



การลดพลังงานในระบบอัดอากาศตามแผนการผลิต Compressed Air System Energy Reduction Based on Production Plan

จิตินันท์ สังข์ทอง* และ จิรพัฒน์ เจาประเสริฐวงศ์

Titinan Sungthong and Jeerapat Nagoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand

*E-mail: yoon_aunzo@hotmail.com, jeerapat_n@chula.ac.th

บทคัดย่อ

หน่วยงานยูทิลิตี้ของโรงงานผลิตผงซักฟอกทำหน้าที่จ่ายระบบสาธารณูปโภคให้กับฝ่ายผลิตประกอบไปด้วย ไฟฟ้า น้ำประปา ไอน้ำ แก๊สธรรมชาติ ซึ่งพบว่าโรงงานกรณีศึกษามีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศไม่สอดคล้องกับการผลิต เช่น ในวันที่ไม่มีการผลิต แต่มีการใช้พลังงานในระบบอัดอากาศ นั้นหมายความว่าหน่วยงานที่ดูแลไม่มีการบริหารจัดการการผลิตอัดอากาศให้เหมาะสมสอดคล้องกับแผนการผลิตทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน โดยพบว่า การใช้พลังงานในระบบอัดอากาศเฉลี่ยหนึ่งปีย้อนหลังปี 2016 เท่ากับ 124,862 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน มีค่าใช้จ่าย 434,519 บาทต่อเดือน คิดเป็นค่าสัดส่วนการใช้พลังงาน 17% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในโรงงาน ดังนั้นจึงต้องการลดพลังงานลงโดยการจ่ายอากาศอัดให้สอดคล้องกับแผนการผลิต

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลการจ่ายอากาศอัดให้กับวาล์วควบคุม ระบบจัดเรียงสินค้าด้วยหุ่นยนต์และเครื่องจักรที่ใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอัตราการไหลของอากาศอัดที่ใช้งานหน่วยลิตรต่อวินาทีที่ระดับแรงดัน 6.5 บาร์ เกจ ปริมาณผลผลิตผงซักฟอกและจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการบรรจุผงซักฟอก ทำให้พบว่าได้สมการในการทำนายอัตราการไหลของอากาศอัด ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ $R^2 = 74.79\%$ จากนั้นนำค่าอัตราการไหลที่ได้จากสมการไปวางแผนปิดเครื่องอัดอากาศล่วงหน้าตามแผนการผลิต พบว่าสามารถประเมินผลการลดพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศลงได้ 186,125 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี มีผลประหยัด 651,439 บาทต่อปี

ABSTRACT

The Utilities Department of a detergent production factory is responsible for supplying electricity, water, steam, and natural gas to the Production Department. It is found that the proportion of electricity consumption in the compressed air system is inconsistent with the production. This means that the supervising unit does not manage the production of compressed air in accordance with the production plan causing the energy waste. The energy consumption was averagely 124,862 kilowatt hours per month costing 434,519 baht per month which is 17% of the total energy consumption in the factory. Therefore, it is desirable to reduce energy use by supplying the compressed air in accordance with the production plan.

This research analyzes the compressed air data for the controlling valves by studying the relationships between the flow rate of compressed air used in liters per second at the pressure of 6.5 bar.

From the amount of detergent yield and the number of machines used in the detergent filling process, it is found that the flow rate (liters per second) with statistical relations at the confidence level of 95% and $R^2 = 74.79\%$. Then, the flow rate obtained from the equation will be planned to turn off the air compressor in advance following the production plan. It is found that the reduction of electricity in the compressed air system can be assessed for 186,125 kWh per year saving 651,439 baht per year.

1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนภาคอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ทำให้อุตสาหกรรมในยุคปัจจุบันคำนึงถึงการผลิตสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้คุณภาพตามมาตรฐานควบคู่ไปกับการแข่งขันทางด้านราคาสินค้าเพื่อให้ได้ผลกำไรที่สูงกว่าบริษัทคู่แข่งและเพิ่มประสิทธิภาพในการแข่งขัน ดังนั้นหลายบริษัทจึงมีนโยบายในการลดต้นทุนในการผลิต ด้วยการลดต้นทุนด้านพลังงานลง เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สำคัญและเป็นส่วนหนึ่งของต้นทุนสินค้า ได้แก่ ต้นทุนพลังงาน

