

เครือข่ายไร้สายเพื่อการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจำแนก

เกรียงศักดิ์ ปานโพธิ์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยบูรพา

พฤษภาคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ เกียรติศักดิ์ ปานโพธิ์ทอง ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....^๑
.....^๑.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนันท์ ลีลาตระกูล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
.....ประธานกรรมการ
(ดร.พนิดา พงษ์ไพบูลย์)

.....
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา ริมเจริญ)

.....
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนันท์ ลีลาตระกูล)

คณะวิทยาการสารสนเทศอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....
.....คณบดีคณะวิทยาการสารสนเทศ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะ ชินสาร)

วันที่ ๑๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนนท์ ติลาตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ พี่เม็กซ์ อาจารย์วราเชษฐ บัวสุวรรณ อาจารย์พิเศษคณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้คำปรึกษาทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย ในครั้งนี้ พร้อมทั้งยังช่วยผลักดันและคอยให้กำลังใจต่อผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิสา ริมเจริญ และ ดร.พนิดา พงษ์ไพบูลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาตรวจสอบ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้อย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ คณบดีคณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยบูรพา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ รัศมีขวัญ พร้อมคณะผู้บริหารที่เห็นความสำคัญของการพัฒนาด้านการศึกษาของบุคลากร และได้มอบทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณรินทราย คุณปรีชา พี่สิริกุล พี่หรรษา น้องธงชัย น้องมัธยม ตลอดจน พี่ ๆ ในกองทะเบียนและประมวลผลการศึกษา และ พี่ ๆ น้อง ๆ ในคณะวิทยาการสารสนเทศ ที่ให้ความร่วมมืออย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการทำวิจัย ทำให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ลิ้ม นิลพวง ภรรยา และครอบครัวที่ให้กำลังใจและสนับสนุน ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศทุกท่าน ที่ร่วมแบ่งปันประสบการณ์ดี ๆ ทั้งด้านการเรียนและการใช้ชีวิตร่วมกัน ตลอด 2 ปี ในการศึกษาาร่วมกัน

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตา แด่บุพการี บุรพจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับเพียงผู้เดียวและยินดีรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

เกรียงศักดิ์ ปานโพธิ์ทอง

55910008: สาขาวิชา: **เทคโนโลยีสารสนเทศ; วท.ม. (เทคโนโลยีสารสนเทศ)**

คำสำคัญ: การจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า/ เครื่องใช้เช่น เซอร์ไวร์สาย/ โครงข่ายประสาทเทียม

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน/ ต้นไม้ตัดสินใจ/ นาอ็อบเบย์

เกรียงศักดิ์ ปานโพธิ์ทอง: เครื่องใช้สายเพื่อการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าและการเปรียบเทียบ

ประสิทธิภาพในการจำแนก (A WIRELESS SENSOR NETWORK FOR APPLIANCE

CLASSIFICATION AND ITS EFFICIENT CLASSIFICATION TECHNIQUES) คณะกรรมการ

ควบคุมวิทยานิพนธ์: ธรรมนูญ ถิลาตระกูล, Ph.D., สุนิสา ริมเจริญ, Ph.D., พนิดา พงษ์ไพบูลย์,

Ph.D., 87 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

งานวิจัยนี้เสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้า จากการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่แต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งถูกเฝ้าดูและควบคุมด้วยระบบเครื่องใช้เซ็นเซอร์ไวร์สาย ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกเปรียบเทียบเทคนิคการจำแนก 4 วิธี ได้แก่ ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) นาอ็อบเบย์ (Naïve Bayes) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) เพื่อหาเทคนิคการจำแนกที่เหมาะสม ผู้วิจัยได้ออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับกระแสในรูปแบบรางปลั๊กไฟฟ้าและนำไปใช้กับทุก ๆ จุดที่เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานอยู่ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดจะถูกจัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการจำแนกโดยใช้โปรแกรม Weka จุดมุ่งหมายของการตรวจจับกระแสไฟฟ้าในจุดที่เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานอยู่ (แทนที่จะเป็นแผงวงจรหลัก) เพื่อให้ระบบสามารถถูกพัฒนาต่อยอกให้รับรู้ได้อัตโนมัติว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าถูกย้ายไปอยู่ที่ตำแหน่งใด สามารถควบคุมการเปิด/ปิด เครื่องใช้ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ สามารถระบุอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเช่น กาต้มน้ำร้อน อันจะส่งผลให้สามารถเพิ่มความปลอดภัยในครัวเรือน ช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงาน และเพิ่มคุณภาพชีวิตได้ในอนาคต จากการทดสอบกับเครื่องใช้ไฟฟ้าตัวอย่าง 40 อุปกรณ์ และเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคการจำแนกทั้ง 4 เทคนิค ผู้วิจัยพบว่า 1) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการใช้ไฟฟ้าเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำแนกสถานะของอุปกรณ์ไฟฟ้า 2) ต้นไม้ตัดสินใจ (J48) ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดที่ 1.66% กฎที่ได้จากแบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการจำแนกแบบเวลาจริงพร้อมแสดงผลและควบคุมการเปิด/ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านเว็บไซต์

55910008: MAJOR: INFORMATION TECHNOLOGY; M.Sc. (INFORMATION TECHNOLOGY)

KEYWORDS: CLASSIFICATION, APPLIANCE CLASSIFICATION, WIRELESS SENSOR NETWORK, NEURAL NETWORK, DECISION TREE, NAÏVE BAYES, SUPPORT VECTOR MACHINE, ENERGY CONSUMPTION

KRIENGSAK PANPHOTONG: A WIRELESS SENSOR NETWORK FOR APPLIANCE CLASSIFICATION AND ITS EFFICIENT CLASSIFICATION TECHNIQUES. ADVISORY COMMITTEE: NUTTHANON LEELATHAKUL, Ph.D., SUNISA RIMCHAROEN, Ph.D., PANITA PONGPAIBOOL, Ph.D. 87 P. 2017.

This work presents a performance comparison of four classification techniques (i.e., Decision Tree, Naïve Bayes, Neuron Network, and Support Vector Machine) for appliance classification by analyzing each appliance's electricity usage sent via a wireless sensor network. To measure and collect the actual electrical power consumed by each device, we designed sensor circuits, each of which is deployed inside each power outlet. The measured data are sent to a centralized system via a wireless sensor network (which can also be used to deliver control commands to turn on/off each appliance). The system uses the data to classify a type of each appliance connected to each of the outlet. Since this research is to be detecting electrical usage at each outlet (instead of at the main circuit as in previous works), the system can be developed further to help identifying the abnormal operation of each appliance, and to automatically recognize the device when it is moved to another outlet, making possible automatic appliance on/off control. As a result, it could promote home safety and energy savings without affecting users' normal behaviors. Comparing the accuracies of classifying 40 electric devices using the four techniques, we found that 1) standard deviation of measured electricity usage is a necessary attribute for accurately classifying appliance states, and 2) the decision tree algorithm (i.e., J48) performs best (with the error of 1.66%).

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นด้านกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า.....	6
2.1.2 ระบบเครือข่ายไร้สาย.....	14
2.1.3 โมดูลเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย ESP8266.....	16
2.1.4 ความรู้เบื้องต้นระบบสมองกลฝังตัว.....	18
2.1.5 คุณสมบัติ Arduino Pro-mini.....	19
2.1.6 การโปรแกรมระบบสมองกลฝังตัว.....	20
2.1.7 การแปลงค่าสัญญาณ Analog เป็น Digital.....	22
2.1.8 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า.....	23
2.1.9 เทคนิคการจำแนกข้อมูล (Classification Techniques).....	24
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
2.2.1 แนวทางการวางอุปกรณ์ตรวจจับการใช้พลังงานอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	29
2.2.2 การจำแนกและการเลือกคุณลักษณะที่ใช้จำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	29
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	32
	3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	34
	3.3 การออกแบบโครงสร้างและการทำงานของระบบ.....	34
	3.4 การทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini ร่วมกับ โมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266.....	39
	3.5 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดค่าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด.....	41
	3.6 การทดสอบตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าจากรางปลั๊กที่มีการใช้กระแสไฟฟ้าจาก อุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดพร้อมกัน.....	45
	3.7 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์กับอุปกรณ์วัดไฟฟ้ามาตรฐาน.....	45
	3.8 วิธีการเก็บข้อมูลและการเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์และ เปรียบเทียบประสิทธิภาพ.....	47
	3.9 การส่งข้อมูลเพื่อแสดงผลและการควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า.....	49
4	ผลการดำเนินงานวิจัย.....	50
	4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	50
	4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น.....	56
	4.3 สร้างตัวแบบเพื่อจำแนกข้อมูล.....	58
	4.4 การเปรียบเทียบตัวแบบและประเมินประสิทธิภาพ.....	60
	4.5 การนำตัวแบบไปใช้จริง.....	69
5	สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	74
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
	5.2 อภิปรายผล.....	75
	5.3 ข้อเสนอแนะ.....	78
	บรรณานุกรม.....	79
	ภาคผนวก.....	81
	ภาคผนวก ก.....	82
	ภาคผนวก ข.....	84
	ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	4
3-1	ตัวแปรที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ส่งค่ามาให้กับเครื่องแม่ข่าย.....	37
4-1	รายการผลิตภัณฑ์และรุ่นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	50
4-2	ลักษณะการใช้งานและสถานะของอุปกรณ์แต่ละชนิด.....	55
4-3	ข้อมูลที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	55
4-4	ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดพัฒนา.....	58
4-5	รายละเอียดของแต่ละแอตทริบิวต์ทั้งหมด.....	59
4-6	เทคนิคการจำแนกและการปรับค่าพารามิเตอร์.....	60
4-7	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละเทคนิคการจำแนก.....	61
4-8	ผลการจำแนกแยกตามคลาสของเทคนิคการจำแนกด้วยนาอูฟเบย์.....	62
4-9	ผลการจำแนกแยกตามคลาส (classes) ของเทคนิคการจำแนกด้วยต้นไม้ตัดสินใจ.....	63
4-10	ผลการจำแนกแยกตามคลาสของเทคนิคการจำแนกโครงข่ายประสาทเทียม.....	65
4-11	ผลการจำแนกแยกตามคลาสของเทคนิคการจำแนกซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน.....	66
4-12	สรุปผลการจำแนกทั้ง 4 วิธีในการจำแนกประเภท.....	68
4-13	ผลการจำแนกแบบเวลาจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้ง 5 ชนิด.....	71
4-14	ผลการจำแนกแบบเวลาจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้า 2 ชนิดทำงานพร้อมกัน.....	71
4-15	ผลการจำแนกแบบเวลาจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้ง 5 ชนิด.....	72

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current sensor) ด้วย IC เบอร์ ACS712.....	3
1-2	อุปกรณ์เครือข่ายไร้สายสำหรับรับ-ส่งข้อมูล ESP8266-01.....	3
1-3	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini 5V.....	3
1-4	สวิตช์ตัด-ต่อวงจร (Relay) 5 โวลต์ แบบแยกอิสระ 4 ช่อง.....	4
2-1	การเขียนรูปแทนกระแสในวงจรซึ่งต้องมีทั้งขนาด (3 A และ -3 A) และทิศทาง.....	7
2-2	กระแสไหลผ่านอิลิเมนต์.....	7
2-3	รูปแบบของกระแส.....	8
2-4	การหาค่าแรงดันกระแสและความต้านทาน จากกฎของโอห์ม.....	7
2-5	สูตรที่ใช้ในการหาค่าแรงดัน กระแส ความต้านทานและกำลังไฟฟ้า.....	9
2-6	การเขียนรูปแทนแรงดัน.....	10
2-7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส.....	10
2-8	อุปกรณ์วัดคีมเตอร์.....	11
2-9	ลักษณะการต่ออุปกรณ์วัดคีมเตอร์ เพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้า.....	12
2-10	คุณสมบัติของการใช้กระแสไฟฟ้าของ Linear load (โหลดใส่) และ Non-linear load... ..	13
2-11	การใช้ Power Meter วัดค่ากำลังไฟฟ้าของจอคอมพิวเตอร์ 17".....	13
2-12	การวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของจอคอมพิวเตอร์ขนาด 17".....	14
2-13	โมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266 (ESP-01).....	15
2-14	โมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266 แบบต่าง ๆ.....	18
2-15	Arduino Pro-mini.....	20
2-16	การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้เครื่องมือ Arduino IDE.....	21
2-17	อัตราการสุ่มตัวอย่าง.....	23
2-18	อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor) ACS712.....	24
2-19	ตัวอย่างแผนภาพต้นไม้.....	26
2-20	ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม.....	20
2-21	รูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า 3 ประเภท.....	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3-1	ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3-2	โครงสร้างและการทำงานของระบบ.....	35
3-3	วงจรสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	36
3-4	รูปแบบการตรวจจับกระแสไฟฟ้าและจัดเก็บเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์.....	36
3-5	แผนภาพวงจรอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่สามารถส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย.....	38
3-6	รูปแบบระบบการจาแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยส่งข้อมูลการจาแนกมายังส่วนกลางพร้อมการสั่งควบคุมเปิด/ปิดไฟฟ้า.....	39
3-7	ตัวอย่างการเขียนคำสั่งเพื่อตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทำงาน.....	40
3-8	แสดงเวลาการทำงานในแต่ละรอบของ Arduino Pro-Mini.....	40
3-9	การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor)...	41
3-10	รูปแบบการใช้กระแสไฟฟ้าของพัดลม.....	42
3-11	รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟ.....	42
3-12	รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเตารีด.....	43
3-13	รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของกระดิกนํ้าร้อน.....	43
3-14	รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเครื่องเป่าผม.....	44
3-15	กราฟการจาแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าจากการใช้กระแสไฟฟ้า.....	44
3-16	การเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดมาตรฐาน.....	45
3-17	โค้ด Arduino สำหรับทดสอบเทียบเคียงอุปกรณ์วัดมาตรฐาน.....	46
3-18	ข้อมูลที่เก็บรวบรวมในรูปแบบ Text File.....	47
3-19	ตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านการกำหนดคลาสแอทริบิวต์.....	48
4-1	การเก็บข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของพัดลม.....	52
4-2	ข้อมูลที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	53
4-3	ตัวอย่างข้อมูลที่เก็บรวบรวม.....	53
4-4	กราฟข้อมูลของพัดลม โดยแยกตามสถานะ.....	56
4-5	กราฟข้อมูลของเครื่องเป่าผม โดยแยกตามสถานะ.....	57
4-6	กราฟข้อมูลของโทรทัศน์ โดยแยกตามสถานะ.....	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-7	Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกด้วยนาอ์ฟเบย์.....	62
4-8	Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกด้วยต้นไม้ตัดสินใจ.....	64
4-9	Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกโครงข่ายประสาทเทียม.....	65
4-10	Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน.....	67
4-11	ขั้นตอนการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเวลาจริง (Real time).....	70
4-12	แสดงผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าพัลลัมและโทรทัศน์แบบเวลาจริงบนเว็บไซต์.....	72
4-13	แสดงผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าตู้เย็นและคอมไฟแบบเวลาจริงบนเว็บไซต์.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสิ้นเปลืองพลังงานที่เกิดจากการใช้ไฟฟ้าโดยเปล่าประโยชน์ของเครื่องใช้ไฟฟ้า อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในภาคครัวเรือนและในภาคธุรกิจ ซึ่งเจ้าของบ้านหรือเจ้าของธุรกิจไม่สามารถพิจารณาได้จากใบแจ้งค่าไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์แต่ละชนิดมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผิดปกติ มีอัตราการใช้ไฟฟ้าน้อยหรือสูญเสียพลังงานอย่างไร เช่น พัดลมที่เปิดทิ้งไว้โดยไม่มีผู้ใช้งาน หลอดไฟเพดานที่เปิดทิ้งไว้โดยไม่มีคนอยู่ ผู้เขียนที่เสื่อมสภาพมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าผู้เขียนปกติเหล่านี้ เป็นต้น ซึ่งหากเรารู้แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ เราก็สามารถวิเคราะห์และวางแผนในการบริหารจัดการเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน โดยเปล่าประโยชน์เหล่านี้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวคิดในการพัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่สามารถจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อให้ทราบถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในบ้านหรือสำนักงานว่ามีอุปกรณ์ใดบ้างและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาเป็นเช่นไร โดยการตรวจจ็บบรูปแบบค่ากระแสไฟฟ้าที่รางปลั๊กซึ่งอาจมีหลายอุปกรณ์ไฟฟ้าเสียบใช้งานอยู่และใช้เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายในการส่งข้อมูลมายังเครื่องแม่ข่ายเพื่อจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อมูล 4 วิธี ได้แก่ นาอิวเบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อหาโมเดลที่ดีที่สุดสำหรับการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การพัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่สามารถจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าและจัดเก็บปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาเพื่อการวางแผนในการบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพ โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อมูล 4 วิธี มีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

1. เพื่อจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ จากการตรวจจ็บบรูปแบบการใช้กระแสไฟฟ้าตรงปลั๊กที่อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียบใช้งาน ซึ่งหนึ่งปลั๊กอาจมีหลายอุปกรณ์ไฟฟ้าใช้งานพร้อมกัน
2. เพื่อจัดเก็บข้อมูลการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายในครัวเรือน และนำมาพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีที่สามารถนำข้อมูลการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์มาวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานที่สูญเปล่าลงได้ในอนาคต

3. เพื่อศึกษาการรู้จำชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าจากเทคนิคการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้า สำหรับใช้ในการพัฒนาการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด ซึ่งมีการใช้พลังงานในรูปแบบที่ต่างกัน

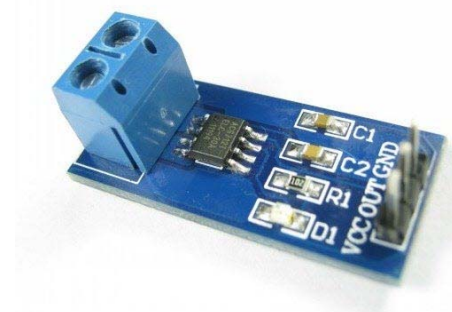
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้า และการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย
2. ทราบรูปแบบและปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าที่ใช้ไปในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละอุปกรณ์
3. สามารถนำวิธีการที่นำเสนอไปพัฒนาต่อยอดเป็นระบบช่วยตัดสินใจในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในทุกภาคส่วน รวมไปถึงการวางแผนในการจัดการด้านพลังงานไฟฟ้าให้อยู่บนพื้นฐานของการใช้พลังงานที่เป็นจริงมากที่สุด ซึ่งสามารถช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายทางด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเดิมลงได้
4. ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะสามารถใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาขั้นสูงต่อไป

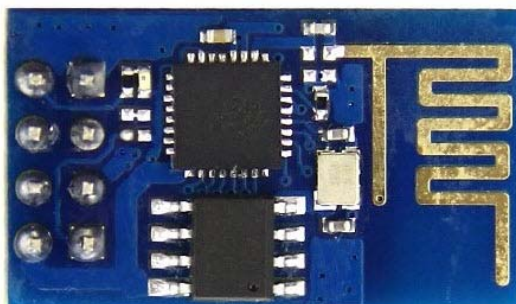
1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาและพัฒนาการนำเทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor network) เพื่อการจำแนกชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าตรงปลั๊กไฟฟ้า โดยอาจมีหลายอุปกรณ์ไฟฟ้าใช้งานพร้อมกัน และนำเทคนิคการจำแนกแบบต่าง ๆ มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อหาโมเดลที่ดีที่สุดสำหรับการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ในระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าผ่านเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายได้ต่อไป โดยมีขอบเขต ดังนี้

1. การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า ใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current sensor) ด้วย IC เบอร์ ACS712 พิกัด $\pm 20A$ ดังภาพที่ 1-1 และใช้การสื่อสารไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi ESP8266-01 สำหรับส่ง/รับ ข้อมูล ดังภาพที่ 1-2

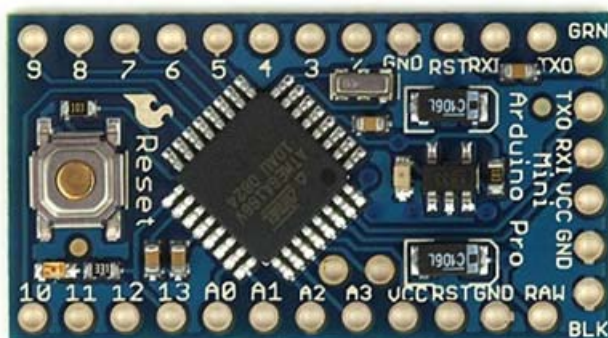


ภาพที่ 1-1 อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current sensor) ด้วย IC เบอร์ ACS712



ภาพที่ 1-2 อุปกรณ์เครือข่ายไร้สายสำหรับรับ-ส่งข้อมูล ESP8266-01

2. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini มีไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ATmega328 เป็นหน่วยประมวลผลสำหรับการตรวจจับและการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังภาพที่ 1-3



ภาพที่ 1-3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini 5V

3. ใช้อุปกรณ์สวิตช์ตัด-ต่อวงจร (Relay) 5 โวลต์ แบบแยกอิสระ 4 ช่อง สำหรับสั่งเปิด/ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อกับรางปลั๊กในแต่ละช่อง รองรับกระแสไฟฟ้าสูงสุด 10 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าขนาด 250 โวลต์แสดงดังภาพที่ 1-4



ภาพที่ 1-4 สวิตช์ตัด-ต่อวงจร (Relay) 5 โวลต์ แบบแยกอิสระ 4 ช่อง

4. ประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย ต้องเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ได้รับมาตรฐานสากล ซึ่งใช้ระดับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน 220 V โดยมีการแบ่งประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าตามแต่ละชนิดการใช้งานดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้า	
1. โคมไฟตั้งโต๊ะ	5. เครื่องเป่าผม
2. เครื่องรับโทรทัศน์	6. เตารีด
3. ตู้เย็น	7. เตอบนไมโครเวฟ
4. พัดลม	8. กาต้มน้ำร้อน

5. กระบวนการในการวิจัย เริ่มจากการตรวจจัดการใช้งานพลังงานไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สายที่ติดตั้งตรงปลั๊กไฟฟ้าส่งข้อมูลมาเก็บยังเครื่องแม่ข่าย จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด ด้วยเทคนิคการจำแนก 4 วิธี คือ นาอิว เบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) โดยใช้อัลกอริทึม J48 โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) แบบ Multilayer perceptron และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) และเปรียบเทียบหาเทคนิคที่ดีที่สุดสำหรับการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าจากข้อมูลที่ได้พร้อมนำเทคนิคนั้นไปทดสอบกับข้อมูลแบบเวลาจริง (Real time) พร้อมสรุปผล

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ เรื่อง เครื่องข่ายไร้สายเพื่อการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจำแนกนี้ต้องอาศัยความรู้หลายด้าน ได้แก่ ความรู้ทางด้านฮาร์ดแวร์ที่ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าและรูปแบบการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์แต่ละประเภท ด้านเครือข่ายและเครื่องแม่ข่าย ขั้นตอนวิธีที่ใช้สำหรับการจำแนกข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้า และภาษาที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องมือในการตรวจจ็บบรูปแบบการใช้งานกระแสไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีของเครือข่ายไร้สายช่วยในการส่งข้อมูลมายังเครื่องแม่ข่ายส่วนกลาง ทำการเก็บข้อมูลในการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า 40 อุปกรณ์ นำข้อมูลที่ได้มาผ่านกระบวนการจำแนกประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการจำแนกข้อมูล 4 วิธี ได้แก่ นาอิวเบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพหาตัวแบบที่ดีที่สุดสำหรับการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นด้านกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า

การวิจัยนี้ต้องใช้ความรู้เบื้องต้นทางด้านกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญในการดำเนินงาน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาจากหนังสือของ เจน สงสมพันธ์ (2537) เรื่อง “เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ 1” [1]; หนังสือของ Robert L. Boylested, Louis Nashelsky เรื่อง Electronics Devices and Circuit พิมพ์ครั้งที่ 7 [2] และเอกสารของ สมพัฒน์ รุ่งตะวันเรืองศรี เรื่อง “210-211 Electric Circuits” [3] ซึ่งได้อธิบายถึงความรู้เบื้องต้นทางด้านกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า ตามหัวข้อดังนี้

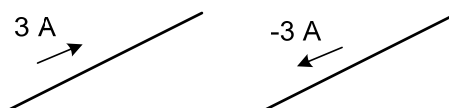
1. ประจุและกระแส (Charge and current)

ประจุเป็นปริมาณพื้นฐานที่สุดทางไฟฟ้า หน่วยที่ใช้วัดปริมาณนี้คือ คูลอมบ์ (Coulomb) และใช้ตัวย่อเป็น C สัญลักษณ์ที่ใช้แทนประจุมีสองแบบคือ Q และ q โดยที่ สัญลักษณ์ตัวพิมพ์ใหญ่ใช้แทนปริมาณที่มีค่าคงที่ ส่วนตัวพิมพ์เล็กจะใช้แทนปริมาณที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา การแทนในลักษณะนี้จะใช้กับปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

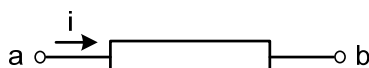
กระแสถูกนิยามไว้ว่าเป็น อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าประจุต่อเวลา หรือ อัตราการเคลื่อนที่ของประจุต่อเวลา ดังสมการ 2.1

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนกระแส คือ I หรือ i โดยมีหน่วยเป็น แอมป์แปร์ (Ampere) โดยที่ 1 A คือประจุที่เคลื่อนที่ด้วยอัตรา 1 C/s กระแสเป็นปริมาณที่มีทั้งขนาดและทิศทาง ค่าของกระแสเป็นได้ทั้งบวกและลบ (ภาพที่ 2-1) โดยที่ค่าลบก็คือค่ากระแสบวกซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่กำหนดมาให้ในตอนแรก ซึ่งกระแสที่ไหลเข้าขั้ว A จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลออกจากขั้ว B เสมอ ไม่มีกระแสเหลือตกค้างในอิลิเมนต์ (ภาพที่ 2-1)

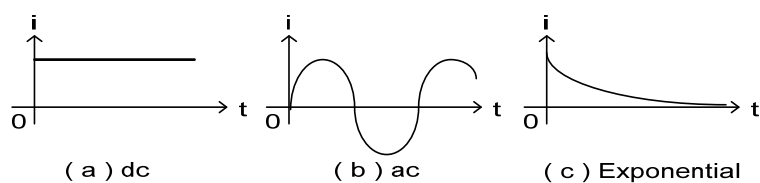


ภาพที่ 2-1 การเขียนรูปแทนกระแสในวงจรซึ่งต้องมีทั้งขนาด (3 A และ -3 A) และทิศทาง (ใช้สัญลักษณ์ลูกศรเขียนขนานไปกับเส้นที่เป็นส่วนของวงจร)



ภาพที่ 2-2 กระแสไหลผ่านอิลิเมนต์

กระแสสามารถมีรูปแบบได้หลาย ๆ อย่าง โดยหลัก ๆ มีอยู่ 3 แบบ คือ กระแสตรง (Direct current หรือ DC หรือ dc) กระแสสลับ (Alternating current หรือ AC หรือ ac) และกระแสเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential current) (ภาพที่ 2-3) แสดงรูปแบบของกระแสทั้งสามแบบข้างต้น แต่ที่เราจะให้ความสนใจในงานวิจัยนี้คือไฟฟ้ากระแสสลับ



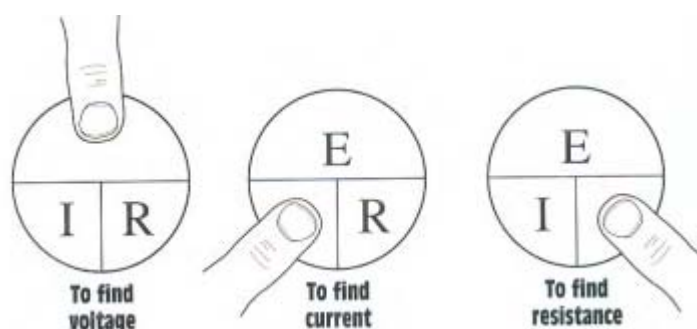
ภาพที่ 2-3 รูปแบบของกระแส

2. กฎของโอห์ม

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรไฟฟ้าได้นั้น เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรและปริมาณกระแสไฟฟ้าภายในวงจรจะถูกจำกัดโดยความต้านทานไฟฟ้าภายในวงจรวางไฟฟ้านั้น ๆ ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าภายในวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานของวงจร โดยกล่าวว่า “กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าและแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า” (ภาพที่ 2-4)

จากกฎของโอห์มซึ่งจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า [5] คือ

1. แรงดันไฟฟ้า E มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volt) สัญลักษณ์ V
2. กระแสไฟฟ้า I มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) สัญลักษณ์ A
3. ความต้าน R ทานมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm) สัญลักษณ์ Ω



ภาพที่ 2-4 การหาค่าแรงดันกระแสและความต้านทาน จากกฎของโอห์ม

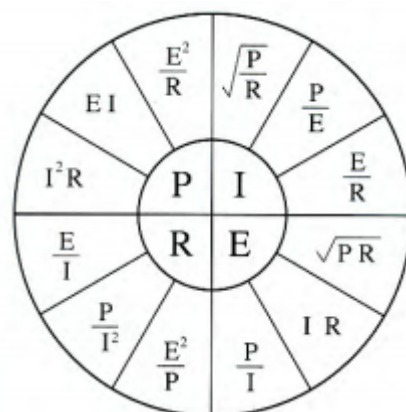
โดยกฎของโอห์มได้กล่าวถึงค่าความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า 3 ค่า นี้ไว้ว่า

1. แรงดันไฟฟ้าขนาดหนึ่งโวลต์ หมายถึงค่าของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถดันกระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ให้ไหลผ่านความต้านทานหนึ่งโอห์มไปได้

2. กระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ หมายถึงค่าของกระแสไฟฟ้าสามารถดันให้ผ่านความต้านทานขนาดหนึ่งโอห์มไปได้

3. ความต้านทานขนาดหนึ่งโอห์มหมายถึงค่าความต้านทานที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าขนาดหนึ่งแอมแปร์ที่ถูกแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าหนึ่งโวลต์ดันให้ผ่านไปได้

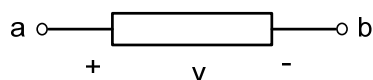
การหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดัน ความต้านทาน และกำลังทางไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน การคำนวณเพื่อหาค่าจะต้องทราบค่าอย่างน้อย 2 ค่า จึงจะหาค่าที่ต้องการได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการหาค่าความต้านทาน จะต้องทราบค่าแรงดันและกระแส หรือถ้าต้องการหาค่ากำลังทางไฟฟ้าจะต้องทราบค่าของแรงดันและกระแส นอกจากนี้ยังมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ไปในการทำให้เกิดเป็นพลังงานรูปต่าง ๆ เข้ามาอีกด้วย เช่น พลังงานแสงสว่าง พลังงานความร้อน พลังงานกล เป็นต้น โดยกำลังไฟฟ้า (P) มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt:W) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปเป็นสูตรเพื่อใช้ในการหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้ (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 2-5 สูตรที่ใช้ในการหาค่าแรงดัน กระแส ความต้านทานและกำลังไฟฟ้า

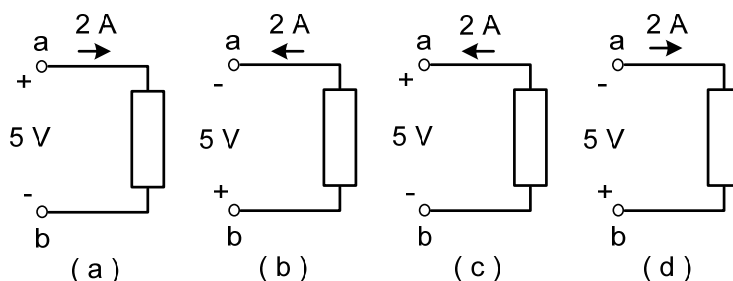
3. แรงดันไฟฟ้า, พลังงาน และกำลังไฟฟ้า (Voltage, Energy and Power)

แรงดันไฟฟ้าหรือมักจะเรียกกันสั้น ๆ ว่า แรงดัน จะปรากฏระหว่างจุดสองจุดในวงจรเสมอ โดยที่นิยามของแรงดัน คือ งาน (Work) ที่ต้องการใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุบวกจำนวน 1 C จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หน่วยสำหรับวัดขนาดของแรงดันคือ โวลท์ (Volt คำย่อคือ V) โดยที่ 1 V จะเท่ากับ 1 J/C นั่นเอง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนแรงดันคือ V หรือ v และใช้เครื่องหมาย + และ - สำหรับการระบุขั้ว โดยมีข้อตกลงว่า ขั้วบวกจะเป็นขั้วที่มีแรงดันสูงกว่าขั้วลบ (ภาพที่ 10) ซึ่งมีความหมายว่าถ้าต้องการเคลื่อนย้ายประจุจากจุดหรือขั้ว B ไปยังขั้ว A จะต้องใช้งานเป็นจำนวน $v \cdot J$.



