

การพัฒนาและการศึกษาอิงพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และ การถ่ายเทความร้อนสำหรับโรงไฟฟ้าระบบโคเจนเนอเรชั่นขนาดเล็ก

Development and Parametric Study of Thermodynamic and Heat Transfer Models for a Small Cogeneration Power Plant

ณัฐนิชา มุสิกะสังข์ และ จิตติน แดงเทียง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail: natnichamus@yahoo.com, qed690@yahoo.com

บทคัดย่อ

โคเจนเนอเรชั่นเป็นเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงและประกอบด้วยกังหันก๊าซ กังหันไอน้ำ และเครื่องผลิตไอน้ำจากไอเสีย ในการศึกษาวิจัยเป็นการพัฒนาและการหาค่าที่เหมาะสมของแบบจำลองโรงไฟฟ้าระบบโคเจนเนอเรชั่นขนาดเล็กภายในประเทศไทยและเป็นการใช้แบบจำลองที่เหมือนจริงที่ถูกวิเคราะห์และพัฒนาจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และการแลกเปลี่ยนความร้อนและระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมแมทแล็บ นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่สำคัญส่งผลต่อการใช้พลังงานและประสิทธิภาพได้แก่ อัตราความร้อนเชื้อเพลิง และการปรับความดันวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูง ผลลัพธ์จากการจำลองพบว่าในกรณีฐานประสิทธิภาพโคเจนเนอเรชั่นมีค่าร้อยละ 56.96 ความสามารถในการใช้พลังงานปรมาณูในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าร้อยละ 16.72 ในส่วนของการปรับพารามิเตอร์จะพบว่าการเพิ่มขึ้นอัตราความร้อนเชื้อเพลิงร้อยละ 3 ส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปรมาณูในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นจากเดิมซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 57.50 และ 17.53 แต่การเพิ่มความดันวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูง 7.5 บาร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่นมีค่าเกือบคงที่ และความสามารถในการใช้พลังงานปรมาณูในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนลดลงจากเดิมซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.62

คำสำคัญ: การศึกษาอิงพารามิเตอร์; ประสิทธิภาพโคเจนเนอเรชั่น; ความสามารถในการใช้พลังงานปรมาณูในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน

Abstract

Cogeneration is high efficiency technology and consists of gas turbine, steam turbine and heat recovery steam generator. In the present research study, optimization model of a small cogeneration power plant in Thailand is developed, and the realistic cogeneration model is analyzed and improved by thermodynamic and heat transfer models. The numerical solution

is obtained by using MATLAB. Furthermore, the important parameters that affect energy consumption and efficiency are the heat rate of fuel and the valve controlling high pressure at steam turbine outlet. The result from the simulation indicates that for the baseline case the cogeneration efficiency is 56.96% and the Primary Energy Saving (PES) is 16.72%. For the parametric study, by increasing the heat rate of fuel by 3%, the cogeneration efficiency and Primary Energy Saving increase to 57.50% and 17.53%, respectively. On the other hand, by increasing the high pressure at the steam turbine outlet by 7.5 bar, the cogeneration efficiency is nearly a constant and the Primary Energy Saving decreases to 16.62%.



Keywords: Parametric study; Cogeneration efficiency; Primary Energy Saving



1. บทนำ

โรงไฟฟ้าเป็นสิ่งที่แสดงถึงความมั่นคงทางพลังงานในแต่ละประเทศ ในแต่ละปีประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอัตราการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกินกว่าที่สามารถผลิตได้จึงมีการนำไฟฟ้าบางส่วนเข้ามาจากต่างประเทศเพื่อรองรับความต้องการของประชาชนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจุบันโรงไฟฟ้าภายในประเทศเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมหรือโคเจนเนอเรชั่นโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง [1] ดังนั้นการออกแบบที่เหมาะสมและการปรับพารามิเตอร์บางตัวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศ

โคเจนเนอเรชั่นเป็นโรงไฟฟ้าผลิตพลังงานไฟฟ้าควบคู่ไปกับผลิตพลังงานความร้อน ซึ่งมีประสิทธิภาพของระบบสูงถึงร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีประสิทธิภาพร้อยละ 40 [2] ระบบส่วนใหญ่มีการทำงานโดยใช้ความร้อนจากก๊าซไอเสียจากกังหันก๊าซผ่านเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำยังยวดไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำให้ได้กำลัง ไฟฟ้า และไอน้ำบางส่วนไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอื่น โดยการออกแบบและการปรับพารามิเตอร์ภายในระบบโคเจนเนอเรชั่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในงานวิจัยส่วนใหญ่พบ

ว่าได้ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ส่วนแรก วัฏจักรเบรย์ค้นพบว่า การเพิ่มเชื้อเพลิงในวัฏจักรเบรย์ต้นส่งผลให้ประสิทธิภาพโคเจนเนอเรชั่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิทางเข้ากังหันก๊าซ อัตราส่วนการอัดกำลังสุทธิประสิทธิภาพข้อหนึ่งและสองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคอมเพรสเซอร์และกังหันก๊าซภายในวัฏจักรเบรย์ต้นเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพข้อหนึ่งและสองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกังหันไอน้ำภายในวัฏจักรแรงดันเพิ่มขึ้น [4,5] ส่วนที่สองเครื่องกำเนิดไอน้ำในแง่การออกแบบควรเป็นการไหลแบบแนวขวาง การวางท่อแบบอินไลน์ ท่อกลมมีครีบเพื่อลดค่าเอ็กเซอร์จีสูญเสียและการออกแบบควรออกแบบจากปริมาตรทั้งหมดเพื่อคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้เหมาะสม [6] และในแง่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำได้โดยเพิ่มจำนวนความดัน เพิ่มความดันในท่อความดันสูงและความดันต่ำ และเพิ่มอุณหภูมิจุดพินช์ (Pinch point) หรือเพิ่มผลต่างของอุณหภูมิก๊าซร้อนออกจากอีเวปอเรเตอร์กับอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวอีเวปอเรเตอร์ภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำ เนื่องจากสามารถลดค่าเอ็กเซอร์จีสูญเสียภายในระบบ [7,8] และส่วนสุดท้ายวัฏจักรแรงดัน

พิจารณาประสิทธิภาพกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบโคเจนเนอเรชั่น แตรังไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นจะเน้นการทำให้ประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าสูงขึ้น เพื่อเพิ่มค่าความสามารถในการใช้พลังงานปฏุนภูมิ ในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงาน ความร้อนร่วมกันเป็นหลัก เนื่องจากค่าดังกล่าวมีผลอย่างน้อยสำคัญต่ออัตราค่าไฟฟ้าที่ซื้อขายกันระหว่างโรงไฟฟ้าเอกชนกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต [3] ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการใช้พลังงานปฏุนภูมิ ในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนร่วมกัน

ตามเหตุผลดังกล่าวที่กล่าวมางานวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของระบบโคเจนเนอเรชั่นโดยใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน



โดยการพัฒนาในส่วนแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ และการถ่ายเทความร้อนจะใช้โปรแกรมเมทแลบในการจำลองโดยมีการเปรียบเทียบกับค่าออกแบบและมีการวิเคราะห์การใช้พลังงานระบบโคเจนเนอเรชั่นของโรงไฟฟ้าขนาดเล็กภายในประเทศ และในส่วนของศึกษาพารามิเตอร์จะศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนความดัน อุณหภูมิทางเข้าคอมเพรสเซอร์ อัตราความร้อนเชื้อเพลิง และการปรับความดันวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูงเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อการใช้พลังงานระบบโคเจนเนอเรชั่นของโรงไฟฟ้าขนาดเล็กภายในประเทศ

2. ทฤษฎีและการออกแบบจำลอง

2.1. ทฤษฎีและการออกแบบจำลองโคเจนเนอเรชั่น

โรงไฟฟ้าระบบโคเจนเนอเรชั่นขนาดเล็กจากภาพที่ 1 ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ กังหันก๊าซ (Gas Turbine) จำนวนสองชุด เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Heat Recovery Steam Generator : HRSG) จำนวนสองชุด และกังหันไอน้ำ (Steam turbine) จำนวนหนึ่งชุด

โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ เครื่องกำเนิดไอน้ำ วัฏจักรแรงดัน (Rankine Cycle) และวัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle) ซึ่งงานวิจัยนี้พัฒนาเพิ่มเติมจากงานวิจัย [11] มีการเพิ่ม 1 วาล์วทางออกความดันสูง 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1 ดีแอร์เรเตอร์ และ 1 อุปกรณ์ผสม เพื่อให้ระบบมีความเสมือนจริงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีการตั้งสมมติในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ คือ 1) สภาวะคงที่ (Steady state) 2) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ และ 3) ละทิ้งความดันตกที่เกิดจากการไหลภายในท่อ โดยการออกแบบใหม่ในแต่ละส่วนเมื่อเทียบกับงานวิจัย [11] ที่กล่าวไปข้างต้นมีดังนี้ ส่วนแรกวัฏจักรเบรย์ตันทั้ง 2 ชุดมีการออกแบบใหม่ให้เหมาะสมใน

ส่วนอัตราส่วนความดันประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของคอมเพรสเซอร์และกังหันก๊าซ ส่วนที่สองเครื่องกำเนิดไอน้ำมีการออกแบบใหม่ให้เหมาะสมในส่วนจำนวนท่อ ความยาวท่อในแต่ละอุปกรณ์ภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ส่วนสุดท้ายวัฏจักรแรงดันการออกแบบใหม่ให้เหมาะสมในส่วนอัตราส่วนประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของกังหันไอน้ำ และมีการเพิ่มอุปกรณ์ภายในวัฏจักรได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 เครื่อง บั๊มบริเวณทางออกคอนเดนเซอร์ ดีแอร์เรเตอร์ วาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูง และห้องผสมเพื่อให้ระบบใกล้เคียงกับความเป็นจริงในทางปฏิบัติเพิ่มขึ้น ซึ่งการวัดประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่น [12] สามารถวัดได้จากประสิทธิภาพโคเจนเนอเรชั่น หรือ η_o

$$\eta_o = \frac{W_e + Q_{TH}}{Q_{Fuel}} \quad (1)$$

เมื่อ W_e คือ งานสุทธิจากระบบ, Q_{TH} คือ ความร้อนสุทธิที่ได้จากระบบ, Q_{Fuel} คือ พลังงานเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ

คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานได้กำหนดวิธีการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กระบบโคเจนเนอเรชั่นได้กำหนดดัชนีชี้วัดความสามารถในการใช้พลังงานปฐมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน หรือ PES [3] ดังนี้

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{COGEN H_\eta}{Ref H_\eta} + \frac{COGEN E_\eta}{Ref E_\eta}} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ $COGEN H_\eta$ คือปริมาณพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าโดยตรงหารด้วยปริมาณพลังงานปฐมภูมิที่ป้อนให้กับโรงไฟฟ้าตั้งแต่วันที่รายงาน

$$COGEN H_\eta = \frac{q_{COGEN}}{f_{COGEN}} \quad (3)$$

q_{COGEN} คือ ปริมาณความร้อนที่โรงไฟฟ้าผลิตได้
 f_{COGEN} คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนให้โรงไฟฟ้า
 $COGEN E_\eta$ คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้
หารด้วยปริมาณพลังงานปฐมภูมิที่ป้อนให้กับโรงไฟฟ้า
ตั้งแต่เวลาที่ทำงาน

$$COGEN E_\eta = \frac{p_{COGEN}}{f_{COGEN}} \quad (4)$$

p_{COGEN} คือ ปริมาณไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าผลิตได้
 $Ref H_\eta$ คือ ค่าอ้างอิงจากระบบโดยที่ของก๊าซ
ธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 85

$Ref E_\eta$ คือ ค่าอ้างอิงจากระบบโดยที่ของก๊าซ
ธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 45.28

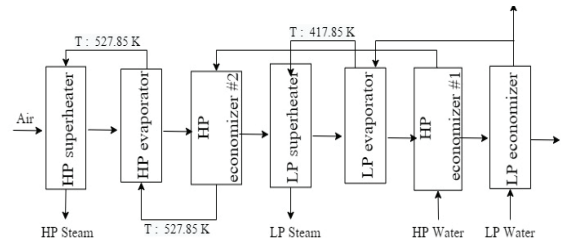
2.2. ทฤษฎีและการออกแบบจำลองวัฏจักรเบรย์ตัน

