

การศึกษาสภาวะใช้งานที่เหมาะสมของพัดลมในหอทำความเย็นสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

สุวัฒนา วปีนันทน์^{1,*} และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์²

¹สหสาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Email: pim430@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์ของจำนวนพัดลมที่ใช้งานสำหรับหอทำความเย็นชนิดใช้พัดลมดูดออก (Mechanical-Induced Draft Cooling Tower) ที่มีผลต่อกำลังการผลิตสุทธิของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมพระนครใต้หน่วยที่ 3 ขนาดกำลังการผลิตรวม (Gross Capacity) $2 \times 246 \text{ MW (GTs)} + 1 \times 275.6 \text{ MW (ST)}$ โดยมีปัจจัยเกี่ยวข้องที่สำคัญได้แก่ จำนวนพัดลมสำหรับหอทำความเย็น อุณหภูมิบรรยากาศระเปาะแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์และร้อยละของกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้า ทั้งนี้ ในการปรับลดจำนวนพัดลมของแต่ละสภาวะได้กำหนดให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงมีค่าคงที่ จากผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ใช้งานและกำลังการผลิตสุทธิมีลักษณะเป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสี่สำหรับสองตัวแปร กรณีที่โรงไฟฟ้าเดินเครื่องที่กำลังการผลิตฐาน (Base Load) และอุณหภูมิกระเปาะเปียกมีค่าต่ำกว่า 16 องศาเซลเซียส กำลังการผลิตสุทธิของโรงไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปรับลดจำนวนพัดลมลงจากจำนวนพัดลมทั้งหมด 14 หน่วย และให้ผลเช่นเดียวกันที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก 17 และ 18 องศาเซลเซียส เมื่อเดินเครื่องที่กำลังการผลิตร้อยละ 75 และ 50 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้งานพัดลมครบทุกหน่วยที่สภาวะอากาศเย็นจะส่งผลให้กำลังการผลิตสุทธิลดลงได้ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การใช้งานจำนวนพัดลมสำหรับหอทำความเย็นอย่างเหมาะสมจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมรรถนะโรงไฟฟ้าโดยไม่มีค่าใช้จ่าย

คำสืบค้น

คำสำคัญ : พัดลมสำหรับหอทำความเย็น, โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

A STUDY OF APPROPRIATE COOLING TOWER FAN OPERATING FOR A COMBINED CYCLE POWER PLANT

Suwattana Wapinanon^{1,*} and Sompong Putivisutisak²

*¹Inter-Department of Energy Technology and Management Graduate School,
Chulalongkorn University*

*²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University*

**Email: pim430@gmail.com*

ABSTRACT

This study investigates the effect of cooling tower fan operation on net power plant output and proposes appropriate operating conditions at various ambient and load percentages for a fourteen-cell mechanical draft cooling tower. Numerical analysis is performed by using a heat balance simulation software, GateCycle™. The plant operation and design data of South Bangkok combined-cycle power plant block III with gross capacity 2×246 MW (GTs) + 1×275.6 MW (ST) are applied in the model to demonstrate as a case study. Base cases with constant gas turbine's heat rate are considered with four primary parameters, i.e., the number of operating fans, ambient dry bulb temperature, relative humidity and load condition.

The study reveals that the impact of cooling tower fan cells operation on net output is a polynomial function of two variables of the fourth power. In case of base load operation, when ambient wet bulb temperature is below 16°C, if the number of operating fans is reduced, the net power plant output will be slightly increased. The results are practically similar for the cases at power plant load 75% and 50% at wet bulb temperature of 17°C and 18°C, respectively. However, when all fans are fully operated the net output is decreased. It can be concluded that the operating number of cooling tower fans can be optimized to improve plant performance at virtually no cost.