ภาพที่ 2-6 การเขียนรูปแทนแรงดัน

การเคลื่อนย้ายประจุต้องใช้พลังงาน การที่เราจะทราบว่า พลังงานถูกจ่ายเข้าไปให้กับ อิลิเมนต์ หรืออิลิเมนต์เป็นตัวจ่ายพลังงานออกมาให้กับอิลิเมนต์อื่น ๆ ของวงจรนั้น เราจะพิจารณา จากกระแสและแรงดันที่อิลิเมนต์นั้น ๆ โดยมีข้อตกลงว่า ถ้ามีกระแสค่าบวกวิ่งเข้าหาขั้วบวกของ อิลิเมนต์ หมายความว่า มีการถ่ายเทพลังงานจากภายนอกเข้าสู่อิลิเมนต์ หรืออีกนัยหนึ่งอิลิเมนต์ ดูดซับ (Absorb) พลังงานนั้นไว้ในทางกลับกัน ถ้ากระแสค่าบวกวิ่งออกจากขั้วบวกของอิลิเมนต์ จะหมายความว่า อิลิเมนต์จ่าย (Deliver) พลังงานออกมาให้กับอิลิเมนต์อื่น ๆ ของวงจร (ภาพที่ 2-7) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสโดย (a) และ (b) แสดงกระแสค่าบวก 2 A วิ่งเข้า ทางขั้วบวกของอิลิเมนต์ (แรงดันต้องมีค่าบวกด้วย) นั่นคือ อิลิเมนต์นี้กำลังดูดซับพลังงานไว้ ส่วน ภาพที่ 2-7 (c) และ (d) แสดงกระแสค่าบวก 2 A วิ่งออกจากขั้วบวกของอิลิเมนต์ (แรงดันยังคงมีค่า เป็นบวก) หมายถึง อิลิเมนต์นี้กำลังจ่ายพลังงานออกมาให้กับอิลิเมนต์ในส่วนอื่น ๆ ของวงจร



ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า เรามักจะไม่ค่อยได้ใช้เทอมพลังงานในการวิเคราะห์วงจร แต่เรา จะใช้เทอม กำลังไฟฟ้า กันมากกว่า โดยที่ กำลังไฟฟ้า ถูกนิยามไว้ว่าเป็น อัตราการใช้พลังงานใน การเคลื่อนย้ายประจุ หรือพลังงานต่อเวลา กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt) ตัวย่อเป็น W ซึ่ง $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ ใช้สัญลักษณ์แทนกำลังไฟฟ้าเป็น P หรือ p จากนิยามของพลังงาน, แรงดันและกระแส จะได้ว่า $P = V(\text{RMS}) \times I(\text{RMS})$

$V(\text{RMS}), I(\text{RMS})$ คือ ค่าแรงดันและค่ากระแสเฉลี่ย (root mean square) ตามลำดับ

นั่นคือ กำลังไฟฟ้าได้จากการคูณกันของแรงดันกับกระแส และ กำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นได้ ทั้งค่าบวกและค่าลบซึ่งขึ้นกับค่าของ v และ i โดยมีข้อตกลงกันว่ากำลังไฟฟ้าค่าเป็นบวก หมายถึง อลิเมนต์ดูดรับหรือใช้กำลังไฟฟ้า และค่าเป็นลบ หมายถึง อลิเมนต์จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมา กล่าวโดยสรุป ถ้ามีกระแสค่าบวกวิ่งเข้าทางขั้วบวกของอลิเมนต์และค่าแรงดันที่อลิเมนต์นั้นเป็นค่าบวกด้วย อลิเมนต์นั้นกำลังดูดรับกำลังไฟฟ้าขนาด $p = vi$ ถ้าเป็นกรณีอื่น อลิเมนต์นั้นกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด $p = vi$ ออกมาให้กับวงจรภายนอก คำกล่าวที่ว่า ดูดรับกำลังไฟฟ้าและจ่ายกำลังไฟฟ้า สามารถกล่าวสลับกันได้ ในกรณีที่ค่าของกำลังไฟฟ้าเป็นค่าลบ เช่น การกล่าวที่ว่า อลิเมนต์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้า -10 W จะมีความหมายเช่นเดียวกันกับการกล่าวที่ว่า อลิเมนต์นั้นกำลังดูดรับกำลังไฟฟ้า 10 W

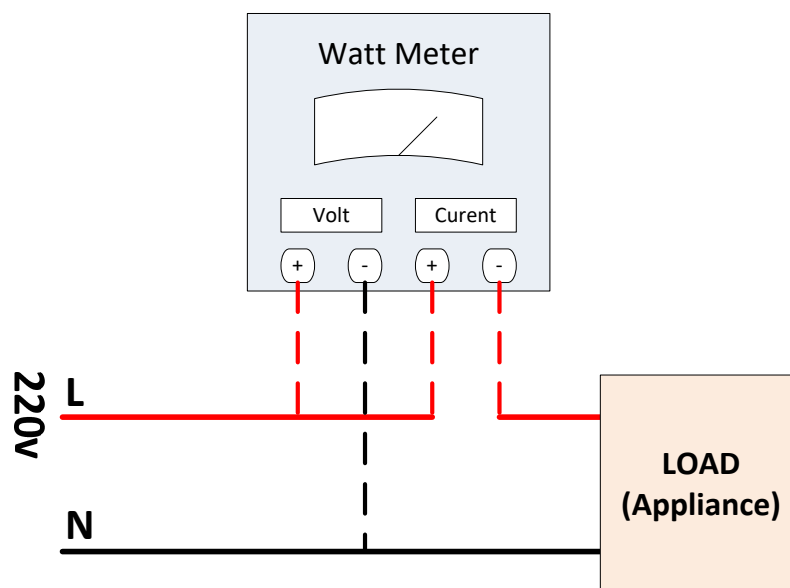
4. การวัดกำลังไฟฟ้า

ในการวัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถวัดได้โดยใช้ วัดต์มิเตอร์ (Watt meter) หรือ เพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter) โดยการวัดจะต้องต่อขั้วไฟให้ถูกต้อง ซึ่งเราจะอ่านค่าของกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวัดต์มิเตอร์ (ภาพที่ 2-8)



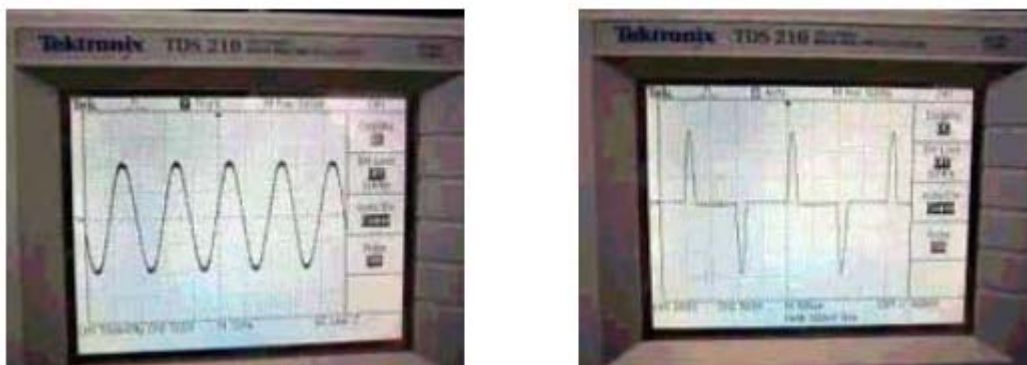
ภาพที่ 2-8 อุปกรณ์วัดต์มิเตอร์ (ที่มา Lutron Electronic Enterprise Co., Ltd.)

การวัดกำลังไฟฟ้า ทำได้โดยการ ต่อให้ขั้วเสียบของช่องกระแสไฟฟ้าของเครื่องวัดต์มิเตอร์ต่อในลักษณะที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเครื่องวัดต์มิเตอร์ก่อนที่จะไหลไปยังเครื่องใช้ไฟฟ้า ในขณะที่ขั้วเสียบของช่องแรงดันไฟฟ้าให้ต่อคร่อมแหล่งจ่ายที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่เครื่องใช้ไฟฟ้า ดังนั้น วัดต์มิเตอร์จึงเป็นทั้งแอมมิเตอร์ และ โวลต์มิเตอร์ในตัวเดียวกัน (ภาพที่ 2-9)



ภาพที่ 2-9 ลักษณะการต่ออุปกรณ์วัตต์มิเตอร์ เพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้า

ในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับนี้ [6] จะมีความซับซ้อนมากกว่าการวัดอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง เพราะทิศทางการไหลของกระแสจะเปลี่ยนไป เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น การหาค่าความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแส จึงต้องคิดในรูปของรากของกำลังสองเฉลี่ย (RMS) เพื่อกำจัดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแส โดยต้องทราบถึงชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้กำลังไฟฟ้ากระแสสลับว่ามีลักษณะการใช้ไฟเป็นประเภทไหน โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ Linear load ตัวอย่างเช่น หลอดไส้ (Incandescent lamp) และ Non-linear load ตัวอย่างเช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์, อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์, คอมพิวเตอร์, จอคอมพิวเตอร์ และ โทรทัศน์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภทจะมีลักษณะของการใช้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 2-10)



ภาพที่ 2-10 คุณสมบัติของการใช้กระแสไฟฟ้าของ Linear load (หลอดไส้) และ Non-linear load (คอมพิวเตอรื) (ที่มา Leonics Co., Ltd.)

การวัดค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับของอุปกรณ์ไฟฟ้า จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Power meter ซึ่งจะวัดแรงดันและกระแสในเวลาเดียวกัน และคำนวณกำลังไฟฟ้าเป็นหน่วยวัตต์ออกมา ดังภาพที่ 2-11 แสดงการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของจอคอมพิวเตอร์ขนาด 17" โดยใช้ Power meter



ภาพที่ 2-11 การใช้ Power Meter วัดค่ากำลังไฟฟ้าของจอคอมพิวเตอร์ 17" (ที่มา Leonics Co., Ltd.)

เราสามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับของจอคอมพิวเตอร์ขนาด 17" ในหน่วยของ วีโอ (VA) ได้เช่นกัน โดยวัดค่าแรงดัน (RMS) และค่ากระแส (RMS) แล้วนำมาคูณกัน และคำนวณกำลังไฟฟ้าเป็นหน่วยวีเอ ดังตัวอย่างในภาพที่ 2-12 ซึ่งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ 229.3 V และค่า

กระแสไฟฟ้าได้ 1.10 A ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าในหน่วย VA จะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าคูณกับ
ค่ากระแสได้ 252.23 VA



ภาพที่ 2-12 การวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าของจอคอมพิวเตอร์ขนาด 17" (ที่มาจาก Leonics Co., Ltd.)

2.1.2 ระบบเครือข่ายไร้สาย

การเชื่อมต่อถึงกันเป็นเครือข่ายแบบไร้สายโดยทั่วไปจะใช้คลื่นความถี่ที่ถูกกำหนดขึ้นตามมาตรฐานแบบต่าง ๆ ปัจจุบันมีมาตรฐานที่ได้รับการรับรองจากสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (The Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) หลายมาตรฐาน เช่น IEEE 802.11 WLAN , IEEE 802.15 Wireless PAN, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access (WiMAX) ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงการเชื่อมต่อไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และ IEEE 802.15 เพื่อให้ทราบถึงแนวทางในการเลือกใช้เครือข่ายสำหรับงานวิจัยนี้

IEEE 802.11 ใช้การส่งสัญญาณแบบคลื่นวิทยุที่ความถี่ 900 MHz, 2.4, 3.6, 5, และ 60 GHz โดยจะมีมาตรฐานที่อยู่ภายใต้กรอบของเทคโนโลยี IEEE 802.11 คือ

1. มาตรฐาน IEEE 802.11a หรือ Class a จะใช้คลื่นความถี่ 5 GHz ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลไร้สาย ทำความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) รองรับอัตราความเร็วของการส่งข้อมูล เท่ากับ 6 , 9 , 12 , 18 , 24 , 36 , 48 และ 54 Mbps อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสามารถปรับระดับให้ช้าลงเพื่อเพิ่มระยะทางการเชื่อมต่อให้มากขึ้นได้ แต่ข้อเสียคือ ที่ความถี่ 5 Ghz ในหลายประเทศไม่อนุญาตให้ใช้ รวมทั้งประเทศไทย และอุปกรณ์ไร้สายที่รองรับเทคโนโลยี IEEE 802.11a ไม่สามารถเข้ากันได้กับอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ได้ รวมทั้งอุปกรณ์ของ IEEE 802.11a ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b ด้วย

2. มาตรฐาน IEEE 802.11b หรือ Class b จะใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลไร้สาย ทำความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary

Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุด โดยย่านความถี่ที่ใช้เป็น ISM (Industrial, Scientific and Medical) Band จากระดับความเร็วที่ค่อนข้างต่ำ คือทำได้เพียง 11 Mbps เท่านั้น เมื่อเทียบกับระบบ LAN แบบมีสาย ที่มาตรฐานปัจจุบันอยู่ที่ระดับ 100 Mbps และล่าสุดมาตรฐานความเร็ว 1 Gbps กำลังเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ จะเห็นว่า IEEE 802.11b ค่อนข้างช้ากว่ามาก ไม่เพียงเท่านั้น คลื่นความถี่วิทยุที่ 2.4 GHz ที่ IEEE 802.11b ใช้อยู่นั้นยังมีอุปกรณ์อื่นๆ ร่วมใช้งานอยู่ด้วยหลายชนิด เช่น โทรศัพท์ไร้สาย, Bluetooth และเตาไมโครเวฟ ที่สำคัญแต่ละผลิตภัณฑ์มีความสามารถทำงานร่วมกันได้ ซึ่งหากมีอุปกรณ์เหล่านี้ทำงานอยู่ใกล้ๆ กับเครือข่าย IEEE 802.11b ก็จะทำให้ความเร็วในการรับส่งข้อมูลช้าลง แต่จุดเด่นคือการใช้ความถี่คลื่นวิทยุที่ค่อนข้างต่ำ เพียง 2.4 GHz นั้นทำให้ IEEE 802.11b มีระยะทางการติดต่อระหว่างอุปกรณ์ค่อนข้างไกล ทำให้ชุดเครือข่ายไร้สายแบบ IEEE 802.11b ไม่จำเป็นต้องมีจุดรับส่งสัญญาณ หรือที่เรียกกันว่า Access Point หรือ Hot Spot มาก ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ดี มาตรฐานนี้มีระบบเข้ารหัสข้อมูลแบบ WEP ที่ 128 บิต

3. มาตรฐาน IEEE 802.11g หรือ Class g จะใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลไร้สาย ทำความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ได้รับการพัฒนาจากการนำเอาเทคโนโลยี OFDM ของ 802.11a มาพัฒนาจนทำให้ได้ความเร็วที่สูงกว่ามาตรฐาน 802.11b ซึ่ง 802.11g สามารถปรับระดับความเร็วในการสื่อสารลงเหลือ 2 Mbps ได้ตามสภาพแวดล้อมของเครือข่ายที่ใช้งาน จุดเด่นที่สำคัญของ 802.11g ก็คือสามารถใช้งานร่วมกับ 802.11b ที่มีอยู่แล้วได้

4. มาตรฐาน IEEE 802.11n หรือ Class n จะใช้คลื่นความถี่ คือ 2.4 GHz และ 5 GHz ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลไร้สาย ทำความเร็วสูงสุดที่ 150 Mbps และ 300 Mbps มีความสามารถในการส่งคลื่นสัญญาณ ได้ระยะประมาณ 70 เมตรในโครงสร้างปิด และ 250 เมตรในที่โล่งแจ้ง เพิ่มความสามารถในการกันสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ความถี่ 2.4GHz เหมือนกัน และสามารถรองรับอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ได้ ซึ่งช่วงระยะหลังได้มีการพัฒนาการส่งสัญญาณแบบ "Dual-Band" หรือการใช้คลื่นความถี่ในย่าน 2.4 GHz และ 5 GHz ในการรับส่งสัญญาณ (จะใช้เสามากกว่า 1 ต้นขึ้นไป) ทำให้สามารถทำความเร็วได้สูงถึง 300 + 300 Mbps หรือเรียกสั้นๆ ว่า N600

5. มาตรฐาน IEEE 802.11-2012 ในปี 2007 กลุ่มงาน TGmb ได้รับการอนุมัติให้รวบรวมการแก้ไขทั้งหมดให้เป็นเวอร์ชันที่เรียกว่า REVmb หรือ 802.11mb ที่ประกอบด้วย 802.11k, r, y, n, w, p, z, v, u, s ตีพิมพ์วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2555

6. มาตรฐาน IEEE 802.11ac หรือ Class ac จะใช้คลื่นความถี่ 5 GHz ในการรับส่งข้อมูลไร้สายเป็นมาตรฐานที่ให้ Throughput กับ Wireless LAN แบบหลายสถานี สูงกว่าที่อย่างน้อย 1 Gbps และสำหรับลิงค์เดี่ยวที่อย่างน้อย 500 Mbps โดยการใช้ RF แบนด์วิธที่กว้างกว่า (80 หรือ 160 MHz) สตรีมมากกว่า (สูงถึง 8 สตรีม) และ Modulation ที่ความจุสูงกว่า (สูงถึง 256 QAM) โดย Class ac เป็นมาตรฐานที่ได้รับการรับรองจาก IEEE ให้เป็นมาตรฐาน เมื่อ ปี ค.ศ. 2013 ซึ่งมาตรฐานในการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายของ Class ac สามารถทำความเร็วได้สูงถึง 6,930 Mbps หรือประมาณ 6.93 Gbps

7. มาตรฐาน IEEE 802.11ad หรือ Class ad หรือ "WiGig" เกิดจากการผลักดันจากผู้ผลิตฮาร์ดแวร์ ในวันที่ 24 กรกฎาคม 2012 Marvell และ Wilocity ได้ประกาศการเป็นคู่ค้าใหม่เพื่อนำ Wi-Fi Solution แบบ Tri-Band ใหม่ออกสู่ตลาด โดยการใช้ความถี่ที่ 60 GHz Throughput ทางทฤษฎีสูงถึง 7 Gbps มาตรฐานนี้ได้ออกสู่ตลาดในช่วงต้นปี 2014

โดยปกติแล้ว การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สาย จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สองชิ้น นั่นคือ

1. Access Point คือ ตัวกลางที่ช่วยในการติดต่อระหว่าง ตัวรับ-ส่งสัญญาณ Wireless ของผู้ใช้กับ Router ผ่านทางสายนำสัญญาณที่ทำจากทองแดงที่ได้รับการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย เช่น สายแลน หรือสายโทรศัพท์ ADSL หรือผ่านทางสายใยแก้วนำแสง

2. ตัวรับ-ส่งสัญญาณ Wireless ทำหน้าที่รับ-ส่ง สัญญาณระหว่างตัวรับส่งแต่ละตัว หรือระหว่างตัวลูกข่ายกับ Access Point

2.1.3 โมดูลเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย ESP8266

ESP8266 เป็นโมดูลเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายขนาดเล็ก ราคาถูก ใช้มาตรฐานการทำงาน ของระบบเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 (b/g/n) ในย่านความถี่ 2.4 GHz มีซีพียูชนิด 32-bit RISC ทำงานที่ความเร็ว 80 MHz รองรับการเข้ารหัสเพื่อยืนยันตัวตนแบบ WEP และ WPA/WPA2 มีพื้นที่ใช้งาน 512 KiB – 4 MiB (รองรับได้ถึง 16 MiB) ผลิตชิป (Chip) โดยบริษัท Espressif System และมีผู้ร่วมผลิตหลายบริษัทพัฒนาบอร์ดที่ใช้ชิปจากบริษัท Espressif System หนึ่งในนั้นที่สำคัญคือบริษัท ShenZhen AI-thinker ผู้ผลิตโมดูลในชื่อ ESP-xx [13]

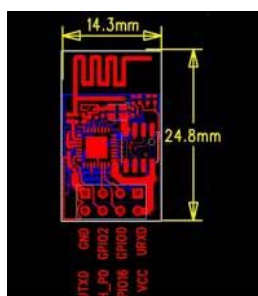
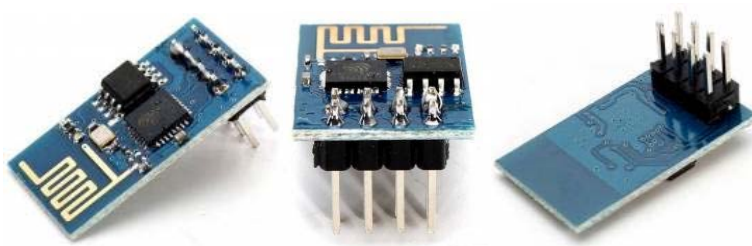
ความสามารถและคุณลักษณะที่สำคัญ

- 802.11 b / g / n
- Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP
- Built-in TCP / IP protocol stack

- Built-in TR switch, balun, LNA, power amplifier and matching network
- Built-in PLL, voltage regulator and power management components
- 802.11b mode + 19.5dBm output power
- Support antenna diversity
- off leakage current is less than 10uA
- Built-in low-power 32-bit CPU: can double as an application processor
- SDIO 2.0, SPI, UART
- STBC, 1x1 MIMO, 2x1 MIMO
- A-MPDU, A-MSDU aggregation and the 0.4 Within wake
- 2ms, connect and transfer data packets
- standby power consumption of less than 1.0mW (DTIM3)

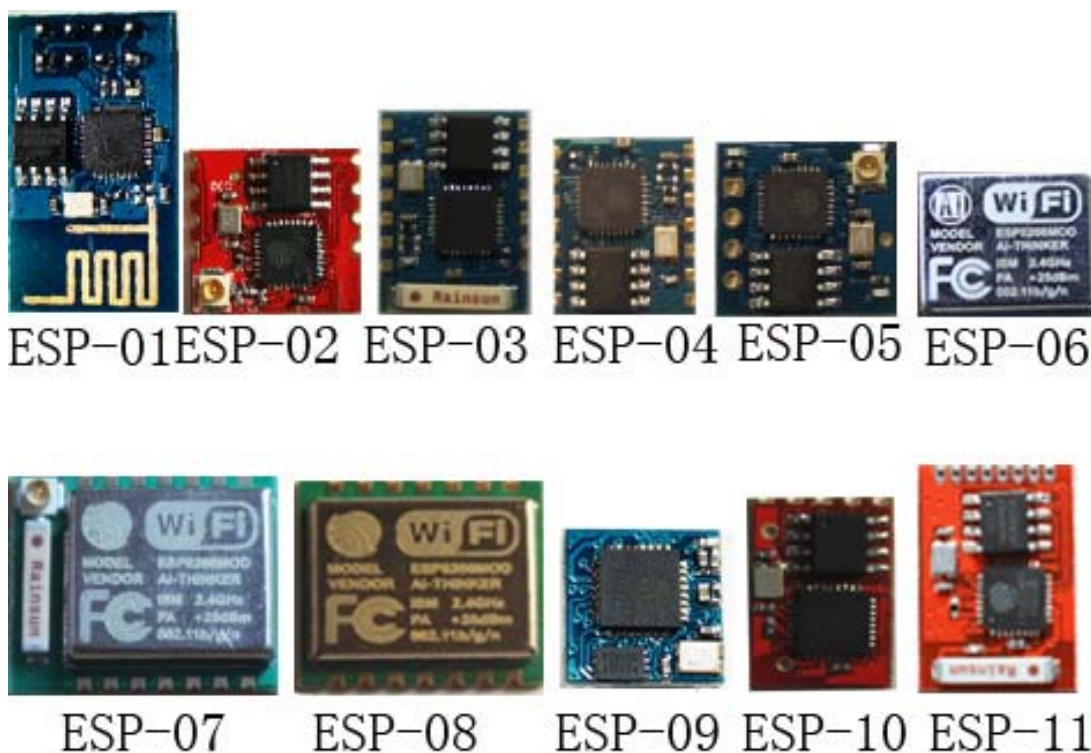
โมดูล ESP8266 ที่นิยมใช้งาน

ESP-01 ดังภาพที่ 2-13 เป็นรุ่นที่เหมาะสมสำหรับการเรียนรู้ มีราคาถูกและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานสำหรับโปรแกรมเล็ก ๆ มีขาทั้งหมด 8 ขา ได้แก่ VCC CH_PD Reset Rx Tx GPIO0 GPIO2 และ GND สามารถปรับเปลี่ยนเฟิร์มแวร์ได้โดยการต่อขา GPIO0 ลงกราวด์เพื่ออยู่ในโหมดการโปรแกรมเฟิร์มแวร์ ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้โมดูลนี้ในการรับ-ส่งข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์กับเครื่องแม่ข่ายส่วนกลาง



ภาพที่ 2-13 โมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266 (ESP-01)

นอกเหนือจาก ESP-01 แล้วยังมีโมดูลเครือข่ายไร้สายอื่น ๆ อีกเช่น ESP-03 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับรุ่น ESP-01 แต่มีจำนวนขาเพิ่มขึ้น มีขาสำหรับเสาอากาศอยู่ที่ขา 14 เพื่อสามารถต่อเสาอากาศเพิ่มทำให้การรับ-ส่งสัญญาณดีขึ้น ESP-07 เป็นโมดูลที่มีแผ่นเหล็กครอบเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ESP-12 มีความคล้ายคลึงกับ ESP-07 แต่เสาอากาศถูกเปลี่ยนเป็นแบบลายทองแดงบน PCB มีความเร็วและความเสถียรในการทำงานเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2-14 โมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266 แบบต่าง ๆ

2.1.4 ความรู้เบื้องต้นระบบสมองกลฝังตัว Embedded System (Arduino)

ระบบสมองกลฝังตัว คือระบบประมวลผล ที่ใช้ชิปหรือไมโครโปรเซสเซอร์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ เป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ฝังไว้ในเครื่องใช้ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความฉลาด ความสามารถให้กับอุปกรณ์เหล่านั้นผ่านซอฟต์แวร์ ซึ่งต่างจากระบบประมวลผลที่เครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป ระบบฝังตัวถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในยานพาหนะ เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านและสำนักงาน อุปกรณ์ เทคโนโลยีเครื่องกลและของเล่นต่าง ๆ คำว่าระบบฝังตัวเกิดจากการที่ระบบนี้เป็นระบบประมวลผลเช่นเดียวกับระบบคอมพิวเตอร์ แต่ว่าระบบนี้จะ

ฝังตัวลงในอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ไม่ใช่เครื่องคอมพิวเตอร์ ในปัจจุบันระบบสมองกลฝังตัวได้มีการพัฒนา
มากขึ้น โดยในระบบสมองกลฝังตัวอาจจะประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ
ไมโครโปรเซสเซอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ระบบสมองกลฝังตัวที่เห็นได้ชัดเช่น โทรศัพท์มือถือ และใน
ระบบสมองกลฝังตัวยังมีการใส่ระบบปฏิบัติการต่าง ๆ แตกต่างกันไปอีกด้วย ดังนั้น ระบบสมอง
กลฝังตัวอาจจะทำงานได้ตั้งแต่ควบคุมหลอดไฟจนไปถึงใช้ในยานอวกาศ

Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ระบบเปิด (open source) ที่มีชุดพัฒนาของ Arduino
โดยเฉพาะ ภายในชุดพัฒนาของ Arduino นี้ จะมีไลบรารีฟังก์ชันภาษาซีสำหรับติดต่อกับฮาร์ดแวร์
ไว้ให้เป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงานอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ง่าย [14] ซึ่งข้อดี
ของ Arduino มีดังนี้

- ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับบอร์ดอื่น
- ทำงานได้หลายแพลตฟอร์ม ทั้งบนวินโดวส์, Macintosh OSX, และ บนลินุกซ์
ในขณะที่บอร์ดอื่นส่วนใหญ่ทำงานได้เฉพาะบนวินโดวส์
- ใช้งานง่าย มีโปรแกรมพัฒนาที่ไม่ซับซ้อน และมีความสามารถครบความต้องการ
ของนักพัฒนามืออาชีพ
- เปิดเผยแพร่โค้ด และ นำไปพัฒนาต่อยอด และสามารถเพิ่มเติมความสามารถผ่าน
C++ library, ถ้าต้องการศึกษาให้ลึกซึ้ง สามารถเข้าไปเล่น AVR C ซึ่งเป็นต้นแบบ
ของ Arduino, และสามารถเพิ่มเติม AVR - C โค้ดได้โดยตรงถ้าต้องการ
- เปิดเผยแพร่ และ นำไปพัฒนาขยาย hardware ได้ Arduino ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
ของ Atmel เบอร์ ATMEGA8 และ ATMEGA168 วงจรของบอร์ดดีพิมพ์แบบ
เปิดเผยวงจรภายใต้ Creative Commons License สามารถนำไปดัดแปลงต่อขยาย
และเพิ่มประสิทธิภาพ เพื่อศึกษาการทำงานของมันได้

