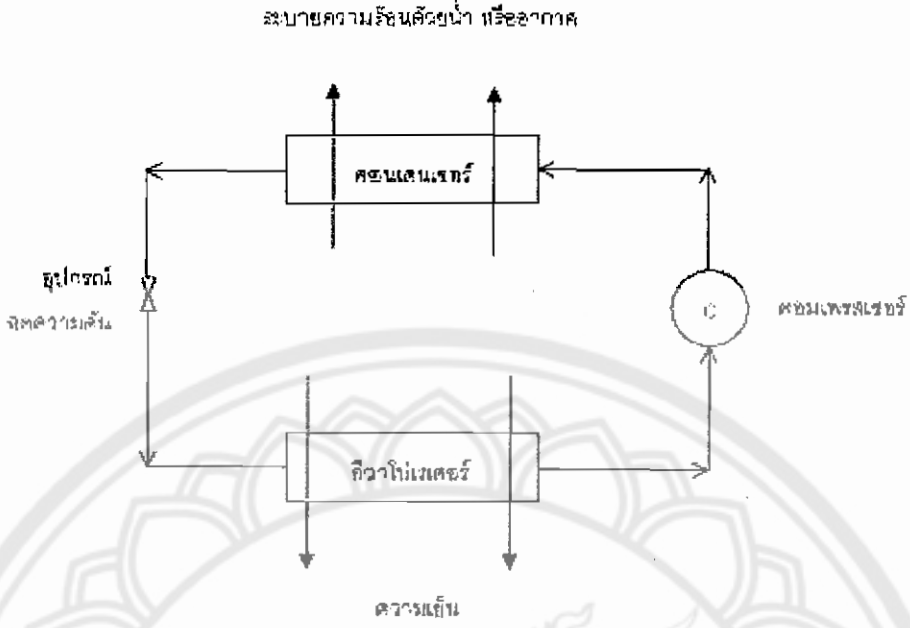
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ระบบทำความเย็น

ระบบการทำความเย็นมีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวันของชาวไทยในยุคปัจจุบัน เนื่องจากประเทศไทยมีสภาวะอากาศค่อนข้างร้อน ดังนั้นระบบการทำความเย็นด้วยเครื่องปรับอากาศจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยผ่อนคลายความร้อนได้ เครื่องปรับอากาศมีชื่อเรียกต่างกันตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ และการใช้งาน เช่น เครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่าง (Window Type) คือ เครื่องปรับอากาศที่ผลิตมาเพื่อติดตั้งที่หน้าต่างได้ เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) คือ เครื่องปรับอากาศที่ผลิตให้ส่วนของคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์แยกจากกัน เพื่อให้สามารถติดตั้งส่วนที่มีเสียงดัง และต้องระบายความร้อนภายนอกห้องโดยไม่รบกวนบรรยากาศภายในห้อง เป็นต้น

การทำความเย็นของระบบปรับอากาศทำงานด้วยหลักการระเหยของสารทำความเย็นคือ เมื่อสารทำความเย็นระเหยและทำความเย็นแล้ว ต้องนำไปควบแน่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากสารทำความเย็นมีราคาแพงมาก ประกอบกับการให้ระเหยทิ้งไปในอากาศส่งผลกระทบให้เกิดมลภาวะต่อสภาพแวดล้อมอีกด้วย ในการควบแน่นอาศัยการเพิ่มความดันให้กับไอระเหย หรืออัด (Press) ไอ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า คอมเพรสเซอร์ (Compressor) จนไอระเหยนั้นกลายเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่ง ในระยะอัดนี้ ไอระเหยจะคายความร้อนออกมาด้วย จึงต้องมีวิธีการในการระบายความร้อนนี้ออกไป โดยการใช้อากาศ (Air-cooled) หรือ น้ำ (Water-cooled)ระบายความร้อน เมื่อสารทำความเย็นกลายเป็นของเหลวแล้วการทำให้ของเหลวระเหยเพื่อทำความเย็นอีกครั้งใช้วิธีการลดความดันลงโดยผ่านอุปกรณ์ลดความดัน เครื่องปรับอากาศขนาดเล็กมักใช้อุปกรณ์เรียกว่า วาล์วลดความดัน (Thermal Expansion Valve) หรือบางทีใช้ขดท่อทองแดงเล็กๆ (Capillary Tube) ที่ให้ค่าแรงเสียดทานที่พอเหมาะก็ใช้ในการปรับลดความดันนี้ได้ดี วงจรการทำความเย็น (Refrigeration Cycle) ดังกล่าวข้างต้นสามารถแสดงการทำงานได้ดัง รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรการทำงานของระบบปรับอากาศ

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบทำความเย็น คือ

1. คอมเพรสเซอร์ (Compressor) ทำหน้าที่ดูดน้ำยาในสภาพที่เป็นไอจากเครื่องระเหย และอัดให้มีความดันสูงขึ้นจนสามารถควบแน่นได้ที่คอนเดนเซอร์

2. คอนเดนเซอร์ (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากน้ำยา เพื่อควบแน่นกลายเป็นของเหลวและส่งเข้ารีซีฟเวอร์

3. รีซีฟเวอร์ (Receiver) ทำหน้าที่สะสมของเหลวที่ออกจากคอนเดนเซอร์เพื่อจ่ายให้แก่เครื่องระเหยได้ตลอดเวลาในการทำงาน

4. ลิ้นลดความดัน (Expansion valve หรือ Refrigerant control) ทำหน้าที่ลดความดันของน้ำยาที่ออกจากคอนเดนเซอร์ เพื่อจ่ายให้กับเครื่องระเหย

5. เครื่องระเหย (Evaporator) ทำหน้าที่ดูดความร้อนออกจากบริเวณรอบๆ เพื่อทำให้น้ำยาเปลี่ยนสถานะเป็นไอและทำให้บริเวณใกล้เคียงเกิดความเย็นขึ้น

ระบบทำความเย็นที่สำคัญมีดังนี้

2.1.1 ระบบปรับอากาศที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็น (Water Chiller) รูปที่ 2.2

โครงสร้างของเครื่องทำน้ำเย็น เหมือนกับเครื่องปรับอากาศทุกชนิด คือ มีวงจรการทำความเย็น (Refrigeration Cycle) เหมือนเดิม แตกต่างกันที่อีวาโปเรเตอร์ทำความเย็นให้กับน้ำก่อน เมื่อน้ำเย็นแล้ว จึงใช้น้ำเป็นตัวกลางถ่ายทอดความเย็นต่อไป สาเหตุที่ต้องใช้น้ำเป็นตัวกลางถ่ายทอดความเย็นนี้ เนื่องจากน้ำสามารถสูบจ่ายไปได้ไกลๆ การควบคุมปริมาณน้ำทำได้ง่ายมีผลทำให้ควบคุม

