มาตรการประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรม

นายโกวิทย์ รัตนารามิก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มาตรการประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรม

นายโกวิทย์ รัตนารามิก วท.บ (ฟิสิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร.เกียรติไกร อายุวัฒน์)

.... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร.อภิชิต เทอดโยธิน)

.... กรรมการ
(ดร.เชิดชัย ประภานวรัตน์)

.... กรรมการ
(ผศ.ดร.กูสกานา กูบาฮา)

หัวข้อวิทยานิพนธ์ มาตรการประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรม
หน่วยกิต 12
ผู้เขียน นายโกวิทย์ รัตนารามิก
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. อภิชิต เทอดโยธิน
หลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหามาตรการประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศทั้งระบบในโรงงานอุตสาหกรรม โดยได้เข้าไปทำการสำรวจการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตอากาศอัดภายในโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลืองแห่งหนึ่งเพื่อหามาตรการปรับปรุงให้เกิดการประหยัดพลังงานสูงสุด ซึ่งการสำรวจได้ทำใน 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนการผลิตอากาศอัด, ส่วนการส่งจ่ายอากาศอัด และการใช้อากาศอัด จากการตรวจสอบพบว่าโรงงานมีเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 12 เครื่องแบ่งเป็น 4 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งมีการเดินท่ออากาศอัดเชื่อมถึงกัน สามารถจ่ายอากาศอัดให้อาคารผลิตทั้งหมด 9 อาคาร ความต้องการใช้อากาศอัดเฉลี่ย = 873.76 l/s กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการผลิตอากาศอัด = 398.97 kW และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย = 2.19 l/s/kW ผลที่ได้จากการตรวจสอบสามารถเสนอเป็นแนวทางปรับปรุงได้ทั้งหมด 6 มาตรการ ได้แก่ 1.เปลี่ยนเครื่องอัดอากาศที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่ำออกแล้วแทนที่ด้วยเครื่องอัดอากาศใหม่ที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่า 2.ติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศแบบศูนย์กลางเดียวกัน 3.ปรับปรุงอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ 4.ปรับปรุงระบบท่อส่งอากาศอัดภายในโรงงาน 5.ปรับลดความดันของเครื่องอัดอากาศลง 6.ปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดและลดความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้ง 6 มาตรการรวมเป็นมูลค่า 5,310,000 บาท สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 505,146 บาท/เดือน คิดเป็นจุดคืนทุน 10.51 เดือน

คำสำคัญ : การประหยัดพลังงาน / ระบบอัดอากาศ

Thesis Title	Energy Saving Measures in Compressed Air System in Industries
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Kowit Ratanaramig
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Apichit Therdyothin
Program	Master of Engineering
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
Academic Year	2013

Abstract

This paper presents case studies that identify significant compressed air savings in Brass ball valve factory. To study the opportunities for energy systems improvement, it is important to understand compressed air generation, compressed air delivery systems and how compressed air is used. This particular factory has 12 air compressors divided into 4 groups. Each group is interconnected by a pipeline header which supplies the compressed air for 9 production lines with an average compressed air consumption of 873.76 l/s in which the electrical power requirement at 398.97 kW, or a Specific energy consumption of 2.19 l/s/kW. Case studies revealed that six measures should be carried out to improve the efficiency of the compressed air system. 1. Remove the low specific energy consumption compressor and replace with higher efficiency units. 2. Install a centralised control unit for the air compressor system. 3. Improve the intake air temperature to the air compressors. 4. Modify the compressed air pipeline. 5. Reduce the pressure settings on the air compressors. 6. Improve the air quality and pressure losses of the equipment being serviced by the air compressors. The total budget to carry out the required remedial work is 5,310,000 baht. This remedial work would give an energy saving of 505,146 baht per month meaning an investment payback time of 10.51 months.

Keywords: Energy saving / Compressed air systems

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิจัยฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนช่วยเหลือมาโดยตลอด รวมถึง ผศ. ดร. อภิชิต เทอดโยธิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. เชิดชัย ประภานวรัตน์ และ ผศ. ดร. กูสกานา กูบาฮา กรรมการวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษางานวิจัยฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณ รศ. ดร. เกียรติไกร อายุวัฒน์ ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณคุณสถาพร ที่ให้โอกาสเข้าไปตรวจวัดและเก็บข้อมูลภายในโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง ขอขอบคุณสายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่มีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาและหาข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณผู้ที่มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนและส่งเสริมทางด้านต่างๆ ซึ่งเป็นกำลังใจที่ช่วยผลักดันให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

สารบัญ

หน้า

สารบัญ

รายการตาราง

รายการรูปประกอบ

รายการรูปประกอบ

รูป (ต่อ) **หน้า**

ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

CFM	=	Cubic feet per minute
PDP	=	Pressure dew point
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
Dia	=	Diameter
USD	=	United States Dollar
PLC	=	Programmable Logic Controller
kJ/kg	=	Kilo Joule per Kilogram

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความจำเป็นและเป็นการใช้ในการผลิตของทุกโรงงาน ความจำเป็น และความสำคัญของการประหยัดพลังงานไฟฟ้า จึงไม่ใช่เพียงแต่เอื้อประโยชน์ต่อผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเพียงเท่านั้นแต่ยังเป็นความจำเป็นและมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศด้วย เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบัน ยังต้องพึ่งเชื้อเพลิงนำเข้าจากต่างประเทศ และมีแนวโน้มว่าจะต้องมีการนำเข้าเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคธุรกิจอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นสาขาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

การประหยัดพลังงานของโรงงาน หมายถึง การลดใช้พลังงานลงโดยการจัดการใช้พลังงานให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด โดยไม่ทำให้กระบวนการผลิตลดลงและไม่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความจำเป็น และมีความสำคัญกับการใช้ในการผลิตของทุกโรงงาน จากการสำรวจพบว่าระบบอากาศอัดเป็นระบบหนึ่งที่ใช้ในการบวนการการผลิตของทุกโรงงานอย่างแพร่หลายและยังพบอีกว่าระบบอัดอากาศเป็นระบบหนึ่งที่ใช้ค่าพลังงานไฟฟ้ามากเป็นลำดับต้นๆ

จากข้อมูลการสำรวจพบว่าโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากไม่มีความเข้าใจในเรื่องระบบการใช้งานอากาศอัดอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การเลือกประเภทของเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งาน, การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศให้ถูกต้อง, การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการติดตั้งเครื่องอัดอากาศ, การเดินท่ออากาศอัดที่เหมาะสม เป็นต้น การไม่มีความเข้าใจอย่างถูกต้องในระบบอัดอากาศจึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก ถ้ามีการศึกษาและเผยแพร่ข้อมูลอย่างถูกต้อง จะสามารถลดการใช้พลังงานของผู้ประกอบการและประเทศชาติได้เป็นอย่างมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหามาตรการประหยัดพลังงานของระบบอัดอากาศทั้งระบบ
2. ปรับปรุงระบบอัดอากาศของ โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง ทั้งระบบเพื่อเป็นโรงงานต้นแบบในการลดพลังงานไฟฟ้าของระบบอัดอากาศทั้งระบบ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.ตรวจสอบสภาพการใช้ระบบอัดอากาศทั้งระบบของ โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง
2.นำเสนอมาตรการปรับปรุงระบบอัดอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงสุดด้านการอนุรักษ์พลังงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบอัดอากาศภายใน โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง และสามารถใช้เป็นโรงงานต้นแบบสำหรับออกแบบระบบอัดอากาศทั้งระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยงข้อง

การประหยัดพลังงานในระบบอากาศอัด

อากาศอัดคือ อากาศที่ถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้นกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อนำมาใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนระบบต่างๆ เนื่องจากอากาศอัดมีความคล่องตัว ปรับเปลี่ยนสถานะได้ และมีความปลอดภัยในการใช้งาน จึงมีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวกลางในการนำพลังงานไปใช้งาน อากาศอัดมีการใช้งานตั้งแต่ความดัน 2 บาร์ ถึง 70 บาร์

มีการประมาณค่าใช้จ่ายรวมตลอด 10 ปีในการผลิตอากาศอัด ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 75% ค่าเงินลงทุนเครื่องจักร 15% และค่าบำรุงรักษา 10% จากข้อมูลของกรมการพลังงานสหรัฐอเมริกา (DOE,2003) [1] ได้รายงานไว้ว่า 70 – 90% ของพลังงานในการผลิตอากาศอัด จะสูญเสียไปในรูปพลังงานความร้อนที่ใช้ไม่ได้, แรงเสียดทาน, การใช้งานที่ไม่ถูกต้อง และเสียง เป็นการดีที่จะคิดไว้เสมอว่า ระบบอากาศอัดจะมีค่าใช้จ่ายในการใช้งานมากกว่าค่าเครื่องอัดอากาศมาก ฉะนั้นถ้าจะมีการเลือกซื้อเครื่องอัดอากาศควรคำนึงถึงประสิทธิภาพทางพลังงานมากกว่าการพิจารณาจากราคาเครื่องเพียงอย่างเดียว การประหยัดพลังงานจากการปรับปรุงระบบจะมีปริมาณถึง 20 – 50% ของปริมาณการใช้ไฟฟ้า เมื่อทำการคิดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของระบบอากาศอัดมีค่าเป็น 10% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นการใช้พลังงานในระบบอัดอากาศให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่มีความคุ้มค่ามาก

การลดการใช้พลังงานในระบบอัดอากาศสามารถทำได้ทั้งแบบไม่มีการลงทุน, ขั้นลงทุนเล็กน้อย และขั้นลงทุนสูงคือปรับปรุงระบบและเลือกใช้เครื่องอัดอากาศประสิทธิภาพสูง การประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน [2] คือ

1.ส่วนการสร้างอากาศอัด

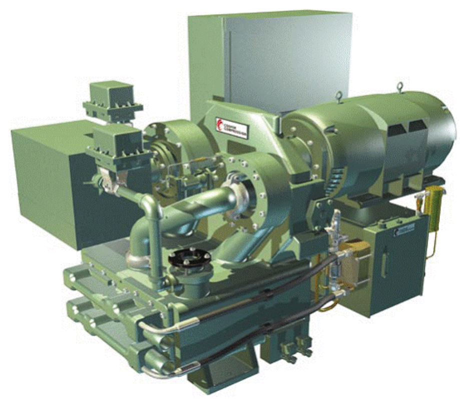
2.ส่วนการส่งจ่ายอากาศอัด

3.ส่วนการใช้อากาศอัด

2.1 การปรับปรุงระบบอัดอากาศในส่วนการสร้างอากาศอัด

2.1.1 การเลือกใช้เครื่องอัดอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งาน เครื่องอัดอากาศสามารถแบ่งตามหลักการอัดอากาศเป็น 2 ชนิด คือ

2.1.1.1 เครื่องอัดอากาศที่ใช้ลักษณะการแทนที่ของอากาศ (Dynamic) คือการให้พลังงานกลแก่อากาศทำให้อากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้นโดยผ่านโรเตอร์ แล้วอาศัยรูปร่างของโครงสร้าง(casing) ภายในเครื่องอัดลดความเร็วของอากาศลง ทำให้พลังงานของอากาศในรูปพลังงานจลน์เปลี่ยนเป็นความดันอากาศแล้วไหลออกทางด้านจ่าย ซึ่งมีแบบ Centrifugal, Ejector, Radial, Axial พบมากในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Centrifugal Compressor[3]



รูปที่ 2.1 แสดงภาพเครื่องอัดอากาศแบบ Centrifugal Compressor[4]

ข้อดี

- สามารถผลิตอากาศอัดได้มาก คือ 1 แรงม้า สามารถผลิตอากาศอัดได้ 4.4 CFM
- ผลิตอากาศอัดได้มากสามารถจ่ายอากาศอัดได้ทั้งโรงงาน (มีขนาด 400HP – 1,500HP)
- สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง

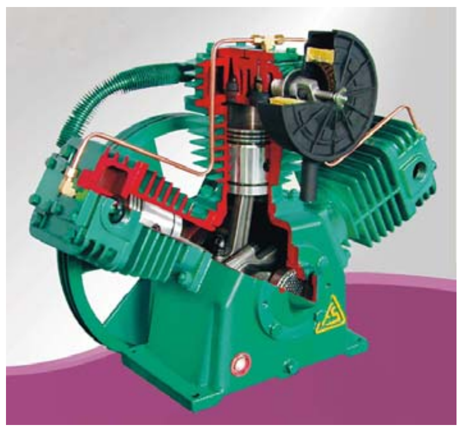
ข้อเสีย

- เมื่อเครื่องเสียจะทำให้ไม่มีอากาศอัดใช้ทั้งโรงงาน

- เนื่องจากเครื่องอัดอากาศมีขนาดใหญ่ ทำให้กินกระแสไฟฟ้ามากไม่เหมาะสำหรับโรงงานที่ใช้อากาศอัดน้อยและมีการใช้อากาศอัดที่ไม่สม่ำเสมอ (ไม่ควรให้เครื่องมีสภาวะ unload เนื่องจากมอเตอร์กินกระแสไฟฟ้าสูง)

2.1.1.2 เครื่องอัดอากาศที่อัดอากาศเชิงปริมาตร (Displacement) คือการดูดอากาศเข้าไปในปริมาตรของห้องอัด แล้วลดปริมาตรอากาศโดยใช้พลังงานจากภายนอก เช่น เครื่องยนต์, มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น เมื่ออากาศถูกลดปริมาตรลงทำให้มีความดันสูงขึ้น แล้วปล่อยออกทางด้านจ่ายเป็นอากาศอัดที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นแบบโรตารี(Rotary) และแบบลูกสูบ(Reciprocating หรือ Piston compressor)

เครื่องอัดอากาศชนิดลูกสูบ



รูปที่ 2.2 แสดงหัวอัดอากาศแบบลูกสูบ[5]

ข้อดี

- ผลิตแรงดันอากาศได้สูง 0 – 20 bar
- ราคาถูก

ข้อเสีย

- ผลิตอากาศอัดได้น้อย คือ 1 แรงม้า สามารถผลิตอากาศอัดได้ประมาณ 3.4 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที
- เสียงดังมากขณะทำงาน
- การสึกหรอมากเพราะมีส่วนที่เคลื่อนที่มากชิ้น

- อากาศอัดที่ได้มีอุณหภูมิสูงจึงเป็นเหตุให้เกิดน้ำในระบบมากกว่าระบบอื่น

- ไม่สามารถเดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมงได้

เครื่องอัดอากาศชนิดโรตารี เครื่องอัดอากาศชนิดนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- แบบโรตารีแวน

รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องอัดอากาศแบบโรตารีแวน[6]

- แบบโรตารี่สกรู

รูปที่ 2.4 แสดงรูปหัวอัดอากาศแบบสกรู[7]

ข้อดี

- สามารถผลิตอากาศได้มาก คือ 1 แรงม้า สามารถผลิตอากาศอัดได้ประมาณ 4.4 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

- อากาศอัดที่ได้มีอุณหภูมิต่ำกว่าชนิดลูกสูบ

- เสียงเครื่องเงียบ และสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง

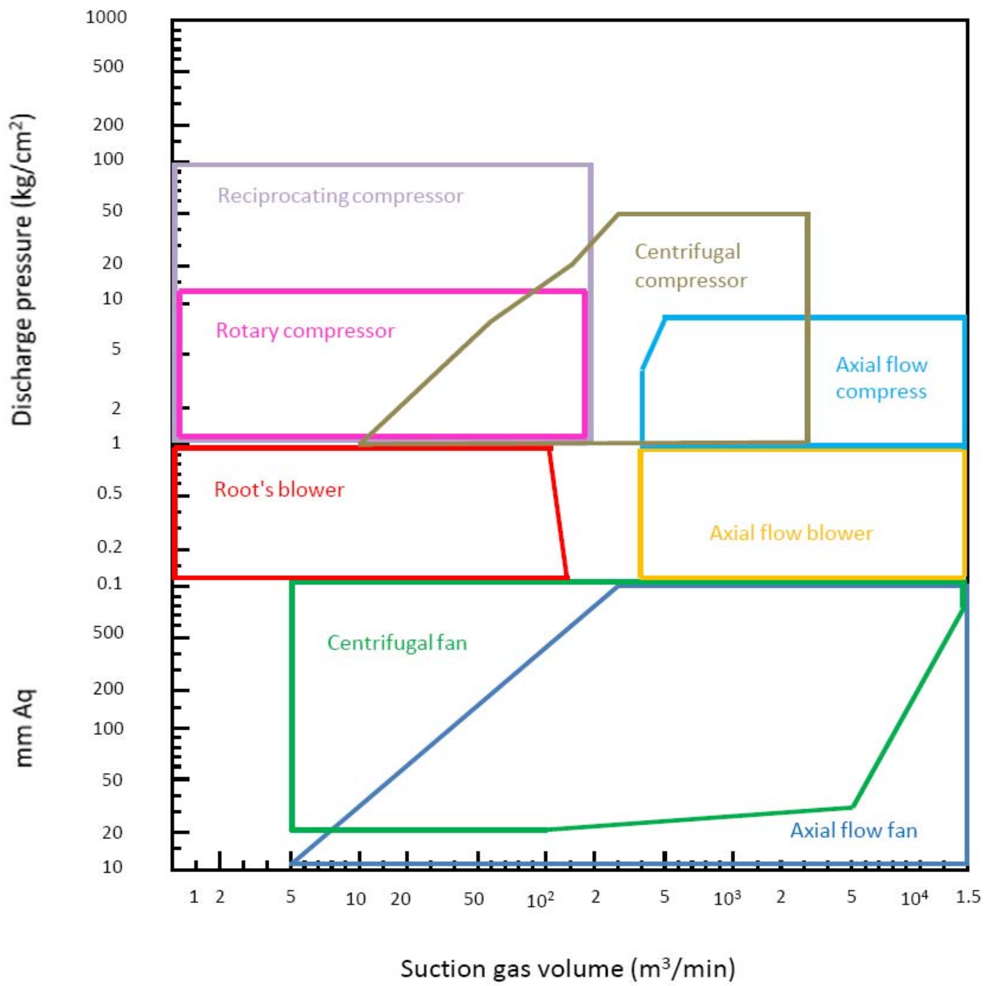
- มีคุณภาพของอากาศอัดสูง คือมีปริมาณน้ำมันหลุดออกไปน้อย

ข้อเสีย

- ผลิตความดันอากาศได้ 0 – 13 bar

- ราคาสูง

การเลือกขนาดและชนิดของเครื่องอัดอากาศที่เหมาะสม สิ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ปริมาณความต้องการอากาศอัดและความดันใช้งานของอุปกรณ์ในโรงงาน เมื่อทราบค่าทั้งหมดแล้ว จึงพิจารณาเลือกประเภทของเครื่องอัดอากาศโดยใช้กราฟ[8] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงย่านแรงดันต่างๆของเครื่องอัดอากาศ,พัดลม และปั๊มสุญญากาศ[8]

จากรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศอัดและปริมาณอากาศอัดที่คอมเพรสเซอร์ชนิดต่างๆผลิตได้ โดยสามารถเลือกช่วงของแรงดันและปริมาณอากาศอัดที่ต้องการ กราฟนี้เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการหาขนาดและชนิดของเครื่องอัดอากาศ โบล์เวอร์ และพัดลม และยังสามารถเลือกได้อีกว่าจะใช้โบล์เวอร์แทนการใช้อากาศอัดหรือใช้เพียงพัดลมก็เพียงพอ สำหรับงานบางอย่าง เช่นงานที่ต้องการความดันไม่ถึง 1 bar สามารถใช้โบล์เวอร์แทน และในงานที่อากาศอัดไม่ถึง 0.1 bar ก็สามารถใช้พัดลมแทนได้เป็นต้น

2.1.2 การเลือกใช้เครื่องอัดอากาศประสิทธิภาพสูง หรือตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศให้สูงกว่า 80% เป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพเครื่องอัดอากาศที่มีอยู่ว่าประสิทธิภาพเครื่องอัดอากาศ (อากาศอัดที่ได้เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้) สูงกว่า 80 % เมื่อวัดเทียบกับค่าที่ระบุของเครื่องนั้น หรือเกณฑ์อ้างอิงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าพลังงานจำเพาะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอัดอากาศ[9]

ประเภทของเครื่องอัดอากาศ	ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (l/s/kW)
ลูกสูบ	2.30 – 2.65 (single state) 2.85 – 3.35 (double state)
สกรู	2.35 – 2.85
เวน	2.22 – 2.5
หมุนเหวี่ยง	2.85 – 3.33

หมายเหตุ : การทดสอบดำเนินการที่ความดัน 7 bar และต้องทดสอบในช่วงที่เครื่องร้อนเท่ากับเวลาใช้งาน

ประสิทธิภาพเครื่องอัดอากาศ (Efficiency of the Air compressor)

การคำนวณปริมาณอากาศอัด(Air produced formula: AP)

$$AP = \frac{V \times (Poff - Pon)}{t \times P_a} \quad l/s \tag{2.1}$$

เมื่อ

V = ปริมาตรถังอัดอากาศ (liter)

P_{off} = ความดันอากาศอัดตอนตัดเป็น unload (bar)

P_{on} = ความดันอากาศอัดตอนเริ่มต่อ load (bar)

P_a = ความดันบรรยากาศ (1.013 bar)

t = เวลาที่ใช้ในช่วงระหว่าง P_{off} และ P_{on}

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องอัดอากาศใช้

$$P_w = \frac{\sqrt{3}\,.I.V.COS\text{Ø}}{1000} \tag{2.2}$$

เมื่อ

P_w = กำลังไฟฟ้า (kW)

I = กระแสไฟฟ้า (Amp.)

V = ความต่างศักดิ์ไฟฟ้า (volt)

COSØ = Power factor

การคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะของเครื่องอัดอากาศ (l/s/kW)

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะของเครื่องอัดอากาศ = AP/ P (2.3)

เมื่อ

AP = ปริมาณอากาศอัด (l/s)

P = กำลังไฟฟ้า (kW)

เมื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศได้ก็สามารถทำการตรวจสอบค่าจากตารางที่ 2.1 ถ้าค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดแสดงว่าเครื่องอัดอากาศที่ใช้อยู่ยังคงใช้ได้ดี แต่ถ้าค่าที่คำนวณได้ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดก็สมควรเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศใหม่

2.1.3 การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ

สำหรับการตรวจสอบสภาพของเครื่องอัดอากาศอยู่เป็นประจำ จะช่วยทำให้เกิดการประหยัดพลังงานและเป็นการยืดอายุเครื่องอัดอากาศด้วย สำหรับจุดที่ต้องหมั่นตรวจสอบเป็นพิเศษเพราะมีผลต่อการประหยัดพลังงานโดยตรงได้แก่

- การตรวจสอบระบบส่งกำลัง คือตรวจสอบชุดสายพานและพูเล่ย์ให้อยู่ในสภาพที่ดี การตรวจสอบความตึงของสายพานให้ตรวจสอบจากคู่มือการบำรุงรักษาของเครื่องอัดอากาศ

- ชุดแยกน้ำมันออกจากอากาศอัดภายในเครื่องอัดอากาศแบบสกรู ควรทำการตรวจสอบอยู่เสมอว่ามีความดันตกคร่อมต้องไม่เกิน 1 bar ถ้าเกินกว่านี้ควรทำการเปลี่ยนชุดแยกน้ำมันออกจากอากาศอัดใหม่

- การตรวจสอบระบบระบายความร้อน คือแผงระบายความร้อนของอากาศและน้ำมันเครื่องให้อยู่ในสภาพที่สะอาดสามารถระบายความร้อนได้ดี การตรวจสอบสามารถดูได้จากอุณหภูมิของไหลก่อนเข้าแผงระบายความร้อนและหลังจากระบายความร้อนเปรียบเทียบกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิก่อนและหลังจะต้องต่างกันอย่างน้อย 10 °C ขึ้นไป

- การตรวจสอบชุดกรองอากาศ คือตรวจสอบสภาพกรองอากาศให้มีสภาพที่ดีอยู่เสมอโดยดูได้จากอินดิเคเตอร์ของเครื่องอัดอากาศหรือตรวจสอบจากอายุการใช้งานตามคู่มือของโรงงานผู้ผลิต และยังดูจากสภาพภายนอกของชุดกรองอากาศ ถ้าอยู่ในสภาพที่สกปรกมากควรใช้อากาศอัดเป่าทำความสะอาดหรือทำการเปลี่ยนชุดกรองอากาศใหม่ [10]

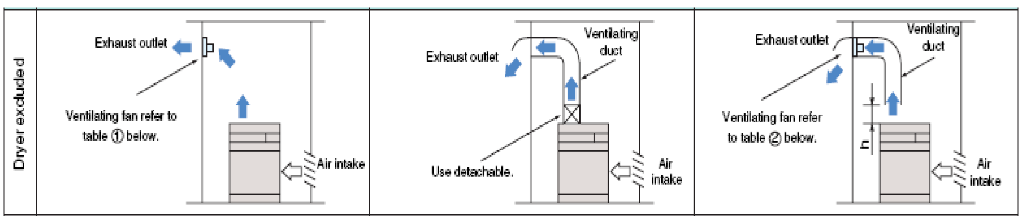
สำหรับการตรวจสอบอุปกรณ์อื่นๆของเครื่องอัดอากาศให้มีสภาพที่ดีอยู่เสมอ ถึงแม้จะไม่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานโดยตรง แต่ก็เป็นการยืดอายุเครื่องอัดอากาศให้มีการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

2.1.4 การลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ

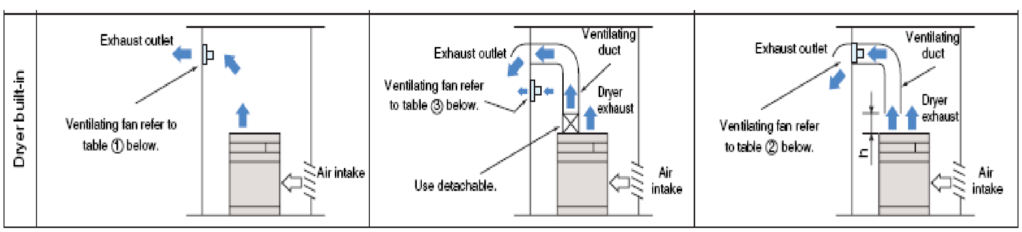
การลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศเป็นการเพิ่มมวลอากาศ อุณหภูมิของอากาศที่ต่ำย่อมมีความหนาแน่นของอากาศมากกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อเกิดการอัดอากาศย่อมได้เนื้ออากาศอัดที่มากกว่า และเป็นการลดการใช้พลังงานในระหว่างการอัดอากาศอีกทั้งยัง

เป็นการเพิ่มคุณภาพของอากาศอัดด้วย การลดอุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศทุกๆ 3°C จะสามารถลดการใช้พลังงานได้ 1% ของกำลังการผลิต นอกจากจะช่วยประหยัดพลังงานให้กับเครื่องอัดอากาศแล้วยังช่วยลดการใช้พลังงานในส่วนของแอร์ไดเออร์ได้อีกด้วย

ปกติห้องเครื่องอัดอากาศจะมีอุณหภูมิสูงเกิดจากการออกแบบระบบระบายอากาศที่ผิดพลาด หมายถึงอากาศร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องอัดอากาศไม่สามารถระบายออกนอกห้องเครื่องอัดอากาศได้ ทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นภายในห้องเครื่องอัดอากาศ การออกแบบระบบระบายอากาศที่เหมาะสมเป็นไปตามรูปที่ 2.6



Item (kW)		7.5	11	15	22	37	55	75	100	150
Heat generation	MJ/h	33.1	47.3	63.2	90.8	154	226	306	406	650
Air exhaust (air compressor)	m³/min	20	28	28	55	75	100	150	200	180×2
Approx. temp. Rise (exhaust air)	°C	25	25	35	25	31	35	30	31	30
Allowable pressure loss (exhaust duct)	Pa	20								
Recommended fan capacity ①	m³/min	88	125	167	240	407	598	810	1,074	1,720
Recommended fan capacity ②	m³/min	23	32	32	63	86	115	173	230	207×2



Item (kW)		7.5	11	15	22	37	55	75
Heat generation	MJ/h	36.4	52.3	69.9	104	175	251	352
Air exhaust (air compressor)	m³/min	20	28	28	55	75	100	150
Air exhaust (airf dryer)	m³/min	10	18	18	30	50	30	30
Approx. temp. Rise (exhaust air)	°C	25	25	35	25	31	35	30
Externally allowable pressure loss	Pa	20						
Recommended fan capacity ①	m³/min	96	138	185	276	464	664	932
Recommended fan capacity ②	m³/min	33	47	52	102	149	181	295
Recommended fan capacity ③	m³/min	10	15	20	39	62	66	122

รูปที่ 2.6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อระบายความร้อนภายในห้องเครื่องอัดอากาศ[11]

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ คือสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกห้องในที่ร่มไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส และช่องดูดอากาศเข้าไม่ใกล้แหล่งความชื้น ค่าพลังงานที่ประหยัดได้จากการลดอุณหภูมิขาเข้าสามารถหาได้จาก

$$\boxed{\Delta W = \frac{ikR_wT_1 - T_2}{k-1}\left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/(ik)} -1\right)} \qquad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้

ΔW = ค่าพลังงานที่ลดลงจากการลดอุณหภูมิ (kJ/kg)

i = จำนวนขั้นตอนการอัดอากาศ (Stage compressor)

k = อัตราส่วนความร้อนจำเพาะสำหรับอากาศ มีค่าเท่ากับ 1.4

R_w = 0.2871 kJ/kg (ค่าคงที่ของก๊าซสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 15°C ที่ระดับน้ำทะเล)

T_1 = อุณหภูมิก่อนการปรับปรุง

T_2 = อุณหภูมิหลังการปรับปรุง

P_1 = ความดันที่ 1 บรรยากาศ (1.013 bar)

P_2 = ความดันอากาศอัดที่ผลิต

และยังสามารถหาค่ากำลังงานที่ประหยัดได้

$$\boxed{P = \Delta W \times D_{air} \times FAD \times \%load} \qquad (2.5)$$

เมื่อ

P = กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จากการลดอุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศ (Watt)

D_{air} = 1.225×10^{-3} kg/liter (ความหนาแน่นของอากาศที่ 15°C)

FAD = อัตราการไหลของของอากาศ (liter/sec)

%load = % การ on load ใน 1 รอบการทำงาน

2.1.5 การลดความดันในการผลิตอากาศอัดที่เครื่องอัดอากาศ [12]

การปรับปรุงท่อเมนส่งจ่ายอากาศอัดนอกจากจะเป็นการลดการสูญเสียความดัน เมื่อเราทำการปรับปรุงท่อเมนแล้วต้องทำการปรับลดความดันที่เครื่องอัดอากาศลง เพราะการลดความดันในการผลิตอากาศอัดลงจะเป็นการประหยัดพลังงานในการอัดอากาศของเครื่องอัดอากาศ

มีความเข้าใจที่ไม่ถูกต้องว่า การผลิตความดันอากาศอัดที่ความดันสูงๆ แล้วให้เครื่องหยุดพักในลักษณะแบบไร้โหลด จะทำให้เครื่องได้หยุดพักและใช้พลังงานน้อยลง ซึ่งก็เป็นความจริง เครื่องอัดอากาศที่ทำงานในลักษณะไร้โหลดเป็นการที่มอเตอร์กินค่าพลังงานไฟฟ้าน้อยลงแต่มิได้จ่ายอากาศอัดออกมาเท่ากับว่าเป็นการสูญเสียพลังงานอย่างมากในช่วงนี้ อุปกรณ์ที่ใช้อากาศอัดทั่วๆไป มีความต้องการอากาศอัดเพียง 5-6 bar เท่านั้น หากอุปกรณ์ใดมีการใช้อากาศอัดที่ความดันสูงกว่านี้ จะถูกจัดไว้เป็นอุปกรณ์พิเศษ ควรทำการแยกระบบท่อออกไป หรือถ้าอุปกรณ์ประเภทนี้มีไม่มากนักควรใช้ปั๊มเพิ่มความดัน (Pressure booster) เพื่อเพิ่มความดันอากาศอัดเฉพาะเป็นจุดๆ ไม่ควรทำการผลิตอากาศอัดที่ความดันสูงเพื่อรองรับอุปกรณ์ที่ใช้ความดันพิเศษเพียงบางจุด

ขั้นตอนการลดความดันในการผลิต

- สำรวจการใช้อากาศอัดทุกๆจุด
- สำรวจความต้องการความดันอากาศอัดของเครื่องจักร ว่าต้องการความดันสูงสุดเท่าใดก่อนการปรับลดความดันเพื่อมิให้มีผลกระทบต่อการผลิต
- การปรับลดความดันควรเป็นแบบลักษณะค่อยๆลด โดยพยายามลดลงคราวละประมาณ 0.5 bar หรือน้อยกว่านี้ถ้าเครื่องสามารถปรับได้