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตสินค้าอุปโภค พบว่ามีค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเดือนสูงถึง 13 ล้านบาท ทางโรงงานได้มีนโยบายในการลดปริมาณการใช้พลังงานลงโดยตั้งเป้าในรูปของการลด CO₂ Emission เท่ากับ 0.1031 kgCO₂/Ton Product ซึ่งในปี 2017 มีปริมาณ CO₂ Emission เท่ากับ 0.1225 kgCO₂/Ton จากตัวเลขดังกล่าวพบว่าไม่เป็นไปตามเป้าหมาย ผู้วิจัยจึงเป็นผู้รับผิดชอบพลังงานของโรงงานได้สังเกตเห็นปัญหาในการจัดการการจ่ายระบบอัดอากาศที่มากเกินไปจนทำให้กับฝ่ายผลิต เช่น ในวันที่ไม่มีการผลิตสินค้าแต่มีค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศ หรือการเปิดเครื่องอัดอากาศในวันที่การผลิตน้อย ซึ่งการผลิตมีการวางแผนการผลิตล่วงหน้าอยู่แล้ว แต่ขาดการประสานข้อมูลดังกล่าวกับฝ่ายสนับสนุน ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศ โดยที่สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงานประกอบไปด้วย ระบบแสงสว่าง 8% ระบบปรับอากาศสำนักงาน 20% ระบบทำความเย็น 9% กระบวนการผลิต 39% ระบบอัดอากาศ 17% และส่วนอื่นๆ 7% ดังนั้นถ้าฝ่ายสนับสนุนใช้แผนการผลิตในการประเมินหาความต้องการปริมาณการใช้ก๊าซอัด คาดว่าจะสามารถลดการผลิตอากาศอัดที่เกินความจำเป็นลงได้

โดยหน่วยงานที่เลือกทำการวิจัยเพื่อเป็นหน่วยงานต้นแบบ ได้แก่ หน่วยงานบรรจุผงซักฟอกที่มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 124,862 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน คิดเป็นค่าใช้จ่าย 434,519 บาทต่อเดือน เนื่องจากหน่วยงานบรรจุผงซักฟอกมีปริมาณการใช้ก๊าซอัดเป็นสัดส่วน 65% ของปริมาณก๊าซอัดที่ใช้ในการผลิตภายในโรงงาน ซึ่งก๊าซอัดที่ใช้ส่วนมากใช้ในเครื่องบรรจุและวาล์วควบคุม

จากการศึกษาข้อมูลและเข้าร่วมอบรมกับหน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนเกี่ยวกับวิธีการลดการใช้พลังงานของระบบอัดอากาศ พบว่ามีหลายวิธีการ เช่น การปรับลดแรงดันที่ใช้ งาน การติดตั้งอุปกรณ์ช่วยควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศตามแรงดันการใช้งานเป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยยังไม่พบการศึกษาการจ่ายก๊าซอัดโดยการใช้แผนผลิตของฝ่ายผลิตเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการทำนายปริมาณการใช้ก๊าซอัดและวางแผนการจ่ายก๊าซอัดล่วงหน้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาตามวิธีการดังกล่าว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) [3]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว กับตัวแปรตาม หรือค่าตอบสนอง แนวทางปฏิบัติอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความสัมพันธ์ สามารถเกิดได้หลายกรณี ประกอบด้วยค่าผิดพลาดที่เกิดจากการวัด เช่น ความผิดพลาดส่วนบุคคลหรือขาดการปรับตั้งเครื่องจักรก่อนวัด ค่าผิดพลาดที่เกิดการใส่ตัวแปรในสมการถดถอยประมาณน้อยหรือมากเกินไปจนความสัมพันธ์ที่แท้จริง รวมทั้งเกิดจากการเลือกรูปแบบสมการหรือวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ผิด

การสร้างสมการถดถอยเชิงพหุสามารถพิจารณาได้ 3 วิธีคือ

2.1.1 วิธี Backward Elimination เริ่มจากสร้างสมการเต็มรูปแบบแล้วลดรูปโดยพิจารณาจาก P-Value ของตัวแปรอิสระ ที่มีค่า $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุดจะถูกเลือกออกจากสมการจนไม่สามารถลดรูปได้อีก

2.1.2 วิธี Forward Elimination เริ่มจากสมการถดถอยอย่างง่ายและพิจารณาเพิ่มตัวแปรอิสระทีละตัว โดยดูจากค่าที่สำคัญ P-Value ที่น้อยที่สุดเป็นตัวเริ่ม แล้วเพิ่มจนกว่าจะเพิ่มไม่ได้

