



การศึกษาอิงพารามิเตอร์ของระบบโคเจนเนอเรชันโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ Parametric Study of the Cogeneration System by Using a Mathematical Model

พงศ์ธร บุญชริกพรพันธุ์* และ รศ.ดร. จิตติน แดงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนน พญาไท แขวง วังใหม่ เขต ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*bookku_soshicclub@hotmail.com, 083-6393252

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอกรณีศึกษาของระบบโคเจนเนอเรชัน โดยการออกแบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชันเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 3 ระบบคือ วัฏจักรเบรย์ตันสำหรับโรงไฟฟ้ากังหันแก๊สที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เครื่องผลิตไอน้ำจากไอเสีย และวัฏจักรแรงคินสำหรับโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ จากนั้นได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลที่ได้จากผลที่ได้จากแบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชันดังกล่าว ทั้งนี้ในแบบจำลองประกอบด้วยแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของวัฏจักรเบรย์ตันและวัฏจักรแรงคิน และแบบจำลองด้านการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องผลิตไอน้ำจากไอเสีย

ผลที่ได้จากแบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชันเชิงคณิตศาสตร์พบว่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวัฏจักรเบรย์ตันมีค่า 34.75 MW และประสิทธิภาพเชิงความร้อน 36.851% ที่อัตราส่วนความดัน 12 และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเชื้อเพลิงเท่ากับ 94366.724 kW ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวัฏจักรแรงคินมีค่าเท่ากับ 11.053 MW ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 25.8% และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องผลิตไอน้ำเท่ากับ 42778.421 kW ประสิทธิภาพของระบบโคเจนเนอเรชันเท่ากับ 60.4% โดยประโยชน์จากงานวิจัยนี้สามารถนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์นี้ไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ระบบโคเจนเนอเรชันจริงต่อไป

คำหลัก: Cogeneration, Gas Turbine Cycle, Steam Turbine Cycle, Heat Recovery Steam Generator.

Abstract

This paper presents a case study of a cogeneration system by using mathematical model. The cogeneration system consists of three main parts: the Brayton cycle for a gas turbine power plant, the heat recovery steam generator, and the Rankine cycle for a steam turbine power plant. Thereafter, a study and analysis of the obtained result is performed from the cogeneration system. The mathematical model is composed of the thermodynamic models for the Brayton and Rankine cycles and the heat transfer model for the heat recovery steam generator.

The result from a cogeneration system by using mathematical model indicates that the output electrical power from the Brayton cycle is 34.75 MW and the thermal efficiency is 36.851% with pressure ratio of 12 and the input heat rate from fuel is 94366.724 kW. The Rankine cycle can produce the electrical power of 11.053 MW the thermal efficiency is 25.8% and the input heat rate from Heat Recovery Steam Generator is 42778.421 kW and efficiency of cogeneration system is 60.4%. The

benefit from this study is to use this mathematical model as a guideline for analyzing the actual cogeneration system in the future.

Keywords: Cogeneration, Gas Turbine Cycle, Steam Turbine Cycle, Heat Recovery Steam Generator.

1. บทนำ

โคเจนเนอเรชัน เป็นโรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานประสิทธิภาพสูงที่มีการพัฒนาต่อเนื่องกันมายาวนานหลายสิบปี ไม่ว่าจะเป็นการผลิตพลังงานในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อนในรูปแบบของไอน้ำ โดยจะได้ต้นทุนการผลิตพลังงานในราคาที่ถูกลงกว่าระบบการผลิตอื่น ๆ ในกระบวนการของโคเจนเนอเรชัน จะนำเอาพลังงานความร้อนที่กำลังถูกปล่อยทิ้ง นำกลับมาใช้

ซ้ำอีกครั้งเพื่อผลิตหรือแปรรูปให้ได้พลังงานรูปแบบอื่นขึ้นมาใหม่อีก โดยประสิทธิภาพความร้อนของโรงไฟฟ้าโคเจนเนอเรชันที่ได้จะสูง เมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าที่ผลิตอย่างเดียว โดยใช้เชื้อเพลิงแหล่งเดียว

การออกแบบโรงไฟฟ้าโคเจนเนอเรชันโดยทั่วไปแล้วจะนำวัฏจักรเบรย์ตันและแรงคินมาผสมกัน เชื้อเพลิงและอากาศที่เผาไหม้ จะให้พลังงานความร้อนที่กังหันแก๊สเป็นพลังขับเคลื่อนให้กังหันแก๊สหมุนขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาแก๊สไอเสียที่ออกมาจากกังหันแก๊สจะผ่านเข้าสู่ เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Heat Recovery Steam Generator หรือ HRSG) ไอน้ำที่ผลิตได้จาก HRSG จะไหลเข้าสู่กังหันไอน้ำหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมา ในขณะที่เดียวกันไอน้ำส่วนหนึ่งจะถูกแยกออกมา (Extract) จากกังหันไอน้ำไปใช้ในกระบวนการที่ต้องการใช้ไอน้ำตามความดันและอุณหภูมิที่กำหนด ไอน้ำที่ไหลผ่านกังหันไอน้ำท้ายสุดก็จะถูกกลั่นตัวเป็นน้ำ นำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตไอน้ำอีก