KEYWORDS

Cooling Tower Fan, Combined Cycle Power Plant

1. บทนำ

หอทำความเย็นเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทำหน้าที่ผลิตน้ำเย็นเพื่อระบายความร้อนให้กับคอนเดนเซอร์ สำหรับหอทำความเย็นชนิดใช้พัดลม (Mechanical-draft Cooling Tower) โดยทั่วไปจะติดตั้งพัดลมหลายตัวเพื่อทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศที่เข้าสู่หอทำความเย็นเพื่อระบายความร้อนออกจากน้ำหล่อเย็นให้ได้ อุณหภูมิตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากข้อมูลออกแบบที่ได้รับจากผู้ผลิตนั้น ไม่แสดงข้อมูลสมรรถนะการทำงานของพัดลมสำหรับหอทำความเย็นซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของพัดลมที่ใช้งานและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาออก (Cooling Water Outlet Temperature) [1] ดังนั้น จึงไม่สามารถที่จะพิจารณาถึงผลกระทบของจำนวนพัดลมที่ปรับลดต่อการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าได้อย่างชัดเจนหากทำการปรับลดจำนวนพัดลมเพื่อช่วยประหยัดพลังงานจากการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าในช่วงที่อากาศมีอุณหภูมิลดลงหรือโรงไฟฟ้าเดินเครื่องที่ร้อยละของกำลังการผลิตลดลง ในปัจจุบันการเดินเครื่องของบางโรงไฟฟ้าจะใช้งานพัดลมครบทุกหน่วยเพื่อลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้ได้ตามค่าที่ผู้ผลิตหอทำความเย็นออกแบบ ซึ่งอาจจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานหากอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ลดลงนั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังการผลิตของกังหันไอน้ำ

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหอทำความเย็นไว้อย่างแพร่หลาย เช่น Ugwu [2] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต่อคอนเดนเซอร์จากระบบทำความเย็นของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม พบว่า หากลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นได้ลงจากเดิม 5 องศาเซลเซียส จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคอนเดนเซอร์ได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาด้านการทำงานของพัดลมที่มีผลต่อสมรรถนะของหอทำความเย็น Poomprasert et al. [3] ได้ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของการระบายความร้อนของหอทำความเย็นโดยการปรับมุมใบพัดของพัดลมสำหรับหอทำความเย็นซึ่งมีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ของพัดลมในระบบทำความเย็นของโรงงานผลิตน้ำแข็ง จากผลการทดลองพบว่า การปรับมุมใบพัดพัดลมที่ตำแหน่ง 22 องศา สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้ 8.92 เปอร์เซ็นต์ Mirjana et al. [4] ได้ทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของคอนเดนเซอร์ กำลังการผลิตและอัตราการใช้เชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้า โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโรงไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และโปรแกรม Microsoft Visual Basic ภายใต้อุปกรณ์โรงไฟฟ้าสำหรับระบบระบายความร้อนแบบวันซ์ทู (Once-Through Cooling System) ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้กำลังการผลิตของโรงไฟฟาลดลง เนื่องจากประสิทธิภาพทางความร้อนที่ลดลงซึ่งเป็นผลให้กำลังการผลิตของโรงไฟฟาลดลง ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อเพิ่มปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากคอนเดนเซอร์ที่มีความดันภายในสูงจะเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของโรงไฟฟ้า Koch and Watson [5] ได้ศึกษาแนวทางการที่เหมาะสมในการเดินเครื่องโดยควบคุมการเปิดปิดพัดลมสำหรับหอทำความเย็นและเครื่องสูบน้ำหล่อเย็น โดยการพิจารณาความคุ้มค่าจากปริมาณสุทธิในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าเทียบกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ทั้งสองตัวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในสภาวะการเดินเครื่องที่แตกต่างกันเพื่อหาจุดเหมาะสมสำหรับการใช้งานในแต่ละสภาวะของการเดินเครื่อง ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาฟาเรนไฮต์ (10 องศาเซลเซียส) การใช้งานเครื่องสูบน้ำหล่อเย็น 2 ตัว คงเดิมและปรับลดพัดลมเท่ากับจำนวน 6 หน่วย จากเดิม 8 หน่วย นั้นสามารถเพิ่มกำลังการผลิตจากวิธีการเดินเครื่องตามขั้นตอนปฏิบัติเดิมได้ถึง 275 กิโลวัตต์ โดยไม่มีการเพิ่มเชื้อเพลิงใดๆ