2.1.3 วิธี Stepwise Selection เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปเนื่องจากหลักการของวิธี Backward Elimination และ Forward Elimination คู่กัน โดยทุกครั้งที่เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าสมการจะพิจารณาว่าตัวแปรอิสระควรอยู่ในสมการหรือตัดออก

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Stepwise selection เนื่องจากต้องการสมการที่สามารถทำนายได้แม่นยำที่สุดเพียง 1 สมการและทดสอบว่าตัวแปรอิสระทุกตัว จะไม่มีความสัมพันธ์กันเองสูง เพื่อป้องกันปัญหาความสัมพันธ์ภายในของตัวแปรพยากรณ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Dionysios[4] ศึกษาเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่อง่ายของคอมเพรสเซอร์ในแบบคู่ขนานด้วย Real Time Optimization (RTO) ของคอมเพรสเซอร์ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเคมี ที่ BASF, SE ประเทศเยอรมัน โดยนำเสนอการบูรณาการของข่ายงานที่เหมาะสมที่สุดของ Compressor แบบขนาน เพื่อเชื่อมต่อกับลักษณะงานที่หลากหลายช่วยในการตัดสินใจ ได้แก่ การจัดตารางดำเนินงานที่เหมาะสมและกำหนดเวลาในการซ่อมบำรุง มุ่งเน้นการตัดสินใจในการเปิด-ปิด Compressor และการเดินเครื่องให้เหมาะสมตาม Load โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ ของการใช้งานในแต่ละวัน จากสมการ Regression model เพื่อหาสถานะในการเดินเครื่องที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการเก็บข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูล และตรวจสอบวิเคราะห์หาความผิดปกติของระบบ พบว่าจากการทดลองใช้งานระบบ RTO พบว่าสถานะที่เครื่องเดินด้วยสถานะที่เหมาะสมกับ Load การใช้งาน สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เมื่อเทียบกับสถานะการเดินเครื่องแบบเดิม วิรัชศักดิ์ สมัครการ [5] ศึกษาเรื่องปรับปรุงเครื่องอัดอากาศใช้งานอัตโนมัติเพื่อลดต้นทุนในระบบ โดยการติดตั้งชุดควบคุมเครื่องอัดอากาศอัตโนมัติ (Group Control Panel) เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศจำนวน 5 เครื่องให้ทำงานเหมาะสมกับความต้องการแรงดันลมที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่งผลให้ชั่วโมงการทำงานของเครื่องลดลงได้โดยเฉลี่ย 918.82 ชั่วโมงต่อเครื่อง คิดเป็น 45% และลดการสูญเสียในระบบ ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง 129,709.95 บาทต่อเดือน Huibin [6] ศึกษาการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ Air compressor ด้วยการบูรณาการออกแบบควบคุมจอแสดงผล โดยศึกษา Air Compressor จำนวน 5 เครื่องภายในโรงงานผลิตถ่านหิน มณฑลซานตง ประเทศจีน ซึ่งประกอบด้วย Air compressor ชนิด Screw จำนวน 2 เครื่องและ Air compressor ชนิด Piston จำนวน 3 เครื่อง โดยติดตั้งระบบ Soft Start สำหรับ Air Compressor ชนิด Screw และติดตั้ง Inverter สำหรับ Air compressor ชนิด Piston พร้อม Sensor สั่งเปิด-ปิด บัมเมอร์บายความร้อนตามสถานะการทำงานของเครื่อง ซึ่งระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วย PLC Controller จากงานวิจัยพบว่าโรงงานสามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ Air compressor ลงได้ เนื่องจากจำนวนชั่วโมงการทำงานที่ลดลง เพราะเครื่อง Air compressor ทำงานตามโหลดความต้องการจริงของการผลิต และในส่วนของ Air compressor ชนิด Screw สามารถเดินเครื่องสลับกันได้พร้อมตั้งเวลาในการเปิด-ปิดเครื่องเพื่อให้เครื่องได้ทำงานที่ชั่วโมงการทำงานใกล้เคียงกันง่ายต่อการบำรุงรักษา อัจฉราภรณ์ พักแสง [7] ศึกษาการจัดการพลังงานของระบบอัดอากาศในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแก้ว โดยการตรวจวัดประสิทธิภาพเครื่องอัดอากาศจำนวน 18 เครื่องพบว่าเครื่องอัดอากาศ