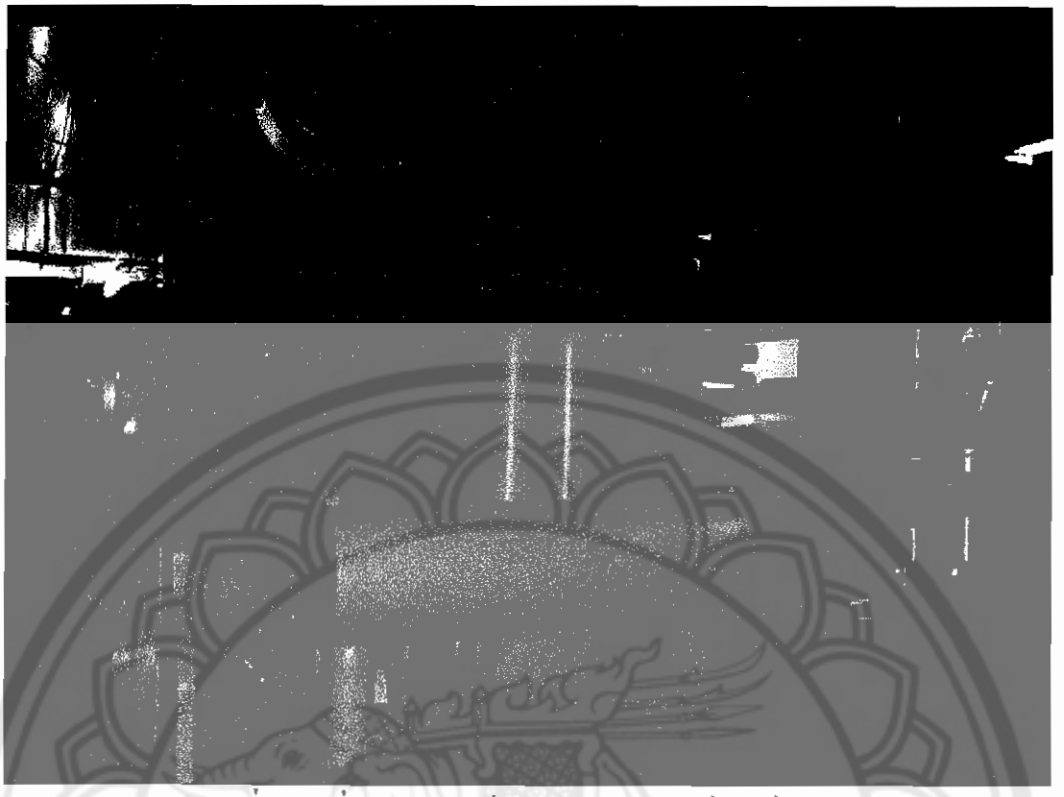
อุณหภูมิได้ง่ายและแม่นยำขึ้น การที่ไม่มีคอมเพรสเซอร์อยู่กับ FCU หรือ AHU เหมือนกับเครื่อง Packaged Unit ก็ทำให้ไม่มีปัญหาเสียงดังรบกวนจากคอมเพรสเซอร์

2.1.2 เครื่องทำน้ำเย็นระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooled Water Chiller)

ลักษณะของงานที่ใช้เครื่องทำน้ำเย็นแบบนี้ จะเป็นลักษณะของงานที่มีความต้องการความเย็นไม่มากนัก (มักจะไม่เกิน 500 ตันความเย็น) ซึ่งต้องการความสะดวกในการติดตั้ง และต้องการลดภาระการดูแลรักษา หรือจะใช้ในโครงการที่ขาดน้ำ หรือไม่มีน้ำที่มีคุณภาพพอจะมาใช้ระบายความร้อนของเครื่องได้ อย่างไรก็ตาม เครื่องที่ระบายความร้อนด้วยอากาศก็ย่อมที่จะกินไฟมากกว่า เครื่องที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ น้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็น จะถูกเครื่องสูบน้ำเย็น (Chilled Water Pump)รูปที่ 2.3 จ่ายเข้าสู่ระบบไปยัง FCU และ AHU โดยอุณหภูมิน้ำเย็นนี้จะอยู่ที่ประมาณ 7 องศาเซลเซียส เมื่อใช้งานผ่าน FCU หรือ AHU แล้ว จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นประมาณ 12 องศาเซลเซียส ก็จะถูกส่งกลับมายังเครื่องทำน้ำเย็นอีกครั้งหนึ่งระบบส่งน้ำเย็นนี้อาศัยท่อน้ำเย็น (Chilled Water Pipe) มีทั้งท่อส่งน้ำเย็น (Supply Chilled Water Pipe) และท่อน้ำเย็นกลับ (Return Chilled Water Pipe) ซึ่งจะต้องหุ้มฉนวน เพื่อป้องกันน้ำเกาะท่อ (Condensation) เนื่องจากความเย็นของท่อ จะทำให้ความชื้นที่อยู่ในอากาศมาเกาะเป็นหยดน้ำที่ท่อคอมเพรสเซอร์ที่ใช้มักจะเป็นคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบ หากมีขนาดใหญ่หน่อยก็อาจจะมีชนิดที่เป็นสกรู ส่วนชนิดที่เป็นหอยโข่ง จะมีใช้เฉพาะเครื่องขนาดใหญ่จริงๆ เท่านั้นที่ออกแบบมาใช้แถบตะวันออก เราจะไม่เห็นนำมาใช้ในประเทศไทย

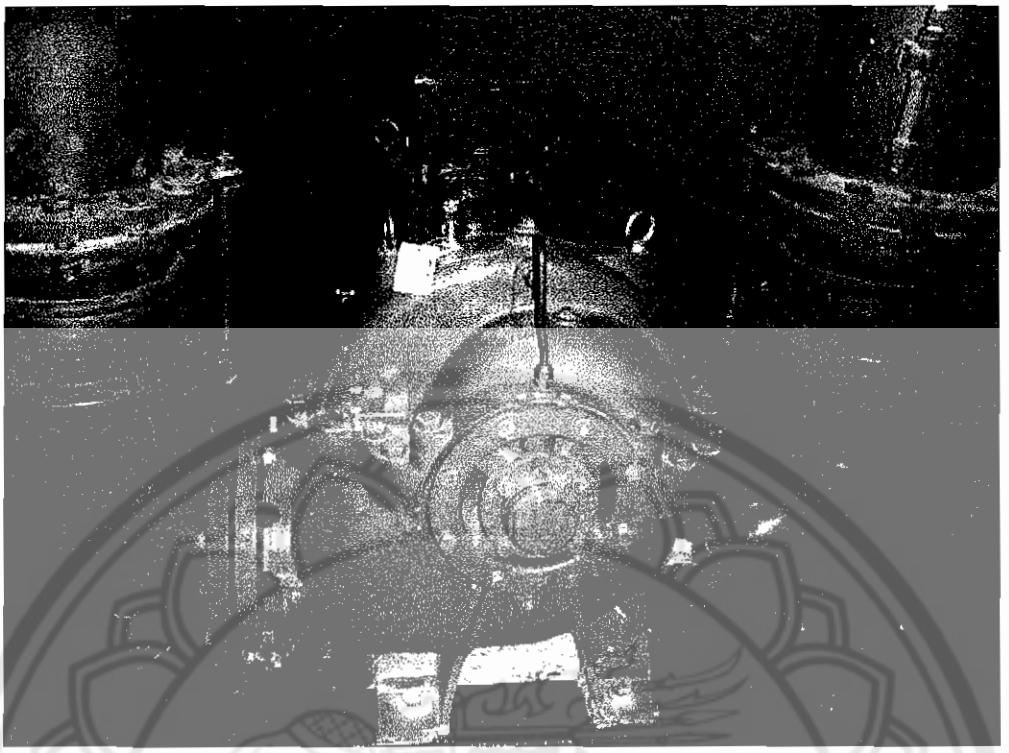
2.1.3 เครื่องทำน้ำเย็นระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooled Water Chiller)

