}$	5.154 V	4.943 V	4.899 V	0.0205 A	0.0245 A	0.0246 A
	$\sigma_{error}$	3.389 V	3.246 V	3.267 V	0.0172 A	0.0238 A	0.0207 A
RL Load	$\%error_{rms}$	0.21 %	1.30 %	0.09 %	1.580 %	1.484 %	2.259 %
	$error_{Avg}$	7.260 V	6.365 V	3.901 V	0.0160 A	0.0164 A	0.0145 A
	$\sigma_{error}$	6.122 V	5.495 V	3.352 V	0.0133 A	0.0150 A	0.0115 A
RC Load	$\%error_{rms}$	0.04 %	0.84 %	0.30 %	1.111 %	1.911 %	0.614 %
	$error_{Avg}$	6.813 V	4.833 V	3.963 V	0.0160 A	0.0160 A	0.0142 A
	$\sigma_{error}$	4.905 V	3.552 V	2.575 V	0.0108 A	0.0107 A	0.0107 A

ตารางที่ 6-2 ค่าความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณไฟฟ้าและส่วนเบี่ยงเบน  
มาตรฐานขนาดความผิดพลาดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ตารางนี้เป็นการสรุปผลลัพธ์จากการทดสอบการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เพื่อให้ภาพรวม  
ของผลลัพธ์ต่างๆ โดยเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ตามกรณีสภาวะโหลดต่างๆ

กรณีสภาวะโหลด 3 เฟส		แรงดันฮาร์มอนิก			กระแสฮาร์มอนิก		
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
สภาวะ โหลดไม่สมดุล	$\%error_{\%THD}$	3.07 %	3.35 %	3.39 %	0.56 %	1.89 %	1.45 %
	$error_{H_{Avg}}$	0.34 V	0.26 V	0.29 V	0.014 A	0.037 A	0.024 A
	$\sigma_{error_{H_i}}$	0.36 V	0.49 V	0.30 V	0.011 A	0.032 A	0.017 A
สภาวะ โหลดสมดุล	$\%error_{\%THD}$	3.14 %	3.20 %	3.42 %	1.53 %	0.72 %	0.49 %
	$error_{H_{Avg}}$	0.30 V	0.26 V	0.24 V	0.022 A	0.021 A	0.014 A
	$\sigma_{error_{H_i}}$	0.33 V	0.25 V	0.19 V	0.017 A	0.014 A	0.008 A

## 6.2 ข้อดี

การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์นั้น ใช้งบประมาณในการพัฒนาประมาณ 2,000 บาท ต่อการพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์หนึ่งชุด แต่ผลลัพธ์ทำให้มิเตอร์เอเอ็มอาร์นั้น สามารถวิเคราะห์ ข้อมูลเกี่ยวกับฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ สร้างแนวทางในการนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ไปติดตั้งร่วมกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ของผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อให้สามารถนำข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้าไปวิเคราะห์คุณภาพ ไฟฟ้าด้านอื่นๆในระบบไฟฟ้าร่วมด้วย

อีกทั้งในงานวิจัยนี้สามารถนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ไปใช้ร่วมกับมิเตอร์เอเอ็มอาร์ได้ หลากหลายรุ่น เนื่องจากตัวอุปกรณ์เป็นอิสระจากตัวมิเตอร์เอเอ็มอาร์ ทำให้สามารถพัฒนาตัวอุปกรณ์ให้ ครอบคลุมในระบบจำหน่ายของ กฟน. ได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องติดตั้งมิเตอร์อัจฉริยะในราคาแพง เพื่อ วิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับฮาร์มอนิก หรือติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่มีราคาแพงในการวิเคราะห์ คุณภาพไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ การพัฒนาอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ ฮาร์มอนิกของผู้ใช้ไฟฟ้าได้นั้น ยังไม่สามารถเชื่อมกับโครงสร้างระบบ DMS (Distribution Management System) ของมิเตอร์เอเอ็มอาร์ใน กฟน. ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้ เนื่องจากติดปัญหาการขออนุญาต เข้าใช้งานเครือข่ายเส้นใยแก้วนำแสงภายในระบบเครือข่ายของ กฟน. จากหน่วยงานฝ่ายโครงสร้าง พื้นฐานได้ ซึ่งหน่วยงานนี้ทำหน้าที่จัดการและวางแผนปฏิบัติงานในระบบ สื่อสารด้านต่างๆภายใน กฟน.ทั้งหมด ทำให้ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการนำข้อมูลที่บันทึกออกจาก SD Card มาใช้เป็นแนวทาง ให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องใน กฟน. เห็นถึงความสำคัญของการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ สามารถสร้างประโยชน์ในการใช้งานในหลายๆ ด้าน เพื่อสร้างการพัฒนาการส่งข้อมูลเข้าฐานข้อมูล ระบบเครือข่ายของ กฟน. ต่อไป