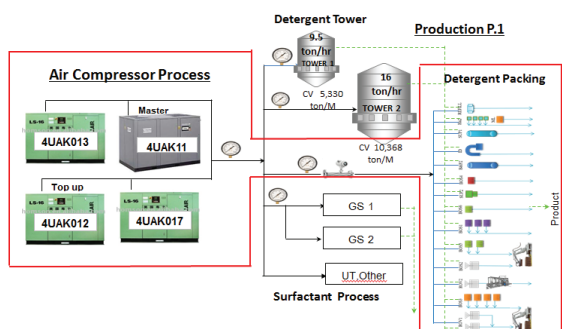
No.5 มีค่าการใช้พลังงานสูงสุดคือ 0.446 kW/L/Sec และเครื่องอัดอากาศ No.1 มีค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตต่ำที่สุด คือ 0.304 kW/L/Sec จึงจัดการทำงานของเครื่องอัดอากาศที่มีสมรรถนะให้ได้สูงที่สุด และเลือกใช้เครื่องที่มีสมรรถนะต่ำไว้เป็นตัวสำรอง

3. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมี 6 ขั้นตอนประกอบด้วยการกำหนดขอบเขตการศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ ศึกษาเฉพาะส่วนงานบรรจุผงซักฟอกเท่านั้น และกำหนดข้อมูลที่ต้องการเก็บเพื่อนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์พร้อมกับการออกแบบตารางผลการทดลองสำหรับเก็บข้อมูลในโรงงานจริง เพื่อใช้สร้าง Regression Model ในการทำนายปริมาณการใช้แก๊สอัดให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตตามแผนการผลิตในแต่ละวัน จากนั้นทำการทดลองและเก็บข้อมูลอีกครั้งตามข้อมูลที่ได้อ้างอิงไว้ภายใต้สมการ Regression ที่ได้ เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนหลังการวิจัย พร้อมทั้งสรุปผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนผังและขอบเขตของการศึกษา

ทำการศึกษาการจ่ายแก๊สอัดให้เหมาะสมกับการผลิตในส่วนงานบรรจุผงซักฟอก ซึ่งมีการใช้พลังงานของเครื่องอัดอากาศจำนวน 4 เครื่อง ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศขนาด 110 kW ที่อัตราการใช้แก๊ส 253 L/S จำนวน 1 เครื่อง และเครื่องอัดอากาศขนาด 75 kW ที่อัตราการใช้แก๊ส 213,214,220 L/S จำนวน 3 เครื่องตามลำดับ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบอัดอากาศ

3.2 การเก็บข้อมูลในการวิเคราะห์

ข้อมูลที่ต้องการเก็บเพื่อนำมาวิเคราะห์ในการสร้างสมการถดถอยประกอบไปด้วย

3.2.1 ปริมาณการใช้แก๊สอัดในหน่วยงานผลิตผงซักฟอก สามารถอ่านได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล

3.2.2 ปริมาณผลผลิต ซึ่งได้ข้อมูลจากแผนการผลิตของฝ่ายผลิต

3.2.3 แรงดันแก๊สอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต ซึ่งสามารถอ่านได้จาก Pressure Gauge

3.2.4 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตจริง ซึ่งข้อมูลได้จากการจดบันทึกจากการทำงานรายวันของเครื่องจักร

3.2.5 แรงดันแก๊สอัดที่ใช้ผลิต ซึ่งสามารถอ่านได้จาก Pressure Gauge

3.2.6 ปริมาณการใช้พลังงานในระบบอัดอากาศ สามารถอ่านได้จากมิเตอร์ไฟฟ้าและโปรแกรมวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องมือวัดในการเก็บข้อมูล

3.3 ผลการเก็บข้อมูลก่อนการปรับปรุง

ทำการเก็บข้อมูลด้วยตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการสร้างสมการถดถอยพหุ โดยเก็บข้อมูลทุกวัน จำนวน 31 วัน ซึ่งมีจำนวน 31 ข้อมูลต่อ 1 ตัวแปร โดยทำการศึกษาทั้งหมด 5 ตัวแปร แบ่งเป็นตัวแปรตาม 1 ตัวแปรและตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปรดังนั้นข้อมูลทั้งหมดที่ศึกษาจำนวน 155 ข้อมูลในการสร้างสมการถดถอย

3.4 สมการถดถอยเชิงพหุ Multiple Regression

กำหนดตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย

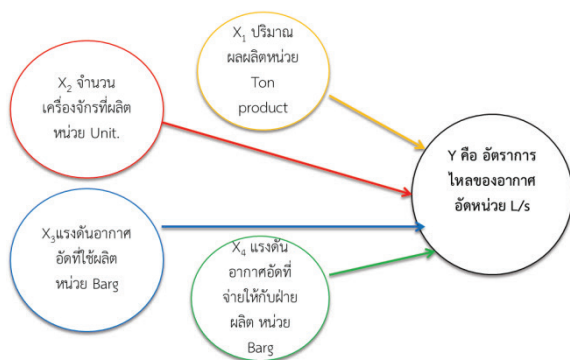
3.4.1 ตัวแปรตาม (Y) คืออัตราการไหลของอากาศอัดหน่วย L/s