ตามที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้ระบบโคเจนเนอเรชัน น่าสนใจที่จะศึกษาและค้นคว้าการออกแบบและวิเคราะห์กระบวนการภายในระบบทั้งหมดเพื่อความรู้และความเข้าใจในการทำงานของระบบโคเจนเนอเรชัน โดยการออกแบบและการคำนวณจะใช้ทฤษฎีวัฏจักรเบรย์ตัน ทฤษฎีการคำนวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และทฤษฎีวัฏจักรแรงคิน ซึ่งจะมีสมมุติพารามิเตอร์บางตัวขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ

มีบทความเก่าๆได้ทำการศึกษาการคำนวณและวิเคราะห์กระบวนการต่างๆภายในระบบโคเจนเนอเรชันซึ่งสามารถนำมาใช้ในการศึกษานี้ได้ เช่น การกำหนดค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกบีม $0.75 < \eta_p < 0.9$ และค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกกังหันไอน้ำ $0.75 < \eta_{st} < 0.9$ และค่าความร้อนสูญเสียของห้องเผา

ศัพท์เฉพาะ

| | |
|---------------|--|
| W | power (W) |
| h | enthalpy (kJ/kg) |
| C_p | specific heat water (kJ/kgK) |
| q | heat transfer (W) |
| T | temperature (K or °C) |
| η_{th} | thermal efficiency (%) |
| LHV | lower heating value (btu/scf) |
| P | pressure (bar) |
| k | specific heat of air |
| r_p | pressure ratio |
| r_{bw} | back work ratio |
| η_{isen} | isentropic efficiency (%) |
| v | specific volume (m ³ /kg) |
| C_r | ratio between $\frac{C_{min}}{C_{max}}$ |
| ϵ | heat exchanger effectiveness |
| NTU | number of transfer unit |
| A_s | surface area (m ²) |
| \dot{m} | mass flow rate (kg/s) |
| U | overall heat transfer coefficient (W/m ² K) |



ใหม่ 0.02 [1][4][8], การออกแบบเครื่องผลิตไอน้ำที่ความดันเหมาะสมสำหรับความดันสูงของการผลิตไอน้ำอยู่ที่ 60 bar ขณะที่ความดันต่ำอยู่ที่ 6 bar [2], การออกแบบทางเรขาคณิตของเครื่องผลิตไอน้ำ (HRSG) สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม (U) โดยพื้นที่ของพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน (A) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการออกแบบพารามิเตอร์เทอร์โมไดนามิกส์ [5], ออกแบบเครื่องผลิตไอน้ำแบบแนวนอน ท่อข้างในเป็นท่อกลมครีบทึบขดตัวเป็นแนวตั้ง การวางท่อวางแบบสลับพื้นปลาทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งสามารถนำไปเป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำต่อไปได้ [6], อุณหภูมิขาเข้าคอมเพรสเซอร์ อุณหภูมิขาเข้ากังหันแก๊สและอัตราความดันที่เหมาะสมคือ 288 K 1600 K และ 23.2 [7], การพ่นไอน้ำและลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าทำให้เพิ่มกำลังได้มากกว่า 70% และเพิ่มอัตราความร้อนได้ 20.4% [9] และการเปลี่ยนระบบใหม่โดยติดตั้งกังหันแก๊สใหม่ 2 ตัว กับลดอุณหภูมิอากาศขาเข้าซึ่งทำให้ประสิทธิภาพ การประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น และลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [10] ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลของบทความเหล่านี้มาทดลองใช้ในแบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชันนี้

2. กระบวนการออกแบบจำลอง

2.1 แบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชัน

ระบบโคเจนเนอเรชันที่ใช้เป็นแบบจำลองมาตรฐานมี 3 ระบบคือ ระบบแรกคือวัฏจักรเบรย์ตันสำหรับโรงไฟฟ้ากังหันแก๊สที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง อุปกรณ์ที่มีในระบบคือ คอมเพรสเซอร์(Compressor) ห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) แ ล ะ ก ัง ห ัน แ ก ๊ ส (Gas Turbine) โดยคอมเพรสเซอร์ดูดอากาศเข้าและผ่านห้องเผาไหม้ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นก๊าซธรรมชาติ แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านกังหันแก๊สจะได้กำลังไฟฟ้าส่วนแก๊สไอเสียที่ออกจากกังหันแก๊สจะถูกนำไปใช้ต่อ ระบบที่สองคือเครื่องผลิตไอน้ำ(Heat Recovery Steam Generator : HRSG) จากไอเสียที่กังหันแก๊สปล่อยออกมาจะไหลผ่าน