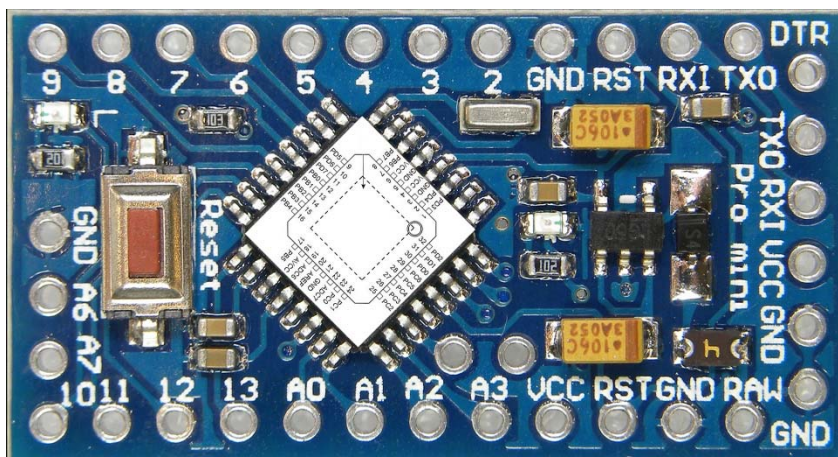
2.1.5 คุณสมบัติ Arduino Pro-mini

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ ระบบสมองกลฝังตัว Arduino Embedded Board ที่ชื่อว่า Pro-
mini [15] (ดังภาพที่ 2-15) เป็นระบบสมองกลฝังตัวขนาดเล็ก ที่มีความสมบูรณ์ใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR (ATmega328) ซึ่งมีคุณสมบัติตามรายละเอียดดังนี้

- หน่วยความจำโปรแกรมแบบ FLASH ขนาด 32 กิโลไบต์
- หน่วยความจำข้อมูลแบบ SRAM ขนาด 2 กิโลไบต์
- หน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 1 กิโลไบต์
- สนับสนุนการเชื่อมต่อแบบ I2C bus และ วงจรสื่อสารอนุกรม

- ช่องสัญญาณสำหรับสร้าง Pulse Width Modulation (PWM) จำนวน 8 ช่อง
- วงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิตในตัวจำนวน 6 ช่อง
- ทำงานได้ตั้งแต่ว่านแรงดัน 5-12 Volts
- ความถี่ใช้งานสูงสุด 16 MHz



รูปที่ 2-15 Arduino Pro-mini

2.1.6 การโปรแกรมระบบสมองกลฝังตัว

ในการโปรแกรมลงไปในตัว Arduino นั้นจะใช้โปรแกรมที่มากับผู้ผลิตที่ชื่อว่า Arduino IDE ใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งภาษาของ Arduino จะอ้างอิงตามภาษา C/C++ จึงอาจกล่าวได้ว่าการเขียนโปรแกรมสำหรับ Arduino ก็คือการเขียนภาษาซี โดยเรียกใช้ฟังก์ชันและไลบรารีที่ทาง Arduino ได้เตรียมไว้ให้แล้ว ซึ่งโปรแกรมของ Arduino แบ่งเป็นสองส่วนคือ void setup() และ void loop()

```

Production | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help
Production
#include "SoftwareSerial.h"
#include "Statistic.h"
#include "EmonLib.h"
EnergyMonitor emon1;

SoftwareSerial mySerial(3, 2); // RX, TX
Statistic elecStats;

const int currentPin = 0; // Analog A3
int i;

void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);
  mySerial.begin(9600);
  analogReference(EXTERNAL);
  emon1.current(currentPin, 15); // Current: input pin, calibration. For SCT-013-030 Cur Const= Rat
  // emon1.current(3, 29); // Current: input pin, calibration. For SCT-013-030 Cur Const= Ratio/Burc
  i=0;
  Serial.println("");
  mySerial.println("");
  Serial.println(",,I,MIN,MAX,MEAN,AVG,DEV,IRMS,");
  mySerial.println(",,I,MIN,MAX,MEAN,AVG,DEV,IRMS,");
  elecStats.clear(); //explicitly start clean
}

void loop(void)
{
  elecStats.add(analogRead(currentPin));
  // Show Output
  if (elecStats.count() == 4000)
  {
    i = i +1;
    double Irms = emon1.calcIrms(1480); // Calculate Irms only
    // -- Serial to Computer --//
    Serial.print("#,");
    Serial.print(i);
    Serial.print(",");
  }
}
15 Arduino Leonardo on COM11

```

รูปที่ 2-16 การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้เครื่องมือ Arduino IDE

โดยฟังก์ชัน `setup()` จะทำงานเพียงครั้งเดียวโดยเริ่มโปรแกรม ใช้ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของการทำงาน ส่วนฟังก์ชัน `loop()` เป็นส่วนที่ทำงานตามคำสั่งในฟังก์ชันนี้ต่อเนื่องกันตลอดเวลา เช่น อ่านอินพุต ประมวลผล ส่งงานเอาต์พุต ฯลฯ โดยส่วนกำหนดค่าเริ่มต้นเช่น ตัวแปร จะต้องเขียนที่ส่วนหัวของโปรแกรม ก่อนถึงตัวฟังก์ชัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงตัวพิมพ์เล็ก พิมพ์ใหญ่ ของตัวแปรและชื่อฟังก์ชันให้ถูกต้อง (ศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่

<http://arduino.cc/en/Tutorial>)

2.1.7 การแปลงค่าสัญญาณ Analog เป็น Digital

ในงานควบคุมหลายประเภท เช่น เซอร์โวล์จะให้ค่าเป็นแรงดัน (หรือกระแส) ไฟฟ้าที่แปรผันตามตัวแปรที่เราต้องการวัดค่า ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ สเตนเกจ (stain gauge) หรือ ไมโครโฟน ในการที่จะประมวลผลสัญญาณนั้น ๆ โดยคอมพิวเตอร์จะต้องทำการสุ่มค่าของสัญญาณเป็นค่าตัวเลขที่สามารถเก็บในหน่วยความจำ อุปกรณ์ที่ใช้ทำหน้าที่นี้ก็คือ ADC (Analog-to-Digital Converters) หรือที่เรียกว่า ระบบการแปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ

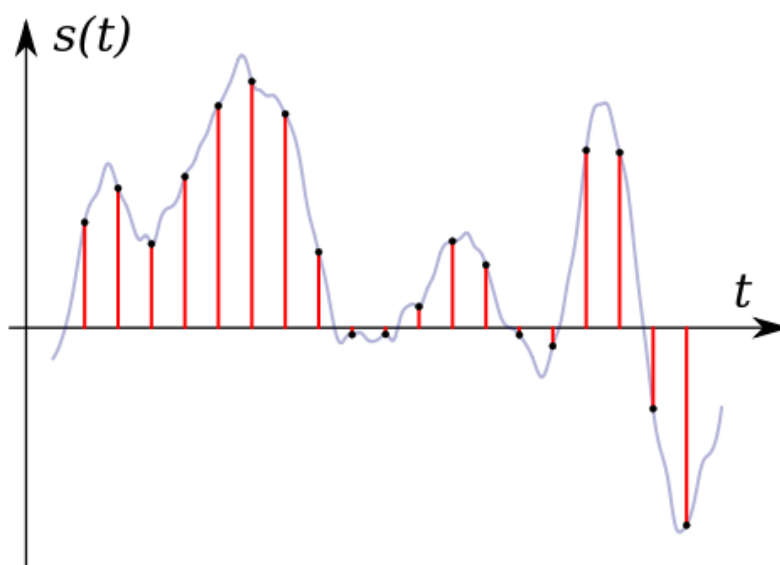
โดยทั่วไปไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีอุปกรณ์ ADC บรรจุอยู่ในชิปแล้ว จึงมักไม่มีความจำเป็นจะต้องหาอุปกรณ์มาเพิ่มภายนอก วิธีการทำ ADC มีหลายประเภท เช่น แฟลช (Flash) ประมาณค่าตามลำดับ (Successive Approximation) ความชันคู่ (Dual Slope) หรือ ซิกมา-เดลตา (Sigma-Delta) เป็นต้น โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดแตกต่างกันเฉพาะ โครงสร้างภายในเท่านั้น ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวเพียงเฉพาะเนื้อหาที่สำคัญในการใช้งาน

ความเร็วของ ADC ในการสุ่มสัญญาณจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 2 เท่าของ Bandwidth สัญญาณแอนะล็อก มิฉะนั้นจะเกิดปัญหาที่เรียกว่า เอเลียส คือ ได้สัญญาณที่แตกต่างไปจากสัญญาณจริง ถ้าหากว่าไม่สามารถสุ่มสัญญาณด้วยอัตราอย่างน้อย 2 เท่าได้ จะต้องใช้วงจรฟิลเตอร์ต้านเอเลียส (Anti-aliasing filter) เข้าช่วย ซึ่งก็คือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่มีความถี่ตัดเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสุ่มนั่นเอง นอกจากนั้นในทางปฏิบัติโมดูล ADC จะไม่สามารถทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกได้อย่างทันทีทันใด ดังนั้นที่ภาคอินพุตจะต้องมีวงจรช่วยในการคงค่าระดับสัญญาณไว้ จนกว่าการแปลงจะเสร็จสิ้น ตัวช่วยนี้เรียกว่า วงจรสุ่มและคงค่า (Sample and Hold)

ความละเอียด (Resolution) คือ จำนวนค่าตัวเลขดิจิตอลทั้งหมดที่สามารถแทนได้ในย่านของสัญญาณแอนะล็อกที่ใช้งาน เนื่องจากค่าเหล่านี้ถูกเก็บในรูปแบบของตัวเลขไบนารี ดังนั้นความละเอียดจะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของ ADC ซึ่ง ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้มี ADC ขนาด 10 บิต สามารถเก็บค่าได้ $2^{10} = 1024$ ระดับ โดยจะเป็นค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1023 ความละเอียดสามารถระบุได้เป็นค่าแรงดันที่แตกต่างกันในแต่ละระดับก็ได้ สมมุติว่าย่านของแรงดันแอนะล็อก คือ 5 โวลต์ เมื่อใช้ ADC ขนาด 10 บิต จะเก็บค่าได้ 1024 ระดับ ดังนั้นค่าความละเอียดในรูปแบบของค่าแตกต่างแรงดันน้อยสุดที่วัดได้คือ $5/1024 = 4.88$ มิลลิโวลต์ ต่อ หนึ่งระดับ

Sampling rate เป็นอัตราที่มักจะถูกใช้กับ Analog to Digital Conversion ซึ่ง Sampling rate เป็นอัตราการอ่านค่าสัญญาณ Analog มาเปลี่ยนเป็น Digital Code (ดังตัวอย่างในภาพที่ 2-17) สำหรับคุณสมบัติของ Analog to Digital Conversion ค่าที่น้อยที่สุดของ Sampling rate จะมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ Analog ที่สูงที่สุด ซึ่ง Sampling rate ที่น้อยที่สุดนี้ มักจะเรียกเป็น Nyquist sampling rate ถ้า Sampling frequency น้อยกว่าสองเท่าของความถี่ Analog ที่สูงที่สุด จะเกิด

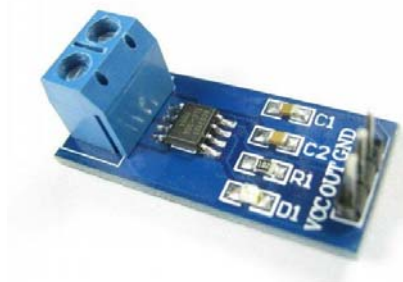
Aliasing error ขึ้น Aliasing error จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของความถี่สูงของสัญญาณ เนื่องจากตัว Spectral ของสัญญาณที่ถูก Sampling ซึ่ง Aliasing error เป็นปรากฏการณ์ ที่มีสาเหตุมาจากส่วนประกอบของความถี่ที่เกิดขึ้นจากสัญญาณ Sampling จะถูกสอดแทรกจากความถี่ของสัญญาณที่จะถูก Sampling เราสามารถที่จะหลีกเลี่ยง Aliasing error ได้โดยการใช้ความถี่ Sampling ที่น้อยกว่า 2 เท่าของ Analog frequency ที่สูงที่สุด



รูปที่ 2-17 อัตราการสุ่มตัวอย่าง

2.1.8 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (ACS712 20A)

ACS712 Current Sensor Carrier $\pm 20A$ เป็น Sensor ตรวจวัดกระแสใช้ IC เบอร์ ACS712 วัดได้ทั้งกระแสไฟ DC และ AC สามารถวัดกระแสที่ไหลได้ 2 ทิศทาง ทั้งค่าบวกและค่าลบ ที่มีขนาด $20A (\pm 20A)$ ให้ค่า Output เป็น Analog Voltage 100 mV/A โดยมี Center ที่ 2.5 V (มีค่า typical error น้อยกว่า 1.5%) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับสัญญาณให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น IC เบอร์ ACS712 ซึ่งใช้หลักการของ Hall effect sensor ในการตรวจจับกระแสไฟฟ้า เมื่อวัดไฟกระแสสลับ output ที่ได้ออกมาจะเป็น VAC ที่วิ่งอยู่บน $2.5V \text{ DC}$ ซึ่งจะใช้ Controller ในการ ตรวจจับค่า VAC ที่ได้แล้วแปลงกลับเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor) ACS712

2.1.9 เทคนิคการจำแนกข้อมูล (Classification Technic)

นาอิว เบย์ (Naïve Bayes)

Naïve-Bayes เป็นเทคนิคที่ถูกตั้งชื่อตาม Thomas Bayes (1702-1761) เทคนิคแบบ Naïve-Bayes ใช้ทฤษฎี Bayes Theorem ในการคำนวณความน่าจะเป็นซึ่งถูกใช้ในการทำนายผล เมื่อทำการวิเคราะห์กรณีใหม่ การทำนายผลทำได้โดยการรวมผลของตัวแปรอิสระ (independent variable) ที่มีต่อตัวแปรตาม (dependent variable) Naïve-Bayes เป็นเทคนิคในการจำแนกประเภทข้อมูล (classification) ที่ทั้งสามารถคาดการณ์ผลลัพธ์ได้และสามารถอธิบายได้ด้วย มันจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระแต่ละตัวกับตัวแปรตามเพื่อใช้ในการสร้างเงื่อนไข ความน่าจะเป็นสำหรับแต่ละความสัมพันธ์ ในทางทฤษฎีแล้วการทำนายผลของ Naïve-Bayes จะถูกต้องถ้าตัวแปรอิสระทั้งหมดเป็นอิสระต่อกัน ไม่ขึ้นกับตัวแปรอิสระตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมีไม่มากนักที่ตัวแปรอิสระทั้งหมดเป็นอิสระต่อกัน ตัวอย่างเช่น ข้อมูลเกี่ยวกับประวัติบุคคล ซึ่งมักประกอบด้วยรายละเอียดย่อยมากมาย อาทิ น้ำหนัก, การศึกษา, รายได้ เป็นต้น จะเห็นว่ารายละเอียดเหล่านี้มักขึ้นอยู่กับอายุ ในกรณีนี้การใช้ Naïve-Bayes จะต้องคำนึงถึงผลของอายุให้มาก ๆ นอกจากนี้ เทคนิคแบบ Naïve-Bayes ยังไม่รองรับข้อมูลที่เป็นข้อมูลต่อเนื่อง (continuous data) ด้วย ดังนั้น ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตามที่มีค่าเป็นค่าต่อเนื่องจะต้องถูกแบ่งเป็นช่วงเช่น ถ้ามีตัวแปรอิสระที่เป็นค่าของอายุก็อาจแปลงค่าเหล่านั้นให้เป็นช่วงแคบ ๆ อาทิ “ต่ำกว่า 20 ปี”, “20-40 ปี”, “40 ปีขึ้นไป” เป็นต้น ซึ่งการแบ่งช่วงนั้น ถ้าแบ่งไม่เหมาะสม ก็จะมีผลต่อคุณภาพของแบบจำลองที่สร้างขึ้น แต่ถ้าไม่คำนึงถึงข้อจำกัดนี้แล้ว เทคนิคแบบ Naïve-Bayes สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีและรวดเร็วได้ ความง่ายและความเร็วทำให้เทคนิคนี้เป็นเครื่องมือที่ดีในการสร้างแบบจำลองและหารูปแบบความสัมพันธ์ที่ไม่ซับซ้อน

Naive Bayes classifier คือตัว classifier ที่ถูกสร้างขึ้น โดยหลักความน่าจะเป็น (probability) โดยจะจำแนกข้อมูลโดยใช้กฎของ Bayes และใช้สมมุติฐานที่ว่า ทุก feature จะเป็น

อิสระต่อกันโดยมีเงื่อนไข (conditional independent) นั่นก็คือเมื่อเรารู้ class ของ feature นั้น ซึ่งสมมุติฐานนี้จะทำให้เราสามารถแก้ปัญหาได้ง่ายขึ้นมาก

กฎของ Bayes โดยกฎนี้จะมองความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นของ 2 เหตุการณ์ ยกตัวอย่างว่าเป็น เหตุการณ์ A กับ เหตุการณ์ B เวลาเราจะกล่าวถึงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ A เราจะเขียน $P(A)$ ส่วนของ B เราจะเขียน $P(B)$ ส่วนความน่าจะเป็นของ B เมื่อเรารู้ว่ามีเหตุการณ์ A เกิดขึ้นก่อนคือ $P(B | A)$ และความน่าจะเป็นของ A เมื่อเรารู้ว่ามีเหตุการณ์ B เกิดขึ้นก่อนคือ $P(A | B)$ กฎของ Bayes แสดงดังสมการที่ 2.2

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)} \quad (2.2)$$

แปลความได้ว่า เราสามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ $P(A | B)$ ได้ ถ้าเราสามารถรู้ได้ว่ามีเหตุการณ์ B เกิดขึ้น เราจะเรียก $P(A)$ ว่าเป็น prior probability ซึ่งก็คือค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ A ที่ทราบได้จากข้อมูลที่มีอยู่ ส่วน $P(A | B)$ เรียกว่า posterior probability ซึ่งก็คือค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ A หลังจากที่เรารู้ว่ามีเหตุการณ์ B เกิดขึ้น

ในกรณีที่เหตุการณ์ C ขึ้นกับเหตุการณ์หลาย ๆ เหตุการณ์คือ F_1, F_2, \dots, F_n คือค่าความน่าจะเป็นคำนวณได้จากสมการ 2.3

$$P(C | F_1, F_2, \dots, F_n) = \frac{P(F_1, F_2, \dots, F_n | C)P(C)}{P(F_1, F_2, \dots, F_n)} \quad (2.3)$$

โดย C แทนคลาส และ F_i แทน feature ลำดับที่ i เราจะพิจารณาสมมุติฐานของ Naive Bayes ที่ว่า ทุก feature จะ conditional independent เมื่อเรารู้คลาส และจะสร้างโมเดลสำหรับนำไปจำแนกข้อมูลตามค่าความน่าจะเป็น posterior ที่มากที่สุด หรือคลาสไหนให้ค่า posterior มากสุด โดยสมการที่ใช้ในการจำแนกแสดงดังสมการที่ 2.4

$$nb_classify(f_1, f_2, \dots, f_n) = \underset{c}{\operatorname{argmax}} p(C = c) \prod_{i=1}^n p(F_i = f_i | C = c) \quad (2.4)$$

ดีซีชันทรี (Decision Tree)

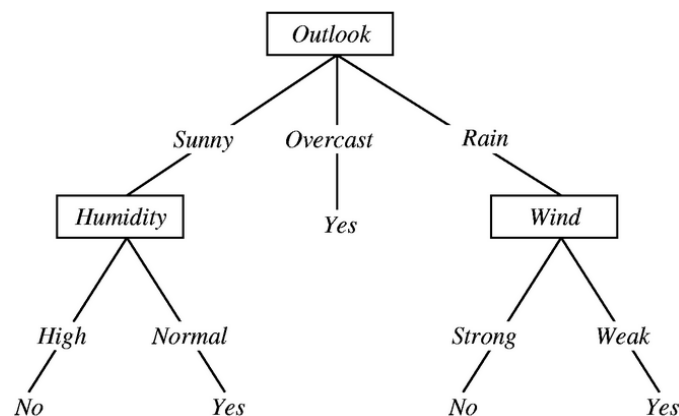
เป็นแบบจำลองที่มีลักษณะคล้ายกับต้นไม้ จะมีการสร้างกฎต่างๆ ขึ้นเพื่อใช้ในการตัดสินใจ ดีซีชันทรีเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากความไม่ซับซ้อนของอัลกอริทึม ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถตีความและเข้าใจลักษณะของรูปแบบข้อมูล (Pattern) ได้ง่าย เพราะ มีการแยกออกเป็นกฎ หรือข้อกำหนดต่าง ๆ แต่ก็ยังคงมีปัญหาในเรื่องของการให้น้ำหนักความน่าเชื่อถือหรือการให้ค่าน้ำหนักในแต่ละ โหนด (Node) ซึ่งถ้าให้น้ำหนักผิดไป อาจจะทำให้การตีความผิดไปได้

รูปแบบกฎที่ได้จาก Decision tree อยู่ในรูปแบบ “IF - THEN” เช่น

“If Income = High and Married = No THEN Risk = Poor”

“If Income = High and Married = Yes THEN Risk = Good”

Decision tree เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างแพร่หลาย เนื่องจากผู้ใช้สามารถทำความเข้าใจผลลัพธ์ได้ง่าย เทคนิค Decision tree จะจำกัดข้อมูลที่เป็นตัวแปรตาม (Dependent variable) 1 ตัวต่อ 1 แบบจำลอง ถ้าต้องการทำนายตัวแปรตามหลาย ๆ ตัวจะต้องสร้างแบบจำลองสำหรับตัวแปรแต่ละตัว เทคนิคแบบ Decision tree ส่วนใหญ่ไม่รองรับข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous data) จะต้องมี การแบ่งให้เป็นข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete data) เสียก่อน เช่น Chi-squared Automatic Interaction Detection (CHAID) , Classification and Regression Trees (CART) , C4.5 และ C5.0 ขั้นตอนวิธีเหล่านี้ส่วนมากมักเหมาะกับปัญหาแบบ classification บางตัวปรับให้ใช้ได้กับปัญหาแบบ regression เช่น Classification and Regression Trees (CART) ซึ่งรองรับทั้งปัญหาในแบบ classification และ regression นอกจากนี้ยังรองรับข้อมูลในแบบที่ต่อเนื่องด้วย ตัวอย่างแผนภาพต้นไม้ตัดสินใจแสดงดังภาพที่ 2-19



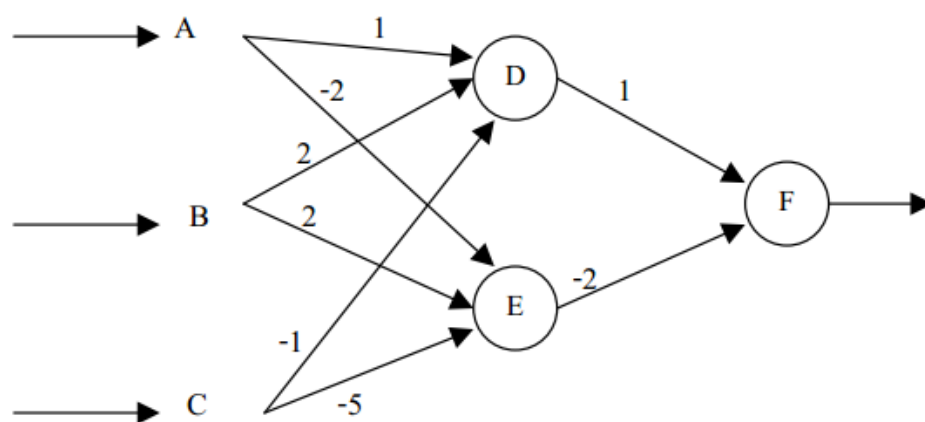
รูปที่ 2-19 ตัวอย่างแผนภาพต้นไม้

นิวรอนเน็ตเวิร์ก (Neural Network)

นิวรอนเน็ตเวิร์ก คือระบบที่มีการประมวลผลข้อมูลที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็น โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเรียนรู้ โดยเลียนแบบการทำงานของสมอง และจะเรียนรู้จากชุดข้อมูลตัวอย่างสอน (Training data) นิวรอนเน็ตเวิร์ก ประกอบด้วยหน่วยความจำจำนวนมากเรียกว่า นิวรอน (Neurons) เซล (Cells) หรือ โหนด (Nodes) แต่ละนิวรอนต่อกันโดยคอนเน็กชันลิงก์ (Connection Link) ที่มีค่าน้ำหนักของมันอยู่ ในแต่ละการเชื่อมต่อ โดยค่าน้ำหนักจะแสดงรายละเอียดที่เน็ตเวิร์กใช้ในการแก้ปัญหา โดยนิวรอนเน็ตเวิร์กถูกใช้ในการแก้ปัญหาอย่างกว้างขวาง เช่น การเก็บและการเรียกข้อมูล การแยกประเภทของข้อมูล การเปลี่ยนจากรูปแบบของอินพุต (Input) ให้อยู่ในรูปแบบของเอาต์พุต (Output) ความสามารถในการตรวจสอบรูปแบบของข้อมูลที่คล้ายคลึงกับความคิดของมนุษย์ เป็นต้น ถึงแม้ว่านิวรอนเน็ตเวิร์ก สามารถ นำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายๆ ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่นิวรอนเน็ตเวิร์ก ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ดังนี้

1. นิวรอนเน็ตเวิร์กเป็นวิธีที่ยากต่อการทำความเข้าใจใน โมเดลที่ถูกผลิตออกมา
2. นิวรอนเน็ตเวิร์กมีคุณสมบัติที่ไวต่อรูปแบบของอินพุต ถ้าเราแทนข้อมูลด้วยรูปแบบที่ แตกต่างกันก็จะผลิตผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกมา ดังนั้นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับข้อมูลจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญส่วนหนึ่ง

Neural networks สามารถใช้ได้ดีกับปัญหา classification, regression และ clustering เทคนิคนี้มักถูกเรียกว่า “black box” เนื่องจากการทำงานของมันมีความซับซ้อนมากกว่าเทคนิคอื่นๆ ก่อนข้างมาก ผลลัพธ์ที่ได้ก็ยากต่อการทำความเข้าใจ



รูปที่ 2-20 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม

ภาพที่ 2-20 แสดงตัวอย่างของการใช้เทคนิคแบบ Neural networks ในการวิเคราะห์ปัญหาความเสี่ยงของการให้กู้เงิน ซึ่งประกอบด้วย A, B, C เป็นจุดที่เป็นข้อมูลเข้า ซึ่งแทนตัวแปรอิสระหนี้สิน (Debt), รายได้ (Income) และสถานภาพสมรส (Married) โหนด D และ E เป็นโหนดในชั้นซ่อน (Hidden layer) ในขณะที่โหนด F เป็นผลลัพธ์ของการวิเคราะห์แทนตัวแปรตามคือ ความเสี่ยง (risk) และตัวเลขที่กำกับอยู่ตามเส้นลูกศรคือ ค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) เป็นต้น

ถึงแม้ว่าเทคนิคนี้จะทำงานได้ดีกับปัญหา classification, regression และ clustering ก็ตามแต่มันเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่าเทคนิคอื่น ความซับซ้อนและการไม่สามารถอธิบายได้ของผลลัพธ์ มักทำให้ผู้ใช้หลีกเลี่ยงเทคนิคนี้ อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ก็มีข้อดีที่สำคัญที่ไม่มีในเทคนิคอื่น ๆ ก็คือ เทคนิคนี้ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับชนิดของความสัมพันธ์ เช่น เทคนิคแบบ neural networks สามารถสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับสัดส่วนของตัวแปรอิสระ 2 ตัวได้ ซึ่งทำได้ยาก ถ้าใช้เทคนิคแบบ Decision tree หรือ Naïve-Bayes นอกจากนี้ เทคนิคแบบ Neural Networks ยังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ที่เป็นแบบตรีโกณมิติ (trigonometric) หรือ logarithmic ด้วย ในการใช้งานจริงนั้น เทคนิคแบบ Decision tree หรือ Naïve-Bayes อาจให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเพียงพอกับความต้องการ แต่ถ้าต้องการความแม่นยำมาก ๆ แล้ว เทคนิคแบบ Neural networks อาจเป็นหนทางที่ดีที่สุด ทางเดียวที่จะรู้ว่าควรใช้เทคนิคแบบ Neural networks หรือ ไม่ ก็คือ การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของแบบจำลองกับเทคนิคอื่น (Decision tree หรือ Naïve-Bayes) ถ้าไม่ได้ดีกว่ากันอย่างเห็นได้ชัด ก็ควรเลือกเทคนิคอื่น แต่ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองของเทคนิค Neural networks มีความเที่ยงตรงกว่าอย่างเห็นได้ชัด นั่นอาจหมายถึงเราต้องทำการปรับปรุงแบบจำลองของเทคนิค Decision tree หรือ บางทีการใช้เทคนิคแบบ Neural networks อาจเหมาะสมสำหรับปัญหานี้มากที่สุดก็ได้

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine)

วิธีการของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจัดเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านการรู้จำรูปแบบข้อมูล โดยอาศัยหลักการของการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อสร้างเส้นแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการสอนให้ระบบเรียนรู้ โดยเน้นไปยังเส้นแบ่งแยกแยกกลุ่มข้อมูลได้ดีที่สุด (Optimal Separating Hyperplane) สำหรับรากฐานเดิมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนถูกนำมาใช้กับข้อมูลที่เป็นเชิงเส้น แต่ในความเป็นจริงแล้วข้อมูลที่นำมาใช้ในระบบการสอนให้ระบบเรียนรู้ส่วนใหญ่มักเป็นข้อมูลแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำเคอร์เนลฟังก์ชันมาใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 แนวทางการวางอุปกรณ์ตรวจสอบการใช้พลังงานอุปกรณ์ไฟฟ้า