3.4.2 ตัวแปรอิสระ (X_1) คือปริมาณผลผลิตหน่วย Ton product

3.4.3 ตัวแปรอิสระ (X_2) คือจำนวนเครื่องจักรที่ผลิต หน่วย Unit

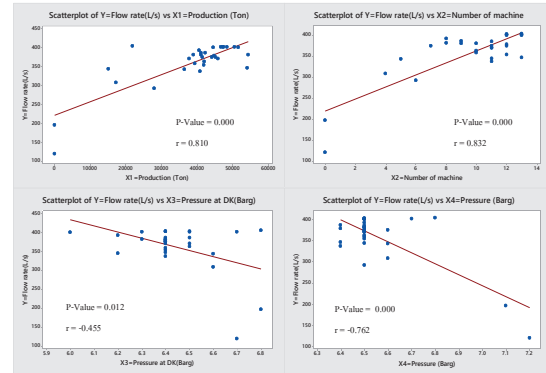
3.4.4 ตัวแปรอิสระ (X_3) แรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต หน่วย Barg.

3.4.5 ตัวแปรอิสระ (X_4) แรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต Barg.



รูปที่ 3 แผนผังวิเคราะห์ Multiple Regression

จากนั้นทำการทดสอบ Scatter Plot ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระ พบว่าความสัมพันธ์ของปริมาณการไหลของอากาศอัดกับตัวแปรอิสระประกอบด้วยปริมาณผลผลิต จำนวนเครื่องจักรที่ผลิตและแรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งมีค่า $r = 0.810$, 0.832 และ -0.762 ตามลำดับ แต่ตัวแปรอิสระแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิตมีความสัมพันธ์เส้นตรงต่ำซึ่งมีค่า $r = -0.455$ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Scatter Plot ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระ

จากนั้นทำการทดสอบ Correlation ระหว่างตัวแปรอิสระพบว่า ตัวแปรปริมาณผลผลิตกับตัวแปรเครื่องจักรที่ผลิต และตัวแปรปริมาณผลผลิตกับตัวแปรแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกันสูงเนื่องจากค่า $r > 0.75$ ส่วนตัวแปรอิสระอื่นๆ มีความสัมพันธ์กันปานกลางและต่ำเนื่องจากค่า $r < 0.75$ ดังรูปที่ 5

รายการ	ปริมาณผลผลิต	จำนวนเครื่องจักรที่ผลิต	แรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต
จำนวนเครื่องจักรที่ผลิต	$r = 0.765$ P-Value = 0.000	-	-
แรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต	$r = -0.482$ P-Value = 0.000	$r = -0.416$ P-Value = 0.000	-
แรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต	$r = -0.777$ P-Value = 0.000	$r = -0.673$ P-Value = 0.000	$r = 0.669$ P-Value = 0.000

รูปที่ 5 Correlation test ระหว่างตัวแปรอิสระ

ทำการทดสอบสมการถดถอยพหุ โดยกำหนดค่า Y คือปริมาณการใช้อากาศอัดหน่วย (ลิตรต่อวินาที) ซึ่งได้สมการในการทำนายดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ Multiple linear regression