ในกรณีที่โครงการมีขนาดใหญ่ ต้องการความเย็นมาก นิยมใช้เครื่องทำน้ำเย็นชนิดนี้ เพราะมีเครื่องทำน้ำเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงให้เลือกใช้ (0.62 - 0.75 กิโลวัตต์/ตัน) ทำให้ได้ระบบปรับอากาศที่กินไฟน้อยกว่าเครื่องประเภทอื่น อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ระบบนี้จะต้องมีหอระบายความร้อน และต้องมั่นใจว่ามีน้ำเพียงพอ มีคุณภาพเหมาะสมกับการนำมาเติมที่หอระบายความร้อน ลักษณะโครงสร้างของเครื่องทำน้ำเย็นยังคงเหมือนกับเครื่องแบบ Air-cooled เพียงแต่แทนที่จะระบายความร้อนด้วยอากาศ ก็กลายเป็นการระบายความร้อนด้วยน้ำเท่านั้นเอง ระบบท่อน้ำระบายความร้อน หรือที่เรียกว่า Condenser Water ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำระบายความร้อน (Condenser Water Pump) รูปที่ 2.4 ทำหน้าที่สูบน้ำเพื่อมาระบายความร้อนให้กับคอนเดนเซอร์ของเครื่องทำน้ำเย็น คอมเพรสเซอร์จะมีทั้งชนิดลูกสูบ, สกรู และแบบหอยโข่ง



รูปที่ 2.2 เครื่องทำความเย็น(โรงแรม ฮอลิเดย์ อินน์ สีลม)

รูปที่ 2.3 ปั๊มด้านน้ำเย็น (โรงแรม ฮอลิเดย์ อินน์ สีลม)



รูปที่ 2.4 ปั๊มด้านน้ำหล่อเย็น (โรงแรม ฮอลิเดย์ อินน์ สีลม)

2.2 ปั๊มน้ำ

เครื่องสูบน้ำหรือปั๊มจัดอยู่ในกลุ่มเครื่องจักรกลของไหล เครื่องสูบน้ำเป็นอุปกรณ์ที่พลังงานกลถูกถ่ายทอดจากชิ้นส่วนที่ทำงานของอุปกรณ์ไปยังของเหลวหรือเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานของเหลวซึ่งอยู่ในรูปพลังงานศักย์ พลังงานจลน์ และพลังงานความร้อนของของเหลวที่ไหลโดยพลังงานของของเหลวที่ทางออกของเครื่องสูบจะมากกว่าที่ทางเข้า ถ้าพิจารณาตามลักษณะการใช้งานเครื่องสูบน้ำ คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการขนถ่ายหรือลำเลียงของเหลวผ่านระบบท่อปิดจากตำแหน่งหนึ่ง ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ในกรณีที่ของเหลวนั้นไม่สามารถไหลได้ตามธรรมชาติ หรือไหลไปได้แต่ไม่เพียงพอ

การแบ่งประเภทของเครื่องสูบน้ำตามหลักการส่งพลังงานไปสู่ของเหลวแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. Displacement pumps เครื่องสูบชนิดนี้จะส่งพลังงานไปสู่ของเหลวเป็นจังหวะ โดยอาศัยแรงอัดลูกสูบหรือใบพัด จะทำให้ความดันของของเหลวสูงขึ้นโดยตรง โดยจำแนกได้เป็นสองแบบใหญ่ๆ ได้แก่ เครื่องสูบแบบลูกสูบชัก (reciprocating pump) และเครื่องสูบแบบโรตารี (rotary pump)

2. Dynamic pumps เครื่องสูบชนิดนี้จะส่งพลังงานไปสู่ของเหลวอย่างต่อเนื่องทำให้ของเหลวมีความเร็วสูงขึ้น จากนั้นความเร็วของของเหลวจะถูกลดลงทันที จึงทำให้ความดันของของเหลวในเครื่องสูบเพิ่มขึ้น จำแนกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ เครื่องสูบแบบหอยโข่ง (centrifugal pump) และ เครื่องสูบชนิดพิเศษ (special effect pump)

ในการทดลองนี้ใช้เครื่องสูบแบบหอยโข่ง สมรรถนะของเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงเครื่องหนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับความเร็ว (speed ; n) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (impeller diameter ; D) โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการทำงานที่สำคัญของเครื่องสูบกับความเร็ว และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด สามารถหาได้จากกฎของปั๊ม (pump laws) คือ

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1 D_1}{n_2 D_2} \qquad (2.1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2 D_1^2}{n_2^2 D_2^2} \qquad (2.2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3 D_1^3}{n_2^3 D_2^3} \qquad (2.3)$$

โดยที่ Q = อัตราการไหล

H = เฮด

P = กำลังการขับ

วิธีการเลือกใช้ปั๊มน้ำ

ผู้ผลิตปั๊มน้ำหรือเครื่องสูบน้ำจะระบุสมรรถนะของเครื่องสูบแต่ละชนิดแต่ละรุ่นรุ่นที่ผลิตขึ้นมาในรูปของเส้นกราฟแสดงสมรรถนะได้แก่ กราฟระหว่างเฮดกับอัตราการสูบ กราฟระหว่างกำลังที่ใช้ขับเครื่องสูบกับอัตราการสูบ กราฟระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องสูบกับอัตราการสูบ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วผู้ผลิตเครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงแต่ละรายพยายามผลิตเครื่องสูบหลายรุ่น ให้ครอบคลุมช่วงความต้องการ (เฮดและอัตราการสูบ) ที่กว้างที่สุด จึงทำให้มีเครื่องสูบหลายรุ่นของผู้ผลิตแต่ละรายให้เลือก ดังนั้นเพื่อให้สามารถเลือกได้สะดวก ผู้ผลิตแต่ละรายจึงรวมเครื่องสูบทุกรุ่นของแต่ละชนิดเข้าไว้ในกราฟแผ่นเดียวกัน แต่การเลือกรุ่นของเครื่องสูบตามกราฟรวมหลายรุ่น กราฟที่แสดงการเลือกเบื้องต้นที่แสดงว่าเครื่องสูบรุ่นที่เลือกสามารถตอบสนองความต้องการของระบบการสูบเท่านั้น มิได้หมายความว่าจะเป็นรุ่นของเครื่องสูบที่เหมาะสมที่สุด การพิจารณาว่าเป็นเครื่องสูบที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่นั้นต้องนำกราฟสมรรถนะของเครื่องสูบมาพิจารณาพร้อมกับกราฟเฮดของระบบเพื่อหาจุดทำงานและดูว่าจุดทำงานนั้นเป็นจุดที่ดีที่สุด (จุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด) หรือไม่ และพิจารณาในกรณีต่างๆ เช่น ถ้ากราฟเฮดของระบบเปลี่ยนแปลงอัตราการสูบของเครื่องสูบที่เลือกจะเปลี่ยนแปลงมากน้อยอย่างไรเป็นต้น