ผลการสำรวจในงานวิจัย [1] ยืนยันว่าการตรวจสอบการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า และรายงานผลให้ผู้ใช้งานทราบแบบเวลาจริงช่วยให้ผู้ใช้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า การส่งผลการใช้เป็นรายสัปดาห์หรือรายเดือนเช่น รายการค่าใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่พยายาม ตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าและส่งผลให้กับผู้ใช้แบบเวลาจริง เช่นงานวิจัย [2], [3], [4] เสนอวิธี ตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยการตรวจวัดพลังงานที่จุดรวมหลักของระบบไฟฟ้า (Main circuit) และ งานวิจัย [5], [6], [7] เสนอวิธีตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์ ตรวจวัดติดตั้งที่อุปกรณ์ไฟฟ้าและบริเวณใกล้เคียง ซึ่งแนวทางการวิจัยทั้งสองแนวทางนี้ต่างมีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกัน กล่าวคือระบบที่ตรวจจับพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ตรงจุดรวมหลัก สามารถลดความ ซับซ้อนของการติดตั้ง ใช้ต้นทุนต่ำ แต่มีข้อเสียคือความแม่นยำในการทำนายผลต่ำกว่าวิธีแรก เนื่องจากข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ตรวจจับจากจุดรวมหลักนั้นประกอบไปด้วยข้อมูลของอุปกรณ์ ไฟฟ้าจำนวนมาก ทำให้ต้องใช้ขั้นตอนวิธีที่ซับซ้อนเพื่อจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้น นอกจากนี้ยัง ไม่สามารถทราบได้ว่าอุปกรณ์ใด ทำงานอยู่ ณ จุดใด ทำให้การพัฒนาต่อขยายระบบทำได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยเลือกแนวทางการวิจัยโดยอาศัยอุปกรณ์ตรวจวัดติดตั้งที่อุปกรณ์ ไฟฟ้า เพื่อให้ระบบสามารถพัฒนาต่อขยายให้รับรู้ได้อัตโนมัติว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าถูกย้ายไปอยู่ที่ ตำแหน่งใด สามารถควบคุมการเปิด/ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ อันจะส่งผลให้สามารถเพิ่มความปลอดภัยในครัวเรือน ช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงานและเพิ่มคุณภาพชีวิตได้ในอนาคต และ ปัจจุบันแนวโน้มของราคาอุปกรณ์ตรวจจับขนาดเล็กมีราคาถูกลงพร้อมกับความสามารถที่เพิ่มมากขึ้นทั้งด้านการส่งข้อมูลและการตรวจจับได้หลากหลาย ทำให้การสร้างอุปกรณ์เพื่อนำไปติดตั้งยัง อุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากขึ้น

2.2.2 การจำแนกและการเลือกคุณลักษณะที่ใช้จำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า

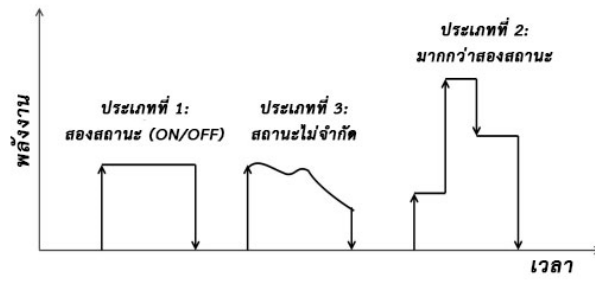
งานวิจัย [2] ได้แบ่งประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้าไว้ 3 ประเภท (ภาพที่ 3-21) ตามจำนวน ของสถานะการทำงาน คือ 1. ประเภทที่มีเพียงสองสถานะ (เช่น หลอดไฟ โทรท์สัน) 2. ประเภทที่มี มากกว่าสองสถานะ แต่จำนวนของสถานะจำกัด (เช่น พัดลม ไดรฟ์เป่าผม) 3. ประเภทที่มีจำนวน สถานะไม่จำกัด (เช่น สว่าน หลอดไฟปรับความสว่างได้)

งานวิจัย [8] เสนอการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบการใช้พลังงานของแต่ละ อุปกรณ์หรือเรียกว่าลายเซ็นต์การใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์โดยพิจารณา พลังงานจริง (Real power), พลังงานปฏิกิริยา (Reactive power), พลังงานปรากฏ (Apparent power), แร่งดัน root mean square (Vrms), ค่ากระแส root mean square (Irms), ค่ากระแสสูงสุด (Imax), ค่ากระแสต่ำสุด (Imin),

ค่ากระแสเฉลี่ย (Iavg), การเกิดฮาร์โมนิก, การเกิดสัญญาณรบกวน, รูปแบบการเปลี่ยนสถานะ (Repeatable transient), ระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะ (Transient response Time) เป็นต้น งานวิจัย [9, 10] ใช้คุณลักษณะของพลังงานจริง (Real Power) เพื่อจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยพบว่า สามารถจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานมาก (เช่น เครื่องทำความร้อนและปั้มน้ำ) ได้อย่างแม่นยำ แต่ไม่สามารถจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีรูปแบบการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันได้ดีพอ งานวิจัย [2,11] พยายามแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของพลังงานจริงและพลังงานปฏิกิริยาทำให้จำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทที่ 1 และ 2 ได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีปัญหาเรื่องการซ้อนทับกันของคุณลักษณะในระนาบ P-Q ของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ งานวิจัย [3] เสนอการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยการสกัดสัญญาณรบกวนในขณะที่มีการเปิด/ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้า โดยต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดพลังงานที่ความถี่สูงถึงจะสามารถสกัดสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มักมีราคาสูง งานวิจัย [13] ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) กับค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์เพื่อจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า

งานวิจัย [7] เสนอสถาปัตยกรรมในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไปติดตั้งยังอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละตัวและส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สายโปรโตคอล 6LoWPAN บนเครือข่าย IPv6 ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และแสดงข้อมูลในลักษณะของเว็บแอปพลิเคชัน งานวิจัยนี้เป็นต้นแบบสำหรับการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไร้สายของผู้วิจัย โดยผู้วิจัยเลือกใช้ ACS712 Current Sensor Carrier -20 to +20A เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า วัดได้ทั้งกระแสไฟ DC และ AC สามารถวัดกระแสที่ไหลได้ 2 ทิศทาง ทั้งค่าบวกและค่าลบที่มีขนาด 30A ($\pm 30A$) ให้ค่า Output เป็น Analog Voltage 66 mV/A โดยมี Center ที่ 2.5 V (มีค่า typical error น้อยกว่า 1.5%) [12] ซึ่งเหมาะสมสำหรับวัดกระแสเครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้าน (ขนาดมิเตอร์ตามบ้าน 3A - 15A โหลดได้มากที่สุด 9A - 45A)

ผู้วิจัยพิจารณาคคุณลักษณะการใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ข้างต้น และเลือกใช้เพียง ค่าน้อยสุด (Min), ค่ามากที่สุด (Max), ค่ากลาง (Mean), ค่าเฉลี่ย (Average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของค่ากระแสไฟฟ้า เนื่องจาก การตรวจจับกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตอุปกรณ์ตรวจจับไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้จำนวนมาก และ จากผลการทดลองยืนยันว่าคุณลักษณะที่เลือกให้ผลการจำแนกที่ถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ (98.34%)



รูปที่ 2-21 รูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า 3 ประเภท [4]

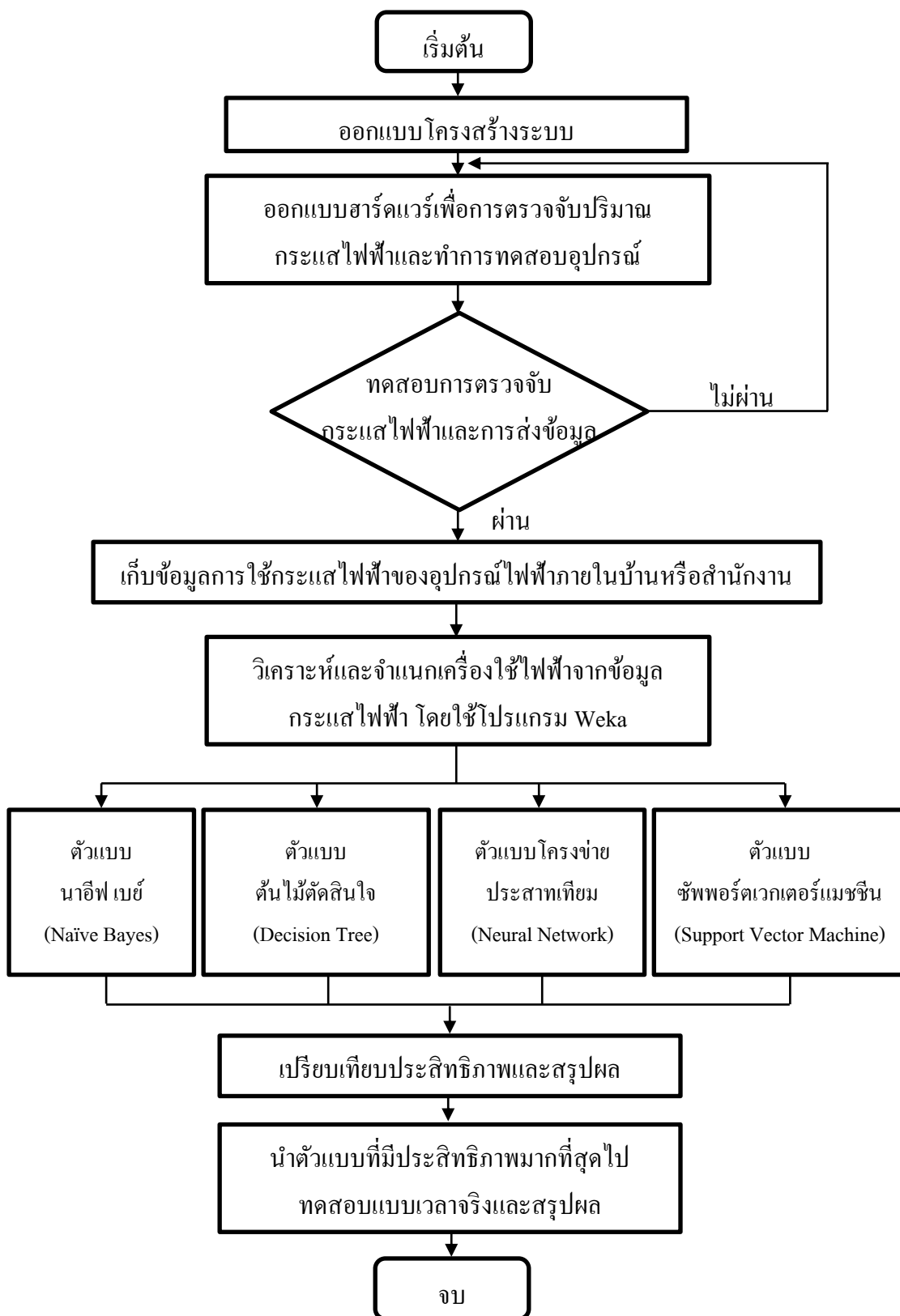
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่องเครือข่ายไร้สายเพื่อการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจำแนกครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการที่ใช้ในการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าโดยใช้ค่าการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าตามบ้านเรือนหรือในสำนักงานและนำวิธีที่เหมาะสมที่สุดมาใช้สำหรับการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เสียบกับปลั๊กต่อพ่วงได้แบบอัตโนมัติโดยมีการส่งผลการจำแนกและข้อมูลกระแสไฟฟ้าไปยังเครื่องแม่ข่ายพร้อมสามารถสั่งเปิด/ปิดอุปกรณ์เหล่านั้นได้ผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึง 1.ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 2.เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย 3.การออกแบบโครงสร้างของระบบ 4.การทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini ร่วมกับโมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266 5.การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดค่าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด 6.การทดสอบตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าจากรางปลั๊กที่มีการใช้กระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดพร้อมกัน 7.การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์กับอุปกรณ์วัดไฟฟ้ามาตรฐาน 8.วิธีการเก็บข้อมูลและการเตรียมข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 9.การส่งข้อมูลเพื่อแสดงผลและการควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างของระบบและศึกษาการทำงานของตัวอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าตรงปลั๊กต่อพ่วงซึ่งอาจมีหลายอุปกรณ์ไฟฟ้าใช้งานพร้อมกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้เซ็นเซอร์ ACS712 ต่อพ่วงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini เพื่อจัดเก็บและคำนวณข้อมูลกระแสไฟฟ้าพร้อมส่งเข้าจัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อจำแนกชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมเวก้า (Weka) ผ่านเทคนิคการจำแนก 4 วิธีได้แก่ นาอิวเบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine) แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละเทคนิคดังกล่าวเพื่อหาตัวแบบที่ดีที่สุดสำหรับการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าพร้อมนำวิธีที่ดีที่สุดนี้มาทำการทดลองแบบเวลาจริงโดยส่งผลลัพธ์การจำแนกไปยังเครื่องแม่ข่าย และสามารถสั่งเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ดังขั้นตอนในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้ประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ด้านฮาร์ดแวร์

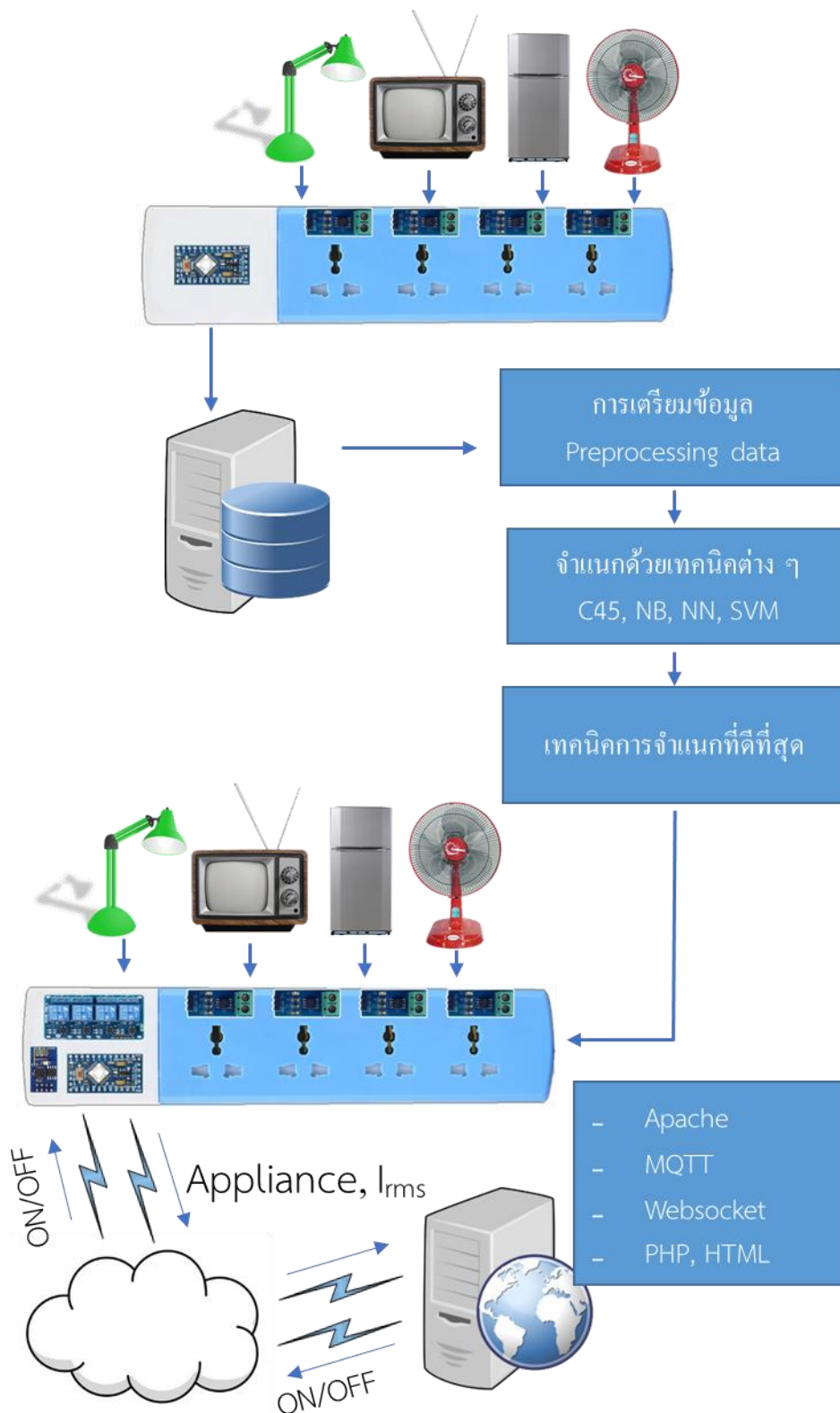
- 2.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Pro Mini 328 - 5V/16MHz
- 2.1.2 โมดูลวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า ACS712-20A
- 2.1.3 โมดูลการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย ESP8266 (ESP-01)
- 2.1.4 อุปกรณ์กระจายสัญญาณเครือข่ายไร้สาย
- 2.1.5 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำเป็นเครื่องแม่ข่ายเพื่อการจัดเก็บข้อมูลและการแสดงผลข้อมูลพร้อมทั้งใช้ในการสั่งเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้า
- 2.1.6 ปลั๊กพ่วงไฟฟ้าที่มีช่องต่อไม่น้อยกว่า 4 ช่อง
- 2.1.7 โมดูลรีเลย์ที่มีช่องควบคุมแบบแยกอิสระไม่น้อยกว่า 4 ช่อง
- 2.1.8 USB TTL to UART

2.2 ด้านซอฟต์แวร์

- 2.2.1 Arduino IDE สำหรับพัฒนาโปรแกรมภาษาซีและเขียนข้อมูลเข้าไปในไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro Mini
- 2.2.2 ไคลบรารี AT Command และเฟิร์มแวร์ ESP8266
- 2.2.3 MQTT Broker (Mosquitto 1.4.11)
- 2.2.4 WebSocket
- 2.2.5 Apache 2.4 และ PHP 5.6
- 2.2.6 Weka เวอร์ชัน 3.9.0

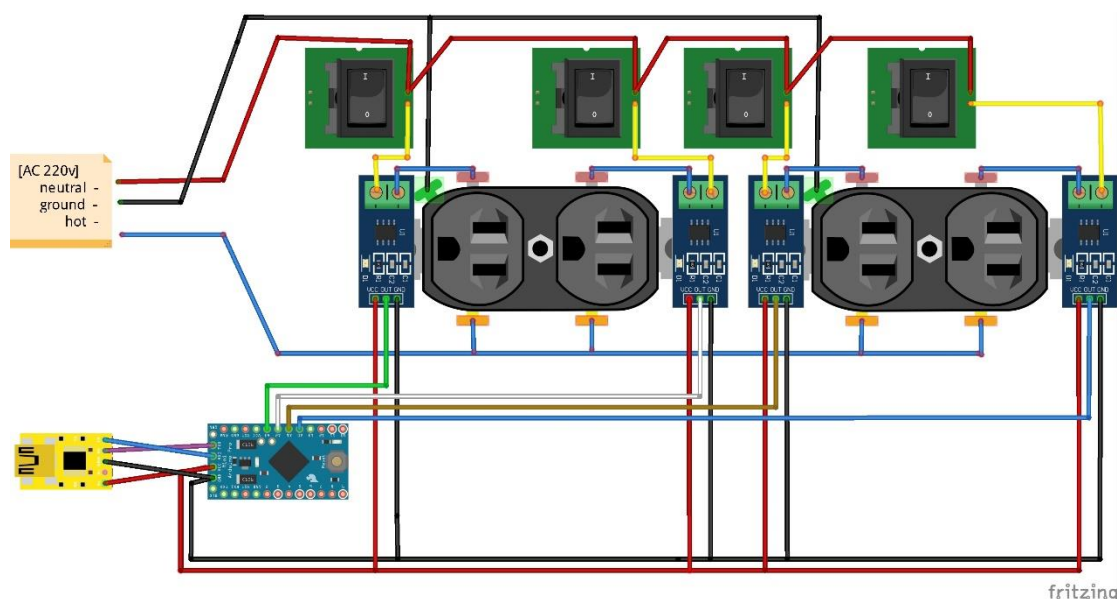
3.3 การออกแบบโครงสร้างและการทำงานของระบบ

การดำเนินการวิจัยนี้มีการทำงานของระบบประกอบไปด้วยส่วนของการตรวจนับปริมาณการใช้ไฟฟ้าและการส่งข้อมูลไปจัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์ ส่วนของการนำข้อมูลมาประมวลผลวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรมเวก้า (Weka) ส่วนของการจำแนกข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเวลาจริงโดยใช้เทคนิคที่ดีที่สุดพร้อมแสดงผลการจำแนกและสามารถควบคุมการเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าจากเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางโดยมีโครงสร้างการทำงานของระบบดังภาพที่ 3-2 และแต่ละส่วนมีการออกแบบและการทำงานของระบบดังนี้

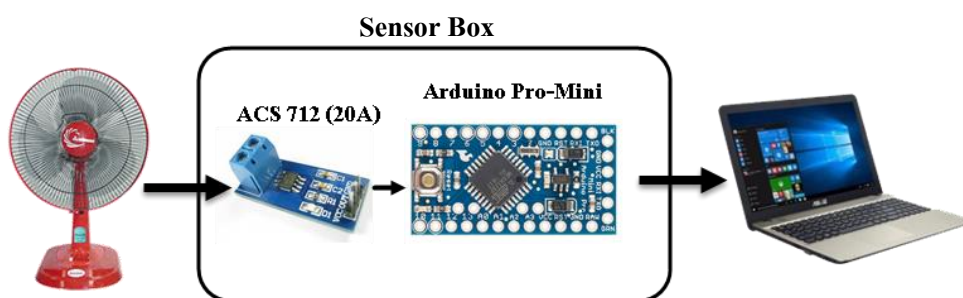


ภาพที่ 3-2 โครงสร้างและการทำงานของระบบ

3.3.1 ส่วนของการตรวจจับปริมาณการใช้ไฟฟ้าและการส่งข้อมูลไปจัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์ ส่วนนี้มีการใช้ IC เบอร์ ACS712 (20A) ต่อพ่วงกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini เพื่อคำนวณผลตั้งสมการในตารางที่ 3-1 และจัดเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3-3, 3-4



ภาพที่ 3-3 วงจรสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3-4 รูปแบบการตรวจจับกระแสไฟฟ้าและจัดเก็บเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์

ในส่วนของ ACS712 Current Sensor Carrier -20 to +20A เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดได้ทั้งกระแสไฟ DC และ AC สามารถวัดกระแสที่ไหลได้ 2 ทิศทาง ทั้งค่าบวกและค่าลบ ที่มีขนาด 20A ($\pm 20A$) ให้ค่า Output เป็น Analog Voltage 100 mV/A โดยมีค่ากลางที่ 2.5 V (มีค่า typical error น้อยกว่า 1.5%) [16]

ตารางที่ 3-1 ตัวแปรที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ส่งค่ามาให้กับเครื่องแม่ข่าย

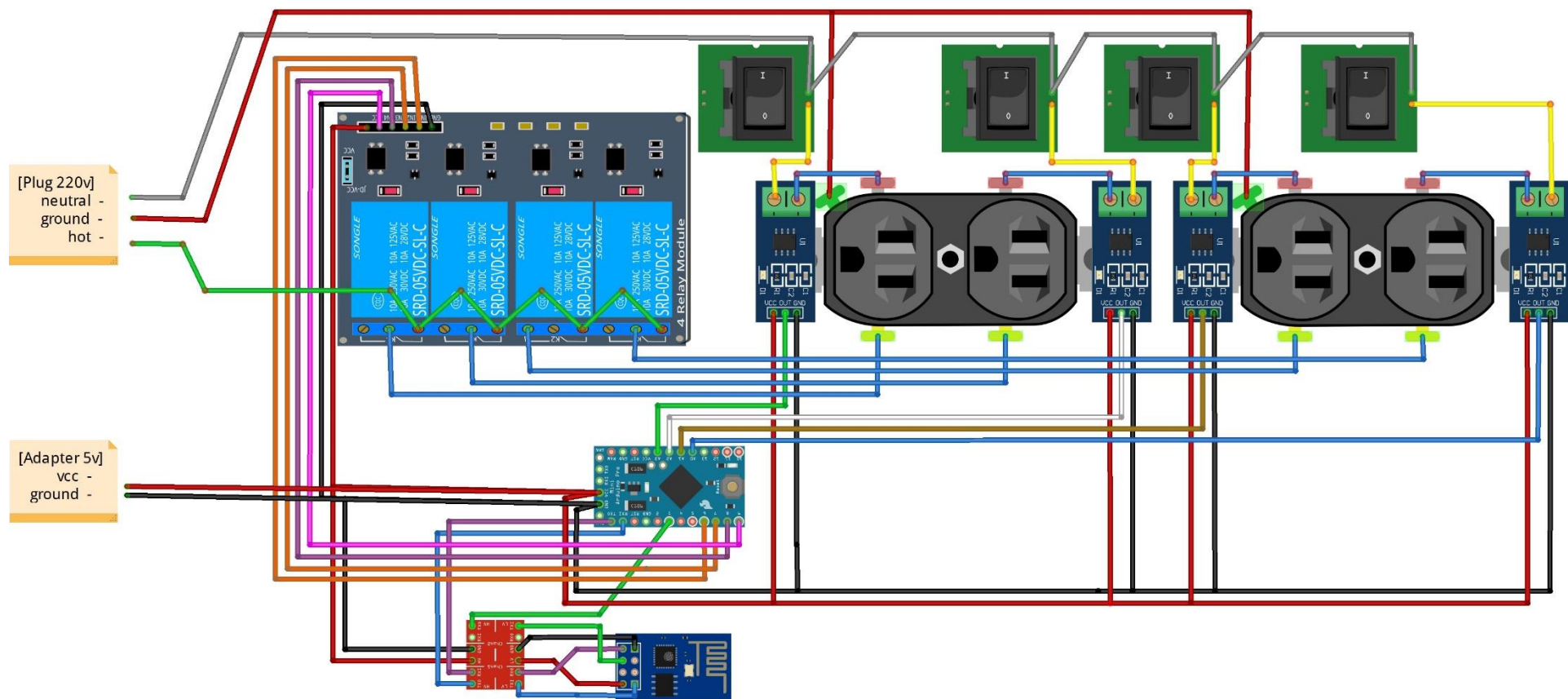
ตัวแปร	สมการ	ความหมาย
$D_{\min,t}$	$Min\{D_i, \dots, D_{i-500}\}$	ค่าน้อยสุดของค่าที่วัด
$D_{\max,t}$	$Max\{D_i, \dots, D_{i-500}\}$	ค่ามากที่สุดของค่าที่วัด
$D_{\text{mean},t}$	$\frac{(D_{\max,t} + D_{\min,t})}{2}$	ค่ากลางของค่าที่วัด
$D_{\text{avg},t}$	$\frac{D_t}{500}$	ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัด
$D_{\text{sd},t}$	$\sqrt{\frac{1}{500} \sum (D_i - D_{\text{avg},t})^2}$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่วัด
$I_{\text{rms},t}$	$\sqrt{\frac{1}{500} \sum I_i^2}$	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสไฟฟ้าจริง

D_t = ผลรวมข้อมูลที่อ่านจาก Sensor จำนวน 500 รายการ

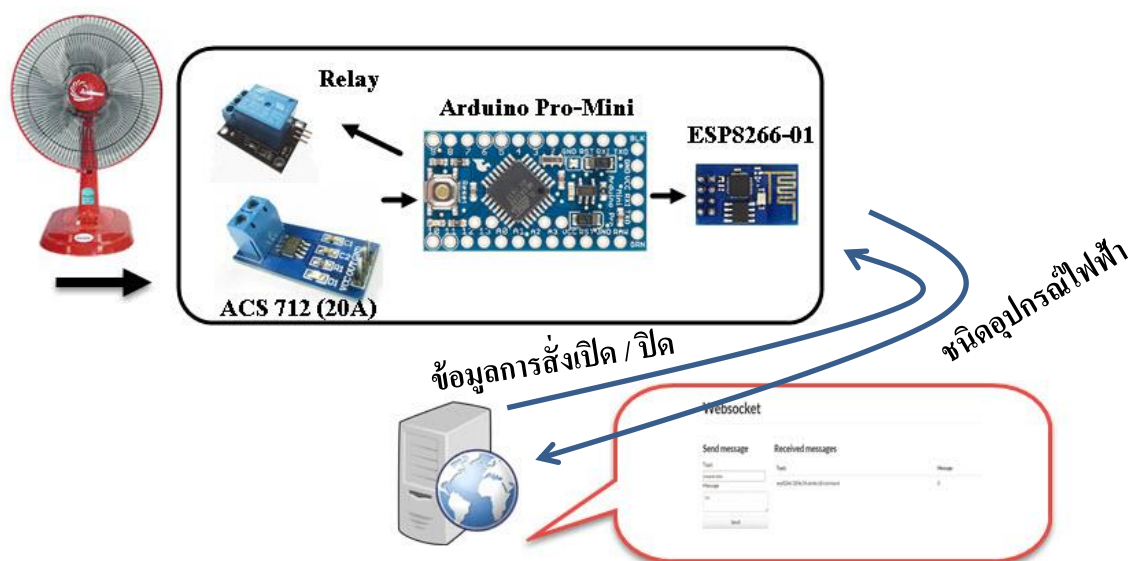
I = ค่ากระแสไฟฟ้า

3.3.2 ส่วนของการนำข้อมูลมาประมวลผล วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรมเวก้า (Weka) เมื่อได้ข้อมูลจากส่วนของการเก็บการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ในข้อ 3.1 แล้วจะต้องนำข้อมูลเหล่านั้นมาเข้าสู่กระบวนการเตรียมข้อมูลสำหรับการจำแนกด้วยเทคนิค 4 วิธีได้แก่ นาอิวเบย์ (Naive Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine)

3.3.3 ส่วนของการจำแนกข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเวลาจริงโดยใช้เทคนิคที่ดีที่สุดพร้อมแสดงผลการจำแนกและสามารถควบคุมการเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าจากเครื่องแม่ข่ายส่วนกลาง จากหัวข้อ 3.2 เมื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีต่าง ๆ จนได้เทคนิคการจำแนกที่ดีที่สุดแล้วจึงนำเทคนิคการจำแนกนั้นมาเขียนโปรแกรมเข้าไปยังอุปกรณ์ตรวจจับการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อให้อุปกรณ์ตรวจจับและจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อโดยจะมีการส่งผลการจำแนกและข้อมูลการใช้กระแสไฟฟ้ามาแสดงผลยังเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางและสามารถที่จะสั่งเปิด/ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านั้นได้ ดังภาพที่ 3-5, 3-6



ภาพที่ 3-5 แผนภาพวงจรอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่สามารถส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย



ภาพที่ 3-6 รูปแบบระบบการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยส่งข้อมูลการจำแนกมายังส่วนกลางพร้อมการสั่งควบคุมเปิด/ปิดไฟฟ้า

3.4 การทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini ร่วมกับโมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266

Arduino Pro-mini ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 16 MHz หน่วยความจำ SRAM ขนาด 2 KB หน่วยความจำชนิด Flash Memory ขนาด 32 KB เมื่อทดลองเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าพบว่าในแต่ละรอบการทำงานใช้เวลาประมาณ 2 มิลลิวินาที ดังนั้นใน 1 วินาทีจะสามารถทำงานได้ทั้งหมดประมาณ 500 รอบหรือ 500 ครั้ง ดังภาพที่ 3-7 และ ภาพที่ 3-8

```

File Edit Sketch Tools Help
Collect-Data-Wifi-AT_Command-Loop-Speed $
91 void loop()
92 {
93   unsigned long tt0 = micros();
94   unsigned long ttl = micros() - tt0;
95
96   elecStats0.add(analogRead(currentPin0));
97   elecStats1.add(analogRead(currentPin1));
98   elecStats2.add(analogRead(currentPin2));
99   elecStats3.add(analogRead(currentPin3));
100
101   if (elecStats0.count() == 500)
102   {
103     i++;
104     //double Irms0 = emon0.calcIrms(1480);
105     MINO = elecStats0.minimum();
106     MAXO = elecStats0.maximum();
107     MEANO = (elecStats0.maximum()+elecStats0.minimum())/2;
108     AVGO = elecStats0.average();
109     STDO = elecStats0.pop stdev();

```

ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างการเขียนคำสั่งเพื่อตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทำงาน

```

COM16
Speed test
-----
F_CPU = 16000000 Hz
1/F_CPU = 0.0625 us
The next tests are runtime compensated for overhead
Interrupts are still enabled, because millis() is used for timing
nop                : 0.063 us
avr gcc I/O        : 0.125 us
Arduino digitalRead : 3.967 us
Arduino digitalWrite : 5.095 us
pinMode            : 4.467 us
multiply byte      : 0.632 us
divide byte        : 5.410 us
add byte           : 0.569 us
multiply integer   : 1.386 us
divide integer     : 14.272 us
add integer        : 0.883 us
multiply long      : 6.102 us
divide long        : 38.662 us
add long           : 1.763 us
multiply float     : 7.112 us
divide float       : 79.987 us
add float          : 9.227 us
itoa()             : 13.517 us
ltoa()             : 126.687 us
dtostrf()          : 78.987 us
random()           : 51.487 us
y |= (1<<x)         : 0.569 us
bitSet()           : 0.569 us
analogRead()       : 112.037 us
analogWrite() PWM  : 12.417 us
delay(1)           : 1005.987 us
delay(100)         : 99999.984 us
delayMicroseconds(2) : 1.638 us
delayMicroseconds(5) : 4.656 us
delayMicroseconds(100) : 100.237 us
-----
Autoscroll
No line ending
9600 baud

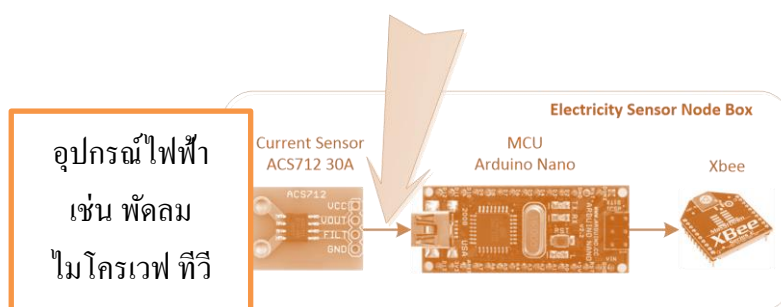
```

ภาพที่ 3-8 แสดงเวลาการทำงานในแต่ละรอบของ **Arduino Pro-Mini**

การส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจจับไฟฟ้ามายังเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางในงานวิจัยนี้ใช้เครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 โดยใช้โมดูลไร้สาย ESP8266-01 ที่ความถี่ 2.4 GHz แรงดันไฟฟ้า 3.3 Volt ใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 240mA ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับโมดูลไร้สาย ESP8266 ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 การเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายและการส่งข้อมูลระหว่างกันถือเป็นสิ่งสำคัญมากอย่างหนึ่งเนื่องจากข้อมูลที่ส่งมายังเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางถ้าได้ข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือการเชื่อมต่อมีปัญหาอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานผลและการควบคุมอุปกรณ์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงเชื่อมต่อเครือข่ายในโหมด Station (mode 1) และทดลองส่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าสามารถส่งได้ที่ความเร็วทุก ๆ 200 มิลิวินาที

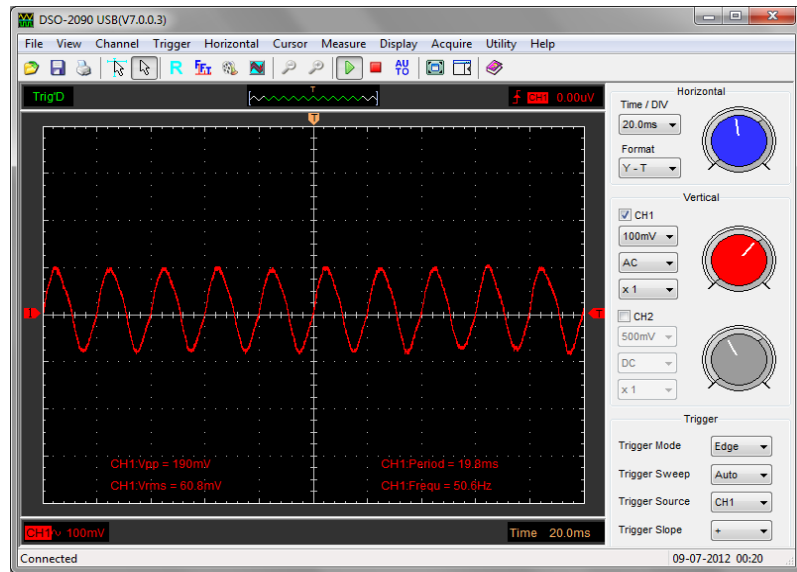
3.5 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดค่าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด

เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัย จำเป็นต้องรู้ว่ารูปแบบกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าวัดได้จากอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด ก่อนที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการประมวลผล มีรูปแบบเป็นอย่างไร จึงได้ทดสอบตรวจวัดตามภาพที่ 3-9

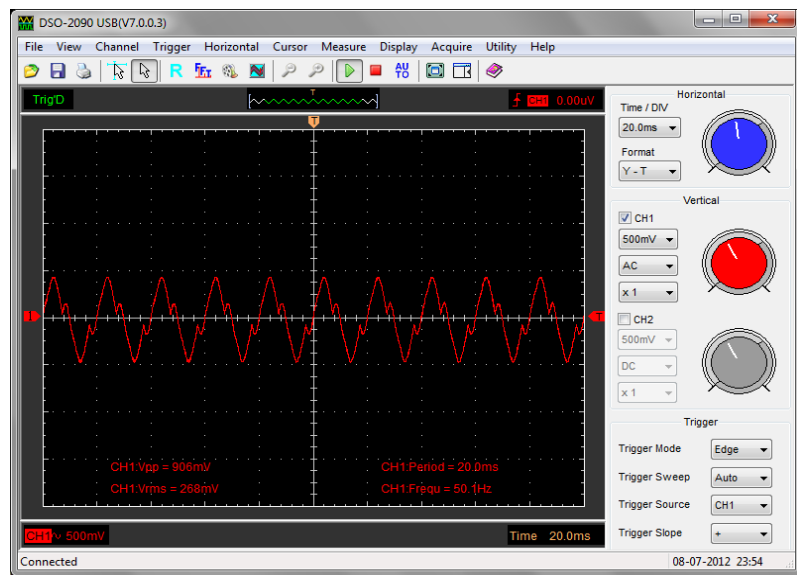


ภาพที่ 3-9 การวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor)

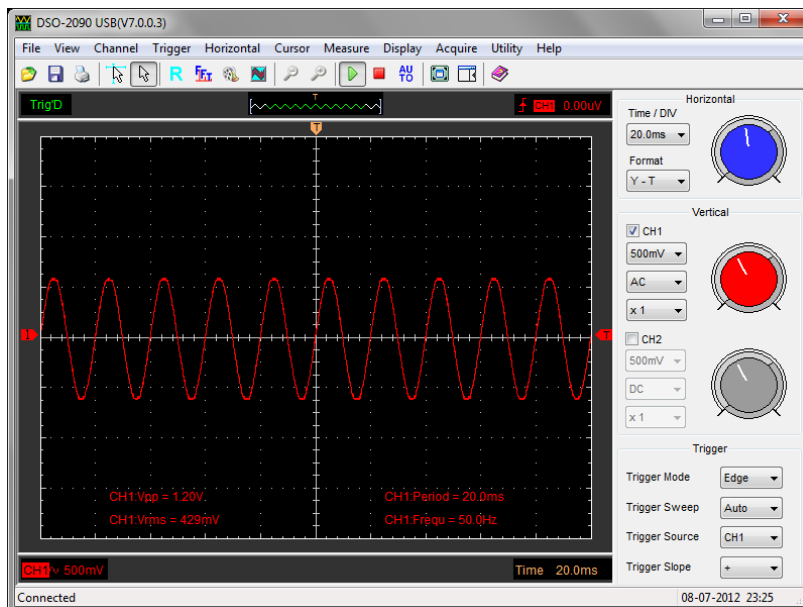
ในการวัดนี้ทำการทดสอบ โดยยกตัวอย่างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดด้วยกัน พบว่าพัดลมและไมโครเวฟมีรูปแบบคลื่นที่แยกกันอย่างเห็นได้ชัด คือไมโครเวฟจะมีรูปคลื่นความถี่อื่นแทรกสอดเข้ามาดังตัวอย่างในภาพที่ 3-10, 3-11 ส่วนการทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ได้ผลตามภาพที่ 3-10, 3-11, 3-12, 3-13 และ 3-14 ตามลำดับ



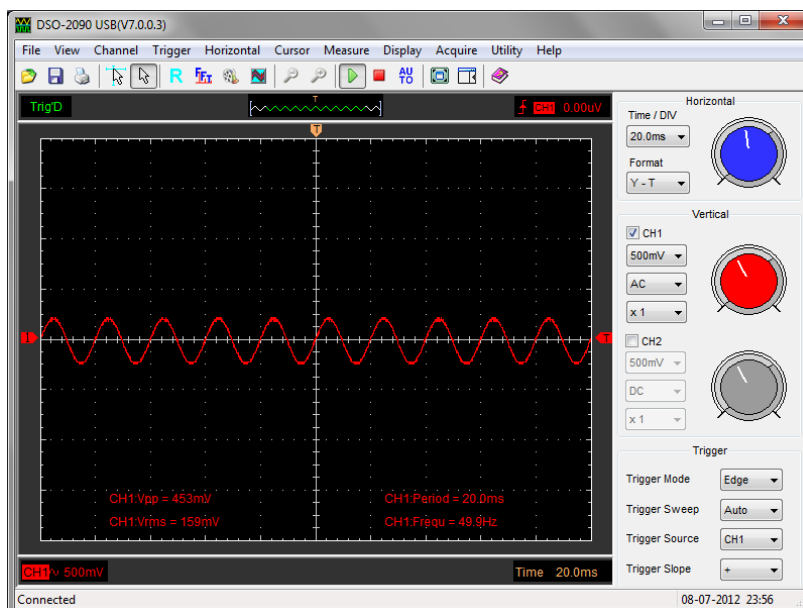
ภาพที่ 3-10 รูปแบบการใช้กระแสไฟฟ้าของพัดลม



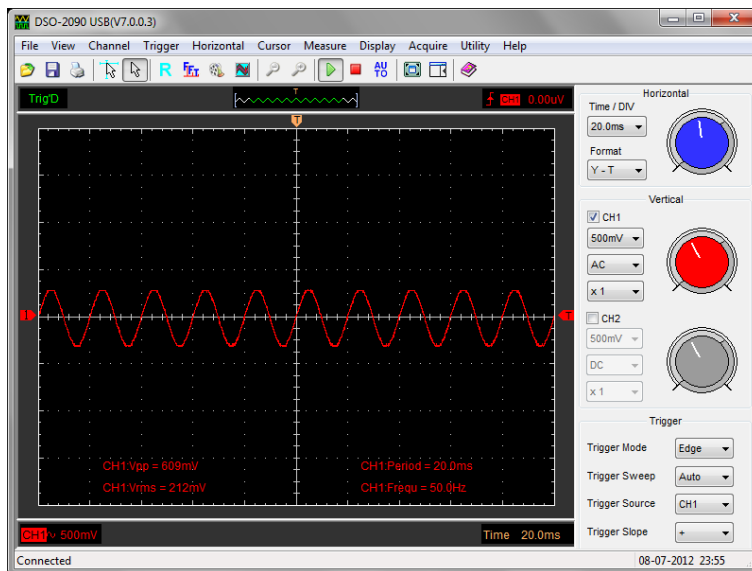
ภาพที่ 3-11 รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟ



ภาพที่ 3-12 รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเตารีด

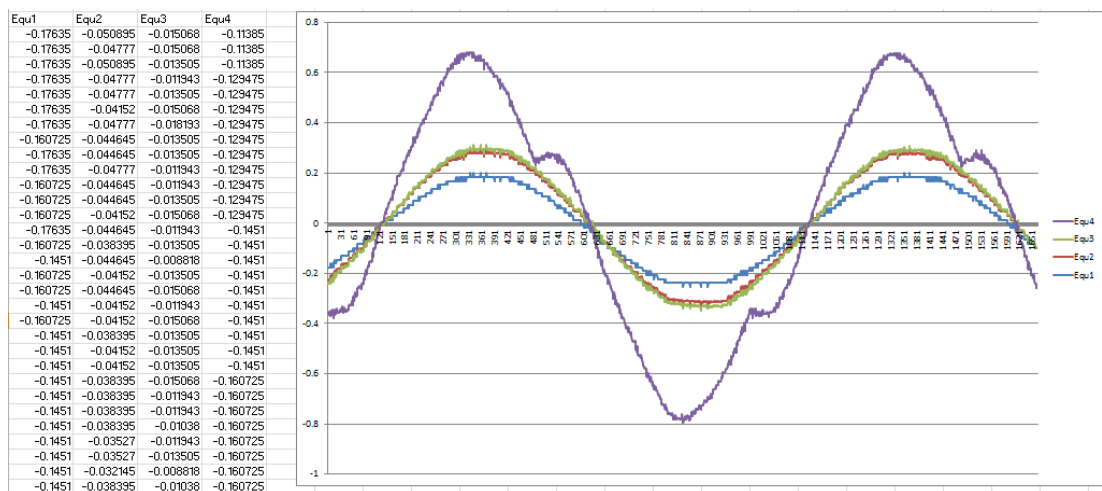


ภาพที่ 3-13 รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของกระติกน้ำร้อน



ภาพที่ 3-14 รูปแบบการใช้ไฟฟ้าของเครื่องเป่าผม

หลังจากที่ได้รวบรวมข้อมูลจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดแล้วผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาสร้างกราฟ ดังภาพที่ 3-15 สีม่วง, สีฟ้า, สีเขียว และ สีแดง แสดงการใช้ไฟฟ้าของ ไมโครเวฟ, โทรทัศน์, ที่เป่าผม และพัดลมตามลำดับ จากภาพทำให้เราทราบว่า ที่เป่าผม และ พัดลม มีรูปแบบการใช้ไฟฟ้าในลักษณะที่คล้ายกัน ซึ่งการใช้ไฟฟ้าที่มีลักษณะคล้ายกันนี้เป็นความท้าทายของงานวิจัยที่จะจำแนกอุปกรณ์เหล่านี้



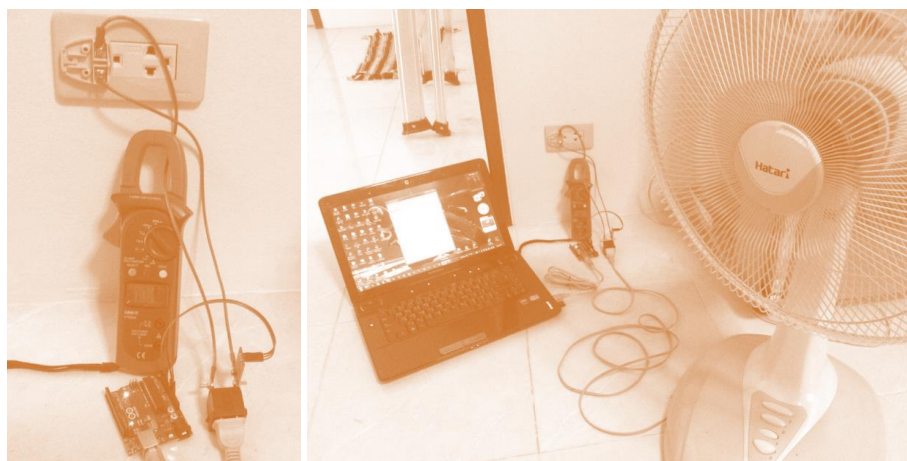
ภาพที่ 3-15 กราฟการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าจากการใช้กระแสไฟฟ้า

3.6 การทดสอบตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าจากรางปลั๊กที่มีการใช้กระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดพร้อมกัน

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้การตรวจจับการใช้กระแสไฟฟ้าตรงรางปลั๊กซึ่งอาจมีการเสียบอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบว่ารูปแบบการใช้งานกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่เมื่อมีอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิดใช้งานพร้อม ๆ กัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยการเสียบปลั๊กพัดลมพร้อมกับโทรทัศน์ ไมโครเวฟพร้อมกับพัดลม โทรทัศน์พร้อมกับพัดลมและไมโครเวฟ ผลปรากฏว่ารูปแบบการใช้งานของกระแสไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความคล้ายคลึงกับรูปแบบการใช้กระแสไฟฟ้าที่ตรวจจับเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5

3.7 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์กับอุปกรณ์วัดไฟฟ้ามาตรฐาน

จากการที่ได้ทำการสร้างตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Library Energy Monitor (Emon) ของ Arduino โดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้า ทำให้ต้องมีการเทียบเคียงค่าของแรงดัน ที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าการวัดที่แม่นยำ โดยจะทำการ calibrate เทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดมาตรฐาน ภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 การเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดมาตรฐาน

โดยการทดลองดังกล่าวมีขั้นตอนในการตรวจสอบดังนี้

1. นำเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ามาต่ออนุกรม ระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้ากับปลั๊กไฟ โดยได้ทำเป็นอุปกรณ์สำหรับทดสอบดังภาพ 3-14
2. ส่วน Output ของเซ็นเซอร์นำมาเข้า Arduino เพื่อประมวลผล

3. นำอุปกรณ์ตรวจสอบวัดมาตรฐาน Multimeter ชนิด Clamp ทำการ วัดค่าเพื่อเทียบกับค่าที่ได้ของตัวอุปกรณ์ตรวจสอบกระแสไฟฟ้า (Current Sensor)
4. ทดสอบโดยนำพัดลมมาวัดทดสอบ โดยเปิดพัดลมและวัดกระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตัวเซ็นเซอร์ โดยเขียนโปรแกรมตรวจสอบที่ Arduino ตามภาพที่ 3-17
5. ทำการปรับค่า ในบรรทัด `emon1.current(currentPin, X);` โดย X ให้ค่าเป็น 0-30 เพื่อหาค่าเปรียบเทียบกับตรงตามอุปกรณ์วัดมาตรฐานให้ได้มากที่สุด

โค้ด Arduino สำหรับทดสอบเทียบเคียงอุปกรณ์วัดมาตรฐาน

```
#include "SoftwareSerial.h"
#include "EmonLib.h"
EnergyMonitor emon1;
SoftwareSerial mySerial(3, 2); // RX, TX
Statistic elecStats;

const int currentPin = 0; // Analog A0
int i;

void setup(void)
{
  mySerial.begin(9600);
  analogReference(EXTERNAL);
  emon1.current(currentPin, 15); // <-- Adjust Value
}

void loop(void)
{
  double Irms = emon1.calcIrms(1480); // Calculate Irms only

  // -- Serial to Xbee --//
  mySerial.print("IRMS = ");
  mySerial.println(Irms, 2);

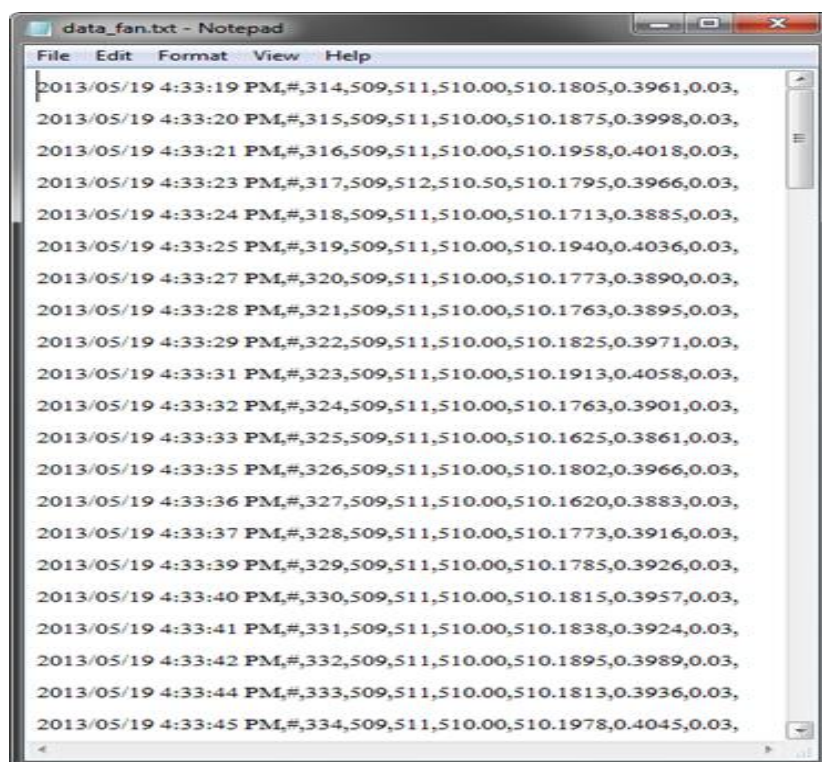
  // -- Clear Stat --//
}
```

ภาพที่ 3-17 โค้ด Arduino สำหรับทดสอบเทียบเคียงอุปกรณ์วัดมาตรฐาน

ซึ่งจากการทดสอบเปรียบเทียบค่า พบว่าการปรับเปลี่ยนค่า ของ Sensor ที่ใช้ Emon Library แล้วให้ค่าตรงกับการวัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์มาตรฐานอยู่ที่ ค่า 15 ค่านี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมที่จะใช้งานจริงอีกทีหนึ่ง

3.8 วิธีการเก็บข้อมูลและการเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

การจัดเก็บข้อมูลเพื่อนำข้อมูลเข้ากระบวนการจำแนก ข้อมูลที่ถูกส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดจะจัดเก็บไว้ที่เครื่องแม่ข่ายส่วนกลาง (ดังภาพที่ 3 – 2) ข้อมูลที่ส่งมาประกอบด้วย ค่าน้อยสุด (Min), ค่ามากที่สุด (Max), ค่ากลาง (Mean), ค่าเฉลี่ย (Average), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของกระแสไฟฟ้า และจัดเก็บในรูปแบบของ text file คั่นด้วยเครื่องหมายจุดภาค (,) ดังภาพที่ 3-18

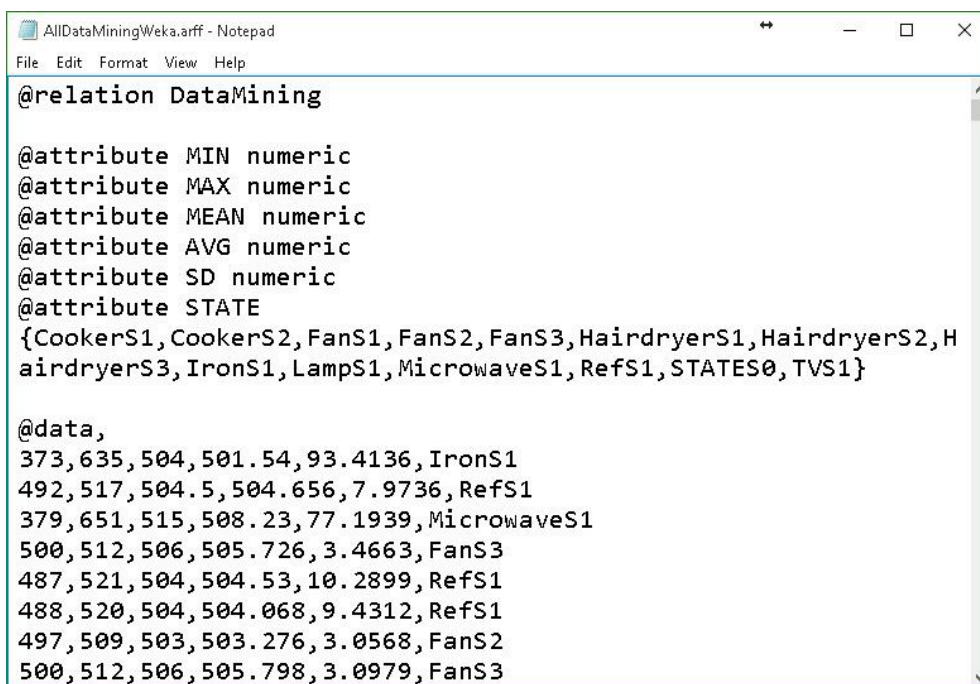


ภาพที่ 3-18 ข้อมูลที่เก็บรวบรวมในรูปแบบ Text File

หลังจากได้ข้อมูลที่ถูกส่งมาจากแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมข้อมูล (Data preparation) ก่อนที่จะส่งไปเข้าสู่กระบวนการหาอัลกอริทึมและการวิเคราะห์ เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเนื่องมาจากเป็นขั้นตอนที่ป้อนอินพุตเข้าไปในระบบหรือโปรแกรมโดยโปรแกรมที่ใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม Weka เวอร์ชัน 3.9.0 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ด้าน

การทำเหมืองข้อมูลที่ได้รับการยอมรับและแพร่หลายทั่วโลกโดยโปรแกรมรับเพิ่มข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้อง จากนั้นจึงผ่านกระบวนการในการทำการจำแนกประเภท

การสร้างโมเดลระบบและการสอนข้อมูล (Building Models and Train Datasets) ใช้วิธีการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) ซึ่งเป็นการเรียนรู้ที่ต้องมีชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training Data) ซึ่งมีทั้งชุดข้อมูลที่เป็นอินพุต และเอาต์พุต ชุดข้อมูลที่ได้มาจากเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางในหัวข้อ 3.2 ยังไม่อยู่ในรูปแบบที่จะใช้สำหรับการเรียนรู้ได้ เพราะยังไม่มีคลาสแอททริบิวต์ (Class attribute) ที่เป็นตัวบอสถานะว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดไหน ดังนั้นในการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้สร้างโมเดลต้นแบบการจำแนกข้อมูลการทำเหมืองข้อมูล จึงต้องมีการกำหนดคลาสแอททริบิวต์ในคอลัมน์ขวาสุดของข้อมูล (ชื่อว่า STATE) โดยบ่งบอก ถึงชนิดอุปกรณ์ไฟฟ้าและสถานะของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ ก่อนที่จะนำข้อมูลไปผ่านกระบวนการจำแนกประเภทในหัวข้อถัดไป ตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านการกำหนดคลาสแอททริบิวต์แล้วแสดงดังภาพที่ 3-19



```

@relation DataMining

@attribute MIN numeric
@attribute MAX numeric
@attribute MEAN numeric
@attribute AVG numeric
@attribute SD numeric
@attribute STATE
{CookerS1,CookerS2,FanS1,FanS2,FanS3,HairdryerS1,HairdryerS2,HairdryerS3,IronS1,LampS1,MicrowaveS1,RefS1,STATES0,TVS1}

@data,
373,635,504,501.54,93.4136,IronS1
492,517,504.5,504.656,7.9736,RefS1
379,651,515,508.23,77.1939,MicrowaveS1
500,512,506,505.726,3.4663,FanS3
487,521,504,504.53,10.2899,RefS1
488,520,504,504.068,9.4312,RefS1
497,509,503,503.276,3.0568,FanS2
500,512,506,505.798,3.0979,FanS3

```

ภาพที่ 3-19 ตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านการกำหนดคลาสแอททริบิวต์

3.9 การส่งข้อมูลเพื่อแสดงผลและการควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า

หลังจากวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพเทคนิคในการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าแล้ว นำเทคนิคการจำแนกที่ดีที่สุดมาเขียน โปรแกรมใส่เข้าไปในอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ทำการจำแนกข้อมูลกระแสไฟฟ้าแบบเวลาจริงกล่าวคือเมื่อนำอุปกรณ์ไฟฟ้ามาเสียบเข้ากับปลั๊กที่มีการติดตั้งระบบตรวจจับกระแสไฟฟ้านี้จะทำการประมวลผลเพื่อเปรียบเทียบและส่งผลการจำแนกไปยังเครื่องแม่ข่ายผ่าน MQTT Broker โดยในงานวิจัยนี้ใช้ Websocket ร่วมกับ HTML สำหรับการแสดงผลการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าและสามารถสั่งเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านหน้าเว็บไซต์ได้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายที่สามารถจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าและจัดเก็บปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาเพื่อการวางแผนในการบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพโดยในงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์เพื่อเก็บข้อมูลการใช้กระแสไฟฟ้าจากรางปลั๊กไฟฟ้าซึ่งบางครั้งอาจมีหลายอุปกรณ์ใช้งานไฟฟ้าพร้อม ๆ กัน ผู้วิจัยนำข้อมูลการใช้กระแสไฟฟ้าของแต่ละอุปกรณ์มาเตรียมการสำหรับเทคนิคการจำแนก 4 วิธี ได้แก่ นาวีฟเบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) และนำผลการจำแนกของแต่ละวิธีมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาวิธีการจำแนกที่ดีที่สุดจากนั้นผู้วิจัยนำวิธีนี้ไปพัฒนาในปลั๊กไฟฟ้าสำหรับการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยปลั๊กจะมีการส่งผลการจำแนกไปยังเครื่องแม่ข่ายหลังจากนั้นผู้ดูแลระบบอาจสั่งเปิด/ปิดการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านหน้าเว็บไซต์ได้ในบทนี้จะกล่าวถึงการเก็บรวบรวมข้อมูล การสร้างตัวแบบเพื่อการจำแนกข้อมูล การเปรียบเทียบตัวแบบและประเมินประสิทธิภาพทั้ง 4 วิธี ตลอดจนการนำตัวแบบไปใช้จริงพร้อมมีการแสดงผลผ่านเว็บไซต์และสั่งเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าได้