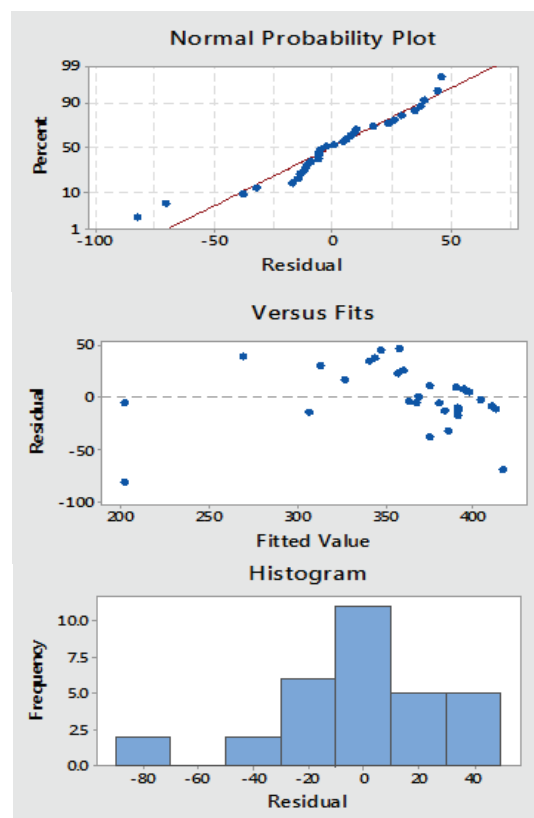
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	F	p-value	t-value	S	R ² (adj)	R ² (pred)
X				55.35	0.000	11.35	36.42	64.43	51.53
	X			65.10	0.000	11.89	34.48	68.12	57.78
		X		40.11	0.000	3.63	40.24	56.59	41.27
			X	7.31	0.012	7.66	55.12	17.87	0.00
X	X			45.49	0.000	11.63	30.66	74.79	63.79
X		X		25.72	0.173	1.40	36.98	63.03	42.85
X			X	32.71	0.015	2.59	34.61	67.89	51.43
	X	X		30.84	0.062	1.95	34.78	67.30	55.01
	X		X	45.92	0.001	3.74	30.55	74.97	63.37
		X	X	23.58	0.000	6.92	38.03	60.89	39.52
X	X	X		27.29	0.218	1.26	31.53	73.12	56.66
X	X		X	33.22	0.032	2.26	29.72	76.32	60.54
	X	X	X	29.75	0.011	2.74	30.50	74.84	59.86
X		X	X	21.87	0.029	2.31	34.21	68.35	45.67
X	X	X	X	23.51	0.000	11.63	30.02	75.64	54.90

พบว่าผลการวิเคราะห์สมการจากตารางที่ 1 ได้สมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการใช้ของอากาศอัดได้ดีที่สุด ได้แก่

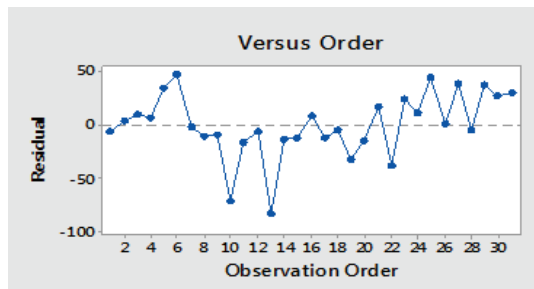
$$\text{อัตราการใช้ของอากาศอัด (ลิตรต่อวินาที)} = 202.1 + 0.001847 \text{ ปริมาณผลผลิต (ตัน)} + 8.86 \text{ จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิต (เครื่อง)} \quad (1)$$

โดยสมการมีค่า $R^2(\text{adj}) = 74.79\%$ หมายความว่าปริมาณการผลิตและจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตสามารถทำนายปริมาณการใช้ของอากาศอัดได้ 74.79% ที่เหลืออีก 25.21% เป็นอิทธิพลจากปัจจัยอื่น ที่ค่า P-Value เท่ากับ 0.00

จากกราฟในรูปที่ 6 พบว่ารูปแบบของกราฟ Normal Probability Plot of Residual มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือเป็นเส้นตรงสรุปได้ว่าการแจกแจงแบบปกติ โดยที่รูปแบบกราฟ Residual Versus Order ไม่มีรูปแบบของแนวโน้ม มีการกระจายตัวตามปกติ และรูปแบบกราฟ Residual Versus Fits มีรูปแบบเป็นแบบ Random แสดงว่า Residual มีความอิสระต่อกัน