ผลประหยัดที่ได้จากการลดความดันในการผลิตอากาศอัดสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta W = \frac{ikR_wT}{k-1}\left(\frac{\left(P_1\right)^{\left(\frac{k-1}{ik}\right)} - \left(P_2\right)^{\left(\frac{k-1}{ik}\right)}}{\left(P_a\right)^{\left(\frac{k-1}{ik}\right)}}\right) \tag{2.6}$$

เมื่อ

ΔW = ค่าพลังงานที่ลดลงจากการลดอุณหภูมิ (kJ/kg)

i = จำนวนขั้นตอนการอัดอากาศ (No. of compression stages)

k = อัตราส่วนความร้อนจำเพาะสำหรับอากาศ มีค่าเท่ากับ 1.4

R_w = 0.2871 kJ/kg (ค่าคงที่ของก๊าซสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 15°C ที่ระดับน้ำทะเล)

T = อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศ (°C)

P_1 = ความดันอากาศอัดก่อนการปรับปรุง (bar)

P_2 = ความดันอากาศหลังการปรับปรุง (bar)

P_a = ความดันที่ 1 บรรยากาศ (1.013 bar)

และยังสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้

$$\boxed{P = \Delta W \times D_{air} \times FAD \times \%load} \tag{2.7}$$

P = กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จากการลดอุณหภูมิขาเข้าเครื่องอัดอากาศ

ΔW = ค่าพลังงานที่ลดลงจากการลดอุณหภูมิ (kJ/kg)

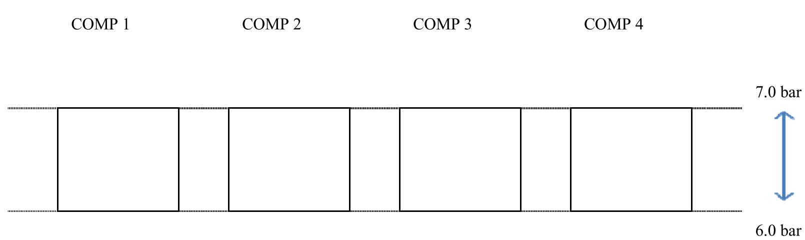
D_{air} = 1.225×10^{-3} kg/liter (ความหนาแน่นของอากาศที่ 15°C)

FAD = อัตราการไหลของอากาศ (liter/sec)

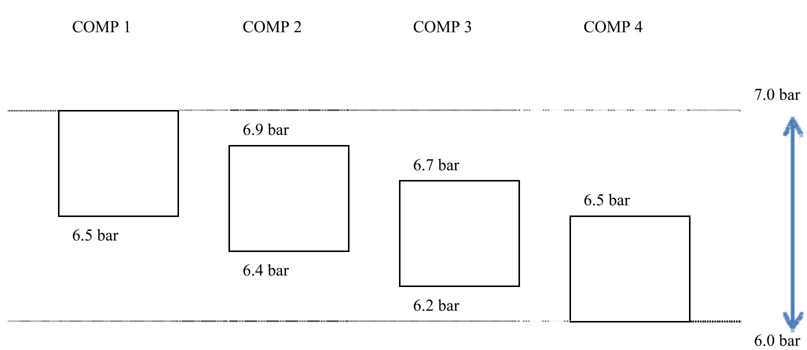
%load = % การ on load ใน 1 รอบการทำงาน

2.1.6 การจัดโหลดเครื่องอัดอากาศ

การจัดโหลดเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสมกับความต้องการ คือการวางแผนการใช้เครื่องอัดอากาศให้มีการเดินตัวเปล่า(unload) น้อยที่สุด ไม่ควรให้มีการเดินตัวเปล่ามากกว่า 10% เพื่อการประหยัดพลังงานสูงสุด โดยทั่วไปสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเครื่องอัดอากาศหลายๆเครื่องต่อร่วมในระบบเดียวกัน มักมีการตั้งค่าความดันในการตัดต่อเครื่องอัดอากาศเท่ากัน เครื่องอัดอากาศก็จะมีการทำงานพร้อมกันและหยุดพร้อมกัน ซึ่งจะเกิดปัญหาการเดินตัวเปล่าเป็นอย่างมาก สำหรับการจัดโหลดให้เหมาะสมเป็นการตั้งความดันให้มีค่าเหลื่อมกันเป็นลักษณะขั้นบันได ซึ่งจะสามารถลดช่วงเวลาการเดินเครื่องตัวเปล่าได้



รูปที่ 2.7 แสดงการตั้งค่าความดันของเครื่องอัดอากาศที่มีการตัดต่อเท่ากัน



รูปที่ 2.8 แสดงการตั้งค่าความดันของเครื่องอัดอากาศที่มีค่าเหลื่อมกัน

จากวิธีการตั้งค่าความดันของเครื่องอัดอากาศให้มีค่าเหลื่อมกันแล้ว ยังจะต้องมีวิธีการเลือกเครื่องอัดอากาศสำหรับการเป็นเครื่องอัดอากาศตัวเมน โดยการเลือกเครื่องอัดอากาศเมนหลักมีวิธีการเลือกดังนี้

- ควรเลือกเครื่องที่มีกำลังการผลิตมากกว่าเป็นตัวหลักในการทำงานและเครื่องขนาดรองลงเป็นตัวเสริมโหลด
- เลือกเครื่องที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดเป็นตัวหลัก เพราะจะใช้พลังงานน้อยกว่า
- ถ้าเครื่องมีอัดอากาศมีระบบอินเวอเตอร์ให้เลือกเครื่องอัดอากาศประเภทนี้เป็นตัวหลักก่อน

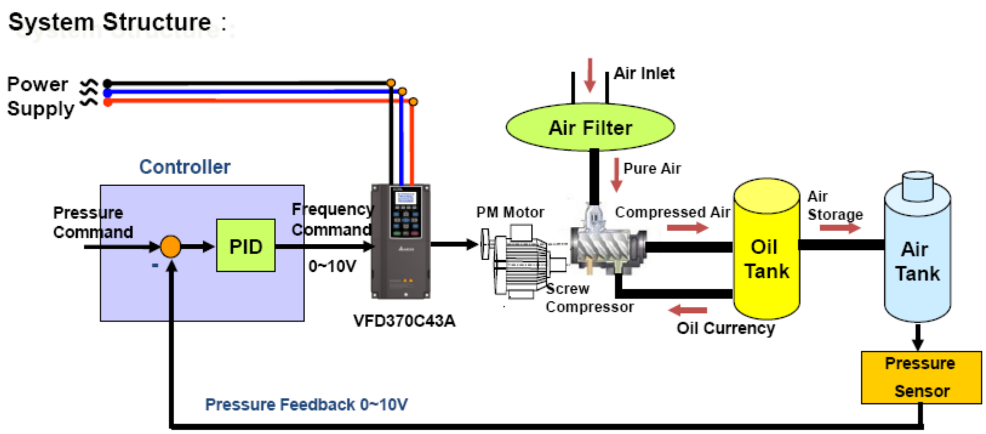
สำหรับการตั้งค่าความดันของเครื่องอัดอากาศ ถ้ามีการใช้เครื่องควบคุมอัตโนมัติควบคุมการทำงานจะช่วยให้ควบคุมช่วงความกว้างของความดันได้ละเอียดและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2.1.7 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สำหรับเครื่องอัดอากาศ

การใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (Variable speed control) เป็นวิธีควบคุมเครื่องอัดอากาศให้มีการผลิตอากาศอัดให้สอดคล้องกับความต้องการอากาศอัดโดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (ลดลงได้ถึง 20% ของกำลังการผลิตอากาศอัดของเครื่อง) ก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะต้องทำการศึกษาให้ดีก่อนว่าสามารถลดความเร็วรอบได้สูงสุดที่ระดับใด โดยไม่ทำให้เกิดผลกระบทบต่อมอเตอร์ เพราะการลดความเร็วรอบลงมากๆ อาจส่งผลต่อการทำงานของระบบการระบายความร้อนของมอเตอร์

การใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะเหมาะกับเครื่องอัดอากาศที่มีโหลดบางส่วนที่มีช่วงระยะเวลานานๆ แต่จะไม่เหมาะกับเครื่องอัดอากาศที่มีโหลดเต็มพิกัดเพราะไม่มีผลต่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศในขณะนี้จะนิยมนำมาใช้กับเครื่องอัดอากาศแบบสกรู (เป็นอุปกรณ์ Standard Measure ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งกับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Ac Induction Motor) และมอเตอร์ความต้านทานแม่เหล็ก

(Reluctance Motor) หลักการทำงานของเครื่องควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศจะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดความดัน เพื่อวัดความดันในระบบ ถ้าความดันในระบบลดลงต่ำกว่าที่กำหนด เครื่องควบคุมความเร็วรอบจะเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศ ในทางกลับกัน ความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศจะถูกลดลงเมื่อความดันเพิ่มถึงระดับที่กำหนด



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างการทำงานของชุดควบคุมความเร็วรอบของเครื่องอัดอากาศ[13]

ในกรณีที่มีเครื่องอัดอากาศหลายเครื่อง สามารถติดตั้งระบบควบคุมความเร็วรอบเสริมกับแบบธรรมดา ในการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะติดตั้งกับเครื่องอัดอากาศเพียงเครื่องเดียว ในการทำงานของระบบนี้ จะมีเครื่องอัดอากาศแบบ On/Off + เครื่องอัดอากาศที่ติดตั้งระบบควบคุมความเร็วรอบเสริมกัน หลักการทำงานโดยให้เครื่องอัดอากาศแบบควบคุมความเร็วรอบทำงานเป็นตัวหลักให้ทำงานก่อนเสมอ เมื่อเครื่องอัดอากาศแบบควบคุมความเร็วรอบไม่สามารถจ่ายอากาศอัดได้เพียงพอ เครื่องอัดอากาศตัวอื่นก็จะทำงานขึ้นตามลำดับ และหากเมื่ออากาศมากเกินความต้องการ เครื่องอัดอากาศที่ควบคุมความเร็วรอบก็จะทำหน้าที่ปรับค่าอัตราการไหลให้ตรงตามความต้องการจริงของระบบ

2.1.8 การปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดให้เหมาะสมกับลักษณะงาน

คุณภาพอากาศอัดที่หลายระดับหลายกระบวนการผลิต บางชนิดต้องการอากาศอัดที่มีคุณภาพสูงกว่าอากาศอัดที่ผลิตได้จากเครื่องอัดอากาศ คุณภาพอากาศอัดที่ดีต้องปราศจากสิ่งสกปรก, น้ำ,

น้ำมัน และจุลินทรีย์เจือปน ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณภาพได้และถ้ายิ่งมีความต้องการอากาศอัดคุณภาพสูงเท่าใดจะต้องใช้พลังงานในการปรับปรุงมากขึ้นเท่านั้น และจะต้องมีการเพิ่มความดันอากาศที่ผลิตมากขึ้น เพราะมีความดันอากาศบางส่วนตกคร่อมในตัวอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพอากาศอัด

เนื่องจากระดับความต้องการมีหลายระดับ และคุณภาพอากาศอัดเป็นค่าที่มีช่วงกว้างมาก จึงมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ให้ถูกต้องเหมาะสมกับงานนั้นๆ และในขณะเดียวกันต้องให้ความสำคัญที่จะลดการใช้พลังงาน เพราะจะมีการใช้พลังงานจำนวนหนึ่งไปกับระบบปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดในระดับที่สูงเกินความจำเป็น

คุณภาพของอากาศอัดถือได้ว่ามีความจำเป็นอย่างมากในระบบอัดอากาศ เพราะในอุตสาหกรรมแต่ละประเภทมีความต้องการคุณภาพของอากาศอัดแตกต่างกัน ถ้าคุณภาพของอากาศอัดต่ำเกินไปจะส่งผลเสียหายต่อชิ้นงานที่ผลิตได้ แต่ถ้าคุณภาพของอากาศอัดสูงเกินไปจะทำให้เป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ฉะนั้นจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับคุณภาพของอากาศอัดโดย ISO8573-1 สำหรับ ISO8573-1 เป็นมาตรฐานของสิ่งปนเปื้อนที่ปนมากับอากาศอัดที่มีอยู่ด้วยกัน 3 อย่างได้แก่ อนุภาคที่เป็นของแข็ง, ความชื้น และน้ำมันเครื่อง

ตารางที่ 2.2 แสดงมาตรฐานอนุภาคที่เป็นของแข็ง, ความชื้น และปริมาณน้ำมันเครื่อง ตาม ISO8573-1[14]

Class	Maximum number of particles per m^3 (see clause 5) Particle size, d µm				Particle size µm	Concentration mg/m^3
	$\leqslant 0{,}10$	$0{,}10 < d \leqslant 0{,}5$	$0{,}5 < d \leqslant 1{,}0$	$1{,}0 < d \leqslant 5{,}0$		
0	As specified by the equipment user or supplier and more stringent than class 1				Not applicable	Not applicable
1	Not specified	100	1	0		
2	Not specified	100 000	1 000	10		
3	Not specified	Not specified	10 000	500		
4	Not specified	Not specified	Not specified	1 000		
5	Not specified	Not specified	Not specified	20 000		
6	Not applicable				$\leqslant 5$	$\leqslant 5$
7	Not applicable				$\leqslant 40$	$\leqslant 10$

NOTE A filtration ratio (β) related to a particle size class is the ratio between the number of particles upstream of the filter and the number of particles downstream. This can be expressed as ($\beta = 1/P$), where P is the penetration of the particles expressed as the ratio of down stream particle concentration to upstream particle concentration. The particle size class is used as an index, e.g. $\beta_{10} = 75$ means that the number of particles of size 10 µm (β m) and larger is 75 times higher upstream of the filter than downstream.

Class	Pressure dewpoint °C
0	As specified by the equipment user or supplier and more stringent than class 1
1	$\leqslant -70$
2	$\leqslant -40$
3	$\leqslant -20$
4	$\leqslant +3$
5	$\leqslant +7$
6	$\leqslant +10$

Class	Concentration total oil (aerosol, liquid, and vapour) mg/m^3
0	As specified by the equipment user or supplier and more stringent than class 1
1	$\leqslant 0{,}01$
2	$\leqslant 0{,}1$
3	$\leqslant 1$
4	$\leqslant 5$

สำหรับคุณภาพอากาศอัดที่ใช้ในงานทั่วไปแสดงไว้ตามตารางที่ 2.3

ลักษณะการใช้งาน	ชั้นคุณภาพอากาศ		
	น้ำมัน	ฝุ่น	น้ำ
เครื่องกวนใช้อากาศอัด	3	5	2
แบริ่งอากาศอัด	2	2	3

ใช้อากาศอัดวัดขนาด	2	3	3
มอเตอร์ขับด้วยอากาศอัด	4	4	5
เครื่องทำอิฐและแก้ว	4	4	5
ทำความสะอาดชิ้นส่วนเครื่องจักร	4	4	4
งานก่อสร้าง	4	5	5
การลำเลียง ชิ้นงานเป็นเม็ด	3	4	3
การลำเลียงด้วยลม	2	3	2
ลักษณะการใช้งาน	ชั้นคุณภาพอากาศ		
	น้ำมัน	ฝุ่น	น้ำ
งานไฮดรอลิค, หัวอ่าน	2	2	2
เครื่องจักรงานหล่อ	4	4	5
อาหารและเครื่องดื่ม	2	3	1
เครื่องมือใช้อากาศอัดที่ควบคุมด้วยมือ	4	5	5
เครื่องมือกล	4	3	5
งานเหมืองแร่	4	5	5
การผลิตอุปกรณ์ไมโคร-อิเล็กทรอนิกส์	1	1	1
เครื่องบรรจุและสิ่งทอ	4	3	3
กระบวนการฟิล์มถ่ายภาพ	1	1	1
กระบอกลม	3	3	5
เครื่องมือนิวเมติกส์	4	4	4

อุปกรณ์ควบคุมกระบวนการผลิต	2	2	3
การพ่นสี	3	3	3
การเป่าทราย	-	3	3
เครื่องเชื่อม	4	4	5
อากาศที่ใช้ในโรงซ่อมทั่วไป	4	4	5

โรงงานส่วนใหญ่ต้องการอากาศอัดที่มีคุณภาพสูงเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถประหยัดพลังงานได้มาก โดยการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดที่ระดับต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้สำหรับการใช้งานทั่วๆไปและเพิ่มคุณภาพอากาศอัดในระดับที่ต้องการให้เหมาะสมเฉพาะจุดที่จำเป็นเท่านั้น

องค์ประกอบของการสร้างอากาศอัดที่มีคุณภาพ

แอร์ไดเออร์(Air dryer) ทำหน้าที่กำจัดความชื้นออกจากอากาศอัด โดยวิธีการสร้างความเย็นแล้วถ่ายเทให้กับอากาศอัด ไอน้ำที่ปนอยู่ในอากาศอัดจะทำการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำก่อนที่จะถูกทิ้งออกจากระบบอากาศอัด ข้อจำกัดของแอร์ไดเออร์คือสามารถทำ Pressure dew point ได้ประมาณ 5°C ถ้ามีการสร้างความเย็นมากกว่านี้น้ำที่กลั่นตัวออกมามีโอกาสที่จะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้ท่อตันได้

ฟิวเตอร์กรองอนุภาคที่เป็นของแข็ง(Pre filter) ทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคที่เป็นของแข็งที่ปนมากับอากาศอัด ความละเอียดของฟิวเตอร์มีให้เลือกหลากหลายซึ่งความละเอียดจะอยู่ในช่วง 1-5 μm

ฟิวเตอร์กรองไอน้ำมันเครื่อง(Coalescent filter) ทำหน้าที่ในการกรองไอน้ำมันเครื่องที่ปนมากับอากาศอัดความละเอียดของไส้กรองอยู่ที่ 0.01 μm

ฟิวเตอร์กรองกลิ่น(Carbon filter) ทำหน้าที่ในการดักจับกลิ่น องค์ประกอบหลักของตัวฟิวเตอร์คือ activated carbon

ฟิวเตอร์กรองแบคทีเรีย(Bacteria filter) ทำหน้าที่ในการกรองแบคทีเรียส่วนใหญ่ใช้กับงานโรงพยาบาล

เดสซิแคนท์แอร์ไดเออร์(Desiccant air dryer) ทำหน้าที่กำจัดความชื้นออกจากระบบ โดยใช้สารดูดซับ เม็ดสารดูดซับที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ molecular sieve และ activated alumina ความสามารถในการทำ Pressure dew point -70°C และ -40°C ตามลำดับ ข้อเสียของตัวเดสซิแคนท์แอร์ไดเออร์อยู่ที่ในขั้นตอนการทำงานจะต้องมีอากาศอัดบางส่วนที่ต้องทิ้งไปคิดเป็น 15-20% ของอากาศอัดด้านขาเข้า จึงค่อนข้างเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก

ชุดปล่อยน้ำทิ้งอัตโนมัติ(automatic drain) ทำหน้าที่ในการปล่อยน้ำทิ้งออกจากระบบอัดอากาศ มีให้เลือกหลายรูปแบบ เช่นแบบใช้ไฟฟ้า, แบบใช้ลูกลอย เป็นต้น ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งชุดปล่อยน้ำทิ้งอัตโนมัติได้แก่ ใต้ถังเก็บอากาศอัด, แอร์ไดเออร์ และชุดฟิวเตอร์ต่างๆ

2.1.9 บำรุงรักษาชุดกรองและจุดกรองต่างๆในระบบอัดอากาศ

ในการผลิตอากาศอัดที่มีคุณภาพจำเป็นต้องมีไส้กรองเป็นจำนวนมาก ควรมีการบำรุงรักษาคือ การหมั่นทำความสะอาดเป็นประจำ, ตรวจสอบจากอินดิเคเตอร์ของชุดไส้กรองเองถ้าพบค่าเกินกว่าที่ผู้ผลิตกำหนดให้ทำการเปลี่ยนตัวใหม่ทันที หรือในกรณีที่ไม่มีอินดิเคเตอร์ควรทำการเปลี่ยนไส้กรองตามอายุการใช้งานที่ทางผู้ผลิตกำหนดมา การบำรุงรักษาที่ดีส่งผลให้การไหลของอากาศไหลได้ดี ความต้านทานในระบบอัดอากาศต่ำและเป็นการประหยัดพลังงาน

2.1.10 การเลือกถังเก็บอากาศอัดที่เหมาะสม ถังเก็บอากาศอัด(Receiver tank) ทำหน้าที่คือ เก็บอากาศอัดและลดการกระเพื่อมของแรงดันอากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศ, สามารถชดเชยความต้องการของโหลดในลักษณะช่วงความต้องการโหลดสูงสุด(Peak load)ได้, ช่วยลดการตัดต่อของเครื่องอัดอากาศที่บ่อยเกินไป และช่วยระบายความร้อนของอากาศอัดพร้อมทั้งเป็นจุดกลั่นตัวของน้ำและน้ำมัน ขนาดของถังเก็บอากาศอัดมี 2 ลักษณะคือ

- ระบบที่มีความต้องการอากาศอัดคงที่ คือระบบที่มีการใช้อากาศอัดสม่ำเสมอต่อเนื่องจนหยุดผลิต ปริมาตรถังเก็บอากาศอัดไม่จำเป็นต้องใหญ่มากนัก

- ระบบที่มีความต้องการปริมาณอากาศอัดที่ไม่คงที่ คือระบบที่มีการใช้อากาศอัดไม่สม่ำเสมอมีความต้องการอากาศอัดในบางช่วงเวลาต่างกันค่อนข้างสูง จึงจำเป็นที่จะต้องติดตั้งถังเก็บอากาศอัดไว้ชดเชยความต้องการโหลดบางช่วงที่มีความต้องการมากกว่ากำลังการผลิตของเครื่องอัดอากาศ การหาขนาดถังเก็บอากาศอัดที่เหมาะสม

$$\boxed{V_R = \frac{A \times C_0 \times P_0}{P_g + P_0}} \tag{2.8}$$

เมื่อ

V_R = ปริมาตรถังเก็บอากาศ (m^3)

C_0 = กำลังการผลิตของอากาศอัด (m^3/min)

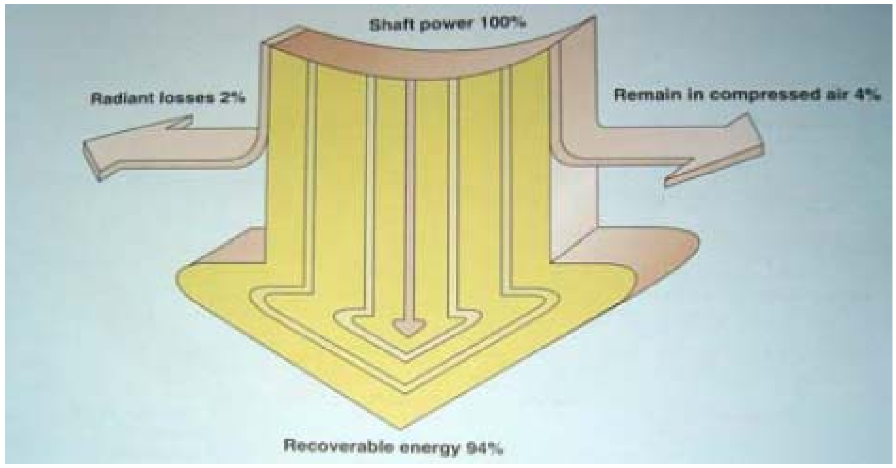
P_0 = ความดันสมบูรณ์ของบรรยากาศ (1.013 bar)

P_g = ความดันเกจ (bar)

A = ค่าตัวประกอบของเวลา (min) โดยปกติจะมีค่าเท่ากับ 1.5 สำหรับโหลดคงที่ และมีค่าเท่ากับ 3 สำหรับโหลดที่ความต้องการปริมาณอากาศอัดไม่คงที่

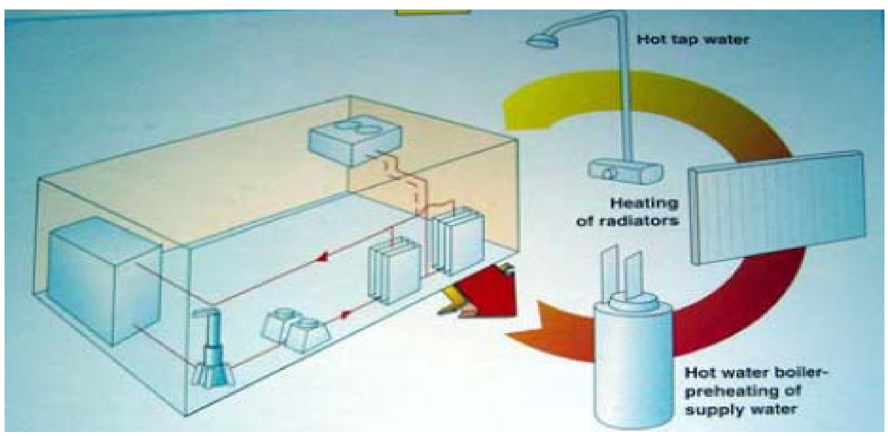
2.1.11 การนำความร้อนทิ้งจากเครื่องอัดอากาศกลับมาใช้

พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องอัดอากาศใช้นั้นจะแปรเป็นรูปพลังงานสองส่วน คือ พลังงานอากาศอัด และพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนนี้สามารถนำกลับมาใช้ได้ถึง 94% เมื่อเทียบกับพลังงานที่ปลายเพลา ที่เหลือเป็นพลังงานความร้อนแผ่ 2% และเป็นพลังงานอากาศอัด 4%



รูปที่ 2.10 สัดส่วนการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเป็นพลังงานรูปอื่นของเครื่องอัดอากาศ

พลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งสามารถนำกลับมาใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น การนำมาอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ, การนำกลับมาอุ่นอากาศเพื่อใช้ในการอบหรือให้ความร้อน และการนำมาแลกเปลี่ยนทำน้ำอุ่น เป็นต้น



รูปที่ 2.11 การนำพลังงานความร้อนที่ได้จากเครื่องอัดอากาศมาใช้โดยผ่านอุปกรณ์ต่างๆ

ประโยชน์ของการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องอัดอากาศกลับมาใช้

- ช่วยประยัดค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนของพลังงานความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆ
- ลดปัญหาอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ
- เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้กับเครื่องอัดอากาศ

การคำนวณค่าพลังงานความร้อนทิ้งกลับมาใช้

$$W_{heat} = [(K_1 \times Q_1)+(K_2 \times Q_2)] \times T_R \times N \quad (2.9)$$

เมื่อ

W_{heat} = พลังงานความร้อนที่นำกลับมา (kWh/year)

K_1 = เวลาทำงานของเครื่องอัดอากาศช่วงโหลด

K_2 = เวลาทำงานของเครื่องอัดอากาศช่วงไร้โหลด

Q_1 = กำลังไฟฟ้าช่วงโหลด (kW)

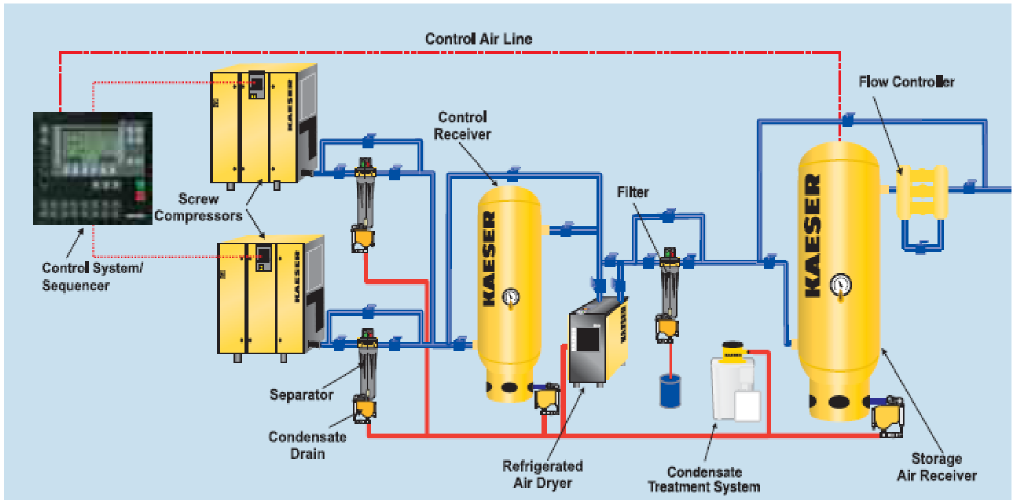
Q_2 = กำลังไฟฟ้าช่วงไร้โหลด (kW)

T_R = ชั่วโมงที่นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ (hours)

N = ประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายพลังงานความร้อน

2.1.12 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเครื่องอัดอากาศจากศูนย์กลางเดียวกัน

ในกรณีที่เครื่องอัดอากาศหลายๆเครื่อง โดยปกติการควบคุมสภาวะโหลดและไม่มีโหลดของเครื่องอัดอากาศจะควบคุมโดยใช้สวิสต์ควบคุมความดันของเครื่องอัดอากาศภายในเครื่อง ทำให้การทำงานของเครื่องอัดอากาศเป็นลักษณะการทำงานที่ไม่มีทิศทางที่เหมาะสม การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเครื่องอัดอากาศจากศูนย์กลางจะทำให้เป็นการควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เป็นการช่วยในเรื่องการประหยัดพลังงานและยังช่วยให้เครื่องอัดอากาศมีอายุการทำงานที่ใกล้เคียงกันอีกด้วย



รูปที่ 2.12 แสดงการใช้อุปกรณ์ควบคุมเครื่องอัดอากาศจากศูนย์กลางเดียว[15]

2.2 การปรับปรุงระบบอัดอากาศในส่วนการส่งจ่ายอากาศอัด

2.2.1 การปรับปรุงท่อเมนในการส่งจ่ายอากาศอัด

ผู้ออกแบบจะออกแบบระบบท่อเมนที่เหมาะสมกับเครื่องจักรในขณะนั้น แต่เมื่อโรงงานมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นมีการเพิ่มเครื่องจักรมากขึ้น ความต้องการปริมาณอากาศอัดมากขึ้น ทางโรงงานมักแก้ปัญหาโดยซื้อเครื่องอัดอากาศเพิ่ม แต่มิได้คำนึงถึงขนาดท่อเมนส่งจ่ายอากาศอัดว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ เมื่อทำการปรับปรุงท่อเมนเพื่อลดความดันสูญเสียแล้วต้องทำการปรับลดความดันที่เครื่องผลิตอากาศอัดลงเพื่อการประหยัดพลังงาน

หลังจากเครื่องอัดอากาศได้ทำการผลิตอากาศอัด อากาศอัดจะถูกส่งผ่านระบบท่อไปยังจุดใช้งาน การส่งจ่ายอากาศอัดอาจทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้มาก จากการที่ต้องผลิตอากาศอัดที่ความดันสูงเพื่อเผื่อความดันสูญเสียเมื่ออากาศอัดมีการไหลผ่านท่อ, วาล์ว และอุปกรณ์ข้อต่อต่างๆที่มีขนาดไม่ถูกต้อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้อากาศอัดไหลด้วยความเร็วสูงแล้วเกิดความดันตกในระบบการส่งจ่าย ดังนั้นควรออกแบบระบบท่อให้มีการสูญเสียความดันให้น้อยที่สุด สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการสูญเสียความดันได้แก่ 1) แรงเสียดทานระหว่างอากาศอัดกับผนังท่อ 2) การปรับทิศทางการไหลของอากาศอัด 3) การเปลี่ยนความเร็วของอากาศอัดเนื่องจากการเพิ่มหรือลดขนาดท่อ ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานสามารถหาได้จาก

$$\Delta P = \frac{f \times L \times Q^{1.85}}{P_m \times D^5} \quad (2.10)$$

เมื่อ

ΔP = ความดันที่สูญเสีย (bar)

f = ตัวประกอบความเสียดทาน

L = ความยาวท่อ (เมตร)

Q = ปริมาณการไหลของอากาศ (L/s)

P_m = ความดันสัมบูรณ์เฉลี่ยในท่อ (bar)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (mm)

2.2.2 การออกแบบท่อเมน

ขนาดของท่อเมนควรมีขนาดใหญ่พอที่จะไม่ให้เกิดความสูญเสียความดันภายในท่อมากเกินไป โดยทั่วไปแล้วความดันสูญเสียไม่ควรเกิน 5% ทุกระยะ 30 เมตรของความยาวของท่อหรือที่ความเร็วของอากาศอัดในท่อเมนไม่เกิน 6 m/s แต่ความดันสูญเสียทั้งระบบไม่ควรเกิน 10% โดยประมาณ หรือยอมให้ 15% ชั่วขณะความต้องการสูงสุด ในแต่ละจุดที่นำอากาศอัดไปใช้งานความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นไม่ควรเกิน 0.1-0.2 bar ณ.ความต้องการอากาศอัดสูงสุด ขนาดของท่อย่อยก็เช่นกันแตกต่างกันตรงความเร็วของอากาศอัดไม่ควรเกิน 10 m/s

$$D_{mm} = \sqrt{\frac{3536 \times Q_{CMM} \times P_0}{P_g + P_0}} \quad (2.11)$$