2.3 การทำงานของระบบ VSD

VSD เป็นอักษรย่อของคำว่า Variable Speed Drive บางท่านเรียกว่า VFD ซึ่งมาจากคำว่า Variable Frequency Drive บ้างก็เรียก Inverter สั้นๆ VSD มีหน้าที่ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มันควบคุมอยู่ ในที่นี้ คือมอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำ หรือพัดลมการติดตั้ง VSD มีวัตถุประสงค์ เพื่อการประหยัดพลังงานและเพื่อคุมการทำงานของระบบให้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น VSD ไม่ใช่สิ่งที่จำเป็นในระบบปรับอากาศ ถึงไม่มี VSD ระบบก็ยังทำงานได้ แต่ในระยะหลังนี้มีการใช้กันมากขึ้น เพราะผู้ใช้เริ่มตระหนักถึงการความสำคัญของพลังงาน

ในภาษาไทยมักเรียก VSD ว่าเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์อิเลคโทรนิค แต่อันที่จริงเราสามารถปรับความเร็วรอบอุปกรณ์ได้หลายวิธี โดยวิธีทางกล เช่น ใช้เกียร์ทดรอบ ใช้ Pulley and Belt หรืออื่นๆ แต่วิธี VSD นี้เป็นการปรับที่ต้นทาง โดยเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งเป็นตัวขับอุปกรณ์นั้นๆ โดยตรง ข้อดีของมันคือไม่มี Mechanical loss เนื่องจากชุดส่งถ่ายกำลัง ถือว่า VSD มีประสิทธิภาพดีที่สุด หากคิดจะปรับเปลี่ยนความเร็วรอบอุปกรณ์ใดๆ

VSD สามารถประหยัดพลังงานได้ แต่ไม่ใช่ในทุกกรณีในระบบและลมบางประเภท หรือการออกแบบที่ under size เกินไป การติด VSD ย่อมไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ การตัดสินใจว่าควรจะติดตั้ง VSD หรือไม่จะต้องมีการวิเคราะห์หลายๆอย่าง จึงจะบอกได้ว่า VSD สามารถประหยัดพลังงานได้หรือไม่ ในกรณีที่ VSD สามารถประหยัดพลังงานได้ ก็ต้องกลับมาคิดอีกครั้งว่าคุ้มทุนหรือไม่ แล้วระยะเวลาคืนทุนนานหรือไม่ จึงจะสามารถบอกได้ว่าควรติดตั้ง VSD หรือไม่

หลักในการคิดระบบ VSD สำหรับระบบปรับอากาศ

ในการใช้งานในระบบ VSD จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจระบบ และอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ของระบบ ความยากง่ายของระบบ VSD ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่นจำนวนของเครื่องสูบน้ำ พื้นที่ที่ต้องการควบคุม หรือการสามารถติดต่อสื่อสาร ส่งผ่านข้อมูลระหว่างพื้นที่ควบคุมกับระบบควบคุม มีส่วนประกอบพื้นฐานสำคัญ 4 อย่าง ที่จำเป็นต้องมีในระบบ VSD

- ชุดควบคุม Variable Speed Drive ถือว่าเป็นสมองของระบบ
- ตัว Variable Speed Drive ถือว่าเป็นกล้ามเนื้อคอยบังคับระบบ
- ชุดตรวจจับและส่งข้อมูล (Sensor / Transmitter) เป็นประสาทสัมผัสคอยรับรู้ข้อมูล
- เครื่องสูบน้ำและมอเตอร์ (Pump และ Motor) เป็นหัวใจของระบบ

ส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้ จะต้องเชื่อมต่อกันด้วยระบบไฮดรอลิค และระบบอิเลคโทรนิคอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่เราจะสามารถประหยัดพลังงานได้มากที่สุด โดยสามารถตอบสนองความต้องการของระบบได้อย่างถูกต้องแน่นอนเราต้องเข้าใจแต่ละส่วนประกอบเหล่านี้ให้ชัดเจนเสียก่อนว่ามันจะทำงานร่วมกันอย่างไร ในระบบเดียวกัน เพื่อให้ทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.3.1 ประเภทของระบบ VSD

ระบบVSD นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ ตามกระบวนการควบคุมคือ

- ระบบแปรเปลี่ยนปริมาณน้ำ (Variable Water Volume ,VWV) ระบบปรับอากาศแบบนี้จะควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำเย็น ให้ส่งน้ำเย็นไปยังเครื่องส่งลมเย็นต่าง ๆ ของอาคารในปริมาณที่สอดคล้องกับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัย วาล์วควบคุม 2 ทาง (2 Way Control Valve) ลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับระบบแบบแปรเปลี่ยนปริมาณอากาศ ทั้งนี้เป็นไปตามกฎของปั๊ม (Pump Laws) ที่ว่า กำลังงานแปรผันกับความเร็วรอบยกกำลังสาม

- ระบบแปรเปลี่ยนปริมาณอากาศ (Variable Air Volume ,VAV) เป็นระบบที่ออกแบบให้จำนวนลมเย็นที่จะเข้าสู่ห้องปรับอากาศแปรเปลี่ยนไปตามภาระความร้อนที่เข้าในพื้นที่ปรับอากาศโดยสามารถควบคุมเป็นจุดย่อย ๆ ได้ จะเห็นได้ว่าเป็นวิธีที่แก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบปริมาตรลมส่งคงที่ได้ หลักการทำงานของระบบ VAV คือ จะมีอุปกรณ์ควบคุมปริมาณลมหลาย ๆ กล่อง โดยแต่ละกล่องจะจ่ายลมไปยังหัวจ่ายลมตามจำนวนที่แต่ละพื้นที่ต้องการอย่างเหมาะสม การใช้ระบบ VAV จะสามารถควบคุมอุณหภูมิในพื้นที่ปรับอากาศได้ดีและลดพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศได้โดยตรง แต่จะต้องพิจารณาใช้ระบบที่เหมาะสมและราคาในการลงทุนของทั้งระบบยังสูงมาก

- ระบบแปรเปลี่ยนปริมาณสารทำความเย็น (Variable Refrigerant Volume , VRV) คือระบบปรับอากาศที่ใช้น้ำยาปรับอากาศเป็นสื่อความเย็น โดยมีความสามารถปรับปริมาณน้ำยาทำความเย็นที่ส่งออกจากตัวคอมเพรสเซอร์เข้าสู่ Fan Coil เปลี่ยนแปลงตามความต้องการระบบนี้ใช้พลังงานน้อยกว่าระบบ CRV ที่ปริมาณน้ำยาทำความเย็นที่ส่งออกจากคอมเพรสเซอร์จะมีปริมาณคงที่ตลอดเวลา การที่ระบบ VRV สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำยาทำความเย็นส่งผลให้สามารถควบคุมอุณหภูมิในพื้นที่ปรับอากาศได้ดีกว่าระบบเดิม

โดยในที่นี้จะทำการศึกษาระบบแปรเปลี่ยนปริมาณน้ำ (Variable Water Volume ,VWV) เนื่องจากที่โรงแรม ฮอลิเดย์ อินน์ สีลม ได้นำอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์มาติดเข้ากับมอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำเย็นเพื่อที่จะควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นให้เป็นตามภาระการทำงานที่เกิดขึ้นจริง

2.3.2 ส่วนประกอบของระบบ VSD

1. ชุดควบคุมเครื่องสูบน้ำ (Pump Controller)