4 – 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก

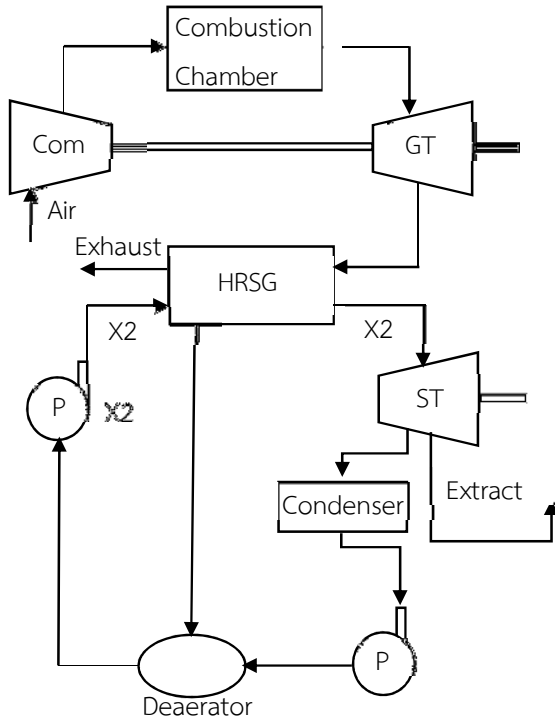
เครื่องผลิตไอน้ำเพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่ไหลภายในเครื่องผลิตไอน้ำนี้ โดยน้ำที่ไหลเข้าเครื่องผลิตไอน้ำจะมีเครื่องปั๊มสองตัวคือเครื่องปั๊มที่ความดันสูงกับความดันต่ำเพื่อทำการผลิตไอน้ำที่สองความดัน ระบบสุดท้ายคือวัฏจักรแรงคินสำหรับโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ อุปกรณ์ที่มีในระบบคือ กังหันไอน้ำ(Steam Turbine) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องปั๊ม (Pump) หลังจากผลิตไอน้ำได้แล้ว ไอน้ำจะไหลผ่านกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่ออกมาจากกังหันไอน้ำจะมีส่วนที่ Extract ออกเพื่อใช้ในกระบวนการอื่นๆต่อไป ไอน้ำอีกส่วนจะไหลไปยังคอนเดนเซอร์เพื่อทำการควบแน่นไอน้ำเป็นน้ำและไหลผ่านต่อไปยังเครื่องปั๊ม โดยแบบจำลองนี้จะมีการติดตั้ง Deaerator ซึ่งติดตั้งหลังเครื่องปั๊มในวัฏจักรแรงคินและมีน้ำจากอีโคโนไมเซอร์ที่ความดันต่ำซึ่งถูกแบ่งปล่อยออกมาจากเครื่องผลิตไอน้ำเข้าสู่ Deaerator โดยแสดงภาพแบบจำลองโคเจนเนอเรชันนี้ในรูปที่ 1

2.2 แบบจำลองเครื่องผลิตไอน้ำ (HRSG)

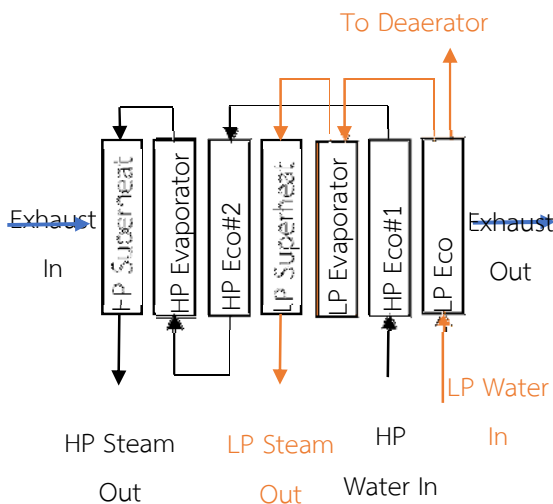
การออกแบบเครื่องผลิตไอน้ำภายในแบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชันนี้ เครื่องผลิตไอน้ำวางแบบแนวนอน ท่อข้างในเป็นท่อกลมครีบทึบขดตัวเป็นแนวตั้ง การวางท่อวางแบบเรียงตามแถว เครื่องผลิตไอน้ำจะแบ่งความดันออกเป็นสองความดันคือความดันสูงกับความดันต่ำ โดยภายในเครื่องผลิตไอน้ำจะมีชุดอุปกรณ์วางเรียงกันอยู่ได้แก่ อีโคโนไมเซอร์(Economizer) อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) และซูเปอร์ฮีท(Superheat) โดยที่ความดันต่ำจะมีชุดอุปกรณ์นี้สามตัวแต่ตรงอีโคโนไมเซอร์จะมีการแบ่งอัตราการไหลเชิงมวลบางส่วนไปยัง Deaerator ส่วนที่ความดันสูงจะมีเพิ่ม มีอีโคโนไมเซอร์เพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งตัว โดยจะแสดงในรูปที่ 2