ดังนั้นสำหรับผู้ที่จะนำอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ไปพัฒนาต่อจำเป็นต้องพัฒนาการส่ง ข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยแก้วนำแสง หรือผ่านระบบการสื่อสารผ่านโครงข่ายของผู้ให้บริการสื่อสาร ไร้สาย GPRS/3G/LTE เพิ่มเติม เพื่อเสริมความสามารถของอุปกรณ์ประกอบมิเตอร์ ซึ่งต้องจำลอง ส่วนการบริหารจัดการข้อมูลมิเตอร์ขึ้น เพื่อใช้ในการเชื่อมโยงข้อมูลมิเตอร์เอเอ็มอาร์ระหว่างผู้ใช้ ไฟฟ้ากับผู้ให้บริการระบบไฟฟ้า ซึ่งจะทำการนำข้อมูลที่บันทึกได้ไปวิเคราะห์เกี่ยวกับฮาร์มอนิก หรือคุณภาพไฟฟ้าง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] สกลพงษ์ บูรณะวิทย์, "การพัฒนาเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและแรงดันตกชั่วขณะได้," วิทยานิพนธ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [2] คมสัน ภูมาลี, "การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, vol. 16, ฉบับที่ 1 ม.ค. - มี.ค., pp. 32-37, 2549.
- [3] ชไมพร ตันฑิตติก, "การพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก," วิทยานิพนธ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [4] S. Elphick, V. Gosbell, V. Smith, S. Perera, P. Ciufu, and G. Drury, "Methods for Harmonic Analysis and Reporting in Future Grid Applications," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, No. 2, pp. 989-995, May 2017.
- [5] S. Ali, K. Wu, K. Weston, and D. Marinakis, "A Machine Learning Approach to Meter Placement for Power Quality Estimation in Smart Grid," IEEE Transaction on Smart Grid, vol. 7, No. 3, pp. 1552-1561, May 2016.
- [6] X. Long, W. Parent, and E. Staff, "Influence of Power Quality on FortisAlberta's PLC Based Automatic Meter Reading System," presented at the Power Quality Fortis Alberta, Calgary Alberta Canada, 2015.
- [7] D. Yeolekar, H. H. Kulkarni, and D.G.Bharadwaj, "Combined Zigbee & GSM approach for AMR in Harmonic Monitoring and Assessment on Smartphone," 2015, IEEE 978-1-4799-6085-9.
- [8] วันเฉลิม โปรา, เอกสารความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมาตรอัจฉริยะ (Smart Meter) และแนวทางการจัดทำข้อกำหนดเฉพาะมาตรอัจฉริยะ, กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] ฝ่ายพัฒนารูกิจ, การศึกษาโอกาสทางธุรกิจจาก AMR & AMI, กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้านครหลวง, 2560.

- [10] กองเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า, เอกสารโครงการนำร่องระบบงานบริการผ่านเครือข่ายสื่อสารและสารสนเทศ Advanced Metering Infrastructure (AMI), กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายอุปกรณ์งานจำหน่าย การไฟฟ้านครหลวง, 2551.
- [11] www.elster.com. Elster A1800 ALPHA meter, 2010. สืบค้นวันที่ 22 พฤศจิกายน 2562.
- [12] www.edmi-meters.com. EDMI Mk10E, MKT-FS-022 Rev 02 ed, 2019. สืบค้นวันที่ 22 พฤศจิกายน 2562.
- [13] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์, "สัญญาณและระบบ." สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2562.
- [14] ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์, "เอกสารประกอบการสอนเรื่องการวัดและการจัดการสัญญาณการสิ้นสะท้อนเบื้องต้น." กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2562.
- [15] วิระสิทธิ์ อิ่มถวิล, "เอกสารประกอบการสอนเรื่องระบบสื่อสารเชิงดิจิทัลขั้นแนะนำ" ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2562."
- [16] จักรี รัศมีฉาย, "เอกสารประกอบการสอนวิชาการออกแบบวงจรดิจิทัล." ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2562.
- [17] ธวัชชัย เตชสุนันต์, "เอกสารประกอบการสอนวิชา 2102555 Fundamentals of Power Quality." กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2009.
- [18] IEEE.519, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2000.
- [19] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม," ฉบับปี 2551 vol. PRC – PQG – 01 / 2008, กรุงเทพมหานคร, 2551.
- [20] ชนวัฒน์ ฉลาดสกุล, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2547.

- [21] เอกสารการอบรมแนวทางการแก้ไขฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า, กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2560.
- [22] กองพัฒนาระบบไฟฟ้า, รายงานผลการวัดฮาร์มอนิกและ Load Profile, กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้านครหลวง, 2553.
- [23] IEC.61000.4-7, Part 4 : Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems 2002.
- [24] อติสรณ์ กำลังเพชร และ ประจวบ อินระวงศ์, "การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว สำหรับวิเคราะห์และแยกแยะสัญญาณรูปคลื่นไฟฟ้า."วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 27, ฉบับที่ 4 ต.ค.-ธ.ค 2560.
- [25] พิระพล ยุวภูษิตานนท์, " เอกสารประกอบการสอนวิชา EEET0485 Digital Signal Processing." ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2562.
- [26] IOXhop. " www.ioxhop.com อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ IoT และนำเข้าสินค้าตามเทคโนโลยี" 22 พฤศจิกายน 2562.
- [27] www.digilent.com. "Analog Discovery 2 Specifications." สืบค้นวันที่ 12 พฤษภาคม 2563.
- [28] ชัยวัฒน์ เจษฎาจินต์, "มาตรวิทยาและการจัดการเครื่องมือวัด," กรุงเทพมหานคร: สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2561.
- [29] www.omicronenergy.com. "CMC 256plus Brochure." สืบค้นวันที่ 12 พฤษภาคม 2563.
- [30] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [31] NANJING ZEMING, "ZMPT101B Voltage Transformer," 2019.
- [32] ACS712, "Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor," 2020.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสาธิต เพ็ชรรอด
วัน เดือน ปี เกิด	19 มิถุนายน 2530
สถานที่เกิด	จ.สมุทรสงคราม
วุฒิการศึกษา	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ที่อยู่ปัจจุบัน	359/66 ถ.เลียบบคลองภาษีเจริญฝั่งใต้ แขวงหนองแขม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160