ระบบควบคุมเป็นหัวใจที่สำคัญมากๆ ในการใช้ VSD ควรจะมีความยืดหยุ่นพอสมควร เนื่องจากระบบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และมีการเปลี่ยนลักษณะซับซ้อน กรณีที่มีเพียง 1 พื้นที่ เครื่องสูบน้ำเพียง 1 ชุด การควบคุมสามารถกำหนดให้ง่ายๆ ไม่ซับซ้อนได้ แต่หากมีจำนวนเครื่องมากกว่า 1 และมีหลายๆพื้นที่ที่ต้องทำการควบคุมระบบควบคุมยิ่งต้องซับซ้อนขึ้นไปอีก เพื่อทำการเพิ่มลดจำนวนเครื่องสูบน้ำ รวมทั้งสั่งงานให้ความเร็วเพิ่มลดเพื่อจ่ายการความเย็นได้ตามที่ต้องการ ตัว

ตรวจจับสัญญาณ(sensor)เป็นอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณมาควบคุม VSD ชุด Software Program เพื่อมาสั่งการชุดควบคุมดังกล่าว จะได้รับสัญญาณจาก Controller เพื่อเปลี่ยนจุด Set Point หรือเพิ่ม / ลด ความเร็ว หรือเพิ่ม / ลด เครื่องสูบน้ำหรือควบคุมพื้นที่แตกต่างกันหลายพื้นที่ หรือตรวจสอบความผิดปรกติหรืออาการใดๆ

หน้าที่ของ Pump Controller

- เป็นตัวสั่งการ Variable Speed Drive รวมทั้งส่งสัญญาณให้ทำการเปิด ปิด เพิ่ม ลด ความเร็ว หรือสลับตัว VSD
- ต้องออกแบบในแบบป้องกันไม่ให้เครื่องสูบน้ำทำงานที่จุดที่ไม่เหมาะ หรือจุดที่เครื่องสูบน้ำจะเสียหายได้เช่นทำงานเลยจุด " End of Curve "
- Pump Controller ควรจะออกแบบให้สั่งการให้เครื่องสูบน้ำทำงานเฉพาะช่วงที่ประสิทธิภาพสูงสุดเท่านั้น

2. ชุด Variable Speed Drive

ตัว VSD เป็นตัวที่ได้รับความสนใจที่มากสุด ในบรรดาส่วนประกอบที่สำคัญทั้ง 4 อย่าง ทั้งนี้น่าจะเป็นเพราะว่ามันมีมูลค่าสูงที่สุดในส่วนประกอบทั้งหมด VSD ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันและความถี่ใหม่เป็นกระแสไฟตรง โดยภาค rectifier และไปเก็บใน Capacitor และเปลี่ยนแปลงทั้งแรงดันและความถี่อีกครั้งไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยภาค Inverter จะเป็นตัวแปลงกระแสตรงกลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสตามที่ต้องใช้ในมอเตอร์

โดยทั่วไปแล้วมี VSD 3 ประเภท Pulse Width Modulation (PWM), Variable Voltage Inverter (VVI) และ Current Source Inverter (CSI) เราสามารถใช้ทั้ง 3 ประเภทได้กับเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง อย่างไรก็ดี ชนิด PWM และ VVI เป็นชนิดที่นิยมมากที่สุด

3. หน้าที่ของเครื่องตรวจจับและส่งสัญญาณ (Sensors/Transmitter)

Sensor จะส่งสัญญาณไปยัง Pump Controller ซึ่งจะไปสั่งการทำงานของระบบต่อ Sensors หรือตัวตรวจจับสัญญาณเปรียบเสมือนประสาทสัมผัสของระบบ ซึ่งจะต้องตรวจจับ อุณหภูมิ แรงดัน และ / หรือ อัตราการไหลตำแหน่งที่ถูกต้องก็เป็นอีกจุดที่สำคัญที่จะทำให้ระบบทำงานได้ถูกต้องตามความต้องการของระบบจริง และทำงานอย่างเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในการออกแบบอาคารบางอย่าง เราอาจต้องใช้ Sensor หลายจุด วาง ณ หลายตำแหน่ง ซึ่งจะส่งสัญญาณให้ Pump Controller เลือกและทำงานตามพื้นที่ที่คาดว่าเลวร้ายมากมากที่สุด ชนิดของ Sensor ยอดนิยมที่ใช้กันคือ Differential pressure sensor/transmitter ซึ่งเราจะใช้เมื่อต้องการแรงดันตกคร่อมที่คงที่

กรณีที่ใช้ Sensor ชนิดนี้ ตัว Variable speed pump จะจ่ายน้ำเพื่อรักษาแรงดันตกคร่อมและจ่ายปริมาณน้ำตามที่ระบบต้องการ ขณะที่ปริมาณน้ำลดลงในระบบ แรงดันในระบบจะลดลงด้วย

ในลักษณะยกกำลังสอง ซึ่งก็เป็นคุณสมบัติของ Variable speed pump เช่นเดียวกันนอกจากนั้น เมื่อความเร็วเปลี่ยน กำลังงานที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงเป็นยกกำลังสามจากเดิม จะเห็นว่าการปรับความเร็วนั้นสามารถประหยัดพลังงานได้มากเมื่อเทียบกับเครื่องสูบน้ำความเร็วคงที่

แต่ในการใช้ Variable speed pump เราจะต้องแน่ใจว่าระบบจะเป็นชนิด Variable volume system ปกติแล้ว เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) หรือเครื่องทำน้ำร้อน มักไม่แนะนำให้ใช้ระบบ Variable volume เราจึงออกแบบให้ระบบแบ่งเป็นชุด primary / secondary เพื่อแบ่งให้ระบบเป็น constant volume ที่ด้าน primary และเป็น Variable volume ที่ด้าน secondary

ในการใช้งานด้าน secondary การจ่ายน้ำควรจะปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำตามภาระความเย็นจริง ซึ่งทำได้โดยการใช้ 2-way valve ที่เครื่องจ่ายลมเย็น ในกรณีที่ระบบเป็น direct return เราจะวาง differential pressure transmitter ที่ปลายสุดของระบบ แต่หากระบบครอบคลุมพื้นที่กว้างมาก อาจจำเป็นต้องใส่ sensor ดังกล่าวมากกว่า 1 ตัว เราจะต้องมีชุดควบคุม VSD ที่ฉลาดพอที่จะควบคุมทุกพื้นที่ให้ได้ปริมาณน้ำตามต้องการ และหากระบบเป็น reverse return แม้ว่าต้นทุนการก่อสร้างระบบจะสูงกว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดของ sensor ควรจะอยู่บริเวณกลางๆของระบบ

4. ปั๊มและมอเตอร์

หัวใจสำคัญของการจ่ายน้ำคือเครื่องสูบน้ำและมอเตอร์ การรู้เท่าทันคุณสมบัติของเครื่องสูบน้ำและเลือกเครื่องสูบน้ำได้อย่างถูกต้องเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด ทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และหากเราประยุกต์ใช้ VSD เข้ากับเครื่องสูบน้ำดังกล่าวจะยิ่งทำให้ประหยัดพลังงานสูงสุด

โดยทั่วไปเราแบ่งเครื่องสูบน้ำเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเคลื่อนที่ คือ

1. ชนิด Dynamic พลังงานที่ใช้จะไปเพิ่มความเร็วของของเหลว ภายในตัวเครื่องสูบน้ำ ความเร็วนี้จะเปลี่ยนเป็นแรงดัน (Head) ที่ขาออกของเครื่องสูบน้ำ ตัวอย่างของเครื่องสูบน้ำชนิดนี้ได้แก่ เครื่องสูบน้ำ Centrifugal แบบ Single / Double Suction Volute และ Axial flow