เมื่อ

P_0 = ความดันบรรยากาศ (1.013 bar)

P_g = ความดันเกจ (bar)

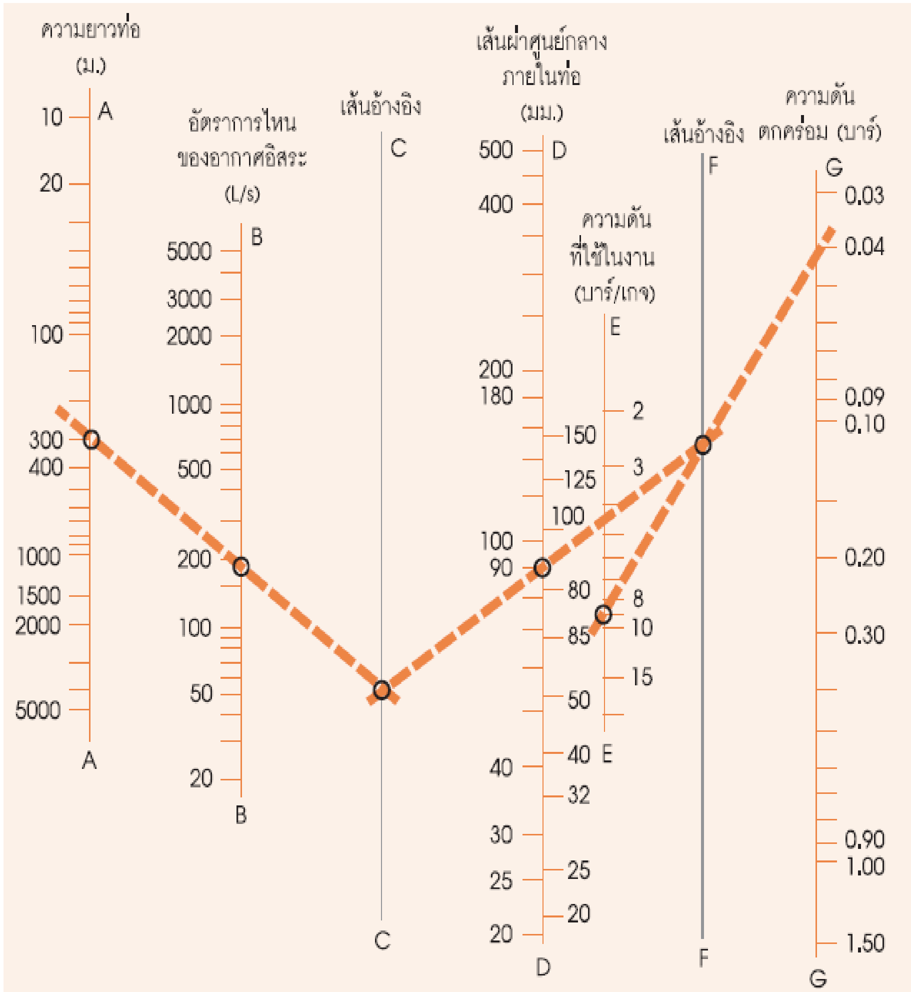
D_{mm} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)

Q_{CMM} = อัตราการไหลของอากาศอัดภายในท่อ (m^3/min)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณการไหลของอากาศอัดที่ความดันและขนาดท่อต่างๆ

ASTM STANDARD PIPE Volume lite/sec at Pressure and Pipe Diameters (Velocity 6 m/s)												
Pipe (in)	1/2	3/4	1.0	1,1/4	1,1/2	2.0	2,1/2	3.0	3,1/2	4.0	5.0	6.0
P(bar) /Dia (mm)	15.76	50.96	26.64	35.08	40.94	52.48	62.68	77.92	90.12	102.26	128.2	154.08
4.0	5.9	10.4	16.8	29.1	39.6	65.1	92.8	143.5	191.9	247.1	388.3	561.0
4.5	6.5	11.4	18.4	32.0	43.6	71.6	102.1	157.8	211.0	271.7	427.1	616.9
5.0	7.0	12.5	20.1	34.9	47.5	78.1	111.3	172.1	230.2	296.4	465.8	672.9
5.5	7.6	13.5	21.8	37.8	51.5	84.5	120.6	186.4	249.3	321.0	504.5	728.8
6.0	8.2	14.5	23.5	40.7	55.4	91.0	129.9	200.7	268.5	345.7	543.3	784.8
6.5	8.8	15.6	25.1	43.6	59.4	97.5	139.1	215.0	287.6	370.3	582.0	840.7
7.0	9.4	16.6	26.8	46.5	63.3	104.0	148.4	229.3	306.7	395.0	620.7	896.7
7.5	10.0	17.6	28.5	49.4	67.3	110.5	157.6	243.6	325.9	419.6	659.5	952.6
8.0	10.6	18.7	30.1	52.3	71.2	117.0	166.9	257.9	345.0	444.2	698.2	1008.6
8.5	11.1	19.7	31.8	55.2	75.2	123.5	176.2	272.2	364.2	468.9	736.9	1064.5
9.0	11.7	20.7	33.5	58.1	79.1	130.0	185.4	286.5	383.3	493.5	775.7	1120.5
9.5	12.3	21.8	35.2	61.0	83.1	136.5	194.7	300.9	402.4	518.2	814.4	1176.4
10.0	12.9	22.8	36.8	63.9	87.0	143.0	203.9	315.2	421.6	542.8	853.1	1232.4

เราสามารถหาขนาดของท่อที่เหมาะสมได้ เมื่อเราทราบค่าอัตราการไหลของอากาศอัด, ความดันใช้งาน, ระยะของความยาวท่อ และกำหนดความดันตกคร่อมในระบบ เราก็จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโดยใช้โมโนกราฟ



A: Pipe length(m) = ความยาวท่อตรง(เมตร) รวมความยาวท่อและข้อต่อ
B: Free air flow = อัตราการไหลของอากาศอิสระ (ลิตร/วินาที)
C: Reference line = เส้นอ้างอิง
D: Pipe inner diameter = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (มิลลิเมตร)
Actual = ขนาดจริง
Nominal = ขนาดระบุ
E: Working pressure = ความดันใช้งาน (บาร์ เกจ)
F: Reference line = เส้นอ้างอิง
G: Pressure drop = ความดันตกคร่อม (บาร์ เกจ) ของความยาวท่อตามเส้น A

รูปที่ 2.13 การหาขนาดของท่ออากาศอัดโดยใช้โมโนกราฟ[16]

ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในข้อต่อต่างๆในการเดินท่ออากาศอัดสามารถหาได้จากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในข้อต่อต่างๆในการเดินท่ออากาศอัด

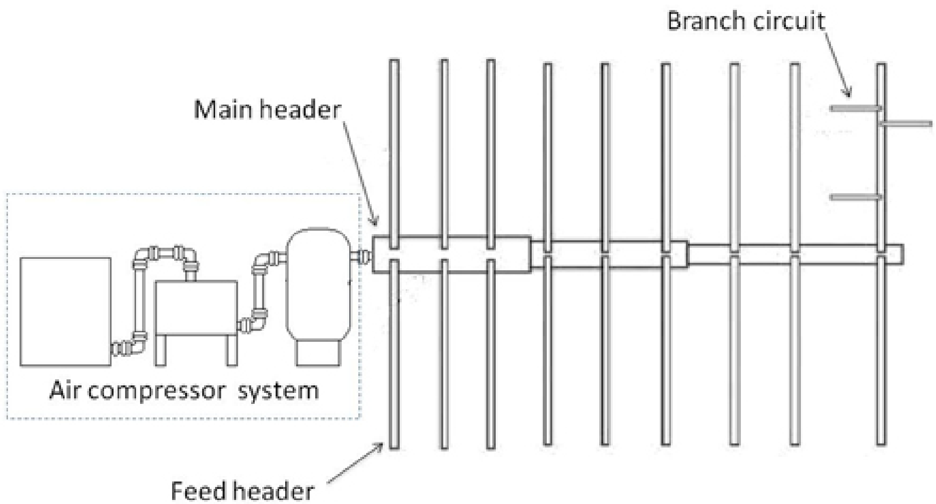
Equivalent length in metres											
	Inner pipe diameter in mm (d)										
Component	25	40	50	80	100	125	200	250	250	300	400
Ball valve (full flow)	0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Diaphragm valve fully open	1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Angle valve fully open	4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Poppet valve	7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Flap check valve	2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Elbow R = 2d	0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Elbow R = d	0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
90° angle	1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Tee through-flow	0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Tee side-flow	1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reducing nipple	0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

2.2.3 การวางรูปแบบของท่อลม (Pipe Line Lay Out)

สำหรับการวาง Layouts ของท่อลมที่ใช้กันโดยทั่วไปในโรงงานนั้นมีหลัก ๆ 3 แบบ คือ ขึ้นอยู่กับขนาดของโรงงาน จำนวนเครื่องจักร และอัตราการใช้ลม ซึ่งบางแห่งอาจเลือกใช้แบบใดแบบหนึ่งและบางแห่งก็อาจใช้หลายแบบผสมกันก็ได้ ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละแบบดังต่อไปนี้คือ

2.2.3.1 การวาง Layouts แบบกริด (Grid System)

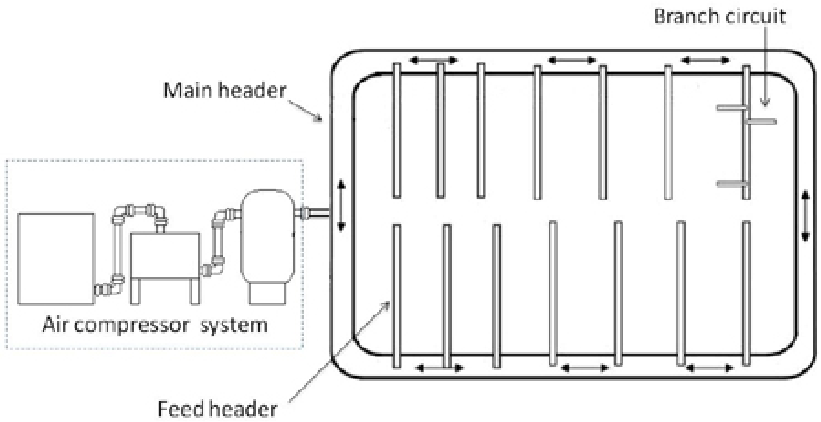
เหมาะกับไลน์หรือกลุ่มเครื่องจักรเล็ก ๆ ที่มีอัตราการใช้ลมน้อยและระยะการจ่ายลมจากเครื่องอัดลมไปจนถึงท้ายไลน์ไม่ไกลมากนัก โดยท่อเมน (Main Pipe) ที่ต่อออกจากถังลมมีขนาดใหญ่แล้วค่อย ๆ ลดขนาดให้เล็กลงในตอนท้าย ส่วนท่อสาขา (Branch Pipe) จะต่อออกจากท่อหลักเข้าสู่เครื่องจักรต่าง ๆ ลงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ไลน์การจ่ายลมแบบกริด[17]

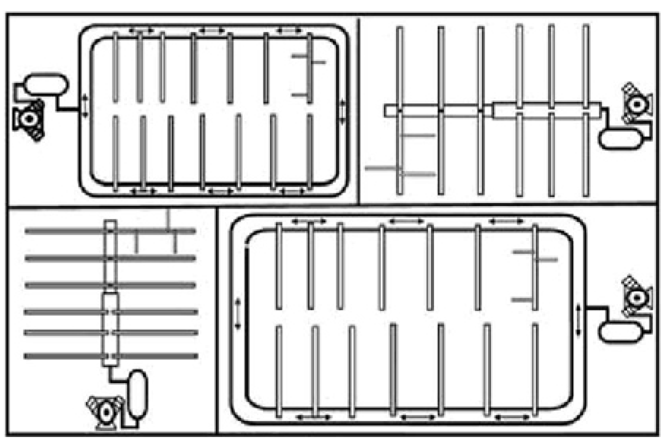
2.2.3.2 การวาง Layouts แบบวงท่อ (Loop Piping System)

เหมาะกับไลน์หรือกลุ่มเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่หรือครอบคลุมพื้นที่มาก มีอัตราการใช้ลมที่มากและท่อลมมีความยาวมาก ดังรูปที่ 10 การจัดวางไลน์ท่อลมแบบวง (Loop Piping System) นั้น วงของท่อจะเชื่อมต่อกันทั้งหมด และจ่ายลมออกจากเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ผ่านถังเก็บลมและระบบปรับปรุงคุณภาพลมเข้าสู่วง (Loop) ของท่อลม เนื่องจากไม่มีหัวไลน์และท้ายไลน์จึงทำให้การสมดุลแรงดันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงทำให้เกิดปัญหาแรงดันลมตก (Pressure Drop) น้อยกว่าระบบอื่น อีกทั้งเมื่อเกิดการใช้ลมที่ส่วนท้ายของวงท่อเป็นปริมาณมาก ลมจะวิ่งจากจุดจ่ายไปยังจุดที่ต้องการใช้ลมโดยผ่านท่อทั้งสองด้านของวงทำให้สามารถรองรับปริมาณการใช้ลมที่มากกว่าได้ในท่อขนาดเดียวกัน



รูปที่ 2.15 แสดงไลน์การจ่ายลมแบบวง[17]

สำหรับไลน์การผลิตอีกรูปแบบที่การผลิตหรือการเดินเครื่องไม่พร้อมกันในแต่ละเวลา เช่น มีไลน์การผลิตย่อยหลายไลน์ แต่ละไลน์มีเครื่องจักรที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน และการผลิตของไลน์แต่ละไลน์ไม่ได้ทำในเวลาเดียวกันหรืออาจมีเวลาที่ Lap กัน รูปแบบการเดินท่อและจ่ายลมอาจใช้รูปแบบผสมหรือรูปแบบแยกหน่วยได้ โดยรูปแบบนี้จะแบ่งไลน์ลมออกเพื่อความเหมาะสมกับความต้องการลมของแต่ละหน่วยผลิตย่อย ซึ่งอาจพิจารณาจากปริมาณการใช้ลม ขนาดและความยาวของท่อลมที่ใช้ตลอดจนเรื่องอื่น ๆ จากนั้นก็ติดตั้งปั๊มลมและถังเก็บลมสำหรับแต่ละหน่วยการผลิตโดยอาจมีทั้งไลน์ลมแบบวง (Loop) สำหรับหน่วยการผลิตย่อยที่มีขนาดใหญ่และไลน์ลมแบบกริด (Grid) สำหรับหน่วยการผลิตขนาดเล็กที่ใช้ลมไม่มาก



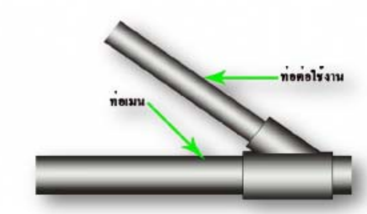
รูปที่ 2.16 ไลน์การจ่ายลมแบบผสมหรือแยกหน่วย[17]

การวางท่อส่งจ่ายอากาศอัดตามแนวนอนควรจะวางให้มีมุมเอียงลาด 1-2% ของความยาวท่อส่งจ่ายอากาศอัด และที่จุดปลายต่ำสุดหรือบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับ จะต้องติดวาล์วหรับกับดักน้ำสำหรับระบายน้ำที่เกิดจากการกลั่นตัวในท่อทิ้ง

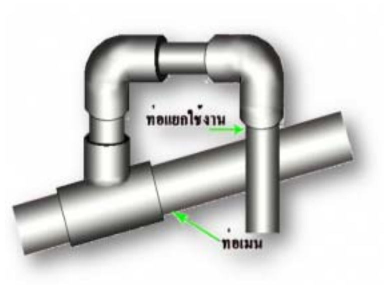
ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ข้องอได้ก็ไม่ควรใช้งอแบบมุมหักฉาก 90° แต่ควรจะใช้ข้องอโค้ง 90°แทน และในการเดินท่อเมื่อมีสิ่งกีดขวาง เช่น คาน เป็นต้น ควรทำการเดินท่อตามรูปที่ 17 และสำหรับส่วนที่ต่ำที่สุดจะต้องติดตั้งชุดระบายน้ำอัตโนมัติ เพื่อป้องกันไม่ให้มีน้ำมาขังอยู่ภายในบริเวณดังกล่าว

รูปที่ 2.17 แสดงกับดักน้ำ [17]

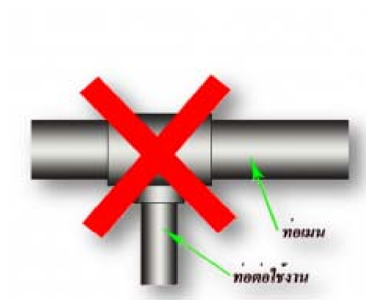
สำหรับการแยกท่อส่งจ่ายอากาศอัดออกไปใช้งานจากท่อเมน จะต้องต่อท่อขึ้นทางด้านบนทำมุมประมาณ 30° กับท่อเมนแล้วงอโค้งลงมาดังรูป 18 แต่ถ้าไม่สามารถหาวัสดุหรือท่อโค้ง 30° ได้ควรใช้ท่อสั้นๆต่อจากด้านบนของท่อเมนแล้วจึงใช้ข้องอต่อลงมาดังรูป 19 ไม่ควรต่อท่อตามรูปที่ 20 เพราะถ้าคุณภาพของอากาศอัดไม่ดีพอจะทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำที่ปนไปกับอากาศอัดไหลลงไปทำความเสียหายแก่อุปกรณ์



รูปที่ 2.18 การต่อท่อแยกออกจากที่เมนทำมุม 30° [17]



รูปที่ 2.19 การต่อท่อแยกออกจากท่อเมนทำมุม 90° [17]



รูปที่ 2.20 แสดงรูปการต่อท่อแยกออกจากท่อเมนที่ผิดวิธี [17]

2.2.4 การลดการรั่วไหลของอากาศอัด

หากทดสอบการรั่วไหลแล้วอัตราการรั่วเกินกว่า 5% โรงงานควรดำเนินการแก้ไขโดยด่วน ประโยชน์ของการลดการรั่วไหลของอากาศอัดได้แก่ 1) ลดการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ 2) ลดปัญหาความดันอากาศตก 3) ลดการใช้งานของเครื่องอัดอากาศ 4) ลดต้นทุนการใช้พลังงานในส่วนของระบบอัดอากาศ ตำแหน่งการรั่วไหลที่พบบ่อยๆ เช่น วาล์ว, หน้าแปลน , ข้อต่อต่างๆ, จุดต่อเข้าเครื่องจักร, หัวต่อสาย, และตำแหน่งที่รั่วมักรั่วซ้ำๆ จุดเดิมอาจรั่วเนื่องจากการยึดท่อที่ไม่แข็งแรง หรือบริเวณใช้งานมีการเคลื่อนไหว หรือการต่อสายท่ออ่อนไม่ถูกต้อง เป็นต้น การรั่วมีอยู่ 2 ลักษณะ คือการรั่วตรง และการรั่วซึม วิธีการตรวจสอบปริมาณการรั่วไหลของอากาศอัดทั้งระบบ การทดสอบหาปริมาณอากาศอัดที่รั่วไหลสามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการลงทุนเพิ่มเติม แต่ต้องปิดโหลดทุกชนิดของระบบอัดอากาศที่ทำการทดสอบ วิธีดังกล่าวมีอยู่ 2 กรณี

วิธีที่ 1 การทดสอบเครื่องอัดอากาศที่ทำงานแบบ on/off load ส่วนใหญ่เป็นเครื่องอัดอากาศขนาดเล็กจำพวกปั๊มลูกสูบ หรือเครื่องอัดอากาศที่มีลักษณะการทำงานในลักษณะนี้ ก็สามารถใช้วิธีคำนวณแบบเดียวกัน

สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการรั่วไหล

$$\boxed{Q_{leak} = \frac{Q \times T_{av}}{T_{av} + t_{av}}} \qquad (2.12)$$

เมื่อ

Q_{leak}	=	อัตราการรั่วไหลของระบบ (l/sec)
Q	=	อัตราการผลิตอากาศอัดที่เครื่องอัดอากาศผลิตได้ (l/sec)
T_{av}	=	เวลาเฉลี่ยที่เครื่องอัดอากาศเริ่มทำงาน (sec)
t_{av}	=	เวลาเฉลี่ยที่เครื่องอัดอากาศหยุดทำงาน (sec)

วิธีที่ 2 การทดสอบเครื่องอัดอากาศแบบ load / unload และแบบ modulate เป็นการทดสอบเครื่องอัดอากาศซึ่งโดยส่วนมากเป็นเครื่องอัดอากาศแบบสกรู

สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการรั่วไหล

$$\boxed{Q_{leak} = \frac{V \times (P_1 - P_2)}{T_{av}}} \qquad (2.13)$$

เมื่อ

Q_{leak} = อัตราการรั่วไหลของระบบ (l/s)

V = ปริมาตรทั้งหมดของถังพัก, ท่อลม (liter)

P_1 = ความดันสุดท้ายหรือความดันตัดโหลด (bar)

P_2 = ความดันเริ่มเริ่มโหลด (bar)

T_{av} = เวลาเฉลี่ยจาก P_1 และ P_2

วิธีการทดสอบ

1.คำนวณปริมาตรของถังเก็บอากาศ, ท่อส่ง

2.ปิดอุปกรณ์ที่ใช้อากาศอัดในระบบทุกตัว

3.เดินเครื่องอัดอากาศเพื่ออัดอากาศเข้าถังจนถึงระดับความดันที่ตั้งไว้ (P_1) แล้วทำการปิดวาล์วด้านอากาศเข้าถัง พร้อมทั้งจับเวลา รอจนกระทั่งความดันลดถึง P_2 ทำการบันทึกเวลา ดำเนินการเช่นนี้ประมาณ 3-5 ครั้ง แล้วทำการวิเคราะห์

4.นำค่าเวลาที่วิเคราะห์ได้จากตารางไปแทนค่าในสมการ เพื่อคำนวณหาอัตราการรั่วไหลของอากาศ

2.3 การปรับปรุงระบบอัดอากาศในส่วนการใช้อากาศอัด

2.3.1การใช้อุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงในระบบอัดอากาศ

การเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบอัดอากาศประสิทธิภาพสูง เป็นการใช้อุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาให้มีความสามารถในการทำงานได้เหมือนเดิมแต่มีการลดการใช้อากาศอัดให้ลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานของเครื่องอัดอากาศได้อย่างมาก อุปกรณ์ที่พบบ่อยในโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่

2.3.1.1 ปืนลมประสิทธิภาพสูง คือการออกแบบให้มีความสูญเสียแรงดันต่ำและใช้ปริมาณอากาศอัดไม่มาก นอกจากนี้ยังสามารถถอดเปลี่ยนหัวได้หลายขนาด เพื่อปรับใช้ให้เหมาะสมกับสภาพหน้างานและช่วยลดการใช้ปริมาณอากาศอัด

2.3.1.2 หัว nozzle ประสิทธิภาพสูง ปัจจุบันมีการผลิต nozzle ออกมาหลากหลายชนิดตามลักษณะงาน เช่น งานเป่าโบ, เป่าเป็นเกลียว หรือเป่าพ่น ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานในระบบอัดอากาศลงได้เป็นอย่างมาก

ลักษณะงานที่มีความจำเป็นต้องใช้อากาศอัดเป่าระบายความร้อนและทำความสะอาด หากทำการติดตั้งหัว nozzle ประสิทธิภาพสูงเข้าไปแทนการใช้ท่อยางอ่อนและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงก็จะทำให้ลดการใช้ลมลงได้มาก

2.3.1.3 การเลือกใช้ Booster เพื่อเพิ่มความดันในระบบที่ต้องการความดันอากาศอัดที่สูงกว่าเครื่องจักรอื่นๆ เราสามารถเลือกใช้บู๊ตเตอร์แทนซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงานกว่าการผลิตอากาศอัดความดันจากปั๊มลม

2.3.2 การลดพฤติกรรมที่ไม่เหมาะสมของการใช้อากาศอัด

ปัจจุบันมีโรงงานจำนวนมากที่มีพฤติกรรมการใช้อากาศอัดที่ไม่เหมาะสม ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก การลดการใช้พฤติกรรมที่ไม่เหมาะสมนอกจากจะได้ปริมาณงานเหมือนเดิมแล้วยังจะช่วยให้เป็นการประหยัดพลังงานได้อย่างมากอีกด้วย หลักการมีอยู่ว่าการใช้อากาศอัดให้ใช้แต่เท่าที่จำเป็นเท่านั้นถ้าการทำงานใดสามารถอุปกรณ์อื่นแทนอากาศอัดได้ก็ควรใช้อุปกรณ์นั้น แต่ถ้ามีความจำเป็นต้องใช้อากาศอัดก็ให้ใช้ในความดันและอัตราการไหลที่เหมาะสมกับลักษณะของงานนั้นๆ พฤติกรรมการใช้อากาศอัดที่ไม่เหมาะสมคือ

2.3.2.1 การนำเอาอากาศอัดไปใช้ในการเป่าทำความสะอาดพื้นหรือเครื่องจักร เป็นการไม่เหมาะสมควรใช้วิธีการอื่น เช่น เช็ดหรือกวาด เป็นต้น ในกรณีนี้ถ้าไม่สามารถหาวิธีอื่นในการทำความสะอาดพื้นหรือเครื่องจักรได้ ต้องใช้ลมในการทำความสะอาดน้อยที่สุด คือรูลมที่ใช้เป่าควรทำการติด nozzle และปืนเป่าลม ไม่ควรทำการเปิดจากท่อลมโดยตรงเพราะการเปิดจากท่อลมโดยตรงรูของท่อมีขนาดใหญ่เกินไปทำให้เป็นการสิ้นเปลืองอากาศอัด

2.3.2.2 การนำอากาศอัดไปใช้เป่าระบายความร้อน หรือเป่าฝุ่นตัวเอง พฤติกรรมในลักษณะนี้เกิดขึ้นจริงในโรงงานจำนวนมากคือ ในช่วงที่อากาศร้อนพนักงานมักทำการต่อสายลมเป่าระบายความร้อนให้กับตัวเอง ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้เป็นการสิ้นเปลืองลมเป็นอย่างมาก ทางโรงงานควรขอความร่วมมือจากพนักงานให้งดการใช้โดยเด็ดขาด และทำการติดตั้งพัดลมเป่าระบายความร้อนให้แก่พนักงานแทน

2.3.2.3 การนำเอาอากาศอัดไปใช้เป่าระบายความร้อนเครื่องจักร ซึ่งวิธีนี้มักพบเป็น 2 ลักษณะคือ 1.ก่อนหน้านี้ใช้โบล์เวอร์เป่า ภายหลังขยายพื้นที่ในการเป่าทำให้ลมไม่พอจึงดัดแปลงมาใช้อากาศอัดแทน หากเป็นเช่นนี้เพิ่มโบล์เวอร์จะดีกว่า 2.เครื่องจักรมีความร้อนเกิดขึ้นสูงกว่าปกติ ในกรณีเช่นนี้แทนที่โรงงานจะหาสาเหตุที่ทำให้เครื่องจักรร้อนผิดปกติกับทำการใช้อากาศอัดเป่าตลอดเวลาเพื่อให้การระบายความร้อนมีมากขึ้น

2.3.2.4 การใช้ท่อยางเป่าโดยตรงโดยไม่ใช้ปืนลม การใช้อากาศอัดเป่าทำความสะอาดชิ้นงานในตำแหน่งที่ทำความสะอาดได้ยาก ควรจะพิจารณาในการใช้ปืนลมแทน โดยปกติการใช้อากาศอัดในการเป่าทำความสะอาดจะต้องทำการควบคุมความดันไม่เกิน 3 bar และขนาดของรูปืนลมไม่เกิน 2 mm

2.3.2.5 การลืมปิดวาล์ว, ปิดวาล์วไม่สนิทของพนักงาน หรือหักท่อสายยางแทนการปิดวาล์วหัวหน้าจะต้องแนะนำหรือคอยย้ำเตือนพนักงานบ่อยๆเพื่อให้เกิดจิตสำนึกที่ดีในการประหยัดพลังงาน

2.3.2.6 ประการอื่นๆที่นอกเหนือจากที่ได้กล่าวมา แต่เป็นการสูญเสียอากาศอัดจากการใช้ที่ไม่เหมาะสม ให้ทางโรงงานพิจารณาเองตามความเหมาะสม

จากการรวบรวมวิธีประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกราฟก้างปลาได้ดังนี้

รูปที่ 2.21 แสดงกราฟก้างปลาแสดงแนวทางประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศ

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ming Yang [18] ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบอากาศอัดของโรงงานผลิตรองเท้าแห่งหนึ่งในประเทศเวียดนาม ซึ่งได้ทำการตรวจสอบเครื่องอัดอากาศรุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเครื่องเก่าที่มีประสิทธิภาพไม่ดีพบว่า ประสิทธิภาพการใช้อากาศอัดอยู่ที่ 5-10% หรือหมายถึงมีการสูญเสียพลังงานในระบบอัดอากาศมากกว่า 80% จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบอัดอากาศทั้งระบบพบปัญหาที่สังเกตได้อย่างชัดเจน 2 ประการคือ เครื่องอัดอากาศไม่ได้ถูกใช้งานอย่างเหมาะสม เครื่องอัดอากาศหลายตัวถูกใช้ไปในงานที่ไม่ใช่ความต้องการที่แท้จริง และมีลมรั่วมากกว่า 65% ของอากาศอัดที่ผลิตได้ทั้งหมด มาตรการปรับปรุงใช้เงินลงทุน 84,000 USD ในปีแรกและ 41,400 USD ในปีถัดไปเพื่อจัดการระบบอัดอากาศ 8 เครื่องและซ่อมแซมอุปกรณ์ที่มีการรั่วซึม การลงทุนนี้ช่วยประหยัด 195,700 USD ต่อปี จุดคุ้มทุนเฉลี่ยไม่ถึง 6 เดือน

Huibin Liang และ Xuehua Li [19] ศึกษาการออกแบบระบบแบบผสมผสานโดยใช้เครื่องอัดอากาศแบบสกรูทำงานร่วมกับเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบโดยใช้ PLC ควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศทั้งหมดเพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณอากาศอัดที่ต้องการและสามารถรองรับความต้องการอากาศอัดแบบผันแปรได้ ระบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงระบบควบคุมของเครื่องอัดอากาศในเหมืองในจังหวัด Shandong ซึ่งช่วยให้ลดการใช้พลังงานลงได้อย่างมาก

Saidur, Rahim และ Hasanuzzaman [20] ศึกษาการใช้ประโยชน์ของระบบอัดอากาศและการอนุรักษ์พลังงานในระบบอัดอากาศ อัดอากาศถือเป็นระบบที่มีการใช้พลังงานประมาณ 10% ของการใช้พลังงานทั้งหมดในอุตสาหกรรม การตรวจสอบการใช้พลังงานของระบบอัดอากาศจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ในหัวข้อนี้ผู้ทำงานวิจัยได้รวบรวมมาตรการปรับปรุงระบบอัดอากาศ วิธีการตรวจสอบและวิธีการคำนวณจุดคืนทุนในการใช้มาตรการปรับปรุงระบบอัดอากาศเพื่อการประหยัดพลังงาน เช่น การใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง การใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ แก้รอยรั่วต่างๆ ดูดอากาศจากทางด้านนอก ลดความดันตกคร่อมในท่อส่งอากาศอัด การนำความร้อนที่สูญเสียกลับมาใช้ ใช้หัวฉีดอากาศอัดที่มีประสิทธิภาพ และใช้เครื่องอัดอากาศที่สามารถผลิตอากาศแบบแปรผันได้ เป็นต้น

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

การสำรวจระบบอากาศอัดทั้งระบบของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง

โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง เป็นกิจการผลิตก๊อกน้ำและมิเตอร์น้ำ โรงงานแบ่งออกเป็น 9 อาคาร โดยแต่ละอาคารทำหน้าที่ดังนี้

อาคาร 1 แบ่งเป็น 3 ชั้น

- ชั้นที่ 1 ลักษณะงานเป็นงานกลึงทองเหลืองทั้งหมด

- ชั้นที่ 2 ลักษณะงานเป็นงานประกอบมิเตอร์น้ำ และใช้ทดสอบคุณสมบัติของมิเตอร์น้ำ

- ชั้นที่ 3 ลักษณะงานเป็นงานประกอบก๊อกน้ำ มิเตอร์น้ำและใช้ทดสอบคุณสมบัติของก๊อกน้ำ