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

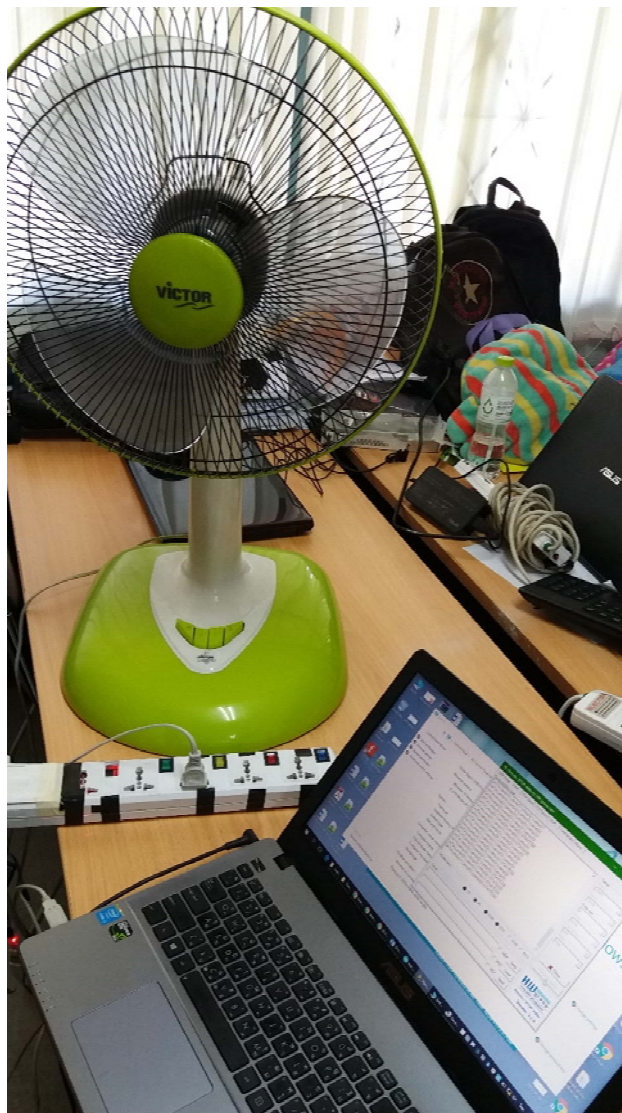
ในการเก็บรวบรวมข้อมูลผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าจำนวน 40 อุปกรณ์ โดยมีชื่อเจ้าของผลิตภัณฑ์และรุ่นดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ชื่อผลิตภัณฑ์และรุ่นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

อุปกรณ์ไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมป์)
พัดลมตั้งโต๊ะ 14 นิ้ว Hatari รุ่น HA-T14M2	39	0.18
พัดลมตั้งโต๊ะ 16 นิ้ว Hatari รุ่น HC-S16M5	50	0.23
พัดลมตั้งโต๊ะ 16 นิ้ว IMARFLEX รุ่น IF-778	56	0.27
พัดลมตั้งโต๊ะ 16 นิ้ว MITSUBISHI รุ่น D16-GV	46	0.23
พัดลมตั้งโต๊ะ 16 นิ้ว VICTOR รุ่น TF-1610	56	0.27

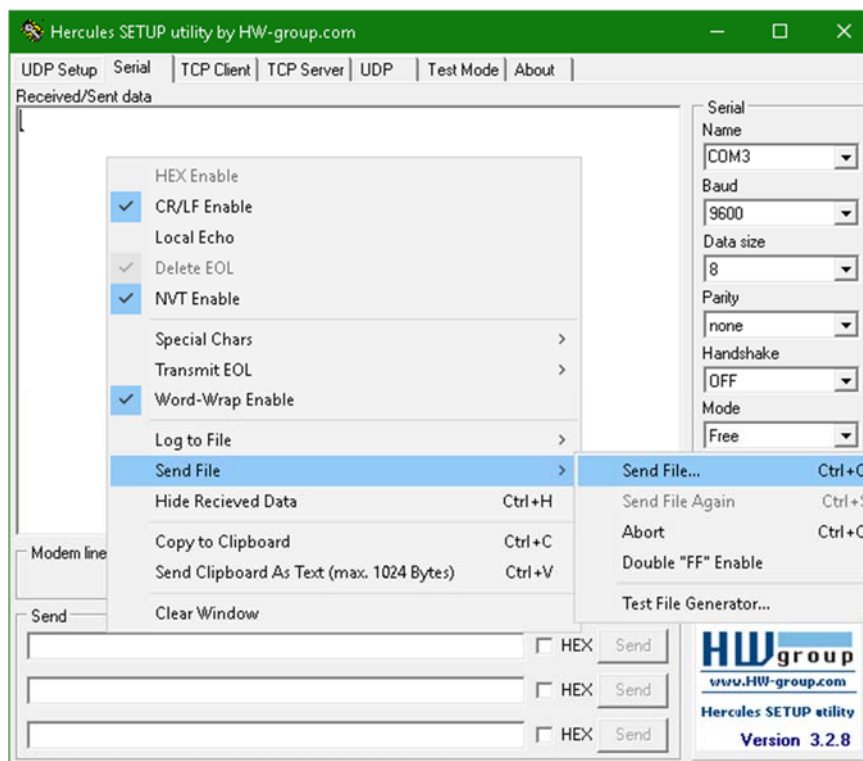
กาต้มน้ำ 1.8 ลิตร KASHIWA รุ่น EK-180	1,500	-
กาต้มน้ำ 2 ลิตร Imarflex รุ่น IF-283	1,500	-
กาต้มน้ำ 1.6 ลิตร SHARP รุ่น KP-A16S	610	-
ไดร์เป่าผม Guangming Professional 2000W	2,000	-
ไดร์เป่าผม IMARFLEX รุ่น BD133	-	-
ไดร์เป่าผม LESASHA รุ่น LS023	1,000	-
ไดร์เป่าผม Panasonic รุ่น EH5171	1,500	-
ไดร์เป่าผม Philips ProCare รุ่น HP8260	2,300	-
เตารีด Electrolux รุ่น ESi501	1,500	-
เตารีด Philips รุ่น HD1120	-	-
เตารีด Sharp รุ่น AM-475	1,000	-
เตารีด Tefal Maestro	2,200	-
โคมไฟตั้งโต๊ะ E14 MAX	40	-
โคมไฟตั้งโต๊ะ MAX-40-W-R50	40	-
ไมโครเวฟ ขนาด 20 ลิตร ELECTROLUX รุ่น EMM2016W	800	-
ไมโครเวฟ LG Intellowave MS-202W	-	-
ไมโครเวฟ LG รุ่น MS2427BW	1,200	-
ไมโครเวฟ Samsung รุ่น GE87Q	1,300	-
ไมโครเวฟ SHARP รุ่น R247	2,000	-
ตู้เย็น 6.9 คิว ELECTROLUX รุ่น ER1805C	-	-
ตู้เย็น 6.7 คิว Hitachi รุ่น R-Z190SV	-	-
ตู้เย็น Panasonic รุ่น NR-A1853	-	-
ตู้เย็น 4.94 คิว PHILCO รุ่น CG-51	-	-
ตู้เย็น Toshiba รุ่น GR-B145Z	-	-
โทรทัศน์ LG FLATRON	-	-
โทรทัศน์ Samsung Bilingual	48	-
โทรทัศน์ SAMSUNG LA40B550K1RXXT	250	-
โทรทัศน์ Sharp 21F-PF365	-	-

จากภาพที่ 4-1 เป็นตัวอย่างเป็นการเก็บข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของพัดลมโดยมีลำดับการดำเนินการดังนี้



ภาพที่ 4-1 การเก็บข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของพัดลม

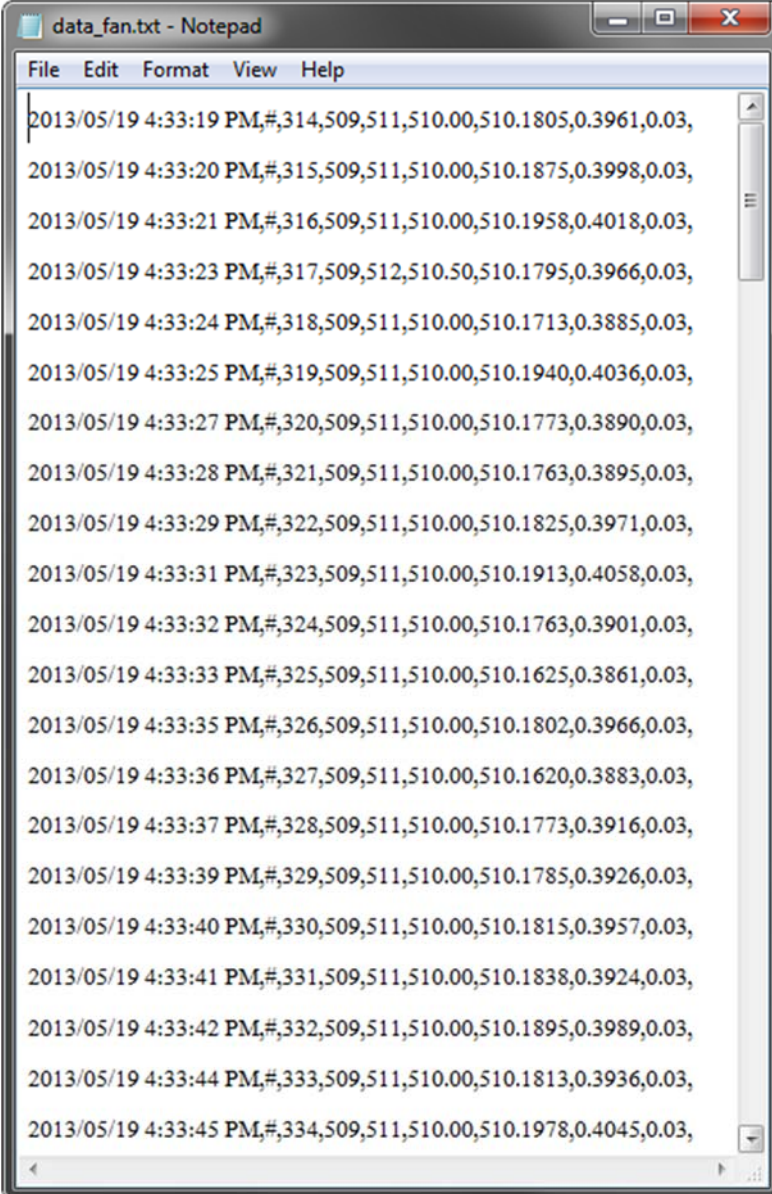
1. เมื่อโปรแกรมทำงาน ค่าที่ส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า (sensor) จะส่งข้อมูลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เปิดการเชื่อมต่อผ่านพอร์ตอนุกรมซึ่งในการเก็บข้อมูลนี้ใช้โปรแกรม Hercules SETUP utility by HW-group.com ทำการบันทึกลงไฟล์ ดังแสดงในภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ข้อมูลที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า

ซึ่งข้อมูลที่เครื่องคอมพิวเตอร์อ่านได้ประกอบด้วย คำวันที่และเวลาที่อ่าน รหัสอุปกรณ์
บรรทัดที่อ่าน ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัด ดังภาพที่
4-3

2. ผู้ทดลองทำการเปลี่ยนสถานะของเครื่องใช้ไฟฟ้าตัวที่ทำการทดสอบ เช่น พัดลม กด
สวิตช์เบอร์ 1 ทิ้งไว้ 2 นาที หลังจากนั้น กดสวิตช์เบอร์ 2 ทิ้งไว้อีก 2 นาที และกดสวิตช์เบอร์ 3 ทิ้ง
ไว้อีก 2 นาที จนครบทุกสถานะ
3. ไฟล์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบ Text file เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การจำแนกประเภท
ต่อไป แสดงดังภาพที่ 4-3



```

data_fan.txt - Notepad
File Edit Format View Help
2013/05/19 4:33:19 PM,#,314,509,511,510.00,510.1805,0.3961,0.03,
2013/05/19 4:33:20 PM,#,315,509,511,510.00,510.1875,0.3998,0.03,
2013/05/19 4:33:21 PM,#,316,509,511,510.00,510.1958,0.4018,0.03,
2013/05/19 4:33:23 PM,#,317,509,512,510.50,510.1795,0.3966,0.03,
2013/05/19 4:33:24 PM,#,318,509,511,510.00,510.1713,0.3885,0.03,
2013/05/19 4:33:25 PM,#,319,509,511,510.00,510.1940,0.4036,0.03,
2013/05/19 4:33:27 PM,#,320,509,511,510.00,510.1773,0.3890,0.03,
2013/05/19 4:33:28 PM,#,321,509,511,510.00,510.1763,0.3895,0.03,
2013/05/19 4:33:29 PM,#,322,509,511,510.00,510.1825,0.3971,0.03,
2013/05/19 4:33:31 PM,#,323,509,511,510.00,510.1913,0.4058,0.03,
2013/05/19 4:33:32 PM,#,324,509,511,510.00,510.1763,0.3901,0.03,
2013/05/19 4:33:33 PM,#,325,509,511,510.00,510.1625,0.3861,0.03,
2013/05/19 4:33:35 PM,#,326,509,511,510.00,510.1802,0.3966,0.03,
2013/05/19 4:33:36 PM,#,327,509,511,510.00,510.1620,0.3883,0.03,
2013/05/19 4:33:37 PM,#,328,509,511,510.00,510.1773,0.3916,0.03,
2013/05/19 4:33:39 PM,#,329,509,511,510.00,510.1785,0.3926,0.03,
2013/05/19 4:33:40 PM,#,330,509,511,510.00,510.1815,0.3957,0.03,
2013/05/19 4:33:41 PM,#,331,509,511,510.00,510.1838,0.3924,0.03,
2013/05/19 4:33:42 PM,#,332,509,511,510.00,510.1895,0.3989,0.03,
2013/05/19 4:33:44 PM,#,333,509,511,510.00,510.1813,0.3936,0.03,
2013/05/19 4:33:45 PM,#,334,509,511,510.00,510.1978,0.4045,0.03,

```

ภาพที่ 4-3 ตัวอย่างข้อมูลที่เก็บรวบรวม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยพบว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าถูกแบ่งได้เป็น 2 จำพวก คือ อุปกรณ์ไฟฟ้า แบบสองสถานะ (Binary state) และอุปกรณ์แบบหลายสถานะ (Multiple states) ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ลักษณะการใช้งานและสถานะของอุปกรณ์แต่ละชนิด

อุปกรณ์	ลักษณะใช้งาน	สถานะ
โคมไฟตั้งโต๊ะ	คนมีส่วนร่วม	BinaryState
เครื่องรับโทรทัศน์	คนมีส่วนร่วม	BinaryState
ตู้เย็น	เปิดทำงานตลอดเวลา	BinaryState
พัดลม	คนมีส่วนร่วม	MultipleStates
เครื่องเป่าผม	คนมีส่วนร่วม	MultipleStates
เตารีด	คนมีส่วนร่วม	BinaryState
เตาอบไมโครเวฟ	คนมีส่วนร่วม	BinaryState
กาต้มน้ำร้อน	คนมีส่วนร่วม	BinaryState

ในการเก็บข้อมูลที่ส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้ามาจัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์ จะใช้โปรแกรม Hercules SETUP utility by HW-group.com ซึ่งข้อมูลที่รับเข้ามานี้จะถูกจัดเก็บในรูปแบบแฟ้มข้อความ (CSV ไฟล์ที่ขึ้นด้วยคอมม่า) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ตัวอย่างค่าข้อมูลที่ได้ดังตารางที่ 4-3 ข้อมูลที่อ่านได้จากอุปกรณ์ปลายทางประกอบด้วย ค่าวันที่และเวลาที่อ่าน รหัสอุปกรณ์ บรรทัดที่อ่าน ค่าต่ำสุดค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้

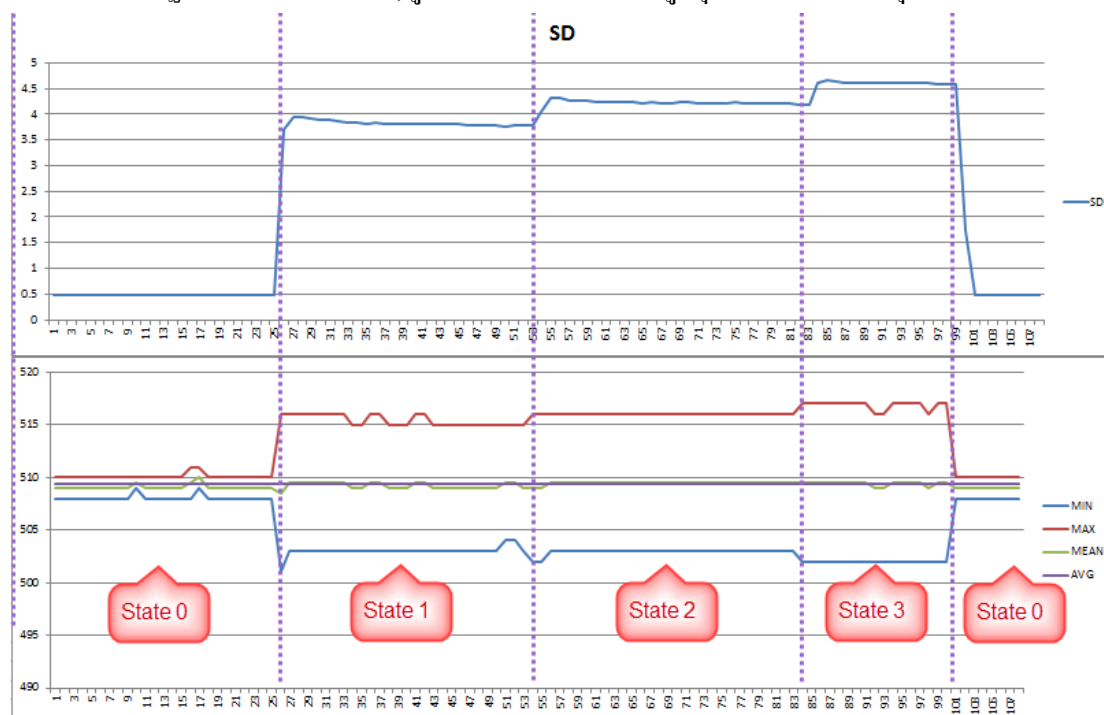
ตารางที่ 4-3 ข้อมูลที่รับมาจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า

Date Time	EQU	LINE	MIN	MAX	MEAN	AVG	SD	IRMS
2013/02/26 06:59:56	#U1	1	509	510	509.50	509.54	0.50	0.04
2013/02/26 06:59:57	#U1	2	509	511	510.00	509.55	0.50	0.04
2013/02/26 06:59:59	#U1	3	509	511	510.00	509.53	0.50	0.04
2013/02/26 07:00:00	#U1	4	508	511	509.50	509.53	0.50	0.04
2013/02/26 07:00:01	#U1	5	509	511	510.00	509.54	0.50	0.04
2013/02/26 07:00:03	#U1	6	509	510	509.50	509.54	0.50	0.04
2013/02/26 07:00:04	#U1	7	430	511	470.50	484.94	30.72	2.39
2013/02/26 07:00:05	#U1	8	430	510	470.00	484.04	30.91	2.30
2013/02/26 07:00:06	#U1	9	430	510	470.00	484.01	30.87	2.28

2013/02/26 07:00:08	#U1	10	431	511	471.00	484.34	30.74	2.28
2013/02/26 07:00:09	#U1	11	431	510	470.50	484.59	30.66	2.31
2013/02/26 07:00:10	#U1	12	431	510	470.50	484.32	30.79	2.32

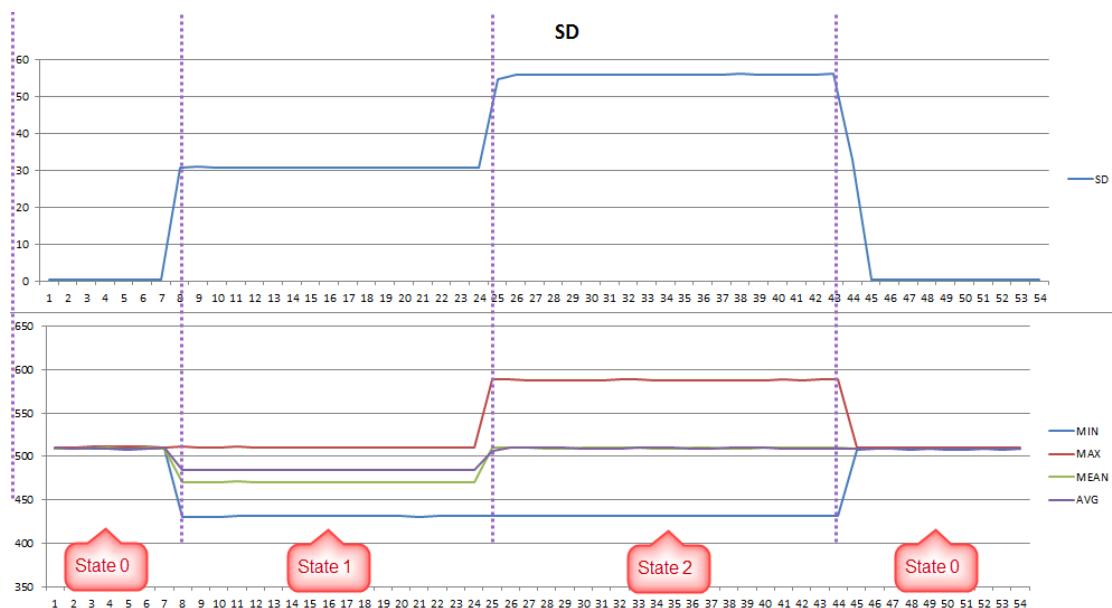
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแบบหลายสถานะ (เช่นพัดลมมีอยู่ 3 สถานะ) หากดูจากค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด หรือค่าเฉลี่ย ของการเปิดพัดลมแต่ละเบอร์ จะพบว่าค่าเหล่านี้จะไม่สามารถแยกสถานะของการใช้งานกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์นั้น ๆ ได้เลย ซึ่งแตกต่างจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการใช้กระแสไฟฟ้าจะพบว่าสามารถแยกสถานะได้อย่างชัดเจน (ภาพที่ 4-4) (กราฟด้านบนแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละสถานะ, รูปด้านล่างแสดงถึงค่าสูงสุด ค่ากลาง ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ย)



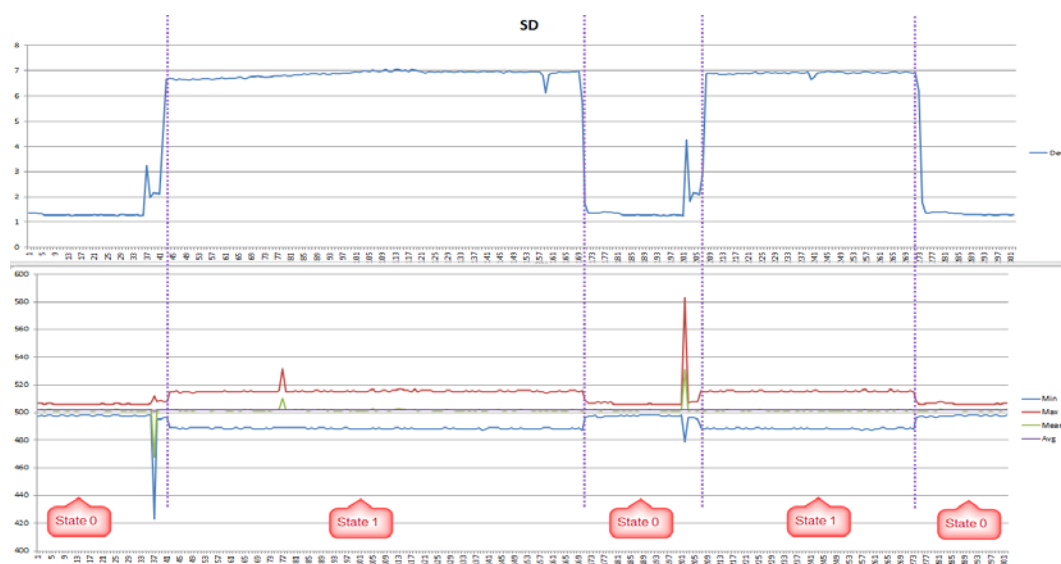
ภาพที่ 4-4 กราฟข้อมูลของพัดลม โดยแยกตามสถานะ

แต่ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด หรือค่าเฉลี่ย นั้นยังมีความจำเป็นในการแยกประเภทของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะแล้ว ค่าเหล่านี้อาจจะแปรผันก็ได้ ตัวอย่างเช่น เครื่องเป่าผม (ภาพที่ 4-5) จะเห็นว่าในสถานะที่ 1 นั้นค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด หรือค่าเฉลี่ย จะมีค่าต่ำ และเมื่อเปลี่ยน เป็นสถานะที่ 2 ค่าสูงสุดจะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-5 กราฟข้อมูลของเครื่องเป่าลมโดยแยกตามสถานะ

ส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแบบสองสถานะ เช่น โตรัทสน์ คณะผู้วิจัยพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเปิดปิดอุปกรณ์ (ภาพที่ 4-6)



ภาพที่ 4-6 กราฟข้อมูลของโตรัทสน์โดยแยกตามสถานะ

4.3 สร้างตัวแบบเพื่อจำแนกข้อมูล

ในการทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม Weka เวอร์ชัน 3.9.0 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ด้านการทำเหมืองข้อมูลที่ได้รับการยอมรับและแพร่หลายโดยโปรแกรมรับเพิ่มงาน (File) ที่อยู่ในรูปแบบเฉพาะ จากนั้นจึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการจำแนกประเภท

การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) เป็นการเรียนรู้ซึ่งต้องมีชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training data) ซึ่งมีทั้งชุดข้อมูลที่เป็นอินพุต และเอาต์พุต ชุดข้อมูลที่ได้มาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลไฟฟ้ายังไม่มีคลาสแอทริบิวต์ (Class attribute) ที่เป็นเอาต์พุตของการจำแนกที่เป็นตัวบอกสถานะว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดใด ดังนั้นในการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ทดสอบในกระบวนการทดสอบเพื่อสร้างโมเดลต้นแบบการจำแนกข้อมูลการทำเหมืองข้อมูล จึงต้องมีการกำหนดคลาสแอทริบิวต์ในด้านขาสุดของข้อมูล (ชื่อว่า CLASS_STATE) โดยบ่งบอกถึงชนิดอุปกรณ์ไฟฟ้า และ State ของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ ก่อนที่จะนำข้อมูลผ่านกระบวนการจำแนกประเภทในหัวข้อถัดไป ตัวอย่างข้อมูลแสดงใน ตารางที่ 4-4 ซึ่งจะใช้โปรแกรม Weka เป็นเครื่องมือในการจำแนกประเภทต่อไป

ตารางที่ 4-4 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดพัลลวม

Date Time	EQU	LINE	MIN	MAX	MEAN	AVG	SD	IRMS	CLASS_STATE
2013/02/26 06:59:56	#U1	1	509	510	509.50	509.54	0.50	0.04	FAN_STATE0
2013/02/26 06:59:57	#U1	2	509	511	510.00	509.55	0.50	0.04	FAN_STATE0
2013/02/26 06:59:59	#U1	3	509	511	510.00	509.53	0.50	0.04	FAN_STATE0
2013/02/26 07:00:00	#U1	4	508	511	509.50	509.53	0.50	0.04	FAN_STATE0
2013/02/26 07:00:01	#U1	5	509	511	510.00	509.54	0.50	0.04	FAN_STATE0
2013/02/26 07:00:03	#U1	6	509	510	509.50	509.54	0.50	0.04	FAN_STATE0
2013/02/26 07:00:04	#U1	7	430	511	470.50	484.94	30.72	2.39	FAN_STATE1
2013/02/26 07:00:05	#U1	8	430	510	470.00	484.04	30.91	2.30	FAN_STATE1
2013/02/26 07:00:06	#U1	9	430	510	470.00	484.01	30.87	2.28	FAN_STATE1
2013/02/26 07:00:08	#U1	10	431	511	471.00	484.34	30.74	2.28	FAN_STATE1
2013/02/26 07:00:09	#U1	11	431	510	470.50	484.59	30.66	2.31	FAN_STATE1
2013/02/26 07:00:10	#U1	12	431	510	470.50	484.32	30.79	2.32	FAN_STATE1

ข้อมูลที่ไหลคเข้าโปรแกรม Weka นี้เป็นชุดข้อมูลของการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด ข้อมูลมีแถว (Instances) ทั้งหมด 44,946 แถว และมีรายละเอียดของแต่ละ

แอตทริบิวต์ ได้แก่ ประเภทของข้อมูลในแอตทริบิวต์ (Type) จำนวนข้อมูลในแอตทริบิวต์ที่ขาดหายไป (Missing) จำนวนข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Distinct) จำนวนข้อมูลที่ปรากฏขึ้นแค่ครั้งเดียวในแอตทริบิวต์ (Unique) ค่าน้อยสุดในแอตทริบิวต์ (Minimum) ค่ามากสุดในแอตทริบิวต์ (Maximum) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแอตทริบิวต์ (Standard deviation) ซึ่งมีแอตทริบิวต์ในการจำแนกคือ State ซึ่งบ่งบอกสถานะของการเปิดปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าในแต่ละสถานะดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 รายละเอียดของแต่ละแอตทริบิวต์ทั้งหมด

Attribute Name	Min	Max	Mean	Average	Standard Deviation	State
Type	Numeric	Numeric	Numeric	Numeric	Numeric	Nominal
Missing	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Distinct	116	105	69	4843	7081	20
Unique	30 (0%)	24 (0%)	22 (0%)	2742 (29%)	5668 (60%)	0%
Minimum	205	505	362.5	2.6	0.289	
Maximum	514	952	661	533.444	116.979	
Mean	489.733	523.159	506.445	506.038	9.871	
Standard Deviation	32.614	34.949	9.546	8.965	20.146	

หากดูจากข้อมูลในตารางที่ 4-5 จะพบว่าไม่มีค่าของข้อมูลที่ขาดหายไป (Missing) อยู่ในแอตทริบิวต์เลย และค่าของแอตทริบิวต์ข้อมูล Standard deviation มีข้อมูลที่ปรากฏขึ้นแค่ครั้งเดียวในแอตทริบิวต์ (Unique) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์มากที่สุดที่ 60% รองลงมาคือแอตทริบิวต์ข้อมูล Average มีข้อมูลที่ปรากฏขึ้นแค่ครั้งเดียวในแอตทริบิวต์อยู่ที่ 29% ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะสามารถช่วยในการจำแนกข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