2. ชนิด Displacement แรงดันของของเหลวจะเพิ่มขึ้นโดยตรง โดยการเพิ่มแรงดันแก่ของเหลวในพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงอย่างจำกัด จนทำให้ของเหลวนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปด้านออกของเครื่องสูบน้ำ เป็นจังหวะตามการเคลื่อนที่ของพื้นที่ ที่สร้างแรงดันแก่ของเหลว ตัวอย่างของเครื่องสูบน้ำชนิดนี้ได้แก่ เครื่องสูบน้ำแบบ Diaphragm และ Rotary

เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในระบบปรับอากาศ มักจะเป็นชนิดแรก แบบ Centrifugal ชนิด Volute หรือแบบ Axial Flow หลักการคือการใช้แรงเหวี่ยง หรือแรงหนีศูนย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการหมุนรอบแกน ของเหลวที่หมุนรอบแกน จะเกิดแรงหนีศูนย์ออกจากจุดศูนย์กลาง ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหรือแรงดัน ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วของการหมุน

ปัญหาที่มักจะเกิดขึ้นคือ ระบบมีตัวแปรมากมากเกินไป จนทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ระบบจะทำงานที่จุดใดกันแน่ ดังนั้นการเลือกเครื่องสูบน้ำมักจะเป็นประมาณการหากประมาณได้ไม่ใกล้เคียง จะทำให้ระบบไม่ได้ทำงาน ณ จุดที่เลือกที่ประสิทธิภาพสูงได้ แต่จะทำงานที่จุดใหม่ ที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า ทำให้ประสิทธิภาพรวมทั้งระบบต่ำตามประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ แม้จะมี VSD ก็ไม่ทำให้ประสิทธิภาพรวมสูงขึ้นมาได้

2.3.3 การทำงานขั้นพื้นฐานของระบบ VSD (รูปที่ 2.5 และ 2.6)

1. เครื่อง VSD จะรับสัญญาณจาก Sensor ที่บนดึกชั้นบนสุดของอาคารซึ่งเป็น Sensor วัดค่าการไหลของน้ำเย็นชั้นบนสุดของอาคาร (สัญญาณเป็น 4 – 20 mA โดยเทียบเป็น % จาก 0 -100)

2. จากนั้นเครื่อง VSD จะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและทำการตัดคลื่น Sine ของไฟฟ้าทำให้จากปกติอยู่ที่ 50 Hz ลดลงมาตามที่โหลดต้องการ จากนั้นทำการแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสสลับเหมือนเดิม เพื่อทำการส่งไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์ของปั๊มน้ำ (คลื่น Sine ที่ตัดได้เรียกว่า “ คลื่น Sine สังเคราะห์ ”)

3. เมื่อมอเตอร์ของปั๊มน้ำทางด้านส่งน้ำเย็นได้รับกระแสไฟฟ้าที่มี Hz ลดลงทำให้ส่งผลให้รอบมอเตอร์ของปั๊มน้ำหมุนน้อยลงตามโหลด ทำให้การกินไฟฟ้าของมอเตอร์ลดลง(เทียบการกินไฟเป็น KW)

2.4 การคำนวณหาค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

$$N = \frac{120f}{Pole} \qquad (2.4)$$

โดยที่

N = ความเร็วรอบของมอเตอร์

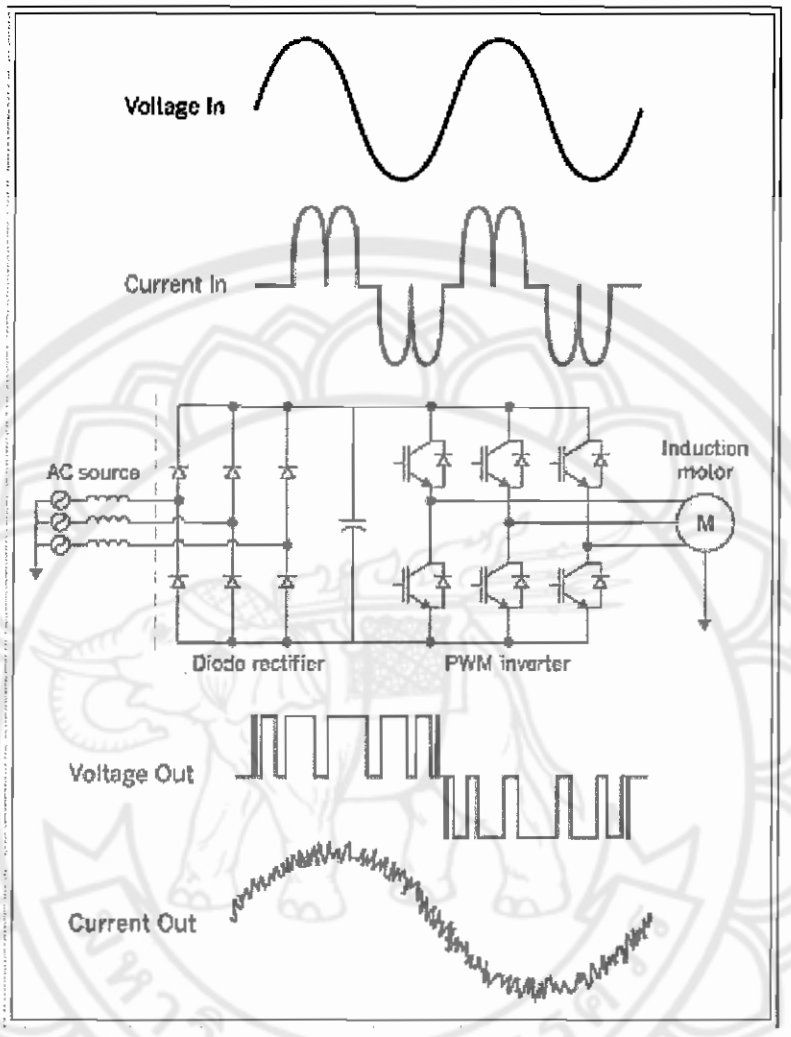
f = ความถี่ของกระแสไฟฟ้า

Pole = จำนวนขั้วของมอเตอร์

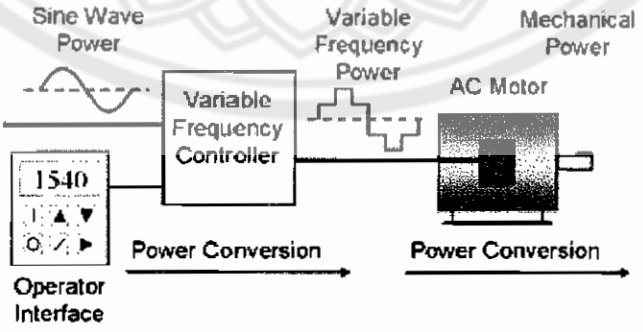
ซึ่งจากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และรอบการทำงานของมอเตอร์จะพบว่าเมื่อความถี่ลดลงจะส่งผลให้รอบการทำงานของมอเตอร์ลดลงตามไปด้วย ซึ่งเมื่อกำลังไฟฟ้าลดลงจะส่งผลให้พลังงานที่ใช้ลดลงตามไปด้วย ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