การออกแบบและการคำนวณวัฏจักรเบรย์ตัน
2 ชุดจากภาพที่ 1 ใช้ทฤษฎีวัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิดโดย
กำหนดปริมาตรควบคุมในแต่ละอุปกรณ์ โดยค่าที่ใช้ใน
การคำนวณแสดงในภาพที่ 1 และมีการตั้งสมมติฐาน
ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองทาง
เทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนวัฏจักร
เบรย์ตันคือ 1) การคำนวณภายในวัฏจักรเบรย์ตัน
เป็นวัฏจักรมาตรฐานอากาศ (Air standard cycle)
2) ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ใช้มีค่าที่อุณหภูมิ
600 เคลวิน และ 3) ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (Low
Heating Value) ของก๊าซธรรมชาติที่ใช้มีค่า 34487
กิโลจูลต่อกิโลกรัม

2.3. ทฤษฎีและการออกแบบจำลองเครื่องกำเนิดไอน้ำ

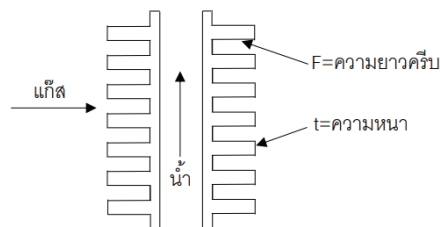
การออกแบบและการคำนวณเครื่องกำเนิด
น้ำใช้วิธี Effectiveness-NTU และ Force Convection
Boiling ในทางทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนร่วมกับ
ทฤษฎีระบบเปิดทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้ข้อมูล
แบบจำลองพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไอน้ำได้แก่

ขนาดของปล่องเครื่องกำเนิดไอน้ำ ทิศทางไหลและสเตจ
ของเครื่องกำเนิดไอน้ำ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
ภายในและนอกท่อของเครื่องกำเนิดไอน้ำ และลักษณะ
ท่อกลมมีครีบในท่อความดันสูงและความดันต่ำ [11]
นำมาใช้ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำให้เหมาะสม
ในระบบโคเจนเนอเรชั่น โดยทิศทางการไหลภายใน
เครื่องกำเนิดไอน้ำแสดงในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 เป็น
ลักษณะท่อที่ใช้ในการออกแบบงานวิจัยนี้ เนื่องจาก
ความดันที่ใช้ออกแบบเครื่องกำเนิดเครื่องมีค่าใกล้เคียง
กัน และลักษณะท่อที่ใช้ให้ประสิทธิภาพสูง [6]



ภาพที่ 2 แผนภาพการไหลภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำ

นอกจากนี้มีการกำหนดค่าคงที่ และมีการตั้ง
สมมติฐานในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เพิ่มเติมสำหรับแบบ
จำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ และการถ่ายเทความร้อน
เครื่องกำเนิดไอน้ำคือการไหลภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำ
เป็นการไหลประเภทตามขวางแบบไม่ผสมกันภายนอกท่อ



ภาพที่ 3 แผนภาพท่อภายในเครื่องกำเนิดไอน้ำ [11]

2.4. ทฤษฎีและการออกแบบจำลองวัฏจักรแรงคิน

การออกแบบและการคำนวณวัฏจักรแรงคิน
เป็นการนำทฤษฎีระบบเปิดทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้
ในการคำนวณจึงจำเป็นต้องกำหนดปริมาตรควบคุม

ในแต่ละอุปกรณ์ โดยค่าที่ใช้ในการคำนวณแสดงในภาพที่ 1 และการออกแบบจำลองต้องสอดคล้องกับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยมีการตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนวัฏจักรแรงคินคือ กำหนดให้ปริมาตรควบคุมให้ดีแอร์เรเตอร์และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 เป็นอุปกรณ์เดียวกัน และกำหนดให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊มที่ใช้ในระบบมีค่าเท่ากับ 1

3. วิธีการหาคำตอบของแบบจำลอง

3.1 การหาคำตอบของกรณีฐาน

หลักการออกแบบจำลองที่เหมาะสมของระบบโคเจนเนอเรชั่นคือออกแบบเพื่อกำหนดค่าฐานของแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายกับแบบจำลองที่กำหนดโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการแก้ปัญหา จึงมีการกำหนดเงื่อนไขค่าเป้าหมายในการออกแบบดังนี้ 1) กำหนดความจุความร้อนของสารที่ใช้ภายในระบบจาก [13,14] 2) อัตราความร้อนของไอน้ำตั้งแต่ 10 ถึง 15 เมกะวัตต์ .3) กำลังสุทธิของกังหันไอน้ำตั้งแต่ 20 ถึง 25 เมกะวัตต์ และ 4) กำลังสุทธิของกังหันก๊าซแต่ละตัวตั้งแต่ 40 ถึง 45 เมกะวัตต์

การหาคำตอบของกรณีฐานวัฏจักรเบรย์ตัน

กำหนดเงื่อนไขการออกแบบคืออัตราส่วนความดันอยู่ตั้งแต่ 10 ถึง 12 และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกคอมเพรสเซอร์ และกังหันก๊าซอยู่ตั้งแต่ 0.80 ถึง 0.95 เพื่อกำหนดแบบใหม่กำลังงานสุทธิที่ได้จากกังหันก๊าซใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย

การหาคำตอบของกรณีฐานเครื่องกำเนิดไอน้ำ

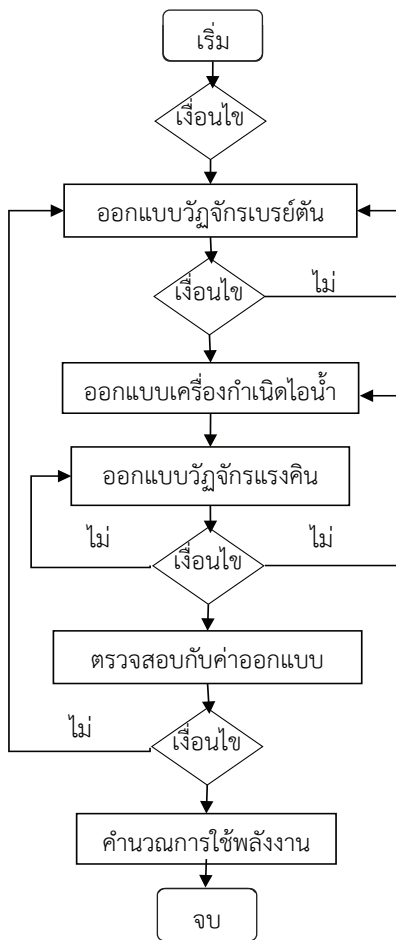
กำหนดเงื่อนไขการออกแบบคืออุณหภูมิอากาศทางออกกังหันก๊าซจากการออกแบบส่วนแรกมาออกแบบความยาวท่อของแต่ละอุปกรณ์ภายใน

เครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำเหมาะสม โดยกำหนดอุณหภูมิทางออกเครื่องกำเนิดไอน้ำความดันสูงอุณหภูมิ 712.15 เคลวิน และความดันต่ำอุณหภูมิ 450.15 เคลวิน

การหาคำตอบของกรณีฐานวัฏจักรแรงคิน

กำหนดเงื่อนไขการออกแบบคือ 1) นำอุณหภูมิทางเข้าดีแอร์เรเตอร์ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ และอุณหภูมิทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำความดันสูงที่ได้จากการออกแบบส่วนเครื่องกำเนิดไอน้ำมาออกแบบ 2) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของกังหันไอน้ำมีค่าตั้งแต่ 0.80 ถึง 0.85 และ 3) อุณหภูมิที่ออกจากคอนเดนเซอร์ควบแน่นจนหมดพอดีที่ 314.15 เคลวิน เพื่อกำหนดหาความดันของวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูงที่ทำให้อุณหภูมิไอน้ำที่ส่งออกไปนอกโรงไฟฟ้าที่ต้องเป็นไอร้อยละ 100 และหาอุณหภูมิทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำให้ใกล้เคียงกับการหาอุณหภูมิในส่วนที่สอง

เมื่อออกแบบทั้งสามส่วนได้ตรงตามเงื่อนไขทั้งสามส่วนมารวมกันเป็นระบบโคเจนเนอเรชั่น ซึ่งแบบจำลองที่ได้ต้องเปรียบเทียบกับค่าออกแบบของโรงไฟฟ้าขนาดเล็กทั่วไปมีค่าคาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 3 หากไม่ใกล้เคียงกับค่าออกแบบต้องพิจารณาการออกแบบใหม่แต่ละส่วน เมื่อมีค่าใกล้เคียงจึงคำนวณประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่น และค่าความสามารถในการใช้พลังงานปฐมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนความสามารถในการใช้พลังงานปฐมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยแสดงแผนภาพการหาคำตอบกรณีฐานแสดงในภาพที่ 4

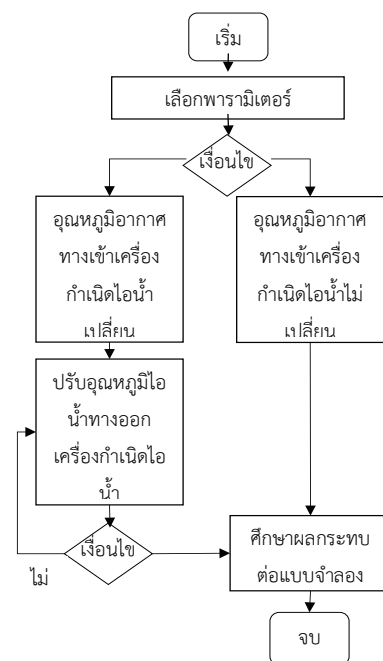


ภาพที่ 4 แผนภาพการหาคำตอบ

3.2 การหาคำตอบของการปรับพารามิเตอร์

เมื่อได้กรณีฐานนำแบบจำลองที่ได้นำมา การศึกษาการปรับพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการใช้พลังงานของระบบโคเจนเนอเรชั่น โดยที่เลือกการปรับพารามิเตอร์คืออัตราส่วนความดันตั้งแต่ 8.5468 ถึง 11.5468 อุณหภูมิทางเข้าคอมเพรสเซอร์ตั้งแต่ 297.45 ถึง 315.45 เคลวิน อัตราความร้อนเชื้อเพลิงตั้งแต่ ร้อยละ 97 ถึง 103 และการปรับความดันวาล์วทางออก กังหันไอน้ำความดันสูงตั้งแต่ 12 ถึง 27 บาร์ และพารามิเตอร์อื่นมีค่าคงที่เพื่อศึกษาผลกระทบต่อบรรยากาศจำลองเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานของระบบ ซึ่งการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าว เมื่อปรับพารามิเตอร์แล้ว

ส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำ ต้องมีการปรับอุณหภูมิไอน้ำทางออกเครื่องกำเนิดไอน้ำ ที่ความดันสูงและความดันต่ำ โดยเงื่อนไขการปรับอุณหภูมิอากาศทางเข้าอีโคโนไมเซอร์ความดันสูงมากกว่าอุณหภูมิไอน้ำทางออกอีโคโนไมเซอร์ความดันสูง และอุณหภูมิอากาศทางเข้าอีโคโนไมเซอร์ความดันต่ำมากกว่าอุณหภูมิไอน้ำทางออกอีโคโนไมเซอร์ความดันต่ำ โดยแสดงการศึกษาพารามิเตอร์ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนภาพการศึกษาการปรับพารามิเตอร์

4. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผล

ผลจากการออกแบบและจำลองระบบโคเจนเนอเรชั่น พบว่าค่าอยู่ตั้งแต่เงื่อนไขของค่าเป้าหมายในการออกแบบที่กำหนด และผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้ทำการออกแบบจากโรงไฟฟ้าขนาดเล็กและค่าแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนความดันมีค่าเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.17 แสดงในตารางที่ 1

ในส่วนแรกวัฏจักรเบรย์ตันออกแบบให้มีอัตราส่วนความดันมีค่า 10.0468 และประสิทธิภาพ

ไอเซนโทรปิกของคอมเพรสเซอร์และกังหันก๊าซมีค่า 0.93

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและค่าออกแบบของโรงไฟฟ้าขนาดเล็กทั่วไป

รายการ	ค่าออกแบบ	ค่าแบบจำลอง
อัตราความร้อนของไอน้ำ (MW)	11.26	11.21
กำลังสุทธิของกังหันไอน้ำ (MW)	23.86	23.78
กำลังสุทธิของกังหันก๊าซ 1 (MW)	40.36	40.35
กำลังสุทธิของกังหันก๊าซ 2 (MW)	40.36	40.35
กำลังสุทธิของระบบ (MW)	104.58	104.49