อาคาร 2 ลักษณะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ

- งานกลึงทองเหลืองครึ่งอาคาร

- งานโค้วทรายทำใส้หล่อ

อาคาร 3 ลักษณะงานเป็นโรงหล่อขึ้นรูป

อาคาร 4 ลักษณะงานเป็นงานหลอมทองเหลืองแท่งใหม่ และเศษทองเหลืองจากงานกลึง หลอมออกมาเป็นแท่งขนาดเศษผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว ความยาว 50 เซนติเมตร

อาคาร 5,6 ลักษณะงานงานรีดทองเหลือง โดยนำทองเหลืองจากอาคาร 4 มาให้ความร้อน แล้วรีดมาเป็นเส้นยาวประมาณ 6 เมตร สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามฝ่ายผลิตเป็นผู้กำหนดมีตั้งแต่ 2,3,4 นิ้ว

อาคาร 7,8,9 ลักษณะงานเป็นการนำทองเหลืองแท่งจากอาคาร 5,6 มาตัดเป็นแท่งสั้น แล้วปั๊มขึ้นรูป เป็นรูปแบบต่างๆ

การใช้อากาศอัดของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง เกิดจากเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 12 เครื่อง แบ่งเป็นตำแหน่งการวางเครื่องทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ลักษกณะการเดินท่ออากาศอัดเดินเชื่อมถึงกันหมดทั้ง 4 ตำแหน่ง แต่มีบอลวาล์วกั้นไว้ ในยามฉุกเฉินสามารถเปิดบอลวาล์วให้ลมในแต่ละตำแหน่งเชื่อมถึงกันได้ ห้องเครื่องอัดอากาศแบ่งเป็น 4 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

อาคาร 1 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 5 เครื่อง ได้แก่

- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ AIR MAN รุ่น หมายเลขเครื่อง 0810 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.1
- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ INGERSOLLRAND, รุ่น หมายเลขเครื่อง D0001กำหนดให้เป็นเครื่อง No.2
- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ KOBELCO, รุ่น หมายเลขเครื่อง 0807 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.3
- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ KOBELCO, รุ่น หมายเลขเครื่อง 1155 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.4
- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ KOBELCO, รุ่น หมายเลขเครื่อง 1156 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.5

อาคาร 2 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 3 เครื่อง ได้แก่

- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ AIR MAN, รุ่น หมายเลขเครื่อง 0805 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.6

- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ AIR MAN, รุ่น หมายเลขเครื่อง 0808 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.7

อาคาร 4 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 1 เครื่อง ได้แก่

- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ AIR BOY, รุ่น : AS100 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.8

อาคาร 9 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 4 เครื่อง ได้แก่

- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ AIR MAN รุ่น หมายเลขเครื่อง : 0835 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.9
- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ AIR MAN, รุ่น หมายเลขเครื่อง : 0834 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.10
- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ KOBELCO, รุ่น หมายเลขเครื่อง : 1157 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.11
- เครื่องอัดอากาศยี่ห้อ KEASER, รุ่น BS61, หมายเลขเครื่อง : 0918 กำหนดให้เป็นเครื่อง No.12

การดำเนินงานวิจัยจะทำการสำรวจและตรวจวัดสภาพการใช้อากาศอัดตามความเป็นจริงของโรงงาน ณ ปัจจุบัน หลังจากนั้นจะทำการเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบอัดอากาศเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยมีขั้นตอนการการดำเนินงานดังนี้

3.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่องอัดอากาศ ณ.สภาพปัจจุบัน เพื่อหาค่าการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องอัดอากาศ

ในการตรวจหาค่าการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องอัดอากาศทำได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าอัตราการไหลของเครื่องอัดอากาศ การตรวจวัดแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

3.1.1 การตรวจวัดอัตราการไหลของเครื่องอัดอากาศ เป็นการวัดอัตราการไหลของเครื่องอัดอากาศจริง ณ.สภาพที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ นาฬิกาจับเวลา, เครื่องคิดเลข, สายวัดความยาว

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- วัดขนาดถังพักลมและคำนวณหาปริมาตรถังลม หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร
- ตั้งค่าความดันทดสอบ ที่ 6 - 7 บาร์
- เดินเครื่องอัดลมเข้าถัง (ปิดวาล์วจ่ายลมออก) จนเครื่องหยุดทำงานที่ 7 บาร์
- ปล่อยลมอัดออกจากถัง(เปิดวาล์วจ่ายลมออก) จนกระทั่งความดันลมลดลงถึง 6 บาร์ (เครื่องจะเริ่มทำงาน) ให้ปิดวาล์วจ่ายลมออกทันที และเริ่มจับเวลาทำงานของเครื่อง
- จับเวลาทำงานของเครื่องจนกระทั่ง เครื่องหยุดทำงาน ที่ 7 บาร์ (หน่วยเป็นวินาที)
- นำค่าที่ได้ทั้งหมดแทนค่าในสมการ $AP = [V \times (Poff - Pon)] / (t \times P_a)$ เพื่อคำนวณหาปริมาณอากาศอัด

3.1.2 การตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้า(P_w) ของเครื่องอัดอากาศ

การตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศ เป็นการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องอัดอากาศใช้จริงในช่วงสภาวะโหลดและสภาวะไร้โหลด ที่ความดัน 6 – 7 bar

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ เพาเวอร์มิเตอร์ ของยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX

รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องพาวเวอร์มิเตอร์ ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ทำการติดตั้งพาวเวอร์มิเตอร์ที่เครื่องอัดอากาศ
- ตั้งค่าความดันของเครื่องอัดอากาศตามมาตรฐานที่ทางโรงงานตั้งอยู่คือ 5- 6 bar
- บันทึกข้อมูลต่อเนื่องเป็นจนกระทั่งได้ช่วงการทำงานตัด/ต่อ อย่างน้อย 2 ไซเคิ้ล
- ทำการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าในลักษณะนี้จนครบทุกเครื่อง

3.1.3 คำนวณหาค่าปริมาณการใช้อากาศอัดตามพฤติกรรมจริงของเครื่องอัดอากาศทุกเครื่อง เป็นการนำผลค่ากำลังไฟฟ้าและค่าอัตราการไหลจากหัวข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 มาคำนวณหาค่าการใช้อัตราการไหลเฉลี่ย และหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยของโรงงาน

3.2 การตรวจสอบอุณหภูมิห้องบริเวณห้องเครื่องอัดอากาศ

ทำการวัดค่าอุณหภูมิบริเวณรอบเครื่องอัดอากาศทุกเครื่องโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และวัดอุณหภูมินอกห้องเครื่องอัดอากาศในที่ร่มเพื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ทำการตรวจวัดอุณหภูมิบริเวณเครื่องอัดอากาศโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งการวัดจะทำการวัดบริเวณที่ฝาเครื่องอัดอากาศตรงช่องที่อากาศไหลเข้าสู่ตัวเครื่องอัดอากาศ แต่ในกรณีที่เครื่องอัดอากาศไม่มีฝาหุ้มเครื่องหรือมีฝาเครื่องไม่ครบทุกด้าน ให้ทำการวัดวัดอุณหภูมิทั้ง 4 ด้านรอบตัวเครื่องแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

- ทำการวัดอุณหภูมิบริเวณห้องเครื่องอัดอากาศในที่ร่มโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์

3.3 ตรวจสอบการใช้ความดันของเครื่องจักรแต่ละประเภท

ทำการสำรวจความดันที่ใช้งานในปัจจุบันของเครื่องจักรภายในโรงงานทั้งหมดที่ใช้อากาศอัดในการเดินเครื่อง เทียบกับค่าความดันที่เครื่องจักรใช้งานจริงตามคุณสมบัติของเครื่องจักร

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ เกจวัดความดัน

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- สำรวจเครื่องจักรทั้งหมดของโรงงานที่ใช้อากาศอัดในการทำงาน

- ติดตั้งเกจวัดความดันในเครื่องจักรทุกประเภทของโรงงานที่ใช้อากาศอัด

- บันทึกค่าความดันที่ต่ำสุดเมื่อเทียบกับความดันในห้องเครื่องอัดอากาศ

3.4 การตรวจสอบความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัด

ความเหมาะสมสำหรับใช้อากาศอัดของ โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง คือมาตรฐาน ISO 8573-1 CLASS 3.3.5 สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 8573-1 ได้แก่ แอร์ไดเออร์, ชุดฟิวเตอร์กรองอนุภาคที่เป็นของแข็ง และชุดฟิวเตอร์กรองไอน้ำมันเครื่อง ในการตรวจสอบจะทำการตรวจสอบความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดเทียบกับมาตรฐานที่ยอมให้เกิดความดันตกคร่อมได้ในแต่ละอุปกรณ์

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ เกจวัดความดัน

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ทำการติดตั้งเกจวัดความดันก่อนและหลังอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดทุกตัว

- อ่านค่าความดันก่อนและหลังที่เกจวัดความดันแล้วบันทึกค่า

3.5 การตรวจสอบความเหมาะสมของถังเก็บอากาศอัด

ทำการตรวจสอบปริมาตรของถังเก็บอากาศเก่าถูกต้องตามมาตรฐานหรือไม่

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- สำรวจปริมาตรถังเก็บอากาศอัดเก่าทั้งหมดของโรงงาน บันทึกค่า

- หาขนาดถังที่เหมาะสมตามมาตรฐานจากสมการ $V_R = (A \times C_0 \times P_0) / (P_g + P_0)$

3.6 การตรวจสอบระบบท่อส่งอากาศอัดทั้งระบบของโรงงาน

ทำการสำรวจลักษณะการเดินท่ออัดอากาศและขนาดของท่ออัดอากาศภายในโรงงานทั้งหมด

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ล้อวัดระยะทาง, เวอร์เนีย

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- สำรวจลักษณะการเดินท่อทั้งหมดของโรงงาน
- วัดความยาวท่อโดยใช้ล้อวัดระยะทาง
- วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ โดยใช้เวอร์เนีย
- เขียนแบบแนวท่อทั้งหมดของโรงงาน
- ทำการคำนวณขนาดท่อโดยใช้โมโนกราฟเพื่อหาความเหมาะสม

3.7 นำเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้งระบบ นำเสนองบประมาณการปรับปรุง และคำนวณหาจุดคืนทุน

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่องอัดอากาศ ณ สภาพปัจจุบัน

4.1.1เครื่องอัดอากาศ No.1

4.1.1.1 ข้อมูลการวัดอัตราการไหล

ปริมาตรถังเก็บอากาศอัด = 2000 ลิตร

ช่วงความดันที่ทำการวัด = 6 – 7 bar

เวลาที่วัดได้ = 25sec, 26sec, 25sec   ค่าเฉลี่ย = 25.33 sec

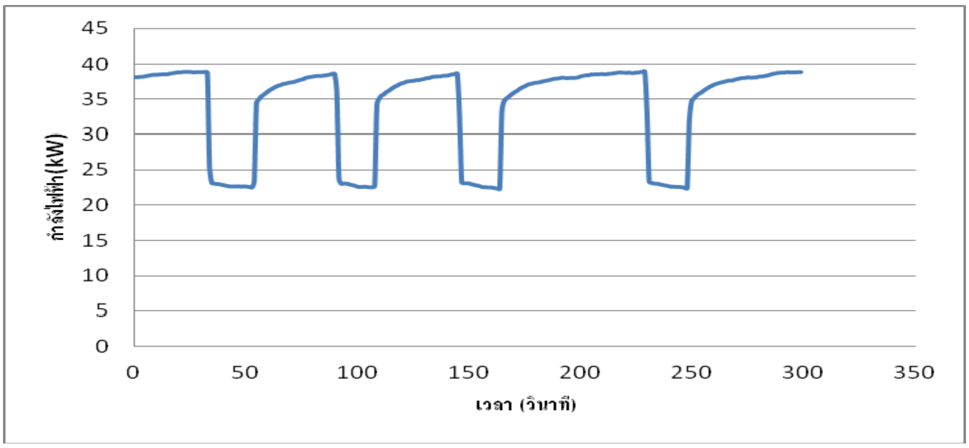
จากสมการ AP $= [V \times (P_{off} - P_{on})] / [t \times P_a]$

$= [2{,}000\text{liters } (7\text{bar} - 6\text{bar})] / [25.33\text{sec} \times 1.01325\text{bar}]$

$= 77.93$ l/s

เพราะฉะนั้นอัตราการไหลช่วงโหลด 100% ของเครื่องอัดอากาศ No.1 = 77.93 l/s

4.1.1.2 ข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องอัดอากาศ No.1



รูปที่ 4.1 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่องอัดอากาศ No.1

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 38.01 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 22.52 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 33.98 kW

การควบคุมเครื่องอัดอากาศ คือ แบบโหลด/ไม่มีโหลด(การตั้งความดันอยู่ระหว่าง 6-7 bar)

วิเคราะห์การทำงานจากกราฟ คือ เครื่องอัดอากาศมีการเดินแบบโหลดและไม่มีโหลด โดยในช่วงสภาวะโหลดเครื่องอัดอากาศจะใช้พลังงานอยู่ในช่วง 35-39.5 kW โดยค่าพลังงานที่เกิดขึ้นแปรผันตรงตามความดันที่เพิ่มสูงขึ้น

4.1.1.3 นำข้อมูลจาก 4.1.1.1 และ 4.1.1.2 มาวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหลเฉลี่ย และค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

หาอัตราการไหลเฉลี่ยจากกราฟกำลังไฟฟ้ากับเวลาของ No.1 โดยจำนวนข้อมูลทั้งหมด 300 ข้อมูล แบ่งเป็น

- ช่วงโหลด จำนวน 222 ข้อมูล ซึ่งอัตราการไหลช่วงโหลด = 77.93 l/s
- ช่วงไร้โหลด จำนวน 78 ข้อมูล โดยอัตราการไหลช่วงไร้โหลด = 0 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = [(อัตราการไหลช่วงโหลด×จำนวนข้อมูลช่วงโหลด)+(อัตราการไหลช่วงไร้โหลด×จำนวนข้อมูลช่วงไร้โหลด)] / (จำนวนข้อมูลช่วงโหลด+ช่วงไร้โหลด)

= [(77.93×222)+(0×78)] / (222+78)

= 57.66 l/s

หาค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = ค่าอัตราการไหลช่วงโหลด / ค่ากำลังไฟฟ้าช่วงโหลด

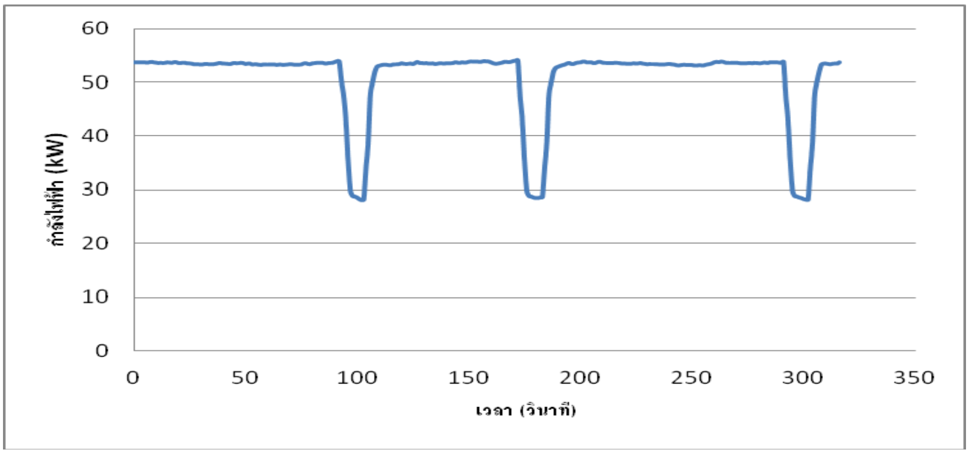
= 77.93 / 38.01

= 2.05 l/s/kW

การคำนวณตั้งแต่เครื่อง No.2 - No.12 จะใช้วิธีคำนวณในลักษณะเดียวกันนี้

4.1.2 เครื่องอัดอากาศ No.2

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.2 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.2

อัตราการไหลช่วงโหลด = 128.75 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 115.35 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 53.73 kW

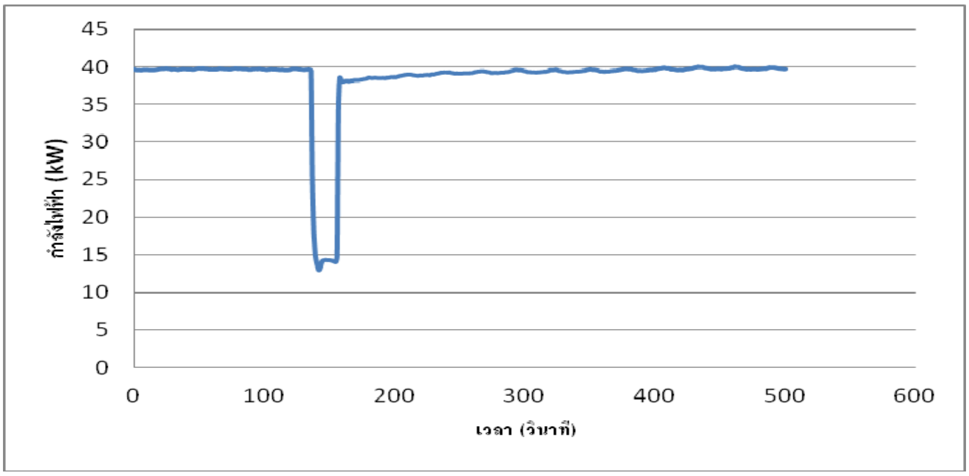
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 27.57 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 51.009 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.39 l/s/kW

4.1.3 เครื่องอัดอากาศ No.3

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.3 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.3

อัตราการไหลช่วงโหลด = 75.91 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 72.88 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 39.51 kW

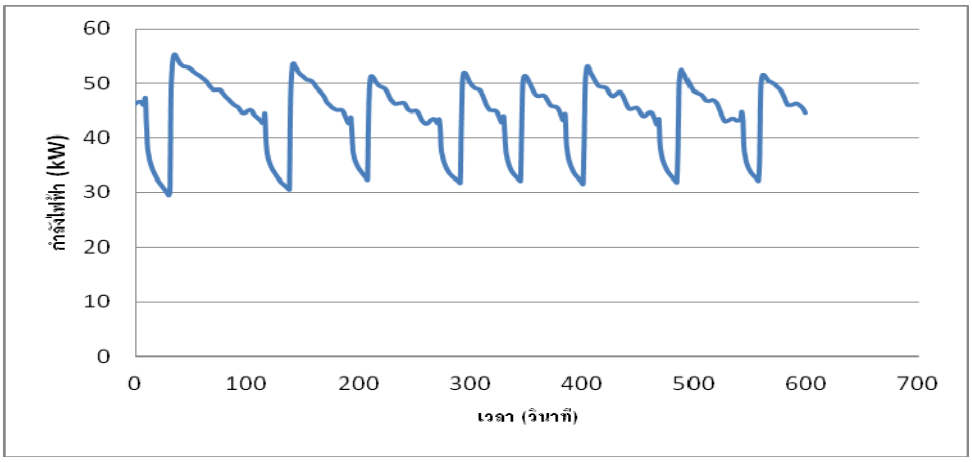
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 13.01 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 38.45 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 1.92 l/s/kW

4.1.4 เครื่องอัดอากาศ No.4

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.4 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.4

อัตราการไหลช่วงโหลด = 98.69 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 76.15 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 48.07 kW

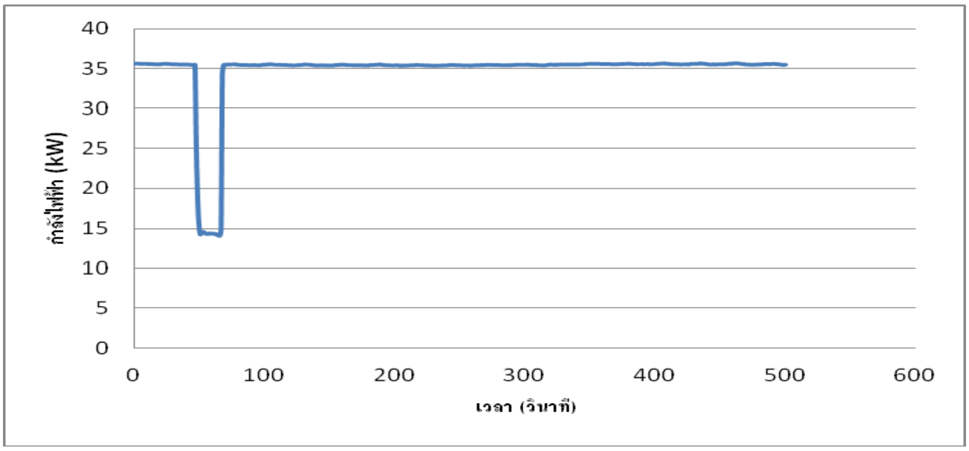
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 31.02 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 44.18 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.05 l/s/kW

4.1.5 เครื่องอัดอากาศ No.5

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.5 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.5

อัตราการไหลช่วงโหลด = 80.04 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 76.84 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 35.58 kW

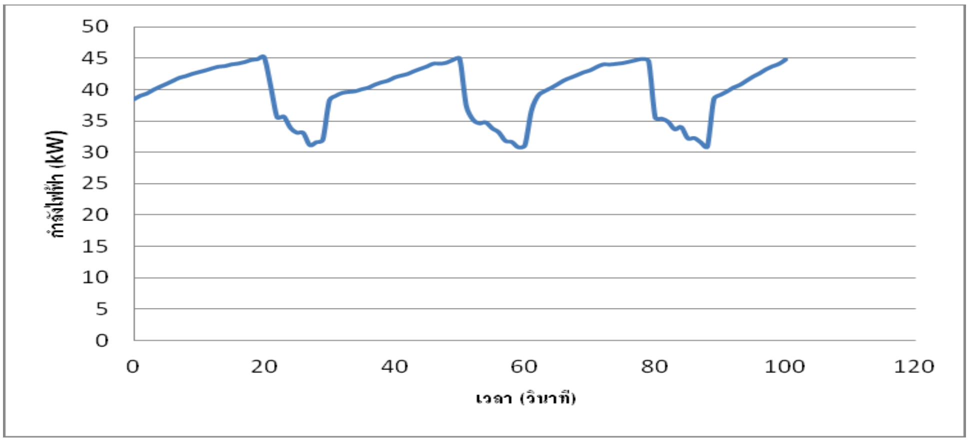
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 14.71 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 34.75 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.25 l/s/kW

4.1.6 เครื่องอัดอากาศ No.6

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.6 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.6

อัตราการไหลช่วงโหลด = 78.95 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 56.84 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 42.30 kW

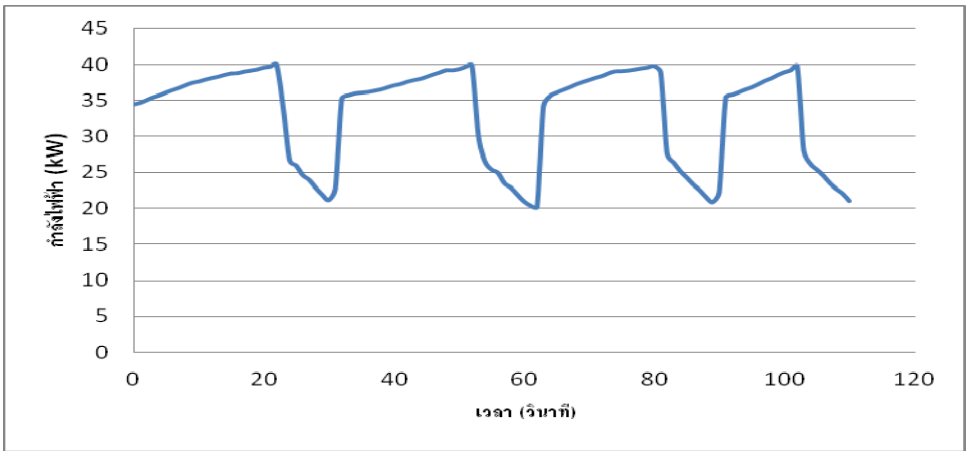
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 33.14 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 39.74 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 1.86 l/s/kW

4.1.7 เครื่องอัดอากาศ No.7

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.7 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.7

อัตราการไหลช่วงโหลด = 75.91 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 50.61 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 38.54 kW

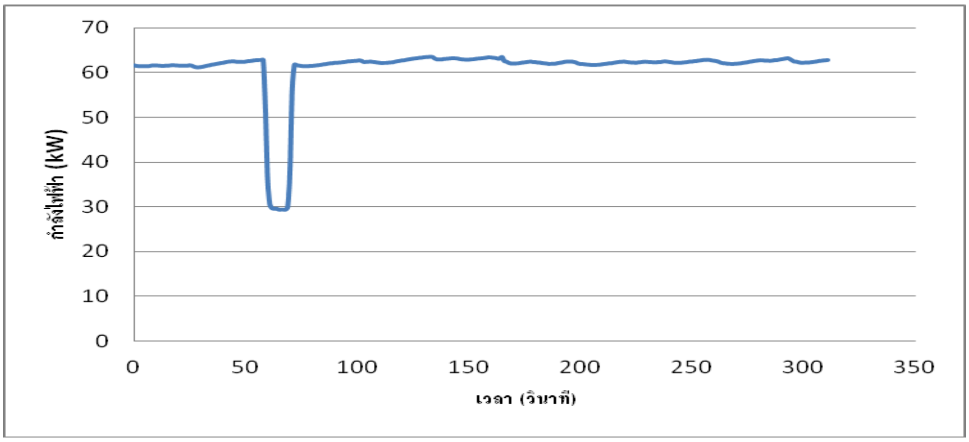
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 22.72 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 33.265 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 1.96 l/s/kW

4.1.8 เครื่องอัดอากาศ No.8

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.8 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.8

อัตราการไหลช่วงโหลด = 174.21 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 168.63 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 62.36 kW

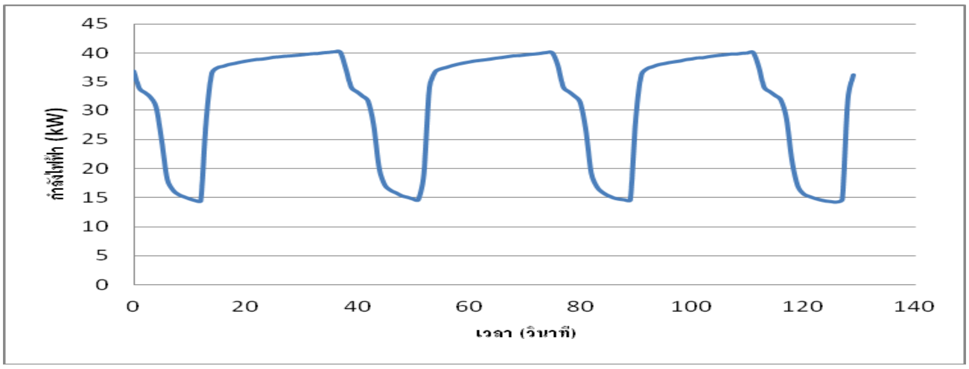
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 29.54 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 61.31 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.79 l/s/kW

4.1.9 เครื่องอัดอากาศ No.9

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.9 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.9

อัตราการไหลช่วงโหลด = 75.91 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 42.63 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 39.08 kW

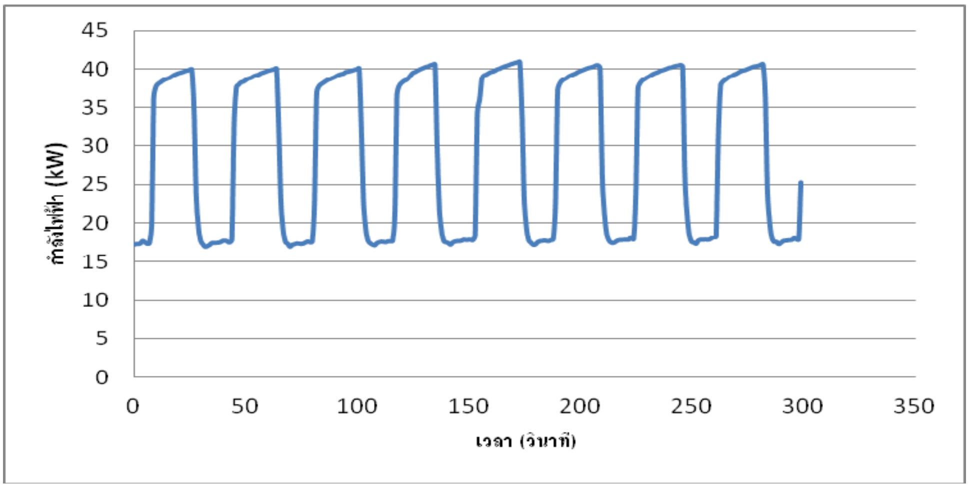
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 21.72 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 31.47 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.26 l/s/kW

4.1.10 เครื่องอัดอากาศ No.10

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.10 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.10

อัตราการไหลช่วงโหลด = 75.91 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 42.63 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 39.10 kW

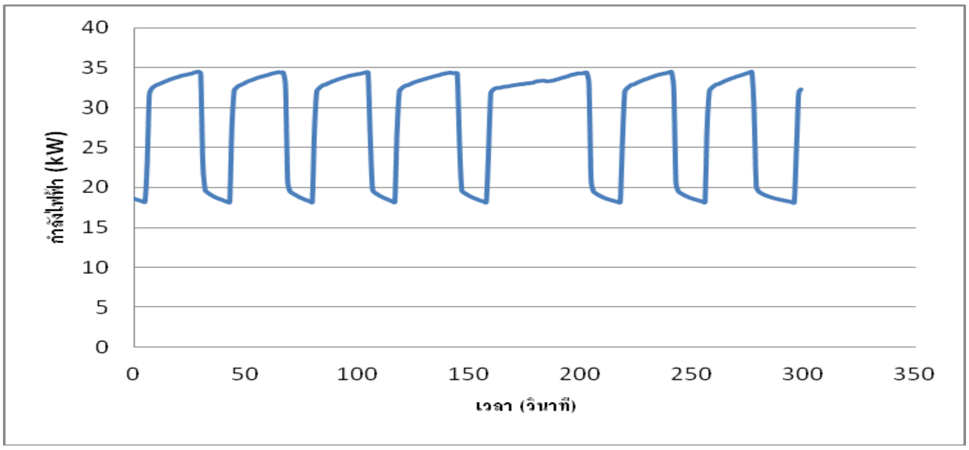
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 18.34 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 29.62 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.36 l/s/kW

4.1.11 เครื่องอัดอากาศ No.11

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.11 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.11

อัตราการไหลช่วงโหลด = 70.49 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 45.58 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 33.59 kW

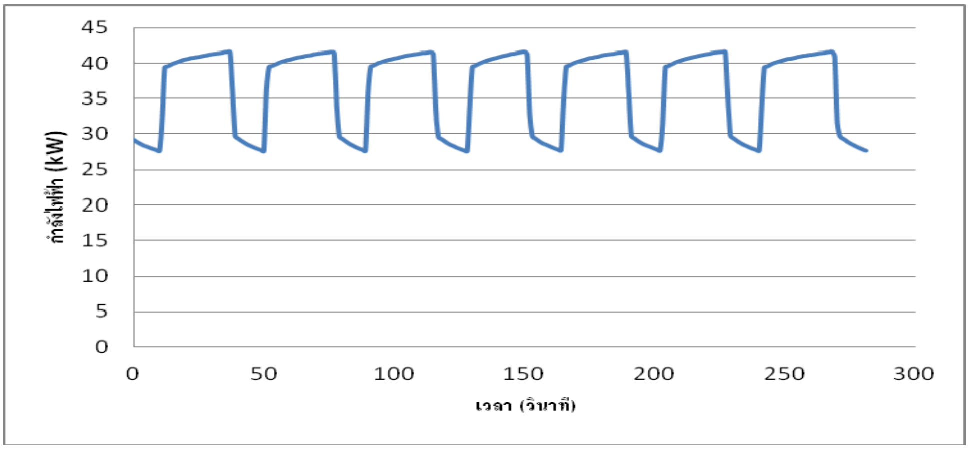
ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 18.65 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 28.313 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.09 l/s/kW

4.1.12 เครื่องอัดอากาศ No.12

ข้อมูลการใช้พลังงาน



รูปที่ 4.12 กราฟค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.12

อัตราการไหลช่วงโหลด = 93.99 l/s

อัตราการไหลเฉลี่ย = 60.32 l/s

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงโหลด = 40.83 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงไร้โหลด = 28.43 kW