- อัตราการไหล $\propto$ ความเร็วรอบของมอเตอร์
- แรงดัน $\propto$ อัตราการไหล ^{2}
- กำลังไฟฟ้า $\propto$ แรงดัน X อัตราการไหล

- กำลังไฟฟ้า ∝ ความเร็วรอบของมอเตอร์ [3]



รูปที่ 2.5 การทำงานภายในเครื่อง VSD



รูปที่ 2.6 การทำงานของเครื่อง VSD

2.5 กำลังไฟฟ้า(Electric Power)

บนเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกชนิดจะมีตัวเลขกำกับไว้เสมอ เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดนั้นๆ เช่น หม้อหุงข้าว ขนาด "220 V 800 W" 200 V หมายถึง หม้อหุงข้าวใบนี้ใช้กับไฟที่มีความต่างศักย์ 220 โวลต์ ส่วน 800 W หมายถึง ค่าพลังงานที่หม้อหุงข้าวนี้ใช้ใน เวลา 1 วินาที หรือ เรียกว่ากำลังไฟฟ้า ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ไปในเวลา 1 วินาที เช่น เตารีด 1,000 วัตต์ คือ เมื่อใช้เตารีดนี้จะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 1,000 จูลต่อวินาที หรือ วัตต์

กำลังไฟฟ้า จะมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้าโดยกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า เขียนสมการได้ดังนี้

$$P = VI \qquad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้ P แทน กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น วัตต์
V แทน ความต่างศักย์ที่ต่อกับเครื่องใช้ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์
I แทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์

$$W = P \times t \qquad (2.6)$$

เมื่อกำหนดให้ P แทน กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น วัตต์
W แทน พลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็นจูล
t แทน เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

ดังนั้นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงๆ ถ้าใช้เป็นเวลานานจะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก ซึ่งในการคิดค่าพลังงนไฟฟ้าจะคิดเป็นหน่วยที่ใหญ่กว่าจูล คือกิโลวัตต์ และคิเวลาเวลาเป็นชั่วโมง ดังนั้น หน่วยของพลังงานไฟฟ้าจึงเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ หน่วย หรือยูนิต ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

พลังงานไฟฟ้า(หน่วย) = กำลังไฟฟ้า(กิโลวัตต์) X เวลา (ชั่วโมง)

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในบ้านอ่านได้จากเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้าที่เรียกว่า มาตรไฟฟ้า ซึ่งวัดพลังงานไฟฟ้าเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือหน่วย มาตรไฟฟ้ามีหลายขนาดกำหนดตามปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่านมาตรไฟฟ้า

2.6 การวิเคราะห์มูลค่าทางการเงิน

ถึงแม้ว่าโครงการประหยัดพลังงานจะมีศักยภาพในการประหยัดพลังงานจะมีศักยภาพในการประหยัดพลังงานได้มากก็ตาม แต่เจ้าของอาคารหรือโรงงานมักจะใช้เหตุผลเป็นตัวเงินที่จะได้รับจากการลงทุน โดยโครงการที่ให้ผลตอบแทนทางการเงินคุ้มค่าต่อการลงทุนมากที่สุดมักจะได้รับการพิจารณาก่อน

2.6.1 วิเคราะห์การเงิน

วิธีการวิเคราะห์การเงิน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 กำหนดให้ได้ค่าของเงินคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กลุ่มที่ 2 ค่าของเงินเปลี่ยนแปลงตามเวลา และในแต่ละกลุ่มยังแบ่งออกเป็นหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อจำกัดแตกต่างกัน

1. ค่าของเงินคงที่

   1.1 ระยะเวลาคืนทุน (Simple Pay Back)

   1.2 ผลตอบแทนการลงทุน (Return on Investment หรือ ROI)

2. ค่าของเงินเปลี่ยนแปลงตามเวลา

   2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value หรือ NPV)

   2.2 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return หรือ IRR)

2.6.2 ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่โครงการใช้ในการจ่ายคืนเงินลงทุนเริ่มต้นของโครงการ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินลงทุนเริ่มต้น}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \qquad (2.7)$$

โดยที่ เงินลงทุนเริ่มต้น ประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ ค่าติดตั้ง และค่าบริหารโครงการ เป็นต้น

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิเฉลี่ยต่อปี คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ประหยัดได้เฉลี่ยต่อปีหลังจากหักค่าใช้จ่ายจากการดำเนินการและการบำรุงรักษาแล้ว (ถ้ามี)

ระยะเวลาคืนทุนสำหรับโครงการประหยัดพลังงานที่ยอมรับได้โดยทั่วไปไม่ควรเกิน 5 ปี อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับขนาดของโครงการ ถ้าโครงการมีขนาดใหญ่ เงินลงทุนสูง อายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี ระยะเวลาคืนทุนที่ยอมรับได้อาจจะมากกว่า 5 ปี

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของระยะเวลาคืนทุน (Simple Pay Back)

ข้อดีของระยะเวลาคืนทุน	ข้อจำกัดของระยะเวลาคืนทุน
1. การวิเคราะห์ทำได้ง่าย 2. การวิเคราะห์เบื้องต้นทำได้อย่างรวดเร็ว 3. แสดงผลเข้าใจง่าย (จำนวนปีและจำนวนเดือนที่จะคุ้มทุน)	1. ไม่คำนึงถึงผลประหยัดที่ได้หลังจากที่คืนทุนแล้ว 2. ไม่คำนึงถึงมูลค่าของโครงการ ซึ่งอาจจะมีค่าเหลืออยู่เมื่อสิ้นสุดโครงการ 3. ไม่คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

2.6.3 ผลตอบแทนการลงทุน

ผลตอบแทนการลงทุน (ROI: Return on Investment) คือ ร้อยละของผลประหยัดสุทธิที่ได้รับตลอดอายุการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับเงินลงทุน สามารถคำนวณได้หลายวิธี ในที่นี้ ROI คำนวณจาก

$$\text{ผลตอบแทนการลงทุน (ROI)} = \left[\frac{\text{ผลประหยัดตลอดอายุการใช้งาน} - \text{เงินลงทุน}}{\text{เงินลงทุน}} \right] (100\%)$$

วิธีนี้ลดข้อจำกัดการวิเคราะห์โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน กล่าวคือ ผลตอบแทนการลงทุนจะคำนึงถึงผลประหยัดที่ได้หลังจากที่คืนทุนแล้ว

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของผลตอบแทนการลงทุน (ROI)

ข้อดี ROI	ข้อจำกัด ROI
1. การวิเคราะห์ทำได้ง่าย 2. การวิเคราะห์เบื้องต้นทำได้อย่างรวดเร็ว 3. คำนึงถึงผลประโยชน์ของโครงการตลอดอายุการใช้งาน	1. ไม่คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

2.6.4 มูลค่าปัจจุบัน

มูลค่าปัจจุบัน (NPV: Net Present Value) คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประหยัดที่จะได้รับแต่ละปีตลอดอายุของโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินทุนและค่าใช้จ่ายในแต่ละปี

การวิเคราะห์การลงทุนวิธีนี้ อาศัยหลักการที่ว่า

"เงินหนึ่งบาทในวันนี้ จะมีค่ามากกว่าเงินหนึ่งบาทที่จะได้รับในปีหน้า"