4.4 การเปรียบเทียบตัวแบบและประเมินประสิทธิภาพ

เทคนิคที่ใช้ในการทดสอบการจำแนกประกอบด้วย 4 วิธี ได้แก่ นาอิวเบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) ในการทดลองกำหนดใช้การตรวจสอบไขว้ (Cross validation) ที่ 10 fold ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 44,946 รายการจากอุปกรณ์ไฟฟ้ารวม 40 อุปกรณ์ โดยกำหนดการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 เทคนิคการจำแนกและการปรับค่าพารามิเตอร์

เทคนิค	พารามิเตอร์ที่ปรับ	ค่าที่ปรับ
Naïve Bayes	-	-
Decision Tree	Confidence factor	0.1 – 0.5
	Minimum number of instances	1 - 50
Neural Network (Multilayer Perceptron)	Hidden Layer	a, t, i, o
	Learning rate	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7, 0.8,0.9,1.0
	Training time	200, 300, 400, 500
Support Vector Machine	Cost	1 – 30
	Gamma	0.0, 0.2, ... , 1.0

ภายหลังจากการนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 44,946 รายการ จากอุปกรณ์ไฟฟ้ารวม 40 อุปกรณ์ ทดสอบกับเทคนิคการจำแนกแต่ละวิธี โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ตามที่ระบุในตารางที่ 4-6 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ CVPParameterSelection ในโปรแกรม Weka สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละเทคนิคการจำแนก

เทคนิค	พารามิเตอร์ที่ปรับ	พารามิเตอร์ที่ให้ผลดีที่สุด
Naïve Bayes	-	-
Decision Tree (J48)	Confidence factor	0.2
	Minimum number of instances	3
Neural Network (Multilayer Perceptron)	Hidden Layer	t
	Learning rate	0.5
	Training time	500
Support Vector Machine (LibSVM)	Cost	27
	Gamma	1.0

4.4.1 เทคนิคการจำแนกแบบนาอิวเบย์ (Naïve Bayes)

เทคนิคการจำแนกแบบนาอิวเบย์ไม่ต้องปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ใด ๆ โดยมีผลลัพธ์ในการจำแนก ดังนี้

1. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเทคนิคนี้ใช้เวลา 0.06 วินาที
2. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลถูกต้อง 36,415 รายการ หรือคิดเป็น 81.0194 % ของข้อมูลทั้งหมด
3. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลไม่ถูกต้อง 8,531 รายการ หรือคิดเป็น 18.9806% ของข้อมูลทั้งหมด

จากการทดลองเทคนิคการจำแนกแบบนาอิวเบย์ สามารถแสดงรายละเอียดผลการจำแนกแยกตามคลาส (classes) ดังตารางที่ 4-8 และมาตรวัดประสิทธิภาพดังภาพที่ 4.7 จะเห็นว่าตัวแบบนาอิวเบย์จำแนกผิดพลาดในสถานะ 2 ได้ถูกต้องน้อยที่สุด (คอลัมน์ d $105+687+1794+696=3,282$ ค่าทำนายถูกเพียง 1,794 ค่า) และจำแนกไคร์เป่าผสมสถานะ 3 ได้แม่นยำที่สุด (คอลัมน์ h $168+1+7=176$ ค่าทำนายถูก 168 ค่า)

ตารางที่ 4-8 ผลการจำแนกแยกตามคลาสของเทคนิคการจำแนกด้วยนาอ์ฟเบย์

TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	Class
0.562	0.030	0.447	0.562	0.498	CookerS1
0.833	0.016	0.709	0.833	0.766	CookerS2
0.503	0.038	0.466	0.503	0.484	FanS1
0.546	0.046	0.484	0.546	0.513	FanS2
0.682	0.020	0.725	0.682	0.703	FanS3
1.000	0.000	0.990	1.000	0.995	HairdryerS1
0.274	0.000	0.954	0.274	0.426	HairdryerS2
0.955	0.000	1.000	0.955	0.977	HairdryerS3
0.899	0.016	0.648	0.899	0.753	IronS1
0.986	0.001	0.993	0.986	0.989	LampS1
0.921	0.003	0.946	0.921	0.933	MicrowaveS1
0.913	0.011	0.981	0.913	0.945	RefS1
0.972	0.000	1.000	0.972	0.986	STATES0
0.825	0.028	0.796	0.825	0.810	TVS1

Classifier output

```

=== Confusion Matrix ===
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m  n  <-- classified as
1029  0  754  0  0  0  0  0  0  0  0  3  0  44 | a = CookerS1
  0 1656  0  0  0  9  7  0  269  0  48  0  0  0 | b = CookerS2
  96  0 1386 1143 128  0  0  0  0  0  0  3  0  0 | c = FanS1
105  0  687 1794  696  0  0  0  0  0  0  3  0  0 | d = FanS2
110  0  134  766 2177  0  0  0  0  0  0  4  0  1 | e = FanS3
  0  0  0  0  0 1004  0  0  0  0  0  0  0  0 | f = HairdryerS1
  0 518  0  0  0  1 288  0 242  0  2  0  0  0 | g = HairdryerS2
  0  0  0  0  0  0  0 168  1  0  7  0  0  0 | h = HairdryerS3
  0  75  0  0  0  0  7  0 1270  0  61  0  0  0 | i = IronS1
 38  0  11  0  0  0  0  0  0 3336  0  0  0  0 | j = LampS1
  0  0  0  0  0  0  0  0  177  0 2059  0  0  0 | k = MicrowaveS1
374 19  0  0  0  0  0  0  0  0  0 15200  0 1058 | l = RefS1
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  22  0  0 757  0 | m = STATES0
550 69  0  0  0  0  0  0  0  0  0  289  0 4291 | n = TVS1

```

ภาพที่ 4-7 Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกด้วยนาอ์ฟเบย์

4.4.2 เทคนิคการจำแนกแบบต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree)

เทคนิคการจำแนกแบบต้นไม้ตัดสินใจมีการปรับค่าพารามิเตอร์ Confidence factor เท่ากับ 0.2 และ Minimum number of instances per leaf เท่ากับ 3 โดยมีผลลัพธ์ในการจำแนก ดังนี้

1. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเทคนิคนี้อยู่ที่ 0.66 วินาที
2. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลถูกต้อง 44,201 รายการ หรือคิดเป็น 98.3425% ของข้อมูลทั้งหมด
3. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลไม่ถูกต้อง 745 รายการ หรือคิดเป็น 1.6575% ของข้อมูลทั้งหมด

จากการทดลองเทคนิคการจำแนกแบบต้นไม้ตัดสินใจ สามารถแสดงรายละเอียดผลการจำแนกแยกตามคลาส (classes) ดังตารางที่ 4-9 และมาตรวัดประสิทธิภาพดังภาพที่ 4.8 จะเห็นว่าต้นไม้ตัดสินใจจำแนกพัฒนาในสถานะ 2 ได้ถูกต้องน้อยที่สุดเช่นเดียวกับตัวแบบนาอิวเบย์ (คอลัมน์ d ทำนายถูก 3,021 ค่า) และจำแนกคู่เขียนสถานะ 1 ได้แม่นยำที่สุด (คอลัมน์ 1 ทำนายถูก 16,648 ค่า)

ตารางที่ 4-9 ผลการจำแนกแยกตามคลาส (classes) ของเทคนิคการจำแนกด้วยต้นไม้ตัดสินใจ

TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	Class
0.978	0.001	0.981	0.978	0.980	CookerS1
0.997	0.000	1.000	0.997	0.999	CookerS2
0.927	0.004	0.941	0.927	0.934	FanS1
0.920	0.008	0.901	0.920	0.910	FanS2
0.938	0.004	0.945	0.938	0.941	FanS3
1.000	0.000	0.997	1.000	0.999	HairdryerS1
0.992	0.000	0.993	0.992	0.993	HairdryerS2
0.989	0.000	0.994	0.989	0.991	HairdryerS3
0.992	0.000	0.992	0.992	0.992	IronS1
0.999	0.000	0.999	0.999	0.999	LampS1
0.998	0.000	0.996	0.998	0.997	MicrowaveS1
1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	RefS1
0.996	0.000	1.000	0.996	0.998	STATES0
0.999	0.000	1.000	0.999	1.000	TVS1

Classifier output

```

=== Confusion Matrix ===
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m  n  <-- classified as
1790  0  33  3  0  0  0  0  0  0  0  4  0  0 | a = CookerS1
  0 1984  0  0  0  1  1  0  0  0  3  0  0  0 | b = CookerS2
 32  0 2555 154 15  0  0  0  0  0  0  0  0  0 | c = FanS1
  0  0  104 3021 160  0  0  0  0  0  0  0  0  0 | d = FanS2
  1  0  22  175 2994  0  0  0  0  0  0  0  0  0 | e = FanS3
  0  0  0  0  0 1004  0  0  0  0  0  0  0  0 | f = HairdryerS1
  0  0  0  0  0  0 1043  0  8  0  0  0  0  0 | g = HairdryerS2
  0  0  0  0  0  0  0 174  0  0  2  0  0  0 | h = HairdryerS3
  0  0  0  0  0  1  6  0 1401  0  5  0  0  0 | i = IronS1
  0  0  2  0  0  0  0  0  0 3383  0  0  0  0 | j = LampS1
  0  0  0  0  0  0  0  1  3  0 2232  0  0  0 | k = MicrowaveS1
  1  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0 16648  0  1 | l = RefS1
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  3  0  0 776  0 | m = STATES0
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  3  0 5196 | n = TVS1

```

ภาพที่ 4-8 Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกด้วยต้นไม้ตัดสินใจ

4.4.3 เทคนิคการจำแนกแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network)

เทคนิคการจำแนกแบบโครงข่ายประสาทเทียมมีการปรับค่าพารามิเตอร์ Hidden layers เป็น t ($\text{attribs} + \text{classes}$) Learning rate เท่ากับ 0.5 และ Trainingtime 500 โดยมีผลลัพธ์ในการจำแนกดังนี้

1. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเทคนิคนี้อยู่ที่ 195.37 วินาที
2. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลถูกต้อง 40,107 รายการ หรือคิดเป็น 89.2337% ของข้อมูลทั้งหมด
3. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลไม่ถูกต้อง 4,839 รายการ หรือคิดเป็น 10.7663% ของข้อมูลทั้งหมด

จากการทดลองเทคนิคการจำแนกแบบโครงข่ายประสาทเทียม สามารถแสดงรายละเอียดผลการจำแนกแยกตามคลาส (classes) ดังตารางที่ 4-10 และมาตรวัดประสิทธิภาพดังภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมจำแนกได้แม่นยำสถานะ 3 ได้ถูกต่อน้อยที่สุด (คอลัมน์ h ทำนายถูก 35 ค่า) และจำแนกตู้เย็นสถานะ 1 ได้แม่นยำที่สุด (คอลัมน์ l ทำนายถูก 16,644 ค่า)

ตารางที่ 4-10 ผลการจำแนกแยกตามคลาสของเทคนิคการจำแนกโครงข่ายประสาทเทียม

TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	Class
0.527	0.004	0.852	0.527	0.651	CookerS1
0.904	0.003	0.942	0.904	0.923	CookerS2
0.701	0.038	0.545	0.701	0.613	FanS1
0.589	0.036	0.563	0.589	0.576	FanS2
0.706	0.017	0.757	0.706	0.730	FanS3
0.856	0.001	0.946	0.856	0.899	HairdryerS1
0.860	0.000	0.983	0.860	0.917	HairdryerS2
0.199	0.002	0.313	0.199	0.243	HairdryerS3
0.992	0.005	0.855	0.992	0.919	IronS1
1.000	0.001	0.985	1.000	0.992	LampS1
1.000	0.004	0.937	1.000	0.968	MicrowaveS1
1.000	0.004	0.992	1.000	0.996	RefS1
0.945	0.000	1.000	0.945	0.972	STATES0
0.967	0.000	0.998	0.967	0.982	TVS1

Classifier output

```

=== Confusion Matrix ===
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m  n  <-- classified as
964  0 719 86  8  0  0  0  0  0  0 47  0  6 | a = CookerS1
  0 1798  0  0  0  0  0 49 61  0 81  0  0  0 | b = CookerS2
  0  0 1932 692 124  0  0  0  0  8  0  0  0  0 | c = FanS1
  0  0 757 1935 591  0  0  0  0  1  0  1  0  0 | d = FanS2
72  0 139 725 2252  0  0  0  0  0  0  3  0  1 | e = FanS3
  0 40  0  0  0 859  0  0 44  0  0 61  0  0 | f = HairdryerS1
  3  2  0  0  0  0 904  8 132  0  2  0  0  0 | g = HairdryerS2
  1 68  0  0  0  0  5 35  0  0 67  0  0  0 | h = HairdryerS3
  0  0  0  0  0  0 11  0 1402  0  0  0  0  0 | i = IronS1
  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0 3384  0  0  0 | j = LampS1
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 2236  0  0 | k = MicrowaveS1
  2  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 16644  0  5 | l = RefS1
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 43  0  0 736 | m = STATES0
90  0  0  0  0  0 49  0 20  0  0  0 14  0 5026 | n = TVS1

```

ภาพที่ 4-9 Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกโครงข่ายประสาทเทียม

4.4.4 เทคนิคการจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine)

เทคนิคการจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมีการปรับค่าพารามิเตอร์ Cost เท่ากับ 27 และ Gamma เท่ากับ 1.0 โดยมีผลลัพธ์ในการจำแนกดังนี้

1. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเทคนิคนี้อยู่ที่ 152.55 วินาที
2. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลถูกต้อง 43,131 รายการ หรือคิดเป็น 95.9618% ของข้อมูลทั้งหมด
3. จากข้อมูลที่มี 44,946 รายการ นั้น มีการทำนายข้อมูลไม่ถูกต้อง 1,815 รายการ หรือคิดเป็น 4.0382% ของข้อมูลทั้งหมด

จากการทดลองเทคนิคการจำแนกแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน สามารถแสดงรายละเอียดผลการจำแนกแยกตามคลาส (classes) ดังตารางที่ 4-11 และมาตรวัดประสิทธิภาพดังภาพที่ 4.10 จะเห็นว่าตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจำแนกพัฒนาในสถานะ 2 ได้ถูกต้องน้อยที่สุดเช่นเดียวกับตัวแบบนาอิวเบย์และต้นไม้ตัดสินใจ (คอลัมน์ d ทำนายถูก 1,794 ค่า) และจำแนกกาต้มน้ำร้อน ไคร์เป่าผม ตู้เย็นและโทรทัศน์ได้แม่นยำใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4-11 ผลการจำแนกแยกตามคลาสของเทคนิคการจำแนกซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	F-Measure	Class
0.928	0.003	0.940	0.928	0.934	CookerS1
0.969	0.000	1.000	0.969	0.984	CookerS2
0.860	0.010	0.845	0.860	0.852	FanS1
0.821	0.014	0.822	0.821	0.821	FanS2
0.890	0.006	0.914	0.890	0.902	FanS3
0.965	0.000	1.000	0.965	0.982	HairdryerS1
0.950	0.000	0.999	0.950	0.974	HairdryerS2
0.881	0.000	1.000	0.881	0.937	HairdryerS3
0.938	0.000	0.998	0.938	0.967	IronS1
0.995	0.000	0.999	0.995	0.997	LampS1
1.000	0.010	0.846	1.000	0.917	MicrowaveS1

0.998	0.000	1.000	0.998	0.999	RefS1
0.988	0.000	1.000	0.988	0.994	STATES0
0.993	0.000	1.000	0.993	0.997	TVS1

Classifier output

```

=== Confusion Matrix ===
  a   b   c   d   e   f   g   h   i   j   k   l   m   n  <-- classified as
1029  0  754  0  0  0  0  0  0  0  0  3  0  44 | a = CookerS1
  0 1656  0  0  0  9  7  0 269  0  48  0  0  0 | b = CookerS2
  96  0 1386 1143 128  0  0  0  0  0  0  3  0  0 | c = FanS1
105  0  687 1794  696  0  0  0  0  0  0  3  0  0 | d = FanS2
110  0  134  766 2177  0  0  0  0  0  0  4  0  1 | e = FanS3
  0  0  0  0  0 1004  0  0  0  0  0  0  0  0 | f = HairdryerS1
  0 518  0  0  0  1 288  0 242  0  2  0  0  0 | g = HairdryerS2
  0  0  0  0  0  0  0 168  1  0  7  0  0  0 | h = HairdryerS3
  0  75  0  0  0  0  7  0 1270  0  61  0  0  0 | i = IronS1
 38  0  11  0  0  0  0  0  0  0 3336  0  0  0 | j = LampS1
  0  0  0  0  0  0  0  0 177  0 2059  0  0  0 | k = MicrowaveS1
374 19  0  0  0  0  0  0  0  0  0 15200  0 1058 | l = RefS1
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  22  0  0 757  0 | m = STATES0
550 69  0  0  0  0  0  0  0  0  0  289  0 4291 | n = TVS1

```

ภาพที่ 4-10 Confusion Matrix ของเทคนิคการจำแนกซ์พอร์ดเวกเตอร์แมชชีน

4.4.5 ผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า

ผลการทดลองโดยใช้ข้อมูลกระแสไฟฟ้าทั้งหมด 44,946 รายการ กับเทคนิคการจำแนกทั้ง 4 วิธี แสดงดังตารางที่ 4-12 พบว่าเทคนิคการจำแนกตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจ (J48) ให้ผลการจำแนกแม่นยำมากกว่าขั้นตอนวิธีแบบอื่น ๆ โดยอาจเกิดจากข้อจำกัดของแต่ละขั้นตอนวิธี ดังจะอภิปรายในบทที่ 5 ต่อไป

ตารางที่ 4-12 สรุปผลการจำแนกทั้ง 4 วิธีในการจำแนกประเภท

Attribute	Classification Technique			
	Decision Tree	Naïve Bayes	Neural Network	Support Vector Machine
Time (Seconds)	0.66	0.06	195.37	6.54
% Correctly	98.34%	81.02%	89.23%	95.96%
% Incorrectly	1.66%	18.98%	10.77%	4.04%
Precision	0.983	0.828	0.898	0.961
Recall	0.983	0.810	0.892	0.960

จากภาพที่ 4-8 แสดงมาตรวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี J48 ($C=0.2$, $\text{minNumObj} = 3$) ซึ่งขั้นตอนวิธี J48 ให้ผลลัพธ์ในการจำแนกแม่นยำมากที่สุด โดยข้อมูลในแต่ละคอลัมน์ คือ ค่าที่โมเดลทำนายผลออกมาในแต่ละคลาส และข้อมูลในแต่ละแถวคือค่าที่เป็นจริงในแต่ละคลาส ตัวอย่างเช่น ค่าตัวเลขในคอลัมน์ c แถว c หมายความว่าโมเดลทำนายได้ถูกต้องว่าเป็นข้อมูลของพัสดุกำลังทำงานในสถานะที่ 1 จำนวน 2555 รายการ จากจำนวนรายการทั้งหมด 2,756 ($32+2555+154+15$) หรือ ค่าตัวเลขในคอลัมน์ i แถว k หมายความว่าโมเดลทำนายผลผิดพลาดไปเป็นข้อมูลของไมโครเวฟกำลังทำงานในสถานะที่ 1 จำนวน 3 รายการ จากข้อมูลของเตารีดในสถานะที่ 1 ทั้งหมด 1,401 รายการ โดยข้อมูลที่อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมคือข้อมูลที่โมเดลสามารถทำนายได้ถูกต้อง (มีความแม่นยำ 98.34 %) และข้อมูลที่อยู่นอกเส้นทแยงมุมคือข้อมูลที่โมเดลทำนายผิดพลาด จากมาตรวัดจะเห็นว่าขั้นตอนวิธี J48 สามารถทำนายผลเครื่องเป่าผมกำลังทำงานในสถานะที่ 1 ได้แม่นยำมากที่สุดคือ 1,004 รายการซึ่งไม่มีค่าที่ทำนายผิดเลย และทำนายผลพัสดุกำลังทำงานในสถานะที่ 2 ค่าที่สุดซึ่งถูกต้อง 3,021 รายการจาก 3,285 รายการ

ตัวอย่างกฎที่ได้จากขั้นตอนวิธี J48:

```
IF (SD <= 2.1749)
  IF (MIN >501)
    IF (AVG <= 509.2848)
      Classify as RefS0
    ELSE IF (SD >0.4997)
      IF (SD <= 0.9415)
```

IF (MIN <= 504)

Classify as FanS0

เมื่อลองนำข้อมูลในรายการที่ 1478 ซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

MIN=504.0, MAX=515.0, MEAN=509.5, AVG=509.3883 and SD=1.2985

จะได้ผลการจำแนกจากตัวอย่างกฎคือพัฒมทำงานในสถานะ 0 หรือเมื่อนำข้อมูลรายการที่ 5007 ซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

MIN=508.0, MAX=510.0, MEAN=509.0, AVG= 509.1133 and SD=0.3477

จะจำแนกได้เป็นตู้เย็นกำลังทำงานในสถานะ 0 เป็นต้น

4.5 การนำตัวแบบไปใช้จริง

จากผลการทดลองในข้อ 4.4 ทำให้ทราบว่าเทคนิคการจำแนกตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจให้ผลลัพธ์การจำแนกแม่นยำมากที่สุด ดังนั้นจึงนำเทคนิคการจำแนกตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจมาสร้างกฎการจำแนกแสดงตัวอย่าง ดังนี้

IF (SD <= 2.1749)

IF (MIN >501)

IF (AVG <= 509.2848)

Classify as RefS0

ELSE IF (SD >0.4997)

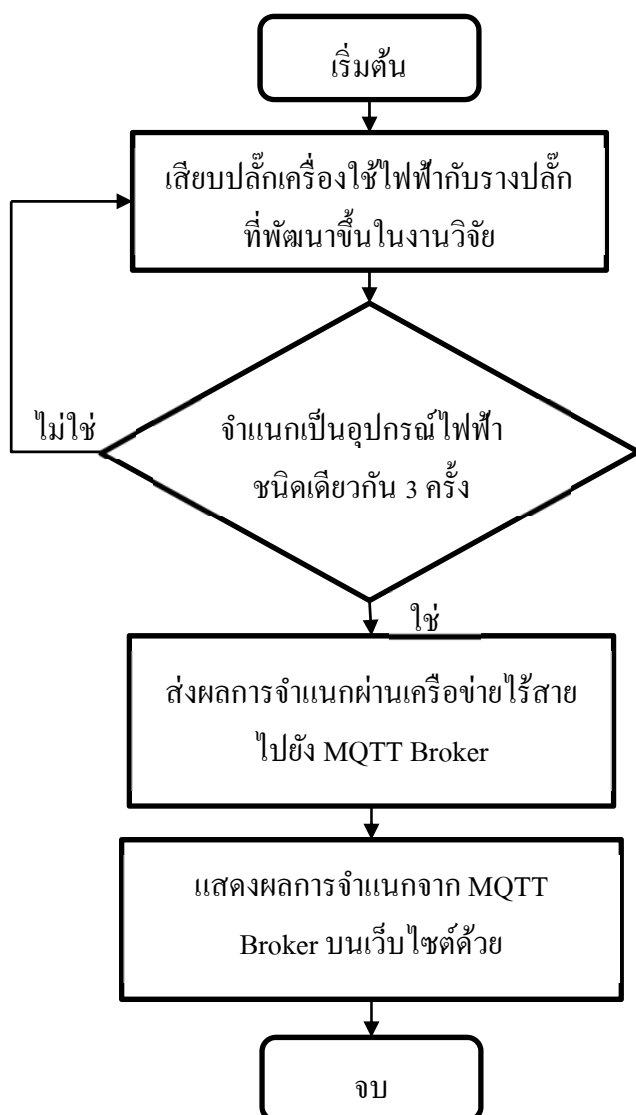
IF (SD <= 0.9415)

IF (MIN <= 504)

Classify as FanS0

.....

นำกฎที่ได้เขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบการจำแนกกับข้อมูลจากการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเวลาจริงโดยมีขั้นตอนการทำงานดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 ขั้นตอนการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเวลาจริง (Real time)

โดยทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อไปนี้เป็นคือ พัดลม โทรทัศน์ ทีวีเป่าผม ไมโครเวฟ โคมไฟตั้งโต๊ะ ใช้เวลาประมาณ 30 วินาทีในแต่ละอุปกรณ์ซึ่งได้ผลการทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนี้

4.5.1 อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 อุปกรณ์ทดสอบการจำแนกแต่ละปลั๊กไฟฟ้า

จากตารางที่ 4-13 พบว่าไม่สามารถจำแนกพัดลมสถานะ 1 ได้เลย (โดยผลการจำแนกจำแนกเป็นพัดลมสถานะ 2 หรือ 3 แทน) นอกจากนี้ยังพบว่า ไมโครเวฟจำแนกได้ 96% และ 90% สองปลั๊กอีก 2 ปลั๊กไม่แม่นยำ ส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่นสามารถจำแนกได้อย่างแม่นยำทุกปลั๊ก

ตารางที่ 4-13 ผลการจำแนกแบบเวลาจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้ง 5 ชนิด

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ปลั๊ก 1	ปลั๊ก 2	ปลั๊ก 3	ปลั๊ก 4
พัดลม State1	0%	0%	0%	0%
พัดลม State2	33.6%	23.3%	10%	53.3%
พัดลม State3	100%	100%	100%	100%
ไดร์เป่าผม State1	100%	100%	100%	100%
ไดร์เป่าผม State2	100%	100%	100%	100%
โทรทัศน์ State1	77.7%	100%	100%	100%
ไมโครเวฟ State1	96%	90%	3.33%	3.3%
คอมไฟตั้งโต๊ะ State1	100%	100%	100%	100%

4.5.2 อุปกรณ์ไฟฟ้า 2 อุปกรณ์ทดสอบการจำแนกกับคู่ปลั๊ก 1, 2 และ 3, 4

เมื่อนำอุปกรณ์ไฟฟ้า 2 อุปกรณ์มาทดสอบจำแนกพร้อมกันโดยทดสอบเป็นคู่ปลั๊กคือ 1,2 และ 3,4 จากผลการจำแนกดังตาราง 4-14 พบว่าไมโครเวฟเมื่อนำมาทดสอบการจำแนกร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นจะส่งผลให้ผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาจับคู่มีความแม่นยำลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่น ไมโครเวฟ - พัดลม หรือ ไมโครเวฟ - คอมไฟตั้งโต๊ะ เป็นต้น

ตารางที่ 4-14 ผลการจำแนกแบบเวลาจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้า 2 ชนิดทำงานพร้อมกัน

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ปลั๊ก 1, 2	ปลั๊ก 3, 4	ค่าเฉลี่ยคู่ปลั๊ก (1+3)/2, (2+4)/2
พัดลม, ไดร์เป่าผม	100%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
พัดลม, ไมโครเวฟ	0%, 100%	0%, 0%	0%, 50%
พัดลม, โทรทัศน์	100%, 73.3 %	100%, 100%	100%, 86.65%
พัดลม, คอมไฟตั้งโต๊ะ	100%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
ไดร์เป่าผม, โทรทัศน์	100%, 24.89%	100%, 0%	100%, 12.45%
ไดร์เป่าผม, ไมโครเวฟ	100%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
ไดร์เป่าผม, คอมไฟตั้งโต๊ะ	100%, 100%	100%, 100%	100%, 100%
โทรทัศน์, คอมไฟตั้งโต๊ะ	99.3%, 100%	100%, 100%	99.65%, 100%
โทรทัศน์, ไมโครเวฟ	0%, 0%	0%, 0%	0%, 0%
ไมโครเวฟ, คอมไฟตั้งโต๊ะ	0%, 100%	0%, 0%	0%, 50%

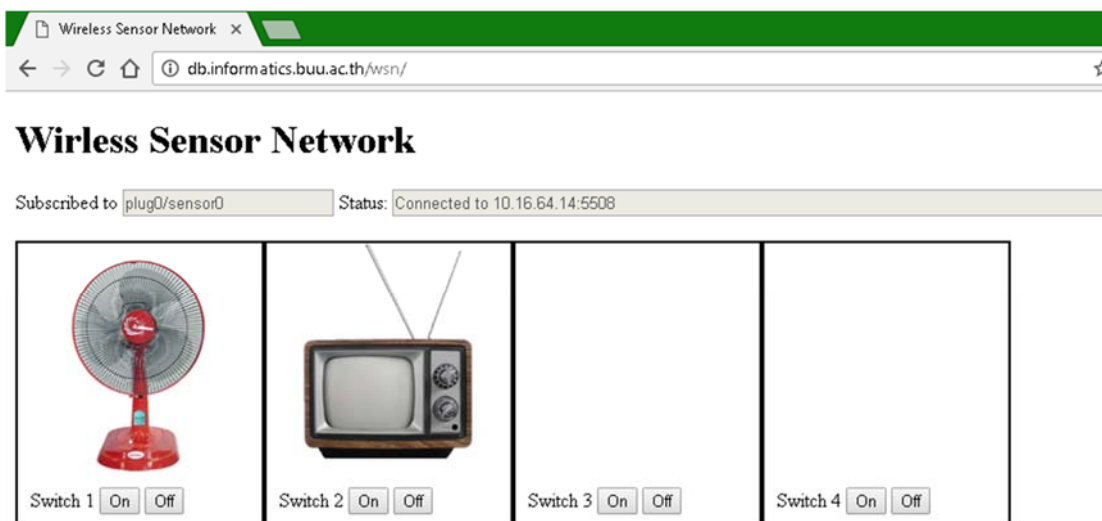
4.5.3 อุปกรณ์ไฟฟ้า 4 อุปกรณ์ทดสอบการจำแนกพร้อมกันทั้ง 4 ปลั๊ก

เมื่อนำอุปกรณ์ไฟฟ้า 2 อุปกรณ์มาทดลองจำแนกพร้อมกันโดยทดสอบเป็นคู่ปลั๊กคือ 1,2 และ 3,4 จากผลการจำแนกดังตาราง 4-14 พบว่าไมโครเวฟเมื่อนำมาทดสอบการจำแนกร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นจะส่งผลให้ผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาจับคู่มีความแม่นยำลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่น ไมโครเวฟ - พัดลม หรือ ไมโครเวฟ - โคมไฟตั้งโต๊ะ เป็นต้น