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยช่วงความดันระหว่าง 6-7 bar = 36.39 kW

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะช่วงโหลด = 2.30/s/kW

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติของเครื่องอัดอากาศและลักษณะการใช้งาน

หมายเลขเครื่อง	ค่าอัตราการไหลช่วงโหลดของเครื่อง(liter/s)	กำลังไฟฟ้าช่วงโหลด(kW)	ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (liter/s/kW)	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย (liters/s)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย(kW)
No.1	77.92	38.00	2.05	57.66	33.98
No.2	128.75	53.73	2.39	115.35	51.01
No.3	75.91	39.50	1.92	72.88	38.45
No.4	98.69	48.07	2.05	76.15	44.18
No.5	80.04	35.58	2.25	76.84	34.75
No.6	78.95	42.30	1.86	56.84	39.74
No.7	75.91	38.54	1.96	50.61	33.26
No.8	174.21	62.36	2.79	168.63	61.31
No.9	75.91	39.08	2.26	42.63	31.47
No.10	92.53	39.10	2.36	50.27	29.62
No.11	70.49	33.59	2.09	45.58	28.31
No.12	93.99	40.83	2.30	60.32	36.39
รวม	1,123.3	501.68		873.76	462.47

มาตรฐานการเลือกใช้เครื่องอัดอากาศจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ = 2.35 – 2.85 l/s/kWจากผลการทดสอบพบว่า เครื่องอัดอากาศที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะอยู่ในค่ามาตรฐานได้แก่ เครื่องอัดอากาศ No.2, No.8และ No.10

4.2 การตรวจสอบอุณหภูมิห้องบริเวณรอบเครื่องอัดอากาศ

ตารางที่ 4.2 การตรวจสอบอุณหภูมิห้องเครื่องอัดอากาศ

หมายเลขเครื่อง	อุณหภูมิบริเวณห้องเครื่อง(°C)	อุณหภูมิรอบเครื่องอัดอากาศ(°C)				
		ด้านหน้า	ด้านขวา	ด้านซ้าย	ด้านหลัง	ด้านบน
No.1	32	38	39	36.5	36	64
No.2	32	39.5	44	37	39	65
No.3	32	39	40	36.5	38	63.5
No.4	32	38.5	42	37	39.5	64
No.5	32	36.5	40	36	38.5	64
No.6	32	34	35	34	35.5	63.5
No.7	32	35.5	35	34	35	63
No.8	33.5	36	36.5	36	36	64.5
No.9	32	33	33.5	34	33.5	64
No.10	32	33.5	33.5	34	33.5	63
No.11	32	33.5	34	33.5	33.5	63
No.12	32	33	34	33.5	33.5	63.5

จากการสำรวจพบว่า อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องอัดอากาศมีค่ามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิห้องอยู่ประมาณ 1-10°C ในด้านข้างรอบตัวเครื่องและสำหรับด้านบนเครื่องอุณหภูมิจะสูงกว่ามาก

4.3 การตรวจสอบการใช้ความดันอากาศอัด

การตรวจสอบการใช้ความดันของทางโรงงาน แบ่งเป็นการตรวจวัดเป็น 9 อาคาร ได้แก่

ตารางที่ 4.3 ความดันอากาศอัดที่ต้องการภายในอาคารต่างๆ

ตำแหน่งที่ใช้อากาศอัด	ความดันที่ใช้งาน (bar)
อาคาร 1	
- ชั้น 1	5
- ชั้น 2	8
- ชั้น 3	8
อาคาร 2	5
อาคาร 4	5
อาคาร 9	5

4.4 การตรวจสอบความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัด

การใช้งานอากาศอัดของทางโรงงาน เป็นการใช้ในการควบคุมอุปกรณ์นิวเมติกส์, เป่าทำความสะอาดชิ้นงาน และทดสอบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ เพราะฉะนั้นเห็นว่าควรใช้คุณภาพอากาศอัดตามมาตรฐาน ISO8573-1 Class 3.4.3 ฉะนั้นได้ทำการสำรวจมาตรฐานของระบบปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดของโรงงานได้ผลดังนี้

อาคาร 1

ความสามารถในการผลิตอากาศอัดรวมทั้งหมดของอาคาร 1 = 461.33 l/s (27.67m^3/min) การปล่อยอากาศอัดสู่โรงงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไปยังถัง 2,000 ลิตร และส่วนที่ไปยังถัง 1,000 ลิตร

- ส่วนที่ไปยังถัง 2,000 ลิตร มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับอากาศอัดครบ ซึ่งได้แก่ Pre filter, Coalescent filter และ Air dryer
- ส่วนที่ไปยังถัง 1,000 ลิตร มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับอากาศอัดครบ ซึ่งได้แก่ Pre filter, Coalescent filter และ Air dryer

สำหรับการตรวจสอบความดันตกคร่อม ณ ตำแหน่งเครื่องอัดอากาศ, ถังเก็บอากาศอัด และท่อเมนอากาศอัดก่อนเข้าโรงงาน พบความดันตกคร่อมประมาณ 0.1 bar

อาคาร 2

ความสามารถในการผลิตอากาศอัดรวมทั้งหมดของอาคาร 2 = 154.87 l/s อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับอากาศอัดมีครบ ได้แก่ Pre filter, Coalescent filter และ Air dryer สำหรับการตรวจสอบความดันตก คร่อม ณ ตำแหน่งเครื่องอัดอากาศ, ถังเก็บอากาศอัด และท่อเมนอากาศอัดก่อนเข้าโรงงาน ไม่พบความดันตกคร่อม

อาคาร 4

ความสามารถในการผลิตอากาศอัดรวมทั้งหมดของอาคาร 2 = 174.21 l/s อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับอากาศอัด ได้แก่ Pre filter และ Air dryer ขาด Coalescent filter เป็นผลให้จะมีน้ำมันปนเปื้อนไปกับอากาศอัด สำหรับการตรวจสอบความดันตกคร่อม ณ ตำแหน่งเครื่องอัดอากาศ, ถังเก็บอากาศอัด และท่อเมนอากาศอัดก่อนเข้าโรงงาน ไม่พบความดันตกคร่อม

อาคาร 9

ความสามารถในการผลิตอากาศอัดรวมทั้งหมดของอาคาร 2 = 332.93 l/s อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับอากาศอัดมีครบ ได้แก่ Pre filter, Coalescent filter และ Air dryer แต่ air dryer ไม่สามารถสร้าง pressure dew point 3°C ได้ สำหรับการตรวจสอบความดันตกคร่อม ณ ตำแหน่งเครื่องอัดอากาศ, ถังเก็บอากาศอัด และท่อเมนอากาศอัดก่อนเข้าโรงงาน พบความดันตกคร่อมประมาณ 0.5 bar ระหว่างถังเก็บอากาศอัดกับท่อเมนอากาศอัดก่อนเข้าโรงงาน

4.5 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของถังเก็บอากาศอัด

การใช้งานอากาศอัดของทางโรงงานเป็นการใช้งานไม่สม่ำเสมอ แต่เครื่องผลิตอากาศอัดสามารถผลิตอากาศอัดได้มากกว่าความต้องการตลอดเวลา จึงถือได้ว่าเป็นการใช้อากาศอัดแบบสม่ำเสมอ จากการสำรวจพบว่าถังเก็บอากาศอัดภายในโรงงานมีรายละเอียดตามตารางที่ 4.4

ตำแหน่ง	ขนาดถังเก็บอากาศอัด(ลิตร)	จำนวน
อาคาร 1	2,000	1
อาคาร 1	1,500	1
อาคาร 2	2,000	2
อาคาร 2	2,000	1
อาคาร 4	1,000	1
อาคาร 4	2,500	1
อาคาร 9	2,000	1

จากการตรวจสอบขนาดถังเก็บอากาศอัดทั้งหมดมีขนาดรวม 13,000 ลิตร การหาขนาดถังเก็บอากาศอัดที่เหมาะสมสามารถหาได้จาก

$$V_R = \frac{A \times C_0 \times P_0}{P_g + P_0}$$

P_g = 7 bar , C_0 = 1,123.3 l/s = 67.40 m^3/min , A = 1.5 min

แทนค่า $$V_R = \frac{1.5 \times 67.4014 \times 1.01325}{7 + 1.01325}$$

$$= 12.78\ m^3$$

เพราะฉะนั้นขนาดถังเก็บอากาศอัดที่เหมาะสมคือ 12,784 ลิตร

4.6 การตรวจสอบระบบท่อส่งอากาศอัด

ท่อส่งอากาศอัดมีการเดินเชื่อมต่อถึงทั้งหมดตั้งแต่อาคาร 1 ถึง 9 แต่จะมีบอลวาล์วกั้นส่วนของระบบท่อออกเป็น 4 ส่วน แต่ในสภาวะฉุกเฉินสามารถเปิดลมแต่ละอาคารให้เชื่อมต่อถึงกันได้ โดยการแบ่งช่วงของท่ออากาศอัดมีดังนี้

4.6.1 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 1 รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 1 จากกสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.8 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inches

4.6.2 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 2 และ 3 ต่อเชื่อมถึงกัน รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 2 จากการสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.1 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inches

4.6.3 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 4, 5 และ 6 ต่อเชื่อมถึงกัน รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 4 จากการสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.2 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inches

4.6.4 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 7, 8 และ 9 ต่อเชื่อมถึงกัน รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 9 จากการสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.3 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inches

4.7 แนวทางการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้งระบบ

ทางโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง มีความต้องการที่จะปรับปรุงระบบอัดอากาศใหม่ โดยต้องการให้เหลือตำแหน่งที่ตั้งเครื่องอัดอากาศอยู่ที่บริเวณอาคาร 1 และอาคาร 9 เท่านั้น เนื่องจากในบริเวณอาคาร 2 และอาคาร 4 มีฝุ่นละอองจากกระบวนการผลิตค่อนข้างมากจึงต้องการย้ายเครื่องอัดอากาศออกจากบริเวณดังกล่าว แล้วทำการเดินท่อเชื่อมต่อกันทุกอาคาร สำหรับเครื่องอัดอากาศทางโรงงานต้องการเปลี่ยนใหม่ทั้งหมดแต่สำหรับเครื่องอัดอากาศเก่าที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ผ่านมาตรฐานอยู่จะถูกเก็บไว้เป็นเครื่องสำรอง

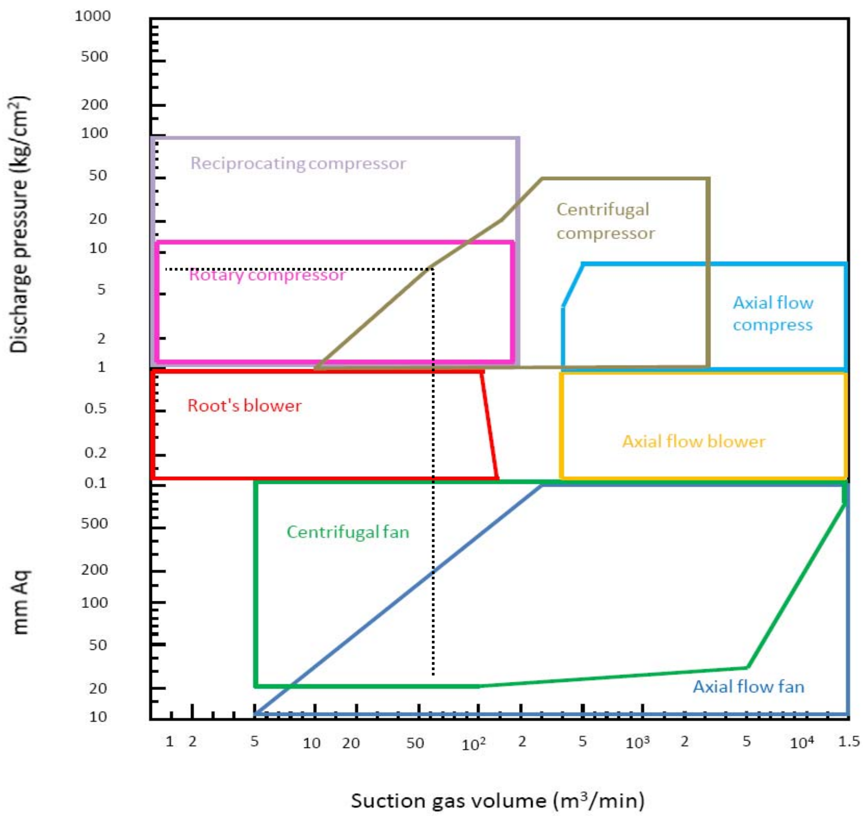
จากการสำรวจพบว่าการใช้อากาศอัดของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง พบว่ายังมีความไม่เหมาะสมในหลายส่วน จึงได้นำเสนอแนวทางปรับปรุงระบบอัดอากาศดังนี้

4.7.1 เปลี่ยนเครื่องอัดอากาศ เป็นการเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะไม่ดีออกและทำการเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าเข้ามาทดแทน

จากการสำรวจพบว่าเครื่องอัดอากาศของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง มีทั้งหมด 12 เครื่อง โดยกระจายอยู่ตามอาคารทั้งหมด 4 อาคาร และค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยของระบบ = 2.19 liter/s/kW และมีเครื่องอัดอากาศที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะไม่ผ่านมาตรฐานทั้งหมด 9 เครื่อง ฉะนั้นจึงทำการเก็บเครื่องอัดอากาศไว้สำรอง 3 เครื่อง ความต้องการอากาศอัดสูงสุด = 1,123.35

l/s และความต้องการปริมาณอากาศอัดของทั้งโรงงาน = 873.76 l/s คิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดอากาศ = 398.97 kW คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า = 398.97×24×30 = 287,258 kWh/เดือน

เลือกชนิดเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเครื่องอัดอากาศเดิมของทางโรงงานเป็นแบบสกรูทั้งหมด ฉะนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบก่อนว่ามีความเหมาะสมหรือไม่จาก



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเลือกประเภทเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสมกับทางโรงงาน

จากกราฟพบว่าเครื่องอัดแบบสกรูมีความเหมาะสม จึงทำการเลือกเครื่องอัดอากาศแบบสกรูในการออกแบบระบบ ซึ่งจะทำการเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศตัวที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่ไม่ผ่านมาตรฐานออก

ตารางที่ 4.5 สมบัติของเครื่องอัดอากาศตัวใหม่ที่จะนำเข้ามาแทนที่

ยี่ห้อ	รุ่น	อัตราการไหล (l/s)	กำลังไฟฟ้า(kW)	ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ(l/s/kW)
COAIRE	AS51	108.33	37	2.92
COAIRE	AS51V	108.33	37	2.92
COAIRE	AS101	228.33	75	3.04
COAIRE	AS101V	228.33	75	3.04
HITACHI	OSP-37V5A	105.00	37	2.83
HITACHI	OSP-37V5AL	105.00	37	2.83
HITACHI	OSP-75V5A	210.00	75	2.80
HITACHI	OSP-75V5AL	210.00	75	2.80

แนวทางการปรับปรุง

เปลี่ยนเครื่องอัดอากาศใหม่ทั้งหมด โดยแบ่งเป็นเครื่องอัดอากาศแบบสกรู ยี่ห้อ COAIRE รุ่น AS101 แบบความเร็วรอบคงที่จำนวน 4 เครื่อง และทำการติดตั้งเครื่องอัดอากาศแบบสกรู ยี่ห้อ COAIRE รุ่น AS101V แบบอินเวอร์เตอร์จำนวน 1 เครื่อง สำหรับเครื่องอัดอากาศเก่าที่ผ่านมาตรฐานทั้ง 3 เครื่องนำมาติดตั้งเป็นเครื่องสำรอง เพื่อให้การออกแบบสอดคล้องกับความต้องการของทางโรงงานจึงได้ทำการออกแบบให้เครื่องอัดอากาศอยู่ภายในห้องเครื่องที่อาคาร 1 และ 9 เท่านั้น

ผลประหยัดที่ได้จากการปรับปรุง

ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะของเครื่องอัดอากาศยี่ห้อ COAIRE = 3.04 l/s/kW

ความต้องการอากาศอัดของทางโรงงาน = 873.76 l/s ฉะนั้นจะใช้กำลังไฟฟ้า = 287.42 kW

ผลประหยัดที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุง = 398.97 – 287.42 = 111.55 kW

คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ = 111.55 × 24 × 30 = 80,316 kWh

เพราะฉะนั้นค่าพลังงานไฟฟ้าหลังปรับปรุงด้วยมาตรการ 4.7.1 จะเหลือ

= 287,258 – 80,316 = 206,942 kWh/เดือน

4.7.2 การติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศแบบศูนย์กลางเดียวกัน

หลักการทำงานของชุด PLC ที่ใช้ในการควบคุมเครื่องอัดอากาศจากศูนย์กลางเดียวกัน การทำงานจะใช้เซนเซอร์เป็นความดัน โดยเริ่มต้นการทำงานจากเครื่องอัดอากาศแบบอินเวอร์เตอร์ก่อน ถ้าความดันยังไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้ตามเวลาที่กำหนด เครื่องตัวที่ 2 ที่เป็นแบบความเร็วรอบคงที่จะถูกสั่งให้เดินเครื่องขึ้นมาทันที การสั่งงานจะเป็นลักษณะเช่นนี้จนครบทั้ง 5 เครื่อง โดยเครื่องที่เป็นแบบอินเวอร์เตอร์จะเป็นเครื่องที่มีการปรับความเร็วรอบอยู่เสมอเพื่อให้การผลิตอากาศอัดมีค่าเท่ากับค่าความต้องการใช้อากาศอัดของทางโรงงาน เมื่อความต้องการอากาศอัดลดลงเครื่องอัดอากาศอัดแบบอินเวอร์เตอร์จะปรับรอบให้เหมาะสมกับความต้องการ แต่เมื่อความต้องการอากาศอัดลดลงมากจนถึงขั้นที่สามารถหยุดเครื่องอัดอากาศแบบความเร็วรอบคงที่ได้ ชุด PLC ก็จะทำการสั่งให้เครื่องอัดอากาศแบบความเร็วรอบคงที่หยุดการทำงานลง

แนวทางการปรับปรุง

ติดตั้งชุด PLC ควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศให้มีการเดินเครื่องเหมาะสมกับความต้องการอากาศอัดที่ใช้จริงของทางโรงงาน การติดตั้งชุด PLC จะทำการติดตั้งที่อาคาร 9 และเดินสายเชื่อมเครื่องอัดอากาศทุกเครื่องเข้าสู่ศูนย์กลางเดียวกัน

ผลประหยัดที่ได้จากการปรับปรุง

ในลักษณะการทำงานของชุด PLC จะส่งผลให้ระบบจะไม่มีสภาวะไร้โหลด

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในสภาวะไร้โหลด = กำลังไฟฟ้าช่วงไร้โหลด × เวลาช่วงไร้โหล

ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังไฟฟ้าช่วงโหลด, ช่วงไร้โหลด ของเครื่องอัดอากาศ

หมายเลขเครื่อง	ค่ากำลังไฟฟ้าช่วงไร้โหลด(kW)	เวลาช่วงไร้โหลด (วินาที/เดือน)	ค่าพลังงานไฟฟ้าช่วงไร้โหลด/เดือน(kW)
No.1	22.52	673,920	4,216.54
No.2	27.57	269,829.65	2,066.80
No.3	13.01	103,473.05	373.80
No.4	31.02	591,840	5,099.13
No.5	14.71	103,680	423.65
No.6	33.14	725,760	6,680.33
No.7	22.72	864,000	5,451.60
No.8	29.54	83,076.92	681.68

หมายเลขเครื่อง	ค่ากำลังไฟฟ้าช่วงไร้โหลด(kW)	เวลาช่วงไร้โหลด (วินาที/เดือน)	ค่าพลังงานไฟฟ้าช่วงไร้โหลด/เดือน(kW)
No.9	21.72	1,136,492.31	6,856.84
No.10	18.34	1,183,680	6,030.09
No.11	18.65	915,840	4,743.53
No.12	28.43	928,340.43	7,331.67

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงไร้โหลด = 49,955.65 kWh / เดือน

เพราะฉะนั้นค่าพลังงานไฟฟ้าหลังปรับปรุงด้วยมาตรการ 4.7.2 จะเหลือ

= 206,942 – 49,955.65 = 156,986.35 kWh/เดือน

4.7.3 การปรับปรุงอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ

จากการสำรวจพบว่าอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าสู่เครื่องอัดอากาศมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิห้องอยู่ประมาณ 1-10°C สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากลมที่ใช้ในการระบายความร้อนของเครื่องอัดอากาศถูกปล่อยทิ้งด้านบนตัวของเครื่องอัดอากาศ อากาศร้อนลอยตัวขึ้นแต่ไม่สามารถระบายออกไปทิ้งได้ทำให้อากาศร้อนไหลย้อนกลับมาด้านล่าง ส่งผลให้อุณหภูมิรอบตัวเครื่องมีอุณหภูมิสูงขึ้น

แนวทางการปรับปรุง

ติดตั้งปล่อยระบายความร้อนจากตัวเครื่องอัดอากาศไปทิ้งด้านนอกห้อง และที่ผนังห้องเครื่อง ทำการติดตั้งพัดลมดูดอากาศออกจากห้องเครื่อง

ผลที่ได้จากการปรับปรุง

อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศลดต่ำลง เป็นผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะการอัดอากาศดีขึ้นและช่วยทำให้ตัวเครื่องอัดอากาศมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

4.7.4 การปรับปรุงระบบท่อส่งอากาศอัดภายในโรงงาน

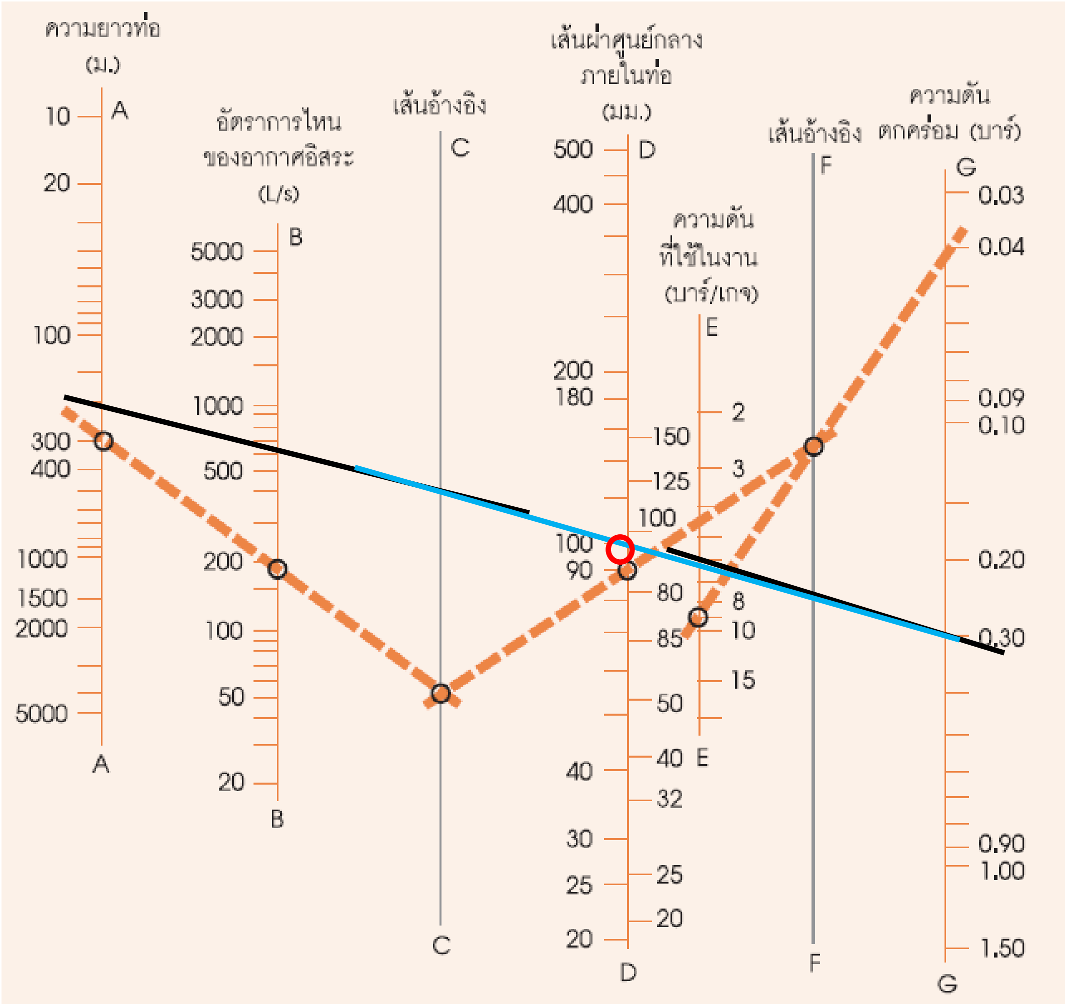
เนื่องด้วยทางโรงงานต้องการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของห้องเครื่องอัดอากาศใหม่ โดยต้องการให้ยุบตำแหน่งของห้องเครื่องอัดอากาศภายในอาคาร 2 และอาคาร 4 ลง ให้เหลือไว้เพียงแต่ห้องเครื่องที่อาคาร 1 และ 9 เท่านั้น จากความต้องการดังกล่าวจึงต้องทำการปรับปรุงระบบท่อเมนส่งอากาศอัดที่เชื่อมต่อระหว่างอาคาร 1 ถึงอาคาร 9 ใหม่เพราะปัจจุบันใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว เป็นตัวเชื่อมต่อ

แนวทางการปรับปรุง

ทำการเดินท่อเมนใหม่จากอาคาร 1 ถึงอาคาร 9 โดยเดินขนานไปกับท่อเมน 2 นิ้วเดิม แล้วทำการต่อเชื่อมท่อเมน 2 นิ้ว และ 4 นิ้ว เข้าด้วยกันเป็นช่วง

การคำนวณหาขนาดท่อเมนใหม่ที่เหมาะสมโดยใช้โมโนกราฟ โดยข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

- ค่าอัตราการไหลของอากาศอัด = 684.99 l/s
- ระยะทางในการเดินท่อส่งอากาศอัด = 216 เมตร
- ความดันที่ใช้งาน = 6 bar
- ความดันตกคร่อม 0.3 bar



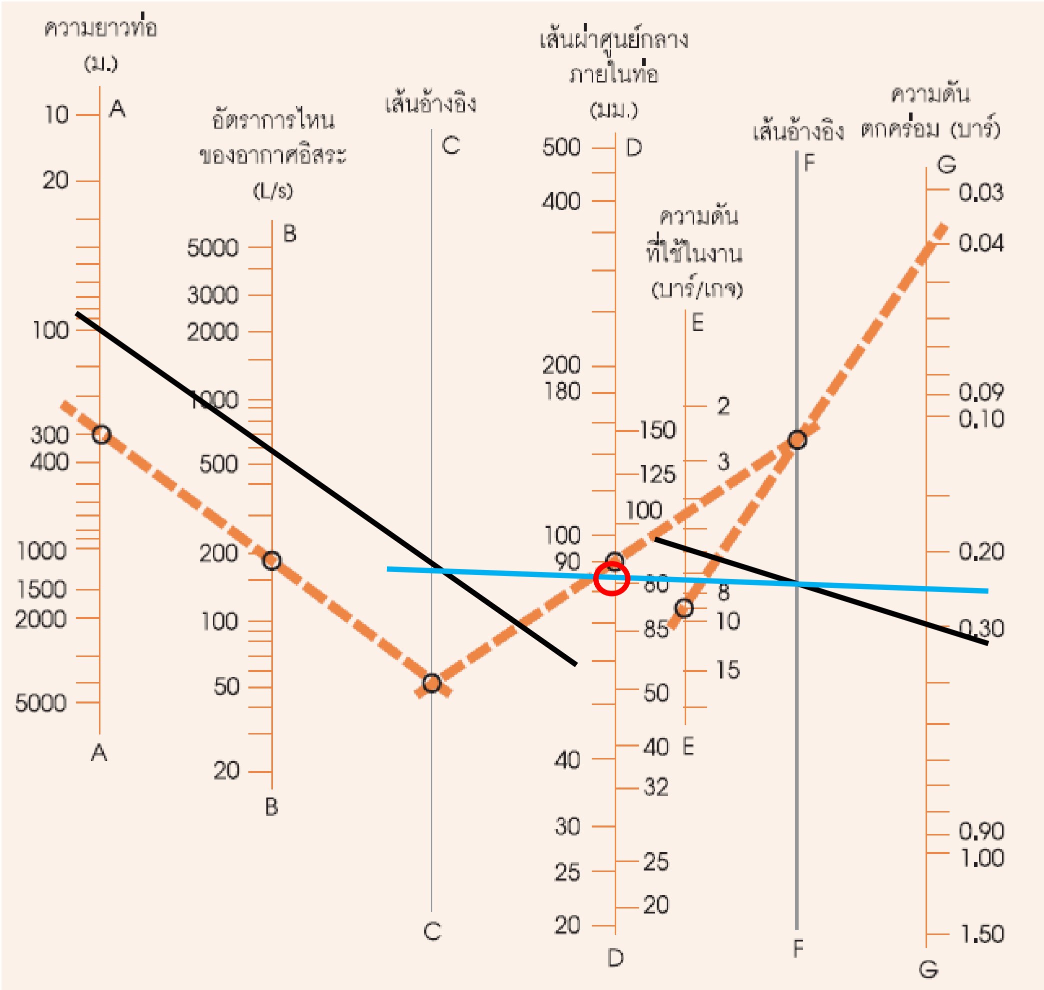
รูปที่ 4.14 การหาขนาดท่อเมนจากอาคาร1-9 โดยใช้โมโนกราฟ

จากการใช้โมโนกราฟ ขนาดท่อที่เหมาะสมคือขนาด 4 นิ้ว

จากการสำรวจท่อย่อยภายในอาคารมีเพียงอาคาร 1 เท่านั้นที่มีความดันตกคร่อม 1 bar สำหรับอาคารอื่นความดันตกคร่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 0.3 bar สำหรับอาคาร 1 จะทำการเดินท่อขนานกับแนวท่อเดิมเพื่อลดความดันตกคร่อมปลายทาง สำหรับข้อมูลในการใช้อากาศอัดสำหรับอาคาร 1 มีดังนี้

- ค่าอัตราการไหลของอากาศอัด = 398.88 l/s
- ระยะทางในการเดินท่อส่งอากาศอัด = 96 เมตร

- ความดันที่ใช้งาน = 6 bar
- ความดันตกคร่อม 0.3 bar



รูปที่ 4.15 การหาขนาดท่อเมนภายในอาคาร 1 โดยใช้โมโนกราฟ

ขนาดท่อที่เหมาะสมสำหรับภายในอาคารคือ 68 mm แต่เดิมมีท่อขนาด 2 นิ้ว อยู่แล้ว จึงต้องทำการเดินท่อใหม่ขนาดไปกับท่อ 2 นิ้วเดิม