ในการศึกษาเกี่ยวกับการเดินเครื่องหอทำความเย็นสำหรับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมในประเทศไทยยังไม่ครอบคลุมในเรื่องผลกระทบจากการปรับลดจำนวนพัดลม ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังการผลิตสุทธิของโรงไฟฟ้าเมื่อทำการปรับลดจำนวนพัดลมที่ใช้งานสำหรับหอทำความเย็นผ่านการจำลองการเดินเครื่องด้วยโปรแกรม GateCycle™ [6] และหาจำนวนของพัดลมที่เหมาะสมในแต่ละ

สภาวะที่ทำการศึกษาคือ สภาวะอากาศ อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ และร้อยละของกำลังการผลิต โดยพิจารณาจากกำลังการผลิตที่ได้สูงที่สุด เมื่อสภาวะของอากาศเปลี่ยนแปลงที่จุดต่างๆ และเปรียบเทียบข้อมูลการเดินเครื่องจริงกับผลจากการศึกษาด้วยแบบจำลอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการเดินเครื่องสำหรับโรงไฟฟ้าและเป็นแนวทางในการอนุรักษ์และการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าภายในโรงไฟฟ้า

2. ทฤษฎี

2.1 หลักการทำงานของหอทำความเย็น

หอทำความเย็น (Cooling Tower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลดอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ระบายความร้อนจาก คอนเดนเซอร์ (Condenser) ในโรงไฟฟ้าโดยการพ่นน้ำที่มีอุณหภูมิสูงให้เป็นละอองขนาดเล็กตกผ่านแผงกระจายน้ำ (Fill Pack หรือ Splash Bar) ละอองน้ำเหล่านี้จะเกาะกับแผงกระจายละอองน้ำทำให้เกิดเป็นพื้นที่เปียก ซึ่งจะสัมผัสกับอากาศที่ถูกดูดผ่านแผงกระจายน้ำทำให้น้ำที่มีอุณหภูมิสูงระเหยกลายเป็นไอ ในกระบวนการระเหยนี้ ไอน้ำจะดึงเอาความร้อนที่อยู่ในน้ำไปเป็นความร้อนแฝงของไอน้ำจึงทำให้น้ำมีอุณหภูมิลดลง ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในกลไกการทำงานของหอทำความเย็น ได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างละอองน้ำและอากาศ อัตราการไหลสัมพัทธ์ระหว่างละอองน้ำและอากาศ ระยะเวลาสัมผัส และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศกระเปาะเปียกที่เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของหอทำความเย็น [7]

สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีการเดินเครื่องตลอดทั้งปี ปริมาณกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าและช่วงของอุณหภูมิของอากาศที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อการทำงานและสมรรถนะของหอทำความเย็นซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าโดยตรง

2.2 การเกิดความสูญเสียจากไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำ (Exhaust Loss)

ความสูญเสียจากไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำ (Exhaust Loss) คือพลังงานของไอน้ำที่สูญเสียให้กับคอนเดนเซอร์ ขณะที่ไอน้ำไหลผ่านใบพัดกังหันไอน้ำขั้นสุดท้ายด้วยความเร็วสูง ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียพลังงานที่สภาวะการไหลของไอน้ำผ่านใบพัดขั้นสุดท้าย (Last Stage Blade) ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ ความดันภายในคอนเดนเซอร์ พื้นที่ออก (Exhaust Area) และอัตราการไหลของไอน้ำ ตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์หากความดันภายในคอนเดนเซอร์มีค่าต่ำจะส่งผลให้ความเร็วของไอน้ำขณะไหลผ่านกังหันไอน้ำขั้นสุดท้ายสูงขึ้น ซึ่งความดันภายในคอนเดนเซอร์จะขึ้นอยู่กับระบบการทำงานของน้ำหล่อเย็น

หลังจากถ่ายเทพลังงานให้กับกังหันไอน้ำ ไอน้ำจะควบแน่นภายในคอนเดนเซอร์ซึ่งถูกระบายความร้อนโดยน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิของอากาศมีผลต่อการทำงานของหอทำความเย็น จากข้อมูลเดินเครื่องในอดีตที่ผ่านมาพบว่า ในช่วงฤดูหนาวความดันภายในคอนเดนเซอร์ต่ำกว่าช่วงฤดูร้อนจะส่งผลให้ความเร็วของไอน้ำที่ไหลผ่านกังหันสูงขึ้นและทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงาน [8]