ส่วนที่สองเครื่องกำเนิดไอน้ำออกแบบให้ความยาวท่อในแต่ละส่วนมีค่าดังนี้ ความยาวของท่อซูเปอร์ฮีทอิแวปโปเรเตอร์และอีโคโนไมเซอร์ 2 ที่ความดันสูงมีค่า 165 เมตร ความยาวของท่อซูเปอร์ฮีทและอีแวปโปเรเตอร์ที่ความดันต่ำมีค่า 100 เมตร ความยาวของท่ออีโคโนไมเซอร์ 1 ที่ความดันสูงมีค่า 43.37 เมตร และความยาวของท่ออีโคโนไมเซอร์ที่ความดันต่ำมีค่า 39.72 เมตร และส่วนสุดท้ายวัฏจักรแรงคินพบว่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกกังหันก๊าซมีค่า 0.85 และความดันของวาล์วทางออกเครื่องกำเนิดไอน้ำความดันสูง 19.5 บาร์ ซึ่งการออกแบบดังกล่าวทำให้อุณหภูมิทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำทั้งสองวัฏจักรมีค่าใกล้เคียงกันแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอุณหภูมิทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำ

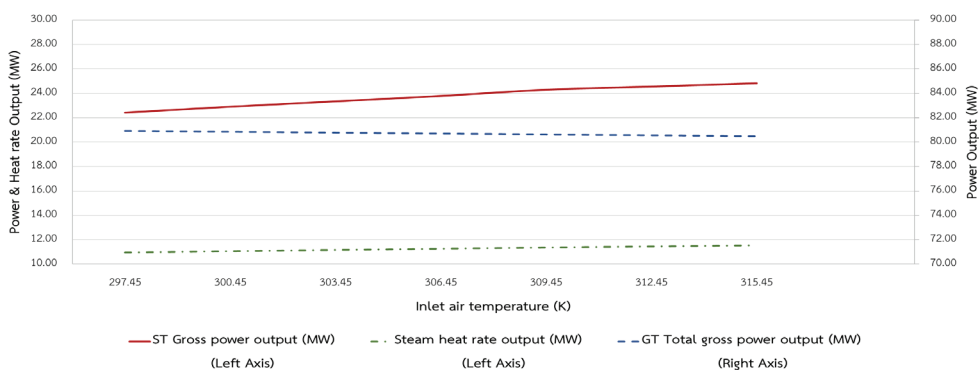
อุณหภูมิทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำ	คำนวณด้วยเครื่องกำเนิดไอน้ำ	คำนวณด้วยวัฏจักรแรงคิน
ความดันสูง (K)	336.6	336.6
ความดันต่ำ (K)	336.3	336.3

การใช้พลังงานของแบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชั่นมีค่าดังนี้ กำลังงานสุทธิที่ได้จากกังหันก๊าซ 40.35 เมกะวัตต์ กำลังงานสุทธิกังหันไอน้ำ 23.78 เมกะวัตต์ กำลังงานสุทธิระบบโคเจนเนอเรชั่น 104.49 เมกะวัตต์ กำลังงานความร้อนของไอน้ำ 11.21 เมกะวัตต์ ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่นร้อยละ 56.95 และค่าความสามารถในการใช้พลังงานปฏุมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนความสามารถในการใช้พลังงานปฏุมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนร้อยละ 16.72

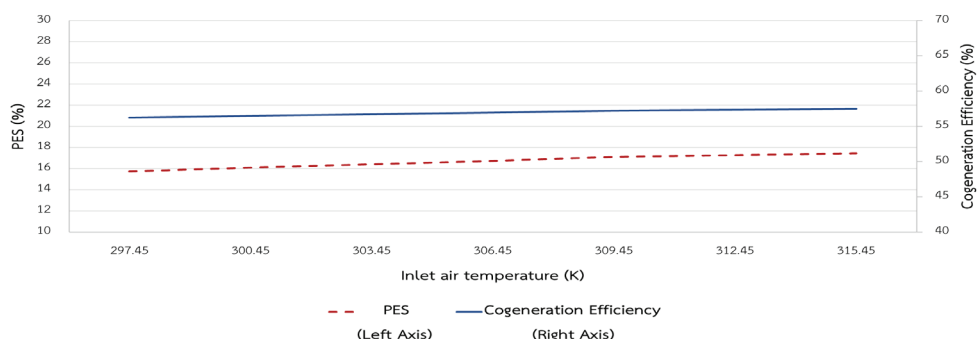
ในการศึกษาการปรับพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการใช้พลังงานของระบบโคเจนเนอเรชั่น พารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับในความเป็นจริงได้ง่าย และมีการใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการหาค่ารากด้วยวิธีซีแคนท์ (Secant method) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ค่าคำตอบลู่เข้าได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ วิธีดังกล่าวใช้ในการปรับอุณหภูมิอากาศทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ความดันสูงและความดันต่ำเพื่อให้ผลการจำลองจะได้คำตอบที่มากลุ่มเข้า ซึ่งการใช้วิธีดังกล่าวต้องกำหนดจุดเริ่มต้นทั้งหมด 4 จุด คือ 2 จุดสำหรับความดันสูงและ 2 จุดที่ความดันต่ำ โดยจุดที่กำหนดต้องเป็นค่าที่ทำให้ค่ารากอยู่ระหว่าง 2 จุดที่กำหนดเพื่อให้ค่าคำตอบมีการลู่เข้าซึ่งการกำหนดจุด 2 จุดต้องปรับใหม่ทุกครั้งเมื่อมีการปรับพารามิเตอร์ใหม่แต่ละตัวเพราะหากใช้ค่าเดียวในการกำหนดจุดพิจารณาทำให้ค่าการจำลองของระบบมีการลู่ออก ผลลัพธ์ที่ได้เป็นการหาค่าตอบโดยใช้วิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าตอบซึ่งผลลัพธ์ที่ได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 1 ดังนี้ จากภาพที่ 6 และ 7 การเพิ่มอุณหภูมิอากาศทางเข้าคอมเพรสเซอร์จาก 306.45 เคลวิน (กรณีฐาน) เป็น 315.45 เคลวิน ทำให้อุณหภูมิ

ทางออกคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังงานจากคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิทางเข้าและทางออกกังหันก๊าซเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังงานจากกังหันก๊าซเพิ่มขึ้น พบว่ากำลังงานลดลงมากกว่าส่วนที่เพิ่มทำให้กำลังงานสุทธิจากระบบกังหันก๊าซมีค่าลดลงเป็น 80.49 เมกะวัตต์ ขณะเดียวกันการเพิ่มอุณหภูมิอากาศทางเข้าคอมเพรสเซอร์จาก 306.45 เคลวิน (กรณีฐาน) เป็น 315.45 เคลวิน ทำให้อุณหภูมิอากาศทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำลดลงส่งผลให้เครื่องกำเนิดไอน้ำผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิไอน้ำทางเข้ากังหันไอน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังงานและอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจากกังหันไอน้ำมี

ค่าเพิ่มขึ้นเป็น 24.86 และ 11.56 เมกะวัตต์ตามลำดับ จากกำลังงานและอัตราความร้อนเพิ่มที่เกิดขึ้นในระบบพบว่ากำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปฐมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.53 และ 17.48 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าในช่วงการศึกษาอุณหภูมิอากาศทางเข้าคอมเพรสเซอร์ตั้งแต่ 297.45 ถึง 315.45 เคลวิน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสุทธิจากกังหันก๊าซ กำลังงานสุทธิจากกังหันไอน้ำ และอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น



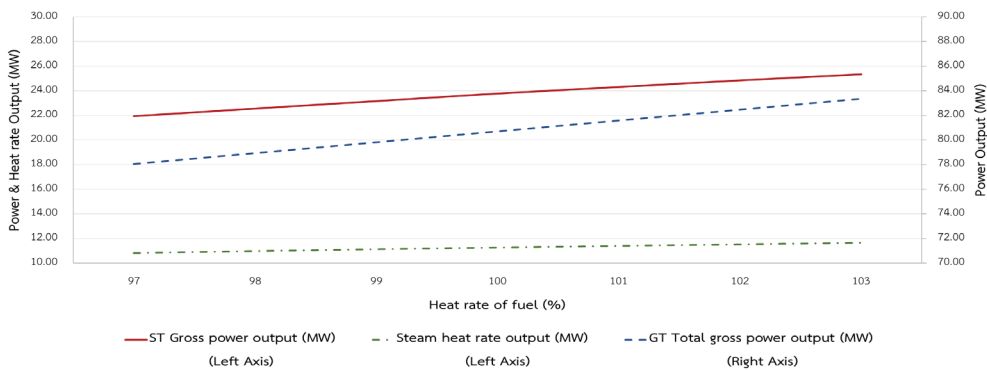
ภาพที่ 6 ผลของกำลังสุทธิกังหันก๊าซและกังหันไอน้ำและอัตราความร้อนของไอน้ำจากการปรับอุณหภูมิอากาศทางเข้าคอมเพรสเซอร์



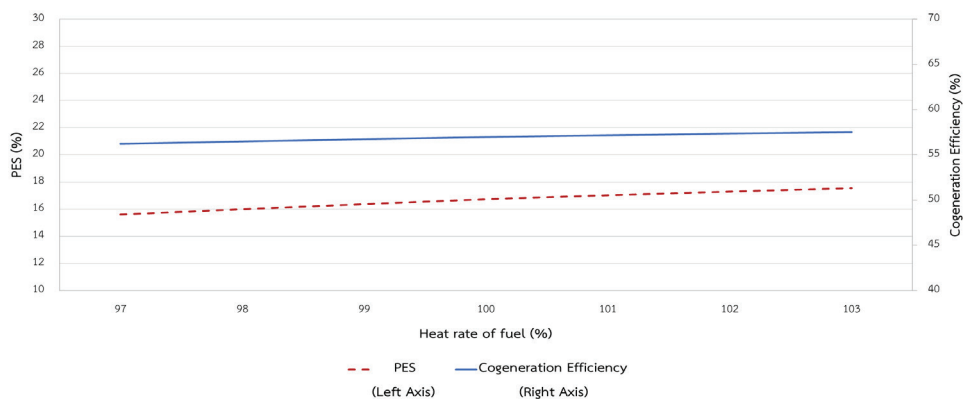
ภาพที่ 7 ผลของประสิทธิภาพโคเจนเนอเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปฐมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจากการปรับอุณหภูมิอากาศทางเข้าคอมเพรสเซอร์

จากภาพที่ 8 และ 9 การเพิ่มอัตราความร้อนเชื้อเพลิงจากร้อยละ 100 (กรณีฐาน) เป็นร้อยละ 103 ทำให้อุณหภูมิทางเข้าและทางออกกังหันก๊าซเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังงานจากกังหันก๊าซเพิ่มขึ้น และทำให้กำลังงานจากคอมเพรสเซอร์คงที่ พบว่ากำลังงานสุทธิจากระบบกังหันก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 83.36 เมกะวัตต์ ขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราความร้อนเชื้อเพลิงจากร้อยละ 100 (กรณีฐาน) เป็นร้อยละ 103 ทำให้อุณหภูมิอากาศทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้เครื่องกำเนิดไอน้ำผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิไอน้ำทางเข้ากังหันไอน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังงานและอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจากกังหันไอน้ำมี

ค่าเพิ่มขึ้นเป็น 25.41 และ 11.66 เมกะวัตต์ จากกำลังงานและอัตราความร้อนเพิ่มที่เกิดขึ้นในระบบพบว่า กำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปฏุมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.53 และ 17.57 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าในช่วงการศึกษ้อัตราความร้อนเชื้อเพลิงร้อยละตั้งแต่ 97 ถึง 103 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสุทธิจากกังหันก๊าซ กำลังงานสุทธิจากกังหันไอน้ำ และอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น



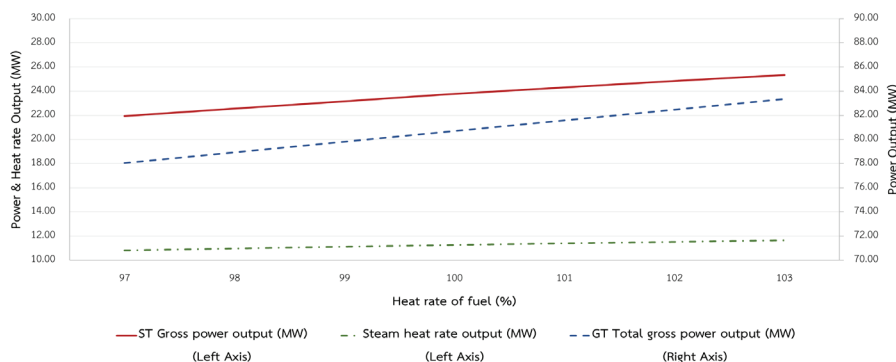
ภาพที่ 8 ผลของกำลังสุทธิกังหันก๊าซและกังหันไอน้ำและอัตราความร้อนของไอน้ำจากการปรับอัตราความร้อนเชื้อเพลิง