2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้การการคำนวณ

การคำนวณและวิเคราะห์แบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชั่นนี้จะมีการกำหนดพารามิเตอร์บางตัวเพื่อใช้ในการคิดคำนวณค่าในแต่ละกระบวนการ โดยจะแยกตารางออกเป็น 3 ระบบคือ วัฏจักรเบรย์ตัน เครื่องผลิตไอน้ำ และวัฏจักรแรงคิน ซึ่งจะแสดงพารามิเตอร์เหล่านี้ในตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 3 โดยอ้างอิงจาก [1][4][7][8][9] ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่สมมุติของวัฏจักรเบรย์ตัน



รูปที่ 1 แบบจำลองของระบบโคเจนเนอเรชั่น



รูปที่ 2 แบบจำลองเครื่องผลิตไอน้ำ

จากรูปที่ 2 ลูกศรเส้นสีดำแสดงการไหลของระบบที่ความดันสูง ส่วนลูกศรสีส้มแสดงการไหลของระบบที่ความดันต่ำ

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|------------------------------------|--------------------|-------|---------|
| อุณหภูมิอากาศขาเข้า | $T_{air,in}$ | K | 298.15 |
| ความดันอากาศขาเข้า | $P_{air,in}$ | kPa | 101.325 |
| อัตราส่วนความดัน | r_p | - | 12 |
| อัตราการไหลเชื้อเพลิง | \dot{m}_f | kg/s | 2.95 |
| อัตราการไหลอากาศ | \dot{m}_a | kg/s | 115.39 |
| ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกคอมเพรสเซอร์ | $\eta_{isen,comp}$ | % | 85 |
| ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกกังหันแก๊ส | $\eta_{isen,GT}$ | % | 90 |
| ประสิทธิภาพห้องเผาไหม้ | η_{cc} | % | 98 |

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่สมมติของเครื่องผลิตไอน้ำ

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|---|-------------------------|---------|-------|
| อัตราการไหลเข้าของน้ำที่ความดันต่ำ | $\dot{m}_{w,in@LP}$ | kg/s | 10.14 |
| อัตราการไหลเข้าของน้ำที่ความดันสูง | $\dot{m}_{w,in@HP}$ | kg/s | 12.18 |
| อัตราการไหลออกของน้ำที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ความดันต่ำ | $\dot{m}_{w,out@LPEco}$ | kg/s | 3.68 |
| ค่าความจุความร้อนของน้ำ | $C_{p,water}$ | kJ/kg·K | 4.197 |
| ค่าความจุความร้อนของไอน้ำ | $C_{p,steam}$ | kJ/kg·K | 1.872 |
| ค่าความจุความร้อนของน้ำแก๊ส | $C_{p,gas}$ | kJ/kg·K | 1.005 |
| ความดันไอน้ำสูงที่ออกจากซูเปอร์ฮีท | $P_{HP,steam}$ | bar | 44 |
| ความดันไอน้ำต่ำที่ออกจากซูเปอร์ฮีท | $P_{LP,steam}$ | bar | 4 |

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่สมมติของวัฏจักรแรงดัน

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--------------------------------------|--------------------------|-------|--------|
| ความดันที่ออกจาก Extract | $P_{out,Extract}$ | bar | 12 |
| อุณหภูมิที่เข้าคอนเดนเซอร์ | $T_{in,Condenser}$ | K | 316.15 |
| อัตราการไหลของไอน้ำที่ออกจาก Extract | $\dot{m}_{in,Extract}$ | kg/s | 4.17 |
| อัตราการไหลเข้าคอนเดนเซอร์ | $\dot{m}_{in,Condenser}$ | kg/s | 11.69 |

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|------|-------|
| อัตราการไหลออกจากคอนเดนเซอร์ | $\dot{m}_{out,Condenser}$ | kg/s | 15.86 |
| อัตราการไหลเข้า deaerator | $\dot{m}_{in,Deaerator}$ | kg/s | 6.46 |
| ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกกังหันไอน้ำ | $\eta_{isen.ST}$ | % | 85 |

3. การคำนวณและวิเคราะห์

3.1 การคำนวณของวัฏจักรเบรย์ตัน

การวิเคราะห์วัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle) อุดมคติในเชิงพลังงาน จะอาศัยสมมติฐานมาตรฐานอากาศเย็น เราสามารถเขียนกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่ปริมาตรควบคุมของอุปกรณ์แต่ละชิ้นต่ออัตราไหลเชิงมวลของอากาศได้ดังนี้

เครื่องอัด (compressor)

$$w_{comp} = h_1 - h_2 = C_{po}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