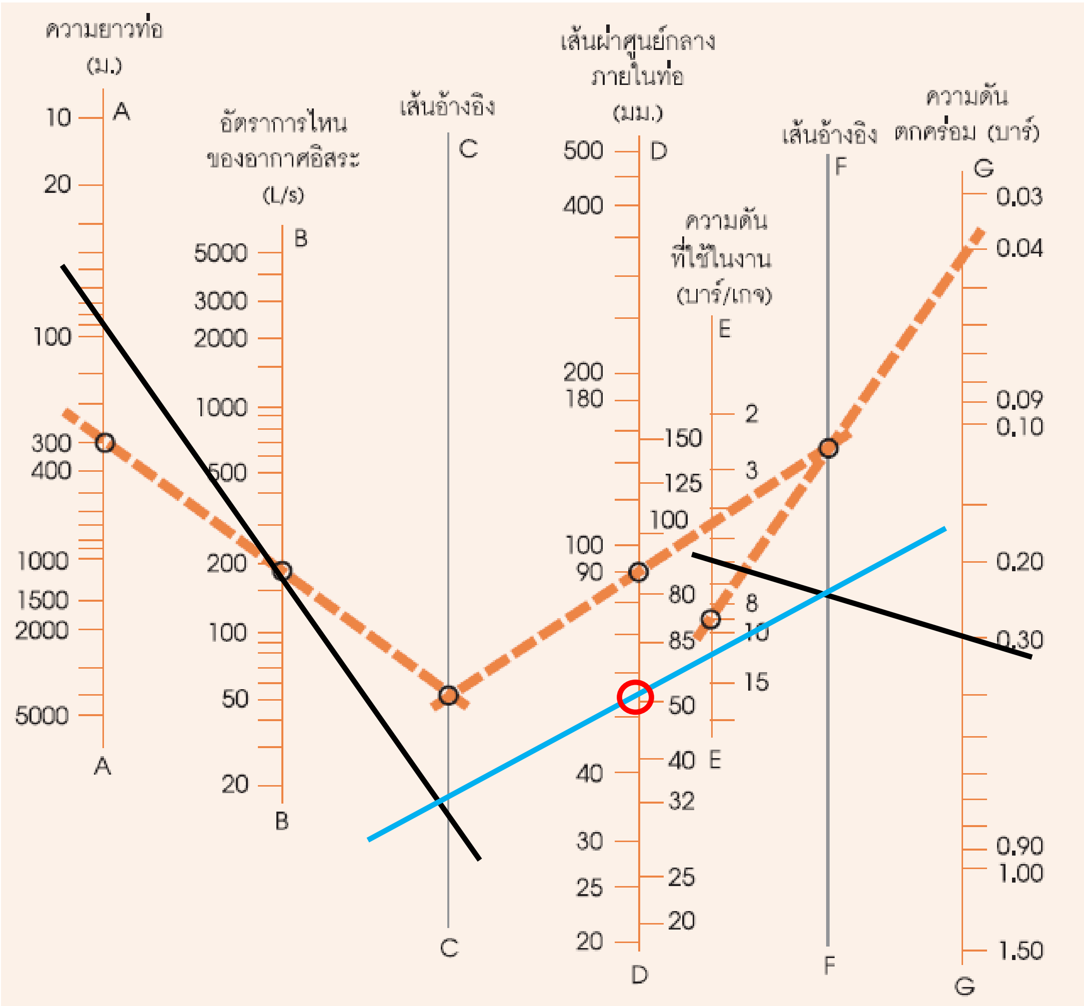
หาขนาดท่อเมนเพิ่ม

จาก $¶ D^2_{\text{ท่อใหม่}} / 4 = ¶ D^2_{\text{ท่อเก่า}} / 4 + ¶ D^2_{\text{ท่อเพิ่ม}} / 4$

$$¶\,(68)^2 / 4 \quad = ¶\,(50.8)^2 / 4 \;+\; ¶\,D^2_{\text{ท่อเพิ่ม}} / 4$$

$$D_{\text{ท่อเพิ่ม}} \quad = 45.20 \text{ mm}$$

เพราะฉะนั้นควรเดินท่อขนาด 2 นิ้ว ขนาดกับแนวท่อเดิมเพื่อไม่ให้เกิดความดันตกคร่อม หรืออาจจะใช้วิธีการเดินท่อขนาด 4 นิ้ว ขนาดกับแนวท่อเดิมแล้วทำการต่อเชื่อมให้ถึงกัน



รูปที่ 4.16 การหาขนาดท่อเมนภายในอาคาร 1 ซึ่งใช้ท่อ 4 นิ้วเดินขนานโดยใช้โมโนกราฟ

สำหรับข้อมูลในการใช้อากาศอัดสำหรับอาคาร 1 ที่ใช้มาตรการเดินท่อ 4 นิ้วขนานกับท่อเมนเดิม มีดังนี้

- ค่าอัตราการไหลของอากาศอัด = 199.44 l/s

- ระยะทางในการเดินท่อส่งอากาศอัด = 48 เมตร
- ความดันที่ใช้งาน = 6 bar
- ความดันตกคร่อม 0.3 bar

เพราะฉะนั้นเมื่อทำการเดินท่อ 4 นิ้ว 1 เส้นขนานกับแนวเดิมท่อขนาน 2 นิ้วเดิมสามารถใช้ได้โดยความดันตกคร่อม = 0.3 bar เนื่องจากการปรับปรุงท่อภายในอาคาร 1 สามารถทำได้ทั้ง 2 วิธี ซึ่งให้ผลได้ใกล้เคียงกัน จึงต้องตรวจสอบที่งบประมาณการลงทุน

- การเดินท่อ 2 นิ้วขนานแนวเดิมทั้ง 4 แนว ใช้งบลงทุน = 544,000 บาท
- การเดินท่อ 4 นิ้วขนานแนวเดิมแนวเดียว ใช้งบลงทุน = 238,000 บาท

ผลที่ได้จากการปรับปรุง

ทำให้ลดความดันตกคร่อมในระบบท่อลมลง ซึ่งจะสามารถลดการตั้งค่าความดันที่เครื่องอัดกาศได้

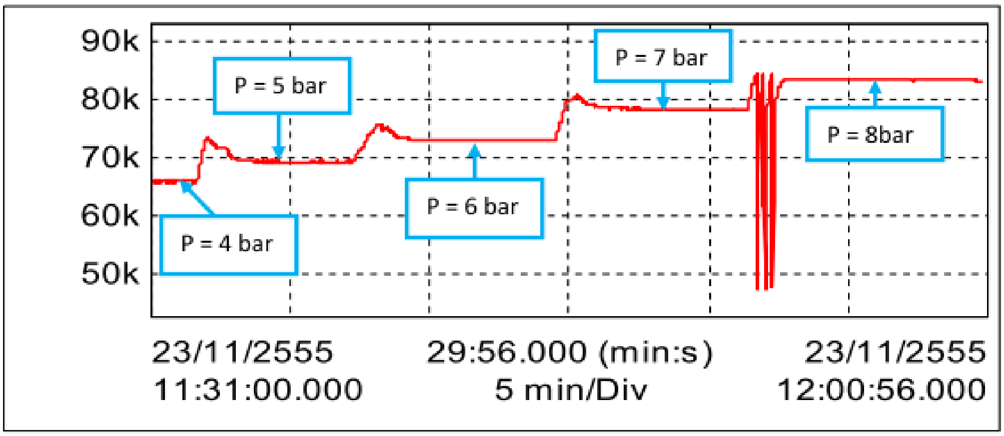
4.7.5 การปรับลดความดันของเครื่องอัดอากาศลง

จากการสำรวจจะพบว่า ค่าความดันที่เครื่องจักรต้องใช้มีด้วยกัน 2 ค่า คือค่าความดันที่ 5 bar สำหรับเครื่องจักรทั่วไปทั้งหมดของโรงงาน และความดัน 8 bar สำหรับการทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันทางโรงงานได้มีการตั้งค่าความดันของเครื่องอัดอากาศทุกเครื่องอยู่ที่ 6 – 7 bar สำหรับที่ความดัน 8 bar ทางโรงงานได้ทำการติดตั้งบูสเตอร์เพื่อสร้างความดันจาก 6 – 7 bar เป็น 8 – 9 bar แต่จากการตรวจสอบคุณสมบัติของบูสเตอร์ สามารถที่จะรับความดันตั้งแต่ 5 bar เพื่อสร้างความดันขึ้นเป็น 8 – 9 bar

แนวทางการปรับปรุง

เมื่อทำการปรับปรุงท่อส่งอากาศอัดเพื่อลดความดันตกคร่อม จึงสามารถที่จะปรับลดความดันที่ตัวเครื่องอัดอากาศลงได้อีกประมาณ 0.5 bar

จากการทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าที่ความดันต่างๆของเครื่องอัดอากาศ COAIRE รุ่น AS101



รูปที่ 4.17 กราฟค่ากำลังไฟฟ้าที่ความดันต่างๆ ของเครื่อง COAIRE รุ่น AS101

จากการทดลองจะพบว่าที่ความดัน 6 bar เครื่องอัดอากาศจะมีค่ากำลังไฟฟ้า = 73.82 kW และถ้าทำการลดความดันลงเหลือ 5.5 bar ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงเหลือ 71.05 kW คิดเป็นการลดลง3.76%

ผลที่ได้จากการปรับปรุง

สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าลงได้อีกประมาณ 3.76%

ฉะนั้นเมื่อทำการปรับปรุงตามมาตรการ 4.7.5 ค่าพลังงานจะลดลงเหลือ

= 156,986.35 – (156,986.35 (3.75/100))

= 151,099.37 kWh/เดือน

4.7.6 การปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดและลดความดันตกคร่อมของอุปกรณ์

จากการสำรวจจะพบว่ามีเพียงอาคาร 9 ที่คุณภาพของอากาศอัดไม่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและยังพบความดันตกคร่อมมากถึง 0.5 bar

แนวทางการปรับปรุง

เนื่องด้วยทางโรงงานต้องการลดจำนวนห้องเครื่องอัดอากาศ จึงต้องทำการออกแบบการวางใหม่ โดยการออกแบบจะแบ่งออกเป็น 2 อาคาร คืออาคาร 1 และอาคาร 9 โดยมีรายละเอียดดังนี้

อาคาร 1 : ทำการติดตั้งเครื่องอัดอากาศตัวใหม่จำนวน 3 เครื่อง เป็นขนาด 75 kW โดยแบ่งเป็นแบบความเร็วรอบคงที่จำนวน 2 เครื่องและแบบมีอินเวอร์เตอร์จำนวน 1 เครื่อง และทำการติดตั้งเครื่อง IR เป็นเครื่องสำรอง สำหรับ Air dryer ย้ายมาจากอาคาร 2 และอาคาร 4 สำหรับ Air dryer ตัวเก่าของอาคาร 1 ย้ายไปอาคาร 9 ทั้งหมด สำหรับชุด Pre filter และ Coalescent filter ย้ายมาจากอาคาร 2 และอาคาร 4 ตามมาด้วยกันเป็นชุด แต่ต้องมีการซื้อ Coalescent filter เพิ่ม 1 ตัว เพราะของเดิมที่ย้ายมาจากอาคาร 4 ไม่มีชุด Coalescent filter

อาคาร 9 : ทำการติดตั้งเครื่องอัดอากาศตัวใหม่จำนวน 2 เครื่อง เป็นขนาด 75 kW เป็นแบบความเร็วรอบคงที่ทั้ง 2 เครื่อง สำหรับ Air dryer ย้ายมาจากอาคาร 1 และเป็นของเดิมที่อยู่ในอาคาร 9 อยู่แล้ว ชุด Pre filter และ Coalescent filter ต้องทำการซื้อใหม่อย่างละ 1 ตัว เพื่อความสะดวกในการติดตั้งเพราะพื้นที่ห้องค่อนข้างแคบ

ตารางที่ 4.7 งบประมาณการลงทุน

มาตรการ	งบประมาณที่ใช้(บาท)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัด (kWh)
4.7.1	3,680,000	80,316
4.7.2	360,000	49,955
4.7.3	150,000	0
4.7.4	1,000,000	0

มาตรการ	งบประมาณที่ใช้(บาท)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัด (kWh)
4.7.5	0	5,887
4.7.6	120,000	0
รวม	5,310,000	136,158

จากข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย = 3.71 บาท

ฉะนั้นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ = 136,158 × 3.71 = 505,146 บาท/เดือน

จุดคืนทุน = เงินลงทุน / ผลประหยัด

= 5,310,000 / 505,146

= 10.51 เดือน

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการตรวจสอบการใช้อากาศอัดของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลืองพบว่ามีความต้องการใช้อากาศอัดเฉลี่ย = 873.76 l/s กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการผลิตอากาศอัด = 398.97 kW และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย = 2.19 l/s/kW

มาตรการที่นำเสนอเพื่อปรับปรุงระบบอัดอากาศเพื่อการประหยัดพลังงานมีทั้งหมด 6 มาตรการ ได้แก่ 1.เปลี่ยนเครื่องอัดอากาศที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่ำออกแล้วแทนที่ด้วยเครื่องอัดอากาศใหม่ที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่า 2.ติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอาศแบบศูนย์กลางเดียวกัน 3.ปรับปรุงอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ 4.ปรับปรุงระบบท่อส่งอากาศอัดภายในโรงงาน 5.ปรับลดความดันของเครื่องอัดอากาศลง 6.ปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดและลดความดันตกคร่อมของอุปกรณ์

งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้ง 6 มาตรการรวมเป็นมูลค่า 5,310,000 บาท สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 505,146 บาท/เดือน คิดเป็นจุดคืนทุน 10.51 เดือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้า ควรมีการใช้เครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับจำนวนเครื่องอัดอากาศเพราะจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงพฤติกรรมของเครื่องอัดอากาศที่ตรงตามความเป็นจริงมากที่สุด ถ้าเครื่องมือวัดไม่พอสำหรับเครื่องอัดอากาศทุกเครื่องและทางโรงงานมีการใช้อากาศอัดไม่สม่ำเสมออาจเป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ไม่ตรงตามความเป็นจริง

5.2.2 ในการทดสอบไม่สามารถคำนวณอัตราการรั่วไหลของอากาศอัดตามอาคารต่างๆได้ เนื่องจากทางโรงงานเดินงานตลอด 24 ชั่วโมง แต่จากการที่เดินสำรวจพบว่ามีจุดรั่วไหลของอากาศอัดมาก ทางโรงงานจึงควรดำเนินการแก้ไขเพื่อการประหยัดพลังงาน

5.2.3 ในการเดินเครื่องอัดอากาศในแต่ละครั้ง ควรมีการตรวจสอบค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของทางโรงงาน เพื่อนำมาออกแบบร่วมกับการเดินเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสม

5.2.4 ควรทำการทดสอบหาค่าสมถนะสูงสุดของเครื่องอัดอากาศ เพื่อการออกแบบให้เครื่องอัดอากาศมีการเดินเครื่องในช่วงที่มีสมถนะสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

1. United Nations Environment Programme (UNEP), 2006, Enegy Efficiency Guide for Industry in Asia[Online], Available: http://www.energyefficiencyasia.org [9 มกราคม 2556]

2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554, กฎหมายและความรู้พื้นฐานด้านการอนุรักษ์พลังงาน หลักสูตรฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงานสามัญ[ออนไลน์], Available: http://www.e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib14451.pdf [9 มกราคม 2556]

3. บริษัทปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด, 2012, คู่มือการปฏิบัติงานที่ดีสำหรับเครื่องอัดอากาศ [ออนไลน์], Available: http://www.4shared.com/get/Xnf1fOMK/_online.html [26 กรกฎาคม 2556]

4. J.P.L. COMPRESSOR SERVICE, INC., 1985, Centrifugal Products[Online], Available: http://www.jplcompressor.com/turboair2020.html [16 กรกฎาคม 2557]

5. AKE ANANTACHAI CO., LTD., 2544, Piston Products[Online], Available: http://www.akeanantachai.co.th/ae/product-list.php?cate1_id=2 [16 กรกฎาคม 2557]

6. AIR TECHNOLOGY WEST CO., LTD., 1984, Hydrovane HV Series Rotary Vane Air Compressors[Online], Available: http://www.airtechnologywest.com/AirCompressors.htm [16 กรกฎาคม 2557]

7. Air Compressor Guide, 2013, Rotary Screw Compressor[Online], Available: http://www.air-compressor-guide.com/compressor-types.html [16 กรกฎาคม 2557]

8. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม และThe Energy Conservation Center แห่งประเทศญี่ปุ่น (ECCJ), 2552, คู่มือการจัดการพลังงานไฟฟ้าในโรงงาน[ออนไลน์], สืบค้นจาก: http://www.teenet.tei.or.th [20 มีนาคม 2556]

9. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, ม.ป.ป., ระบบอัดอากาศ[ออนไลน์], สืบค้นจาก:

10. U.S. Department of Energy, 2004, Effect of Intake on Compressor Performance[Online], Available:
http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/compressed_air14.pdf [18 กุมภาพันธ์ 2556]

11. Hitachi Industrial Equipment System CO., LTD., 2014, Screw Compressors Oil-flooded Type [Online], Avilable: http://www.hitachi-ies.co.jp/english/catalog_library/index.htm#air[18 กรกฎาคม 2557]

12. International Standard, 2001, ISO8573-1[Online], Avilable: http://www.iso.ch [4 เมษายน 2556]

13. Andy Lin, 2011, Industrial Air Compressor Introduction[Online], Avilable: http://www.deltaww.com[18 กรกฎาคม 2557]

14. International Standard, 2001, ISO8573-1[Online], Available: http://www.iso.ch [4 เมษายน 2556]

15. Kaeser Compressors, Inc., 2007, Designing Your Compressed Air System[Online], Available: http://www.kaeser.com [18 กรกฎาคม 2557]

16. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป., การใช้พลังงานในเครื่องอัดอากาศ [ออนไลน์], สืบค้นจาก:

http://www.enconlab.com/ve/Download/energy/Compressed%20Air%20&%20Energy%20Use.PDF[18 กรกฎาคม 2557]

17. อาจหาญ ณ นรงค์, 2555, การเลือกขนาดท่อและถังเก็บสำหรับลมอัด[ออนไลน์], สืบค้นจาก: http://tec-thailand.com/?name=news&file=readnews&id=119[18 กรกฎาคม 2557]

18. Ming Yang., 2009, Air compressor efficiency in a Vietnamese enterprise, Energy Policy, pp. 2327-2337

19. Huibin Liang and Xuehua Li., 2011, Integrated Monitoring System Design of Hybrid Air compressor, Procedia Engineering, pp. 938-943

20. R. Saidur, N.A. Rahim and M. Hasanuzzaman., 2010, A review on compressed-air energy use and energy savings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.1135-1153

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศแต่ละเครื่อง

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.1

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	38.10	47	22.61	94	22.99
1	38.10	48	22.56	95	23.00
2	38.10	49	22.59	96	22.94
3	38.16	50	22.59	97	22.84
4	38.15	51	22.54	98	22.77
5	38.24	52	22.50	99	22.70
6	38.28	53	22.44	100	22.57
7	38.36	54	23.31	101	22.49
8	38.41	55	34.38	102	22.49
9	38.45	56	34.91	103	22.53
10	38.44	57	35.31	104	22.52
11	38.48	58	35.53	105	22.49
12	38.50	59	35.77	106	22.46
13	38.53	60	36.03	107	22.46
14	38.52	61	36.25	108	22.63
15	38.51	62	36.44	109	34.20
16	38.61	63	36.62	110	35.03
17	38.64	64	36.80	111	35.46
18	38.71	65	36.91	112	35.63
19	38.76	66	37.00	113	35.92
20	38.82	67	37.14	114	36.12
21	38.79	68	37.17	115	36.32
22	38.85	69	37.27	116	36.55
23	38.86	70	37.35	117	36.76
24	38.87	71	37.37	118	36.89
25	38.88	72	37.45	119	37.08
26	38.83	73	37.55	120	37.23
27	38.79	74	37.66	121	37.29
28	38.83	75	37.76	122	37.44
29	38.83	76	37.82	123	37.52
30	38.82	77	38.01	124	37.54
31	38.81	78	38.06	125	37.58
32	38.86	79	38.15	126	37.63
33	38.78	80	38.17	127	37.70
34	25.29	81	38.24	128	37.69
35	23.08	82	38.27	129	37.79
36	23.00	83	38.29	130	37.83
37	22.93	84	38.27	131	37.95
38	22.92	85	38.33	132	37.95
39	22.85	86	38.38	133	38.07
40	22.79	87	38.41	134	38.17
41	22.71	88	38.49	135	38.17
42	22.66	89	38.59	136	38.21
43	22.58	90	38.58	137	38.19
44	22.59	91	35.85	138	38.26
45	22.58	92	23.67	139	38.33
46	22.58	93	22.98	140	38.32

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	38.36	190	37.91	239	22.69
142	38.46	191	37.97	240	22.59
143	38.51	192	38.02	241	22.55
144	38.57	193	38.02	242	22.55
145	38.63	194	37.95	243	22.52
146	32.65	195	37.98	244	22.50
147	23.17	196	37.99	245	22.51
148	23.03	197	38.01	246	22.44
149	23.02	198	38.02	247	22.38
150	23.04	199	38.07	248	22.29
151	22.94	200	38.20	249	31.77
152	22.86	201	38.27	250	34.65
153	22.77	202	38.34	251	35.05
154	22.71	203	38.40	252	35.42
155	22.64	204	38.39	253	35.68
156	22.51	205	38.50	254	35.85
157	22.46	206	38.49	255	36.07
158	22.47	207	38.53	256	36.32
159	22.43	208	38.50	257	36.51
160	22.44	209	38.56	258	36.71
161	22.40	210	38.56	259	36.86
162	22.32	211	38.52	260	37.02
163	22.29	212	38.54	261	37.13
164	22.20	213	38.60	262	37.25
165	33.26	214	38.61	263	37.32
166	34.68	215	38.67	264	37.41
167	35.03	216	38.70	265	37.48
168	35.29	217	38.76	266	37.57
169	35.57	218	38.79	267	37.63
170	35.80	219	38.75	268	37.60
171	36.02	220	38.74	269	37.72
172	36.20	221	38.72	270	37.82
173	36.43	222	38.77	271	37.87
174	36.63	223	38.71	272	37.95
175	36.76	224	38.70	273	37.99
176	36.94	225	38.77	274	37.98
177	37.10	226	38.76	275	38.08
178	37.14	227	38.82	276	38.07
179	37.24	228	38.88	277	38.02
180	37.31	229	38.93	278	38.10
181	37.34	230	33.30	279	38.06
182	37.39	231	23.27	280	38.18
183	37.47	232	23.09	281	38.20
184	37.55	233	23.01	282	38.22
185	37.61	234	22.97	283	38.29
186	37.67	235	22.97	284	38.34
187	37.77	236	22.85	285	38.44
188	37.84	237	22.81	286	38.56
189	37.90	238	22.72	287	38.61

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	38.68
289	38.73
290	38.76
291	38.76
292	38.78
293	38.83
294	38.80
295	38.82
296	38.79
297	38.81
298	38.83
299	38.84

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.2

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	53.76	47	53.62	94	47.60
1	53.80	48	53.68	95	43.00
2	53.75	49	53.63	96	35.50
3	53.76	50	53.46	97	30.00
4	53.75	51	53.52	98	29.00
5	53.77	52	53.55	99	28.90
6	53.70	53	53.34	100	28.70
7	53.80	54	53.40	101	28.40
8	53.85	55	53.39	102	28.20
9	53.77	56	53.31	103	28.30
10	53.71	57	53.28	104	34.10
11	53.64	58	53.35	105	39.00
12	53.68	59	53.35	106	48.00
13	53.64	60	53.33	107	50.10
14	53.66	61	53.38	108	52.00
15	53.76	62	53.37	109	52.95
16	53.73	63	53.36	110	53.13
17	53.68	64	53.28	111	53.25
18	53.80	65	53.33	112	53.32
19	53.79	66	53.34	113	53.31
20	53.65	67	53.28	114	53.25
21	53.61	68	53.32	115	53.20
22	53.71	69	53.36	116	53.35
23	53.68	70	53.42	117	53.38
24	53.57	71	53.38	118	53.39
25	53.57	72	53.31	119	53.45
26	53.52	73	53.30	120	53.58
27	53.40	74	53.32	121	53.49
28	53.40	75	53.36	122	53.46
29	53.39	76	53.53	123	53.48
30	53.34	77	53.61	124	53.55
31	53.38	78	53.46	125	53.44
32	53.47	79	53.41	126	53.64
33	53.44	80	53.57	127	53.85
34	53.38	81	53.62	128	53.64
35	53.41	82	53.67	129	53.64
36	53.42	83	53.68	130	53.58
37	53.51	84	53.70	131	53.63
38	53.62	85	53.64	132	53.53
39	53.61	86	53.51	133	53.54
40	53.52	87	53.62	134	53.56
41	53.51	88	53.65	135	53.45
42	53.50	89	53.67	136	53.52
43	53.42	90	53.82	137	53.59
44	53.55	91	53.99	138	53.58
45	53.66	92	53.96	139	53.53
46	53.59	93	50.30	140	53.59

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	53.58	190	52.92	239	53.43
142	53.59	191	53.10	240	53.46
143	53.63	192	53.23	241	53.39
144	53.79	193	53.34	242	53.34
145	53.71	194	53.54	243	53.23
146	53.65	195	53.66	244	53.17
147	53.79	196	53.45	245	53.25
148	53.71	197	53.47	246	53.30
149	53.75	198	53.64	247	53.29
150	53.87	199	53.73	248	53.26
151	53.94	200	53.75	249	53.26
152	53.92	201	53.90	250	53.25
153	53.91	202	53.91	251	53.18
154	53.91	203	53.74	252	53.15
155	53.84	204	53.79	253	53.22
156	53.93	205	53.77	254	53.20
157	54.00	206	53.61	255	53.16
158	53.93	207	53.68	256	53.29
159	53.92	208	53.86	257	53.38
160	53.76	209	53.84	258	53.45
161	53.59	210	53.70	259	53.57
162	53.49	211	53.66	260	53.78
163	53.53	212	53.64	261	53.87
164	53.62	213	53.65	262	53.79
165	53.71	214	53.64	263	53.91
166	53.88	215	53.65	264	53.87
167	53.86	216	53.67	265	53.70
168	53.79	217	53.65	266	53.67
169	53.88	218	53.58	267	53.65
170	54.02	219	53.52	268	53.69
171	54.09	220	53.53	269	53.69
172	54.17	221	53.48	270	53.69
173	47.60	222	53.50	271	53.63
174	43.00	223	53.52	272	53.59
175	35.50	224	53.59	273	53.57
176	30.00	225	53.52	274	53.58
177	29.00	226	53.57	275	53.61
178	28.90	227	53.63	276	53.64
179	28.70	228	53.53	277	53.60
180	28.60	229	53.47	278	53.66
181	28.60	230	53.40	279	53.65
182	28.70	231	53.45	280	53.60
183	28.80	232	53.42	281	53.61
184	34.10	233	53.42	282	53.70
185	39.00	234	53.42	283	53.70
186	48.00	235	53.38	284	53.64
187	50.10	236	53.36	285	53.79
188	52.00	237	53.36	286	53.76
189	52.72	238	53.38	287	53.78

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	53.77
289	53.72
290	53.68
291	53.88
292	47.60
293	43.00
294	35.50
295	30.00
296	29.00
297	28.90
298	28.70
299	28.60
300	28.40
301	28.30
302	28.30
303	34.10
304	39.00
305	48.00
306	50.10
307	52.00
308	53.35
309	53.52
310	53.52
311	53.46
312	53.40
313	53.50
314	53.54
315	53.52
316	53.79

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.3

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	39.72	47	39.69	94	39.73
1	39.63	48	39.74	95	39.71
2	39.58	49	39.78	96	39.74
3	39.55	50	39.81	97	39.73
4	39.56	51	39.79	98	39.70
5	39.56	52	39.78	99	39.65
6	39.55	53	39.81	100	39.67
7	39.59	54	39.77	101	39.62
8	39.60	55	39.74	102	39.60
9	39.58	56	39.74	103	39.67
10	39.61	57	39.72	104	39.64
11	39.60	58	39.65	105	39.70
12	39.57	59	39.69	106	39.69
13	39.59	60	39.65	107	39.67
14	39.58	61	39.66	108	39.66
15	39.56	62	39.67	109	39.69
16	39.58	63	39.69	110	39.64
17	39.61	64	39.68	111	39.63
18	39.64	65	39.74	112	39.60
19	39.68	66	39.78	113	39.61
20	39.71	67	39.76	114	39.64
21	39.74	68	39.75	115	39.58
22	39.78	69	39.74	116	39.60
23	39.73	70	39.69	117	39.55
24	39.78	71	39.69	118	39.57
25	39.81	72	39.70	119	39.59
26	39.76	73	39.67	120	39.62
27	39.74	74	39.65	121	39.69
28	39.73	75	39.70	122	39.76
29	39.64	76	39.76	123	39.72
30	39.70	77	39.76	124	39.76
31	39.69	78	39.81	125	39.74
32	39.67	79	39.79	126	39.71
33	39.64	80	39.74	127	39.67
34	39.61	81	39.77	128	39.67
35	39.66	82	39.77	129	39.63
36	39.66	83	39.72	130	39.62
37	39.69	84	39.70	131	39.60
38	39.73	85	39.70	132	39.65
39	39.71	86	39.70	133	39.64
40	39.73	87	39.69	134	39.67
41	39.67	88	39.63	135	39.63
42	39.71	89	39.65	136	39.55
43	39.66	90	39.63	137	25.50
44	39.68	91	39.71	138	18.88
45	39.65	92	39.71	139	15.51
46	39.64	93	39.72	140	14.24

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	13.53	190	38.48	239	39.27
142	12.95	191	38.54	240	39.29
143	13.30	192	38.51	241	39.25
144	13.95	193	38.47	242	39.31
145	14.28	194	38.56	243	39.24
146	14.30	195	38.55	244	39.20
147	14.37	196	38.56	245	39.18
148	14.32	197	38.63	246	39.12
149	14.33	198	38.65	247	39.12
150	14.33	199	38.59	248	39.16
151	14.28	200	38.66	249	39.10
152	14.28	201	38.59	250	39.14
153	14.16	202	38.70	251	39.13
154	14.11	203	38.71	252	39.12
155	14.06	204	38.82	253	39.16
156	14.92	205	38.80	254	39.17
157	34.42	206	38.88	255	39.16
158	38.58	207	38.86	256	39.14
159	38.23	208	38.96	257	39.15
160	38.02	209	38.96	258	39.18
161	38.03	210	39.00	259	39.17
162	38.12	211	38.96	260	39.21
163	38.10	212	38.97	261	39.26
164	38.14	213	38.97	262	39.35
165	38.07	214	38.92	263	39.33
166	38.13	215	38.88	264	39.41
167	38.16	216	38.86	265	39.39
168	38.15	217	38.84	266	39.43
169	38.23	218	38.81	267	39.44
170	38.22	219	38.84	268	39.45
171	38.22	220	38.88	269	39.40
172	38.22	221	38.84	270	39.40
173	38.24	222	38.86	271	39.32
174	38.29	223	38.92	272	39.32
175	38.28	224	38.91	273	39.30
176	38.35	225	38.95	274	39.20
177	38.37	226	38.94	275	39.17
178	38.40	227	38.87	276	39.23
179	38.45	228	38.99	277	39.23
180	38.58	229	39.02	278	39.24
181	38.57	230	38.98	279	39.20
182	38.51	231	39.03	280	39.21
183	38.50	232	39.12	281	39.24
184	38.53	233	39.10	282	39.24
185	38.56	234	39.19	283	39.28
186	38.54	235	39.19	284	39.26
187	38.51	236	39.28	285	39.33
188	38.49	237	39.24	286	39.31
189	38.53	238	39.29	287	39.34

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	39.37	337	39.35	386	39.51
289	39.44	338	39.38	387	39.47
290	39.49	339	39.38	388	39.51
291	39.50	340	39.41	389	39.48
292	39.59	341	39.40	390	39.45
293	39.60	342	39.41	391	39.50
294	39.60	343	39.44	392	39.49
295	39.58	344	39.45	393	39.52
296	39.58	345	39.51	394	39.57
297	39.56	346	39.49	395	39.53
298	39.55	347	39.57	396	39.62
299	39.47	348	39.61	397	39.60
300	39.44	349	39.63	398	39.57
301	39.42	350	39.68	399	39.67
302	39.32	351	39.67	400	39.61
303	39.31	352	39.61	401	39.74
304	39.34	353	39.63	402	39.75
305	39.27	354	39.61	403	39.78
306	39.28	355	39.57	404	39.83
307	39.29	356	39.54	405	39.82
308	39.27	357	39.47	406	39.90
309	39.25	358	39.39	407	39.92
310	39.31	359	39.43	408	39.85
311	39.29	360	39.41	409	39.82
312	39.32	361	39.34	410	39.83
313	39.34	362	39.42	411	39.81
314	39.36	363	39.36	412	39.68
315	39.39	364	39.41	413	39.67
316	39.36	365	39.40	414	39.66
317	39.44	366	39.47	415	39.65
318	39.42	367	39.45	416	39.60
319	39.57	368	39.49	417	39.57
320	39.57	369	39.49	418	39.56
321	39.57	370	39.51	419	39.63
322	39.58	371	39.54	420	39.59
323	39.60	372	39.58	421	39.55
324	39.63	373	39.59	422	39.63
325	39.58	374	39.65	423	39.67
326	39.48	375	39.67	424	39.70
327	39.48	376	39.72	425	39.70
328	39.44	377	39.75	426	39.74
329	39.37	378	39.75	427	39.76
330	39.34	379	39.73	428	39.78
331	39.36	380	39.68	429	39.83
332	39.31	381	39.74	430	39.92
333	39.27	382	39.68	431	39.95
334	39.32	383	39.59	432	39.96
335	39.36	384	39.58	433	40.04
336	39.32	385	39.56	434	39.97

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
435	39.99	484	39.81
436	40.00	485	39.75
437	39.96	486	39.85
438	39.88	487	39.90
439	39.85	488	39.94
440	39.83	489	39.93
441	39.79	490	39.94
442	39.76	491	39.93
443	39.69	492	39.91
444	39.72	493	39.86
445	39.74	494	39.82
446	39.70	495	39.78
447	39.75	496	39.79
448	39.77	497	39.74
449	39.73	498	39.74
450	39.73	499	39.70
451	39.70	500	39.71
452	39.77		
453	39.76		
454	39.76		
455	39.80		
456	39.81		
457	39.80		
458	39.90		
459	39.90		
460	39.92		
461	40.05		
462	39.99		
463	40.00		
464	39.98		
465	39.90		
466	39.83		
467	39.80		
468	39.77		
469	39.74		
470	39.67		
471	39.70		
472	39.72		
473	39.67		
474	39.69		
475	39.71		
476	39.71		
477	39.73		
478	39.68		
479	39.68		
480	39.71		
481	39.71		
482	39.75		
483	39.74		