รูปที่ 6 ผลการทดสอบ Multiple linear regression



รูปที่ 6 (ต่อ) ผลการทดสอบ Multiple linear regression

ตารางที่ 2 แผนการดำเนินการปิดเครื่องตามแผนผลิต

วันที่	ปริมาณ ผลผลิต (ตัน)	จำนวนเครื่องจักร	อัตราการไหลอากาศ อัด (L/s)	ปริมาณอากาศ อัดคงที่	Balance (L/s)	ปิดเครื่อง
10 Oct.	53,036	12	406	805	109	
11 Oct.	54,191	12	409	807	107	
12 Oct.	50,122	14	419	818	96.4	
13 Oct.	0	0	202	601	313	4UAK11
14 Oct.	49,986	13	410	808	106	
15 Oct.	27,345	6	306	705	209	4UAK13
16 Oct.	43,229	10	371	769	145	
17 Oct.	46,160	11	385	784	130	
18 Oct.	50,884	13	411	810	104	
19 Oct.	49,399	12	399	786	115	
20 Oct.	49,937	12	401	800	114	
21 Oct.	47,312	11	387	786	128	
22 Oct.	4,914	2	229	628	286	4UAK11
23 Oct.	38,502	10	362	761	153	
24 Oct.	43,338	10	371	770	144	
25 Oct.	43,591	10	371	770	144	
26 Oct.	23,805	5	290	689	225	4UAK12
27 Oct.	46,850	10	377	776	138	
28 Oct.	47,269	9	369	768	146	
29 Oct.	3,780	1	218	617	297	4UAK11
30 Oct.	46,889	10	377	776	138	
31 Oct.	36,073	11	366	765	149	
1 Nov.	49,307	9	373	772	142	
2 Nov.	50,556	10	348	783	131	
3 Nov.	49,736	9	374	773	141	
4 Nov.	35,702	12	374	773	141	
5 Nov.	0	0	202	601	313	4UAK11
6 Nov.	45,762	10	375	774	140	
7 Nov.	41,542	12	385	784	139	
8 Nov.	47,184	12	396	794	120	
9 Nov.	49,680	12	400	799	115	
10 Nov.	40,178	12	383	782	132	

3.5 ดำเนินการทดลอง

นำสมการ (1) มาใช้ในการทำนายปริมาณอากาศอัดที่ฝ่ายผลิตต้องใช้และจัดทำตารางแผนการดำเนินการทดลองปิดเครื่องอัดอากาศในแต่ละวันตามแผนการผลิตดังตารางที่ 2 โดยใช้ปริมาณการผลิตและจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตที่ได้จากแผนการผลิตของฝ่ายผลิต

3.6 ผลการทดลอง

จากการดำเนินการเปิด-ปิด เครื่องอัดอากาศตามแผนการผลิต ภายใต้การทำนายด้วยสมการ (1) เพื่อวางแผนการบริหารการจ่ายอากาศอัดให้เหมาะสมกับแผนการผลิตพบว่า พบว่าก่อนการปรับปรุงมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อตันผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.20 หลังการทดลองมีค่า

เท่ากับ 0.18 ซึ่งลดลง 0.02 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 3 ดังนั้นถ้ามีปริมาณผลผลิตเท่ากับ 9,306,279 ตันต่อปี พบว่าเกิดผลประหยัดที่ได้เท่ากับ 186,125 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี เป็นเงิน 651,439 บาทต่อปี ที่ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.50 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และลดปริมาณ CO₂ Emission ได้ 108.34 ตัน CO₂ ต่อปี

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง

วันที่	ก่อนปรับปรุงเดือนสิงหาคม		หลังปรับปรุงเดือนตุลาคม	
	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	พลังงานไฟฟ้า(kWh)	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	พลังงานไฟฟ้า(kWh)
1	44,105	7,499	40,047	7,447
2	48,439	7,454	38,413	7,433
3	44,538	7,441	35,936	7,214
4	47,167	5,128	-	4,465
5	41,472	7,702	39,315	7,577
6	21,953	4,064	-	5,065
7	47,401	7,536	33,173	7,367
8	54,327	7,069	39,878	6,864
9	50,482	6,918	42,891	7,389
10	54,061	7,536	44,382	7,701
11	45,212	7,387	41,311	7,323
12	-	4,784	47,713	7,134
13	-	4,647	1,134	4,237
14	45,895	7,477	41,843	7,646
15	51,516	7,521	37,426	7,479
16	46,598	7,539	34,718	5,991
17	44,857	7,530	-	3,088
18	41,958	7,536	39,538	7,271
19	41,929	7,527	35,702	6,555
20	27,999	6,357	-	3,434
21	15,078	7,562	45,762	7,830
22	40,805	7,447	41,542	6,884
23	41,057	7,490	47,184	8,009
24	41,118	7,539	49,680	8,752
25	40,628	7,816	40,178	6,245
26	37,849	7,117	47,330	8,714
27	17,204	4,336	26,703	5,137
28	39,328	7,501	44,465	7,555
29	38,935	7,470	46,845	7,664
30	42,317	7,454	50,955	7,322
31	36,407	7,405	47,586	7,646
Total	790,751	154,977	811,997	149,616
Index (kWh/Ton)		0.20		0.18