ห้องเผาไหม้ (combustion chamber)

$$q_{comb} = q_{in} = h_3 - h_2 = C_{po}(T_3 - T_2) \quad (2)$$

หรือ

$$\dot{Q}_{in} = \eta_{cc} \times \dot{m}_f \times LHV \quad (3)$$

กังหันแก๊ส (gas turbine)

$$w_{turbine} = h_3 - h_4 = C_{po}(T_3 - T_4) \quad (4)$$

กำลังสุทธิ

$$W_{net} = w_{comp} + w_{turbine} \quad (5)$$

การหาค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ย

$$\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (6)$$

อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ

$$\bar{k} = \frac{\bar{C}_{po}}{\bar{C}_{vo}} = \frac{\bar{C}_p}{\bar{C}_p - R} \quad (7)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรเบรย์ตันอุดมคติคือ

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{W_{net}}{q_{in}} \quad (8)$$

กระบวนการไอเซนโทรปิกในวัฏจักรเบรย์ตันสามารถเขียนสมการได้ว่า

4 - 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก

และสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่ว่าแบบใด สามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \text{ และ } \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

อัตราส่วนความดัน (pressure ratio)

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (10)$$

อัตราส่วน back work (back work ratio)

$$r_{bw} = \frac{W_{comp}}{W_{turbine}} \quad (11)$$

ความเป็ยงเบนของเครื่องอัดจริงและกังหันจริงจากอุดมคติแบบไอเซนโทรปิกสามารถแสดงในเทอมของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเครื่องอัดและกังหันดังนี้

$$\eta_{isen,comp} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (12)$$

$$\eta_{isen,turbine} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (13)$$

3.2 การคำนวณของเครื่องผลิตไอน้ำ

เครื่องผลิตไอน้ำเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนไอน้ำแบบหนึ่ง ดังนั้นจะใช้การวิเคราะห์ห่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธี Effectiveness-NTU Method แนวความคิดของการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ค่า effectiveness ซึ่งเกี่ยวข้องกันกับ NTU (number of transfer units)

อัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถหาจากสมดุลพลังงานของของไหลร้อนหรือของไหลเย็นดังนั้นจะได้

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,out} - T_{c,in}) = C_h(T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (14)$$

จากผลลัพธ์ข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (15)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (16)$$

แทนค่า ลงในสมการ จะได้

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (17)$$

หรือ

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (18)$$

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \quad (19)$$

ความสัมพันธ์ของ effectiveness กับ NTU โดยที่ $NTU = UA_s / C_{min}$ และ $C_r = C_{min} / C_{max}$

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-\frac{1}{C_r} \{1 - \exp[-C_r(NTU)]\}\right) \quad (20)$$

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (21)$$

ความสัมพันธ์ของค่า NTU กับ effectiveness

$$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1] \quad (22)$$

$$NTU = -\ln(1 - \varepsilon) \quad (23)$$

3.3 การคำนวณของวัฏจักรแรงคิน

วัฏจักรแรงคินอุปกรณ์ในวัฏจักรนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีการไหลแบบคงตัว ดังนั้นหม้อต้มและเครื่องควบแน่นจะไม่มีงานใดๆเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนปั๊มและกังหันหมุนจะถูกสมมุติทำงานในลักษณะกระบวนการแบบไอเซนโทรปิก เราสามารถเขียนกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่ปริมาตรควบคุมของอุปกรณ์แต่ละชิ้นได้ดังนี้

ปั๊ม (pump)

$$w_{pump,in} = h_2 - h_1 \quad (24)$$

กังหันไอน้ำ (steam turbine)

$$w_{turb,out} = h_3 - h_4 \quad (25)$$

เครื่องควบแน่น (Condenser)

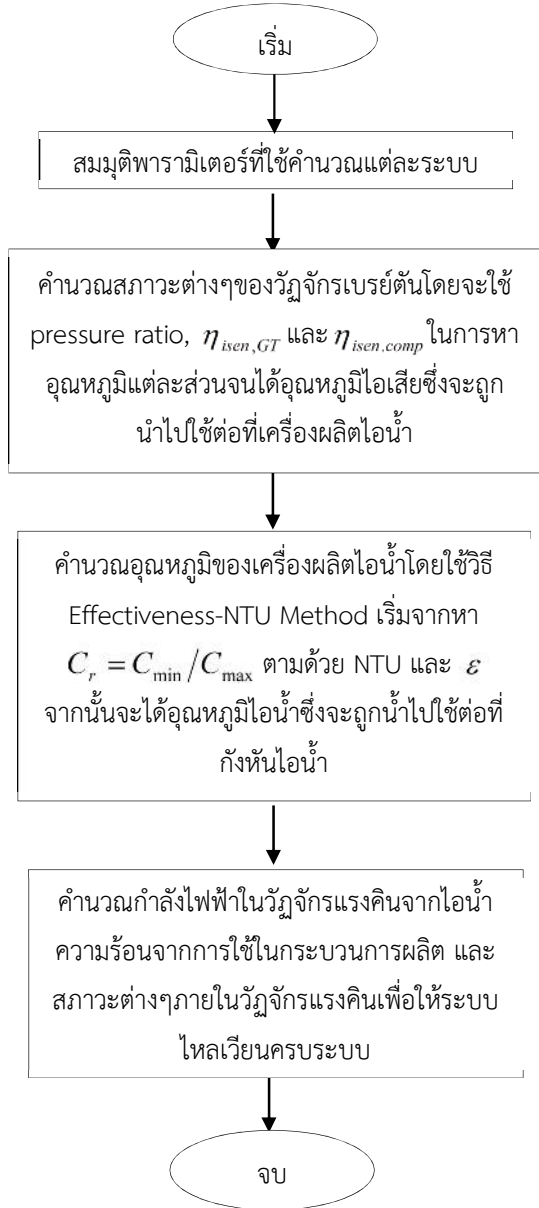
$$w_{turb,out} = h_3 - h_4 \quad (26)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรแรงคินอุดมคติ คือ

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \quad (27)$$

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์จากการคำนวณวัฏจักรเบรย์ตัน

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|---|------------------------|------------|---------------|
| ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศเฉลี่ย | $\bar{C}_{p,air@750K}$ | kJ/k-mol·K | 1.088 |
| อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศเฉลี่ย | $\bar{K}_{air@750K}$ | - | 1.358 |
| ค่าการเผาไหม้เชื้อเพลิง | \dot{Q}_{in} | kw | 94366.7 24 |
| อุณหภูมิที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ | T_2 | K | 623.151 |
| กำลังที่ได้จากคอมเพรสเซอร์ | w_{comp} | kJ/kg | 353.469 |
| อุณหภูมิที่ออกจากห้องเผาไหม้ | T_3 | K | 1356.34 7 |
| กำลังที่ได้จากกังหันแก๊ส | w_{turb} | kJ/kg | 638.511 |
| อุณหภูมิที่ออกจากกังหันแก๊ส | T_4 | K | 769.261 |
| อัตราส่วน back work | r_{bw} | - | 0.554 |
| กำลังสุทธิ | w_{net} | MW | 34.775 |
| ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรเบรย์ตัน | η_{th} | % | 36.851 |

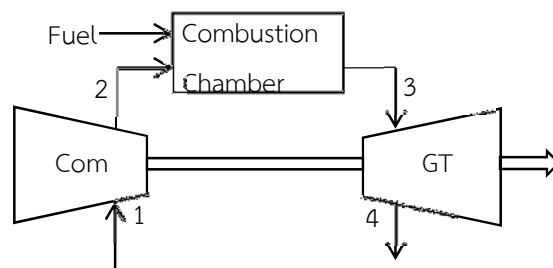


รูปที่ 3 แสดง flow diagram การคำนวณระบบโคเจเนอเรชั่น

4. ผลลัพธ์จากการคำนวณและวิเคราะห์

4.1 ผลลัพธ์ของวัฏจักรเบรย์ตัน

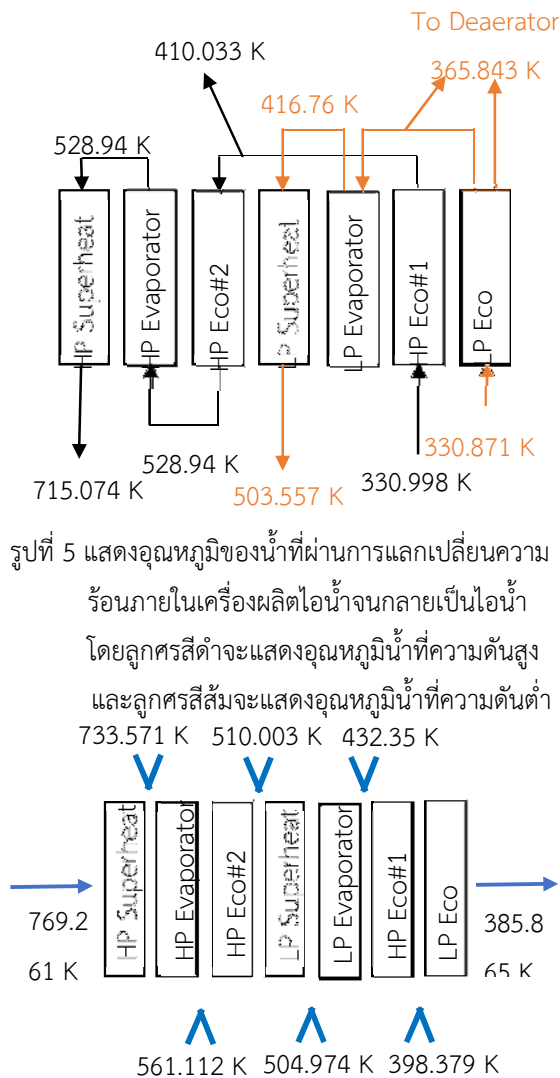
จากการใช้สมการของวัฏจักรเบรย์ตันและค่าพารามิเตอร์ที่สมมุติจะสามารถคำนวณค่าในแต่ละกระบวนการได้ ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4 และตารางที่ 4