ตัวอย่างแสดงการคำนวณค่าเงินปัจจุบัน

ท่านฝากเงิน 100 บาทแบบประจำกับธนาคาร ในอัตราดอกเบี้ยร้อยละ 10 ต่อปีท่านจะมีเงิน

ต้นปีที่ 1 = 100 บาท

สิ้นปีที่ 1 = 100+10 = 110 บาท

สิ้นปีที่ 2 = 110+11 = 121 บาท

จะเห็นว่าเงิน 121 บาทในปีที่ 2 เท่ากับเงินมูลค่า 100 บาท ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = P(1+i)^n \qquad (2.8)$$

โดยที่ F คือ มูลค่าในอนาคต (Future Value)

P คือ มูลค่าในปัจจุบัน (Present Value)

i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (Interest Rate)

n คือ จำนวนปี (Number of Year)

ส่วนในกรณีคิดอัตราดอกเบี้ยทบต้น (Compound Interest) หรือคิดดอกเบี้ยหลายครั้งต่อปี

$$F = P\left(1+\frac{i}{M}\right)^{Mn} \qquad (2.9)$$

โดย M คือ จำนวนครั้งที่คิดดอกเบี้ยต่อปี

ในทำนองเดียวกัน ถ้าทราบมูลค่าในอนาคตเราสามารถแปลงกลับเป็นมูลค่าในปัจจุบันได้ดังนี้

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \qquad (2.10)$$

โดย i คือ อัตราดอกเบี้ย (Discount Rate)

ในกรณีที่ทราบค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปีที่คงที่ (Annuity : A) เป็นเวลา n ปี แล้วต้องการแปลงเป็นมูลค่าปัจจุบัน P ดังนี้

$$P = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right] \qquad (2.11)$$

ส่วนในกรณีที่ค่าใช้จ่ายต่อปีเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ (Gradient) เช่น ค่าบำรุงรักษา เป็นต้น เป็นเวลา n ปี สามารถแปลงให้เป็นค่าใช้จ่ายต่อปีคงที่ (Annuity : A) ดังนี้

$$A = G\left[\frac{1}{i} - \frac{n}{(1+i)^n - 1}\right] \qquad (2.12)$$

$$NPV = -I_0 + A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}\right] \qquad (2.13)$$

โดย I_0 คือ เงินลงทุนเริ่มต้น

โครงการประหยัดพลังงานที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบ (ต่ำกว่าศูนย์) จะไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ในขณะที่โครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกยิ่งมาก ยิ่งคุ้มค่าต่อการลงทุน

ตารางที่ 2.3 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของมูลค่าปัจจุบัน (NPV)

ข้อดี NPV	ข้อจำกัด NPV
1. คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ดอกเบี้ย) 2. คำนึงถึงผลประหยัดของโครงการตลอดอายุการใช้งาน	1. การวิเคราะห์มีความซับซ้อน 2. ต้องกำหนดอัตราลดค่า

2.6.5 อัตราผลตอบแทนภายใน

มูลค่าปัจจุบันสุทธิใช้สำหรับตัดสินใจเลือกโครงการที่คุ้มค่าต่อการลงทุนมากที่สุด ในขณะที่อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) บอกให้ทราบผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุน

อัตราผลตอบแทนภายใน คือ อัตราลดค่าที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับศูนย์

IRR คือ i ที่ทำให้ NPV = 0

โครงการที่มีค่า IRR มากกว่าค่า i ที่กำหนดจะคุ้มค่าต่อการลงทุน ส่วนต่างก็คือกำไรจากการลงทุนโครงการ

ประเภทของอัตราผลตอบแทนภายใน

1. **อัตราผลตอบแทนภายในทางเศรษฐศาสตร์** (Economic Internal Rate of Return: EIRR) **เป็นผลตอบแทนที่แท้จริงต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศโดยรวม คำนึงถึงต้นทุนและผลได้ของทุกคนในระบบเศรษฐกิจมูลค่าของเงินลงทุน และอัตราค่าพลังงาน จะคำนวณจากมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งก็คือราคาตลาดไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม หักด้วยภาษีนำเข้าและไม่คิดอัตราดอกเบี้ยและอัตราเงินเฟ้อ** ทั้งนี้เนื่องจากเงินภาษีและดอกเบี้ยเป็นเพียงเงินที่ถ่ายเทจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งโดยที่ไม่มีการใช้ทรัพยากรใด ๆ จึงไม่จัดเป็นมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์

2. อัตราผลตอบแทนภายในทางการเงิน (Financial Internal Rate of Return: FIRR) เป็นผลตอบแทนต่อผู้ลงทุนโครงการโดยตรง โดยมูลค่าของเงินลงทุนจ่ายจริงและจะคำนึงถึงอัตราดอกเบี้ย ภาษีต่าง ๆ ที่จ่ายออกไปหมด

ในที่นี้ IRR จะหมายถึง FIRR เนื่องจากเป็นผลตอบแทนต่อผู้ลงทุนโดยตรง ส่วนการวิเคราะห์ EIRR นั้นใช้หลักการเดียวกัน เพียงแต่ว่าต้องใช้ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ในการคำนวณ

ตารางที่ 2.4 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของอัตราผลตอบแทนภายในทางการเงิน (FIRR)

ข้อดี FIRR	ข้อจำกัด FIRR
1. เช่นเดียวกับมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 2. แสดงผลเข้าใจง่าย	1. ค่อนข้างเสียเวลาในการคำนวณต้องใช้วิธีลองผิดลองถูกหลายครั้ง

ตารางที่ 2.5 แสดงข้อดี ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะของการวิเคราะห์ทางการเงินทุกวิธี

วิธีการวิเคราะห์	ข้อดี	ข้อจำกัด	ข้อเสนอแนะ
ระยะเวลาคืนทุน	1. การวิเคราะห์เข้าใจง่าย 2. แสดงผลเข้าใจง่าย	1. ไม่คำนึงถึงผลที่ประหยัดได้หลังจากคืนทุนแล้ว 2. ไม่คำนึงถึงมูลค่าโครงการเมื่อสิ้นสุดโครงการ 3. ไม่คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนตามเวลา	1. ใช้วิเคราะห์เบื้องต้น 2. โครงการขนาดเล็กและอายุโครงการไม่เกิน 5 ปี
ผลตอบแทนการลงทุน	1. การวิเคราะห์ทำงานได้ง่าย 2. คำนึงถึงผลประหยัดของโครงการอายุการใช้งาน	1. ไม่คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนตามเวลา	1. ใช้ควบคู่กับระยะเวลาคืนทุน 2. โครงการขนาดเล็ก อายุโครงการไม่เกิน 5 ปี
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	1. คำนึงถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 2. คำนึงถึงผลประหยัดของอายุโครงการตลอดอายุการใช้งาน 3. วิเคราะห์รายได้และค่าใช้จ่ายที่แท้จริงของโครงการ	1. ซับซ้อน 2. ต้องกำหนดอัตราส่วนลด	1. เหมาะสมกับโครงการทุกประเภท
อัตราผลตอบแทนภายใน	1. เช่นเดียวกับมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 2. แสดงผลเข้าใจง่าย	1. การคำนวณต้องลองผิดลองถูกหลายครั้ง	1. เหมาะสมกับโครงการทุกประเภท 2. ต้องการเปรียบเทียบหลาย ๆ โครงการหรือเปรียบเทียบกับอัตราดอกเบี้ย