2.3 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานสำหรับหอทำความเย็น

หอทำความเย็นทำหน้าที่ระบายความร้อนจากคอนเดนเซอร์ทิ้งสู่บรรยากาศ โดยมีน้ำหล่อเย็นเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน หากอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต่ำจะส่งผลให้ความดันภายในคอนเดนเซอร์ต่ำลงและได้กำลังการผลิตของกังหันไอน้ำที่สูงขึ้น ดังนั้นคอนเดนเซอร์และหอทำความเย็นจะทำงานสัมพันธ์กันโดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและช่วงทำความเย็นเดียวกัน ดังสมการด้านล่าง

$$\Delta T_{Range} = \frac{Q_{cond}}{W_{cool} \times C_{p_{cool}}} = T_{cool_{in}} - T_{cool_{out}} \quad (1)$$

โดยที่ ΔT_{Range}	คือ ช่วงทำความเย็น
Q_{cond}	คือ ความร้อนที่ต้องการระบายออกจากคอนเดนเซอร์
W_{cool}	คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (Cooling Water Flow Rate)
$C_{p\text{cool}}$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น
T_{coolin}	คือ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้า
T_{coolout}	คือ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาออก

การวิเคราะห์โดยสร้างแบบจำลองสมดุลทางความร้อนของหอทำความเย็นด้วยโปรแกรม GateCycle™ ใช้หลักการสมดุลมวล (Mass Balance) ในการคำนวณปริมาณของอากาศและน้ำหล่อเย็นในหอทำความเย็น รวมทั้งปริมาณน้ำที่หายไปกับบรรยากาศ โดยที่มวลโดยรวมของน้ำที่เข้าระบบจะเท่ากับมวลโดยรวมของน้ำที่ออกจากระบบ และสมการสมดุลพลังงาน (Energy Balance) เป็นการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำหล่อเย็นกับอากาศซึ่งจะเท่ากับภาระการทำงานของคอนเดนเซอร์ (Condenser Duty) โดยที่พลังงานโดยรวมที่เข้าระบบจะเท่ากับพลังงานโดยรวมที่ออกจากระบบ [1] แบบจำลองสมดุลทางความร้อนของหอทำความเย็นต้องอาศัยข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลเบื้องต้นในการสร้างแบบจำลองโรงไฟฟ้าสำหรับส่วนของหอทำความเย็น [1]

Cooling Tower Heat Balance Analysis	
Inputs	Outputs
Ambient Air Temperature	Cooling Tower Duty
Ambient Air Wet Bulb Temperature	Makeup Water Flow
Ambient Air Pressure	Evaporation Water Loss
Cooling Water Inlet Flow	Drift Water Loss
Make Up Water Temperature	Outlet Air Temperature
Cooling Water Inlet Temperature	Inlet Air Flow
Cooling Water Outlet Temperature/Range	Outlet Air Flow
Outlet Air Relative Humidity (ϕ)	Approach Temperature Difference
Blowdown Flow or Cycles of Concentration	Markel Number (KaV/L)
Drift Loss Fraction	Cycles of Concentration
Air Side Pressure Loss (Δp)	Blow Down Flow
Number of Fans in Operation	Fan Efficiency
Fan Speed for Each Fan	
Fan Power Consumption	
Fan Motor Efficiency	
Fan Shaft Loss Fraction	
Design Fan Power, Efficiency and Air Flow at The Reference Air Pressure and Temperature	

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับการศึกษาการทำงานของระบบต่างๆภายในโรงไฟฟ้านั้น หากระบบที่ทำการศึกษามีขนาดใหญ่และเลือกควบคุมปัจจัยที่ต้องการทำการศึกษายาก การทดลองเพื่อศึกษาระบบดังกล่าวจะไม่สามารถทำได้โดยง่ายหรืออาจจะไม่สามารถทำได้เลย ดังนั้นจึงต้องอาศัยเครื่องมือ เช่น ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการจำลองเหตุการณ์ การศึกษาการทำงานของหอทำความเย็นในครั้งนี้เป็นการศึกษาผ่านโปรแกรมสร้างแบบจำลองโรงไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมพระนครใต้ หน่วยที่ 3 มีกำลังการผลิตทั้งหมด 767 เมกะวัตต์ ที่สภาวะออกแบบและหอทำความเย็นชนิดใช้ลมดูดออก ซึ่งประกอบด้วยพัดลมทั้งหมด 14 หน่วย สำหรับการสร้างแบบจำลองจะใช้ข้อมูลออกแบบจากผู้ผลิตและข้อมูลการเดินเครื่อง แสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลองดังนี้