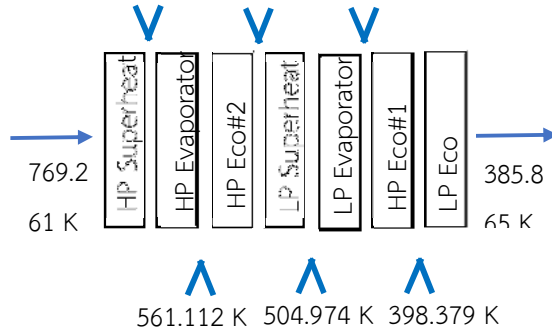
รูปที่ 4 แบบจำลองของวัฏจักรเบรย์ตัน

4.2 ผลลัพธ์ของเครื่องผลิตไอน้ำ

จากการใช้สมการ Effectiveness-NTU Method และค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิแต่ละกระบวนการได้ซึ่งสามารถดูแบบจำลองจากรูปที่ 2 โดยจะเอาอุณหภูมิที่ออกจากกังหันแก๊สของวัฏจักรเบรย์ต้นมาใช้ต่อในเครื่องผลิตไอน้ำซึ่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้จะแสดงรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 6 และในตารางที่ 5 จะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองนี้



รูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องผลิตไอน้ำจนกลายเป็นไอน้ำ โดยลูกศรสีดำจะแสดงอุณหภูมิน้ำที่ความดันสูง และลูกศรสีส้มจะแสดงอุณหภูมิน้ำที่ความดันต่ำ



รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิของแก๊สที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องผลิตไอน้ำ

ตารางที่ 5 แสดงผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองนี้

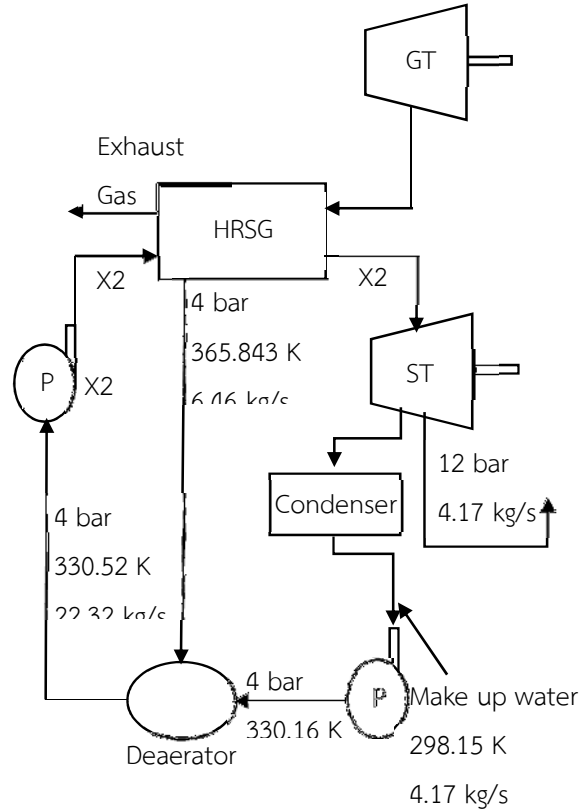
| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--|------------------|-------|---------|
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของอีโคโนไมเซอร์ที่ความดันต่ำ | $UA_{Eco,LP}$ | kW/K | 36 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของอีเวปโปเรเตอร์ที่ความดันต่ำ | $UA_{EVAP,LP}$ | kW/K | 184.075 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของซูเปอร์ฮีทที่ความดันต่ำ | $UA_{SH,LP}$ | kW/K | 20 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของอีโคโนไมเซอร์ตัวที่ 1 ที่ความดันสูง | $UA_{Eco\#1,HP}$ | kW/K | 125 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของอีโคโนไมเซอร์ตัวที่ 2 ที่ความดันสูง | $UA_{Eco\#2,HP}$ | kW/K | 130 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของอีเวปโปเรเตอร์ที่ความดันสูง | $UA_{EVAP,HP}$ | kW/K | 220.038 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของซูเปอร์ฮีทที่ความดันสูง | $UA_{SH,HP}$ | kW/K | 40 |

4.3 ผลลัพธ์ของวัฏจักรแรงดัน

จากการใช้สมการของวัฏจักรแรงดันและค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสามารถคำนวณค่าในแต่ละกระบวนการได้ ซึ่งค่าอุณหภูมิของไอน้ำที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไอน้ำที่ความดันสูงและความดันต่ำ โดยจะแสดงภาพแบบจำลองในรูปที่ 7 และค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์จากการคำนวณวัฏจักรแรงดัน