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.4

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	46.16	47	52.88	94	44.96
1	46.37	48	52.83	95	44.72
2	46.46	49	52.67	96	44.56
3	46.53	50	52.52	97	44.48
4	46.61	51	52.29	98	44.54
5	46.57	52	52.17	99	44.67
6	46.33	53	52.00	100	44.80
7	46.01	54	51.85	101	44.93
8	46.62	55	51.69	102	45.02
9	47.28	56	51.53	103	45.07
10	42.32	57	51.47	104	44.97
11	38.06	58	51.29	105	44.69
12	36.74	59	51.14	106	44.35
13	35.77	60	50.93	107	44.12
14	35.05	61	50.85	108	43.89
15	34.43	62	50.63	109	43.73
16	33.92	63	50.45	110	43.54
17	33.45	64	50.25	111	43.34
18	33.04	65	49.93	112	43.20
19	32.63	66	49.62	113	42.92
20	32.26	67	49.30	114	42.65
21	31.94	68	49.12	115	43.14
22	31.65	69	48.88	116	44.32
23	31.38	70	48.75	117	39.59
24	31.12	71	48.76	118	37.28
25	30.84	72	48.78	119	36.27
26	30.56	73	48.81	120	35.56
27	30.25	74	48.78	121	34.98
28	29.97	75	48.79	122	34.56
29	29.68	76	48.78	123	34.13
30	29.38	77	48.52	124	33.80
31	30.39	78	48.23	125	33.48
32	48.16	79	47.99	126	33.16
33	52.83	80	47.74	127	32.85
34	54.80	81	47.50	128	32.56
35	55.32	82	47.30	129	32.29
36	55.18	83	47.13	130	31.99
37	54.71	84	46.92	131	31.74
38	54.32	85	46.66	132	31.57
39	53.92	86	46.46	133	31.38
40	53.58	87	46.28	134	31.21
41	53.37	88	46.07	135	31.02
42	53.19	89	45.92	136	30.80
43	53.03	90	45.80	137	30.64
44	53.02	91	45.71	138	30.43
45	52.98	92	45.57	139	46.49
46	52.92	93	45.33	140	51.77

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	53.52	190	42.95	239	46.41
142	53.59	191	42.60	240	46.41
143	53.13	192	42.68	241	46.31
144	52.76	193	43.72	242	46.00
145	52.40	194	40.80	243	45.55
146	52.06	195	37.51	244	45.22
147	51.82	196	36.48	245	45.04
148	51.60	197	35.78	246	44.87
149	51.42	198	35.25	247	44.85
150	51.31	199	34.83	248	44.82
151	51.09	200	34.45	249	44.86
152	50.88	201	34.12	250	44.89
153	50.69	202	33.84	251	44.95
154	50.63	203	33.56	252	44.86
155	50.59	204	33.28	253	44.67
156	50.53	205	33.03	254	44.31
157	50.47	206	32.77	255	43.87
158	50.35	207	32.52	256	43.42
159	50.13	208	32.25	257	43.09
160	49.94	209	44.56	258	42.84
161	49.60	210	50.15	259	42.65
162	49.25	211	51.29	260	42.53
163	49.02	212	51.32	261	42.56
164	48.81	213	51.06	262	42.63
165	48.54	214	50.77	263	42.88
166	48.32	215	50.29	264	43.09
167	48.12	216	50.08	265	43.28
168	47.87	217	49.80	266	43.34
169	47.54	218	49.55	267	43.47
170	47.12	219	49.41	268	43.42
171	46.67	220	49.30	269	43.18
172	46.35	221	49.24	270	42.84
173	46.15	222	49.12	271	42.61
174	45.96	223	49.04	272	43.43
175	45.76	224	48.84	273	41.95
176	45.54	225	48.57	274	37.81
177	45.36	226	48.18	275	36.70
178	45.31	227	47.69	276	35.87
179	45.16	228	47.26	277	35.25
180	45.05	229	46.93	278	34.73
181	45.02	230	46.70	279	34.27
182	45.02	231	46.45	280	33.91
183	45.06	232	46.25	281	33.57
184	45.07	233	46.18	282	33.33
185	45.02	234	46.15	283	33.10
186	44.82	235	46.25	284	32.90
187	44.47	236	46.28	285	32.72
188	43.98	237	46.31	286	32.58
189	43.42	238	46.33	287	32.40

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	32.25	337	33.90	386	39.33
289	32.09	338	33.61	387	37.27
290	31.90	339	33.32	388	36.29
291	31.69	340	33.08	389	35.52
292	42.10	341	32.86	390	34.90
293	50.13	342	32.67	391	34.41
294	51.90	343	32.44	392	33.95
295	51.97	344	32.24	393	33.54
296	51.73	345	32.04	394	33.22
297	51.28	346	40.95	395	32.97
298	50.83	347	49.63	396	32.74
299	50.34	348	51.20	397	32.52
300	50.02	349	51.39	398	32.28
301	49.74	350	51.23	399	32.05
302	49.46	351	50.93	400	31.78
303	49.25	352	50.50	401	31.49
304	49.12	353	50.07	402	39.40
305	48.94	354	49.66	403	50.16
306	48.96	355	49.23	404	52.48
307	48.86	356	48.76	405	53.08
308	48.81	357	48.34	406	52.81
309	48.62	358	48.04	407	52.32
310	48.25	359	47.80	408	51.87
311	47.80	360	47.66	409	51.51
312	47.25	361	47.64	410	51.09
313	46.73	362	47.63	411	50.71
314	46.14	363	47.72	412	50.38
315	45.72	364	47.78	413	49.95
316	45.39	365	47.79	414	49.66
317	45.09	366	47.72	415	49.43
318	45.02	367	47.58	416	49.36
319	44.97	368	47.26	417	49.32
320	44.95	369	46.89	418	49.27
321	44.94	370	46.54	419	49.26
322	44.96	371	46.19	420	49.22
323	44.86	372	45.89	421	49.16
324	44.66	373	45.74	422	49.02
325	44.23	374	45.73	423	48.74
326	43.73	375	45.68	424	48.40
327	43.22	376	45.64	425	48.05
328	42.75	377	45.63	426	47.81
329	42.83	378	45.45	427	47.62
330	43.92	379	45.18	428	47.57
331	40.37	380	44.76	429	47.72
332	37.32	381	44.26	430	47.85
333	36.30	382	43.73	431	48.04
334	35.49	383	43.19	432	48.20
335	34.86	384	43.43	433	48.33
336	34.34	385	44.25	434	48.38

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
435	48.20	484	32.03	533	43.53
436	47.91	485	31.77	534	43.52
437	47.55	486	37.50	535	43.48
438	47.03	487	49.54	536	43.34
439	46.52	488	51.90	537	43.16
440	46.08	489	52.42	538	43.14
441	45.64	490	52.11	539	43.18
442	45.30	491	51.74	540	43.20
443	45.21	492	51.30	541	43.45
444	45.21	493	50.81	542	44.73
445	45.28	494	50.41	543	43.24
446	45.35	495	50.01	544	38.00
447	45.41	496	49.61	545	36.66
448	45.45	497	49.25	546	35.72
449	45.48	498	48.82	547	35.03
450	45.32	499	48.54	548	34.47
451	45.01	500	48.42	549	34.08
452	44.66	501	48.33	550	33.72
453	44.38	502	48.21	551	33.43
454	44.08	503	48.14	552	33.19
455	43.90	504	48.07	553	32.94
456	43.92	505	47.95	554	32.75
457	44.04	506	47.86	555	32.55
458	44.25	507	47.59	556	32.31
459	44.41	508	47.38	557	32.07
460	44.57	509	46.99	558	35.97
461	44.66	510	46.79	559	48.70
462	44.60	511	46.75	560	51.14
463	44.40	512	46.72	561	51.57
464	44.03	513	46.72	562	51.50
465	43.55	514	46.81	563	51.26
466	42.98	515	46.90	564	50.93
467	42.38	516	46.91	565	50.66
468	42.61	517	46.84	566	50.40
469	43.40	518	46.68	567	50.29
470	38.79	519	46.47	568	50.20
471	37.11	520	46.17	569	50.08
472	36.23	521	45.72	570	49.94
473	35.58	522	45.17	571	49.86
474	35.03	523	44.65	572	49.67
475	34.57	524	44.11	573	49.44
476	34.13	525	43.65	574	49.26
477	33.78	526	43.23	575	49.06
478	33.48	527	42.97	576	48.92
479	33.22	528	42.99	577	48.62
480	32.96	529	43.07	578	48.31
481	32.72	530	43.17	579	47.87
482	32.49	531	43.29	580	47.41
483	32.26	532	43.38	581	46.88

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
582	46.42
583	45.99
584	45.91
585	45.92
586	45.93
587	46.01
588	46.06
589	46.11
590	46.26
591	46.28
592	46.20
593	46.05
594	45.88
595	45.73
596	45.51
597	45.25
598	44.86
599	44.55

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.5

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	35.72	47	35.55	94	35.49
1	35.70	48	25.50	95	35.47
2	35.68	49	18.88	96	35.49
3	35.70	50	15.51	97	35.49
4	35.69	51	14.24	98	35.52
5	35.67	52	14.53	99	35.54
6	35.67	53	14.55	100	35.57
7	35.68	54	14.50	101	35.55
8	35.66	55	14.35	102	35.58
9	35.67	56	14.28	103	35.58
10	35.68	57	14.30	104	35.62
11	35.63	58	14.37	105	35.62
12	35.67	59	14.32	106	35.59
13	35.65	60	14.33	107	35.58
14	35.64	61	14.33	108	35.57
15	35.63	62	14.28	109	35.54
16	35.61	63	14.28	110	35.53
17	35.61	64	14.16	111	35.54
18	35.61	65	14.11	112	35.55
19	35.62	66	14.06	113	35.54
20	35.60	67	14.92	114	35.53
21	35.64	68	34.42	115	35.53
22	35.65	69	35.53	116	35.51
23	35.66	70	35.54	117	35.52
24	35.65	71	35.54	118	35.50
25	35.68	72	35.60	119	35.50
26	35.65	73	35.57	120	35.50
27	35.66	74	35.57	121	35.49
28	35.65	75	35.60	122	35.47
29	35.63	76	35.59	123	35.47
30	35.62	77	35.61	124	35.47
31	35.61	78	35.61	125	35.47
32	35.62	79	35.57	126	35.51
33	35.60	80	35.53	127	35.51
34	35.60	81	35.53	128	35.52
35	35.58	82	35.52	129	35.54
36	35.59	83	35.52	130	35.56
37	35.59	84	35.51	131	35.56
38	35.59	85	35.53	132	35.58
39	35.59	86	35.52	133	35.57
40	35.59	87	35.51	134	35.57
41	35.59	88	35.49	135	35.53
42	35.57	89	35.51	136	35.53
43	35.56	90	35.50	137	35.50
44	35.55	91	35.50	138	35.49
45	35.51	92	35.51	139	35.50
46	35.53	93	35.51	140	35.45

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	35.46	190	35.56	239	35.47
142	35.47	191	35.53	240	35.48
143	35.49	192	35.53	241	35.48
144	35.47	193	35.50	242	35.51
145	35.47	194	35.49	243	35.52
146	35.49	195	35.49	244	35.50
147	35.47	196	35.50	245	35.53
148	35.47	197	35.48	246	35.53
149	35.46	198	35.47	247	35.50
150	35.47	199	35.47	248	35.48
151	35.46	200	35.47	249	35.49
152	35.47	201	35.49	250	35.48
153	35.46	202	35.48	251	35.48
154	35.50	203	35.48	252	35.47
155	35.50	204	35.42	253	35.45
156	35.54	205	35.45	254	35.47
157	35.52	206	35.45	255	35.47
158	35.55	207	35.42	256	35.48
159	35.57	208	35.46	257	35.46
160	35.56	209	35.47	258	35.44
161	35.57	210	35.45	259	35.45
162	35.54	211	35.47	260	35.45
163	35.53	212	35.50	261	35.48
164	35.52	213	35.49	262	35.48
165	35.51	214	35.49	263	35.48
166	35.50	215	35.50	264	35.49
167	35.51	216	35.52	265	35.48
168	35.50	217	35.53	266	35.50
169	35.49	218	35.52	267	35.53
170	35.50	219	35.51	268	35.50
171	35.47	220	35.50	269	35.52
172	35.48	221	35.49	270	35.52
173	35.48	222	35.49	271	35.54
174	35.50	223	35.48	272	35.55
175	35.47	224	35.46	273	35.53
176	35.49	225	35.48	274	35.54
177	35.47	226	35.45	275	35.52
178	35.47	227	35.45	276	35.53
179	35.49	228	35.45	277	35.52
180	35.46	229	35.43	278	35.52
181	35.52	230	35.43	279	35.53
182	35.52	231	35.45	280	35.52
183	35.53	232	35.43	281	35.51
184	35.51	233	35.44	282	35.49
185	35.54	234	35.45	283	35.48
186	35.54	235	35.44	284	35.49
187	35.54	236	35.47	285	35.48
188	35.59	237	35.48	286	35.48
189	35.59	238	35.46	287	35.51

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	35.50	337	35.58	386	35.61
289	35.49	338	35.59	387	35.63
290	35.52	339	35.58	388	35.63
291	35.53	340	35.58	389	35.62
292	35.53	341	35.57	390	35.64
293	35.56	342	35.56	391	35.62
294	35.56	343	35.60	392	35.61
295	35.55	344	35.60	393	35.64
296	35.56	345	35.61	394	35.65
297	35.57	346	35.62	395	35.63
298	35.53	347	35.65	396	35.61
299	35.54	348	35.65	397	35.59
300	35.57	349	35.66	398	35.63
301	35.56	350	35.68	399	35.62
302	35.57	351	35.67	400	35.64
303	35.54	352	35.69	401	35.69
304	35.56	353	35.67	402	35.66
305	35.52	354	35.67	403	35.66
306	35.54	355	35.66	404	35.69
307	35.49	356	35.66	405	35.72
308	35.55	357	35.67	406	35.70
309	35.52	358	35.65	407	35.73
310	35.48	359	35.64	408	35.71
311	35.48	360	35.65	409	35.66
312	35.48	361	35.62	410	35.68
313	35.49	362	35.65	411	35.63
314	35.47	363	35.64	412	35.64
315	35.47	364	35.65	413	35.62
316	35.49	365	35.67	414	35.64
317	35.52	366	35.61	415	35.61
318	35.54	367	35.62	416	35.61
319	35.58	368	35.60	417	35.62
320	35.57	369	35.62	418	35.61
321	35.55	370	35.61	419	35.58
322	35.55	371	35.62	420	35.59
323	35.52	372	35.63	421	35.60
324	35.58	373	35.66	422	35.60
325	35.56	374	35.64	423	35.61
326	35.54	375	35.64	424	35.60
327	35.58	376	35.67	425	35.61
328	35.57	377	35.66	426	35.59
329	35.60	378	35.67	427	35.66
330	35.57	379	35.68	428	35.67
331	35.57	380	35.69	429	35.65
332	35.58	381	35.67	430	35.67
333	35.57	382	35.65	431	35.67
334	35.58	383	35.64	432	35.69
335	35.57	384	35.65	433	35.66
336	35.59	385	35.64	434	35.71

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
435	35.74	484	35.63
436	35.68	485	35.66
437	35.69	486	35.63
438	35.67	487	35.66
439	35.65	488	35.62
440	35.64	489	35.66
441	35.59	490	35.66
442	35.58	491	35.66
443	35.60	492	35.65
444	35.59	493	35.64
445	35.61	494	35.60
446	35.58	495	35.61
447	35.59	496	35.58
448	35.60	497	35.58
449	35.60	498	35.52
450	35.59	499	35.55
451	35.61		
452	35.61		
453	35.61		
454	35.62		
455	35.65		
456	35.66		
457	35.67		
458	35.69		
459	35.66		
460	35.73		
461	35.73		
462	35.73		
463	35.74		
464	35.71		
465	35.71		
466	35.66		
467	35.63		
468	35.65		
469	35.59		
470	35.58		
471	35.57		
472	35.59		
473	35.55		
474	35.55		
475	35.54		
476	35.55		
477	35.57		
478	35.58		
479	35.57		
480	35.60		
481	35.60		
482	35.59		
483	35.64		

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.6

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	38.41	47	44.11	94	41.38
1	38.99	48	44.27	95	42.03
2	39.33	49	44.71	96	42.56
3	39.93	50	44.91	97	43.21
4	40.42	51	37.43	98	43.70
5	40.87	52	35.24	99	44.08
6	41.37	53	34.58	100	44.76
7	41.86	54	34.75		
8	42.13	55	33.78		
9	42.48	56	33.15		
10	42.76	57	31.80		
11	43.03	58	31.62		
12	43.34	59	30.76		
13	43.63	60	31.05		
14	43.72	61	36.55		
15	43.99	62	38.95		
16	44.13	63	39.70		
17	44.35	64	40.22		
18	44.69	65	40.81		
19	44.82	66	41.44		
20	45.15	67	41.86		
21	40.54	68	42.27		
22	35.55	69	42.73		
23	35.69	70	43.03		
24	33.93	71	43.56		
25	33.09	72	43.98		
26	33.06	73	43.97		
27	31.11	74	44.07		
28	31.57	75	44.20		
29	31.94	76	44.41		
30	38.21	77	44.65		
31	38.98	78	44.85		
32	39.45	79	44.51		
33	39.60	80	35.51		
34	39.70	81	35.34		
35	40.03	82	34.81		
36	40.27	83	33.63		
37	40.76	84	33.98		
38	41.13	85	32.19		
39	41.40	86	32.25		
40	41.90	87	31.54		
41	42.20	88	30.87		
42	42.46	89	38.45		
43	42.91	90	39.12		
44	43.29	91	39.67		
45	43.67	92	40.29		
46	44.12	93	40.72		

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.7

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	34.44	47	38.86	94	36.50
1	34.66	48	39.20	95	36.80
2	35.04	49	39.19	96	37.22
3	35.43	50	39.34	97	37.70
4	35.72	51	39.66	98	38.06
5	36.09	52	39.86	99	38.53
6	36.43	53	30.11	100	38.92
7	36.72	54	26.56	101	39.20
8	37.10	55	25.42	102	39.76
9	37.44	56	24.94	103	28.03
10	37.60	57	23.49	104	26.23
11	37.87	58	22.88	105	25.40
12	38.10	59	21.90	106	24.56
13	38.28	60	20.96	107	23.50
14	38.55	61	20.37	108	22.70
15	38.76	62	20.17	109	22.04
16	38.79	63	34.22	110	21.02
17	39.02	64	35.59		
18	39.15	65	36.08		
19	39.31	66	36.44		
20	39.58	67	36.81		
21	39.69	68	37.21		
22	39.96	69	37.53		
23	34.01	70	37.83		
24	26.65	71	38.14		
25	25.98	72	38.39		
26	24.63	73	38.77		
27	23.95	74	39.05		
28	22.87	75	39.07		
29	21.91	76	39.16		
30	21.14	77	39.29		
31	22.68	78	39.46		
32	35.24	79	39.58		
33	35.69	80	39.78		
34	35.96	81	38.94		
35	36.07	82	27.59		
36	36.15	83	26.39		
37	36.33	84	25.21		
38	36.50	85	24.29		
39	36.79	86	23.32		
40	37.07	87	22.54		
41	37.26	88	21.55		
42	37.57	89	20.85		
43	37.81	90	22.23		
44	37.96	91	35.36		
45	38.26	92	35.77		
46	38.59	93	36.10		

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.8

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	61.69	47	62.42	94	62.38
1	61.55	48	62.45	95	62.43
2	61.49	49	62.41	96	62.54
3	61.45	50	62.47	97	62.55
4	61.44	51	62.58	98	62.61
5	61.46	52	62.61	99	62.64
6	61.48	53	62.68	100	62.68
7	61.50	54	62.77	101	62.77
8	61.62	55	62.80	102	62.68
9	61.65	56	62.83	103	62.40
10	61.62	57	62.83	104	62.42
11	61.60	58	62.87	105	62.44
12	61.56	59	52.00	106	62.50
13	61.49	60	36.00	107	62.43
14	61.56	61	30.50	108	62.38
15	61.56	62	29.70	109	62.30
16	61.62	63	29.60	110	62.23
17	61.68	64	29.59	111	62.17
18	61.67	65	29.40	112	62.20
19	61.65	66	29.41	113	62.19
20	61.60	67	29.40	114	62.24
21	61.57	68	29.39	115	62.30
22	61.57	69	30.00	116	62.32
23	61.55	70	38.00	117	62.45
24	61.57	71	56.00	118	62.56
25	61.66	72	61.80	119	62.63
26	61.59	73	61.69	120	62.74
27	61.36	74	61.60	121	62.76
28	61.23	75	61.52	122	62.88
29	61.21	76	61.46	123	62.97
30	61.26	77	61.45	124	63.05
31	61.35	78	61.44	125	63.13
32	61.48	79	61.53	126	63.20
33	61.59	80	61.53	127	63.25
34	61.66	81	61.59	128	63.33
35	61.80	82	61.65	129	63.36
36	61.87	83	61.71	130	63.45
37	61.97	84	61.77	131	63.50
38	62.06	85	61.88	132	63.51
39	62.17	86	61.92	133	63.58
40	62.21	87	62.02	134	63.50
41	62.34	88	62.10	135	63.13
42	62.44	89	62.12	136	62.96
43	62.50	90	62.22	137	62.95
44	62.55	91	62.21	138	62.95
45	62.53	92	62.27	139	63.09
46	62.46	93	62.31	140	63.10

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	63.16	190	62.15	239	62.49
142	63.21	191	62.23	240	62.41
143	63.26	192	62.29	241	62.33
144	63.23	193	62.43	242	62.24
145	63.18	194	62.49	243	62.24
146	63.06	195	62.50	244	62.21
147	62.99	196	62.52	245	62.21
148	62.95	197	62.44	246	62.28
149	62.92	198	62.32	247	62.32
150	62.91	199	62.08	248	62.38
151	62.98	200	61.96	249	62.47
152	63.01	201	61.95	250	62.47
153	63.08	202	61.89	251	62.58
154	63.16	203	61.82	252	62.60
155	63.18	204	61.80	253	62.70
156	63.24	205	61.74	254	62.76
157	63.30	206	61.74	255	62.83
158	63.37	207	61.75	256	62.85
159	63.46	208	61.78	257	62.90
160	63.43	209	61.81	258	62.87
161	63.34	210	61.91	259	62.75
162	63.30	211	61.96	260	62.69
163	63.18	212	62.01	261	62.61
164	63.12	213	62.11	262	62.48
165	63.55	214	62.11	263	62.25
166	62.63	215	62.22	264	62.13
167	62.49	216	62.29	265	62.10
168	62.20	217	62.38	266	62.01
169	62.07	218	62.45	267	61.98
170	62.04	219	62.46	268	61.96
171	62.07	220	62.48	269	61.97
172	62.10	221	62.39	270	62.01
173	62.16	222	62.32	271	62.06
174	62.26	223	62.28	272	62.10
175	62.32	224	62.29	273	62.20
176	62.38	225	62.21	274	62.27
177	62.45	226	62.32	275	62.34
178	62.48	227	62.35	276	62.45
179	62.38	228	62.41	277	62.52
180	62.37	229	62.47	278	62.62
181	62.28	230	62.43	279	62.69
182	62.26	231	62.40	280	62.75
183	62.17	232	62.37	281	62.80
184	62.10	233	62.32	282	62.76
185	62.06	234	62.30	283	62.68
186	61.97	235	62.39	284	62.69
187	61.99	236	62.38	285	62.66
188	62.00	237	62.49	286	62.70
189	62.03	238	62.54	287	62.80

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	62.79
289	62.91
290	63.00
291	63.08
292	63.17
293	63.25
294	63.06
295	62.77
296	62.49
297	62.46
298	62.33
299	62.23
300	62.23
301	62.27
302	62.26
303	62.31
304	62.38
305	62.45
306	62.51
307	62.64
308	62.67
309	62.74
310	62.78
311	62.84

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.9

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	36.92	47	15.80	94	38.00
1	33.80	48	15.30	95	38.17
2	33.07	49	15.04	96	38.37
3	32.25	50	14.76	97	38.52
4	30.59	51	14.59	98	38.66
5	24.81	52	18.97	99	38.89
6	18.14	53	33.97	100	39.00
7	16.32	54	36.74	101	39.18
8	15.52	55	37.28	102	39.21
9	15.11	56	37.53	103	39.38
10	14.76	57	37.83	104	39.51
11	14.48	58	38.07	105	39.64
12	14.41	59	38.28	106	39.72
13	28.50	60	38.45	107	39.84
14	36.57	61	38.63	108	39.84
15	37.47	62	38.75	109	39.97
16	37.73	63	38.85	110	40.03
17	38.03	64	38.99	111	40.14
18	38.21	65	39.14	112	37.73
19	38.43	66	39.24	113	33.97
20	38.61	67	39.39	114	33.24
21	38.76	68	39.53	115	32.55
22	38.91	69	39.57	116	31.78
23	38.97	70	39.68	117	28.56
24	39.11	71	39.78	118	21.22
25	39.28	72	39.86	119	17.03
26	39.36	73	39.97	120	15.67
27	39.46	74	40.10	121	15.20
28	39.52	75	40.08	122	14.87
29	39.61	76	37.93	123	14.59
30	39.70	77	33.99	124	14.39
31	39.80	78	33.22	125	14.29
32	39.90	79	32.47	126	14.22
33	39.93	80	31.44	127	14.65
34	40.07	81	26.81	128	31.90
35	40.14	82	19.23	129	36.26
36	40.24	83	16.87		
37	40.21	84	15.89		
38	37.36	85	15.34		
39	33.96	86	14.93		
40	33.21	87	14.71		
41	32.47	88	14.59		
42	31.62	89	14.55		
43	27.44	90	28.72		
44	19.98	91	36.32		
45	17.16	92	37.30		
46	16.26	93	37.66		

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.10

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	17.15	47	37.97	94	39.40
1	17.24	48	38.27	95	39.62
2	17.26	49	38.36	96	39.65
3	17.33	50	38.52	97	39.72
4	17.65	51	38.73	98	39.80
5	17.49	52	38.82	99	39.90
6	17.29	53	38.93	100	39.96
7	17.36	54	39.11	101	40.10
8	19.55	55	39.20	102	32.52
9	36.44	56	39.27	103	22.69
10	37.77	57	39.44	104	19.13
11	38.10	58	39.53	105	17.68
12	38.29	59	39.63	106	17.35
13	38.50	60	39.74	107	17.18
14	38.65	61	39.82	108	17.09
15	38.76	62	39.90	109	17.38
16	38.86	63	39.97	110	17.49
17	39.02	64	40.07	111	17.56
18	39.21	65	32.17	112	17.53
19	39.33	66	22.44	113	17.49
20	39.45	67	18.95	114	17.61
21	39.53	68	17.53	115	17.59
22	39.61	69	17.30	116	17.66
23	39.72	70	16.91	117	20.76
24	39.81	71	17.14	118	36.79
25	39.88	72	17.23	119	37.87
26	39.97	73	17.32	120	38.21
27	34.96	74	17.31	121	38.45
28	23.63	75	17.26	122	38.57
29	19.44	76	17.31	123	38.80
30	17.65	77	17.45	124	39.15
31	17.21	78	17.58	125	39.48
32	16.89	79	17.48	126	39.59
33	16.99	80	17.56	127	39.75
34	17.13	81	22.53	128	39.91
35	17.38	82	37.02	129	40.02
36	17.39	83	37.78	130	40.14
37	17.41	84	38.06	131	40.25
38	17.43	85	38.25	132	40.31
39	17.51	86	38.44	133	40.47
40	17.68	87	38.60	134	40.54
41	17.69	88	38.70	135	40.59
42	17.57	89	38.84	136	29.73
43	17.45	90	38.94	137	21.71
44	17.82	91	39.11	138	18.86
45	32.87	92	39.25	139	17.62
46	37.65	93	39.35	140	17.49

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	17.37	190	37.33	239	40.03
142	17.18	191	38.17	240	40.15
143	17.47	192	38.52	241	40.18
144	17.58	193	38.69	242	40.30
145	17.63	194	38.85	243	40.38
146	17.64	195	39.05	244	40.42
147	17.70	196	39.19	245	40.50
148	17.83	197	39.31	246	40.30
149	17.76	198	39.42	247	26.19
150	17.80	199	39.60	248	20.96
151	17.82	200	39.71	249	18.40
152	17.75	201	39.83	250	17.55
153	18.36	202	39.93	251	17.47
154	34.34	203	40.05	252	17.29
155	36.01	204	40.14	253	17.69
156	38.75	205	40.20	254	17.81
157	39.17	206	40.30	255	17.80
158	39.28	207	40.43	256	17.83
159	39.46	208	40.47	257	17.81
160	39.60	209	40.10	258	17.84
161	39.67	210	25.99	259	18.01
162	39.79	211	20.98	260	18.15
163	39.97	212	18.52	261	18.19
164	40.03	213	17.69	262	31.23
165	40.19	214	17.44	263	37.90
166	40.30	215	17.40	264	38.37
167	40.39	216	17.56	265	38.60
168	40.48	217	17.72	266	38.81
169	40.59	218	17.78	267	39.00
170	40.68	219	17.79	268	39.08
171	40.77	220	17.80	269	39.28
172	40.82	221	17.79	270	39.38
173	40.90	222	17.83	271	39.54
174	34.10	223	18.18	272	39.70
175	23.15	224	17.87	273	39.80
176	19.36	225	23.31	274	39.85
177	17.73	226	37.54	275	39.98
178	17.44	227	38.23	276	40.08
179	17.17	228	38.55	277	40.20
180	17.20	229	38.71	278	40.30
181	17.50	230	38.91	279	40.35
182	17.63	231	39.05	280	40.40
183	17.66	232	39.22	281	40.53
184	17.71	233	39.39	282	40.59
185	17.67	234	39.49	283	36.92
186	17.64	235	39.60	284	24.31
187	17.75	236	39.75	285	20.01
188	17.87	237	39.84	286	18.05
189	22.38	238	39.94	287	17.52

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	17.55
289	17.24
290	17.41
291	17.62
292	17.68
293	17.72
294	17.76
295	17.79
296	18.01
297	17.86
298	17.82
299	25.25

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.11

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	18.57	47	32.72	94	33.79
1	18.44	48	32.84	95	33.87
2	18.35	49	32.97	96	33.96
3	18.26	50	33.13	97	34.03
4	18.19	51	33.27	98	34.10
5	18.10	52	33.38	99	34.15
6	22.80	53	33.48	100	34.20
7	31.68	54	33.59	101	34.24
8	32.35	55	33.71	102	34.30
9	32.62	56	33.81	103	34.37
10	32.80	57	33.88	104	34.45
11	32.90	58	33.95	105	34.45
12	33.03	59	34.04	106	26.29
13	33.15	60	34.10	107	19.71
14	33.28	61	34.21	108	19.31
15	33.38	62	34.30	109	19.13
16	33.52	63	34.36	110	18.94
17	33.60	64	34.42	111	18.79
18	33.71	65	34.49	112	18.65
19	33.80	66	34.41	113	18.53
20	33.87	67	34.42	114	18.40
21	33.99	68	32.84	115	18.29
22	34.07	69	20.70	116	18.16
23	34.11	70	19.47	117	18.08
24	34.17	71	19.26	118	26.85
25	34.25	72	19.08	119	31.96
26	34.29	73	18.93	120	32.39
27	34.41	74	18.74	121	32.62
28	34.49	75	18.62	122	32.78
29	34.55	76	18.49	123	32.82
30	34.26	77	18.38	124	32.97
31	22.82	78	18.27	125	33.10
32	19.64	79	18.18	126	33.20
33	19.34	80	18.05	127	33.31
34	19.12	81	27.15	128	33.40
35	18.95	82	31.99	129	33.48
36	18.79	83	32.39	130	33.57
37	18.65	84	32.65	131	33.64
38	18.54	85	32.83	132	33.74
39	18.43	86	32.88	133	33.81
40	18.33	87	33.05	134	33.90
41	18.21	88	33.15	135	33.98
42	18.12	89	33.30	136	34.05
43	18.06	90	33.38	137	34.11
44	27.55	91	33.50	138	34.22
45	32.06	92	33.60	139	34.27
46	32.48	93	33.68	140	34.34