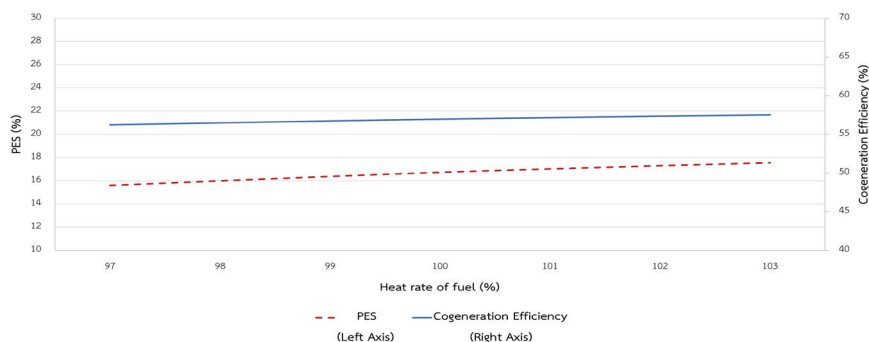
ภาพที่ 9 ผลของประสิทธิภาพโคเจนเนเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปฏุมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจากการปรับอัตราความร้อนเชื้อเพลิง

จากภาพที่ 10 และ 11 การเพิ่มอัตราส่วนความดันจาก 10.0468 (กรณีฐาน) เป็น 11.5468 ทำให้อุณหภูมิทางออกคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังงานจากคอมเพรสเซอร์เพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิทางเข้าเพิ่มขึ้นและทางออกกังหันก๊าซลดลงส่งผลให้กำลังงานจากกังหันก๊าซเพิ่มขึ้น พบว่ากำลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนที่ลดทำให้กำลังงานสุทธิจากระบบกังหันก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 83.94 เมกะวัตต์ ขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราส่วนความดันจาก 10.0468 (กรณีฐาน) เป็น 11.5468 ทำให้อุณหภูมิอากาศทางเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำลดลงส่งผลให้เครื่องกำเนิดไอน้ำผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิลดลง และทำให้อุณหภูมิไอน้ำทางเข้ากังหันไอน้ำลดลงส่งผลให้กำลังงานและอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจาก

กังหันไอน้ำมีค่าลดลงเป็น 22.03 และ 10.83 เมกะวัตต์ตามลำดับ จากกำลังงานและอัตราความร้อนเพิ่มที่เกิดขึ้นในระบบพบว่ากำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปฏุนภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.47 และ 17.65 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าในช่วงการศึกษ้อัตราส่วนความดันตั้งแต่ 8.5468 ถึง 11.5468 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสุทธิจากกังหันก๊าซ กำลังงานสุทธิจากกังหันไอน้ำ และอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น



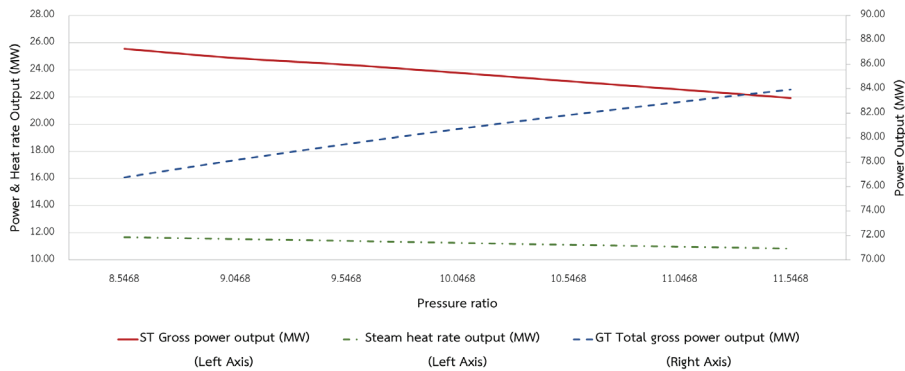
ภาพที่ 10 ผลของกำลังสุทธิกังหันก๊าซและกังหันไอน้ำและอัตราความร้อนของไอน้ำจากการปรับอัตราส่วนความดัน



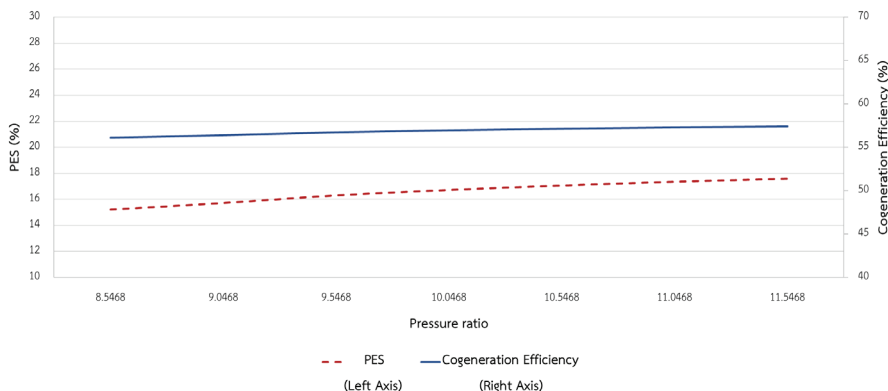
ภาพที่ 11 ผลของประสิทธิภาพโคเจนเนอเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปฏุนภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจากการปรับอัตราส่วนความดัน

จากภาพที่ 12 และ 13 การเพิ่มความดันวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูงจาก 19.5 บาร์ (กรณีฐาน) เป็น 27 บาร์ ส่งผลให้กำลังงานจากกังหันไอน้ำมีค่าลดลงเป็น 23.50 และอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจากกังหันไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11.54 เมกะวัตต์ จากกำลังงานและอัตราความร้อนเพิ่มที่เกิดขึ้นในระบบพบว่ากำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนเรชั่นมีค่าลดลงเกือบคงที่เป็นร้อยละ 56.96 และ ความสามารถในการใช้พลังงานปฏุมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้า

และพลังงานความร้อนมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 16.62 ตามลำดับ ในทางกลับกันอัตราส่วนค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 7020 กิโลจูลต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวว่าประสิทธิภาพระบบโคเจนเนเรชั่นลดลงอัตราส่วนค่าความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าในช่วงการศึกษาประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกกังหันไอน้ำตั้งแต่ 0.82 ถึง 0.88 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสุทธิจากกังหันก๊าซ กำลังงานสุทธิจากกังหันไอน้ำ และอัตราความร้อนไอน้ำส่งออกมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 12 ผลของกำลังสุทธิกังหันก๊าซและกังหันไอน้ำและอัตราความร้อนของไอน้ำจากการปรับความดันวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูง



ภาพที่ 13 ผลของประสิทธิภาพโคเจนเนเรชั่นและความสามารถในการใช้พลังงานปฏุมภูมิในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจากการปรับความดันวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูง

5. สรุปผลงานวิจัย

การพัฒนาและศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของระบบโคเจนเนอเรชัน โดยใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน ผลจากแบบจำลองกรณีฐานพบว่าค่าคาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.17 เมื่อเทียบกับค่าออกแบบจากโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชัน และความสามารถในการใช้พลังงานป้อนรวมในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าร้อยละ 56.95 และ 16.72 ตามลำดับ และผลการปรับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานโดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลขในการจำลองพบว่าผลจากแบบจำลองมีค่าความคาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1 และมีผลต่อการใช้พลังงานในแต่ละพารามิเตอร์ ดังนี้

1. การเพิ่มอุณหภูมิทางเข้าคอมเพรสเซอร์ จาก 306.45 เคลวิน (กรณีฐาน) เป็น 315.45 เคลวิน พบว่ากำลังงานสุทธิกักเก็บก๊าซลดลง กำลังงานสุทธิกักเก็บไอน้ำเพิ่มขึ้น และ อัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจากกังหันไอน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชัน และความสามารถในการใช้พลังงานป้อนรวมในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.53 และ 17.48 ตามลำดับ

2. การเพิ่มอัตราความร้อนเชื้อเพลิงจากร้อยละ 100 (กรณีฐาน) เป็นร้อยละ 103 พบว่ากำลังงานสุทธิกักเก็บก๊าซเพิ่มขึ้น กำลังงานสุทธิกักเก็บไอน้ำเพิ่มขึ้น และ อัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจากกังหันไอน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิในระบบ เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชัน และความสามารถในการใช้พลังงานป้อนรวมในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.53 และ 17.57 ตามลำดับ

3. การเพิ่มอัตราส่วนความดันจาก 10.0468 (กรณีฐาน) เป็น 11.5468 พบว่ากำลังงานสุทธิกักเก็บก๊าซเพิ่มขึ้น กำลังงานสุทธิกักเก็บไอน้ำลดลง และ อัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจากกังหันไอน้ำลดลง ส่งผลให้กำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชัน และความสามารถในการใช้พลังงานป้อนรวมในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.47 และ 17.65 ตามลำดับ

4. การเพิ่มความดันวาล์วทางออกกังหันไอน้ำความดันสูงจาก 19.5 บาร์ (กรณีฐาน) เป็น 27 บาร์ พบว่ากำลังงานสุทธิกักเก็บก๊าซคงที่ กำลังงานสุทธิกักเก็บไอน้ำลดลง และ อัตราความร้อนไอน้ำส่งออกจากกังหันไอน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังงานและอัตราความร้อนสุทธิในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชันมีค่าลดลงเกือบคงที่ 56.96 และความสามารถในการใช้พลังงานป้อนรวมในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 16.62

6. เอกสารอ้างอิง

[1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2564). กราฟและสถิติ. เข้าถึงได้จาก https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=76&Itemid=116 01 กันยายน 2564.

[2] บริษัทปตท.จำกัด (มหาชน) (2549). ระบบโคเจนเนอเรชัน. วารสารธุรกิจสีเขียว, 4, ตุลาคม-ธันวาคม.

[3] คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (2560). คู่มือการตรวจวัดประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วมและการคำนวณค่า PES สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก(ระบบ Cogeneration).

- [4] Sanjay (2011). Investigation of effect of variation of cycle parameters on thermodynamic performance of gas-steam combined cycle, *Energy*, 36(1) : 157-167.
- [5] Ahmadi P, and Dincer I. (2011). Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit, *Energy Conversion and Management*, 52(5) : 2296-2308.
- [6] Mehrgoo M, and Amidpour M (2017). Constructal design and optimization of a dual pressure heat recovery steam generator, *Energy*, 124 : 87-99.
- [7] Kaviri A G, Jaafar M N M, Lazim T M, and Barzegaravval H (2013). Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis, *Energy Conversion and Management*, 67 : 27-33.
- [8] Woudstra N, Woudstra T, Pirone A, and Stelt T v d (2010). Thermodynamic evaluation of combined cycle plants, *Energy Conversion and Management*, 51(5) : 1099-1110.
- [9] Srinivas T, Gupta A V S S K S, and Reddy B V (2008). Sensitivity analysis of STIG based combined cycle with dual pressure HRSG, *International Journal of Thermal Sciences*, 47(9) : 1226-1234.
- [10] Ganjehkaviri A, Mohd Jaafar M N, and Hosseini S E (2015). Optimization and the effect of steam turbine outlet quality on the output power of a combined cycle power plant, *Energy Conversion and Management*, 89 : 231-243.
- [11] Buntarikpornpant P, and Tangthieng C (2020). A Parametric Investigation of the Steam Injection Gas Turbine System on a Cogeneration Plant, *Engineering Journal*, 24(1) : 11-21.
- [12] Dincer I, and Rosen M A (2021). Chapter 13 Exergy analyses of cogeneration and district energy systems. In I. Dincer & M. A. Rosen (Eds.), *Exergy* (Third Edition) : 355-381.
- [13] Borgnakke C, and Sonntag R E (2020). *Fundamentals of thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- [14] Bergman T L, Lavine A S, Incropera F P, and DeWitt D P (2011). *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons.
- [15] Urošević D, Gvozdenac D, and Grković V. (2013). Calculation of the power loss coefficient of steam turbine as a part of the cogeneration plant. *Energy*, 59 : 642-651.