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--|----------------------------|-------|---------------|
| กำลังสุทธิ | w_{net} | MW | 11.053 |
| ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรแรงดัน | η_{th} | % | 25.8 |
| อัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องผลิตไอน้ำ | \dot{Q}_{in} | kW | 42778.4 21 |
| อัตราการไหลที่ออกจากกังหันไอน้ำไปคอนเดนเซอร์ | $\dot{m}_{out, st}$ | kg/s | 11.69 |
| อุณหภูมิที่ออกจากคอนเดนเซอร์ | $T_{out, condenser}$ | K | 316.15 |
| อัตราการไหลที่ออกจากคอนเดนเซอร์ | $\dot{m}_{out, condenser}$ | kg/s | 15.86 |
| ประสิทธิภาพระบบโคเจนเนอเรชั่น | η_{Cogen} | % | 60.4 |



รูปที่ 7 แสดงแบบจำลองของวัฏจักรแรงดัน

5. สรุปผลงานวิจัย

ผลจากการคำนวณและวิเคราะห์กรณีศึกษาของแบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชั่นเชิงคณิตศาสตร์นี้ พบว่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวัฏจักรเบรย์ตันมีค่า 34.75 MW และประสิทธิภาพเชิงความร้อน 36.851% ที่อัตราส่วนความดัน 12 และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเชื้อเพลิงเท่ากับ 94366.724 kW ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากวัฏจักรแรงดันมีค่าเท่ากับ 11.053 MW ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 25.8% และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องผลิตไอน้ำเท่ากับ 42778.421 kW โดยผลจากกำลังไฟฟ้าวรวมที่ผลิตได้จากแบบจำลองนี้เท่ากับ 45.803 MW และประสิทธิภาพของระบบโคเจนเนอเรชั่นเท่ากับ 60.4% ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมที่ได้จากแบบจำลองนี้ได้ผลที่ค่อนข้างดี เนื่องจากได้ใช้ความร้อนทิ้งจากกังหันแก๊สทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพความร้อน



เพิ่มขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ในแบบจำลองนี้ใกล้เคียงกับค่าที่ผลิตได้จากระบบโคเจนเนอเรชันจริง ทำให้สามารถนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์นี้ไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ระบบโคเจนเนอเรชันจริงต่อไป

โดยสามารถนำวิธีการคำนวณ และวิเคราะห์แบบจำลองระบบโคเจนเนอเรชันเชิงคณิตศาสตร์นี้ไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ระบบโคเจนเนอเรชันจริงต่อไป แต่แบบจำลองนี้ก็มีข้อเสียตรงที่ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมแต่ละอุปกรณ์ภายในเครื่องผลิตไอน้ำยกเว้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของอีเวปเรเตอร์ที่สองความดันซึ่งได้จากการคำนวณ ทำให้ได้ค่าในแบบจำลองนี้คลาดเคลื่อนออกไป

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Abdolsaeid Ganjeh Kaviri, Mohammad Nazri Mold, Jaafar, Tholudin Mat Lazim, Hassan Barzegaravval. Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis, *Energy Conversion and Management*, vol. 67, 2013, pp. 27–33.

[2] Abid-Al-Rahman, H.AL-Hobo, Maher. Saab. Salamah. Design of Dual Pressure Heat Recovery Steam Generator For Combined Power Plants, 2005.

[3] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, drienne S. Lavine. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th ed.* 2007. pp 705-747.

[4] Karaali R., Oztürk I. Thermoeconomic optimization of gas turbine cogeneration plants, *Energy*, vol. 80, 2015, pp. 474-485.

[5] Ma, Dolores Duran, Manuel Valdes, Antonio Rovira, E.Rincon. A methodology for the geometric design of heat recovery steam

generators applying genetic algorithms, *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, 2013, pp. 77-83.

[6] Manassaldi J., Mussati S., Scenna N. Optimal synthesis and design of Heat Recovery Steam Generation (HRSG) via mathematical programming, *Energy*, vol. 36, 2011, pp. 475-485.

[7] Memon A., Memon R., Harijan K., Uqaili M. Thermo-environmental analysis of an open cycle gas turbine power plant with regression modeling and optimization, *Journal of the Energy Institute*, vol. 87, 2004, pp. 81-88.

[8] Sahoo P.K. Exergoeconomic analysis and optimization of a cogeneration system using evolutionary programming, *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, 2013, pp. 77-83.

[9] Wang F.J., Chiou J.S. Integration of steam injection and inlet air cooling for a gas turbine generation system, *Energy Conversion and Management*, vol. 45, 2004, pp. 15-26.

[10] Wantana Somcharoenwattana, Christoph Menke, Darunporn, Dusan Gvozdenac. Study of operational parameters improvement of natural-gas cogeneration plant in public buildings in Thailand, *Energy and Buildings*, vol. 43, 2011, pp. 925-934.

[11] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. *Thermodynamics 5th ed.* 2006.

[12] บริษัท ปตท จำกัด (มหาชน). ข้อมูลก๊าซธรรมชาติ, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา [https://dscng.pttplc.com/\(S\(lrclibnrud3a3mnv3pvevl55\)\)/OnlineGas/WEST.asp](https://dscng.pttplc.com/(S(lrclibnrud3a3mnv3pvevl55))/OnlineGas/WEST.asp).