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
141	34.36	190	33.57	239	34.38
142	34.44	191	33.67	240	34.46
143	34.33	192	33.76	241	34.51
144	34.38	193	33.83	242	32.44
145	34.30	194	33.91	243	20.59
146	25.47	195	33.99	244	19.51
147	19.62	196	34.13	245	19.26
148	19.30	197	34.17	246	19.09
149	19.12	198	34.25	247	18.92
150	18.94	199	34.32	248	18.81
151	18.80	200	34.32	249	18.66
152	18.67	201	34.33	250	18.58
153	18.54	202	34.38	251	18.46
154	18.44	203	34.42	252	18.40
155	18.31	204	33.00	253	18.31
156	18.23	205	20.75	254	18.23
157	18.14	206	19.45	255	18.14
158	18.06	207	19.23	256	18.05
159	24.43	208	19.03	257	27.90
160	31.74	209	18.90	258	32.05
161	32.21	210	18.75	259	32.45
162	32.40	211	18.62	260	32.69
163	32.48	212	18.51	261	32.89
164	32.47	213	18.43	262	32.95
165	32.54	214	18.33	263	33.09
166	32.61	215	18.26	264	33.22
167	32.63	216	18.17	265	33.36
168	32.67	217	18.12	266	33.46
169	32.73	218	18.05	267	33.57
170	32.79	219	25.42	268	33.70
171	32.83	220	31.90	269	33.77
172	32.88	221	32.39	270	33.90
173	32.92	222	32.63	271	33.98
174	32.93	223	32.85	272	34.07
175	32.97	224	32.89	273	34.16
176	33.03	225	33.04	274	34.26
177	33.05	226	33.19	275	34.36
178	33.10	227	33.30	276	34.43
179	33.13	228	33.42	277	34.52
180	33.25	229	33.54	278	29.69
181	33.34	230	33.62	279	20.08
182	33.34	231	33.74	280	19.48
183	33.38	232	33.84	281	19.27
184	33.39	233	33.94	282	19.10
185	33.31	234	34.03	283	18.98
186	33.32	235	34.13	284	18.86
187	33.35	236	34.19	285	18.76
188	33.40	237	34.28	286	18.67
189	33.50	238	34.31	287	18.59

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
288	18.52
289	18.46
290	18.38
291	18.34
292	18.26
293	18.22
294	18.15
295	18.08
296	18.02
297	24.75
298	31.81
299	32.29

ค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาของเครื่อง No.12

เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)
0	29.18	47	27.95	94	40.06
1	28.94	48	27.81	95	40.17
2	28.71	49	27.68	96	40.30
3	28.51	50	27.53	97	40.40
4	28.32	51	36.37	98	40.51
5	28.21	52	39.48	99	40.57
6	28.06	53	39.62	100	40.68
7	27.92	54	39.78	101	40.73
8	27.80	55	39.93	102	40.84
9	27.66	56	40.11	103	40.93
10	27.56	57	40.25	104	41.03
11	32.24	58	40.35	105	41.10
12	39.42	59	40.46	106	41.15
13	39.58	60	40.53	107	41.21
14	39.74	61	40.64	108	41.27
15	39.94	62	40.74	109	41.31
16	40.07	63	40.83	110	41.38
17	40.21	64	40.88	111	41.45
18	40.34	65	40.95	112	41.45
19	40.48	66	41.04	113	41.50
20	40.56	67	41.09	114	41.55
21	40.64	68	41.13	115	41.33
22	40.75	69	41.26	116	33.17
23	40.79	70	41.31	117	29.58
24	40.86	71	41.37	118	29.29
25	40.90	72	41.40	119	29.06
26	40.98	73	41.46	120	28.79
27	41.07	74	41.49	121	28.56
28	41.12	75	41.54	122	28.39
29	41.21	76	41.59	123	28.22
30	41.26	77	41.45	124	28.04
31	41.32	78	33.78	125	27.89
32	41.36	79	29.64	126	27.76
33	41.41	80	29.34	127	27.63
34	41.47	81	29.05	128	27.52
35	41.57	82	28.80	129	33.74
36	41.61	83	28.55	130	39.48
37	41.59	84	28.36	131	39.63
38	35.95	85	28.17	132	39.84
39	29.73	86	28.00	133	40.02
40	29.38	87	27.85	134	40.18
41	29.10	88	27.71	135	40.32
42	28.88	89	27.56	136	40.45
43	28.63	90	35.94	137	40.56
44	28.43	91	39.50	138	40.67
45	28.26	92	39.68	139	40.76
46	28.10	93	39.86	140	40.85
เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)	เวลา(sec)	กำลังไฟฟ้า(kW)

141	40.96	190	35.62	239	27.69
142	41.05	191	29.71	240	27.58
143	41.12	192	29.41	241	33.82
144	41.21	193	29.13	242	39.41
145	41.32	194	28.88	243	39.57
146	41.35	195	28.65	244	39.75
147	41.43	196	28.48	245	39.95
148	41.51	197	28.31	246	40.09
149	41.58	198	28.19	247	40.20
150	41.62	199	28.04	248	40.31
151	41.28	200	27.88	249	40.41
152	32.90	201	27.74	250	40.52
153	29.69	202	27.61	251	40.63
154	29.38	203	31.48	252	40.65
155	29.12	204	39.45	253	40.73
156	28.86	205	39.61	254	40.81
157	28.64	206	39.80	255	40.92
158	28.51	207	39.96	256	40.98
159	28.34	208	40.16	257	41.07
160	28.18	209	40.29	258	41.09
161	28.01	210	40.41	259	41.18
162	27.87	211	40.53	260	41.21
163	27.73	212	40.64	261	41.26
164	27.63	213	40.72	262	41.32
165	34.55	214	40.82	263	41.39
166	39.52	215	40.90	264	41.43
167	39.66	216	40.98	265	41.46
168	39.88	217	41.07	266	41.54
169	40.05	218	41.15	267	41.57
170	40.19	219	41.23	268	41.62
171	40.30	220	41.28	269	40.96
172	40.41	221	41.34	270	31.56
173	40.51	222	41.45	271	29.68
174	40.64	223	41.49	272	29.37
175	40.75	224	41.54	273	29.13
176	40.79	225	41.58	274	28.86
177	40.87	226	41.61	275	28.63
178	40.93	227	41.59	276	28.44
179	41.03	228	35.13	277	28.24
180	41.14	229	29.77	278	28.07
181	41.20	230	29.42	279	27.92
182	41.24	231	29.15	280	27.74
183	41.29	232	28.88	281	27.62
184	41.32	233	28.65		
185	41.40	234	28.46		
186	41.47	235	28.29		
187	41.48	236	28.12		
188	41.55	237	27.96		
189	41.55	238	27.83		

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

มาตรการประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรม

Energy Saving Measures in Compressed Air in Industries

นายโกวิทย์ รัตนารามิก[1] อภิชิต เทอดโยธิน[2]

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพฯ

โทร 081-845-3796 อีเมล์ kowit.rhanksupply@gmail.com

[2]สาขาวิชาการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพฯ

โทร 0-2470-8631 ต่อ 8039โทรสาร 0-2470-8635 อีเมล์ apichit.the@kmutt.ac.th

Mr.Kowit Ratanaramig[1] Apichit Therdyothin[2]

[1]Program in Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Tel: 081-845-3796 E-mail: kowit.rhanksupply@gmail.com

[2]Program in Energy Management Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Tel: 0-2470-8631 ext 8039, Fax: 0-2470-8635, E-mail: apichit.the@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหามาตรการประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศทั้งระบบในโรงงานอุตสาหกรรม โดยได้เข้าไปทำการสำรวจการใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าในการผลิตอากาศอัดภายในโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลืองแห่งหนึ่งเพื่อหามาตรการปรับปรุงให้เป็นไปเพื่อการประหยัดพลังงานสูงสุด ซึ่งการสำรวจได้ทำใน 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนการผลิตอากาศอัด, ส่วนการส่งจ่ายอากาศอัด และการใช้อากาศอัด จากการตรวจสอบพบว่าทางโรงงานมีเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 12 เครื่องแบ่งเป็น 4 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งมีการเดินท่ออากาศอัดเชื่อมถึงกัน สามารถจ่ายอากาศอัดให้โรงงานผลิตทั้งหมด 9 โรงงาน ความต้องการใช้อากาศอัดเฉลี่ย = 873.76 l/s กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการผลิตอากาศอัด = 398.97 kW และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย = 2.19 l/s/kW ผลที่ได้จากการตรวจสอบสามารถเสนอเป็นแนวทางปรับปรุงได้ทั้งหมด 6 มาตรการ ได้แก่ 1.เปลี่ยน

เครื่องอัดอากาศที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่ำออกแล้วแทนที่ด้วยเครื่องอัดอากาศใหม่ที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่า 2.ติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอาศแบบศูนย์กลางเดียวกัน 3.ปรับปรุงอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ 4.ปรับปรุงระบบท่อส่งอากาศอัดภายในโรงงาน 5.ปรับลดความดันของเครื่องอัดอากาศลง 6.ปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดและลดความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้ง 6 มาตรการรวมเป็นมูลค่า 5,310,000 บาท สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 505,146 บาท/เดือน คิดเป็นจุดคืนทุน 10.51 เดือน

คำสำคัญ : การประหยัดพลังงาน / ระบบอัดอากาศ

Abstract

This paper presents a series of case studies that identifies significant compressed air savings in Brass ball valve manufacturer. To study the opportunities for energy systems improvement, it is important to understand compressed air generation, compressed air delivery systems and how compressed air is used. This particular factory has 12 air compressors divided into 4 sections, with each section interconnected by a pipeline header, with the header supplying the compressed air for 9 production lines, with an average compressed air consumption of 873.76 l/s with the average Power required to generate this quantity of compressed air being 398.97 kW, or a Specific energy consumption of 2.19 l/s/kW , case studies offer 6 process applications to improve the compressed air system, 1. Remove the low specific energy consumption sectors and replace with higher efficiency units. 2. Install a centralised control unit for the air compressor system. 3. Improve the intake air temperature to the air compressors. 4. Modify the compressed air pipeline. 5. Reduce the pressure settings on the air compressors. 6. Improve the air quality and pressure losses of the equipment being serviced by the air compressors. Total budget to carry out the required remedial work is 5,310,000 Baht. This remedial work would give an energy saving of 505,146 Baht per month meaning an investment payback time of 10.51 months.

Keywords: Energy saving / compressed air systems

1.บทนำ

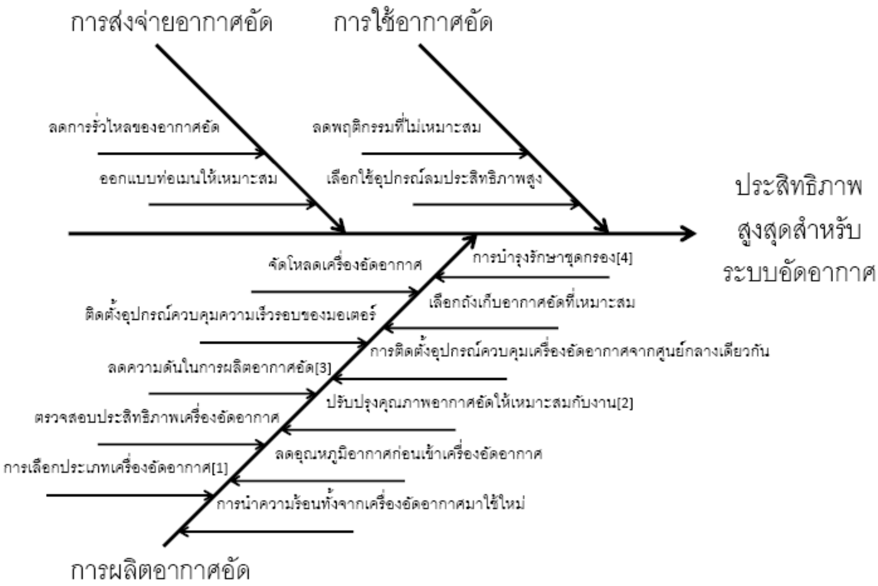
พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความจำเป็นและเป็นการใช้ในการผลิตของทุกโรงงาน ความจำเป็นและความสำคัญของการประหยัดพลังงานไฟฟ้า จึงไม่ใช่เพียงแต่เอื้อประโยชน์ต่อผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเพียงเท่านั้นแต่ยังเป็นความจำเป็นและมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศด้วย เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบัน ยังต้องพึ่งเชื้อเพลิงนำเข้าจากต่างประเทศ และมีแนวโน้มว่าจะต้องมีการนำเข้าเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคธุรกิจอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นสาขาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด การประหยัดพลังงานของโรงงาน หมายถึง การลดใช้พลังงานลงโดยการจัดการใช้พลังงานให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด โดยไม่ทำให้กระบวนการผลิตลดลงและไม่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความจำเป็น และมีความสำคัญกับการใช้ในการผลิตของทุกโรงงาน จากการสำรวจพบว่าระบบอากาศอัดเป็นระบบหนึ่งที่ใช้ในการบวนการการผลิตของทุกโรงงานอย่างแพร่หลายและยังพบอีกว่าระบบอัดอากาศเป็นระบบหนึ่งที่ใช้ค่าพลังงานไฟฟ้ามากเป็นลำดับต้นๆ จากข้อมูลการสำรวจพบว่าโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากไม่มีความเข้าใจในเรื่องระบบการใช้งานอากาศอัดอย่างมีประสิทธิภาพ การไม่มีความเข้าใจอย่างถูกต้องในระบบอัดอากาศจึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก ถ้ามีการศึกษาและเผยแพร่ข้อมูลอย่างถูกต้อง จะสามารถลดการใช้พลังงานของผู้ประกอบการและประเทศชาติได้เป็นอย่างมาก

2.วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหามาตรการประหยัดพลังงานของระบบอัดอากาศทั้งระบบ
2. ปรับปรุงระบบอัดอากาศของ โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง ทั้งระบบเพื่อเป็นโรงงานต้นแบบในการลดพลังงานไฟฟ้าของระบบอัดอากาศทั้งระบบ

3.วิธีการวิจัย

3.1 ทฤษฎี



รูปแสดงแนวทางสู่การทำให้ระบบอัดอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด

3.2 กระบวนการวิจัย การสำรวจระบบอากาศอัดทั้งระบบของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลืองและมิเตอร์น้ำ โรงงานแบ่งออกเป็น 9 อาคาร โดยแต่ละอาคารทำหน้าที่ที่แตกต่างกัน มีทั้งงานหล่อขึ้นรูป, งานกลึง, งานประกอบ และงานทดสอบคุณภาพ การใช้อากาศอัดของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง เกิดจากเครื่องอัดอากาศทั้งหมด 12 เครื่อง แบ่งเป็นตำแหน่งการวางเครื่องทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ลักษณะการเดินท่ออากาศอัดเดินเชื่อมถึงกันหมดทั้ง 4 ตำแหน่ง แต่บอลวาล์วกั้นไว้ ในยามฉุกเฉินสามารถเปิดบอลวาล์วให้ลมในแต่ละตำแหน่งเชื่อมถึงกันได้ ห้องเครื่องอัดอากาศแบ่งเป็น 4 ตำแหน่ง ได้แก่อาคาร 1 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศ 5 เครื่อง อาคาร 2 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศจำนวน 3 เครื่อง อาคาร 4 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศจำนวน 1 เครื่อง และอาคาร 9 ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศจำนวน 4 เครื่อง

การดำเนินงานวิจัยจะทำการสำรวจและตรวจวัดสภาพการใช้อากาศอัดตามความเป็นจริงของโรงงาน ณ ปัจจุบัน หลังจากนั้นจะทำการเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบอัดอากาศเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยมีขั้นตอนการการดำเนินงานดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่องอัดอากาศ ณ.สภาพปัจจุบัน เพื่อหาค่าการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องอัดอากาศ ในการตรวจหาค่าการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องอัดอากาศทำได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าอัตราการไหลของเครื่องอัดอากาศ

3.2.2 การตรวจสอบอุณหภูมิห้องบริเวณห้องเครื่องอัดอากาศ ทำการวัดค่าอุณหภูมิบริเวณรอบเครื่องอัดอากาศทุกเครื่องโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และวัดอุณหภูมินอกห้องเครื่องอัดอากาศในที่ร่มเพื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิ

3.2.3 ตรวจสอบการใช้ความดันของเครื่องจักรแต่ละประเภท ทำการสำรวจความดันที่ใช้งานในปัจจุบันของเครื่องจักรภายในโรงงานทั้งหมดที่ใช้อากาศอัดในการเดินเครื่อง เทียบกับค่าความดันที่เครื่องจักรใช้งานจริงตามคุณสมบัติของเครื่องจักร

3.2.4 การตรวจสอบความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัด ความเหมาะสมสำหรับใช้อากาศอัดของ โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง คือมาตรฐาน ISO 8573-1 CLASS 3.3.5 สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 8573-1 ได้แก่ แอร์ไดเออร์, ชุดฟิวเตอร์กรองอนุภาคที่เป็นของแข็ง และชุดฟิวเตอร์กรองไอน้ำมันเครื่อง ในการตรวจสอบจะทำการตรวจสอบความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดเทียบกับมาตรฐานที่ยอมให้เกิดความดันตกคร่อมได้ในแต่ละอุปกรณ์

3.2.5 การตรวจสอบความเหมาะสมของถังเก็บอากาศอัด ทำการตรวจสอบปริมาตรของถังเก็บอากาศเก่าถูกต้องตามมาตรฐานหรือไม่

3.2.6 การตรวจสอบระบบท่อส่งอากาศอัดทั้งระบบของโรงงาน ทำการสำรวจลักษณะการเดินท่ออัดอากาศและขนาดของท่ออัดอากาศภายในโรงงานทั้งหมด

3.2.7 นำเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้งระบบ นำเสนองบประมาณการปรับปรุงและคำนวณหาจุดคืนทุน

4.ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 ผลการวัดค่าอัตราการไหล, กำลังไฟฟ้า เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะของเครื่องอัดอากาศ

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆของเครื่องอัดอากาศแต่ละเครื่อง

หมายเลขเครื่อง	ค่าอัตราการไหลช่วงโหลดของเครื่อง (liter/s)	กำลังไฟฟ้าช่วงโหลด(kW)	ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (liter/s/kW)	ค่าอัตราการไหลเฉลี่ย (liters/s)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย(kW)
No.1	77.92	38.00	2.05	57.66	33.98
No.2	128.75	53.73	2.39	115.35	51.01
No.3	75.91	39.50	1.92	72.88	38.45
No.4	98.69	48.07	2.05	76.15	44.18
No.5	80.04	35.58	2.25	76.84	34.75
No.6	78.95	42.30	1.86	56.84	39.74
No.7	75.91	38.54	1.96	50.61	33.26
No.8	174.21	62.36	2.79	168.63	61.31
No.9	75.91	39.08	2.26	42.63	31.47
No.10	92.53	39.10	2.36	50.27	29.62
No.11	70.49	33.59	2.09	45.58	28.31
No.12	93.99	40.83	2.30	60.32	36.39
รวม	1,123.3	501.68		873.76	462.47

มาตรฐานการเลือกใช้เครื่องอัดอากาศจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ = 2.35 – 2.85 l/s/kWจากผลการทดสอบพบว่า เครื่องอัดอากาศที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะอยู่ในค่ามาตรฐานได้แก่ เครื่องอัดอากาศ No.2, No.8และ No.10

4.2 การตรวจสอบอุณหภูมิห้องบริเวณรอบเครื่องอัดอากาศ ผลการตรวจสอบพบว่าอุณหภูมิภายในห้องเครื่องบริเวณรอบตัวเครื่องมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องในที่ร่มประมาณ 5°C แต่ด้านบนของตัวเครื่องมีอุณหภูมิสูงกว่ามากอยู่ที่ประมาณ 20°C

4.3 การตรวจสอบการใช้ความดันอากาศอัด การตรวจสอบการใช้ความดันของทางโรงงาน พบว่าใช้ความดันของอากาศอัด = 5 bar แต่ทางโรงงานมีการตั้งค่าความดันอยู่ที่ 7 bar มีเพียงแผนกทดสอบการรั่วของวาล์วเท่านั้นที่ใช้ความดัน 8 bar และทางโรงงานมีการตั้งค่าความดันที่ 9 bar

4.4 การตรวจสอบความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศอัด พบว่าอาคาร 1 มีความดันตกคร่อมประมาณ 0.1 bar แต่มาตรฐานคุณภาพอากาศอัดเป็นไปตามมาตรฐาน อาคาร 2 ไม่พบความดันตกคร่อมและมาตรฐานคุณภาพอากาศอัดเป็นไปตามมาตรฐาน อาคาร 4 ไม่พบความดันตกคร่อมแต่คุณภาพอากาศอัดไม่เป็นไปตามมาตรฐานขาดชุดไส้กรองไอน้ำมันเครื่อง สำหรับอาคาร 9 พบความดันตกคร่อม 0.5 bar และคุณภาพอากาศอัดไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งชุดกำจัดความชื้นออกจากอากาศอัดไม่สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพได้

4.5 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของถังเก็บอากาศอัด การใช้งานอากาศอัดของทางโรงงานเป็นการใช้งานไม่สม่ำเสมอ แต่เครื่องผลิตอากาศอัดสามารถผลิตอากาศอัดได้มากกว่าความต้องการตลอดเวลา จึงถือได้ว่าเป็นการใช้อากาศอัดแบบสม่ำเสมอ จากการสำรวจพบว่า อาคาร 1 มีถังเก็บอากาศอัดขนาด 2,000 ลิตร จำนวน 1 ใบ ขนาด1,500 ลิตร จำนวน 1 ใบ อาคาร 2 มีถังเก็บอากาศอัดขนาด 2,000 ลิตร จำนวน 3 ใบ อาคาร 4 มีถังเก็บขนาด 1,000 ลิตร จำนวน 1 ใบ ขนาด 2,500 ลิตร จำนวน 1 ใบ และอาคาร 9 มีขนาดถังเก็บอากาศอัดขนาด 2,000 ลิตร จำนวน 1 ใบ ฉะนั้นรวมถังเก็บอากาศอัดทั้งระบบมีขนาด 13,000 ลิตร จากการคำนวณพบว่าถังเก็บอากาศอัดที่เหมาะสมคือ 12,784 ลิตร ฉะนั้นถังเก็บอากาศอัดที่มีอยู่มีความเหมาะสมแล้ว

4.6 การตรวจสอบระบบท่อส่งอากาศอัด ท่อส่งอากาศอัดมีการเดินเชื่อมต่อถึงทั้งหมดตั้งแต่อาคาร 1 ถึง 9 แต่จะมีบอลวาล์วกั้นส่วนของระบบท่อออกเป็น 4 ส่วน แต่ในสภาวะฉุกเฉินสามารถเปิดลมแต่ละอาคารให้เชื่อมต่อถึงกันได้ โดยการแบ่งช่วงของท่ออากาศอัดมีดังนี้

4.6.1 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 1 รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 1 จากกสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.8 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inch

4.6.2 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 2 และ 3 ต่อเชื่อมถึงกัน รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 2 จากการสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.1 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inch

4.6.3 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 4, 5 และ 6 ต่อเชื่อมถึงกัน รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 4 จากการสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.2 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inch

4.6.4 ท่อส่งอากาศอัดภายในอาคาร 7, 8 และ 9 ต่อเชื่อมถึงกัน รับอากาศอัดมาจากห้องเครื่องอัดอากาศที่อาคาร 9 จากการสำรวจความดัน ณ จุดใช้งานที่ระยะไกลสุดเทียบกับความดันภายในห้องเครื่องอัดอากาศมีค่าต่างกันประมาณ 0.3 bar ขนาดท่อเมนมีขนาด Ø 2 inch

4.7 แนวทางการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้งระบบ

4.7.1 เปลี่ยนเครื่องอัดอากาศ เป็นการเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะไม่ดีออกและทำการเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าเข้ามาทดแทน โดยแบ่งเป็นเครื่องอัดอากาศแบบสกรู ยี่ห้อ COAIRE รุ่น AS101 แบบความเร็วรอบคงที่จำนวน 4 เครื่อง และทำการติดตั้งเครื่องอัดอากาศแบบสกรู ยี่ห้อ COAIRE รุ่น AS101V แบบอินเวอร์เตอร์จำนวน 1 เครื่อง สำหรับเครื่องอัดอากาศเก่าที่ผ่านมาตรฐานทั้ง 3 เครื่องนำมาติดตั้งเป็นเครื่องสำรอง

งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุง = 3,680,000 บาท สามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า 80,316 บาท/เดือน

4.7.2 การติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอาศแบบศูนย์กลางเดียวกัน ติดตั้งชุด PLC ควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศให้มีการเดินเครื่องเหมาะสมกับความต้องการอากาศอัดที่ใช้จริงของทางโรงงาน การติดตั้งชุด PLC จะทำการติดตั้งที่อาคาร 9 และเดินสายเชื่อมเครื่องอัดอากาศทุกเครื่องเข้าสู่ศูนย์กลางเดียวกัน งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุง = 360,000 บาท สามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า 49,955 บาท/เดือน

4.7.3 การปรับปรุงอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอัด ติดตั้งปล่อยระบายความร้อนจากตัวเครื่องอัดอากาศไปทิ้งด้านนอกห้อง และที่ผนังห้องเครื่อง ทำการติดตั้งพัดลมดูดอากาศออกจากห้องเครื่อง งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุง = 150,000 บาท สามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้น้อยมากจนไม่นำมาคิดแต่ผลที่ได้คือการทำให้เครื่องอัดอากาศมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

4.7.4 การปรับปรุงระบบท่อส่งอากาศอัดภายใน ทำการเดินท่อเมนใหม่จากอาคาร 1 ถึงอาคาร 9 โดยเดินขนานไปกับท่อเมน 2 นิ้วเดิม แล้วทำการต่อเชื่อมท่อเมน 2 นิ้ว และ 4 นิ้ว เข้าด้วยกันเป็นช่วงงบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุง = 1,000,000 บาท จะช่วยทำให้ลดการเกิดความดันตกคร่อมและจะส่งผลให้สามารถลดความดันที่เครื่องอัดอากาศให้มีค่าลดลงได้

4.7.5 การปรับลดความดันของเครื่องอัดอากาศลง เมื่อทำการปรับปรุงท่อส่งอากาศอัดเพื่อลดความดันตกคร่อม จึงสามารถที่จะปรับลดความดันที่ตัวเครื่องอัดอากาศลงได้อีกประมาณ 0.5 bar งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุง = 0 บาท สามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า 5,887 บาท/เดือน

4.7.6 การปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดและลดความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ จากการสำรวจจะพบว่ามีเพียงอาคาร 9 ที่คุณภาพของอากาศอัดไม่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและยังพบความดันตกคร่อมมากถึง 0.5 bar แนวทางการปรับปรุง อาคาร 1 ทำการติดตั้งเครื่องอัดอากาศตัวใหม่จำนวน 3 เครื่อง เป็นขนาด 75 kW โดยแบ่งเป็นแบบความเร็วรอบคงที่จำนวน 2 เครื่องและแบบมีอินเวอร์เตอร์จำนวน 1 เครื่อง และทำการติดตั้งเครื่อง IR เป็นเครื่องสำรอง สำหรับ Air dryer ย้ายมาจากอาคาร 2 และอาคาร 4 สำหรับ Air dryer ตัวเก่าของอาคาร 1 ย้ายไปอาคาร 9 ทั้งหมด สำหรับชุด Pre filter และ Coalescent filter ย้ายมาจากอาคาร 2 และอาคาร 4 ตามมาด้วยกันเป็นชุด

แต่ต้องมีการซื้อ Coalescent filter เพิ่ม 1 ตัว เพราะของเดิมที่ย้ายมาจากอาคาร 4 ไม่มีชุด Coalescent filter สำหรับอาคาร 9 ทำการติดตั้งเครื่องอัดอากาศตัวใหม่จำนวน 2 เครื่อง เป็นขนาด 75 kW เป็นแบบความเร็วรอบคงที่ทั้ง 2 เครื่อง สำหรับ Air dryer ย้ายมาจากอาคาร 1 และเป็นของเดิมที่อยู่ในอาคาร 9 อยู่แล้ว ชุด Pre filter และ Coalescent filter ต้องทำการซื้อใหม่อย่างละ 1 ตัว เพื่อความสะดวกในการติดตั้งเพราะพื้นที่ห้องค่อนข้างแคบงบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุง = 120,000 บาท ไม่ช่วยในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าแต่ช่วยทำให้คุณภาพของอากาศอัดดีขึ้น ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ISO8573-1 CLASS 3.3.5 หลังจากทำการปรับปรุงตามมาตรการทั้ง 6 ข้อ จะต้องใช้งบประมาณลงทุนทั้งหมด 5,310,000 บาท โดยสามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 505,146 บาท/เดือน ฉะนั้นจุดคืนทุน = 5,310,000 / 505,146 = 10.51 เดือน

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการตรวจสอบการใช้อากาศอัดของโรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลืองพบว่ามีความต้องการใช้อากาศอัดเฉลี่ย = 873.76 l/s กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการผลิตอากาศอัด = 398.97 kW และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ย = 2.19 l/s/kW มาตรการที่นำเสนอเพื่อปรับปรุงระบบอัดอากาศเพื่อการประหยัดพลังงานมีทั้งหมด 6 มาตรการ ได้แก่ 1.เปลี่ยนเครื่องอัดอากาศที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่ำออกแล้วแทนที่ด้วยเครื่องอัดอากาศใหม่ที่มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่า 2.ติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอาศแบบศูนย์กลางเดียวกัน 3.ปรับปรุงอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอัดอากาศ 4.ปรับปรุงระบบท่อส่งอากาศอัดภายในโรงงาน 5.ปรับลดความดันของเครื่องอัดอากาศลง 6.ปรับปรุงคุณภาพอากาศอัดและลดความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงระบบอัดอากาศทั้ง 6 มาตรการรวมเป็นมูลค่า 5,310,000 บาท สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 505,146 บาท/เดือน คิดเป็นจุดคืนทุน 10.51 เดือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้า ควรมีการใช้เครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับจำนวนเครื่องอัดอากาศเพราะจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่แสดงพฤติกรรมของเครื่องอัดอากาศที่ตรงตามความเป็นจริง

มากที่สุด ถ้าเครื่องมือวัดไม่พอสำหรับเครื่องอัดอากาศทุกเครื่องและทางโรงงานมีการใช้อากาศอัดไม่สม่ำเสมออาจเป็นผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ไม่ตรงตามความเป็นจริง

5.2.2 ในการทดสอบไม่สามารถคำนวณอัตราการรั่วไหลของอากาศอัดตามอาคารต่างๆได้ เนื่องจากทางโรงงานเดินงานตลอด 24 ชั่วโมง แต่จากการที่เดินสำรวจพบว่ามีจุดรั่วไหลของอากาศอัดมาก ทางโรงงานจึงควรดำเนินการแก้ไขเพื่อการประหยัดพลังงาน

6.การนำผลประโยชน์ไปใช้งาน

สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบอัดอากาศภายใน โรงงานผลิตก๊อกน้ำทองเหลือง และสามารถใช้เป็นโรงงานต้นแบบสำหรับออกแบบระบบอัดอากาศทั้งระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

1. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม และThe Energy Conservation Center แห่งประเทศญี่ปุ่น (ECCJ), 2552, คู่มือการจัดการพลังงานไฟฟ้าในโรงงาน[ออนไลน์], Available: http://www.teenet.tei.or.th [20 มีนาคม 2556]

2. International Standard, 2001, ISO8573-1[Online], Avilable: http://www.iso.ch [4 เมษายน 2556]

3. U.S. Department of Energy, 1998, Pressure Drop and Controlling System Pressure[Online], Available: http://www.compressedairchallenge.org/library/factsheets/factsheet04.pdf *[9 มีนาคม 2556]*

4. U.S. Department of Energy, 2004, Effect of Intake on Compressor Performance[Online], Available:

http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/compressed_air14.pdf [18 กุมภาพันธ์ 2556]

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	โกวิทย์ รัตนารามิก
วัน เดือน ปีเกิด	12 มกราคม 2520
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนโยธินบูรณะ จังหวัดกรุงเทพฯ พ.ศ. 2538
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2542
ระดับปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	โกวิทย์ รัตนารามิก และอภิชิต เทอดโยธิน, 2556, “มาตรการประหยัดพลังงานในระบบอัดอากาศภายในโรงงานอุตสาหกรรม”, การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏสุราษฎร์ธานีวิจัย ครั้งที่ 10 เรื่อง งานวิจัยและงานสร้างสรรค์เพื่อพัฒนาท้องถิ่นที่ยั่งยืน, 20 – 21 พฤศจิกายน 2557