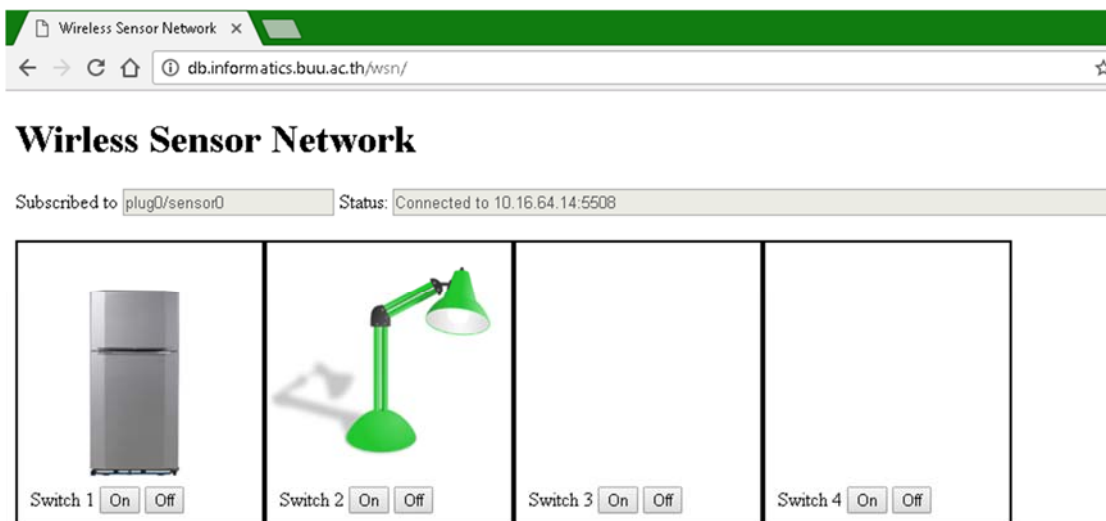
ตารางที่ 4-15 ผลการจำแนกแบบเวลาจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้ง 5 ชนิด

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ปลั๊ก 1, 2, 3, 4
โคมไฟตั้งโต๊ะ, พัดลม, ทีวี, โทรทัศน์	100%, 100%, 100%, 24.5%
โทรทัศน์, โคมไฟตั้งโต๊ะ, พัดลม, ทีวี	0%, 0%, 0%, 0%
ทีวี, โทรทัศน์, โคมไฟตั้งโต๊ะ, พัดลม	0%, 0%, 0%, 0%
พัดลม, ทีวี, โทรทัศน์, โคมไฟตั้งโต๊ะ	0%, 0%, 0%, 0%

โดยการทำงานของระบบจะทำการส่งผลการจำแนกและปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางเพื่อทำการแสดงผลบนเว็บไซต์ดังภาพที่ 4 -12, 4-13



ภาพที่ 4-12 แสดงผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าพัดลมและโทรทัศน์แบบเวลาจริงบนเว็บไซต์



ภาพที่ 4-13 แสดงผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าตู้เย็นและ โคมไฟแบบเวลาจริงบนเว็บไซต์

ภาพที่ 4-12 และ 4-13 แสดงผลการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้า พัดลม โทรทัศน์ ตู้เย็น และ โคมไฟ บนหน้าเว็บไซต์และผู้ใช้สามารถสั่งเปิดปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้นได้ผ่านหน้าเว็บไซต์ได้ทันที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยใช้ค่าการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่เทียบกับรางวัลไฟฟ้าซึ่งอาจมีหลายอุปกรณ์ใช้งานไฟฟ้าพร้อมกัน ข้อมูลการใช้กระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้จากการเก็บข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเรือนหรือสำนักงาน โดยแบ่งเป็น 8 ชนิด ๆ 5 เครื่อง (รวมทั้งหมดเป็น 40 เครื่อง) ได้แก่ โคมไฟตั้งโต๊ะ โทรทัศน์ตู้เย็น พัดลม เครื่องเป่าผม เตารีด เตอบนไมโครเวฟ และกาต้มน้ำร้อน ค่าการใช้กระแสไฟฟ้าถูกนำมาคำนวณทางสถิติเพื่อหาค่าน้อยสุด (Min) ค่ามากที่สุด (Max) ค่ากลาง (Mid-range) ค่าเฉลี่ย (Average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) (คำนวณจากค่ากระแสไฟฟ้า 500 ค่าในหนึ่งวินาที)และทำการจัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์ก่อนนำไปใช้ทดสอบการจำแนกผ่านเทคนิคการจำแนก 4 วิธี ได้แก่ นาอิวเบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อหาเทคนิคการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าที่แม่นยำมากที่สุดนำมาทดสอบการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเวลาจริง (Real time) โดยจากการทดลองพบว่าตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจให้ผลการจำแนกแม่นยำมากที่สุด (ค่าความแม่นยำในการจำแนก 98.34%) ซึ่งนอกจากความแม่นยำที่ได้แล้วแบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจยังง่ายต่อความเข้าใจและง่ายต่อการนำไปพัฒนาจริงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-Mini อีกด้วย

การนำตัวแบบการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้ามาใช้ทดสอบแบบเวลาจริง ผู้วิจัยเขียนกฎที่ได้จากตัวแบบต้นไม้ตัดสินใจใส่เข้าไปยังอุปกรณ์ตรวจจับค่ากระแสไฟฟ้าโดยเมื่อมีการเสียบปลั๊กอุปกรณ์ไฟฟ้าบนเครื่องตรวจวัดกระแสไฟฟ้านี้จะทำการคำนวณเปรียบเทียบค่าที่ได้กับแบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจและส่งผลการจำแนกไปยังเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย โดยผู้วิจัยได้จัดทำระบบการแสดงผลข้อมูลบนหน้าเว็บไซต์ซึ่งตัวระบบสามารถแสดงผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เสียบกับรางวัลอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้านี้แบบเวลาจริงพร้อมสามารถสั่งเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ทันที

5.2 อภิปราย

5.2.1 ประเภทของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่นำมาจำแนก

เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ปัจจุบันสามารถแบ่งประเภทตามจำนวนของสถานะการทำงานได้ 3 ประเภท [4] คือ 1. ประเภทที่มีเพียงสองสถานะ (เปิด-ปิด) เช่น หลอดไฟ โตรัทสน์ 2. ประเภทที่มีมากกว่าสองสถานะแต่จำนวนของสถานะจำกัด เช่น พัดลม ไดร์เป่าผมและ 3. ประเภทที่มีจำนวนสถานะไม่จำกัด เช่น สว่าน หลอดไฟปรับความสว่างได้ ดังภาพที่ 2-21 โดยในงานวิจัยนี้มุ่งหวังการจำแนกเครื่องใช้ไฟฟ้าตามประเภทอุปกรณ์ไฟฟ้า 2 ประเภทคือ 1.ประเภทที่มีเพียงสองสถานะ (เปิด-ปิด) 2. ประเภทที่มีมากกว่าสองสถานะแต่จำนวนของสถานะจำกัด

5.2.2 การคัดเลือกแอททริบิวต์สำหรับการจำแนก

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาวิธีการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า[10] โดยใช้รูปแบบการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า (หรือเรียกว่าลายเซ็นต์การใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์) โดยพิจารณา พลังงานจริง (Real power), พลังงานปฏิกิริยา (Reactive power), พลังงานปรากฏ (Apparent power), แร่งดัน root mean square (Vrms), ค่ากระแส root mean square (Irms), ค่ากระแสสูงสุด (Imax), ค่ากระแสต่ำสุด (Imin), ค่ากระแสเฉลี่ย (Iavg), การเกิดฮาร์โมนิก, การเกิดสัญญาณรบกวน, รูปแบบการเปลี่ยนสถานะ (Repeatable transient), ระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะ (Transient response time) เป็นต้น งานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าในการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ โดยนำค่ากระแสไฟฟ้า 500 ค่าในหนึ่งวินาทีมาคำนวณทางสถิติเพื่อหาค่าน้อยสุด (Min), ค่ามากที่สุด (Max), ค่ากลาง (Mid-range), ค่าเฉลี่ย (Average)และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ซึ่งการทดลองได้ยืนยันว่าค่าทางสถิติเหล่านี้สามารถนำมาใช้จำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำดังเช่นในงานวิจัย Design and implementation of a high-fidelity AC metering network[9] มีการนำค่าของกระแสไฟฟ้าร่วมกับแรงดันไฟฟ้าซึ่งให้ผลความแม่นยำมากกว่า 84%

5.2.3 การเลือกฮาร์ดแวร์สำหรับใช้ในระบบ

การตรวจจับข้อมูลการใช้กระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ใช้ ACS712 Current Sensor Carrier -20 to +20A เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า วัดได้ทั้งกระแสไฟ DC และ AC สามารถวัดกระแสที่ไหลได้ 2 ทิศทาง ทั้งค่าบวกและค่าลบที่มีขนาด 20A ($\pm 20A$) ซึ่งอยู่ในช่วงการวัดที่เหมาะสมในใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าตามอาคารบ้านเรือนหรือสำนักงาน (ขนาดมิเตอร์ตามบ้าน 5A - 15A โหลดได้มากที่สุด 15A – 45A [11]) นอกจากนี้ยังง่ายต่อการนำไปใช้งานและราคาถูก

ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini เพื่อการคำนวณและการประมวลผลข้อมูล ทั้งในส่วนของการจัดเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าและการคำนวณเพื่อการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบ เวลาจริงจากกฎที่ได้จากการทดลองพร้อมส่งข้อมูลไปแสดงผลยังเครือข่ายผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย ผู้วิจัยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro-mini เพราะมีขนาดเล็กมีความสามารถครบถ้วนตามความต้องการของระบบเช่น สามารถเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าได้อย่างน้อย 4 เซ็นเซอร์ สามารถเชื่อมต่อกับโมดูลเครือข่ายไร้สาย ESP8266 (ESP8266-01) เพื่อส่งข้อมูล และสามารถเชื่อมต่อกับรีเลย์เพื่อควบคุมการเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ Arduino Pro-mini และ ESP8266 ยังมีราคาถูกมากทำให้ตัวอุปกรณ์จำแนกที่สร้างขึ้นในระบบมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง

5.2.4 ขั้นตอนวิธีสำหรับการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้า

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลกระแสไฟฟ้า ผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิคการจำแนกที่เป็นที่นิยมโดยทั่วไป 4 วิธี คือ นาอ็ฟเบย์ ต้นไม้ตัดสินใจ (J48) โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (MLP) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ผู้วิจัยสร้างตัวแบบโดยใช้ข้อมูลที่จัดเก็บและผ่านการจัดเตรียมข้อมูลสำหรับใช้ใน โปรแกรม WEKA เวอร์ชัน 4.9.0 โดยผู้วิจัยทำการปรับจูนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแต่ละตัวแบบเพื่อให้ผลการจำแนกสูงสุดในแต่ละเทคนิคดังตารางที่ 4-6 ที่ได้กล่าวไปในบทก่อนหน้า

ผลการจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าจากชุดข้อมูลการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรงรางปลั๊กในงานวิจัยนี้พบว่าตัวแบบการจำแนกต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้ขั้นตอนวิธี J48 ให้ผลลัพธ์การจำแนกแม่นยำมากที่สุดรองลงมาคือตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (MLP) และตัวแบบนาอ็ฟเบย์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาข้อมูลและผลการจำแนกในแต่ละตัวแบบสามารถวิเคราะห์สรุปผลได้ดังนี้

ตัวแบบนาอ็ฟเบย์

ตัวแบบนาอ็ฟเบย์ให้ผลลัพธ์ในการจำแนกต่ำที่สุด (ทำนายผิดพลาดที่ 18.98%) โดยค่าปริยายแล้ว ตัวแบบนาอ็ฟเบย์ที่ทำงานโดยโปรแกรมประยุกต์ WEKA อนุมานว่าข้อมูลที่เป็นตัวเลขมีการกระจายแบบเกาส์เซียน และประมาณการคุณลักษณะที่เป็นตัวเลขให้เป็นชื่อแทนตัวเลข ซึ่งการกระทำในลักษณะดังกล่าวอาจส่งผลให้ความแม่นยำในการทำนายผลของตัวแบบนาอ็ฟเบย์ต่ำลง และในขณะที่เดียวกันค่าของแต่ละคุณลักษณะอาจมีความใกล้เคียงกันมาก เป็นการยากที่ตัวแบบนาอ็ฟเบย์จะจำแนกความแตกต่างของอุปกรณ์ไฟฟ้าบนพื้นฐานของการประมาณการ

คุณลักษณะที่เป็นตัวเลขให้เป็นชื่อแทนตัวเลข จากตัวอย่างด้านล่างแสดงให้เห็นถึงการทำนายที่ผิดพลาดคือ

ทำนายเป็น : ผู้เย็นทำงานอยู่ในสถานะ 1

คลาสที่เป็นจริง : เครื่องเป่าผมทำงานอยู่ในสถานะ 1

ค่าของข้อมูล [Min, Max, Mid-range, Avg, SD]: [499, 510, 504.5, 506.37, และ 3.85]

เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะของผู้เย็นทำงานอยู่ในสถานะ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูล Min, Max, Mid-range, Avg, และ SD คือ 489.64, 521.72, 505.68, 505.64, และ 9.66 ตามลำดับ จะเห็นว่าข้อมูลของเครื่องเป่าผมที่ทำงานในสถานะ 1 มีความใกล้เคียงกันมากกับข้อมูลโดยส่วนใหญ่ของผู้เย็นทำงานในสถานะที่ 1 ซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนในการจำแนกดังกล่าว

ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียบแบบเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น

ตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียบแบบเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น ถึงแม้ว่าเป็นขั้นตอนวิธีที่เป็นที่นิยมแต่จากผลการทดลองให้ผลลัพธ์ในการจำแนกที่ต่ำกับข้อมูลของเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยอาจเกิดจากตัวแบบชนิดนี้ให้ผลการทำนายไม่แม่นยำกับข้อมูลที่มีลักษณะเป็น โครงสร้างสูงและข้อมูลลักษณะชุดข้อมูลเวลา (Time series data) และ/หรืออาจเกิดจากขั้นตอนวิธีแบบขั้นตอนการส่งค่าย้อนกลับที่ทำงานเร็วทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local minimum at a high risk)

ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสร้างไฮเปอร์เพลนเพื่อแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าออกเป็นหนึ่งคลาสหรือมากกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เมื่อไฮเปอร์เพลนถูกสร้างขึ้นข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ด้านหนึ่งของไฮเปอร์เพลนก็จะจำแนกเป็นคลาสหนึ่ง ขณะที่ข้อมูลที่อยู่ในด้านอื่น ๆ ของไฮเปอร์เพลนก็จะถูกจำแนกเป็นคลาสต่าง ๆ เช่นกัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วข้อมูลที่อยู่ในด้านต่าง ๆ ของไฮเปอร์เพลนอาจไม่อยู่ในคลาสนั้น ๆ ก็เป็นไปได้ โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจะไม่สามารถจำแนกข้อมูลได้ผลลัพธ์ที่ดีนักเมื่อข้อมูลเหล่านั้นมีความผิดปกติ (Outlier) จำนวนมาก จากตัวอย่างด้านล่างแสดงให้เห็นถึงการทำนายที่ผิดพลาดคือ

ทำนายเป็น : เตาไรด์ทำงานอยู่ในสถานะ 1

คลาสที่เป็นจริง : ผู้เย็นทำงานอยู่ในสถานะ 1

ค่าของข้อมูล [Min, Max, Mid-range, Avg, SD]: [411, 610, 510.5, 509.16, และ 34.99]

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะข้อมูลของผู้เย็น [489.64, 521.72, 505.68, 505.64, และ 9.66] เทียบกับค่าของข้อมูลด้านบน (ซึ่งคลาสที่เป็นจริงคือผู้เย็นทำงานอยู่ในสถานะ 1) พบว่ามีค่าที่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของผู้เย็นมากซึ่งอาจเกิดจากข้อมูลที่มีความผิดปกติทำให้การจำแนกยังให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีก็เป็นได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการดำเนินการวิจัยผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. ทำให้ระบบสามารถจำแนกอุปกรณ์ไฟฟ้าได้มากขึ้น
2. พิจารณาใช้ NETPIE แทนการตั้ง MQTT Broker เองเพื่อลดความยุ่งยากในการติดตั้งและการบริหารจัดการเนื่องจาก NETPIE มี PLATFORM สำหรับให้บริการเชื่อมต่อสื่อสารและมีไลบรารีให้ใช้งานมากมาย
3. ทำให้ระบบมีการสั่งงานเปิด/ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าได้อย่างชาญฉลาดโดยเรียนรู้จากข้อมูลพฤติกรรมการใช้งานของผู้ใช้และข้อมูลสิ่งแวดล้อมอื่นภายในอาคาร เพื่อดูแลทั้งด้านการใช้พลังงานและความปลอดภัยในอาคาร

บรรณานุกรม

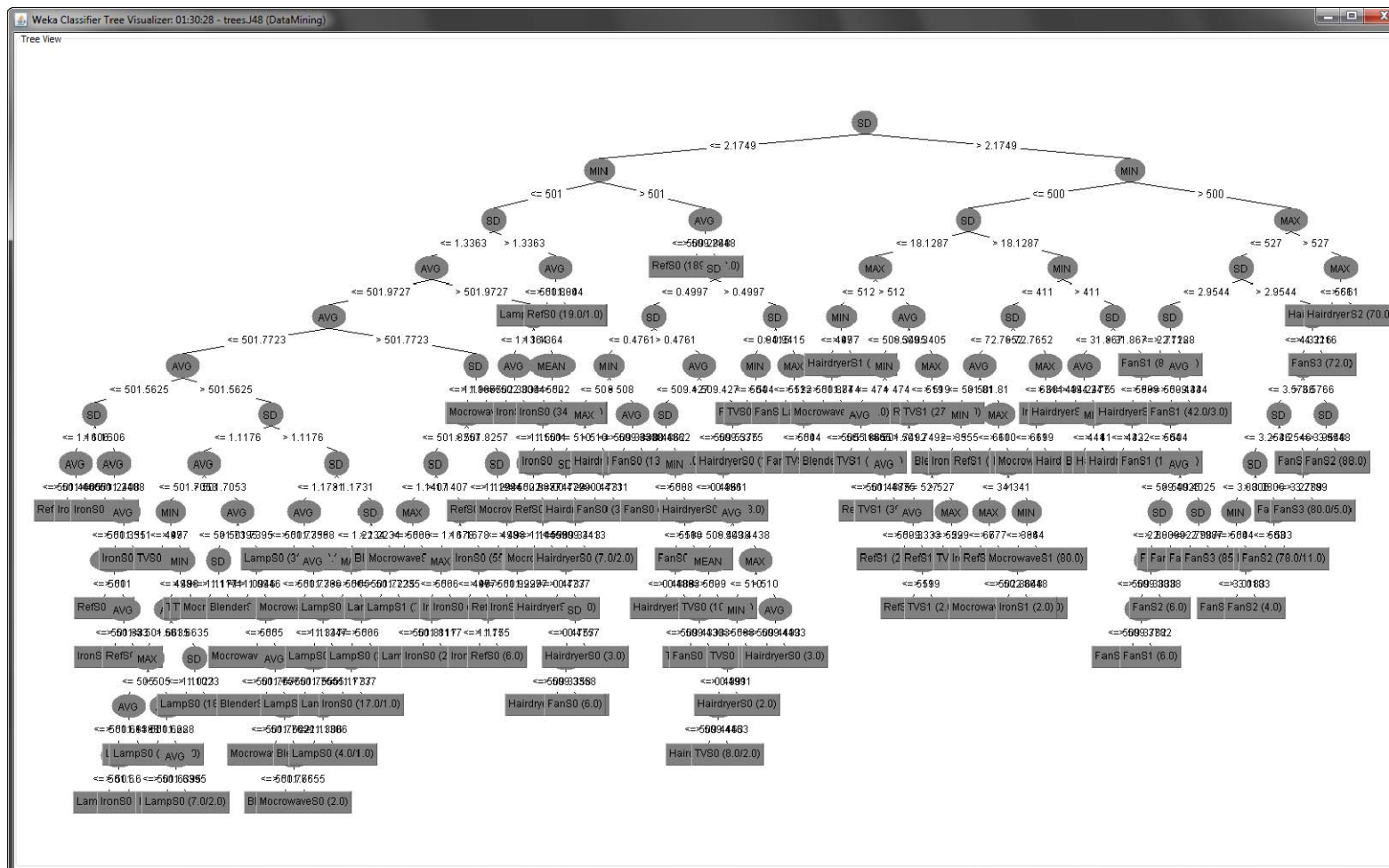
1. เจน สงสมพันธ์, เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ 1, กรุงเทพมหานคร: เม็ดทรายพรีนติ้ง, 1994.
2. R. L. Boylested และ L. Nashelsky , Electronics Devics and Circuit Theory 7 th edition, Prentice-Hall,Inc., 1999.
3. Darby, S. The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption: A Review for Defra of the Literature on Metering, Billing and Direct Displays; Technical Report for Environmental Change Institute, University of Oxford: Oxford, UK, 2006.
4. Hart, G. W., 1992, Nonintrusive appliance load monitoring: Proceedings of the IEEE, v. 80, p. 1870-1891
5. Patel, S.N., Robertson, T., Kientz, J.A., Reynolds, M.S. and Abowd, G.D.: At the Flick of a Switch: Detecting and Classifying Unique Electrical Events on the Residential Power Line. In: UbiComp 2007, pp. 271-288
6. Shih-chiang Lee, Hsu, J.Y.-J., Wan-rong Jih, "Applying power meters for appliance recognition on the electric panel," Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference, 2010.
7. Tapia, E.M., Intille, S.S., Lopez, L., and Larson, K. The design of a portable kit of wireless sensors for naturalistic data collection. In Proc. of Pervasive 2006. pp. 117-134. 2006.
8. Lifton, J., Feldmeier, M., Ono, Y., Lewis, C., and Paradiso, J. A. A platform for ubiquitous sensor deployment in occupational and domestic environments. In Proceeding of Information Processing in Sensor Networks, 2007.
9. Jiang, X., S. Dawson-Haggerty, P. Dutta, and D. Culler, 2009, Design and implementation of a high-fidelity AC metering network. In Proceedings of the Eighth International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'09) Track on Sensor Platforms, Tools, and Design Methods (SPOTS '09), Apr. 2009.
10. Zoha, Ahmed; Gluhak, Alexander; Imran, Muhammad A.; Rajasegarar, Sutharshan. 2012. "Non-Intrusive Load Monitoring Approaches for Disaggregated Energy Sensing: A Survey." Sensors 12, no. 12: 16838-16866.
11. นิพนธ์ ลักขณาอดิศร, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). เข้าถึงได้จาก http://www.tpa.or.th/tpanews/upload/mag_content/53/ContentFile934.pdf

12. บริษัท ทนสาร ซิสเต็มส์ จำกัด.(2559).ระบบเครือข่ายไร้สาย และมาตรฐาน IEEE 802.11. สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.tanasan.co.th/index.php/blog/categories/item/6-network-standards.html>
13. Wikipedia (2559), ESP8266. สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2559, เข้าถึงได้จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP8266>
14. ETT Co., Ltd., เรียนรู้ เข้าใจ ใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino, 2009.
15. Arduino LLC, ARDUINO PRODUCTS > Arduino Pro Mini. สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2559, เข้าถึงได้จาก <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardProMini>
16. Allegro MicroSystems, LLC, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>
17. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., “Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs),” ใน IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, IEEE Standard, 2011.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

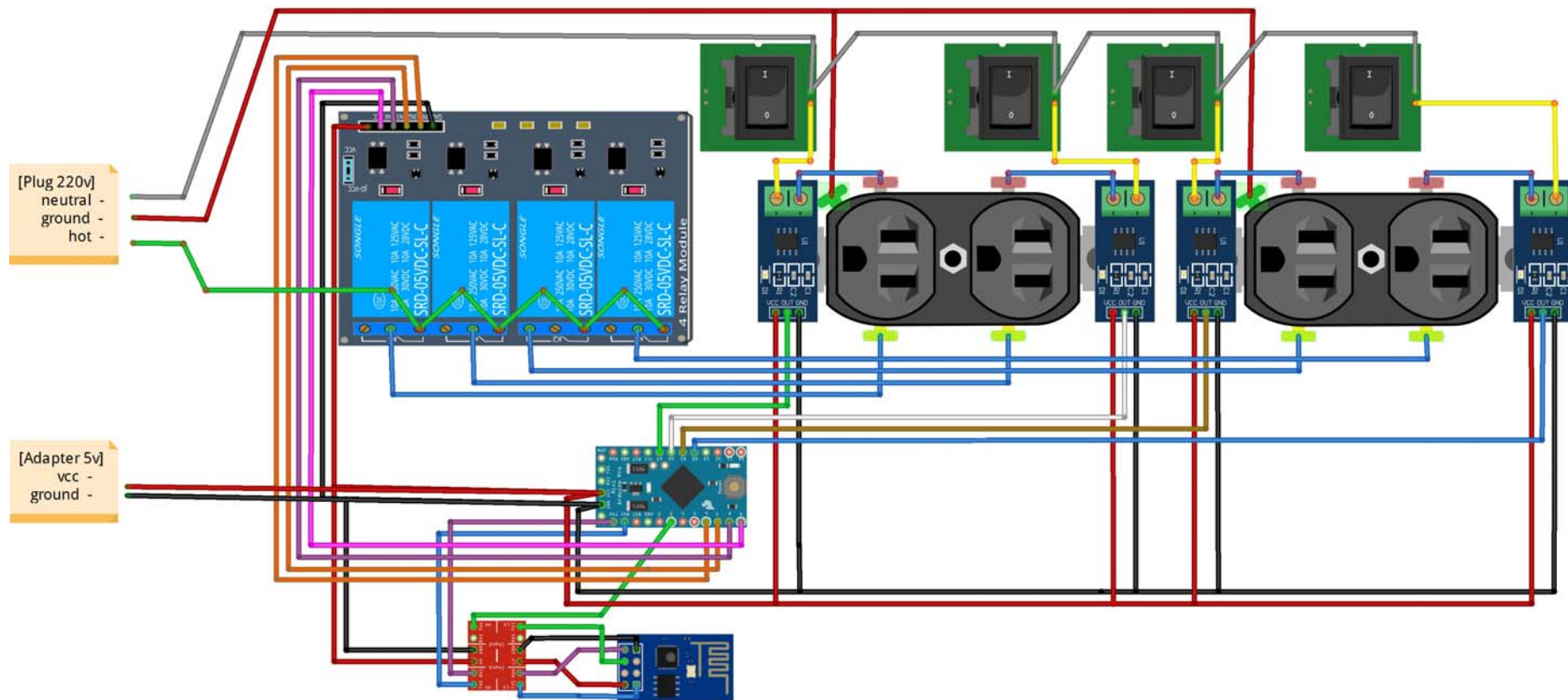
แบบจำลองแผนภาพต้นไม้ตัดสินใจ



แบบจำลองแผนภาพต้นไม้ตัดสินใจสำหรับทำนายการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิด

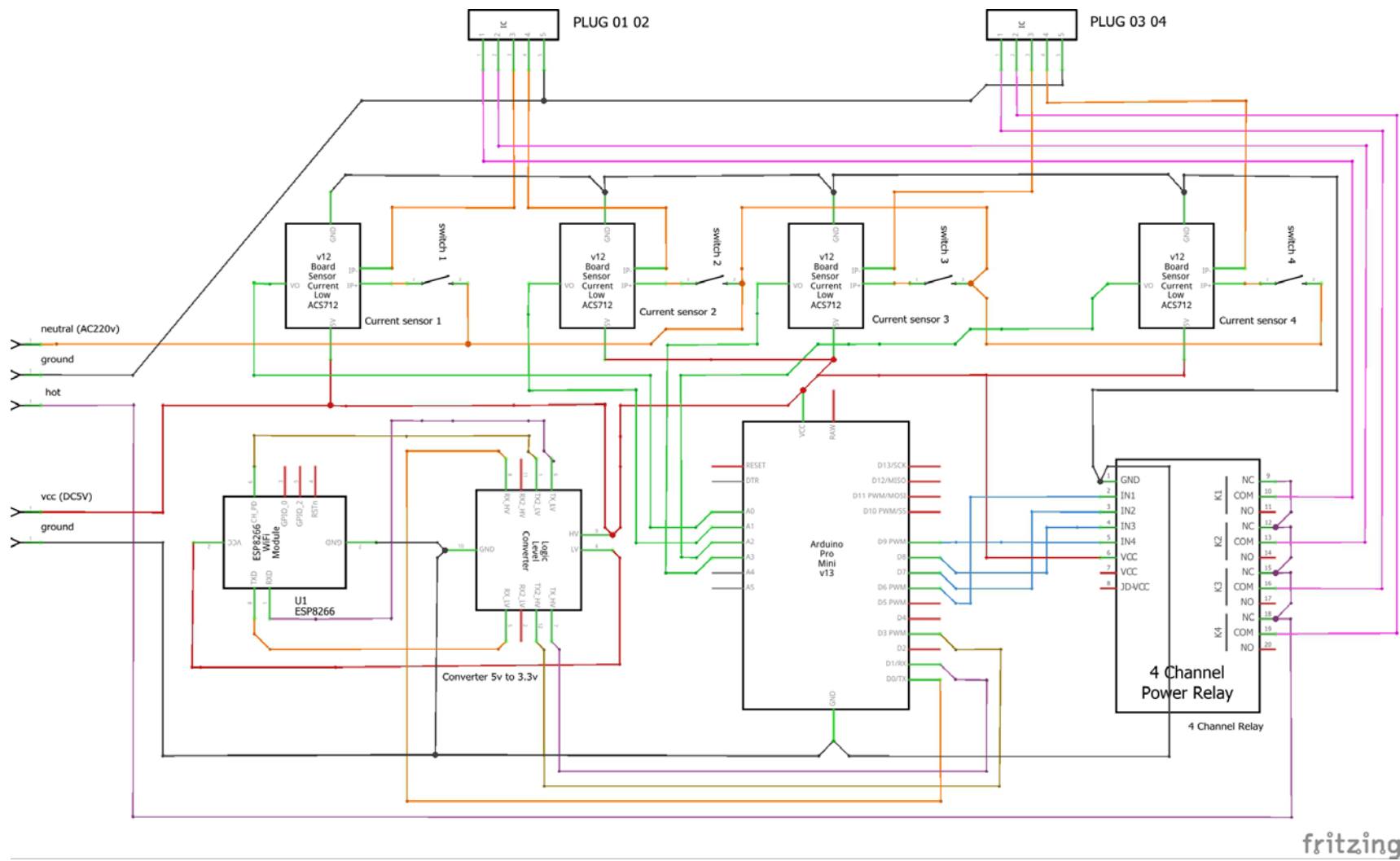
ภาคผนวก ข

แผนภาพและแผนผังวงจรอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่สามารถส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย



fritzing

แผนภาพวงจรของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่สามารถส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย



fritzing

แผนผังวงจรอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่สามารถส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย