

บทที่ 3

การตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy audit)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

การตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า มีความสำคัญค่อนข้างมาก ซึ่งจะช่วยให้โรงงานอุตสาหกรรม และอาคารทราบถึงการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยขั้นตอน และวิธีการตรวจวัดการใช้พลังงานต้องเป็นไปตามกฎกระทรวง เพื่อได้ข้อมูลอย่างถูกต้อง และสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมาวิเคราะห์ซึ่งขั้นตอน และวิธีการตรวจวัดนั้นต้องเริ่มจากการรู้จักเครื่องมือวัด และวิธีการใช้งานเครื่องมือวัดรวมไปถึงวิธีหรือขั้นตอนในการวัด และการอ่านค่าที่ถูกต้อง แล้วนำค่าที่ได้มารวบรวม และวิเคราะห์ผลแล้วจึงกำหนดมาตรการการอนุรักษ์พลังงานที่เหมาะสมจึงจัดทำรายงานได้อย่างถูกต้อง

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. อธิบายวิธีการ และขั้นตอนการตรวจวัดวิเคราะห์การใช้พลังงานตามกฎกระทรวง
2. อธิบายวิธีการใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า
3. อธิบายการวัดทางไฟฟ้าได้
4. อธิบายวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล
5. อธิบายการวิเคราะห์ข้อมูล
6. อธิบายการกำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงาน
7. อธิบายวิธีการจัดทำรายงาน

บทนำ (Introduction)

เนื้อหาในบทนี้เป็นการแนะนำให้รู้จักเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า ขั้นตอน และวิธีการวัดที่ถูกต้องรวมถึงการวัดระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย เพื่อให้ได้ผลการวัดที่จะนำไปวิเคราะห์ หามาตรการการอนุรักษ์พลังงานที่เหมาะสมต่อไป และวิธีการเขียนรายงานการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานให้ถูกต้องตามกฎกระทรวง

3.1 วิธี และขั้นตอนการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าตามกฎหมาย (Procedure of electrical energy audit according to Ministerial order)

กฎกระทรวงที่เกี่ยวกับวิธี และขั้นตอนการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า มีดังนี้

1) ดำเนินการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น และจัดทำรายงานส่งให้กับ พ.พ. ทุก 3 ปี นับแต่วันที่กฎกระทรวงมีผลใช้บังคับในกรณีที่เป็นการควบคุมหรือโรงงานควบคุมก่อนวันที่พระราชกฤษฎีกากำหนดอาคารควบคุมหรือโรงงานควบคุมมีผลใช้บังคับให้ดำเนินการ และจัดส่งรายงานครั้งแรกภายใน 6 เดือนนับแต่วันที่กฎกระทรวงมีผลใช้บังคับ

2) ดำเนินการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด และจัดทำรายงาน ส่งให้กับ พ.พ. ทุก 3 ปี โดยครั้งแรกให้ดำเนินการและจัดส่งภายใน 6 เดือน หลังจากการจัดส่งรายงานการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น

3) กำหนดเป้าหมาย และแผนอนุรักษ์พลังงาน และจัดทำรายงาน ส่งให้กับ พ.พ. ทุก 3 ปี โดยครั้งแรกให้จัดส่งภายใน 6 เดือนหลังจากการจัดส่งรายงานการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด

ผลที่ได้จากการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงาน เบื้องต้น

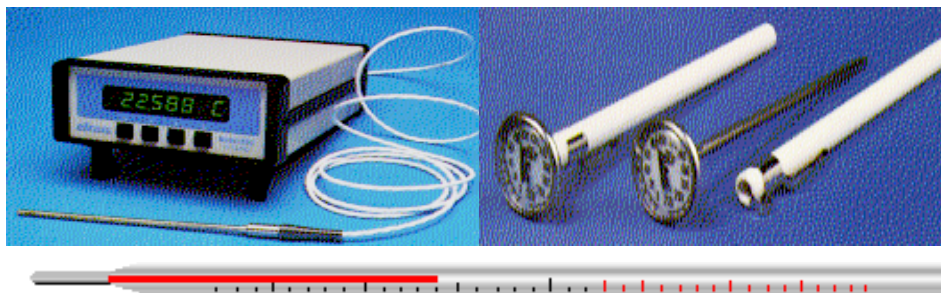
- ทำให้ทราบถึงปริมาณการใช้พลังงาน และบริเวณ
- หรืออุปกรณ์ที่มีการสูญเสียพลังงาน
- กำหนดหลักเกณฑ์สำหรับการวางแผนอนุรักษ์พลังงาน
- ทำให้เห็นโครงการที่มีความคุ้มค่าในการลงทุน
- เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งาน
- ทำให้ทราบศักยภาพการประหยัดพลังงานโดยประมาณ
- พร้อมค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ
- ทำให้เห็นความต้องการการฝึกอบรมสำหรับเจ้าหน้าที่ด้านการจัดการด้านพลังงาน
- ใช้เป็นพื้นฐานในการจัดทำงบประมาณเบื้องต้น
- ทำให้เห็นสิ่งที่ขาดไปในระบบการตรวจวัดการใช้พลังงาน
- ทำให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนไปใช้เชื้อเพลิงหรือ พลังงานชนิดอื่นๆ
- ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการบริหารการอนุรักษ์พลังงาน
- ทำให้ทราบถึงการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิต

3.2 เครื่องมือวัดการใช้พลังงานตามกฎหมาย

การพัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ทำให้เครื่องมือวัดและเครื่องมือ ควบคุมการใช้พลังงาน ใช้ได้ง่าย เชื่อถือได้ และมีความเที่ยงตรง ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนในก๊าซจากการเผาไหม้ สามารถวัดได้จากการใช้เครื่องมือชนิดที่ใช้สารเคมีดูดซึม หรืออาจจะใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่เป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยส่วนใหญ่เครื่องมือแบบอิเล็กทรอนิกส์มักมีราคาแพงกว่าแบบใช้สารเคมี แต่เครื่องมือแบบอิเล็กทรอนิกส์ใช้ง่าย และค่าที่วัดได้ถูกต้องมากกว่า ดังนั้นการเลือกเครื่องมือวัดควรเลือกให้เหมาะสมกับค่าใช้จ่าย ต่อไปนี้เป็นอธิบายถึงเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจสอบการใช้พลังงาน

■ เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับทุกๆ ระดับของการตรวจสอบการใช้พลังงาน ในขณะที่เดียวกันประเภทของเทอร์โมมิเตอร์ก็มีหลายชนิด เหมาะกับงานต่างๆ กัน



รูปที่ 3.1 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) ประเภทต่าง ๆ กัน

■ เครื่องวัดอุณหภูมิผิว (Surface Pyrometer)

เครื่องวัดอุณหภูมิผิว หรือ Surface Pyrometer นี้เป็นเครื่องมือวัดที่มีหัววัดที่สามารถแนบสนิทกับพื้นผิวได้ เพื่อใช้ในการวัดค่าความร้อนสูญเสียจากผนังได้ และใช้ทดสอบการทำงานของสตีมแทรป อาจจะแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ใช้สำหรับวัดค่าอุณหภูมิต่ำ (ได้ถึง 250°F) และสำหรับอุณหภูมิสูง (ได้ถึง $600-700^{\circ}\text{F}$)



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดอุณหภูมิผิว (Surface Pyrometer) และหัววัดประเภทต่าง ๆ กัน

■ เครื่องวัดความชื้น (Psychrometer)

Psychrometer หรือเครื่องวัดความชื้น เป็นเครื่องมือใช้วัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยอาศัยหลักการความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกระเปาะแห้งกับกระเปาะเปียก

ความชื้นสัมพัทธ์นี้เป็นตัวหลักสำคัญในระบบ HVAC เครื่องมือนี้สามารถใช้ร่วมกับเครื่องบันทึกเพื่อบันทึกค่าต่อเนื่องหรือในช่วงเวลาได้ ส่วนความชื้นที่มีอุณหภูมิมากกว่า 200°F ต้องใช้เครื่องมือวัดชนิดพิเศษ



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความชื้น (Psychrometer) ประเภทต่าง ๆ กัน

■ เครื่องวัดกระแส (Ammeter)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้า กระแสอาจจะเป็นกระแสตรงหรือกระแสสลับ เครื่องวัดกระแสที่ใช้กับงานตรวจสอบการใช้พลังงานควรจะเป็นแบบเคลื่อนย้ายได้และ ออกแบบมาเพื่อให้ใช้ได้ง่ายและถอดง่ายโดยวัดแบบเฟสเดียว



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดกระแส (Ammeter)

เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltmeter)

เครื่องวัดชนิดนี้ เป็นเครื่องมือวัดความต่างศักย์ของไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดในวงจรไฟฟ้า ความต่างศักย์นี้ ใช้หน่วยเป็นโวลต์ (V) แรงดันไฟฟ้าเป็นค่าหนึ่งที่ต้องวัดในการคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltmeter)

■ เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Wattmeter)

เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าชนิดเคลื่อนย้ายได้เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ และสำคัญมาก เพราะเป็นเครื่องมือที่วัดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าได้โดยตรง ส่วนวิธีอื่นต้องมีการวัดค่ากระแสแรงเคลื่อน และนำมาคำนวณ ในกรณีที่เป็นกระแสสลับ 3 เฟส การวัดวิธีนี้ทำให้การคำนวณการใช้ไฟฟ้าง่ายขึ้น



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Wattmeter)

■ เครื่องวัดตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Meter)

เครื่องวัดตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ชนิด 3 เฟส การวัดจะใช้ Probe ของเครื่องวัดหนีบกับขั้วตัวนำไฟฟ้าหรือขั้วของอุปกรณ์ที่ต้องการวัดค่า โดยแยกแต่ละเฟส และใช้ Snap-on Jaw คล้องกับตัวนำไฟฟ้าแต่ละเฟส การต่อลักษณะนี้เช่นเดียวกับวัดมิตเตอร์ วิธีนี้ก็สามารถอ่านค่าเป็นตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้เลย



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Meter)

■ เครื่องมือทดสอบการเผาไหม้ (Combustion Tester)

เครื่องมือทดสอบการเผาไหม้ ประกอบด้วย การหาค่าความเข้มข้นของก๊าซจากการเผาไหม้ที่ปล่อยก๊าซ โดยปกติแล้วจะพิจารณาเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกซิเจน (O_2) ใช้ในการทดสอบหาอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้



รูปที่ 3.8 เครื่องมือทดสอบการเผาไหม้ (Combustion Tester)

■ เครื่องมือวัดความดันก๊าซ (Draft Gauge)

เครื่องมือวัดชนิดนี้เป็นการวัดความดันของก๊าซในเตาหน่วยที่ใช้ อาจจะเป็นความดันหรือความสูงของการติดตั้ง Draft ให้เหมาะสมทำให้หัวเผาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพขนาดของ Draft แสดงถึงอัตราการรั่วไหลของก๊าซจากการเผาไหม้ที่ออกจากเตา และเป็นการควบคุมปริมาณการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้อีกด้วย



รูปที่ 3.9 เครื่องมือวัดความดันก๊าซ (Draft Gauge)

■ เครื่องมือวัดระดับแสงสว่าง (Lux Meter)

เครื่องมือวัดระดับแสงสว่างเป็นเครื่องมือวัดการส่องสว่างของแสงมีหน่วยเป็นแรงเทียนหรือลักซ์ การวัดอาศัยเซลล์ที่ไวต่อแสง ปกติแล้วเครื่องมือแบบนี้จะเคลื่อนย้ายหรือพกติดตัวได้ เหมาะกับการใช้วัดความสว่างได้ตามจุดต่าง ๆ

ระดับของแสงที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบการใช้พลังงาน จะอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 1,000 แรงเทียน ซึ่งในระดับนี้เครื่องมือมีขายทั่วไป



รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดระดับแสงสว่าง (Lux Meter)

■ เครื่องมือทดสอบควัน (Smoke Tester)

เครื่องมือทดสอบควันเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหนาแน่นของควันในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เครื่องมือทดสอบควันประกอบด้วย Pump ในการวัดแต่ละครั้งจะนำควันจากปล่องไอเสียจำนวนหนึ่งมาผ่านกระดาศกรองสีของควันที่ปรากฏขึ้นบนกระดาศกรองนำไปเทียบกับสีมาตรฐานจะได้ค่าความหนาแน่นของควันในปล่อง

หากการทดสอบแสดงว่าควันดำเกินกว่าสีมาตรฐานที่กำหนดไว้มากเกินไปควรจะได้หาสาเหตุว่าเกิดมาจากอะไร และหาทางแก้ไขต่อไป



รูปที่ 3.11 เครื่องมือทดสอบควัน (Smoke Tester)

■ เครื่องมือวัดความเร็วอากาศ (Air Velocity Meter)

เครื่องมือชนิดนี้เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการการหมุนของใบพัดหมุน ใช้กันในงานสนาม และเป็นชนิดเคลื่อนย้ายได้ มีช่วงการวัดกว้าง ให้การวัดค่าได้ทันที ใช้ได้ทั้งวัดความเร็วอากาศ แวดลุ่ม และอากาศที่มีการควบคุมอุณหภูมิ สามารถวัดได้ถึง 10,000 ฟุต/นาทีก

Hot Wire Anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็วอากาศแบบหนึ่งที่ใช้กันมากการวัดอาศัยหลักการของความต้านทานของขดลวดร้อนที่ทำให้เย็นด้วยกระแสของอากาศ



รูปที่ 3.12 เครื่องมือวัดความเร็วอากาศ (Air Velocity Meter) และ Hot Wire Anemometer

3.2.1 การใช้มิเตอร์วัดไฟฟ้าที่ถูกต้อง

1) ตรวจสอบย่านการตรวจวัด กระแส/แรงดัน ให้ถูกต้อง เช่น กรณีต้องการตรวจวัดค่ากระแสสลับ 43 แอมป์ ก็ควรปรับตั้งย่านการตรวจวัดให้อยู่ในช่วง 0-100 แอมป์ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง (โดยทั่วไปสำหรับเครื่องมือวัดแบบอนาล็อก ควรปรับตั้งย่านการตรวจวัดให้ค่าที่ต้องการวัดอยู่ในช่วง 40-60% ของค่าสูงสุดของย่านการตรวจวัด)

2) ตรวจสอบตัวแปรอื่น เช่น การเปลี่ยนแปลงของภาระหรือความเร็วรอบจะมีผลต่อค่าที่ได้จากการตรวจวัด นอกจากการเลือกย่านการตรวจวัดให้สอดคล้องกับค่าพิกัดที่ต้องการตรวจวัดแล้วในระหว่างการวัดจะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของภาระของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งจะทำให้ค่าที่ต้องการตรวจวัดแตกต่างไปจากค่าพิกัดรวมถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของภาระของอุปกรณ์ต่างๆ อาจทำให้จำเป็นต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการบันทึกค่าเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงได้อย่างถูกต้อง

3) ตรวจสอบว่าอุปกรณ์มีการบำรุงรักษาอย่างถูกต้องสม่ำเสมอ

ข้อแนะนำในการปฏิบัติ

มีข้อแนะนำหลายประการที่ควรปฏิบัติเพื่อให้ได้การตรวจวัดที่ถูกต้องและใช้ประโยชน์ได้

1) สำหรับมิเตอร์ที่ต้องมีการอ่านตัวเลขอย่างสม่ำเสมอและมีค่าหน่วยเพิ่มขึ้นตามเวลา เช่น มิเตอร์วัดการใช้พลังงานให้ตรวจสอบการอ่านค่าตัวเลขครั้งสุดท้าย เพื่อให้แน่ใจว่าค่าตัวเลข ครั้งต่อไปมีค่ามากขึ้น

2) การอ่านค่ามิเตอร์ต้องทำที่เวลาเดียวกันทุกวัน (สัปดาห์)

3) ถ้าเป็นไปได้ต้องแน่ใจว่าพนักงานแต่ละคนอ่านค่ามิเตอร์จากมิเตอร์จริงๆ

4) สำหรับมิเตอร์ซึ่งมีการตรวจวัดเฉพาะควรวัดหลายๆ ค่าในช่วงเวลาสั้นๆ และเฉลี่ยค่าที่อ่านได้

5) จะต้องทำการตรวจวัดอย่างละเอียดสำหรับอุปกรณ์ที่มีการใช้กำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 20 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือใช้พลังความร้อนเทียบเท่าเฉลี่ยตั้งแต่ 175 กิโลวัตต์ขึ้นไป และให้ใช้การสังเกตจากภายนอกสำหรับอุปกรณ์ที่มีพิกัดการใช้กำลังไฟฟ้าหรือความร้อนที่น้อยกว่านี้

3.2.2 การเลือกเครื่องมือวัดไฟฟ้าที่เหมาะสม

เนื่องจากเครื่องมือวัดไฟฟ้ามีหลายขนาด และมีวิธีใช้ที่แตกต่างกัน และใช้ในการตรวจวัดตัวแปรหลายประเภท ดังนั้นจึงเป็นการยาก และมีค่าใช้จ่ายสูงที่จะเลือกเครื่องมือที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามมีกฎเบื้องต้นสำหรับการปฏิบัติเพื่อให้ได้ผลการตรวจวัดที่ถูกต้อง ดังนี้

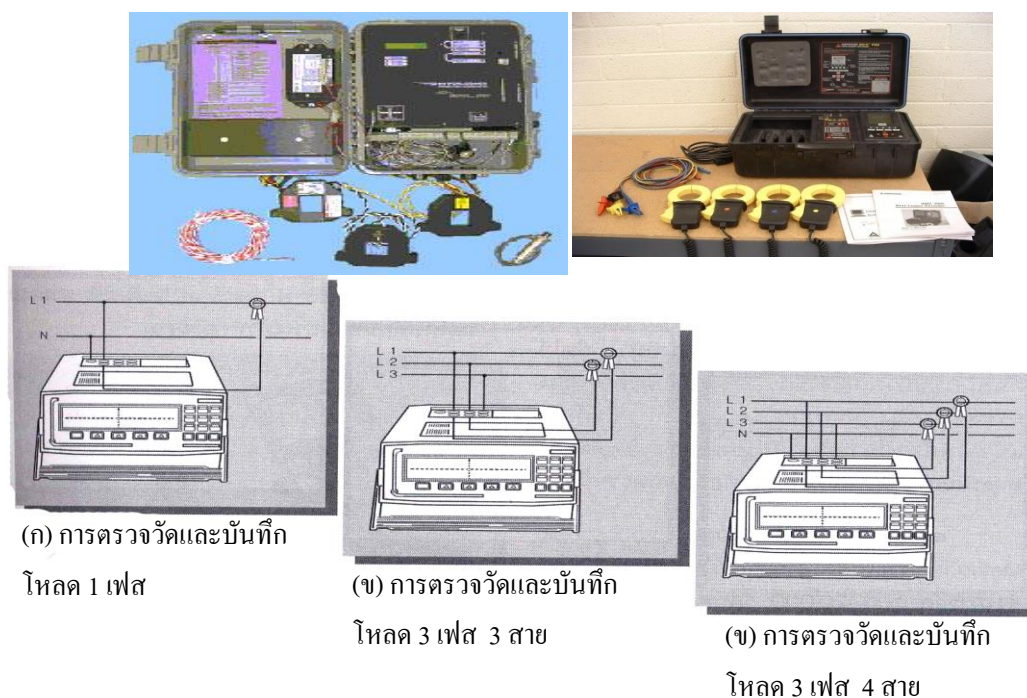
1) ควรติดตั้งมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าตรวจวัดที่มีตำแหน่งตายตัว และต้องการการวัดอย่างสม่ำเสมอ

2) เครื่องมือแบบคล่องวัดจะมีความเหมาะสม และมีความสะดวกสำหรับการวัดที่มีความถี่ไม่บ่อยนัก

3) ควรใช้มิเตอร์ที่สามารถวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ในกรณีที่จะต้องมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ในกรณีที่ไม่สามารถซื้อหรือไม่คุ้มค่าที่จะติดตั้งมิเตอร์ย่อย อาจใช้เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียวในการตรวจวัดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อหาปริมาณพลังงานที่ใช้แทนได้โดยทำการตรวจวัดในช่วงก่อนที่จะหยุดการทำงานของระบบต่างๆ ในแต่ละวันซึ่งจะทำให้ทราบกำลังไฟฟ้าของแต่ละอุปกรณ์ได้เมื่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบนั้นๆ เริ่มทยอยหยุดการทำงานลง

โดยทั่วไปมิเตอร์จะเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้การจัดการด้านพลังงานดีขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงาน และคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งเครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (Data Logger) จะวัดค่าของไฟฟ้า อุณหภูมิ ก๊าซ ไอน้ำ และอื่นๆ โดยอัตโนมัติและเก็บบันทึกไว้สำหรับประมวลผลเพื่อให้ทราบรายละเอียดของการใช้งานตามช่วงเวลาต่างๆ



(ก) การตรวจวัดและบันทึก

โหลด 1 เฟส

(ข) การตรวจวัดและบันทึก

โหลด 3 เฟส 3 สาย

(ง) การตรวจวัดและบันทึก

โหลด 3 เฟส 4 สาย

รูปที่ 3.13 แสดงการใช้งานเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลทางไฟฟ้า (Data Logger)

ในปัจจุบันมีเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอยู่ 3 ประเภทคือ

- เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล และวิเคราะห์ที่หน้างาน
- เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล ส่งข้อมูล และวิเคราะห์ที่หน้างาน
- เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลที่ส่งข้อมูล เก็บบันทึก และวิเคราะห์ระยะไกล

1) เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ที่หน้างาน

สำหรับเครื่องประเภทนี้ ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานจะอ่านค่าจากมิเตอร์และป้อนข้อมูลเข้าสู่เครื่องเก็บข้อมูลแบบพกพา เครื่องมือนี้ยังสามารถสร้างรูปกราฟอย่างง่าย หรือส่งข้อมูลกลับไปยังหน่วยประมวลผลกลางได้

ข้อดี :

- ราคาถูก
- คงทน
- ใช้งานง่าย

ข้อเสีย :

- ความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของผู้ใช้
- มีหน่วยความจำที่ค่อนข้างจำกัด
- ไม่มีความยืดหยุ่น ใช้ได้สำหรับการตรวจวัดเฉพาะประเภท
- ความถี่ในการอ่านค่าของมิเตอร์ไม่สม่ำเสมอ

2) เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลที่ส่งข้อมูล เก็บบันทึก และวิเคราะห์ระยะไกล

สำหรับเครื่องมือประเภทนี้ มิเตอร์ และตัวตรวจวัดที่ติดตั้งในระยะไกลจะส่งข้อมูลมายังหน่วยประเมินผลกลางโดยอัตโนมัติตามช่วงเวลา โดยจะสามารถแสดงผลในรูปแบบของกราฟฟิคได้

ข้อดี :

- จัดความผิดพลาดในการเก็บข้อมูลโดยใช้คน
- สามารถตรวจติดตามการใช้พลังงานได้ตลอดเวลา
- ให้ข้อมูลที่มีความชัดเจนที่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที

ข้อเสีย :

- ราคาแพง
- ติดตั้งยาก
- อาจไม่มีความยืดหยุ่นในบางกรณี

3.2.2.1 การใช้เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล

เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลรุ่นใหม่ได้มีการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย และให้ค่าการตรวจวัดได้หลากหลาย

เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลแบบนี้จะมีความคล้ายกับแอมป์มิเตอร์แบบคล่องวัดผู้ใช้เลือกค่าต่างๆ ที่จะวัด ได้ เช่น กิโลวัตต์ตองศาเซลเซียส

- ใส่เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของการ บันทึก
- เลือกความถี่ของการเก็บบันทึก เช่น ทุกๆ 5 นาที ทุกๆ ชั่วโมง ฯลฯ
- คล่องตัวอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) เข้ากับสายไฟ ท่อ ฯลฯ
- กรณีที่ใช้งานแบบส่งข้อมูลจากระยะไกล ให้ต่อเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลเข้ากับ

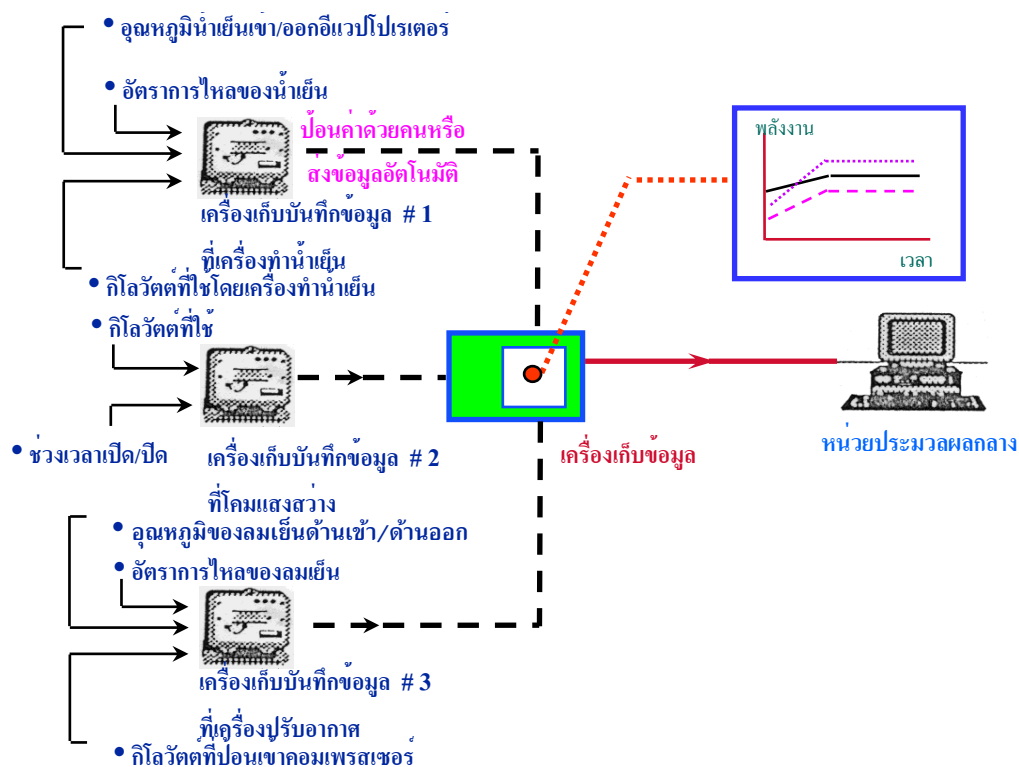
คอมพิวเตอร์ก่อนการใช้งานควรตรวจสอบกับคู่มือการใช้งานจากผู้ผลิตทุกครั้ง

กรณีศึกษา : โรงงานกระดาษแห่งหนึ่งใช้เวลา 10 นาทีในการผลิตกระดาษ 1 ตัน ขั้นตอนการทำงานจะหยุดเมื่อถึงป้อนว้างเปล่า โดยจะเริ่มทำงานใหม่อีกครั้งเมื่อมีสัญญาณสั่งให้ทำงานมีการใช้เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลเพื่อวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 1 สัปดาห์ ซึ่งได้ผลการใช้ไฟฟ้าในช่วงที่มีการทำงาน 110 กิโลวัตต์ และการใช้ไฟฟ้าในระหว่างเวลาที่ไม่มีการะ 55 กิโลวัตต์

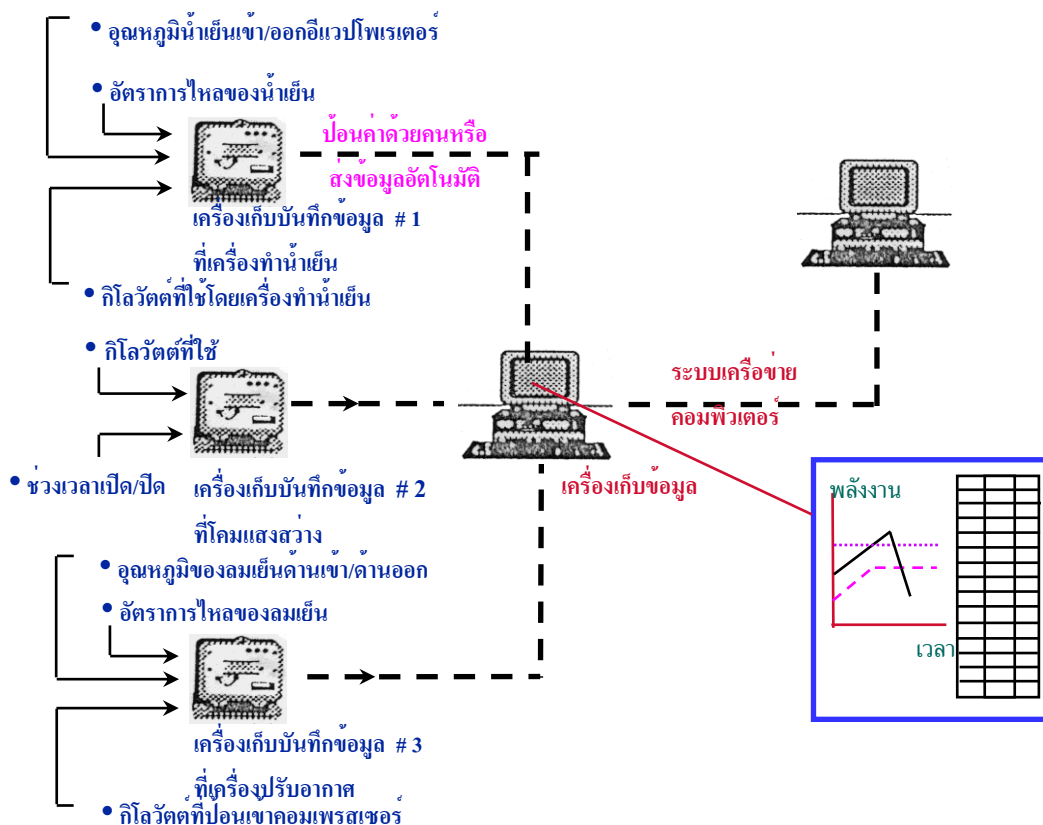
มีการปรับปรุงเครื่องจักรผลิตกระดาษโดยติดตั้งตัวซอฟต์แวร์ (ราคา 200,000 บาท) และเครื่องจักรจะถูกปิดเมื่อไม่ได้ใช้งานการดำเนินการนี้จะสามารถประหยัดได้ 400,000 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน 6 เดือน

แผนภูมิการต่อเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลแบบพื้นฐานการเก็บ และวิเคราะห์ข้อมูล/การส่ง และวิเคราะห์ข้อมูล

แผนภูมิการต่อเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลแบบพื้นฐาน การเก็บ และวิเคราะห์ข้อมูล/การส่ง และวิเคราะห์ข้อมูล



การส่งข้อมูลระยะไกล การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล



3.3 พื้นฐานการวัดทางไฟฟ้า เช่น การวัดแรงดันไฟฟ้า การวัดกระแสไฟฟ้า การวัดกำลังไฟฟ้า การวัดพลังงานไฟฟ้า (Basic electric measurement i.e., voltage, Current, power, electricity)

3.3.1 พื้นฐานการวัดทางไฟฟ้า

3.3.1.1 การวัด

การอ่านค่าปริมาณที่วัดโดยตรงจากเครื่องวัด เรียกว่า การวัดโดยตรง การวัดปริมาณอื่นๆที่มีความสัมพันธ์ที่แน่นอนอย่างหนึ่งกับปริมาณที่ต้องการวัด และใช้ค่าที่วัดได้นั้นมาคำนวณหาปริมาณที่ต้องการวัดทางอ้อม เช่น การแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณค่าความต้านทาน เรียกว่า การวัดทางอ้อม

การวัดปริมาณทางไฟฟ้าส่วนมากจะใช้วิธีแปลงปริมาณที่ต้องการวัดให้เป็นการกวาดของเข็มหน้าปัดเครื่องวัด วิธีนี้เรียกว่า Deflection method กรณีที่ต้องการวัดด้วยความเที่ยงตรงสูง จะใช้วิธีการปรับปริมาณที่ต้องการวัดให้สมดุลกับปริมาณมาตรฐาน แล้วหาค่าปริมาณที่ต้องการวัดโดยดูจากขนาดของปริมาณมาตรฐาน เช่น Potentiometer หรือการวัดบริดจ์ เป็นต้น วิธีนี้เรียกว่า Zero method ในการวัดความถี่และอัตราขยาย จะใช้วิธีลบค่าค่าหนึ่งออกจากปริมาณที่ต้องการวัด แล้ววัดค่าที่เหลืออยู่ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าที่ต้องการวัดต่อไป วิธีนี้เรียกว่า Compensation method

กรณีของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะมีวิธีพิจารณาค่าที่วัดได้แตกต่างกันดังต่อไปนี้

- ค่า Effective: เป็นรากที่สองของค่าเฉลี่ยต่อ 1 คาบของกำลังสองของค่าในขณะใดๆ
- ค่าเฉลี่ย: เป็นค่าเฉลี่ยต่อ 1/2 คาบของค่าในขณะใดๆ
- ค่าเฉลี่ยของกำลังสอง: เป็นค่าเฉลี่ยต่อ 1 คาบของกำลังสองของค่าในขณะใดๆ
- ค่า Peak-to-peak: เป็นผลต่างระหว่างค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของค่าในขณะใดๆ

ค่า Effective มีความหมายคือ เทียบเท่ากับกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำให้มีความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าเท่ากัน เมื่อภาระไฟฟ้าตัวต้านทาน 1Ω ส่วนค่าเฉลี่ยของกำลังสอง เป็นความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อให้กระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าแก่ภาระไฟฟ้าตัวต้านทาน 1Ω ตัวอย่างเช่น เมื่อแสดงค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของกำลังสอง ค่า Effective และค่า Peak-to-peak ของกระแสไฟฟ้า รูปคลื่นไซน์ที่มีค่า $i = I \sin \omega t$ แล้ว

$$\text{ค่าเฉลี่ย } I_m = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (I \sin \omega t) dt = \frac{2I}{T} \left[-\frac{1}{\omega} \cos \omega t \right]_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2I}{\pi} \quad (3.1)$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยของกำลังสอง } I_{ms} = \frac{1}{T} \int_0^T (I \sin \omega t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{I^2}{2} \quad (3.2)$$

$$\text{ค่า effective } I_{rms} = \sqrt{I_{ms}} = I/\sqrt{2}$$

$$\text{ค่า peak-to-peak } I_{pp} = i_{\max} - i_{\min} = I - (-I) = 2I$$

ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าก็เหมือนกันทุกประการ โดยแทนค่าในขณะใดๆ i เป็น v และแทนค่าสูงสุด I ด้วย V เท่านั้น

3.3.1.2 หน่วยทางไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

กระแสไฟฟ้าเป็นหน่วยพื้นฐานตามระบบหน่วยวัดนานาชาติ (หน่วย SI) และหน่วยทางไฟฟ้าในทางปฏิบัติอื่นๆ ก็เป็นหน่วยผสมของหน่วย SI ซึ่งมีนิยามดังต่อไปนี้

- กระแสไฟฟ้า 1 A: เท่ากับกระแสไฟฟ้าที่เมื่อกระแสไฟฟ้านี้ไหลผ่านลวดตัวนำตรง 2 เส้นที่มีความยาวเป็นอนันต์มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมที่มีขนาดเล็กเป็นอนันต์ วางขนานกันโดยมีระยะห่าง 1 m ในสุญญากาศแล้วจะทำให้มีแรงกระทำต่อลวดแต่ละเส้นเท่ากับ 2×10^{-7} N ต่อความยาวของลวดตัวนำ 1 m กรณีที่เป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ค่า effective ของกระแสไฟฟ้านั้นต้องเท่ากับค่าที่นิยามไว้สำหรับกำลังไฟฟ้า 1 W: เท่ากับกำลังที่ให้พลังงาน 1 J ต่อหนึ่งวินาที
- แรงดันไฟฟ้า 1 V: เท่ากับแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดบนตัวนำไฟฟ้าที่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าคงที่ 1 A ไหลผ่านจุดทั้งสองแล้วจะทำให้มีความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 W กรณีที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ค่า Effective ของแรงดันไฟฟ้านั้นต้องเท่ากับค่าที่นิยามไว้
- ความต้านทานไฟฟ้า 1 Ω : เท่ากับค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดบนตัวนำไฟฟ้าที่เมื่อมีกระแสไฟฟ้า 1 A ไหลผ่านแล้วแรงดันไฟฟ้าระหว่างทั้ง 2 จุดนั้นจะเท่ากับ 1 V
- ประจุไฟฟ้า 1 C: เท่ากับปริมาณไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้า 1 A พาให้เคลื่อนที่ไปในเวลา 1 วินาที
- ความจุไฟฟ้าสถิต 1 F: เท่ากับค่าความจุไฟฟ้าสถิตของคาปาซิเตอร์ที่เมื่อ charge คาปาซิเตอร์นั้นด้วยประจุไฟฟ้า 1 C แล้วจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า 1 V
- อินดักแตนซ์ 1 H: เท่ากับอินดักแตนซ์ของวงจรปิดที่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอด้วยอัตรา 1 A/s ไหลผ่านแล้วจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น 1 V
- เส้นแรงแม่เหล็ก 1 Wb: เท่ากับค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับวงจรปิดพื้นที่ 1 รอบลดลงอย่างสม่ำเสมอจนกลายเป็นศูนย์ในเวลา 1 วินาทีแล้วจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น 1 V ในวงจรปิดนั้น

3.3.1.3 มาตรฐานทางไฟฟ้า

การวัด Fundamental standard มีการสร้างเครื่องมาตรฐานทางไฟฟ้าขึ้นมาหลายชนิดเพื่อรักษา Fundamental standard ให้คงที่เครื่องมาตรฐานเหล่านั้นจะใช้ในการสอบเทียบเครื่องวัดทางไฟฟ้า ตัวอย่างของเครื่องมาตรฐานทางไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่แคดเมียมมาตรฐาน ซีเนอร์ไดโอด เป็นต้น โดยมากตัวต้านทานมาตรฐานจะทำจากตัวต้านทานแบบขดลวดที่ทำจาก Manganin (โลหะผสมระหว่าง Cu-Mn-Ni) รีแอกแตนซ์มาตรฐานจะใช้คาปาซิเตอร์แบบ Fused quartz หรือคาปาซิเตอร์แบบอากาศ หรือใช้ลวดทองแดงพันรอบฉนวนไฟฟ้า เช่น หินอ่อน ฯลฯ เพื่อกำหนดอินดักแตนซ์ที่มีค่าคงที่ในช่วงความถี่ใช้งาน ส่วน มาตรฐานสำหรับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ จะใช้วิธีเปรียบเทียบ และสอบเทียบค่า Effective กับมาตรฐานกระแสตรง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเรียกว่า AC/DC converter หรือ AC/DC comparator มีทั้งแบบ Electrodynamometer, แบบไฟฟ้าสถิต และแบบ Thermoelectric ซึ่งมีความเที่ยงตรง สูงที่สุด

3.3.1.4 ความคลาดเคลื่อนในการวัด

ค่าที่วัดได้แม้จะมีความสัมพันธ์กับค่าจริงที่เครื่องวัดชี้บอกแต่เราไม่สามารถวัดค่าจริงได้ จะต้องทำการวัดหลายๆ ครั้งแล้วถือเอาค่าเฉลี่ยเป็นค่าจริงผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริงเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนอัตราส่วนระหว่างความคลาดเคลื่อนต่อค่าจริง เรียกว่า อัตราความคลาดเคลื่อนความคลาดเคลื่อนประกอบด้วยความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดของผู้วัดความคลาดเคลื่อนของระบบที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงสภาพสิ่งแวดล้อม และวิธีการวัดรวมทั้งความคลาดเคลื่อนโดยบังเอิญซึ่งไม่ทราบสาเหตุแน่ชัดความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาด และความคลาดเคลื่อนของระบบนั้น หากมีการค้นหาสาเหตุ และดำเนินการแก้ไขก็สามารถขจัดความคลาดเคลื่อนได้และค่าที่วัดได้ $\times$ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนโดยบังเอิญรวมอยู่ด้วยนั้นเมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้งจะได้ค่าที่แตกต่างกัน แต่ระดับความไม่สม่ำเสมอ $f(x)$ จะมีการกระจายเป็น Normal distribution ซึ่งแสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{x - x_m}{2\sigma^2}\right) \quad (3.3)$$

x_m เป็นค่าเฉลี่ยของการวัด σ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งแสดงความไม่สม่ำเสมอของการวัดถ้าให้การวัด n ครั้งได้ค่าเท่ากับ $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ แล้ว ค่าเฉลี่ยจะเท่ากับ

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.4)$$

ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หมายถึงค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน แสดงได้ด้วยสูตรต่อไปนี้

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n}} \quad (3.5)$$

เมื่อเราพูดถึงการวัดที่มีความเที่ยงตรงสูง ความเที่ยงตรงในที่นี้หมายถึงความถูกต้องและสามารถทำซ้ำได้ดี ความถูกต้องของการวัด หมายถึง ขนาดของผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง ความสามารถในการทำซ้ำได้ หมายถึง ค่าอัตราส่วนของความไม่สม่ำเสมอของค่าที่วัดได้ที่แสดงเป็น % ซึ่งมี ความหมายเหมือนกับความเที่ยงตรง

สมรรถนะของเครื่องวัด ระบุได้ด้วย ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัด (ค่าที่เครื่องวัดชี้บอก – ค่า Input มาตรฐาน) ความไว (การเปลี่ยนแปลง Output / การเปลี่ยนแปลง Input) และความละเอียด (ขนาดของ Input ที่ทำให้ Output เปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้) กรณีที่พูดถึงความเที่ยงตรงของเครื่องวัด ความเที่ยงตรงในที่นี้จะหมายถึงความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดที่แสดงค่าเป็น %

3.3.1.5 ความเที่ยงตรงของเครื่องวัดกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เราต้องเลือกใช้เครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงไม่น้อยกว่าความเที่ยงตรงที่เราต้องการในการวัดความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแบ่งออกเป็น 5 ระดับตามความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดที่แสดงค่าเป็น % และถือเป็นความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเที่ยงตรงของ

เครื่องวัดกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เป็นค่าร้อยละเทียบกับค่าพิกัด (Rated value) (ค่า Input มาตรฐาน) ดังนั้น เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนในการวัดน้อยที่สุด เราจึงต้องพยายามเลือกช่วงการวัดให้ใกล้กับค่าพิกัดมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ กล่าวคือ ต้องใช้ส่วนที่ค่าของขีดวัด (Scale) มีค่าสูง

กรณีที่ใช้เครื่องวัดที่มีเข็มชี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานไฟฟ้า r ของขดลวดเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าคงที่ต่ออุณหภูมิเป็นบวก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ต้องมีวิธีชดเชยความคลาดเคลื่อนนี้ หลักการของการชดเชยอุณหภูมิก็คือนำตัวต้านทาน R_c ซึ่งเป็นลวดความต้านทาน Manganese ที่มีค่าคงที่ของความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำมาก และมีความต้านทานไฟฟ้าสูง มาต่ออนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่เมื่อทำเช่นนี้ ค่าคงที่ต่ออุณหภูมิของความต้านทานรวม $r + R_c$ จะมีค่าต่ำกว่าค่าคงที่ต่ออุณหภูมิของความต้านทานของขดลวดเคลื่อนที่มากจึงสามารถลดอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ นอกจากนี้ ยังมีวิธีใช้เทอร์มิสเตอร์ซึ่งมีค่าคงที่ของอุณหภูมิเป็นลบเพื่อมาหักล้างกับค่าคงที่ของอุณหภูมิของขดลวดเคลื่อนที่ซึ่งเป็นบวกอีกด้วย

ตารางที่ 3.1 ระดับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ระดับความ เที่ยงตรงของ เครื่องวัด	ความคลาด เคลื่อนที่ยอมรับ ได้ ต่อค่าพิกัด [%]	วัตถุประสงค์การใช้งานหลัก
ระดับ 0.2	± 0.2	เครื่องมาตรฐานรอง: เครื่องมาตรฐานสำหรับสอบเทียบ การวัดละเอียดมาก
ระดับ 0.5	± 0.5	การวัดละเอียด: การวัดทั่วไปที่ต้องการความละเอียด
ระดับ 1.0	± 1.0	การวัดปกติ: การวัดง่ายๆ เช่น เครื่องวัดพกติดตัว ฯลฯ
ระดับ 1.5	± 1.5	เครื่องวัดอุตสาหกรรม: เครื่องวัดสำหรับแผงจ่ายไฟทั่วไปและแผงควบคุม
ระดับ 2.5	± 2.5	เครื่องวัดคร่าวๆ: ใช้กับงานที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรง

3.3.2 เครื่องวัด

3.3.2.1 เครื่องวัดอนาล็อก

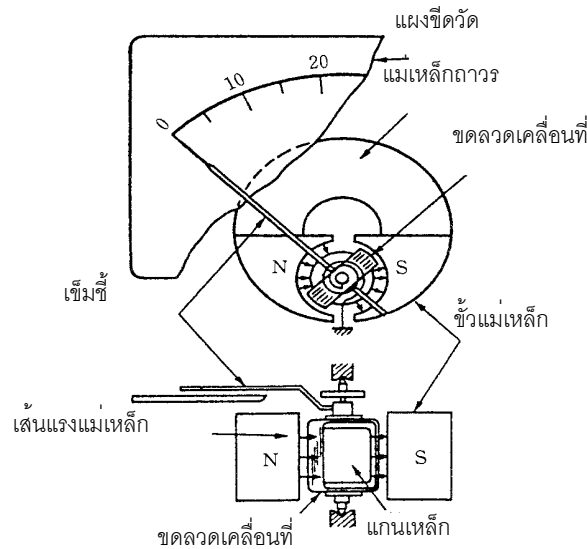
(1) เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ (Moving coil)

เป้าหมายในการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีช่วงการวัดตั้งแต่ ไม่กี่ μA – 100 A , 10 mV–1 kV หลักการทำงานคือใช้ปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด

รูปที่ 3.14 แสดงขดลวดเคลื่อนที่พร้อมเข็มชี้ติดตั้งอยู่กลางสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอของแม่เหล็กถาวรเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเคลื่อนที่จะเกิดแรงบิดขับเคลื่อนทำให้คอยล์หมุนแต่เนื่องจากขดลวดเคลื่อนที่จะติดตั้งอยู่กับสปริงกันหอยเมื่อคอยล์หมุนไปจะเกิดแรงบิดต้านคอยล์จะหมุนไปจะหยุดที่ตำแหน่งที่แรงบิดทั้งสองนี้สมดุลกันมุมที่หมุนไปจะแปรผันตามกระแสไฟฟ้า ค่า K เรียกว่าค่าคงที่ของความไว ยิ่งมีค่าสูงเครื่องวัดจะยิ่งมีความไวสูง

หากนำตัวต้านทานที่มีความต้านทานสูงมาต่ออนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเคลื่อนที่ จะแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าของวงจร จึงกลายเป็น Voltmeter

เนื่องจากขดลวดเคลื่อนที่ที่สามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ไม่กี่สิบลีบ mA เท่านั้นในการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูง เราจึงต้องต่อ Shunt ขนานกับขดลวดเคลื่อนที่ และในการวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงต้องต่อ Multiplier อนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่ เมื่อทำเช่นนี้แล้วจะสามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ถึงหลายพัน A หรือวัดแรงดันไฟฟ้าได้หลายสิบลีบ kV



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่

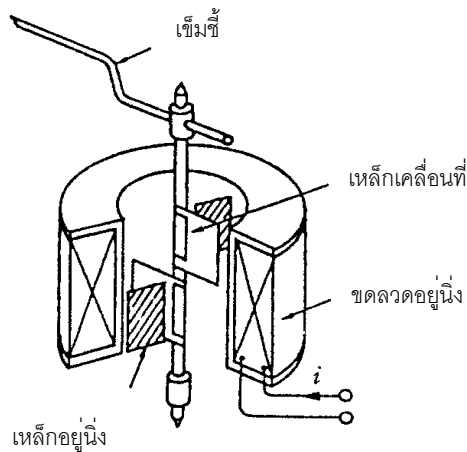
(2) เครื่องวัดแบบเหล็กเคลื่อนที่ (Moving iron)

เป้าหมายการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ไม่เกิน 500 Hz มีช่วงการวัดระหว่าง 10 mA–100 A, 10 V–10 kV หลักการทำงานคือใช้แรงดึงดูด-แรงผลักระหว่างเหล็กที่ถูกทำให้กลายเป็นแม่เหล็ก

การทำงานจะปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดให้ไหลผ่านขดลวดอยู่นิ่ง แล้วใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาทำให้เหล็กเคลื่อนที่กับเหล็กอยู่นิ่งกลายเป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะผลักหรือดูดเหล็กเคลื่อนที่ซึ่งติดตั้งเข็มชี้เอาไว้ เนื่องจากเหล็กทั้งสองชิ้นจะกลายเป็นแม่เหล็กโดยมีขั้ว N และ S ซี่ไปทางเดียวกัน หากวางเหล็กเคลื่อนที่กับเหล็กอยู่นิ่งไว้ที่ความสูงเท่ากัน จะเรียกว่าเครื่องวัดแบบผลัก หากวางตำแหน่งให้มีความสูงเหลื่อมกัน จะเรียกว่าเครื่องวัดแบบดูด รูปที่ 3.15 แสดงโครงสร้างของเครื่องวัดแบบผลัก-ดูดซึ่งใช้ทั้งสองวิธีผสมกัน เนื่องจากระดับความเป็นแม่เหล็กจะแปรผันตามกระแสไฟฟ้า และแรงผลัก-แรงดูดจะแปรผันตามผลคูณของระดับความเป็นแม่เหล็กของเหล็กทั้งสองชิ้น ดังนั้น แรงบิด τ ที่ทำให้เข็มเคลื่อนที่ จะแปรผันตามค่าเฉลี่ยตามเวลาของกำลังของของค่ากระแสไฟฟ้าในขณะใดๆ $i(t)$ ที่ไหลผ่านขดลวดอยู่นิ่ง

$$\tau = k \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \quad (3.6)$$

ดังนั้นสำหรับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดแรงบิดที่มีขนาดแปรผันตามกำลังสองของค่า Effective เครื่องวัดประเภทนี้ใช้เป็น Voltmeter และ Ammeter สำหรับชี้บอกค่า Effective ของไฟฟ้าที่มีความถี่ตั้งแต่ประมาณไฟบ้านไปจนถึงหลายร้อย Hz



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดแบบเหล็กเคลื่อนที่

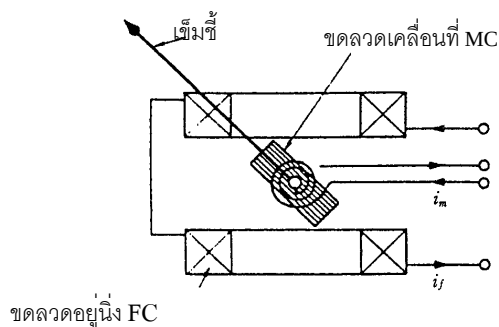
(3) เครื่องวัดแบบ Electrodynamometer

เป้าหมายการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าทั้งกระแสตรง และ กระแสสลับที่มีความถี่ไม่เกิน 1 kHz มีช่วงการวัดระหว่าง 10 mA–20 A, 1 V–1 kV หลักการทำงานใช้แรง แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด 2 ชุด

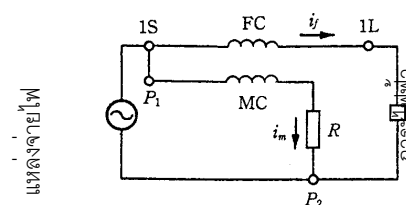
รูปที่ 3.16 (a) แสดงโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยขดลวดอยู่หนึ่ง (FC) ขดลวดเคลื่อนที่ (MC) โดยจะเกิดแรงบิดที่แปรผันตามผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทั้งสองเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า เดียวกันให้ไหลผ่านขดลวดทั้งสองเข็มจะชี้บอกค่าที่แปรผันตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้า รูปที่ 3.16 (b) แสดงวิธีการต่อวงจรเพื่อใช้เป็น Wattmeter โดยเมื่อให้กระแสไฟฟ้า $i_f = I_f \sin(\omega t - \phi)$ ให้ไหลผ่าน FC และป้อนแรงดันไฟฟ้า $v_m = V_m \sin \omega t$ ให้แก่ MC แล้ว v_m จะแปรผันตามกระแสไฟฟ้า i_m ที่ไหลระหว่างขั้ว P_1 – P_2 และแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมภาระไฟฟ้า ดังนั้น แรงบิดที่ทำให้ MC เคลื่อนที่ซึ่งแปรผันตามผล คูณของ i_f กับ i_m จะชี้บอกค่ากำลังไฟฟ้าที่แปรผันตามกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของภาระไฟฟ้างต่อไปนี้

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_m \cdot i_f dt = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_f}{\sqrt{2}} \cos \phi = VI \cos \phi \quad (3.7)$$

ทั้งนี้ V และ I เป็นค่า Effective ส่วน $\cos \phi$ เท่ากับเพาเวอร์แฟกเตอร์ และ $T = 2\pi/\omega$



(a) โครงสร้าง



(b) วิธีการต่อใช้เป็น wattmeter

รูปที่ 3.16 เครื่องวัดแบบ Electrodynamometer

(4) เครื่องวัดแบบ Thermoelectric

เป้าหมายการวัดได้แก่กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าทั้งกระแสตรง และกระแสสลับที่มีความถี่ไม่เกิน 100 MHz (ทั้งนี้ในกรณีของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะรองรับได้ไม่เกิน 100 kHz เนื่องจากคุณลักษณะด้านความถี่ของลวดตัวนำทาน) ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 1 mA–5 A, 1 V–100 V

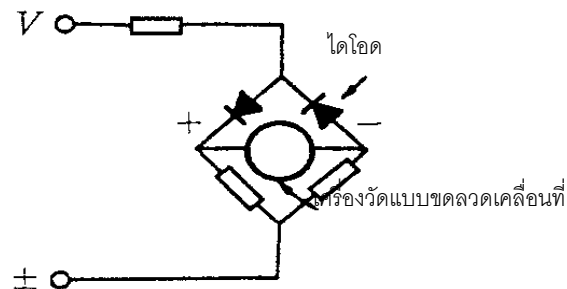
หลักการทำงานจะใช้ thermoelectromotive force ที่เกิดจาก thermocouple ไปขับเคลื่อนขดลวดเคลื่อนที่

การทำงานจะวางลวดตัวนำติด Thermocouple ไว้ในทรงกลมสุญญากาศแล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าที่จะวัดให้ไหลผ่านลวดตัวนำนั้น Joule heat ซึ่งแปรผันตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นที่ Thermocouple แล้วนำแรงดันไฟฟ้านี้ไปขับเคลื่อนขดลวดเคลื่อนที่ด้วยโครงสร้างทำนองเดียวกับเครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ ดังนั้น ค่าที่วัดได้จึงเป็นค่า Effective ในการวัดแรงดันไฟฟ้าจะใช้ตัวนำทานต่ออนุกรมเข้าไป

(5) เครื่องวัดแบบ Rectifier

เป้าหมายการวัดได้แก่กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 Hz–1 MHz ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 100 μ A–0.1 A, 1 V–1 kV หลักการทำงานจะใช้เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ที่มีวงจร Rectifier อยู่ภายใน

รูปที่ 3.17 แสดงการใช้วงจร Full-wave rectifier ไปขับเคลื่อนขดลวดเคลื่อนที่ โดยจะเกิดแรงบิดขับเคลื่อนซึ่งแปรผันตรงกับค่าเฉลี่ยของ Full-wave แต่การสอบเทียบและกำหนด Scale จะใช้คลื่นซายนเป็นเกณฑ์ ดังนั้น หากรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจะทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นเนื่องจากไดโอดมีขีดจำกัดของคุณลักษณะด้านความถี่เครื่องวัดประเภทนี้จึงใช้กับความถี่ไม่เกิน 1 MHz



รูปที่ 3.17 Voltmeter แบบ rectifier

(6) เครื่องวัดแบบเหนี่ยวนำ

เป้าหมายการวัดได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 Hz–500 Hz ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 0.1 A–100 A, 1 V–100 V

หลักการทำงานจะใช้ปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่หรือสนามแม่เหล็กหมุนกับกระแสไหลวน (Eddy current) ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากสนามแม่เหล็กนั้น

เครื่องวัดแบบนี้ที่รู้จักกันดีที่สุด ได้แก่ Watt-hour meter แบบเหนี่ยวนำสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 3.18 ซึ่งใช้สำหรับแสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปเครื่องวัดนี้มีขดลวดแรงดันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ψ_E ซึ่งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า และขดลวดกระแสจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ψ_I ซึ่งแปรผันตามกระแสของภาระไฟฟ้า โดย ψ_E และ ψ_I จะมีเฟสต่างกัน 90° และสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นโดยมีเฟสเข้าไปตามลำดับเรียงตาม ψ_E , ψ_I และ $-\psi_I$ จะทำให้เกิดกระแสไหลวนในแผ่นจานอลูมิเนียม ทำให้เกิดแรงบิดปฏิกิริยาต่อสนามแม่เหล็กของกระแสไหลวนนี้กระทำต่อจานในทิศทางเดียวกับ

สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ ดังนั้น ถ้าให้ความต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้า E และกระแสไฟฟ้า I เท่ากับ ϕ และค่า K เป็นค่าคงที่จากการออกแบบและลักษณะการพันขดลวดบนแกนเหล็กแล้ว แรงบิดจะมีค่าเท่ากับ

$$\tau_1 = K_1 EI \cos \phi \quad (3.8)$$

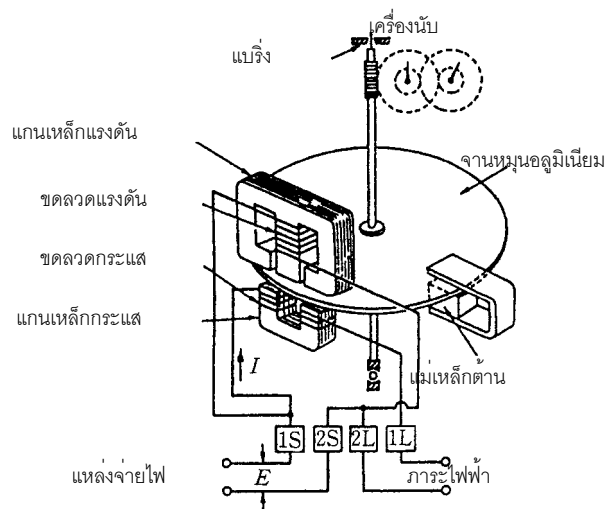
เมื่อความเร็วรอบของจานเท่ากับ n แล้วแผ่นจานจะได้รับแรงบิดด้านที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ของแม่เหล็กด้านเท่ากับ

$$\tau_2 = K_2 nB \quad (3.9)$$

แผ่นจานจะหมุนด้วยความเร็วรอบที่ทำให้แรงบิดทั้งสองสมดุลกัน ($\tau_1 = \tau_2$) กล่าวคือ $n = (K_1/K_2B) EI \cos \phi = K_c P$ ความเร็วรอบ n จึงแปรผันตามกำลังไฟฟ้า P ของภาระไฟฟ้า เนื่องจากจำนวนรอบ N ที่แผ่นจานหมุนไปในเวลา t จะเท่ากับ nt ดังนั้น

$$N = K_c Pt \quad (3.10)$$

เมื่อนับจำนวนรอบ N ด้วยเครื่องนับจะได้ความสิ้นเปลืองไฟฟ้า Pt ที่ใช้ไปในเวลา t



รูปที่ 3.18 Watt-hour meter แบบเหนี่ยวนำสำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ

(7) เครื่องวัดแบบไฟฟ้าสถิต

เป้าหมายการวัดได้แก่ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ความถี่ไม่เกิน 100 kHz ช่วงการวัดอยู่ระหว่าง 1 V–100 kV

หลักการทำงานได้แก่แรงไฟฟ้าสถิตที่กระทำระหว่างแผ่นวัตถุที่มีประจุ 2 แผ่น

ขั้วของคาปาซิเตอร์ด้านหนึ่งจะเป็นขั้วไฟฟ้าอยู่นิ่ง อีกด้านหนึ่งจะเป็นขั้วไฟฟ้าเคลื่อนที่ซึ่งติดตั้งสปริงและเข็มชี้อยู่ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่จะวัด V ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง พลังงานไฟฟ้าสถิตที่สะสมในคาปาซิเตอร์ความจุ C จะเท่ากับ

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.11)$$

ดังนั้น จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ทำให้ขั้วไฟฟ้าเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งและขั้วเข้มข้น แรงขับเคลื่อน F นี้จะแปรผันตามกำลังสองของแรงดันไฟฟ้า

$$F = K_s \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} K_s V^2 \frac{dC}{dx} \quad (3.12)$$

ทั้งนี้ K_s เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเครื่องวัด

ดังนั้น แรงดันที่เครื่องวัดชี้บอก จึงเป็นค่า Effective เครื่องวัดแบบนี้ใช้กับการวัดไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีความเป็นฉนวนสูง

(8) เครื่องวัดแบบ Transducer

เป้าหมายการวัดได้แก่ปริมาณทางฟิสิกส์ ปริมาณทางกลศาสตร์ ปริมาณทางเคมี ต่างๆ ที่เหมาะสมกับเครื่องแปลงชนิดต่างๆ ช่วงการวัดจะอยู่ในช่วงที่เซ็นเซอร์สามารถรองรับได้

หลักการทำงานคือ ใช้ Device ที่สามารถแปลงปริมาณทางฟิสิกส์หรือเคมีต่างๆ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Transducer แล้วนำ Output ที่ได้ไปขับเครื่องวัดแบบเข็ม ตัวอย่างของ Transducer ชนิดต่างๆ มีดังต่อไปนี้

Transducer ทางแสง: Photoconductive cell (หรือ Photoresistor เป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อมีแสงตกกระทบ เช่น CdS เป็นต้น) Photovoltaic cell (Photoelectromotive force ของ pn junction) Photoelectric tube (ปรากฏการณ์ปลดปล่อย Photoelectron) Pyroelectric device (Polarized charge ที่เกิดขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อถูกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น LiTaO_3)

Transducer ด้านอุณหภูมิ: Thermocouple (ปรากฏการณ์ Seebeck) Thermistor (ค่าคงที่ของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำต่ออุณหภูมิ) Radiation thermometer (Thermocouple หรือ Pyroelectric device เป็นต้น) เทอร์โมมิเตอร์แสง (ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัตถุกับ ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่แผ่รังสีออกมา)

Transducer ด้านกลศาสตร์: Strain gauge (การเปลี่ยนแปลงความต้านทานจากความเค้นของโลหะผสม เช่น Manganese เป็นต้น) Displacement sensor (ตรวจจับการเปลี่ยนตำแหน่งด้วยการแปลงความจุไฟฟ้าสถิตหรืออินดักแตนซ์) Electromagnetic flowmeter (แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในของไหลนำไฟฟ้าที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก) Ultrasonic current meter (ผลต่างเวลาในการนำคลื่นอัลตราโซนิกในทิศทางรัศมีของท่อส่งของเหลว หรือปรากฏการณ์ Doppler)

3.3.2.2 เครื่องวัดดิจิทัล

เครื่องวัดดิจิทัลที่ใช้แสดงค่าที่วัดได้ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าทั้งกระแสตรง และ กระแสสลับรวมทั้งความต้านทานไฟฟ้า เรียกว่า ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ หรือ ดิจิทัลเทสเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย A/D converter เครื่องขยายสัญญาณขาเข้า Voltage divider อุปกรณ์แปลงปริมาณทางไฟฟ้าและฟิสิกส์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น A/D converter จะใช้แบบ Double integral กันมากที่สุดเนื่องจากได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนด้านขาเข้าน้อยแม้จะมีความเร็วต่ำก็ตาม

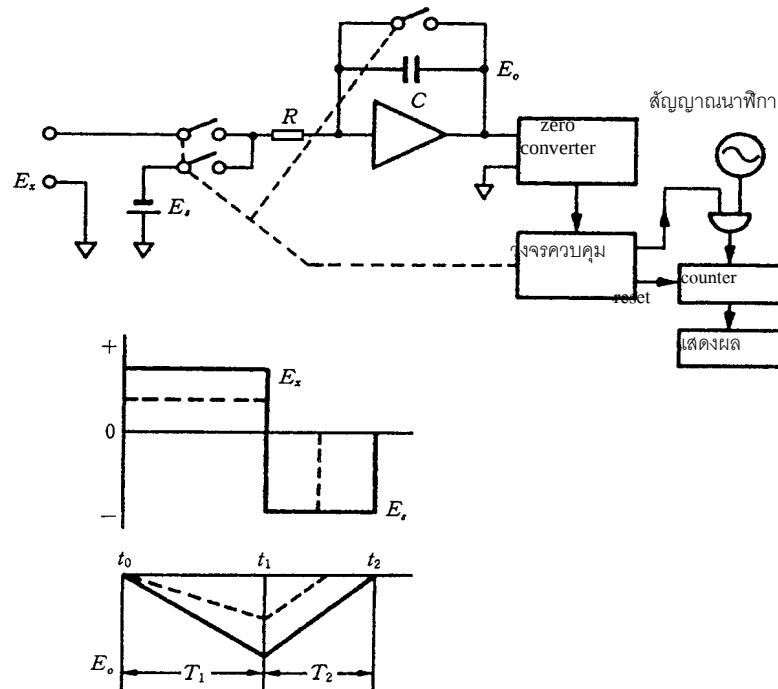
รูปที่ 1.90 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ A/D converter แบบ Double integral ซึ่งส่วนที่ประกอบด้วย Op-amp ตัวต้านทานต่ออนุกรม และคาปาซิเตอร์ต่อขนาน เรียกว่า วงจร Miller integrator เมื่อวงจรนี้ทำการอินทิเกรตสัญญาณขาเข้า E_x ไปเป็นระยะเวลา T_1 แล้ว จะทำการอินทิเกรตแรงดันมาตรฐาน E_s ซึ่งมีขั้วกลับกับ E_x และตรวจวัดเวลา T_2 ที่ทำให้สัญญาณขาออก E_o ของวงจรอินทิเกรตเป็นศูนย์ด้วย Comparator

$$\frac{1}{CR} \int_{t_0}^{t_1} E_x dt + \frac{1}{CR} \int_{t_1}^{t_2} (-E_s) dt = \frac{E_x T_1}{CR} - \frac{E_s T_2}{CR} = 0 \quad (3.13)$$

ดังนั้น $E_x = E_s (T_2/T_1)$ เนื่องจาก E_s และ T_1 เป็นค่าที่รู้อยู่แล้ว หากวัดค่า T_2 ได้ ก็สามารถคำนวณหา E_x ได้ การวัดค่า T_2 จะเปิดวงจรเกิดสร้างสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ f เป็นระยะเวลา $T_2 (= t_1 - t_2)$ ส่งไปที่วงจรรนับเพื่อนับจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่เข้ามา เนื่องจาก $T_2 = n / f$ ดังนั้น

$$E_x = \frac{E_s}{T_1} \frac{n}{f} = k_c \cdot n \quad (3.14)$$

กล่าวคือ เพียงแค่นับจำนวนสัญญาณนาฬิกาเท่านั้นก็สามารถทราบค่าแรงดันที่ต้องการวัดได้แล้ว ในการวัดปริมาณอื่นนอกเหนือจากกระแสตรง จะใช้ Transducer เข้ามาช่วย



รูปที่ 3.19 A/D Converter แบบ Double integral (Dual slope)

3.3.2.3 เครื่องบันทึกผล (Logger)

เครื่องบันทึกผลเป็นอุปกรณ์ที่บันทึกผลค่าที่วัดได้ที่เปลี่ยนแปลงไปลงบนกระดาษโดยอัตโนมัติ ซึ่งแบ่งออกตามกลไกการทำงานได้เป็นแบบ Direct drive กับแบบ Automatic balance โดยแบบแรกจะใช้พลังงานจากสัญญาณที่วัดได้มาขับปากกาบันทึกผลโดยตรง และแบบหลังจากได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟเฉพาะ มาขับเซอร์โวมอเตอร์เพื่อขับปากกาโดยให้สัญญาณ Input กับสัญญาณ Feedback มีค่าเท่ากัน

กระดาษบันทึกผลมีทั้งแบบวงกลม และแบบแถบยาว ปัจจุบันที่ใช้กันมากจะเป็นแบบแถบยาวกลไกการบันทึกมีทั้งการบันทึกต่อเนื่องด้วยปากกาและแบบจุด หากบันทึกแบบจุดจะสามารถบันทึกได้หลายปริมาณโดยใช้กลไกเพียง 1 ชุด นอกจากนี้บางครั้งยังใช้กระดาษไวความร้อนหรือ Electric-sensitive recording paper ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้หมึกอีกด้วย

3.3.2.4 Oscilloscope

Oscilloscope เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเกตรูปคลื่น ความถี่ เฟส ฯลฯ ด้วยการนำรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า มาฉายลงบนจอภาพ CRT โดยให้แกนนอนแสดงเวลา แกนตั้งแสดง Amplitude อุปกรณ์นี้บางครั้งก็เรียกว่า Synchroscope เนื่องจาก มีกลไกในการ Synchronize แกนเวลาของจอภาพกับสัญญาณ Input หากป้อนสัญญาณ $x(t)$ ต่างหากให้แก่แกนนอน แทนที่จะป้อนสัญญาณแกนเวลาให้แล้ว จะได้รูปคลื่นประกอบกับสัญญาณ $y(t)$ ที่ป้อนให้แก่แกนตั้ง ซึ่งเป็นกราฟ x-y ที่เรียกว่า Lissajous figure

สำหรับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นคาบด้วยความถี่ต่ำ เช่น ไม่กี่ Hz หรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเพียงครั้งเดียว หากใช้ Oscilloscope ทั่วไปจะไม่สะดวกในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นตามเวลา ดังนั้น จึงใช้ Storage oscilloscope ซึ่งสามารถบันทึกค่าสัญญาณไว้ได้ นอกจากนี้ ยังมี Digital memory oscilloscope ซึ่งใช้ A/D converter แปลงสัญญาณ Input ให้เป็นข้อมูลดิจิทัล บันทึกไว้ในหน่วยความจำ IC แล้วนำไปประมวลผลต่อไปอีกด้วย

กรณีที่สัญญาณ Input มีความถี่สูงถึง 400-500 MHz แล้ว Oscilloscope ทั่วไปจะไม่สามารถติดตามสัญญาณได้ทัน จึงจำเป็นต้องใช้ Sampling oscilloscope อุปกรณ์นี้จะสุ่มวัดรูปคลื่น Input ด้วยคาบ $(T + \Delta t)$ ซึ่งมีค่ามากกว่าคาบ T ของสัญญาณ Input เล็กน้อย ดังนั้น จุบนจอ CRT จะออกไปคาบละ Δt วิธีนี้ทำให้สามารถสังเกตปรากฏการณ์ที่มีความถี่สูงถึง 10 GHz ได้

3.3.3 วิธีการวัด

3.3.3.1 การวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

(1) การวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

โดยทั่วไปจะใช้เครื่องวัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ เนื่องจากขดลวดเคลื่อนที่ที่สามารถรับกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ไม่เกิน 10 mA เท่านั้น หากต้องการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่านั้น จะต้องต่อ Shunt (ความต้านทานของ Shunt เท่ากับ R_S) ขนานกับขดลวดเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.20 ถ้าความต้านทานภายในของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ r_A ให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเท่ากับ I_A แล้ว กระแสไฟฟ้าที่จะวัด I จะคำนวณได้ตามสูตรต่อไปนี้

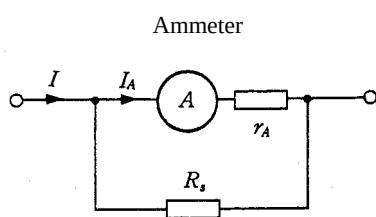
$$I = \frac{r_A + R_S}{R_S} I_A = m_A I_A \quad (3.15)$$

ค่า m_A เรียกว่า scale factor ของ ammeter โดยที่หน้าปัดจะเขียนตัวเลขที่คูณด้วยค่านี้ไว้แล้ว

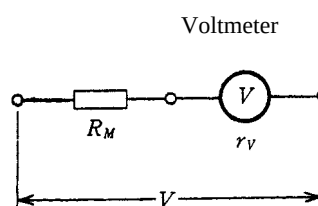
สำหรับ Voltmeter กรณีที่จะวัดไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง จะใช้ Multiplier (ความต้านทาน R_M) ต่ออนุกรมกับขดลวดเคลื่อนที่ดังรูป 3.21 ถ้าความต้านทานภายในของ Voltmeter เท่ากับ r_V ให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเคลื่อนที่เท่ากับ V_V แล้ว แรงดันไฟฟ้าสูงสุด V ที่สามารถวัดได้จะคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$I = \frac{r_V + R_M}{r_V} V_V = m_V V_V \quad (3.16)$$

ค่า m_v เรียกว่า Scale factor ของ Voltmeter หากใช้สวิตช์ในการเลือกใช้ Multiplier หลายๆ ตัว จะเรียกว่า Multi-range voltmeter



รูปที่ 3.20 Shunt ใน Ammeter



รูปที่ 3.21 Multiplier ใน Voltmeter

(2) การวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การวัดไฟฟ้ากระแสสลับโดยมากจะแสดงค่า Effective ดังนั้นหน้าปัด Voltmeter และ Ammeter กระแสสลับทั่วไปจึงมักแสดงว่า Effective กรณีที่จะวัดค่าที่สูงกว่าพิกัดของเครื่องวัด จะใช้หม้อแปลงสำหรับเครื่องวัด (หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าหรือหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า) โดยพันขดลวดปฐมภูมิรอบแกนเหล็กจำนวน n_1 รอบ และขดลวดทุติยภูมิจำนวน n_2 รอบ

กรณีที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น จะต้องขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าอนุกรมกับเส้นทางที่มีกระแสไฟฟ้าที่จะวัด i_1 ไหลผ่านดังรูปที่ 3.22 ถ้าให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Ammeter เท่ากับ i_2 จากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current ratio) จะได้

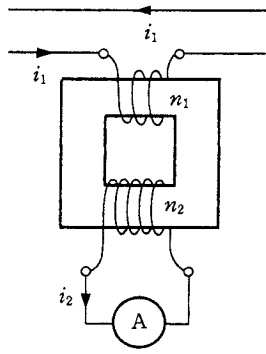
$$i_1 = \frac{n_1}{n_2} i_2 \quad (3.17)$$

ถ้า $n_2 \gg n_1$ แล้ว จะสามารถวัดกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าพิกัดมากๆ ได้

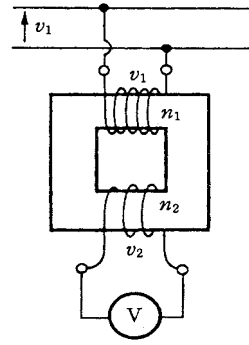
กรณีที่ต้องการวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น จะต้องขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเหมือนกับการวัดแรงดันไฟฟ้า v_1 ตกคร่อมจุดที่จะวัด ถ้า Voltmeter ชี้บอกค่า v_2 จากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage ratio) จะได้ว่า

$$v_1 = \frac{n_1}{n_2} v_2 \quad (3.18)$$

อนึ่ง Current ratio และ Voltage ratio ในทางปฏิบัติจะไม่เท่ากับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด เนื่องจาก Exciting current และอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ดังนั้น จึงต้องชดเชยด้วยการลดจำนวนรอบของขดลวดด้านที่มีจำนวนรอบมากกว่าประมาณ 1%



รูปที่ 3.22 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า



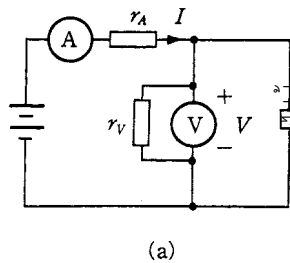
รูปที่ 3.23 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องวัด

3.3.3.2 การวัดกำลังไฟฟ้า

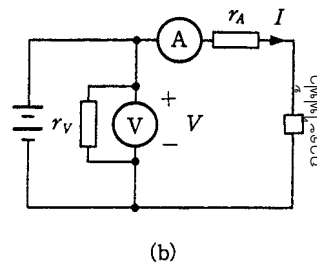
(1) การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่สิ้นเปลืองไปในภาระไฟฟ้าความต้านทาน สามารถวัดได้ด้วยการต่อ Voltmeter และ Ammeter ตามวิธีที่แสดงในรูปที่ 3.24 (a) หรือ (b) เมื่อให้ความต้านทานภายในของ Voltmeter และ Ammeter เท่ากับ r_V , r_A และให้ค่าที่เครื่องวัดแต่ละตัวชี้บอกเท่ากับ V และ I ตามลำดับแล้ว กำลังไฟฟ้า P จะเท่ากับ

$$(a) \quad P = VI - \frac{V^2}{r_V}, \quad (b) \quad P = VI - r_A I^2 \quad (3.19)$$



(a)



(b)

รูปที่ 3.24 การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ Voltmeter และ Ammeter

กรณีที่สามารถไม่คิดถึงความต้านทานภายในของเครื่องวัดได้ กล่าวคือ $r_V = \infty$ หรือ $r_A = 0$ จะได้ว่า $P = VI$

(2) การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว

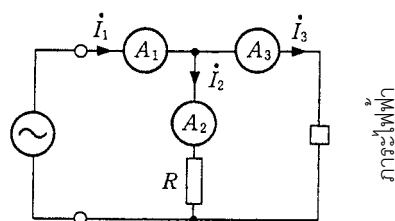
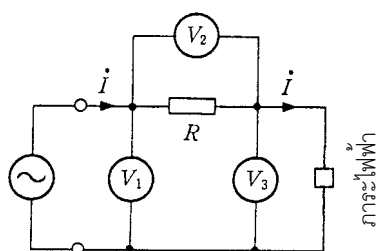
โดยทั่วไปการวัดกำลังไฟฟ้าจริง $VI \cos \phi$ จะใช้ Wattmeter แบบ Electrodynamometer โดยป้อนกระแสไฟฟ้า I ให้ขดลวดอยู่นิ่ง และป้อนกระแสไฟฟ้า V ให้ขดลวดเคลื่อนที่ ในการวัดที่มี เพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำเนื่องจาก Iron loss และ Corona loss ฯลฯ นั้น การวัดจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก ดังนั้นจึงใช้ Wattmeter แบบเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ ซึ่งมี FSD (Full-scale deflection) ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ที่ 0.1–0.2 การวัดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ $VI \sin \phi$ จะใช้ Reactive power meter ซึ่งจะเลื่อนเฟสของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าของ Wattmeter ไป 90° นอกจากนี้ ยังมีวิธีวัดโดยใช้ Voltmeter 3 ตัว และวิธีวัดโดยใช้ Ammeter 3 ตัวอีกด้วย

วิธีวัดโดยใช้ Voltmeter 3 ตัว จะนำ Voltmeter ที่มีความต้านทานภายในสูง 3 ตัว และตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ R มาต่อตามรูปที่ 3.25 วัดแรงดันไฟฟ้า Effective ได้ V_1, V_2, V_3 แล้วนำไปคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย P ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{1}{2R}(V_1^2 - V_2^2 - V_3^2) \quad (3.20)$$

วิธีวัดโดยใช้ Ammeter 3 ตัว จะนำ Ammeter ที่มีความต้านทานภายในต่ำ 3 ตัว และตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ R มาต่อตามรูป 3.26 วัดกระแสไฟฟ้า Effective ได้ I_1, I_2, I_3 แล้วนำไปคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย P ดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{R}{2}(I_1^2 - I_2^2 - I_3^2) \quad (3.21)$$



รูปที่ 3.25 การวัดกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Voltmeter 3 ตัว รูปที่ 3.26 การวัดกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Ammeter 3 ตัว

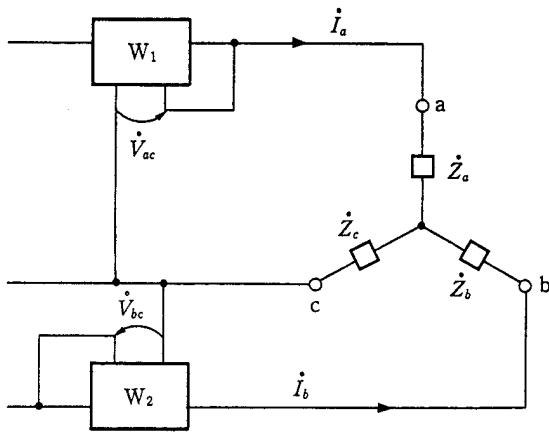
(3) การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สามารถทำได้โดยการนำ Wattmeter เฟสเดียว 3 ตัวมาต่อกับแต่ละเฟส แล้วหาผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าของมิเตอร์แต่ละตัว

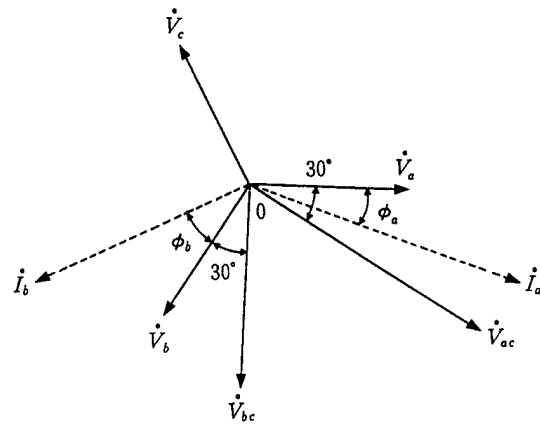
กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ n เฟสในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ n เฟส n สาย ไม่ว่าการระไฟฟ้า จะสมดุลหรือไม่ก็ตาม จะสามารถวัดได้โดยใช้ Wattmeter เฟสเดียวจำนวน $(n - 1)$ ตัว และกำลังไฟฟ้รวมจะเท่ากับผลบวกของค่าที่วัดได้จากมิเตอร์แต่ละตัว (Brondel's theorem) ดังนั้น กำลังไฟฟ้าของวงจร 3 เฟส จะสามารถวัดได้ด้วยวิธี Wattmeter 2 ตัว ซึ่งใช้ ซึ่งใช้ Wattmeter เฟสเดียวจำนวน 2 ตัว กรณีของวงจร 3 เฟส 3 สาย ถ้าเราคิดว่าสายเฟส c เป็นทางไหลกลับของกระแสไฟฟ้าแล้ว กำลังไฟฟ้า (ค่าในขณะใดๆ) ที่แหล่งจ่ายไฟจ่ายให้แก่ภาระไฟฟ้า จะเท่ากับ $p = v_{ac} i_a + v_{bc} i_b$ ดังนั้น ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย V_{ac} และ V_{bc} และกระแสเฟส I_a และ I_b ให้แก่ Wattmeter 2 ตัวดังรูปที่ 3.27 (a) แล้ว จะสามารถวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสได้

ถ้าให้ความต่างเฟสระหว่าง V_a กับ I_a เท่ากับ ϕ_a ให้ความต่างเฟสระหว่าง V_b กับ I_b เท่ากับ ϕ_b แล้ว เนื่องจากระหว่างแรงดันเฟสกับแรงดันระหว่างสายจะมีความต่างเฟสเท่ากับ 30° ดังผังเวกเตอร์ในรูป 3.27 (b) ดังนั้น จึงคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง P ได้ดังต่อไปนี้

$$P = P_1 + P_2 = V_{ac} I_a \cos(\phi_a - 30^\circ) + V_{bc} I_b \cos(\phi_b + 30^\circ) \quad (3.22)$$



(a) วิธีต่อวัตต์มิเตอร์



(b) ผังเวกเตอร์

รูปที่ 3.27 การวัดกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสด้วยวิธี Wattmeter 2 ตัว

โดย V_{ac} และ V_{bc} เป็นค่า Effective ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย และ I_a และ I_b เป็นค่า Effective ของกระแสเฟส ดังนั้น

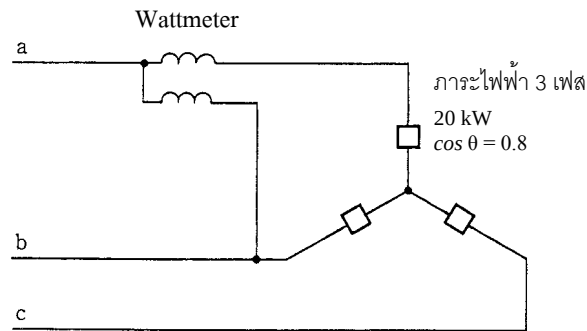
- (a) ถ้า $-30^\circ < \phi_a, \phi_b < 30^\circ$ แล้ว P_1, P_2 จะเป็นบวก
- (b) ถ้า $-30^\circ = \phi_a, \phi_b = 30^\circ$ แล้ว P_1, P_2 จะเป็นศูนย์
- (c) ถ้า $\phi_a < -30^\circ$ แล้ว P_1 จะเป็นลบ ถ้า $30^\circ < \phi_b$ แล้ว P_2 จะเป็นลบ

เนื่องจาก Wattmeter จะชี้แต่ค่าบวกเท่านั้น ดังนั้น กรณีที่ P_1 หรือ P_2 เป็นลบ จะต้องกลับขั้วของ Wattmeter ที่เข็มชี้ไปทางด้านลบ แล้วนำค่าที่มิเตอร์ทั้งสองชี้มาหาผลต่างเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

อนึ่ง ในการปฏิบัติงานจริงๆ มักจะใช้ Wattmeter 3 เฟส ซึ่งสามารถระบุกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสได้โดยตรงด้วยเข็มชี้เพียง 1 อัน แต่หลักการทำงานของมิเตอร์ก็เหมือนกับวิธี Wattmeter 2 ตัว

กรณีของภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล เราสามารถใช้วิธี Wattmeter 1 ตัว ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับวิธี Wattmeter 2 ตัวได้ กล่าวคือ ต่อสวิตช์สลับสายกับขดลวดแรงดันของ Wattmeter เฟสเดียว 1 ตัว แล้วหาค่ากำลังไฟฟ้าจากผลบวกของค่าที่มิเตอร์ชี้บอกเมื่อสลับระหว่างสาย 2 เส้นของภาระไฟฟ้า 3 เฟส ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างสาย 2 เส้นในกรณีนี้

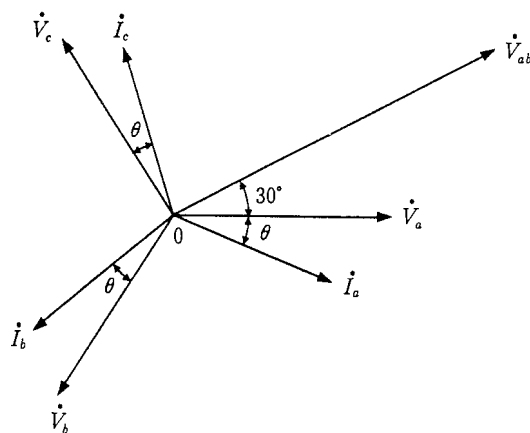
รูปที่ 3.29 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสสมมาตร จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า 3 เฟสสมดุลที่มีความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า 20 kW มีเพาเวอร์แฟกเตอร์ (Lagging) เท่ากับ 0.8 ถ้าให้ลำดับของเฟสเท่ากับ a-b-c เมื่อคำนวณหาว่าที่ Wattmeter จะชี้บอกเมื่อต่อมิเตอร์ระหว่างเฟส a-b จะได้อะไรต่อไปนี้



รูปที่ 3.29 ตัวอย่างตัวเลขในการวัดกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 3.30 แสดงผังเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในกรณีนี้ ซึ่งถ้าให้มุมเฟาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้าเท่ากับ θ แล้ว เนื่องจากความต่างเฟสระหว่างแรงดัน V_{ab} กับกระแส I_a เท่ากับ $(30^\circ + \theta)$ ดังนั้นค่าที่ Wattmeter ชี้บอก P_{ab} จะเท่ากับ

$$P_{ab} = V_{ab} I_a \cos(30^\circ + \theta) = VI (\cos 30^\circ \cos \theta - \sin 30^\circ \sin \theta)$$



รูปที่ 3.30 ผังเวกเตอร์แสดงตัวอย่างค่าในการวัดกำลังไฟฟ้า

ทั้งนี้ให้แรงดันระหว่างสาย $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = V$ กระแสสาย $I_a = I_b = I_c = I$ และใช้ addition theorem เข้าช่วย ถ้าให้เพาเวอร์แฟกเตอร์ของภาระไฟฟ้าเท่ากับ $\cos \theta$ แล้ว ความสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า 3 เฟส $P = \sqrt{3}VI \cos \theta$ ดังนั้น เมื่อนำ $VI = P / \sqrt{3} \cos \theta$ เข้าไปแทนค่าในความสัมพันธ์ข้างต้น จะได้ว่า

$$P_{ab} = \frac{P}{\sqrt{3} \cos \theta} (\cos 30^\circ \cos \theta - \sin 30^\circ \sin \theta)$$

เมื่อแทนค่า $P = 20 \text{ kW}$, $\cos \theta = 0.8$, $\sin \theta = \sqrt{1 - 0.8^2} = 0.6$ และ $\cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$, $\sin 30^\circ = 1/2$ ลงไปในความสัมพันธ์นี้ จะได้ว่า

$$P_{ab} = \frac{20}{\sqrt{3} \times 0.8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.8 - \frac{1}{2} \times 0.6 \right) \approx 10 - 4.33 = 5.67 \text{ kW}$$

3.3.3.3 การวัดความถี่

เมื่อป้อนคลื่นไซน์ที่มีความถี่พื้นฐานเปลี่ยนแปลงได้ $x(t) = A \sin(\omega_1 t + \theta_1)$ ให้แก่แกนนอนของ Oscilloscope และป้อนคลื่นไซน์ ที่ไม่ทราบความถี่ $y(t) = B \sin(\omega_2 t + \theta_2)$ ให้แก่แกนตั้งแล้วจะเกิดภาพ Lissajous figure ขึ้น หาก $\omega_1 = \omega_2$ ภาพนี้จะหยุดนิ่งเป็นรูปวงรี ดังนั้น เราจึงสามารถวัด ω_2 ได้ด้วยการ ปรับ ω

สำหรับวิธีการใช้เครื่องนับความถี่จะแปลงรูปคลื่นที่ไม่ทราบความถี่ให้เป็นคลื่นรูป Pulse ด้วยวงจรแปลงรูปคลื่นนำไปป้อนผ่านวงจรเกตในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วใช้วงจรนับจำนวน Pulse ที่วิ่งผ่านในช่วงระยะเวลานั้น โดยทั่วไปวงจรนับจะใช้วงจร Flip-flop (bistable multivibrator)

นอกจากนี้ ยังมีวิธี Heterodyne wavemeter วิธีคำนวณจากเงื่อนไขสมดุลโดยทำให้เกิด Resonance กับ Bridge และวิธีอื่นๆ อีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีของคลื่นผิวน้ำซึ่งประกอบด้วยความถี่จำนวนมากจะใช้วิธีนำคลื่นที่วัดมาแปลง A/D แล้วใช้คอมพิวเตอร์แปลง Fast Fourier Transformation (FFT) เพื่อแสดง Spectrum ออกมา

3.3.3.4 การวัดความต่างเฟส

การวัดความต่างเฟสระหว่างคลื่นไซน์ 2 คลื่นที่มีความถี่เท่ากัน เมื่อป้อน $x(t) = A \sin \omega t$ ให้แกนนอน และ $y(t) = B \sin(\omega t + \theta_2)$ ให้แกนตั้งแล้ว เนื่องจากคลื่นทั้งสองมีความถี่เท่ากัน ดังนั้น ส่วนความต่างเฟสสามารถหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{B}{A} \quad (3.23)$$

หากใช้ Oscilloscope ที่มี 2 channel จะสามารถวัดผลต่างเวลา Δt ที่คลื่นทั้งสองมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ หากทราบคาบ T ของคลื่นแล้ว ก็สามารถหาความต่างเฟสได้ดังต่อไปนี้

$$\theta = 2\pi \times \frac{\Delta t}{T} \quad (3.24)$$

กรณีที่ต้องการวัดความต่างเฟสด้วยความเที่ยงตรงสูง จะใช้วิธีแปลงคลื่นทั้งสองเป็น pulse นำไปวัดผลต่างเวลาระหว่างคลื่นทั้งสอง Δt และคาบ T ด้วยวงจรนับ แล้วนำไปผ่านวงจรคำนวณสูตร (3.24) เพื่อแสดงความต่างเฟส

3.3.3.5 การวัดความต้านทาน

ค่าความต้านทานน้อยๆ ไม่เกิน 1 Ω นั้น จะวัดโดยใช้ Potentiometer หรือวัดโดยหาสมดุลของ Kelvin double bridge ค่าความต้านทานในช่วง 1 Ω – 1 M Ω โดยทั่วไปมักจะวัดด้วยวิธีกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า โดยนำ Ammeter มาต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต้องการวัด และนำ Voltmeter มาต่อขนานกับตัวต้านทานที่ต้องการวัด แล้วคำนวณหาความต้านทานจากค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า โดยใช้กฎของโอห์ม นอกจากนี้ในการวัดง่ายๆ จะใช้ Tester แต่ถ้าต้องการวัดให้เที่ยงตรง จะวัดโดยหาสมดุลของ Wheatstone bridge สำหรับการวัดความต้านทานที่มีค่าสูงตั้งแต่ 1 M Ω ขึ้นไป โดยทั่วไปจะวัดด้วย Megger (Insulation resistance tester) ในการวัดความต้านทานของสายดิน จะใช้ขั้วไฟฟ้าต่อสายดินกับ

ข้อไฟฟ้าวัด 2 ข้อ แล้วปรับตัวด้านทานปรับค่าได้แบบสไลด์ให้แรงดันไฟฟ้าสมดุล นำอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า ณ จุดสมดุลไปคำนวณความต้านทานระหว่างตัวนำที่ต่อสายดินกับกราวด์

3.3.3.6 การวัดอิมพีแดนซ์

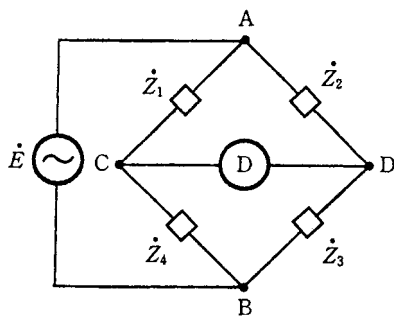
การวัดอิมพีแดนซ์อย่างเที่ยงตรง จะใช้ Bridge กระแสสลับ เช่น Bridge 4 ด้าน กระแสสลับ หรือ Transformer bridge รูปที่ 1.101 แสดง bridge 4 ด้านกระแสสลับที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ E เครื่องตรวจจับ D อิมพีแดนซ์ Z_1-Z_4 ซึ่งประกอบเป็นด้านทั้ง 4 ด้านของ Bridge เมื่อปรับอิมพีแดนซ์ของแต่ละด้านให้ Bridge สมดุล กล่าวคือ Output ของเครื่องตรวจจับเท่ากับศูนย์แล้ว จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4 \quad (3.25)$$

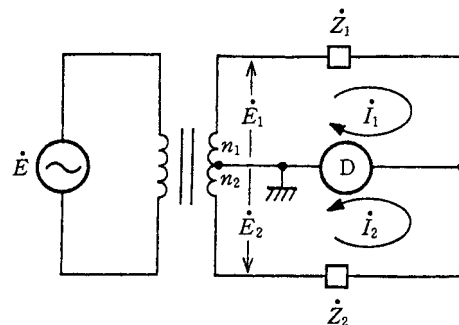
หากทราบอิมพีแดนซ์ของ 3 ด้าน ก็สามารถหาอิมพีแดนซ์ของด้านที่เหลือได้ ทั้งนี้ เนื่องจาก Z_1-Z_4 เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้น เงื่อนไขของสมดุลข้างต้นจึงต้องสอดคล้องกับความสัมพันธ์ต่อไปนี้ ส่วนจริงของ $(Z_1 Z_3) =$ ส่วนจริงของ $(Z_2 Z_4)$ และ ส่วนจินตภาพของ $(Z_1 Z_3) =$ ส่วนจินตภาพของ $(Z_2 Z_4)$ (3.26)

ใน Bridge นี้ กรณีที่ความจุไฟฟ้าสถิตต่อกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟ และเครื่องตรวจจับ อาจส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขสมดุลจะต้องต่อกราวด์ระหว่าง C-D ในรูปให้มัลติมิเตอร์ไฟฟ้าเท่ากับกราวด์ในสภาพสมดุลการต่อกราวด์นี้เรียกว่า Wagner ground

นอกจากนี้ ทุกๆ ส่วนของ Bridge 4 ด้านกระแสสลับยังมี Stray capacitance อยู่ ซึ่งการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นอาจทำให้แหล่งจ่ายไฟส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขสมดุลได้ ในกรณีนี้ควรใช้ Transformer bridge ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.31 Bridge 4 ด้านกระแสสลับ



รูปที่ 3.32 Transformer bridge

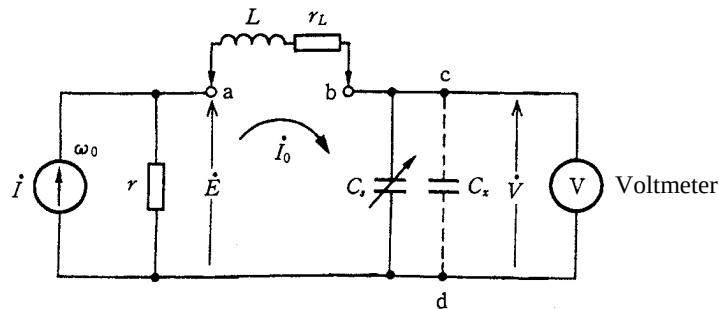
รูปที่ 3.31 แสดงหลักการวัดโดยใช้ Transformer bridge เงื่อนไขสมดุลที่ทำให้ Output ของเครื่องตรวจจับเป็นศูนย์คือ $I_1 = I_2$ ซึ่งในภาวะสมดุล $E_1 = Z_1 I_1$ และ $E_2 = Z_2 I_2$ นอกจากนี้ E_1 และ E_2 ยังแปรผันตามจำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลง n_1 และ n_2 ดังนั้น เมื่อ Bridge อยู่ในภาวะสมดุล ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่างๆ จึงมีดังต่อไปนี้

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2}, \quad \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} \quad (3.27)$$

เนื่องจาก E_1 และ E_2 มีเฟสตรงกัน ดังนั้น Z_1 และ Z_2 จะมีเฟสตรงกันด้วยหากทราบค่า Z_1 หรือ Z_2 ค่าใดค่าหนึ่งก็สามารถวัดอิมพีแดนซ์ของอีกด้านหนึ่งได้

การวัดอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่สูงทำได้โดยนำวงจรที่ต้องการวัดมาทำให้เกิด Resonance แล้วหาอิมพีแดนซ์จากเงื่อนไขของ Resonance นั้นซึ่งมีหลายวิธี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดอินดักแตนซ์ของขดลวดหรือความจุไฟฟ้าสถิตของคาปาซิเตอร์โดยมากมักจะใช้ Q-meter ซึ่งเป็นวิธี Resonance รูปแบบหนึ่ง รูปที่ 3.33 แสดงหลักการวัดด้วย Q-meter ในการวัดอินดักแตนซ์ อันดับแรกจะปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ $I = I \sin \omega t$ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ทำให้ที่ตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ r เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $E = E \sin (\omega t + \theta)$ ต่อไปจะนำอินดักแตนซ์ L ที่ต้องการวัดมาต่อระหว่างจุด a-b แล้วปรับคาปาซิเตอร์ปรับค่าได้มาตรฐาน C_s ให้วงจรอยู่ในภาวะ Resonance ซึ่งที่ความถี่ Resonance $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_s}$ ค่า effective ของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้วของ C_s จะมีค่าสูงสุด และมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$V = \frac{E}{\omega_0 C_s r_L} = \frac{\omega_0 L}{r_L} = QE \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.33 ภาพแสดงหลักการทำงานของ Q-meter

ทั้งนี้ r_L เป็นความต้านทานสูญเสียของขดลวดอินดักแตนซ์ เมื่อวัด V โดยให้แรงดัน E คงที่ แล้วจะหาค่า Q ของขดลวดได้ Q-meter จะบอกค่า Q ไว้ที่หน้าปัดของ Voltmeter และหาค่า L กับ r_L ได้จาก ω_0 และ C_s ที่ทำให้ค่า Q นี้มีค่าสูงสุด

การวัดความจุไฟฟ้าสถิตของคาปาซิเตอร์จะใช้วิธีทำนองเดียวกับข้างต้น โดยเมื่อทำให้ L กับ C_s เกิดการ Resonance กันแล้ว ก็นำคาปาซิเตอร์ C_x ที่ต้องการวัด มาต่อระหว่างจุด c-d โดยรักษา ω_0 ให้คงที่ เมื่อปรับคาปาซิเตอร์ปรับค่าได้มาตรฐาน C_s จนกลายเป็นภาวะ Resonance อีกครั้ง ค่า C_s จะเปลี่ยนไปเป็น C_s' ค่าที่ต้องการวัดจะคำนวณได้จาก $C_x = C_s - C_s'$

3.4 การตรวจวัดระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้า (Measuring power system and equipment)

ในการตรวจสอบและตรวจวัดควรเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรและอุปกรณ์ ดังนี้

- 1) แผนผังการใช้ไฟฟ้าของโรงงาน
- 2) แหล่งจ่ายไฟฟ้าและใบเสร็จรับเงินค่าไฟฟ้าในรอบ 12 เดือนที่ผ่านมา
- 3) แบบแสดงตำแหน่งหม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักร
- 4) รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าหลักพร้อมระบุขนาดในรายการควรระบุ ค่ากิโลวัตต์ แรงดัน กระแส และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไว้ด้วยรายละเอียดสำหรับระบบไฟฟ้า (กิโลวัตต์ แรงดัน กระแส ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า)

- รายละเอียดหม้อแปลงทั้งหมด
 - แผนผังย่อยสำหรับหม้อแปลงแต่ละลูก
 - ขนาดของตัวเก็บประจุที่ติดตั้งไว้
- 5) รายละเอียดสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า
(กิโลวัตต์ แร่งดัน กระแส ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า)
- เครื่องอัดอากาศ
 - ปั๊มน้ำ
 - เตาลหะด้วยขดลวดขนาดใหญ่
 - เครื่องปรับอากาศ
 - อุปกรณ์ในระบบแสงสว่าง
 - มอเตอร์
- 6) การใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละกระบวนการผลิต
- 7) ข้อมูลเฉพาะและราคาของอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน

การตรวจวัดระบบที่ใช้พลังงาน

เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานในโรงงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้า และระบบที่ใช้พลังงานความร้อน ซึ่งรายละเอียดโดยสังเขปของการตรวจวัดเครื่องจักร และอุปกรณ์หลักของทั้ง 2 ระบบมีดังนี้

1) ระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้า

■ ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

หมายถึง ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าตั้งแต่จุดที่ออกจากหม้อแปลง จนถึงตู้ส่งจ่ายหรือตู้ MDB (Main Distribution Breaker) ที่แต่ละจุดภายในโรงงาน

ค่าที่จำเป็นต้องตรวจวัด ได้แก่ แร่งดันไฟฟ้า (โวลต์) กระแสไฟฟ้า (แอมป์) กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ซึ่งเรียกโดยรวมว่าค่าทางไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของระบบ เช่น ลักษณะการใช้ไฟฟ้าเวลาที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อจัดโหลดหลีกเลี่ยงช่วง Peak ของค่าไฟฟ้าความสมดุลของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าศักยภาพในปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าซึ่งควรจะสูงกว่า 0.90 ฯลฯ

เครื่องมือตรวจวัดมีทั้งชนิดที่วัดค่าทางไฟฟ้าแบบชั่วขณะ เช่น แอมป์มิเตอร์หรือเพาเวอร์มิเตอร์แบบคล่องวัด มิเตอร์วัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และเครื่องมือตรวจวัดชนิดที่วัดและบันทึกค่าแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 3.2 การตรวจวัดระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า	● แร่งดันไฟฟ้า ● กระแสไฟฟ้า ● กำลังไฟฟ้า ● ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	● เพาเวอร์มิเตอร์แบบคล่องวัด ● เครื่องมิเตอร์วัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.34 เพาเวอร์มิเตอร์แบบคล้องวัด



รูปที่ 3.35 มิเตอร์วัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.36 เครื่องวัดและบันทึกค่าทางไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

■ ระบบปรับอากาศแบบหน่วยเดียว

หมายถึง เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split-type) เครื่องปรับอากาศแบบติดหน้าต่าง (Window-type) และเครื่องปรับอากาศแบบเป็นชุด (Packaged Unit)

ค่าที่จำเป็นต้องตรวจวัด ได้แก่ ค่าทางไฟฟ้ารวมทั้งช่วงเวลาการตัดต่อของคอมเพรสเซอร์เพื่อตรวจสอบสภาพการทำงานของคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ของลมจ่าย และลมกลับรวมทั้งปริมาณลมจ่ายเพื่อคำนวณภาระการทำความเย็น และสมรรถนะการทำงานของระบบปรับอากาศซึ่งไม่ควรจะใช้พลังงานเกิน 1 กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น และค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าคอนเดนเซอร์และอากาศแวดล้อมภายนอก

นอกจากนี้ยังมีข้อมูลประกอบอื่นๆ ที่จำเป็น เช่น ชนิดของเทอร์โมสแตท สภาพของแผงกรองอากาศ เวลาใช้งาน

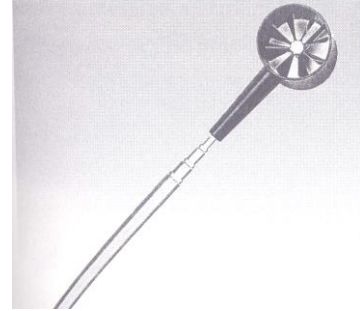
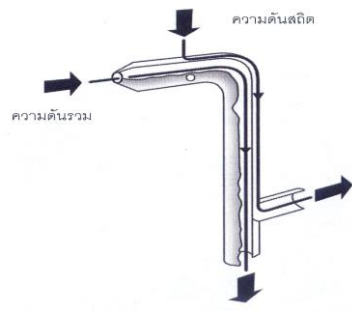
เครื่องมือตรวจวัดที่จำเป็น ได้แก่ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ และเครื่องวัดความเร็วลม

ตารางที่ 3.3 การตรวจวัดระบบปรับอากาศแบบหน่วยเดียว

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
ระบบปรับอากาศแบบหน่วยเดียว	■ ค่าทางไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ ■ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของลมจ่าย ■ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของลมกลับ ■ ความเร็วลม และพื้นที่ช่องจ่ายลมเย็น ■ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าคอนเดนเซอร์ ■ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมภายนอก	● เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า ● เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ● เครื่องวัดความเร็วลม



รูปที่ 3.37 เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์



(ก) หัววัดความเร็วลมแบบ Pilot Tube (ข) หัววัดความเร็วลมใบพัดความเร็วปานกลาง (ค) หัววัดความเร็วลมใบพัดความเร็วต่ำ



รูปที่ 3.38 เครื่องมือวัดความเร็วลม

■ ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ (Central System) มักจะประกอบด้วยเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ที่ติดตั้งอยู่ในห้องเครื่องศูนย์กลางทำหน้าที่ส่งจ่ายน้ำเย็นไปยังเครื่องส่งลมเย็น (AHU, Air Handling Unit และ FCU, Fan Coil Unit) ซึ่งจะติดตั้งกระจายอยู่ตามพื้นที่ปรับอากาศต่างๆ ซึ่งมี รายละเอียดการตรวจวัดดังนี้

1. เครื่องส่งลมเย็นค่าที่จำเป็นต้องตรวจวัดสำหรับเครื่องส่งลมเย็น ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของลมจ่าย (Supply Air) และลมกลับ (Return Air) รวมทั้งปริมาณลมจ่ายเพื่อคำนวณภาระการทำความเย็นค่าทางไฟฟ้าของพัดลมของเครื่องส่งลมเย็นความดันตกคร่อมแผงกรองอากาศเพื่อตรวจสอบสภาพการใช้งานด้านลมจ่าย และความดันตกคร่อมและอัตราการไหลในท่อน้ำเย็นเพื่อตรวจสอบสมดุลน้ำ นอกจากนี้ยังต้องรวบรวมข้อมูลประกอบอื่นๆ ที่จำเป็นเช่นเดียวกับระบบปรับอากาศแบบหน่วยเดียว เช่น ชนิดของเทอร์โมสแตท สภาพของแผงกรองอากาศ และเวลาใช้งาน

เครื่องมือตรวจวัดที่จำเป็น ได้แก่ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ เครื่องวัดความเร็วลม และเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในท่อ

ตารางที่ 3.4 การตรวจวัดเครื่องส่งลมเย็น

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
เครื่องส่งลมเย็น	■ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของลมจ่าย ■ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของลมกลับ ■ ความเร็วลม และพื้นที่ช่องจ่ายลมเย็น ■ ค่าทางไฟฟ้าของพัดลม ■ ความดันตกคร่อมแผงกรองอากาศ ■ ความดันตกคร่อมท่อน้ำเย็น ■ อัตราการไหลของน้ำเย็น	■ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า ■ เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ■ เครื่องวัดความเร็วลม ■ เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในท่อ ■ เกจวัดความดัน

- เครื่องทำน้ำเย็น

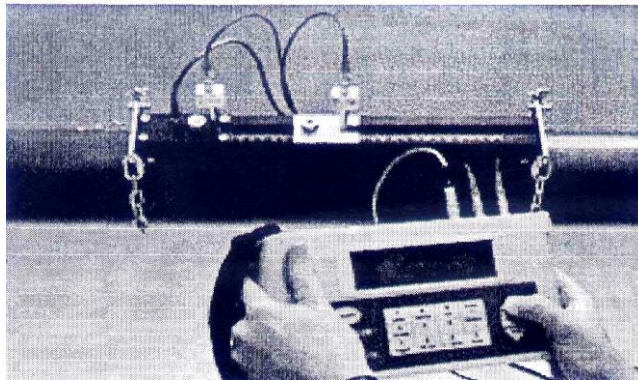
เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ใช้สำหรับผลิตน้ำเย็น ทั้งเพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ และใช้ในระบบการผลิตค่าที่จำเป็นต้องตรวจวัดสำหรับเครื่องทำน้ำเย็น ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเย็นและอุณหภูมิ น้ำเย็นด้านเข้า และด้านออกเพื่อคำนวณภาระการทำความเย็น อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นด้านเข้าและด้านออกเพื่อคำนวณอัตราการระบายความร้อนทั้งค่าทางไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์เพื่อใช้ประกอบกับภาระการทำความเย็นในการประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบซึ่งไม่ควรใช้พลังงานเกิน 0.7 กิโลวัตต์ต่อตันความเย็นสำหรับระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำและ 1.2 กิโลวัตต์ต่อตันความเย็นสำหรับระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศตลอดจนการสำรวจเวลาใช้งานของเครื่องทำน้ำเย็น

นอกจากนี้ ยังมีข้อมูลประกอบอื่นๆ ที่ควรตรวจวัดด้วย เช่น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ที่ปั๊มน้ำเย็นและปั๊มน้ำหล่อเย็น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ที่พัดลมระบายความร้อนทั้งที่คอนเดนเซอร์กรณีระบายความร้อนด้วยอากาศ และที่หอผึ่งน้ำกรณีระบายความร้อนด้วยน้ำ

เครื่องมือตรวจวัดที่จำเป็น ได้แก่ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในท่อ และเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส

ตารางที่ 3.5 การตรวจวัดเครื่องทำน้ำเย็น

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
เครื่องทำน้ำเย็น	● ค่าทางไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ ● อัตราการไหลของน้ำเย็น ● อุณหภูมิ น้ำเย็นด้านเข้า และด้านออก ● อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ● อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นด้านเข้า และด้านออก ● ค่าทางไฟฟ้าของเครื่องน้ำเย็นและเครื่องน้ำหล่อเย็น ● ค่าทางไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อน	● เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า ● เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส ● เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในท่อ



รูปที่ 3.39 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในท่อ (Ultrasonic Flow Meter)

■ ระบบแสงสว่าง

ค่าที่จำเป็นต้องสำรวจ และตรวจวัดสำหรับระบบแสงสว่าง ได้แก่ ชนิด และจำนวนของหลอดไฟ และโคมไฟในแต่ละพื้นที่ตลอดจนค่าทางไฟฟ้าเพื่อคำนวณดัชนีการใช้แสงสว่างซึ่งไม่ควรเกิน 16 วัตต์ต่อตารางเมตรสำหรับพื้นที่สำนักงานทั่วไปและ 23 วัตต์ต่อตารางเมตรสำหรับพื้นที่ทำงานที่ต้องการความสว่างมากขึ้น เช่น พื้นที่ตรวจสอบชิ้นงาน ค่าความส่องสว่าง (Lux) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของจำนวน และตำแหน่งของหลอดไฟ และโคมไฟเมื่อเทียบกับลักษณะการใช้งานของแต่ละพื้นที่ ซึ่งจำเป็นต้องวัดค่าความส่องสว่างในระดับความสูงเดียวกับพื้นที่ใช้งานจริง เช่น บนโต๊ะทำงาน หรือบน พื้นทางเดินภายในโรงงาน นอกจากนี้ยังต้องสำรวจเวลาใช้งานระบบแสงสว่างในแต่ละพื้นที่อีกด้วย

เครื่องมือตรวจวัดที่จำเป็น ได้แก่ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า และเครื่องวัดค่าความส่องสว่าง (Lux meter)

ตารางที่ 3.6 การตรวจวัดระบบแสงสว่าง

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
ระบบแสงสว่าง	- ค่าทางไฟฟ้าของระบบแสงสว่าง - ค่าความส่องสว่าง - ขนาดพื้นที่ของแต่ละส่วน	- เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า - เครื่องวัดค่าความส่องสว่าง (Lux Meter)



รูปที่ 3. 40 เครื่องมือวัดค่าความส่องสว่าง (Lux Meter)

■ ระบบอัดอากาศ

ค่าที่จำเป็นต้องตรวจวัดสำหรับระบบอัดอากาศ ได้แก่ ค่าทางไฟฟ้า ความดันของอากาศอัด อัตราการไหลของอากาศเข้ารวมทั้งอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศเข้าเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดอากาศทั้งที่เป็นอัตราการผลิตอากาศอัดที่ทำได้ (Free air delivery) และเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออากาศอัดที่ผลิตได้ซึ่งไม่ควรเกิน 0.111 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรนอกจากนี้ต้องมีการสำรวจจุดรั่วไหลของระบบส่งจ่ายอากาศอัดภายในโรงงาน และสำรวจเวลาการใช้งานเครื่องอัดอากาศ

สำหรับโรงงานที่มีช่วงเวลาที่สามารถหยุดระบบอัดอากาศได้จะทำให้การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ และการตรวจวัดปริมาณอากาศรั่วไหลในระบบทำได้อย่างแม่นยำขึ้น โดยการตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศสามารถทำได้โดยการจับเวลาที่ใช้ในการอัดอากาศเข้าถังเก็บอากาศจากถังเปล่าจนกระทั่งมีความดันเท่ากับค่าที่กำหนดรวมกับการตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศส่วนการตรวจวัดปริมาณอากาศรั่วไหลในระบบสามารถทำได้โดยการจับเวลาที่เครื่องเดินและหยุดระหว่างความดันสองระดับที่ตั้งไว้รวมกับการตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า

เครื่องมือตรวจวัดที่จำเป็น ได้แก่ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้น และนาฬิกาจับเวลา

ตารางที่ 3.7 การตรวจวัดระบบอัดอากาศ

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
ระบบอัดอากาศ	■ ค่าทางไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศ ■ ความเร็วลม และพื้นที่ของช่องอากาศเข้า ■ อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศเข้า ■ ช่วงเวลาการตัดต่อของเครื่องอัดอากาศ	■ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า ■ เครื่องวัดความเร็วลม ■ เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ■ นาฬิกาจับเวลา

■ ปั๊มน้ำ

ค่าที่จำเป็นต้องตรวจวัด ได้แก่ ค่าทางไฟฟ้า ความดันด้านส่ง และด้านดูดของปั๊มน้ำเพื่อใช้ตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของปั๊ม ความเร็วรอบมอเตอร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ตลอดจนการประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งเครื่องปรับลดความเร็วรอบเพื่อประหยัดพลังงานซึ่งต้องใช้ค่าที่ต้องตรวจวัดทั้งหมดมาประกอบกัน นอกจากนี้ ยังต้องสำรวจเวลาการทำงานของปั๊มน้ำอีกด้วย

เครื่องมือตรวจวัดที่จำเป็น ได้แก่ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า เครื่องวัดความเร็วรอบ และเกจวัดความดัน

ตารางที่ 3.8 การตรวจวัดปั๊มน้ำ

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
ปั๊มน้ำ	● ค่าทางไฟฟ้าของปั๊ม ● ความเร็วรอบมอเตอร์ ● ความดันด้านส่ง และด้านดูดของปั๊ม	● เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า ● เครื่องวัดความเร็วรอบ ● เกจวัดความดัน

■ มอเตอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่นๆ

ค่าที่จำเป็นต้องตรวจวัด ได้แก่ ค่าทางไฟฟ้าต่างๆ และช่วงเวลาการทำงาน ตลอดจนความเร็วรอบในกรณีของมอเตอร์ที่ต้องการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วย

เครื่องมือตรวจวัดที่จำเป็น ได้แก่ เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า และเครื่องวัดความเร็วรอบ

ตารางที่ 3.9 การตรวจวัดมอเตอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ระบบ	ค่าที่ตรวจวัด	เครื่องมือ
มอเตอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า	● ค่าทางไฟฟ้า ● ความเร็วรอบ กรณีเป็นมอเตอร์	● เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า ● เครื่องวัดความเร็วรอบ

3.5 ตัวอย่างการหาประสิทธิภาพจากการตรวจวัด

■ มอเตอร์ไฟฟ้า

การตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า สามารถตรวจวัดได้หลายวิธี แต่วิธีที่สามารถนำมาใช้เพื่อหาประสิทธิภาพขณะเริ่มต้น ก็คือการวัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะไม่มีการจะทำให้ทราบการสูญเสียขณะไม่มีการ (core loss or no-load loss) และวัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ขณะมีการจะทำให้ทราบกำลังไฟฟ้าที่ใช้งาน (input power: P_{in}) ซึ่งจะรวมการสูญเสียทั้งหมดเช่น การสูญเสียที่ขดลวด (stator copper loss) ประมาณ 33% การสูญเสียที่แกนเหล็ก (core loss or rotor copper loss) ประมาณ 15% ดังนั้นประสิทธิภาพที่ได้คือ

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ, \%} &= \frac{746 \times \text{แรงม้า (เฮิร์ตซ์)}}{\text{วัตต์ (อินพุต)}} \times 100 \\ &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้าขาออก}(P_{out})}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อน}(P_{in})} \times 100 \end{aligned}$$

ค่าประสิทธิภาพอาจเขียนอยู่ในรูปที่แสดงค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ด้วยก็ได้ ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ, \%} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า} - \text{กำลังสูญเสีย}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า}} \times 100$$

กำลังไฟฟ้าขาออก (P_{out}) เป็นกำลังที่สามารถทดสอบจากความสามารถในการขับภาระของมอเตอร์ซึ่งปกติเป็นกำลังทางกลแล้วแปลงค่ามาเป็นทางไฟฟ้าเพื่อให้่ายต่อการคำนวณ

$$\text{กำลังไฟฟ้าขาออก} = \text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อน} - \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่โรเตอร์และสเตเตอร์}$$

ตัวอย่างที่ 3.1 พิจารณาถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น 1 % เช่นจาก 94 % เป็น 95 % ของมอเตอร์ขนาด 500 แรงม้า ทำงานที่ 80 % ของพิกัดกำลังจะทำให้มอเตอร์กินกำลังไฟฟ้าลดลงเท่าใด

วิธีทำ

กำลังไฟฟ้า ที่มอเตอร์ประสิทธิภาพ 94 % ต้องการ

$$= 0.746 \times 500 \times \frac{0.8}{0.94}$$

$$= 317.45 \text{ kW}$$

กำลังไฟฟ้า ที่มอเตอร์ประสิทธิภาพ 95 % ต้องการ

$$= 0.746 \times 500 \times \frac{0.8}{0.95}$$

$$= 314.11 \text{ kW}$$

โดยกำหนดให้ 746 W เท่ากับ 1 แรงม้า

ดังนั้นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ 95% จะกินกำลังไฟฟ้าน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าที่มี ประสิทธิภาพ 94% เป็นจำนวนเท่ากับ

$$= 317.45 - 314.11 = 3.34 \text{ kW}$$

ถ้ามอเตอร์ทำงานในลักษณะที่ต่อเนื่องทุกวัน วันละ 24 ชั่วโมง ตลอดปีประมาณ $365 \times 24 = 8760$ ชั่วโมง แต่ถ้ามอเตอร์ทำงานในลักษณะที่ต่อเนื่องเป็นช่วงๆ ซึ่งชั่วโมงการทำงานจะลดลง เช่น ประมาณ 6000 ชั่วโมงใน 1 ปี และคิดค่าไฟฟ้าที่ 2.75 บาท ต่อ kWh ก็จะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้จากค่าประสิทธิภาพที่ เพิ่มขึ้น 1 % ได้เท่ากับ

$$= 3.34 \times 6,000 \times 2.75 = 55,110 \text{ บาทต่อปี}$$

ซึ่งในการใช้งานจริง ๆ นั้น นอกจากค่ากำลังไฟฟ้าที่ผู้ประกอบการต้องชำระแล้วผู้ประกอบการยังต้อง ชำระค่ากำลังไฟฟ้า (Demand) ให้กับทางโรงไฟฟ้าด้วย ดังนั้นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้จะมีค่ามากกว่าตัวเลขที่ คำนวณได้

ตัวอย่างที่ 3.2 การตรวจวัดหาเพื่อวิเคราะห์หาสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟสพิจารณามอเตอร์ขับปั๊มน้ำขนาด 220 โวลต์ 1500 วัตต์ 1 เฟส วัดค่าความต้านทานของขดลวดได้ 2.8 และทำการวัดกำลังไฟฟ้าได้ข้อมูลดังนี้

ขณะไม่มีภาระ กระแส 0.8 A แรงดัน 221 V ค่า PF เท่ากับ 0.76

ขณะใช้งาน กระแส 4.58 A แรงดัน 221 V ค่า PF เท่ากับ 0.8

ดังนั้นสามารถคำนวณหาสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์ได้คือ

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ขณะใช้งาน} \quad 4.58 \times 221 \times 0.8 = 809.7 \text{ วัตต์}$$

$$\text{สมรรถนะการทำงาน} \quad \frac{809.7}{1500} \times 100 = 53.98 \%$$

ที่สมรรถนะการทำงาน 53.98 % มอเตอร์มีประสิทธิภาพดังนี้

$$\begin{aligned} h &= \frac{P_{in} - P_{noload} - P_{copper} - load}{P_{in}} \times 100 \\ &= \frac{211 \times 4.5 \times 0.8 - 211 \times 0.8 \times 0.76 - 4.58^2 \times 2.8}{211 \times 4.58 \times 0.8} \times 100 \\ &= 76.15 \% \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 3.3 การตรวจวัดหาเพื่อวิเคราะห์หาสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 5 HP 380 โวลต์ 3 เฟส วัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ได้ 1.21 และทำการวัดกำลังไฟฟ้าได้ข้อมูลดังนี้

กำลังไฟฟ้าขณะไม่มีภาระ 290 W กระแสไฟฟ้า 0.68 A, 380 V, PF 0.65

กำลังไฟฟ้าขณะใช้งาน 3692 W กระแสไฟฟ้า 6.6 A, 380 V, PF 0.85

ดังนั้นสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์คือ

$$\text{สมรรถนะการทำงาน} = \frac{3692}{3730} \times 100 = 98.99 \%$$

โดยมีประสิทธิภาพ

$$\begin{aligned} h &= \frac{P_{in} - P_{noload} - P_{copper} - load}{P_{in}} \times 100 \\ &= \frac{3692 - 290 - 3 \times 6.6^2 \times 1.21}{3692} \times 100 \\ &= 87.86 \% \end{aligned}$$

หมายเหตุ กำลังไฟฟ้าสูญเสียสามารถคำนวณได้จากค่ากระแส แรงดันและ PF

■ ระบบเครื่องทำความเย็น

ประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็นวัดจากค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น (Coefficient of Performance ; COP) ซึ่งหาได้จาก

$$\text{COP} = \frac{\text{ความร้อนถ่ายเทที่อีแวปโปเรเตอร์}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์}}$$

$$\text{COP} = \frac{h1 - h4}{h2 - h1}$$

โดย h คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น หาได้จากแผนภูมิความดัน เอนทาลปี (P-H diagram)

h1 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์

h2 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากคอมเพรสเซอร์

h4 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นก่อนเข้าอีแวปโปเรเตอร์

ค่า COP ที่สูงแสดงว่าเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพทำงานดี

ดัชนีการใช้พลังงาน

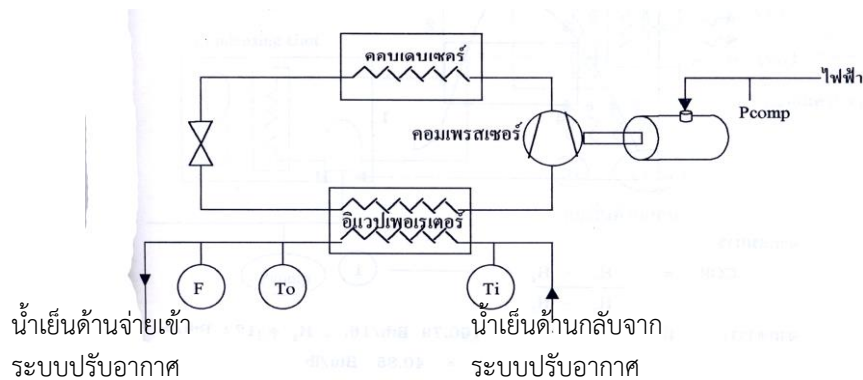
นอกจาก COP แล้วมักนิยมใช้ค่าดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องทำความเย็น ซึ่งเรียกว่าค่าสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น (Chiller Performance ; Chp)

$$\text{Chp} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์ (กิโลวัตต์)}}{\text{ความสามารถในการทำความเย็น (ตันทำความเย็น)}}$$

$$\text{Chp} = \frac{\text{Pcomp} \times 50.4}{F \times (T_i - T_o)}$$

$$\text{COP} = 3.517 / \text{Chp} \quad \text{หรือ} \quad \text{Chp} = 3.517 / \text{COP}$$

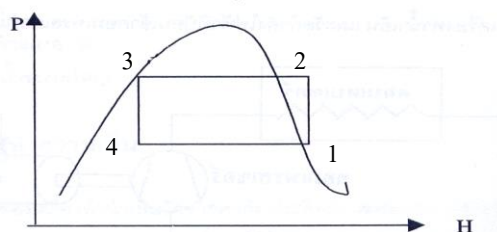
โดย	Pcomp	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์ (กิโลวัตต์)
	F	คือ	อัตราการไหลของน้ำเย็น (ลิตร / นาที)
	Ti	คือ	อุณหภูมิน้ำเย็น ด้านกลับเข้าเครื่องทำความเย็น (°C)
	To	คือ	อุณหภูมิน้ำเย็น ด้านจ่ายออกจากเครื่องทำความเย็น (°C)



รูปที่ 3.41 ตำแหน่งการวัดของระบบทำความเย็น

ในการตรวจวัดทางปฏิบัติเครื่องทำความเย็นบางระบบอาจไม่มีการวัดความดันหรืออุณหภูมิของสารทำความเย็นที่จะสามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพหรือดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องทำความเย็นได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจวัดที่ระบบท่อน้ำเย็นที่เข้า - ออกจากเครื่องทำความเย็น และวัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์

ตัวอย่างที่ 3.3 การคำนวณประสิทธิภาพ และดัชนีการใช้พลังงานระบบทำความเย็นโดยเครื่องทำความเย็นเป็นแบบหอยโข่งขนาด 500 ตัน โหลดทางไฟฟ้าที่วัดได้ 244.87 กิโลวัตต์ 380 โวลต์ 400 แอมป์ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.93 อุณหภูมิ และความดันของสารทำความเย็นที่อีแวปโปเรเตอร์ 38 °F , 66 PSI และที่คอมเพรสเซอร์ 105 °F , 210 PSI



รูปที่ 3.42 กราฟแสดงของสารทำความเย็น

$$\text{จาก } COP = \frac{h1 - h4}{h2 - h1}$$

จากตาราง R-22 ได้ค่า $h1 = 100.79 \text{ Btu/lb}$, $h2 = 122 \text{ Btu/lb}$, $h3 = h4 = 40.85 \text{ Btu/lb}$

$$\text{ดังนั้น } COP = \frac{100.79 - 40.85}{122 - 100.79} = 2.83$$

$$\text{จาก } Chp = 3.517 / COP$$

$$\text{ดังนั้น } Chp = 3.517 / 2.83 = 1.24 \text{ kW / tonR}$$

ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy Efficiency Ratio: EER)

ค่า EER คืออัตราส่วนระหว่างความสามารถให้ความเย็นของเครื่องปรับอากาศ (BTU/hr) ต่อกำลังไฟฟ้า (Watt) ที่เครื่องปรับอากาศใช้ มีหน่วยเป็น Btu/hr/W ดังนั้นถ้าจะซื้อเครื่องปรับอากาศใหม่ควรเลือกเครื่องที่มีค่า EER สูงจะทำให้ได้รับความเย็นเท่ากันแต่เสียเงินค่าไฟฟ้าน้อยกว่าหรือในทางกลับกันหากจ่ายค่าไฟฟ้าเท่ากันก็จะได้รับความเย็นมากกว่าจากเครื่องที่มีค่า EER สูงนั่นเอง

การหาค่า EER สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ} = \frac{\text{ปริมาณความเย็นของเครื่อง (Btu/hr)}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (Watt)}}$$

ตัวอย่าง 3.4 เครื่องปรับอากาศขนาด 12,000 บีทียูต่อชั่วโมง ใช้กำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{12,000 \text{ Btu/hr}}{1,200 \text{ W}} = 10 \text{ Btu/hr/W}$$

หรือหมายถึงการใช้กำลังไฟฟ้า 1 วัตต์ ได้ความเย็น 10 บีทียู/ชม.

ดังนั้น ค่า EER ยิ่งสูงแสดงว่าใช้กำลังไฟฟ้า 1 วัตต์ แต่ให้ความเย็นมากขึ้นไปอีก

ตารางที่ 2.10 แสดงถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานของเครื่องปรับอากาศที่นิยมใช้ในบ้านอยู่อาศัย

ตารางที่ 2.10 ระดับของค่า EER ของเครื่องปรับอากาศชนิดต่าง ๆ

ระดับค่า EER หน่วย : บีทียู/ชม./วัตต์	เครื่องปรับอากาศ		
	ชนิดติดตั้งต่าง	ชนิดแยกส่วนแบบติดตั้งผนัง	ชนิดแยกส่วนแบบตั้งพื้น
	ขนาดตั้งแต่ 9,000 – 24,000 บีทียู/ชม.	ขนาดตั้งแต่ 8,000 – 24,000 บีทียู/ชม.	ขนาดตั้งแต่ 12,000 – 36,000 บีทียู/ชม.
มีประสิทธิภาพสูง	9 - 10	10 - 13	9 - 11
มีประสิทธิภาพปานกลาง	8 - 9	8 - 10	8 - 9
มีประสิทธิภาพต่ำ	7.5 - 8	7.5 - 8	6 - 8

ในช่วงปี พ.ศ. 2539-2548 (ค.ศ. 1996 – 2005) สำนักงานจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้จำแนกประสิทธิภาพด้านพลังงาน ออกเป็น 5 ระดับ คือ

- ระดับที่ 5 เป็นระดับประสิทธิภาพดีมาก EER ตั้งแต่ 10.6 ขึ้นไป
- ระดับที่ 4 เป็นระดับประสิทธิภาพดี EER ตั้งแต่ 9.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 10.6
- ระดับที่ 3 เป็นระดับประสิทธิภาพปานกลาง EER ตั้งแต่ 8.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 9.6
- ระดับที่ 2 เป็นระดับประสิทธิภาพพอใช้ EER ตั้งแต่ 7.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 8.6
- ระดับที่ 1 เป็นระดับประสิทธิภาพต่ำ EER ต่ำกว่า 7.6

จะเห็นว่า ระดับที่ 5 เป็นระดับที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานดีที่สุด ดังนั้นจึงมีการทำฉลากแสดงระดับประสิทธิภาพดังกล่าวติดบนเครื่องใช้ไฟฟ้าที่วางจำหน่ายทั่วไป เพื่อเป็นข้อมูลให้ผู้ใช้ทราบ



รูปที่ 2.43 ฉลากแสดงระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแบบเดิม

ในช่วงปี พ.ศ. 2549 (ค.ศ. 2006) ได้มีการดำเนินนโยบายประหยัดและอนุรักษ์พลังงานโดยโครงการฉลากอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน ได้ปรับปรุงสัญลักษณ์ของฉลากประหยัดไฟฟ้าเบอร์ 5 เดิมมาเป็นฉลากรูปแบบใหม่ให้มีตราสัญลักษณ์ของกระทรวงพลังงานเป็นพื้นหลัง และแสดงข้อมูลภายในฉลากแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Energy Efficiency Ratio: EER) ข้อมูลที่แสดงถึงปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นๆ ในแต่ละปี และข้อมูลที่แสดงถึงจำนวนค่าใช้ไฟฟ้าในแต่ละปี เพื่อให้ประชาชนสามารถนำข้อมูลจากฉลากประหยัดพลังงานนี้ประกอบการเลือกซื้อเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และได้จำแนกประสิทธิภาพด้านพลังงาน ออกเป็น 5 ระดับ คือ

- ระดับที่ 5 เป็นระดับประสิทธิภาพดีมาก EER ตั้งแต่ 11.6 ขึ้นไป
- ระดับที่ 4 เป็นระดับประสิทธิภาพดี EER ตั้งแต่ 10.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 11.6
- ระดับที่ 3 เป็นระดับประสิทธิภาพปานกลาง EER ตั้งแต่ 9.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 10.6
- ระดับที่ 2 เป็นระดับประสิทธิภาพพอใช้ EER ตั้งแต่ 8.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 9.6
- ระดับที่ 1 เป็นระดับประสิทธิภาพต่ำ EER ต่ำกว่า 8.6



รูปที่ 2.44 ฉลากแสดงระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแบบใหม่

ระบบเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

ประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนจะวัดจากค่า EER หรือ Energy Efficiency Ratio)

$$EER = \frac{\text{อัตราการทำความเย็น (บีทียู / ชั่วโมง)}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์ (กิโลวัตต์)}}$$

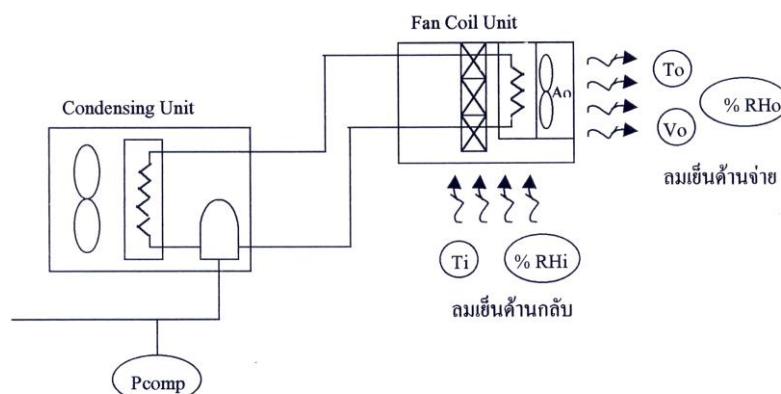
$$EER = \frac{4.5 \times A_o \times V_o \times (h_1 - h_0)}{P_{comp}}$$

โดย P_{comp} คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์ (กิโลวัตต์)
 A_o คือ พื้นที่ของด้านจ่ายลมของ Fan Coil Unit (ตารางฟุต)
 V_o คือ ความเร็วของลมเย็นด้านจ่าย (ฟุต / นาที)
 h_o คือ เอนทาลปีของลมเย็นด้านจ่ายออก

(หาได้จาก Psychrometric Chart โดยวัดอุณหภูมิ T_0 และเปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ % R_h0)

h_1 คือ เอนทาลปีของลมเย็นที่กลับสู่ Fan Coil Unit

(หาได้จาก Psychrometric Chart โดยวัดอุณหภูมิ T_1 และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ % R_h1)



รูปที่ 3.45 แสดงตำแหน่งการวัดของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

การตรวจวัดจะวัดที่ลมเย็นด้านจ่าย และด้านกลับของเครื่องที่ Fan Coil Unit และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์ที่ Condensing Unit

ตัวอย่างที่ 3.5 การคำนวณหาประสิทธิภาพและดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศแยกส่วนโดยเครื่องปรับอากาศมีขนาด 38,000 Btu / hr กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 3.68 กิโลวัตต์ พื้นที่ด้านลมจ่ายของ Fan Coil Unit 1.59 ตารางฟุต ความเร็วของลมด้านจ่าย 656.33 ฟุตต่ออนาที

อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ด้านลมจ่าย 54.68 °F , 88.4 % และ Enthalpy (h_o) = 21.8 Btu/lb
อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ด้านลมกลับ 75.2 °F , 51.0 % และ Enthalpy (h₁) = 28.52 Btu/lb

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \text{EER} &= \frac{4.5 \times A_o \times V_o \times (h_1 - h_o)}{P_{\text{comp}}} \\ \text{EER} &= \frac{4.5 \times 1.59 \times 656.33 \times (28.52 - 21.8)}{3.68 \times 1000} \\ &= 8.58 \text{ Btu / hr - W} \end{aligned}$$

$$\text{จาก} \quad \text{EER} = 3.412 \times \text{COP}$$

$$\text{จะได้} \quad \text{Chp} = 3.517 / \text{COP} = \frac{3.517 \times 3.412}{\text{EER}}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{Chp} = \frac{3.517 \times 3.412}{8.58} = 1.39 \text{ Btu / TonR}$$

■ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

การตรวจวัดเพื่อหาประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าแสงสว่าง จะหาโดยใช้กำลังไฟฟ้าติดตั้งทั้งหมด (รวมหลอดไฟ และอุปกรณ์ประกอบ เช่น บัลลาสต์) ต่อพื้นที่ใช้งาน โดยมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร

ตัวอย่างที่ 3.6 การคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าแสงสว่าง โดยอาคารแห่งหนึ่งมีการใช้ระบบแสงสว่างดังนี้

ลำดับ	ชนิดของหลอด	ขนาด (วัตต์)	จำนวน (หลอด)	รวม(วัตต์)	ballast loss (วัตต์)	โหลตรวม(วัตต์)
1	อินแคนเดสเซนต์	60	461	27,600	-	27,600
2	อินแคนเดสเซนต์	100	167	16,700	-	16,700
3	จำปา	40	298	11,920	-	11,920
4	คอมแพคฟลูออเรสเซนต์	7	951	6,657	5420.7	12077.70
5	ฮาโลเจน	20	255	5,100	-	5,100
6	ฮาโลเจน	50	789	39,450	-	39,450
7	ฮาโลเจน	100	25	2,500	-	2,500
8	ฮาโลเจน	150	5	750	-	750
9	ฮาโลเจน	200	33	6,600	-	6,600
10	ฮาโลเจน	300	1	300	-	300
11	ฟลูออเรสเซนต์	18	265	4,770	2,650	7,420
12	ฟลูออเรสเซนต์	36	1,991	71,676	19,910	91,586
	รวม		5,241	194,083	27,980.7	222,063.7

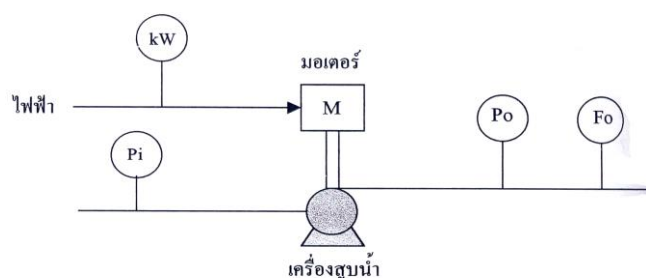
พื้นที่การใช้งานทั้งหมด 27,106.28 ตารางเมตร

$$\text{จาก ประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าแสงสว่าง} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าติดตั้งทั้งหมด}}{\text{พื้นที่ใช้งาน}}$$

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าแสงสว่าง} &= \frac{222,063.7}{27,106.28} \\ &= 8.19 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

ปั๊มน้ำ

ประสิทธิภาพรวมของปั๊มน้ำหาได้จาก



รูปที่ 3.46 ตำแหน่งการตรวจวัดของปั๊ม

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{งานที่ได้จากปั๊มน้ำ} \times 100 \%}{\text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{0.746 \times F_o \times (P_o - P_i) \times 100 \%}{3,960 \times \text{kW}}$$

โดยที่	F_o	คือ	อัตราการไหลของน้ำ (gal/min)
	$P_o - P_i$	คือ	เฮดของปั๊มน้ำ (ฟุตน้ำ)
	kW	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ (กิโลวัตต์)

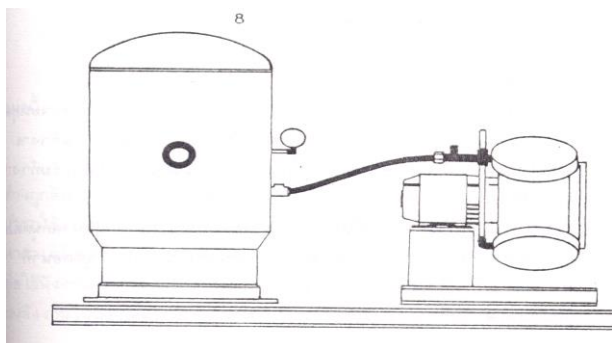
ตัวอย่างที่ 3.7 การคำนวณหาประสิทธิภาพรวมของปั๊มน้ำและมอเตอร์โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ปั๊มน้ำมีค่า 250 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของน้ำ (F_o) 100 gal/min เฮดของปั๊มน้ำ ($P_o - P_i$) 8 ฟุตน้ำ

จาก

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{0.746 \times F_o \times (P_o - P_i) \times 100 \%}{3,960 \times \text{kW}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{0.746 \times 100 \times 8 \times 100 \%}{3,960 \times 250} = 60.28 \%$$

■ การหาประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ



รูปที่ 3.47 เครื่องอัดอากาศ

ถ้ามีเครื่องอัดอากาศได้ความดัน 1 bar หรือ 700 kPa และ F.A.D 1000 ลิตร/นาที โดยปกติ เครื่องอัดอากาศ ใช้เวลา 8 นาที อัดได้ 7 bar หรือ 700 kPa

ดังนั้น Actual $\frac{1000}{8} = 125$ ลิตร / นาที

เมื่อใช้งานจริงใช้เวลาอัด 10 นาที จึงจะได้ 7 bar หรือ 700 kPa

ดังนั้น อัดได้จริง $\frac{1000}{10} = 100$ ลิตร / นาที

ถ้าประสิทธิภาพเดิมของเครื่องอัดอากาศ 125 ลิตร / นาที เมื่อใช้งานอัดได้ จริง 100 ลิตร / นาที

ดังนั้น เครื่องอัดอากาศมีประสิทธิภาพ $\frac{100}{125} \times 100 = 80 \%$

3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ผลข้อมูล (Gathering and analyzing data)

ในขั้นต้นจะต้องมีการตรวจสอบประเภทของข้อมูลที่สามารถ หาได้ ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจาก โรงงานหรืออาคารหนึ่งๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงข้อจำกัดของปริมาณข้อมูลพลังงานที่มีอยู่ในหลาย กรณี อาจทราบได้ในขั้นต้นว่าไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะให้ภาพรวมของสมรรถนะการใช้พลังงานของโรงงานได้ โดยทั่วไปอาจหาข้อมูลได้จากมิเตอร์ตามจุดต่างๆ ของโรงงานหรือจากใบเสร็จรับเงินค่าพลังงานต่างๆ

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานจะสามารถรวบรวมได้จาก :

- ใบเสร็จรับเงินค่าไฟฟ้า เชื้อเพลิง น้ำ การจำกัดของเสีย
- บันทึกข้อมูลการผลิต
- บันทึกข้อมูลการทำงาน
- มิเตอร์และมิเตอร์ย่อยที่มีอยู่

โดยทั่วไปใบเสร็จรับเงินค่าไฟฟ้าและเชื้อเพลิง จะมีข้อมูลปริมาณการใช้พลังงาน อย่างหยาบๆ ของ กิจกรรมหนึ่งๆ

ข้อดี ของใบเสร็จรับเงินเหล่านี้ คือข้อมูลจะถูกเก็บรวบรวมอย่างสม่ำเสมอ และจะสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณการใช้พลังงานโดยรวมของโรงงานหรืออาคารได้โดยตรง

ข้อเสีย ของใบเสร็จรับเงินค่าเชื้อเพลิงต่างๆ คือ จะแสดงการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมดของโรงงานหรืออาคารแต่จะไม่แสดงการทำงานของกระบวนการที่ใช้พลังงานหลัก นอกจากนี้ ยังแสดงการใช้พลังงานในแต่ละช่วงเวลา โดยไม่คำนึงถึงปริมาณที่ผลิตได้ ซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณหาดัชนีการใช้พลังงาน หรือหาตำแหน่งการใช้พลังงาน หรือวิธีการที่ใช้พลังงานได้

ใบเสร็จรับเงินของเชื้อเพลิงที่จัดเก็บได้ ได้แก่ น้ำมันเตา ถ่านหิน จะไม่แสดงถึงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจริง เนื่องจากมีปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลือจากการใช้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ประกอบกับข้อมูลปริมาณเชื้อเพลิงที่จัดเก็บ เพื่อหาปริมาณการใช้จริงในแต่ละช่วงเวลา

ข้อมูลการผลิต และการทำงานของโรงงานหรืออาคารในแต่ละช่วงเวลาที่ถูกต้องจะเป็นสิ่งสำคัญมากในการที่จะประเมินสมรรถนะการใช้พลังงานจากการวัดพลังงานต่างๆ โดยข้อมูลการผลิตนี้จะต้องถูกเก็บรวบรวมจากช่วงเวลาเดียวกันกับข้อมูลปริมาณการใช้พลังงาน

ตัวอย่างที่ 3.8 โรงงานกระดาษผลิตกระดาษได้ 21,440 ตัน จากสายการผลิตหนึ่งระหว่างเดือนเมษายน และกรกฎาคม 2539 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าระหว่างเดือนเมษายน และมิถุนายน 2540 เท่ากับ 3,681,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ท่านสามารถคำนวณดัชนีการใช้พลังงานเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันของกระดาษที่ผลิตจากโรงงานนี้ได้หรือไม่

อาจหาคำตอบไม่ได้ง่ายนัก เพราะช่วงเวลาเป็นคนละช่วงกัน และจะต้องตั้งสมมติฐานที่อาจไม่สามารถหาเหตุผลสนับสนุนได้

แต่ถ้าทราบปริมาณการใช้ไฟฟ้าระหว่างเดือนเมษายนและกรกฎาคม 2539 ว่ามีค่าเท่ากับ 4,241,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ก็สามารถคำนวณดัชนีการใช้พลังงานของโรงงานกระดาษแห่งนี้ได้ เท่ากับ 197.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันของกระดาษที่ผลิตได้

ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากโรงงานจำเป็นต้องเก็บรวบรวมข้อมูลการผลิตที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้น ข้อมูลของทั้งผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย และของเสียที่ได้จะเป็นสิ่งจำเป็นในการประเมินสมรรถนะการใช้พลังงาน

ตัวอย่างเช่น ในโรงงานกระดาษเราจะสามารถใช้ปริมาณพลังงานที่ใช้เทียบกับต้นของผลิตภัณฑ์กระดาษที่ผลิตได้ หรือต้นของเยื่อกระดาษที่ใช้โดยที่ของเสียจากโรงงานและประสิทธิภาพของโรงงานจะมีผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพพลังงาน

ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานจะต้องเป็นผู้กำหนดหน่วยการผลิตที่จะใช้ในการหาดัชนีการใช้พลังงาน ซึ่งโดยทั่วไปมักจะใช้จำนวนตันของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายในกรณีที่ของเสียไม่ใช่ปัญหาหรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการการใช้พลังงาน

ในกรณีของอาคารจำเป็นต้องเก็บรวบรวมข้อมูลที่แสดงถึงการใช้งานของอาคารเพื่อนำมาประเมินสมรรถนะการใช้พลังงานของอาคารได้อย่างถูกต้อง

ตัวอย่างที่ 3.9 ในการประเมินการใช้พลังงานของโรงพยาบาลจะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวนเตียงคนไข้ จำนวนคนไข้ใน จำนวนคนไข้นอกในแต่ละเดือน เพื่อนำมาหาดัชนีการใช้พลังงานในหน่วยของกิโลวัตต์-ชั่วโมง/เตียง-วัน

ส่วนในการประเมินการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศของอาคาร จะต้องทราบถึงพื้นที่ปรับอากาศ เพื่อนำมาคำนวณดัชนีการใช้พลังงานในหน่วยของกิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/เดือน ซึ่งสะท้อนถึงการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศได้อย่างถูกต้อง

ในบางโรงงานจะมีมิเตอร์ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจติดตามการใช้พลังงานได้ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปมิเตอร์เหล่านี้จะไม่ได้ถูกติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมการตรวจวัดการใช้พลังงานแต่จะใช้เพื่อช่วยในการทำงาน หรือโดยบริษัทผู้จำหน่ายพลังงาน ดังนั้น จึงต้องคิดว่าเสมอว่ามีเตอร์เหล่านี้อาจไม่อยู่ในตำแหน่งที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจวัดการใช้พลังงาน

การกำหนดตำแหน่งของมิเตอร์ในโรงงานจะอยู่นอกขอบเขตของเนื้อหาวิชาอย่างไรก็ตามสำหรับการเริ่มต้นการติดตั้งที่เหมาะสมของมิเตอร์เชื้อเพลิงหรือไฟฟ้าควรจะอยู่ในตำแหน่งก่อนกระบวนการที่มีการใช้พลังงานหลัก และควรจะมีความยาวการวัดและความละเอียดที่จะบันทึกตัวเลขปริมาณการใช้ได้อย่างแม่นยำในสภาวะการใช้งานต่างๆ

สำหรับมิเตอร์ต่างๆ ในโรงงานหรืออาคารเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทราบ :

- ตำแหน่งของมิเตอร์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับส่วนการใช้พลังงานต่างๆ
- ย่านการวัดและความแม่นยำของมิเตอร์ทั้งหมด
- อายุและสภาพของมิเตอร์ทั้งหมด
- ความถี่ในการสอบเทียบมิเตอร์
- ความถี่ที่มิเตอร์ควรได้รับการสอบเทียบ
- เหตุผลในการติดตั้งมิเตอร์

การวัดการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ :

- ความยากง่ายในการวัด
- ทรัพยากรที่มีอยู่สำหรับการวัด
- การให้ความสำคัญของผู้บริหารระดับสูงของโรงงานในการพิจารณาปริมาณการใช้พลังงาน

ปัจจัยทั้งสามนี้มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ค่าใช้จ่ายพลังงานเป็นเพียงส่วนน้อยของจำนวนเงินในการดำเนินธุรกิจทั้งหมดจะไม่สมควรที่จะกำหนดให้การวัดการใช้พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการบริหารโรงงานซึ่งในกรณีนี้จะมีการจัดสรรทรัพยากรที่จำกัดมากๆ สำหรับใช้ในการวัดการใช้พลังงาน เช่น ในอุตสาหกรรมยา ซึ่งมีค่าใช้จ่ายพลังงานน้อยกว่า 2% ของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งหมด

คำถาม : ท่านควรอ่านข้อมูลจากมิเตอร์บ่อยแค่ไหน?

ความถี่ของการอ่านข้อมูลจากมิเตอร์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มากมาย ได้แก่

- ตารางการผลิตควรเก็บค่าการวัดที่จุดเริ่มต้น และภายในช่วงเวลาการผลิตมากกว่านอกช่วงเวลาการผลิต
- ช่วงเวลาของการเรียกเก็บค่าพลังงานเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องให้การอ่านค่าการวัดมิเตอร์ทั้งหมดตรงกับช่วงเวลาการเรียกเก็บเงินของบริษัทผู้จำหน่ายพลังงานซึ่งวิธีนี้จะทำให้ตรวจสอบความถูกต้องของใบเรียกเก็บเงินได้ และสามารถพร้อมที่จะวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา
- ปริมาณการใช้ที่วัดได้โดยมิเตอร์กรณีที่กระบวนการมีการใช้พลังงานเป็นสัดส่วนที่น้อยจะสามารถลดความถี่ในการอ่านค่าการวัดจากมิเตอร์นั้นได้

การแปลงข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานให้เป็นหน่วยมาตรฐานเดียวกันเป็นสิ่งจำเป็นในกรณีที่มีการใช้พลังงานหรือเชื้อเพลิงมากกว่าหนึ่งประเภท ซึ่งจะทำให้สามารถ

- หาปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดได้
- เปรียบเทียบกับมาตรฐานทั่วไปของอุตสาหกรรมหรืออาคารประเภทเดียวกัน

โดยปกติการวัดพลังงานไฟฟ้าจะใช้หน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง สำหรับพลังงานความร้อนหรือการใช้เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ หน่วยที่นิยมใช้ทั่วไปก็คือ หน่วยเมกะจูล

ในการหาปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดของโรงงานหรืออาคาร โดยทั่วไปจะแปลงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนทั้งหมดเป็นหน่วย เมกะจูลหรือกิกะจูล

ตารางที่ 3.11 ตัวอย่างตารางแปลงหน่วยการใช้พลังงานประเภทต่างๆ เป็นหน่วยเมกะจูล

ประเภทของพลังงาน/เชื้อเพลิง	ตัวแปลงหน่วย
ก๊าซธรรมชาติ	1.04 เมกะจูล/ลบ.ฟุตมาตรฐาน
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	26.62 เมกะจูล/ลิตร
เคโรซีน (น้ำมันก๊าด)	34.53 เมกะจูล/ลิตร
ดีเซล	36.42 เมกะจูล/ลิตร
น้ำมันเตา	39.77 เมกะจูล/ลิตร
ไฟฟ้า	3.60 เมกะจูล/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
ลิกไนต์ (กระบี่)	10.88 เมกะจูล/กิโลกรัม
ถ่านไม้	28.88 เมกะจูล/กิโลกรัม

ตารางที่ 3.12 ตัวอย่างการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานประเภทต่างๆ และแปลงเป็นหน่วยมาตรฐานเพื่อคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมด

ประเภทของพลังงาน/ เชื้อเพลิง	วันเริ่มต้น	วันสิ้นสุด	ปริมาณการใช้	หน่วย	ตัวแปลงหน่วย	ปริมาณพลังงานที่ใช้ (เมกะจูล)
ก๊าซธรรมชาติ				ลบ.ฟุต มาตรฐาน	1.04	
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว				ลิตร	26.62	
เคโรซีน				ลิตร	34.53	
ดีเซล	01/01/98	31/01/98	4,580	ลิตร	36.42	166,804
น้ำมันเตา	01/01/98	31/01/98	743,527	ลิตร	39.77	29,570,069
ลิกไนต์	01/01/98	31/01/98	9,261	กิโลกรัม	10.88	100,760
ถ่านไม้				กิโลกรัม	28.88	
ไฟฟ้า	01/01/98	31/01/98	95,000	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	3.60	342,000
					รวม (เมกะจูล)	30,179,632

3.7 การใช้กราฟช่วยในการวิเคราะห์แนวโน้มประสิทธิภาพพลังงาน (Analysis trend of energy efficiency using graph)

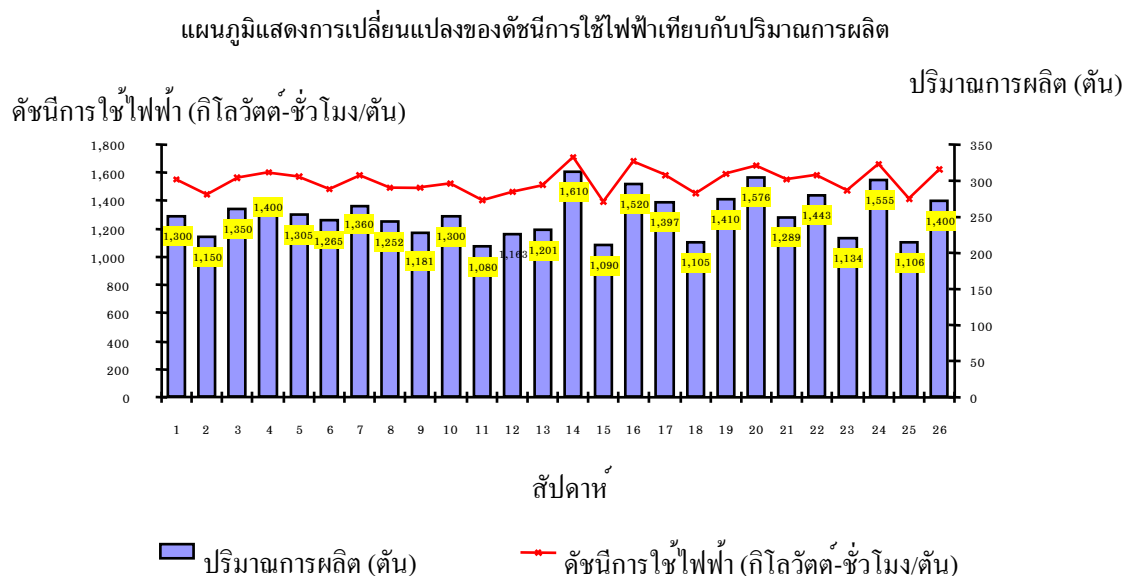
การใช้รูปแบบต่างๆ ในการวิเคราะห์ และนำเสนอข้อมูลจะเป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการประเมินผลจากข้อมูล วิธีการต่างๆ สามารถใช้ในการให้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพพลังงานต่อเวลา และสามารถใช้ในการคาดการณ์แนวโน้มของการใช้พลังงานในอนาคตได้ นอกจากนี้ ยังเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการนำเสนอข้อมูลแก่ทั้งผู้บริหารและผู้ปฏิบัติงานในหลายบริษัทข้อมูลแนวโน้มของการใช้พลังงานจะถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภูมิเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทั้งหมดได้เห็นภาพอย่างชัดเจนซึ่งจะกระตุ้นความสนใจ และส่งผลถึงการประหยัดพลังงานได้แผนภูมิบางประเภทยังสามารถที่จะใช้หาค่าดัชนีการใช้พลังงานได้ในส่วนนี้จะแสดงถึงรูปแบบของแผนภูมิประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และนำเสนอข้อมูลการใช้พลังงานแผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิตหรือการทำงานแผนภูมิการกระจายแสดงแนวโน้มของดัชนีการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิตหรือการทำงานแผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิตหรือการทำงานแผนภูมิ CUSUM ข้อมูลการใช้พลังงานที่รวบรวมจากโรงงานหรืออาคารจะถูกจัดทำเป็นตารางก่อนที่จะนำเสนอลงบนแผนภูมิประเภทต่างๆ ตารางต่อไปนี้จะแสดงถึงตัวอย่างการนำข้อมูลที่ได้จากสายการผลิตหนึ่งมาจัดทำเป็นตารางพร้อมทั้งการคำนวณค่าดัชนีการใช้พลังงานในแต่ละสัปดาห์

ตารางที่ 3.13 ตัวอย่างการนำข้อมูลที่ได้จากสายการผลิตหนึ่งมาจัดทำเป็นตารางพร้อมทั้งการคำนวณค่าดัชนีการใช้พลังงานในแต่ละสัปดาห์

สัปดาห์	ปริมาณการผลิต (ตัน)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ดัชนีการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน)
1	1,300	301	231.5
2	1,150	280	243.5
3	1,350	304	225.2
4	1,400	312	222.9
5	1,305	306	234.5
6	1,265	289	228.5
7	1,360	307	225.7
8	1,252	291	232.4
9	1,181	290	245.6
10	1,300	297	228.5
11	1,080	274	253.7
12	1,163	285	245.1
13	1,201	294	244.8
14	1,610	333	206.8
15	1,090	272	249.5
16	1,520	327	215.1
17	1,397	307	219.8
18	1,105	282	255.2
19	1,410	309	219.1
20	1,576	322	204.3
21	1,289	301	233.5
22	1,443	307	212.8
23	1,134	286	252.2
24	1,555	324	208.4
25	1,106	275	248.6
26	1,400	316	225.7

ตอนที่ 3 บทที่ 3 การตรวจวัด และการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า

ข้อมูลจากตารางสามารถนำมาพลอตลงบนแผนภูมิเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิตหรือการทำงานได้ โดยแกน Y จะแสดงค่าดัชนีการใช้พลังงาน และปริมาณการผลิต (การทำงาน) ส่วนแกน X จะแสดงเวลา

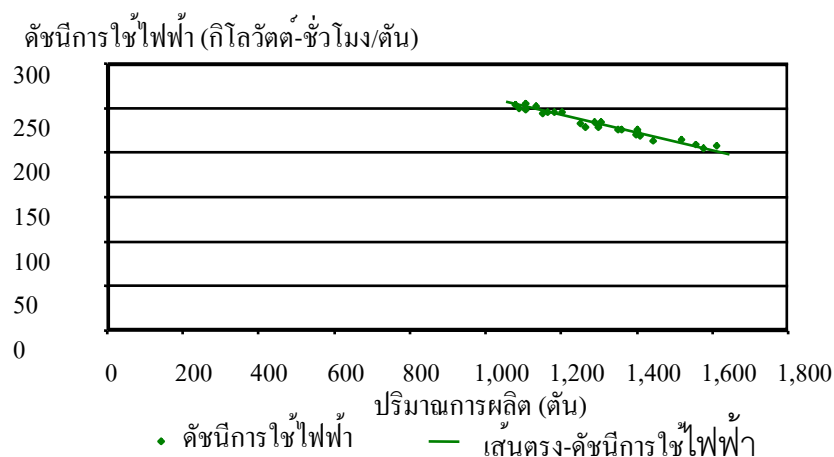


รูปที่ 3.48 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการใช้ไฟฟ้าเทียบกับปริมาณการผลิต

แผนภูมินี้สามารถใช้ในการตรวจติดตามประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ช่วงเวลา และระดับการผลิต (การทำงาน) ต่างๆ ได้ โดยค่าดัชนีการใช้พลังงานสูงจะแสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิต (การทำงาน) ที่สูง

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลการใช้พลังงานต่างๆ สามารถทำได้โดยใช้แผนภูมิที่เรียกว่า แผนภูมิการกระจาย (X-Y Scatter Diagram) ซึ่งตัวแปรหนึ่งจะแสดงอยู่บนแกน X และอีกตัวแปรหนึ่งจะแสดงอยู่บนแกน Y ของแผนภูมิ เราสามารถหาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลได้โดยลากเส้นตรงที่เป็นตัวแทนจุดต่างๆ บนแผนภูมิ หรือใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่า การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) ได้

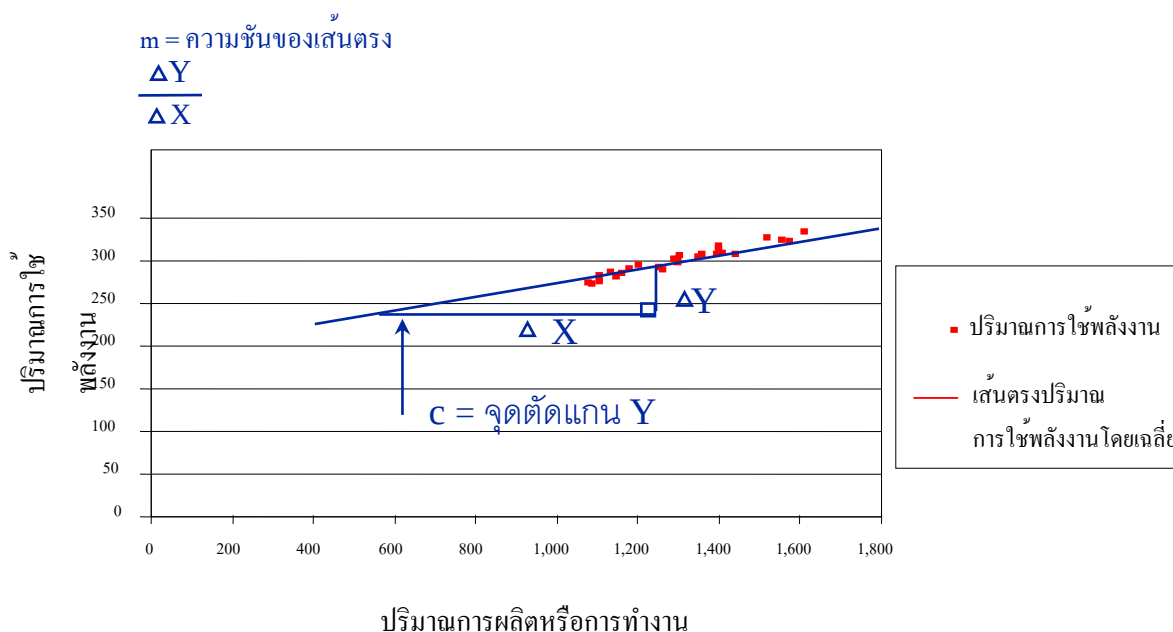
ข้อมูลดัชนีการใช้พลังงาน และข้อมูลปริมาณการผลิตหรือการทำงานสามารถนำมาพลอตลงบนแผนภูมิการกระจายเพื่อแสดงแนวโน้มของดัชนีการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิต (การทำงาน) ได้



รูปที่ 3.49 แผนภูมิการกระจายแสดงแนวโน้มของดัชนีการใช้ไฟฟ้าเทียบกับปริมาณการผลิต

แผนภูมินี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการใช้พลังงานต่อหน่วยที่ลดลงตามปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้น แนวโน้มการลดลงของดัชนีการใช้พลังงานในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นโดยทั่วไปกับกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรม

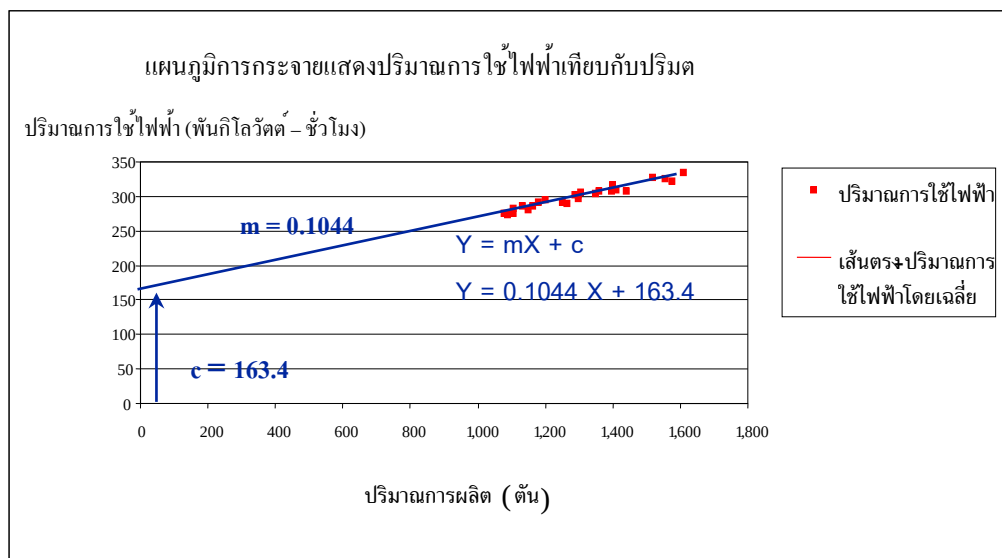
แผนภูมิการกระจายอีกรูปแบบหนึ่งที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงาน คือ แผนภูมิการกระจายซึ่งแสดงปริมาณการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิต (การทำงาน)



รูปที่ 3.50 แผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิตหรือการทำงาน

การวิเคราะห์การกระจายประเภทนี้สามารถแสดงข้อเท็จจริงที่เกี่ยวกับการใช้พลังงานได้หลายประการดังต่อไปนี้

- จุดตัดแกน Y (c) ของเส้นตรงที่ได้จากจุดต่างๆ บนแผนภูมิจะแสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานซึ่งไม่ให้ผลผลิตออกมา หรือที่เรียกว่า พลังงานคงที่ที่ไม่ก่อให้เกิดผลผลิตหรือการทำงาน (Fixed energy use)
- ความชันของเส้นตรง (m) แสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานที่แปรเปลี่ยนไปตามหน่วยการผลิต (การทำงาน) (Variable energy use) ค่าพลังงานคงที่และปริมาณการใช้พลังงานที่แปรเปลี่ยนไปตามหน่วยการผลิต (การทำงาน)นี้ จะแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
- การกระจายของจุดบนแผนภูมิจะแสดงถึง ความไม่แน่นอนของการใช้พลังงาน ซึ่งบ่งบอกถึงการควบคุมที่ไม่ดี อย่างไรก็ตามการกระจายของข้อมูลอาจเกิดจากความไม่แน่นอนในการวัดได้
- เส้นตรงจะแสดงปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยที่ปริมาณการผลิตหรือการทำงานระดับต่างๆ
- ปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ย = $m \times \text{ปริมาณการผลิต (การทำงาน)} + c$
- ความเบี่ยงเบนของจุดบนแผนภูมิกับเส้นตรง สามารถใช้ในการตรวจติดตามการใช้พลังงานได้



รูปที่ 3.51 แผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าเทียบกับปริมาณการผลิต

จากการนำข้อมูลการใช้พลังงานในตารางตัวอย่างมาสร้างแผนภูมิการกระจายจะได้เส้นตรงที่แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ปริมาณการผลิตต่างๆตามสมการ

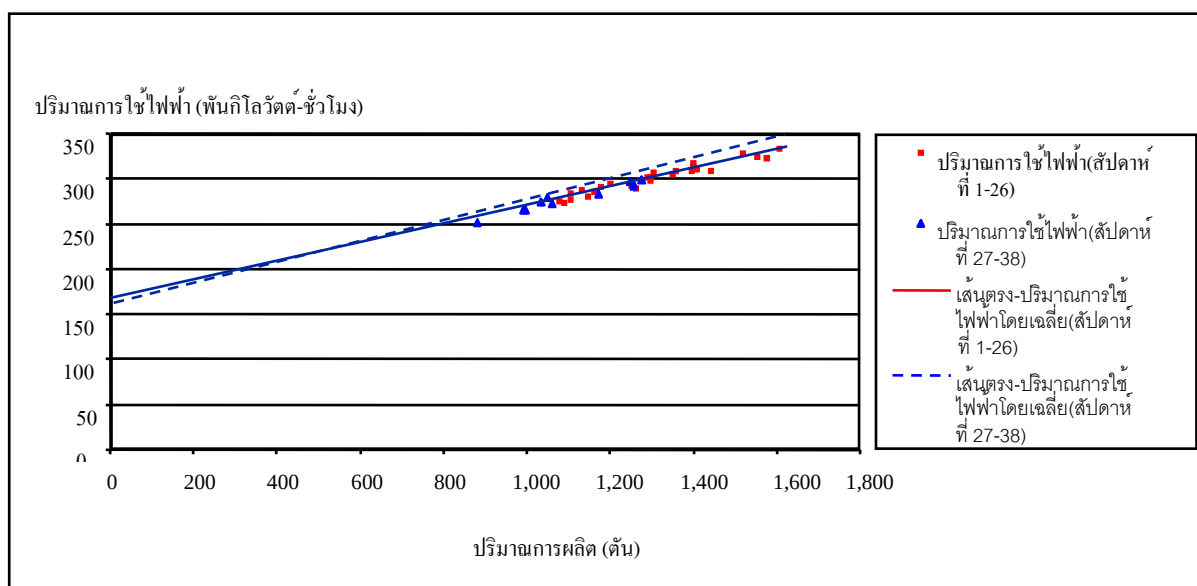
$$\text{ปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ย (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)} = 0.1044 \times \text{ปริมาณการผลิต(ตัน)} + 163.4$$

ค่าจุดตัดแกน Y (c) ซึ่งแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าคงที่ที่ไม่ก่อให้เกิดผลผลิตเท่ากับ 163,400 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และค่าความชันของเส้นตรง (m) เท่ากับ 104.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันสาเหตุที่ทำให้เกิดปริมาณการใช้ไฟฟ้าคงที่นี้จะต้องได้รับการตรวจสอบต่อไปในระหว่างช่วงเวลาที่ไม่มีการผลิต (v) แผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้พลังงานเปรียบเทียบกับปริมาณการผลิต (การทำงาน) สามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามการใช้พลังงานได้ในกรณีที่มีข้อมูลการใช้พลังงานเพิ่มเติมแผนภูมิการกระจายจะแสดงให้เห็นถึงการเบี่ยงเบนของจุดต่างๆ จากเส้นตรงซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของปริมาณการใช้พลังงานจริง และปริมาณ

การใช้พลังงานโดยเฉลี่ยซึ่งประมาณจากเส้นตรงที่ได้จากชุดข้อมูลเดิม นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้มาพร้อมกับข้อมูลชุดเดิมเพื่อหาเส้นตรงใหม่เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมได้

จากตัวอย่างที่ผ่านมามีสมมติว่าโรงงานสามารถเก็บข้อมูลการใช้พลังงานเพิ่มเติม (สัปดาห์ที่ 27 ถึง 38) ดังตาราง

สัปดาห์	ปริมาณการผลิต (ตัน)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ดัชนีการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน)
27	1,250	297	237.6
28	1,255	292	232.7
29	1,034	274	265.0
30	991	265	267.4
31	1,060	273	257.5
32	880	251	285.2
33	1,050	279	265.7
34	995	266	267.3
35	1,250	297	237.6
36	1,170	283	241.9
37	1,258	293	232.9
38	1,274	298	233.9



จากการนำข้อมูลเพิ่มเติมมาใช้ ทำให้ได้แผนภูมิการกระจาย ดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.52 แผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าเทียบกับปริมาณการผลิต

จากแผนภูมินี้ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงที่ได้จากข้อมูลเพิ่มเติมไม่แตกต่างจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่คำนวณจากข้อมูลชุดเดิมมากนัก นอกจากนี้ ความชันของเส้นตรง-ปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยที่ได้จากการคิดรวมข้อมูลชุดใหม่ก็เปลี่ยนแปลงจากเส้นตรงเดิมเพียงเล็กน้อย และจุดตัดแกน Y ไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ไม่เปลี่ยนแปลง

แผนภูมิอีกประเภทหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามการใช้พลังงานและประเมินปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้หรือปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปได้ คือ แผนภูมิ CUSUM แผนภูมิ CUSUM จะใช้การคำนวณหาผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง (The Cumulative Sum of Differences) ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้จริง และปริมาณพลังงานที่ใช้โดยเฉลี่ยซึ่งได้จากแผนภูมิการกระจายแล้วนำมาพลอตกับช่วงเวลาการผลิตหรือการทำงานของโรงงานหรืออาคาร

แผนภูมิ CUSUM มีขั้นตอนในการจัดทำดังต่อไปนี้

1. พลอตแผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้พลังงานเทียบกับปริมาณการผลิตหรือการทำงาน
2. ลากเส้นตรงผ่านจุดข้อมูลหรือใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยสำหรับชุดข้อมูลเพื่อหาปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยที่ระดับการผลิตหรือการทำงานต่างๆ

$$\text{ปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ย} = m \times \text{ปริมาณการผลิต หรือการทำงาน} + c$$

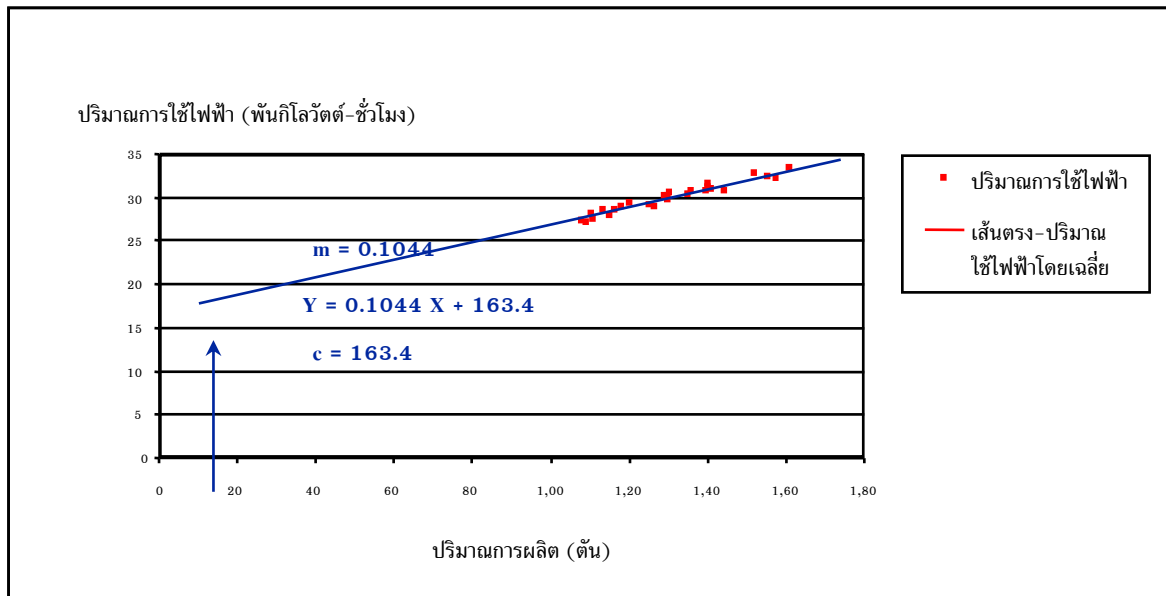
3. คำนวณปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยโดยใช้สมการในข้อ 2 เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานที่ใช้จริง
4. คำนวณค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้จริง และปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ย ซึ่งได้จากการคำนวณ

$$\text{ค่าความแตกต่าง} = \text{ปริมาณพลังงานที่ใช้จริง} - \text{ปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ย}$$

5. ณ แต่ละช่วงเวลาคำนวณผลรวมของค่าความแตกต่าง จากช่วงเวลาก่อนจนถึงช่วงเวลาที่จะพิจารณาทั้งหมด เพื่อหาผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง (The Cumulative Sum of Differences) ณ ช่วงเวลานั้น

$$\begin{aligned} \text{ผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง} &= \text{ผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง ณ ช่วงเวลาก่อน} \\ &\quad \text{ช่วงเวลาที่พิจารณา} + \text{ค่าความแตกต่างของ} \\ &\quad \text{ช่วงเวลาที่พิจารณา} \end{aligned}$$

6. นำผลรวมสะสมของค่าความแตกต่างที่ได้ มาพลอตบนแผนภูมิเทียบกับเวลาจากตัวอย่างของข้อมูลการใช้พลังงาน เราได้แผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าเทียบกับปริมาณการผลิตสำหรับข้อมูลในสัปดาห์ที่ 1 ถึง 26 ได้เป็นต้น

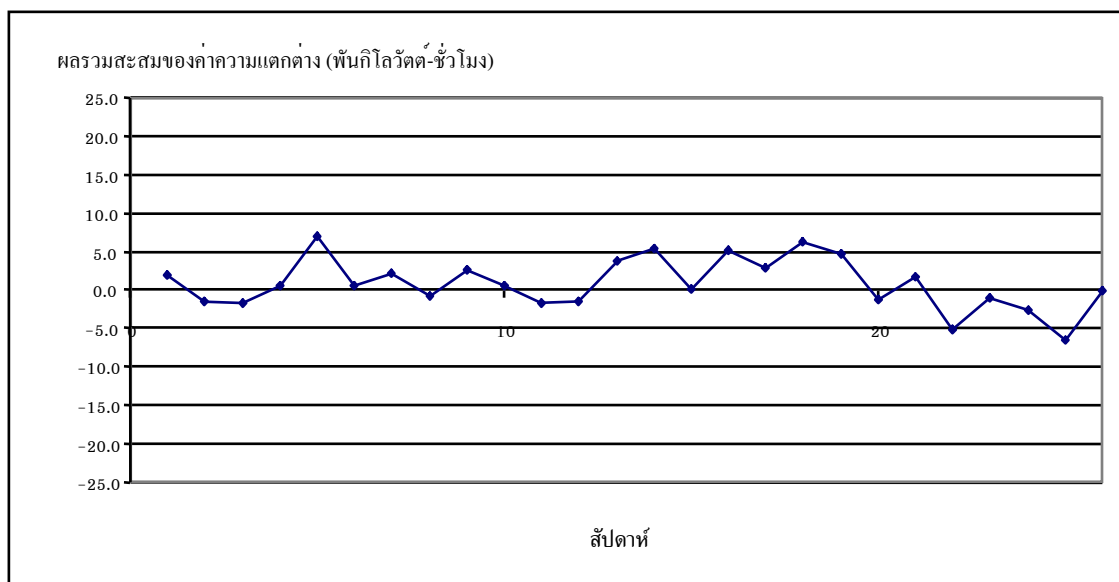


รูปที่ 3.53 แผนภูมิการกระจายแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าเทียบกับปริมาณการผลิต

ตอนที่ 3 บทที่ 3 การตรวจวัด และการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า

จากสมการของปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยสามารถนำมาคำนวณหาผลรวมสะสมของค่าความแตกต่างเพื่อจัดทำแผนภูมิ CUSUM ดังต่อไปนี้

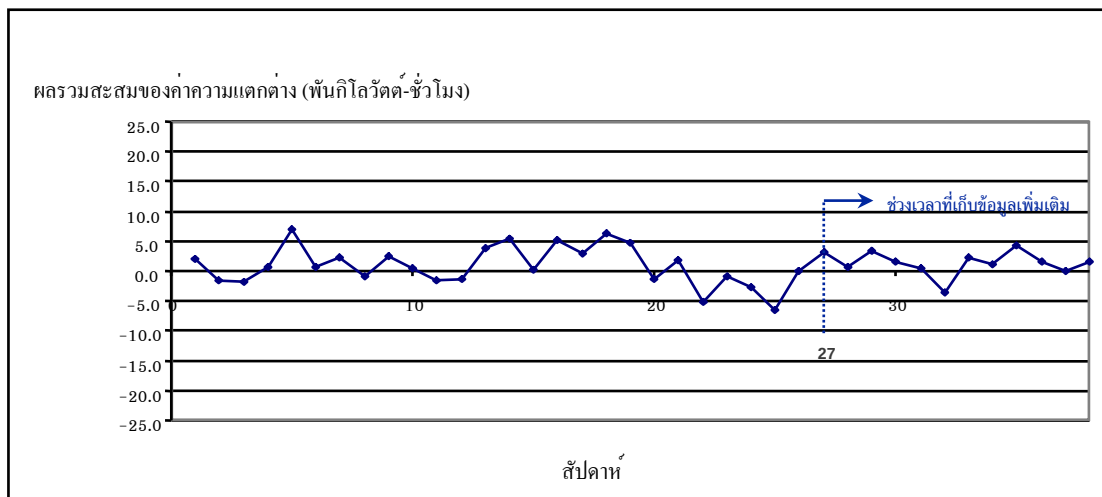
ลำดับ	ปริมาณการผลิต (ตัน)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ค่าความแตกต่าง	ผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง
1.	1,300	301	299.1	1.9	1.9
2.	1,150	280	283.4	-3.4	-1.5
3.	1,350	304	304.3	-0.3	-1.8
4.	1,400	312	309.5	2.5	0.7
5.	1,305	306	299.6	6.4	7.1
6.	1,265	289	295.4	-6.4	0.6
7.	1,360	307	305.3	1.7	2.3
8.	1,252	291	294.1	-3.1	-0.8
9.	1,181	290	286.7	3.3	2.5
10.	1,300	297	299.1	-2.1	0.5
11.	1,080	274	276.1	-2.1	-1.7
12.	1,163	285	284.8	0.2	-1.4
13.	1,201	294	288.8	5.2	3.8
14.	1,610	333	331.4	1.	5.4
15.	1,090	272	277.2	-5.2	0.2
16.	1,520	327	322.0	5.0	5.2
17.	1,397	307	309.2	-2.2	2.9
18.	1,105	282	278.7	3.3	6.2
19.	1,410	309	310.6	-1.6	4.6
20.	1,576	322	327.9	-5.9	-1.2
21.	1,289	301	297.9	3.1	1.8
22.	1,443	307	314.0	-7.0	-5.2
23.	1,134	286	281.8	4.2	-0.9
24.	1,555	324	325.7	-1.7	-2.6
25.	1,106	275	278.8	-3.8	-6.5
26.	1,400	316	309.5	6.5	0.0



รูปที่ 3.54 แผนภูมิ CUSUM ของปริมาณการใช้ไฟฟ้า สัปดาห์ที่ 1-26

ในกรณีที่มิข้อมูลการใช้พลังงานเพิ่มเติม ก็สามารถใช้แผนภูมิ CUSUM ในการตรวจติดตามการใช้พลังงานได้จากข้อมูลตัวอย่างที่ผ่านมา โรงงานเก็บรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมในสัปดาห์ที่ 27 ถึง 38 ซึ่งนำมาคำนวณและจัดทำแผนภูมิ CUSUM เพิ่มเติมได้ ดังต่อไปนี้

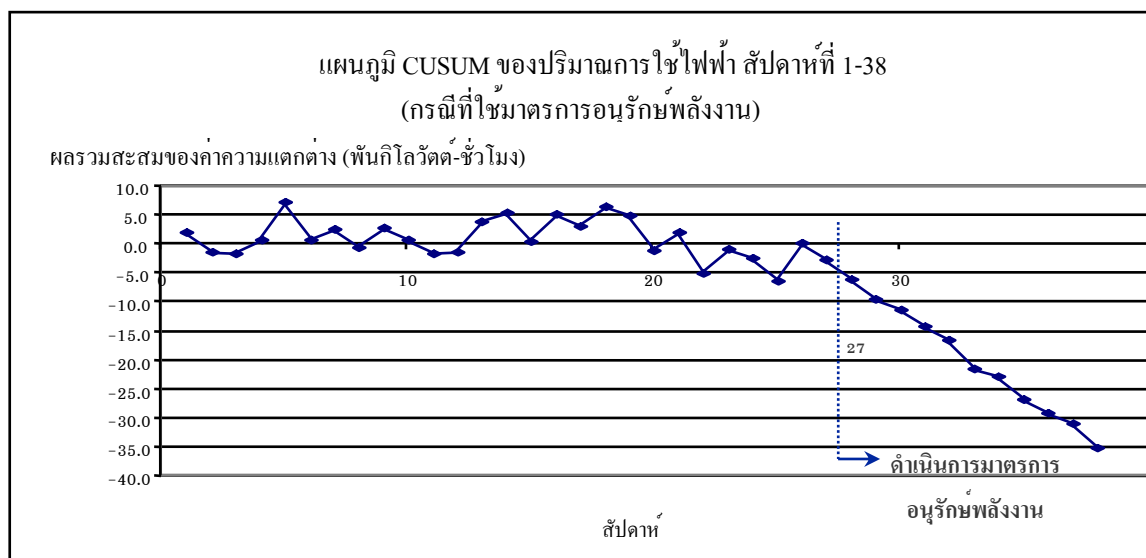
สัปดาห์	ปริมาณการผลิต (ตัน)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ค่าความแตกต่าง	ผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง
27.	1,250	297	293.9	3.1	3.1
28.	1,255	292	294.4	-2.4	0.7
29.	1,034	274	271.3	2.7	3.4
30.	991	265	266.8	-1.8	1.6
31.	1,060	273	274.0	-1.0	0.6
32.	880	251	255.2	-4.2	-3.7
33.	1,050	279	273.0	6.0	2.3
34.	995	266	267.3	-1.3	1.1
35.	1,250	297	293.9	3.1	4.2
36.	1,170	283	285.5	-2.5	1.7
37.	1,258	293	294.7	-1.7	0.0
38.	1,274	298	296.4	1.6	1.6



รูปที่ 3.55 แผนภูมิ CUSUM ของปริมาณการใช้ไฟฟ้า สัปดาห์ที่ 1-38

แผนภูมิ CUSUM จากชุดข้อมูลตัวอย่างนี้ แสดงให้เห็นถึงผลรวมสะสมของค่าความแตกต่างของปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริง และปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยที่มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ในช่วงใกล้ๆ ศูนย์ตลอดช่วงเวลาซึ่งแสดงถึงการผลิตที่เป็นปกติไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดปกติที่ชัดเจนเกิดขึ้นในกระบวนการ ในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการผลิตหรือการทำงานเกิดขึ้นซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงเวลาที่มีการผลิตหรือการทำงานตามปกติที่ใช้ในการหาเส้นตรงปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยแผนภูมิ CUSUM จะแสดงให้เห็นถึงค่าผลรวมสะสมของค่าความแตกต่างที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างชัดเจน จากข้อมูลตัวอย่าง ถ้าในสัปดาห์ที่ 27 โรงงานมีการดำเนินการมาตรการอนุรักษ์พลังงานเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีขึ้น ดังข้อมูลที่แสดงในตาราง

สัปดาห์	ปริมาณการผลิต (ตัน)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย (พันกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ค่าความแตกต่าง	ผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง
27.	1,250	291	293.9	-2.9	-2.9
28.	1,255	291	294.4	-3.4	-6.3
29.	1,034	268	271.3	-3.3	-9.6
30.	991	265	266.8	-1.8	-11.4
31.	1,060	271	274.0	-3.0	-14.4
32.	880	253	255.2	-2.2	-16.7
33.	1,050	268	273.0	-5.0	-21.7
34.	995	266	267.3	-1.3	-22.9
35.	1,250	290	293.9	-3.9	-26.8
36.	1,170	283	285.5	-2.5	-29.3
37.	1,258	293	294.7	-1.7	-31.0
38.	1,274	292	296.4	-4.4	-35.4



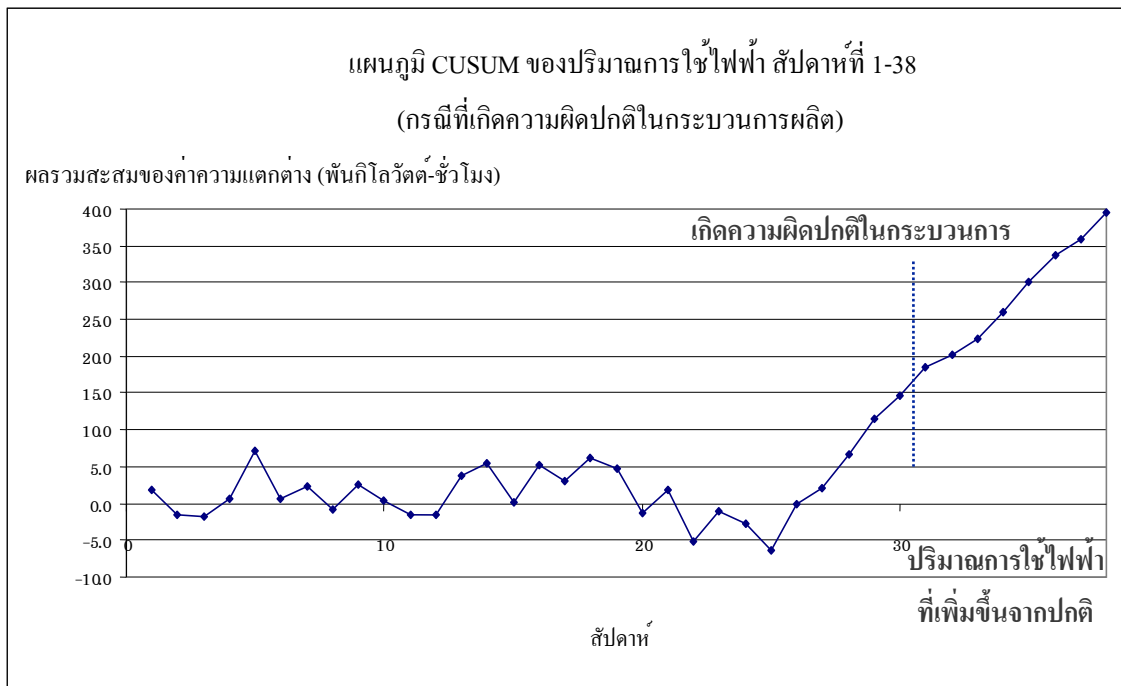
รูปที่ 3.56 แผนภูมิ CUSUM ของปริมาณการใช้ไฟฟ้า สัปดาห์ที่ 1-38

แผนภูมิ CUSUM แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตั้งแต่สัปดาห์ที่ 27 ซึ่งเริ่มมีการดำเนินการมาตรการอนุรักษ์พลังงานเป็นต้นไปผลรวมสะสมของค่าความแตกต่างของปริมาณการใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งแสดงว่าตั้งแต่สัปดาห์ที่ 27 เป็นต้นไป ที่ปริมาณการผลิตเท่ากับปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงมีค่าน้อยกว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยในช่วงเวลาปกติ

นอกจากการตรวจติดตามการใช้พลังงานแล้วแผนภูมิ CUSUM ยังแสดงถึงปริมาณการใช้พลังงานที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าตามปกติ

จากตัวอย่าง แผนภูมิ CUSUM แสดงค่าผลรวมสะสมของค่าความแตกต่างของปริมาณการใช้ไฟฟ้า ณ สัปดาห์ที่ 38 เท่ากับ 35,400 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งหมายความว่า หลังจากดำเนินการมาตรการอนุรักษ์พลังงานมาเป็นระยะเวลา 11 สัปดาห์ (สัปดาห์ ที่ 27-38) สามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากปกติ (สัปดาห์ที่ 1-26) ได้เท่ากับ 35,400 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ในทางกลับกัน ถ้าในสัปดาห์ที่ 27 โรงงานมีความผิดปกติเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน แผนภูมิ CUSUM ก็จะแสดงค่าผลรวมสะสมของค่าความแตกต่างของปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากช่วงเวลาปกติ



รูปที่ 3.57 แผนภูมิ CUSUM ของปริมาณการใช้ไฟฟ้า สัปดาห์ที่ 1-38

กรณีที่เกิดความผิดปกติในกระบวนการผลิต

แผนภูมิการกระจายและแผนภูมิ CUSUM เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์ ในการตรวจติดตามการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องของโรงงานหรืออาคารแต่มีสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา คือ

1. ชุดข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยจะต้องมีจำนวนมากเพียงพอ และทันสมัยเพื่อให้สามารถใช้เป็นตัวแทนของลักษณะการใช้พลังงานของโรงงานหรืออาคารตามช่วงเวลาปกติได้
2. ในกรณีที่โรงงานหรืออาคารมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตหรือลักษณะการทำงาน หรือการใช้งานที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการใช้พลังงานจะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานที่สะท้อนถึงการใช้พลังงานของโรงงานหรืออาคารหลังจากที่มีการปรับปรุง เปลี่ยนแปลงแล้วเพื่อที่จะได้นำมาปรับการคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยสำหรับการตรวจติดตามการใช้พลังงานในอนาคตต่อไป
3. การทำแผนภูมิการกระจาย และแผนภูมิ CUSUM แยกสำหรับพลังงานที่ใช้แต่ละประเภทจะทำให้สามารถตรวจติดตามการใช้พลังงานได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

การตรวจติดตามการใช้พลังงานจะนำไปสู่การตรวจสอบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อปริมาณการใช้พลังงานปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้พลังงาน และการผลิต และควรที่จะนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพพลังงานตัวอย่างของปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่

ไฟฟ้า

- ปริมาณที่ผลิตได้ (น้ำหนัก, ปริมาตร, จำนวน)
- ชั่วโมงการใช้งาน/การทำงาน
- ภูมิอากาศ

เชื้อเพลิง (ก๊าซ, น้ำมัน, ถ่านหิน, อื่น ๆ)

- ปริมาณที่ผลิตได้ (น้ำหนัก, ปริมาตร, จำนวน)
- ภูมิอากาศ
- ไอน้ำที่ผลิตได้

ประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาในกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

- ใบเสร็จค่าพลังงานรายเดือนบางประเภทจะมีข้อมูลที่ไม่ละเอียดพอที่จะนำไปใช้ในการจัดการพลังงาน
- การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยคน จะเป็นทางเลือกที่ราคาถูกแม้ว่าความแม่นยำไม่สม่ำเสมอ
- การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยคน และใช้ตัวเก็บบันทึกข้อมูลจะให้ความแม่นยำที่สูงขึ้น และสามารถถ่ายข้อมูลที่บันทึกไว้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง
- การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยอัตโนมัติทั้งหมดจะมีข้อดี คือ ความถี่ของการอ่านค่ามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นความผิดพลาดของค่า และเวลาการอ่านลดลงแต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง

2. ความถี่ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

- จะต้องรักษาสมดุลระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลที่มากเกินไป ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ไม่เพียงพอ ซึ่งทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของค่าใช้จ่ายพลังงานในบางช่วงเวลาได้

การเสียค่าใช้จ่ายในการเก็บรวบรวมข้อมูลมากกว่ามูลค่าที่ประหยัดได้จากการใช้ข้อมูลเป็นสิ่งที่ไม่ควรกระทำ

สิ่งที่ต้องค้นหาระหว่างการตรวจสอบและตรวจวัดการใช้พลังงาน

ในระหว่างการตรวจสอบ และตรวจวัดการใช้พลังงาน ที่ปรึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานจะพยายามชี้ให้เห็นโอกาสในการอนุรักษ์พลังงานสำหรับอุปกรณ์ และบริเวณต่างๆ รายการอุปกรณ์หรือบริเวณที่มีศักยภาพในการอนุรักษ์พลังงานมีดังนี้

1) มอเตอร์และชุดขับ

- มีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมหรือไม่
- มอเตอร์ที่ใช้มีขนาดใหญ่เกินไปหรือไม่
- มีการเปิดมอเตอร์ทิ้งไว้ โดยไม่มีภาระ (Load) เป็นเวลานานหรือไม่
- มีโอกาสที่จะติดตั้งตัวปรับความเร็วมอเตอร์
- หรือใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงหรือไม่

2) เครื่องทำน้ำเย็น

- อุปกรณ์มีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอหรือไม่
- การหุ้มฉนวนเหมาะสมตามมาตรฐานหรือไม่
- ระดับภาระการทำงานต่ำสุดแล้วหรือไม่
- มีโอกาสปรับปรุงระบบควบคุมหรือไม่
- การทำงานของอุปกรณ์เป็นไปตามข้อกำหนด และใช้งานในสภาวะที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุดหรือไม่

3) ระบบปรับอากาศ

- มีการบำรุงรักษาตามข้อกำหนดของผู้ผลิตหรือไม่
- มีการรั่วของอากาศหรือไม่
- ระบบควบคุมเหมาะสมหรือไม่
- มีส่วนของระบบจ่ายลมที่ติดตั้งเกินความต้องการหรือไม่
- ถ้ามีสามารถรื้อออกได้หรือไม่

4) ห้องเย็น

- ลดช่วงการละลายน้ำแข็งให้ต่ำสุดได้หรือไม่
- การหุ้มฉนวนเหมาะสมหรือไม่
- มีการติดตั้งอุปกรณ์ปิดประตูอัตโนมัติที่ประตูหรือไม่

5) ระบบแสงสว่าง

- สามารถที่จะปิดไฟซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้งานได้บ้างหรือไม่
- สามารถเปลี่ยนใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูงแทนหลอดปัจจุบันได้หรือไม่
- สามารถเปลี่ยนใช้แผ่นสะท้อนแสงประสิทธิภาพสูงสำหรับโคมไฟในบริเวณที่เหมาะสมได้หรือไม่
- สามารถใช้ระบบควบคุมสำหรับระบบแสงสว่างได้หรือไม่
- สามารถใช้แสงสว่างจากภายนอกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้อย่างไร

6) กรอบอาคาร

- ประเมินสภาพคุณสมบัติฉนวนของหลังคา ผนัง และพื้น
- มีการใช้ระบบปิดประตูอัตโนมัติ ในบริเวณที่มีการใช้ระบบปรับอากาศหรือไม่
- มีรอยรั่วของอาคารซึ่งจะทำให้ภาระการทำความเย็นเพิ่มขึ้นหรือไม่

7) ระบบปรับอากาศ

- มีการปรับปริมาณลมที่เหมาะสมกับความต้องการในบริเวณต่างๆ หรือไม่
- สามารถลดชั่วโมงการทำงานลงได้หรือไม่
- การใช้งานระบบสอดคล้องกับปริมาณผู้อยู่อาศัยหรือไม่
- มีการบำรุงรักษาระบบตามข้อกำหนดของผู้ผลิตหรือไม่

3.8 การวิเคราะห์ด้านไฟฟ้า

ครอบคลุมการประเมินในเรื่องดังต่อไปนี้

1) ภาระของหม้อแปลงไฟฟ้า

- มีโอกาสที่จะตัดไฟจ่ายหม้อแปลงในช่วงที่ไม่มีการใช้งานได้หรือไม่
- พิจารณาว่าสามารถถอดหม้อแปลงบางลูกที่ไม่ได้ใช้งานออกจากระบบได้หรือไม่

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

- เพื่อลดความสูญเสียขณะมีภาระของหม้อแปลงไฟฟ้า
- เพื่อลดความสูญเสียในระบบจ่าย

- 2) ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด
 - เพื่อเสนอแนะทางเลือกในการลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการจัดการทำงานของเครื่องจักรให้เหมาะสม
 - เพื่อพิจารณาการใช้อุปกรณ์ควบคุมความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 3) ศักยภาพในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินไปพิจารณาโอกาสในการลดขนาดของมอเตอร์ลงตามความเหมาะสม
- 4) ระบบแสงสว่าง โดยพิจารณาดังนี้
 - เปลี่ยนไปใช้หลอดประสิทธิภาพสูง
 - นำแสงสว่างจากภายนอกเข้ามาใช้งานในบริเวณที่เหมาะสม
- 5) เครื่องอัดอากาศ
 - คำนวณค่าใช้จ่ายที่เสียไปจากการรั่ว
 - ตรวจสอบขนาดถึงความดันให้เหมาะสมกับความต้องการ
- 6) ระบบปรับอากาศ
 - สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ลมกลับ และอากาศจากภายนอกได้หรือไม่?
 - มีแนวทางในการใช้ระบบปรับปริมาณลมหรือไม่ (Variable Air Flow System)
 - ความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบเข้ากับปั๊มน้ำหล่อเย็น
 - สามารถเปลี่ยนใช้อุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงกับเครื่องทำน้ำเย็นได้หรือไม่?

3.9 การกำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงาน (Identification of energy conservation measures)

ในการกำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงานควรพิจารณาสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.9.1 ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในโรงงานทั่วไป มีดังนี้

- 1) จำนวนคนงาน
- 2) พื้นที่ส่วนการผลิต
- 3) พื้นที่ผนังและหน้าต่าง
- 4) โครงสร้างของหลังคา
- 5) ประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ
- 6) ประสิทธิภาพของระบบแสงสว่าง
- 7) ประสิทธิภาพของระบบอัดอากาศ
- 8) ระบบผลิตและจ่ายไอน้ำ
- 9) ระบบทำความเย็น
- 10) อุปกรณ์ในกระบวนการผลิต
- 11) อื่น ๆ

สำหรับอาคารและโรงงานลักษณะเฉพาะอื่นๆ อาจมีตัวแปรอื่นๆ ที่มีความสำคัญเพิ่มเติมด้วย

3.9.2 มาตรฐานการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร :

1) การใช้ไฟฟ้าส่องสว่าง

กฎกระทรวง (พ.ศ.2538) หมวด 3 ข้อ 4 กำหนดว่าความส่องสว่างในอาคารจะต้องมีระดับความส่องสว่างสำหรับงานแต่ละประเภทอย่างเพียงพอ

อุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับใช้ส่องสว่างภายในอาคารโดยไม่รวมพื้นที่ที่จอตรงจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

ประเภทของอาคาร	ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด (วัตต์ต่อตารางเมตรของพื้นที่ใช้งาน)
(ก) สำนักงาน โรงแรม สถานศึกษาและโรงพยาบาล/สถานพักฟื้น	16
(ข) ร้านขายของ ซูเปอร์มาร์เก็ต หรือ ศูนย์การค้า (2)	23

(1) อาคารที่มีการใช้งานหลายลักษณะให้ใช้ค่าในตารางตามลักษณะพื้นที่ใช้งาน

(2) รวมถึงไฟฟ้าแสงสว่างทั่วไปที่ใช้ในการโฆษณาเผยแพร่ สินค้า ยกเว้นที่ใช้ในตู้กระจกแสดงสินค้า

2) ระบบปรับอากาศ

กฎกระทรวง (พ.ศ.2538) หมวด 3 ข้อ 5 กำหนดมาตรฐานการปรับอากาศในอาคารควบคุมไว้แบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

- เครื่องทำความเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ
- เครื่องทำความเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ

ระบบปรับอากาศที่ติดตั้งในอาคารจะต้องมีค่ากำลังไฟฟ้าต่อตันความเย็นที่ภาระเต็มพิกัด (Full Load) หรือที่ภาระใช้งานจริง (Actual Load) ไม่เกินกว่าค่าตามตารางดังต่อไปนี้

- เครื่องทำความเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ

ชนิดส่วนทำความเย็น/เครื่องทำความเย็น	อาคารใหม่ (กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น)	อาคารเก่า (กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น)
ก. ส่วนทำน้ำเย็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal Chiller)		
ขนาดไม่เกิน 250 ตันความเย็น	0.75	0.90
ขนาดเกินกว่า 250 ตันความเย็น ถึง 500 ตันความเย็น	0.70	0.84
ขนาดเกินกว่า 500 ตันความเย็น	0.67	0.80
ข. ส่วนทำน้ำเย็นแบบลูกสูบ (Reciprocating Chiller)		
ขนาดไม่เกิน 35 ตันความเย็น	0.98	1.18
ขนาดเกินกว่า 35 ตันความเย็น	0.91	1.10
ค. เครื่องทำน้ำเย็นแบบเป็นชุด (Package Unit)	0.88	1.06
ง. ส่วนทำน้ำเย็นแบบสกรู (Screw Chiller)	0.70	0.84

■ เครื่องทำความเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ

ชนิดส่วนทำความเย็น/เครื่องทำความเย็น	อาคารใหม่ (กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น)	อาคารเก่า (กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น)
ก. ส่วนทำน้ำเย็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal Chiller)		
ขนาดไม่เกิน 250 ตันความเย็น	1.40	1.61
ขนาดเกินกว่า 250 ตันความเย็น	1.20	1.38
ข. ส่วนทำน้ำเย็นแบบลูกสูบ (Reciprocating Chiller)		
ขนาดไม่เกิน 50 ตันความเย็น	1.30	1.50
ขนาดเกินกว่า 50 ตันความเย็น	1.25	1.44
ค. เครื่องทำน้ำเย็นแบบเป็นชุด (Package Unit)	1.37	1.58
ง. เครื่องทำความเย็นแบบติดหน้าต่าง/แยกส่วน (Window/Split Type)	1.40	1.61

3.9.3 มาตรฐานการใช้พลังงานในโรงงาน : ระบบปรับอากาศ (ร่างกฎกระทรวง)

ค่ากำลังไฟฟ้าต่อตันความเย็นที่ภาระเต็มพิกัดของเครื่องทำความเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ ต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดในตาราง

ชนิดส่วนทำความเย็น/เครื่องทำความเย็น	โรงงานใหม่ (กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น)	โรงงานเก่า (กิโลวัตต์ต่อตันความเย็น)
ก. เครื่องทำน้ำเย็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal Chiller)		
ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 250 ตันความเย็น	0.75	0.90
ขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 251 ตันความเย็น ถึง 500 ตันความเย็น	0.70	0.84
ขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 501 ตันความเย็นขึ้นไป	0.67	0.80
ข. เครื่องทำน้ำเย็นแบบลูกสูบ (Reciprocating Chiller)		
ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 35 ตันความเย็น	0.98	1.18
ขนาดมากกว่า 35 ตันความเย็น	0.91	1.10
ค. เครื่องแบบเป็นชุด (Package Unit)	0.88	1.06
ง. เครื่องทำน้ำเย็นแบบสกรู (Screw Chiller)	0.70	0.84

ค่ากำลังไฟฟ้าต่อต้านความเย็นที่ภาระเต็มพิกัดของเครื่องทำความเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดในตาราง

ชนิดส่วนทำความเย็น/เครื่องทำความเย็น	โรงงานใหม่ (กิโลวัตต์ต่อต้านความเย็น)	โรงงานเก่า (กิโลวัตต์ต่อต้านความเย็น)
ก.เครื่องทำน้ำเย็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal Chiller)		
ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 250 ตันความเย็น	1.40	1.61
ขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 251 ตันความเย็น	1.20	1.38
ข.เครื่องทำน้ำเย็นแบบลูกสูบ (Reciprocating Chiller)		
ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 ตันความเย็น	1.30	1.50
ขนาดมากกว่า 51 ตันความเย็น	1.25	1.44
ค.เครื่องแบบเป็นชุด (Package Unit)	1.37	1.58
ง. เครื่องแบบติดหน้าต่าง/แยกส่วน (Window/Split Type)	1.40	1.61

3.9.4 รูปแบบการทำงานในการตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบและตรวจวัดควรมีการจัดทำเป็นฐานข้อมูลหรืออย่างน้อยควรมีการจดบันทึกซึ่งจะเป็นส่วนช่วยให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้รูปแบบการทำงานควรมีองค์ประกอบดังนี้

- 1) ครอบคลุมเทคโนโลยีการใช้พลังงานทั้งหมดในโรงงาน
- 2) สะท้อนการทำงานภายในโรงงานวันต่อวันได้อย่างแท้จริง (หรืออย่างน้อยที่สุดคือเป็นสัปดาห์ต่อสัปดาห์)
- 3) ควรจะสามารถคาดการณ์การใช้พลังงานของโรงงานในสถานการณ์ปกติได้
- 4) ควรเน้นให้เห็นถึงแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพในการปรับปรุง และแสดงให้เห็นผลกระทบต่อการใช้พลังงานโดยรวมด้วย

3.9.5 การดำเนินการภายหลังการตรวจสอบและตรวจวัดการใช้พลังงาน

ภายหลังการตรวจสอบ และตรวจวัดการใช้พลังงาน และศึกษาข้อมูลการใช้พลังงานที่ผ่านมาเสร็จสิ้นแล้วที่ปรึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานที่มีประสบการณ์จะสามารถระบุ

- 1) ข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตหรือในโรงงานได้
- 2) เทคนิคการดำเนินการที่ควรปรับปรุง
- 3) การจัดขั้นตอน และการจัดการทำงานที่ดีมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ที่ปรึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานจะสามารถตรวจสอบการบันทึกข้อมูลของผู้รับผิดชอบด้านพลังงานในรูปแบบฟอร์มต่างๆ ได้

สำหรับอาคาร

- บพอ. 1 (กฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2538) หมวด 1 ข้อ 2) และ บพอ. 2 (กฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2538) หมวด 2 ข้อ 4)โดยเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการกรอกข้อมูล

สำหรับโรงงาน

- บพร.1 (กฎกระทรวงฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2540) หมวด 1 ข้อ 2) และ บพร. 2 (กฎกระทรวงฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2540) หมวด 2 ข้อ 4) โดยเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการกรอกข้อมูล

3.9.6 ศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน

โอกาสในการอนุรักษ์พลังงานมีดังนี้

อาคาร

- 1) ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ
- 2) ลดความร้อนจากแสงอาทิตย์
- 3) ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบแสงสว่าง
- 4) ปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ให้เหมาะสม
- 5) เลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่ช่วยอนุรักษ์พลังงาน
- 6) การจัดให้มีการบำรุงรักษาอุปกรณ์อย่างเหมาะสม
- 7) อื่นๆ

โรงงาน

- 1) การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่
- 2) ปรับปรุงระบบควบคุม
- 3) ปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์
- 4) การหุ้มฉนวนสำหรับอุปกรณ์ด้านความร้อน
- 5) การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้
- 6) การจัดให้มีการบำรุงรักษาอุปกรณ์อย่างเหมาะสม
- 7) อื่นๆ

ตัวอย่างที่ 3.10 : การตรวจวัดข้อมูลก่อนการลงทุน

ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานของศูนย์การค้าขนาดใหญ่แห่งหนึ่งได้ดำเนินการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานของระบบปรับอากาศของศูนย์การค้าอย่างละเอียด โดยมีข้อมูลทั่วไปดังต่อไปนี้

- เครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำมีขนาด 300 ตันความเย็น
- หอผึ่งน้ำ และปั๊มน้ำมีขนาดตามเครื่องทำน้ำเย็น
- ระบบปรับอากาศจะทำงานระหว่าง 09:30-20:00 น.
- เงินลงทุนในการทำความสะดวกคอนเดนเซอร์เท่ากับ 60,000 บาท

การวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดอย่างละเอียดจากเครื่องทำน้ำเย็นแสดงให้เห็น

จุดการวัด	ตัวแปรที่วัด	เครื่องทำน้ำเย็น	
		ค่าจากการตรวจวัด	ตามข้อกำหนดรายละเอียด
น้ำเย็น	อุณหภูมิเข้า (องศาเซลเซียส)	12.1	12.0
	อุณหภูมิออก (องศาเซลเซียส)	8.2	7.0
	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	48.3	45.4
น้ำหล่อเย็น	อุณหภูมิเข้า (องศาเซลเซียส)	31.3	32.5
	อุณหภูมิออก (องศาเซลเซียส)	36.1	38.0
	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)	47.4	57.0
สารทำความเย็น	อุณหภูมิอีแวปโปเรเตอร์ (องศาเซลเซียส)	4.1	-
	อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ (องศาเซลเซียส)	40.5	-
	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	171.0	177.0
ภาระการทำความเย็น (ตันทำความเย็น)		222.9	300.0
สมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็น (กิโลวัตต์/ตันทำความเย็น)		0.7	0.5

หมายเหตุ : ตามข้อกำหนดรายละเอียดของอุปกรณ์ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างสารทำความเย็นของคอนเดนเซอร์และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ด้านนอกมีค่าประมาณ 1.5 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะเห็นว่าสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำเย็นจะไม่เป็นไปตามที่ระบุไว้ในข้อกำหนดรายละเอียดของเครื่อง ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำเย็นขาออก และสารทำความเย็นที่อีแวปโปเรเตอร์มีค่าเท่ากับ 4.05 องศาเซลเซียส ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างสารทำความเย็น และน้ำหล่อเย็นขาออกที่คอนเดนเซอร์มีค่าเท่ากับ 4.45 องศาเซลเซียสจากข้อกำหนดรายละเอียดของเครื่องทำน้ำเย็นคอนเดนเซอร์ควรที่จะมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างสารทำความเย็นและน้ำขาออกประมาณ 1.5 องศาเซลเซียส ค่าความแตกต่างอุณหภูมิที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำลงซึ่งอาจเนื่องมาจากการอุดตันของคอนเดนเซอร์ภายในเครื่องทำน้ำเย็นจากประสบการณ์ที่ผ่านมาผู้รับผิดชอบด้านพลังงานพบว่า การทำความสะอาดคอนเดนเซอร์จะสามารถปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นชุดนี้ได้จนมีค่าประมาณ 0.70 กิโลวัตต์/ตันทำความเย็น

จากข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาผู้รับผิดชอบด้านพลังงานสามารถคำนวณปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อปีของระบบปรับอากาศ (สมมติให้ค่าไฟฟ้า ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง = 2.75 บาท)

- พลังงานไฟฟ้าต่อปี
- = สมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็น x ภาระการทำความเย็น x ชั่วโมงทำงานต่อปี
- = 0.77 กิโลวัตต์/ตันทำความเย็น x 222.95 ตันทำความเย็น x 10.5 ชม./วัน x 365 วัน/ปี
- = 657,931 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
- ค่าไฟฟ้าต่อปี
- = พลังงานไฟฟ้าต่อปี x ค่าไฟฟ้า
- = 657,931 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี x 2.75 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
- = 1,809,310.25 บาท/ปี

หลังจากการล้างสิ่งอุดตันที่คอนเดนเซอร์

$$\begin{aligned}
 &= 0.70 \text{ กิโลวัตต์/ตันความเย็น} \times 222.95 \text{ ตันความเย็น} \times 10.5 \text{ ชม./วัน} \times 365 \text{ วัน/ปี} \\
 &= 598,119 \text{ กิโลวัตต์-ชม./ปี} \\
 &= 598,119 \text{ กิโลวัตต์-ชม./ปี} \times 2.75 \text{ บาท/ กิโลวัตต์-ชม.} \\
 &= 1,644,827.25 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

ผลการประหยัดต่อปี

$$\begin{aligned}
 \blacksquare \text{ พลังงานไฟฟ้า} &= 657,931 - 598,119 \\
 &= 59,812 \text{ กิโลวัตต์-ชม./ปี} \\
 \blacksquare \text{ ค่าไฟฟ้า} &= 1,809,310.25 - 1,644,827.25 \\
 &= 164,483 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

การลงทุน

$$\begin{aligned}
 \blacksquare \text{ ค่าลงทุนทั้งหมด} & 60,000 \text{ บาท} \\
 \text{การคืนทุน} &= \text{ค่าลงทุน/ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดต่อปี} \\
 \text{การคืนทุน} &= 60,000 / 164,483 \\
 \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= 0.36 \text{ ปี}
 \end{aligned}$$

จากการตรวจวัดระบบปรับอากาศของศูนย์การค้าแห่งนี้ ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานสามารถที่จะหาศักยภาพในการประหยัดพลังงานที่สำคัญได้โดยการเสียค่าใช้จ่าย 60,000 บาท ในการทำความสะอาดคอนเดนเซอร์ของเครื่องทำน้ำเย็นปีละหนึ่งครั้งจะทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าได้ 125,605 บาท/ปี ซึ่งจะสามารถคืนทุนได้ภายในเวลาครึ่งปี และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เกือบ 6 หมื่นกิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี

ตัวอย่างที่ 3.11 : ผลกระทบของข้อมูลที่ตรวจวัดกับการประมาณการประหยัด

โรงงานทอผ้าแห่งหนึ่ง ซึ่งมีค่าไฟฟ้าต่อปี 1.5 ล้านบาท ติดตั้งระบบทำให้แห้งใหม่โดยใช้อินฟราเรดซึ่งผู้ผลิตอ้างว่าจะประหยัดได้ 30% เมื่อเทียบกับระบบอบแห้งเดิมค่าลงทุนของระบบคือ 1.35 ล้านบาท

ระยะเวลาคืนทุนโดยประมาณ สามารถหาได้โดย

$$\begin{aligned}
 \blacksquare 1,500,000 \text{ บาท} \times (30/100) &= 450,000 \text{ บาท/ปี} \\
 \blacksquare 1,350,000 / 450,000 &= 3 \text{ ปี}
 \end{aligned}$$

จากข้อมูลข้างต้นเจ้าของโรงงานคาดว่าจะประหยัดค่าพลังงานได้ 450,000 บาท/ปี โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 3 ปี

ในการติดตั้งระบบอินฟราเรดนี้ผู้จำหน่ายอุปกรณ์จะต้องติดตั้งมิเตอร์วัดไฟฟ้าด้วย

มิเตอร์ได้บันทึกและให้ผลการประหยัดเพียง 20% จากระบบเดิมมูลค่าการประหยัดที่ลดลงนี้ทำให้

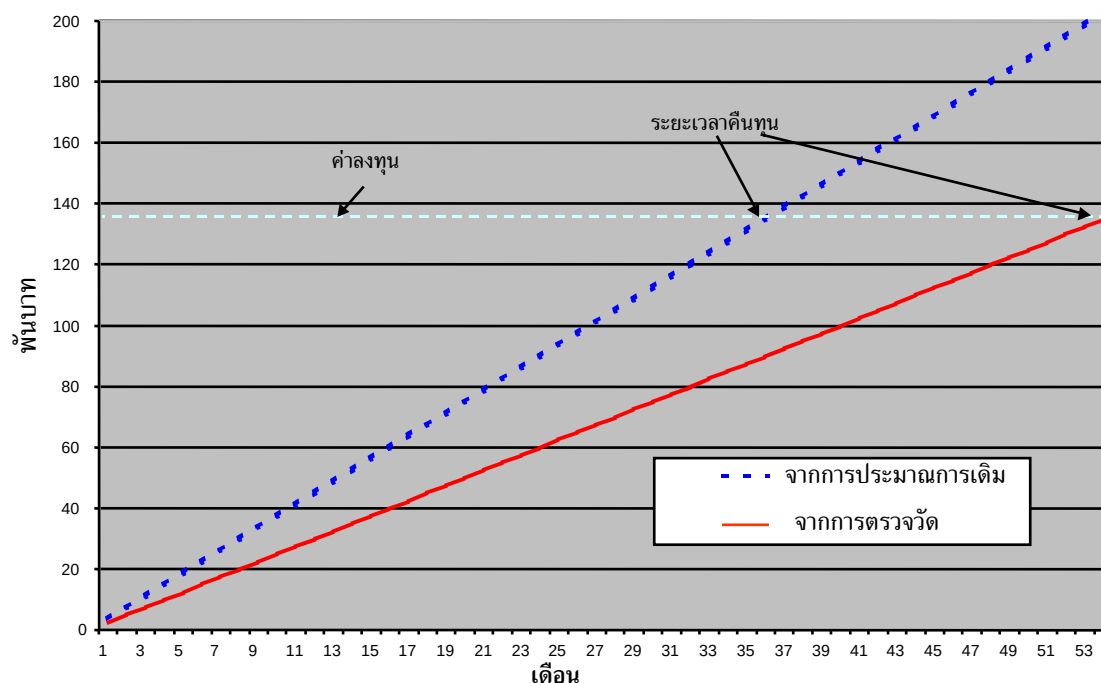
ระยะเวลาคืนทุนยาวขึ้นเป็น

$$\begin{aligned}
 \blacksquare 1,500,000 \text{ บาท} \times (20/100) &= 300,000 \text{ บาท/ปี} \\
 \blacksquare 1,350,000 \text{ บาท} / 300,000 \text{ บาท/ปี} &= 4.5 \text{ ปี}
 \end{aligned}$$

ถ้าไม่มีมิเตอร์ที่จะอ่านค่าก็คงจะไม่สามารถที่จะตรวจพบปัญหานี้ได้จะเห็นได้ว่าระยะเวลาคืนทุนได้ยืดออกเป็น 4.5 ปี ซึ่งแสดงดังกราฟ

ผู้ผลิตเครื่องทำให้แห้งได้ถูกสั่งให้ดำเนินการตรวจสอบ และปรับปรุงระบบให้เป็นไปตามที่อ้างไว้ในตอนต้น

จากกราฟข้างล่างนี้ จะเห็นได้ว่าการประมาณเดิมคาดว่าจะมีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่าความเป็นจริงมาก



รูปที่ 3.58 กราฟแสดงการประมาณการประหยัด

จากกราฟ จะเห็นได้ว่าการประมาณเดิมคาดว่าจะมีระยะเวลาคืนทุนสั้นกว่าความเป็นจริงมาก

อย่างไรก็ตาม นอกจากความแม่นยำถูกต้องของเครื่องมือวัดแล้วการใช้งานที่ถูกต้องและการนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดไปใช้อย่างเหมาะสมก็เป็นสิ่งสำคัญในการที่จะทำให้เกิดการจัดการด้านพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ตัวอย่าง 3.12 โรงงานทอผ้าแห่งหนึ่งตระหนักถึงค่าไฟฟ้าที่มีค่าสูงเกินไป ดังนั้น จึงได้มอบหมายให้ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานหาสาเหตุโดยพิจารณาว่า การใช้พลังงานในโรงงานแต่ละส่วนเป็นอย่างไรสองสัปดาห์ผ่านไปผู้รับผิดชอบด้านพลังงานได้ทำการตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือวัดอย่างง่ายพร้อมกับทำการศึกษาถึงค่าใช้จ่ายจากใบเสร็จค่าไฟฟ้า

ผู้จัดการได้ขอให้พนักงานทุกคน ทำการจดบันทึกการเปิด-ปิดเครื่องจักรรวมถึงเวลาการพักชั่วคราวในกระบวนการผลิตด้วยค่าไฟฟ้ารวมของโรงงานที่ปรากฏในใบเรียกเก็บค่าไฟ คือ 530,000 บาทต่อเดือน

ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานพบว่ามีการเปิดเครื่องจักรทิ้งไว้ในช่วงเวลาที่พักรวมทั้งในเวลากลางคืนที่ไม่มีการผลิตแต่ยังมีการใช้พลังงาน คิดเป็น 20% ของช่วงเวลากลางวันที่มีการผลิต

ดังนั้น ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานจึงได้แนะนำผู้จัดการฝ่ายผลิตให้กำชับพนักงานแต่ละส่วนให้ปิดเครื่องจักรที่ไม่ได้ใช้งานพร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์ตั้งเวลาในบางเครื่องจักร ให้เปิด-ปิดตามเวลาที่ต้องการราคาของอุปกรณ์ตั้งเวลาเท่ากับ 80,000 บาท เมื่อผ่านไป 1 เดือนหลังจากที่พนักงานทุกคนได้ร่วมมือกันปฏิบัติตามที่มีการรณรงค์ และทำการติดตั้งอุปกรณ์ตั้งเวลาในบางเครื่องจักรแล้วค่าไฟฟ้าได้ลดลงเป็น 410,000 บาท

ต่อเดือนจากผลการปฏิบัตินี้เจ้าของโรงงานสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ถึง 120,000 บาท ซึ่งเป็นการลงทุนที่ให้ผลตอบแทนโดยมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 24 วันเท่านั้น

ตัวอย่าง 3.13 การเปลี่ยนแปลงครั้งนี้เจ้าของกิจการมีความมั่นใจว่าจะสามารถประหยัดเงินได้ถึง 1.9 ล้านบาทต่อปี การติดตั้งเตาหลอมใหม่นี้ไม่เพียงแต่เป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังเป็นการปรับปรุงในเรื่องของกระบวนการผลิต ปรับปรุงสิ่งแวดล้อม และยังได้ผลิตผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมที่ดีขึ้น รวมทั้ง ลดปริมาณของเสียได้ด้วยจากการประหยัดในครั้งนี้โรงงานได้เงินลงทุนคืนมาภายในระยะเวลา 2.5 ปี

ตัวอย่างของปัญหาซับซ้อน

ตัวอย่าง 3.14 ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานของโรงงานแห่งหนึ่งได้ทำการศึกษา และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียดของระบบปรับอากาศ และภาระการทำความเย็นข้อมูลทั่วไปจากการศึกษามีดังต่อไปนี้ :

- เครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ มีความสามารถในการทำความเย็น 300 ตันทำความเย็น
- หอระบายความร้อน และปั๊มน้ำมีขนาดที่สอดคล้องกับเครื่องทำน้ำเย็น
- ระบบปรับอากาศ มีการทำงาน 24 ชั่วโมง
- ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานยังได้ระบุภาระการทำความเย็นจะลดลงครั้งหนึ่ง

ระหว่างเวลา 12:00–13:00 น. และระหว่าง 20:00-08:00 น. วันจันทร์ถึงวันอาทิตย์

รายละเอียดการวิเคราะห์ แสดงถึงสมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็น ได้ดังนี้

จุดตรวจวัด	ค่าตรวจวัด	เครื่องทำน้ำเย็นหมายเลข			
		CH-1	CH-2	CH-3	พิกัด
น้ำเย็น	อุณหภูมิน้ำเข้า (องศาเซลเซียส)	12.10	11.95	12.22	12.22
	อุณหภูมิน้ำออก (องศาเซลเซียส)	8.22	8.17	8.78	6.67
	อัตราการไหล (ลิตร-วินาที)	48.30	49.50	51.60	45.40
น้ำระบายความร้อน	อุณหภูมิน้ำเข้า (องศาเซลเซียส)	31.37	31.78	31.00	32.22
	อุณหภูมิน้ำออก (องศาเซลเซียส)	36.11	36.39	35.67	37.78
	อัตราการไหล (ลิตร-วินาที)	47.40	48.30	45.20	56.78
สารทำความเย็น	อุณหภูมิอีแวปโปเรเตอร์อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	4.17	4.17	4.44	-
	อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ (องศาเซลเซียส)	40.56	40.83	40.28	-
กำลังไฟฟ้า(กิโลวัตต์)	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	171.00	168.00	161.00	177.00
ภาระการทำความเย็น		222.95	224.60	211.31	300.00
สมรรถนะของเครื่องทำความเย็น (กิโลวัตต์-ตันทำความเย็น)		0.77	0.7	0.76	0.59

ค่ากิโลวัตต์/ตันทำความเย็น มีค่าสูงเกินกว่าค่าพิกัด ซึ่งเหตุผลหลักเกิดจากการมีตะไคร่ และตะกรันติดอยู่ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิแตกต่างกันเล็กน้อยสำหรับด้านทำความเย็นเท่ากับ 4.13 องศาเซลเซียส (ค่าเฉลี่ยจากความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเย็นออกกับอุณหภูมิ อีแวปโปเรเตอร์) และเท่ากับ 4.5 องศาเซลเซียส (ค่าเฉลี่ยจากความแตกต่างอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนออกกับอุณหภูมิคอนเดนเซอร์) สำหรับด้านหล่อเย็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชุดใหม่จะมีค่าอุณหภูมิแตกต่างกันประมาณ 1.5 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของลม : อากาศจากภายนอกที่ถูกดูดเข้ามาในระบบมีสภาพดังนี้

- อัตราการไหล 24,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาทีโดยประมาณ
- อุณหภูมิ 26.5 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% โดยประมาณ
- อุณหภูมิภายในพื้นที่ปรับอากาศ 24.5 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50% โดยประมาณ

จากสภาพการทำงานภายในโรงงานทำให้ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานคำนวณได้ว่าภาระปรับอากาศสามารถลดลงได้ครึ่งหนึ่งระหว่างเวลา 12:00 – 13:00 น. และ ระหว่าง 20:00-08:00 น. วันจันทร์ถึงวันอาทิตย์

จากข้อมูลเหล่านี้ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานคำนวณได้ว่าสามารถลดอัตราการไหลของลมลงได้ถึงครึ่งหนึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว

การปรับปรุงสมรรถนะเครื่องทำน้ำเย็น : กรณีศึกษา

การปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องทำน้ำเย็นทำได้โดยการกำจัดตะไคร่และตะกอนออกจากเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน

ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานประมาณไว้ว่าการปรับปรุงจะเพิ่มสมรรถนะได้ประมาณ 10%

การวิเคราะห์การปรับปรุงสมรรถนะเครื่องทำน้ำเย็น

รายละเอียด	เครื่องทำน้ำเย็น		
	CH-1	CH-2	CH-3
ภาระการทำความเย็น (ตันความเย็น)	222.95	224.60	211.31
สมรรถนะก่อนการล้างทำความสะอาด (กิโวลต์/ตันความเย็น)	0.77	0.75	0.76
สมรรถนะหลังการล้างทำความสะอาด (กิโวลต์/ตันความเย็น)	0.65	0.65	0.65
กำลังไฟฟ้าลดลง (กิโวลต์)	26.75	22.4	23.24
พลังงานไฟฟ้าลดลง (กิโวลต์/ตันความเย็น) (24 ชั่วโมงต่อวัน, 350 วันต่อปี, เปอรเซนต์การทำงาน)	134,820	113,198.4	117,129.6

การใช้กำลังไฟฟ้าลดลงทั้งสิ้น	=	72.45	กิโวลต์
การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงทั้งสิ้น	=	365,148	กิโวลต์-ชั่วโมง/ปี
คิดเป็นผลการประหยัดทั้งสิ้น	=	1,004,157	บาท/ปี
(ใช้ค่าพลังงานไฟฟ้า 2.75 บาท/กิโวลต์- ชั่วโมง)			
การวิเคราะห์การลงทุนสำหรับเครื่องทำน้ำเย็น			
ค่าล้างทำความสะอาด	=	70,000	บาท/ชุด
รวมค่าใช้จ่าย 3 ชุด	=	210,000	บาท
ระยะเวลาคืนทุน	=	เงินลงทุน/ผลประหยัดต่อปี	
	=	210,000 / 1,004,157	
	=	0.209	
		ปี	

การปรับปรุงอัตราการไหลของลม : กรณีศึกษา

การวิเคราะห์การปรับปรุงอัตราการไหลของลมโดยการปรับปริมาณอัตราการไหลของลมให้เหมาะสมกับภาระความต้องการโดยใช้ระบบปรับปริมาณลม (Variable air volume) จะลดการใช้พลังงานลงได้ ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานมีแผนที่จะลดอัตราการไหลของลมลง 50% ในช่วงเวลา 12:00-13:00 น. และช่วงเวลา 20:00 - 08:00 น. วันจันทร์ถึงวันอาทิตย์ โดยการคำนวณแสดงได้ดังนี้

- การลดลงของปริมาณลมหมุนเวียน (Fa) = 12,000 ลบ.ฟุตต่อนาที
- เอนทัลปีของอากาศจากภายนอก (ho) = 38.6 บีทียู/ปอนด์
- เอนทัลปีของอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ (hi) = 28.8 บีทียู/ปอนด์
- ภาระการปรับอากาศลดลง = $4.45 \times Fa \times (ho - hi) / 12,000$ ตันความเย็น
= $4.45 \times 12,000 \times (38.6 - 28.8) / 12,000$
= 43.61 ตันความเย็น
- ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำเย็น = 0.65 กิโลวัตต์/ตันความเย็น
- กำลังไฟฟ้าลดลง (0.65×43.61) = 28.35 กิโลวัตต์
- ชั่วโมงการใช้งานลดลง = 13×350
= 4,550 ชั่วโมง
- พลังงานไฟฟ้าลดลง = 128,992 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี
- มูลค่าการประหยัด = 354,728 บาท/ปี

การวิเคราะห์ผลการลงทุนสำหรับการปรับปรุงอัตราการไหลของลม

ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบปรับปริมาณลม	=	200,000	บาท
ระยะเวลาคืนทุน	=	เงินลงทุน/ผลที่ประหยัดได้ต่อปี	
	=	200,000/354,728	
	=	0.56	ปี

การวิเคราะห์เพิ่มเติม : กรณีศึกษา

ผลการลงทุนจากการวิเคราะห์ทางการเงิน สามารถแสดงได้ดังนี้

- การลงทุนสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะเครื่องทำน้ำเย็น
 - ค่าใช้จ่าย 210,000 บาท
 - ระยะเวลาคืนทุน 0.59 ปี
- การลงทุนสำหรับการปรับปรุงอัตราการไหลของลม
 - ค่าใช้จ่าย 200,000 บาท
 - ระยะเวลาคืนทุน 0.56 ปี

ก่อนที่จะนำเสนอมาตรการผู้รับผิดชอบด้านพลังงานจะต้องคำนึงถึงเรื่องอื่นๆ ดังนี้ :

- การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของลมมีผลต่อกระบวนการผลิตหรือไม่
- ผู้รับเหมาจะสามารถรับประกันระยะเวลาแล้วเสร็จของงานได้หรือไม่
- ความเชื่อถือได้ (Reliability) ของอุปกรณ์เป็นอย่างไร
- จะมีการเปลี่ยนแปลงภาระความเย็นของระบบปรับอากาศอีกหรือไม่

ในระหว่างการดำเนินการปรับปรุง

การเปลี่ยนแปลงในระบบปรับอากาศในช่วงการผลิตย่อมส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแน่นอนผลกระทบจากคุณภาพของระบบปรับอากาศที่ลดลงในช่วงปรับปรุงไม่สามารถประเมินได้โดยง่าย ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานสามารถใช้ข้อมูลที่ผ่านมาในอดีต สำหรับกรณีที่ไม่สามารถจ่ายระบบปรับอากาศได้ตามต้องการว่าเคยมีผลกระทบต่อปริมาณการผลิตอย่างไร และใช้ข้อมูลดังกล่าวในการประเมินผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้

ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานจะต้องติดต่อประสานงานกับผู้จัดการแผนกต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อที่จะได้ทราบข้อมูลที่แน่ชัด

3.10 การจัดทำรายงาน (Report preparation)

ภายหลังดำเนินการการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานแล้วเสร็จที่ปรึกษาด้านการอนุรักษ์พลังงานจะต้องจัดทำรายงานการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้นตามแบบที่พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานประกาศกำหนด เพื่อให้เจ้าของกิจการจัดส่งให้แก่กรมพัฒนา และส่งเสริมพลังงานต่อไป

ในรายงานจะประกอบไปด้วยข้อมูลหลักที่ได้จากการตรวจสอบและตรวจวัดดังนี้

- 1) ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานหรืออาคาร
- 2) รายละเอียดการใช้พลังงานในเครื่องจักรและอุปกรณ์
- 3) การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานตามมาตรการต่าง ๆ
- 4) การประเมินปัญหาอุปสรรค และความถูกต้องในการกรอกแบบ ส่งข้อมูลฯ (บพร. 1 และ บพอ. 1) และแบบบันทึกข้อมูล (บพร. 2 และ บพอ. 2)
- 5) การประเมินผลการดำเนินการอนุรักษ์พลังงาน ผลการลงทุนตลอดจนปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานที่ผ่านมา
- 6) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการบริหารการอนุรักษ์พลังงาน
- 7) สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลจากรายงานนี้ ผู้บริหารควรจะทำกรวางแผนการปฏิบัติเพื่อขยายผลจากสิ่งที่ตรวจสอบได้

โดยทั่วไปการดำเนินการตามผลจากรายงานนี้จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการดำเนินการพื้นฐานหรือการจัดซื้ออุปกรณ์ที่มีการลงทุนต่ำ เช่น การเปลี่ยนมาใช้หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

ปณิธานของฝ่ายบริหาร

ปณิธานของฝ่ายบริหารเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าแผนงานจะดำเนินการไปได้จริงการนำเสนอข้อมูลที่เป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินการตามแผนงาน เช่น ผลประโยชน์ด้านการเงินให้กับผู้เกี่ยวข้องทราบเป็นเรื่องที่สำคัญเช่นเดียวกัน เหตุผลต่างๆ ในการนำเสนอควรจะเข้าใจได้ง่ายและชัดเจนรวมทั้งต้องชี้แจงผลที่จะเกิดขึ้นภายหลังการดำเนินการต่างๆ ให้ชัดเจน เช่น ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การประหยัดพลังงาน ผู้ทำงาน คุณภาพของผลิตภัณฑ์ พยายามหา “ผู้สนับสนุนด้านพลังงาน” ภายในองค์กรที่อยู่ในระดับผู้จัดการอาวุโสหรือคณะกรรมการบริษัทผู้ซึ่งมีความสนใจเป็นพิเศษในด้านพลังงาน และหรือสิ่งแวดล้อม โดยจะเป็นผู้ที่คอยสนับสนุนรวมถึงชักชวนให้ผู้บริหารท่านอื่นยอมรับในการนำเสนอแผนงานของท่าน

แบบแผนในการดำเนินโครงการ

แบบแผนในการดำเนินโครงการที่เป็นที่ยอมรับของผู้เกี่ยวข้องจะเกิดขึ้นจากการมี แผนการทำงาน รวมถึงการสนับสนุนจากฝ่ายบริหาร

แบบแผนในการดำเนินโครงการนี้จะรวมถึงวิธีการปรับปรุงระบบการตรวจสอบที่มีอยู่ในปัจจุบัน และมีการตั้งเป้าหมายด้วย

แผนงานควรแสดงตารางการทำงานที่สามารถปฏิบัติได้จริงในทางปฏิบัติ และเป้าหมายของแต่ละขั้นตอนซึ่งจะทำให้สามารถประเมินผลความก้าวหน้าของงานได้

สรุป

การตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงาน ทำให้ทราบถึงปริมาณการใช้พลังงาน และบริเวณหรืออุปกรณ์ที่มีการสูญเสียพลังงานเพื่อที่จะกำหนดหลักเกณฑ์สำหรับการวางแผนอนุรักษ์พลังงานทำให้เห็นความคุ้มค่าในการลงทุนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานพร้อมค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ดังนั้นการเลือกเครื่องมือวัดควรเลือกให้เหมาะสมกับค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่ไม่สามารถซื้อหรือไม่คุ้มค่าที่จะติดตั้งมิเตอร์ย่อยอาจใช้เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียวในการตรวจวัดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล (Data Logger) จะวัดค่าของไฟฟ้า อุณหภูมิ ก๊าซ ใช้น้ำและอื่นๆ โดยอัตโนมัติและเก็บบันทึกไว้สำหรับประมวลผลเพื่อให้ทราบรายละเอียดของการใช้งานตามช่วงเวลาต่างๆ โดยปกติการวัดพลังงานไฟฟ้าจะใช้หน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง

การใช้กราฟช่วยในการวิเคราะห์แนวโน้มประสิทธิภาพพลังงาน จะเป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการประเมินผลจากข้อมูล วิธีการต่างๆ สามารถใช้ในการให้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพพลังงานต่อเวลา และสามารถใช้ในการคาดการณ์แนวโน้มของการใช้พลังงานในอนาคตได้ แผนภูมิบางประเภทยังสามารถที่จะใช้หาค่าดัชนีการใช้พลังงานได้สามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามการใช้พลังงาน และประเมินปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้หรือปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปได้ที่นิยม และง่ายในการนำไปใช้งานได้แก่แผนภูมิ CUSUM แผนภูมิ CUSUM จะใช้การคำนวณหาผลรวมสะสมของค่าความแตกต่าง (The Cumulative Sum of Differences) ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้จริง และปริมาณพลังงานที่ใช้โดยเฉลี่ยซึ่งได้จากแผนภูมิการกระจายแล้วนำมาพลอต กับช่วงเวลาการผลิตหรือการทำงานของโรงงานหรืออาคาร

3.11 กิจกรรม (Activity)

1. จงบอกชื่อเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าหรือวัดระบบไฟฟ้า และวิธีการวัดอย่างน้อย 3 ชนิด
2. จงบอกมาตรการ และวิธีการเพื่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า
ในโรงงานหรืออาคารอย่างน้อย 3 เรื่อง

เฉลยกิจกรรม

1. จงบอกชื่อเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าหรือวัดระบบไฟฟ้าและวิธีการวัดอย่างน้อย 5 ชนิด

ตอบ

1. แอมมิเตอร์แบบคล่องวัดใช้ในการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) ซึ่งไหลเข้าสู่อุปกรณ์โดยปกติจะใช้สำหรับสายไฟฟ้าเดี่ยว ดังนั้น ค่าที่ได้จะเป็นค่ากระแสเข้าแต่ละเฟสการใช้งานแอมมิเตอร์แบบคล่องวัดทำได้โดยเปิดแกนเฟอร์ไรต์คล่องกับตัวนำไฟฟ้าหลังจากนั้นเลือกย่านการตรวจวัดที่เหมาะสมอ่านค่าแอมแปร์ที่แสดง

ตอนที่ 3 บทที่ 3 การตรวจวัด และการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า

2. เครื่องมือวัดไฟฟ้าที่ใช้ในการคิดค่าไฟฟ้าจะใช้ในการตรวจวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงเวลา และจะแสดงในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง

3. มิเตอร์วัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะใช้ในการตรวจวัดค่ากิโลวาร์เฉลี่ยในช่วง 15 นาที ที่สูงสุด และจะแสดงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และกิโลวาร์

4. เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ปรึกษาด้านพลังงานจะนิยมใช้เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้ามากที่สุดในการอ่านค่ากำลังไฟฟ้า (วัตต์หรือกิโลวัตต์ หรือ กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ที่เข้าสู่อุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแอมป์มิเตอร์แบบคล่องวัดและโวลต์มิเตอร์เพื่อแสดงค่ากำลังไฟฟ้าโดยตรง และอาจจะมีสวิตช์สำหรับเลือกย่านการวัดด้วย

5. มิเตอร์วัดความส่องสว่างมิเตอร์วัดความส่องสว่างใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง หรือ ค่าความส่องสว่าง โดยแสดงในหน่วยลักซ์ (Lux) (ลูเมน/ตารางเมตร)

จึงบอกมาตรการและวิธีการเพื่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในโรงงานหรืออาคารมาอย่างน้อย 3 เรื่อง

ตอบ

ภาระของหม้อแปลงไฟฟ้า

- มีโอกาสที่จะตัดไฟจ่ายหม้อแปลงในช่วงที่ไม่มีการใช้งานได้หรือไม่
- พิจารณาว่าสามารถถอดหม้อแปลงบางลูกที่ไม่ได้ใช้งานออกจากระบบได้หรือไม่

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

- เพื่อลดความสูญเสียขณะมีภาระของหม้อแปลงไฟฟ้า
- เพื่อลดความสูญเสียในระบบจ่ายความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- เพื่อเสนอแนะทางเลือกในการลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการจัดการทำงานของเครื่องจักรให้เหมาะสม
- เพื่อพิจารณาการใช้อุปกรณ์ควบคุมความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ศักยภาพในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินไปพิจารณาโอกาสในการลดขนาดของมอเตอร์ลงตามความเหมาะสมระบบแสงสว่าง โดยพิจารณาดังนี้

- เปลี่ยนไปใช้หลอดประสิทธิภาพสูง
- นำแสงสว่างจากภายนอกเข้ามาใช้งานในบริเวณที่เหมาะสม

เครื่องอัดอากาศ

- คำนวณค่าใช้จ่ายที่เสียไปจากการรั่ว
- ตรวจสอบขนาดถึงความดันให้เหมาะสมกับความต้องการ

ระบบปรับอากาศ

- สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ลมกลับ และอากาศจากภายนอกได้หรือไม่?
- มีแนวทางในการใช้ระบบปรับปริมาณลมหรือไม่ (Variable Air Flow System)
- ความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบเข้ากับปั๊มน้ำหล่อเย็น
- สามารถเปลี่ยนใช้อุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงกับเครื่องทำน้ำเย็นได้หรือไม่?

เอกสารอ้างอิง

- [1] Timothy L. Skvarenina and William E. DeWitt. Electrical Power and Control, Printice Hall, 2004.
- [2] วชิระ มั่งวิฑิตกุล, กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม, ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย
- [3] วิทยา ยงเจริญ. พื้นฐานการทำความเย็นและการปรับอากาศ (ภาคทฤษฎี) : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) : กรุงเทพฯ, 2547.
- [4] ศิริพรรณ ธงชัย และ พิชัย อัมมมงคล. การอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า. : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- [5] การตรวจวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคาร, เอกสารเผยแพร่, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน
- [6] โอกาสการดำเนินทางธุรกิจด้านการจัดการพลังงานของโรงงานควบคุม (TB1- F3- Thai), ศูนย์ทรัพยากรฝึกอบรมเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ,กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [7] การตรวจติดตามประสิทธิภาพพลังงาน (TB1- G8- Thai), ศูนย์ทรัพยากรฝึกอบรมเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน , กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [8] การตรวจวัดการใช้พลังงาน (TB1- G9- Thai), ศูนย์ทรัพยากรฝึกอบรมเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน , กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [9] เอกสารการอนุรักษ์พลังงานของญี่ปุ่น

ภาคผนวก

การตรวจวัดระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
แรงดันไฟฟ้า		
กระแสไฟฟ้า		
กำลังไฟฟ้า		
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า		

การตรวจวัดระบบปรับอากาศแบบหน่วยเดียว

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
ค่าทางไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมจ่าย		
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมกลับ		
ความเร็วลมและพื้นที่ช่องจ่ายลมเย็น		
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าคอนเดนเซอร์		
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมภายนอก		

การตรวจวัดเครื่องส่งลมเย็น

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมจ่าย		
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมกลับ		
ความเร็วลมและพื้นที่ช่องจ่ายลมเย็น		
ค่าทางไฟฟ้าของพัดลม - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
ความดันตกคร่อมแผงกรองอากาศ		
ความดันตกคร่อมท่อน้ำเย็น		
อัตราการไหลของน้ำเย็น		

การตรวจวัดเครื่องทำน้ำเย็น

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
ค่าทางไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
อัตราการไหลของน้ำเย็น		
อุณหภูมิน้ำเย็นด้านเข้าและด้านออก		
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น		
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นด้านเข้าและด้านออก		
ค่าทางไฟฟ้าของเครื่องน้ำเย็นและเครื่องน้ำหล่อเย็น - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
ค่าทางไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อน		

การตรวจวัดระบบแสงสว่าง

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
ค่าทางไฟฟ้าของระบบแสงสว่าง - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
ค่าความส่องสว่าง		
ขนาดพื้นที่ของแต่ละส่วน		

การตรวจวัดระบบปรับอากาศ

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
ค่าทางไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
ความเร็วลมและพื้นที่ของช่องอากาศเข้า		
อุณหภูมิและความชื้นของอากาศเข้า		
ช่วงเวลาการตัดต่อของเครื่องปรับอากาศ		

การตรวจวัดปั๊มน้ำ

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
ค่าทางไฟฟ้าของปั๊ม - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
ความเร็วรอบมอเตอร์		
ความดันด้านส่งและด้านดูดของปั๊ม		

การตรวจวัดมอเตอร์ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ตรวจวัด	ค่าที่ตรวจวัดได้	เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
ค่าทางไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้า - กำลังไฟฟ้า		
ความเร็วรอบของมอเตอร์		