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สมการถดถอยพหุในการทำนายอัตราการไหลของอากาศอัดสำหรับสร้างแผนการจ่ายอากาศอัดให้สอดคล้องกับแผนผลิตเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยศึกษาตัวแปรอิสระจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณผลผลิตหน่วย จำนวนเครื่องจักรที่ผลิตแรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิตและแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต เพื่อทำนายตัวแปรตามได้แก่ อัตราการไหลของอากาศอัด จากผลการทดสอบ Scatter Plot ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระพบว่าปริมาณผลผลิตกับจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเชิงบวกเนื่องจากเมื่อมีการผลิตมากขึ้นจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถผลิตได้ตามเป้า ซึ่งเครื่องจักรใช้อากาศอัดในการผลิต ส่งผลให้ต้องใช้อัตราการไหลของอากาศอัดที่สูงขึ้นเช่นกัน ส่วนความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของอากาศอัดกับแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิตมีความสัมพันธ์เส้นตรงในเชิงลบ เนื่องจากเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นอัตราการไหลลดลงตามทฤษฎี และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศอัดกับแรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิตมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่ำ เนื่องจากปัจจัยหลายอย่างเช่นขนาดของท่อ ถึงเก็บอากาศอัด หรือระยะทางของท่อจากจุดจ่ายไปยังจุดใช้งาน เป็นต้น

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ได้นำตัวแปรดังกล่าวมาสร้างสมการพหุคูณ เพื่อทำนายปริมาณอากาศอัดที่ต้องใช้ในการผลิต พบว่าได้สมการดังนี้ อัตราการไหลของอากาศอัด (ลิตรต่อวินาที) = $202.1 + 0.001847$ ปริมาณผลผลิต (ตัน) + 8.86 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิต เครื่อง ที่ค่า $R^2(\text{adj}) = 74.79\%$ เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณอัตราการไหลของอากาศอัดโดยใช้ข้อมูลจากแผนผลิตที่ได้จากฝ่ายผลิต เพื่อมาวางแผนการเปิด-ปิดเครื่องอัดอากาศล่วงหน้า เมื่อทำการทดลองตามแผนพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานลง 186,125 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ประหยัดค่าไฟฟ้า 651,439 บาทต่อปี ลดปริมาณ CO₂ Emission ได้ 108.34 ตัน CO₂ ต่อปี (CO₂ Emission Factor = 0.5821 kgCO₂/kWh) [8]

จากการวิจัยพบว่ามีข้อจำกัดในการวิจัยได้แก่ ผู้วิจัยได้นำสมการที่ (1) มาทำนายการปิดเครื่องอัดอากาศรายกะ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากแผนการผลิตพบว่าในช่วงกะดึกมีการผลิตต่ำแต่เมื่อทำการทดลองพบว่าไม่เกิดผลประหยัดเนื่องจากเมื่อทำการปิดเครื่องขนาด 75 kW จำนวน 1 เครื่องในและดึกส่งผลให้เครื่องขนาด 110 kW ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำทำงานนานขึ้น ควรทำการเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศประสิทธิภาพสูงและทำการบริหารจัดการโดยใช้สมการที่ (1) จะทำให้เกิดผลประหยัดสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] การประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), กระทรวงพลังงาน, 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=344%3A2010-07-22-10-13-47&catid=67%3A2010-04-06-09-28-47&Itemid=103&lang=th.
- [2] คู่มือการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), กระทรวงพลังงาน, 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/243>
- [3] ทองพรรณราย มัชโชติ. การทำนายความขรุขระของผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยประยุกต์ใช้การเวฟเลทของแรงตัดพลวัต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [4] Dionysios, P. Applied Energy: Optimization of a network of compressors in parallel: Real Time Optimization (RTO) of compressors in chemical plants – An industrial case study. *Journal of Applied Energy*, 2015; 144: 51-63.

- [5] Huibin, L. and Xuehua, L. Advance in control engineering information science: Integrated Monitoring System Design of Hybrid Aircompressors. *Procedia Engineering*, 2011; 15: 938–943.
- [6] วีระศักดิ์ สมัครงูร, เอรวัฒน์ ลำเต้ะ และ วันเฉลิม นูราณเดช. ปรับปรุงเครื่องอัดอากาศใช้งานระบบอัตโนมัติ เพื่อลดต้นทุนในระบบ. ปรินญานิพนธ์เทคโนโลยีบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2554.
- [7] อัจฉราภรณ์ พักแสง. การจัดการพลังงานของระบบอัดอากาศในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตขวดแก้ว. วิทยานิพนธ์ปรินญานิพนธ์บัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [8] ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor). ฉลากคาร์บอนและคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (อบก.), องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_11335ee08a.pdf