3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

- 1) สร้างแบบจำลองที่กำลังการผลิตฐาน (Base load) ที่สภาวะออกแบบ (Design Case) จากแผนภาพสมดุลทางความร้อน (Heat Balance) ของกำลังการผลิตฐานที่ได้รับจากผู้ผลิตเพื่อเป็นแบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) โดยการต่ออุปกรณ์ต่างๆ และประกอบเป็นองค์ประกอบโดยรวมของโรงไฟฟ้า (Plant Configuration)
- 2) กำหนดค่าเฉพาะด้านวัสดุและขนาดของแต่ละอุปกรณ์ ข้อมูลตัวแปรในแต่ละอุปกรณ์ที่โปรแกรมต้องการโดยใช้ข้อมูลออกแบบที่สภาวะอ้างอิง แสดงดังตารางที่ 2
- 3) กำหนดข้อมูลคุณสมบัติต่างๆ ของระบบที่โปรแกรมต้องการโดยใช้ข้อมูลจากแผนภาพสมดุลทางความร้อน (Heat Balance Diagram) ที่ได้รับจากบริษัทผู้ผลิตโรงไฟฟ้า Mitsubishi Heavy Industries, LTD. [9] และจากค่าคุณสมบัติซึ่งอ้างอิงตามสมการและมาตรฐานทางวิศวกรรม เช่น
 1. คุณสมบัติของเชื้อเพลิง (อ้างอิงตามมาตรฐาน Lee – Kesler [10])
 2. คุณสมบัติของน้ำและไอน้ำ (อ้างอิงตามมาตรฐาน IAPWS-IF97 [11])
 3. คุณสมบัติของอากาศและก๊าซ (อ้างอิงตามมาตรฐาน JANAF [12])
- 4) ทดสอบการจำลองการทำงานของแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบ คุณสมบัติของน้ำและไอน้ำที่ได้จริงจากแบบจำลองและปรับเปลี่ยนตัวแปรภายในอุปกรณ์หากผลที่ได้จากแบบจำลองแตกต่างจากข้อมูลออกแบบโรงไฟฟ้า
- 5) ได้แบบจำลองที่สภาวะออกแบบซึ่งผลจากการจำลองได้ค่าใกล้เคียงกับข้อมูลออกแบบโรงไฟฟ้า (กำลังการผลิตรวม $767 \pm 10\%$ เมกะวัตต์) ดังแสดงในรูปที่ 3
- 6) สร้างแบบจำลองที่กำลังการผลิตร้อยละ 50 และ 75 โดยใช้แบบจำลองที่สภาวะออกแบบเป็นแบบจำลองอ้างอิง และปรับค่า Properties ต่างๆ ของระบบโดยใช้ข้อมูลจากแผนภาพสมดุลทางความร้อน (Heat Balance Diagram) ของกำลังการผลิตร้อยละ 50 และ 75

3.2 ขอบเขตและเงื่อนไขการจำลอง

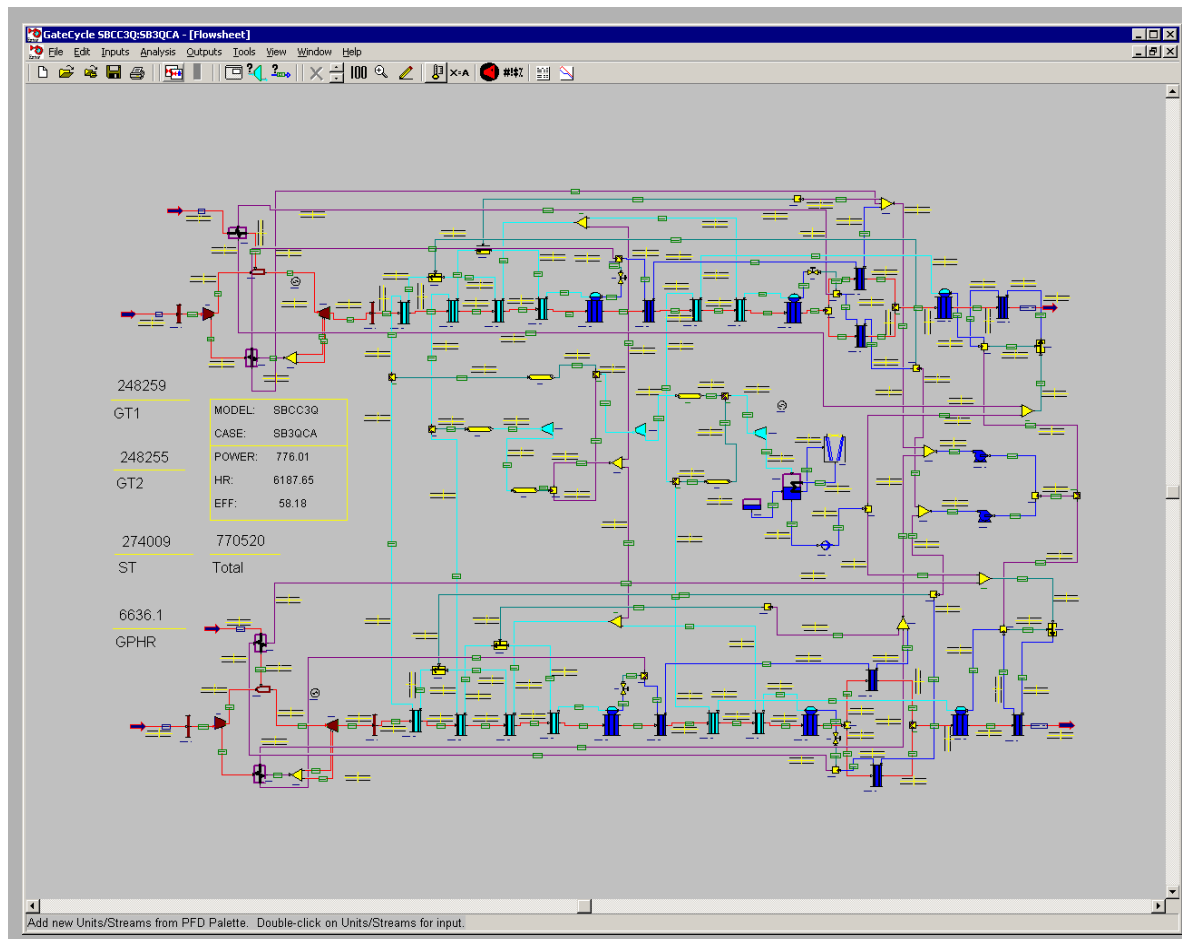
ในการจำลองการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้า จะควบคุมอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Heat Rate) ให้คงที่ในแต่ละสภาวะที่ทำการศึกษา และทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ต้องการศึกษาดังนี้

- 1) อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ 20, 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส
- 2) ความชื้นสัมพัทธ์ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์
- 3) กำลังการผลิตร้อยละ 50 75 และ 100
- 4) จำนวนพัดลมที่ทำการปิดตั้งแต่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ตัว

3.3 การบันทึกผลที่ได้จากแบบจำลอง

จากการจำลองการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าด้วยโปรแกรม GateCycle™ สามารถบันทึกผลของข้อมูลดังนี้

- 1) กำลังการผลิตกังหันแก๊ส
- 2) กำลังการผลิตกังหันไอน้ำ
- 3) กำลังไฟฟ้าในการขับเคลื่อนสำหรับหอทำความเย็น



รูปที่ 3 แบบจำลองของโรงไฟฟ้าความร้อนร่วมพระนครใต้หน่วยที่ 3 ด้วยโปรแกรม GateCycle™

ตารางที่ 2 ข้อมูลของระบบที่สภาวะอ้างอิงของโรงไฟฟ้า [9]

Circulating Water Flow Rate	m ³ /h	45,230	Reference Condition		
Wet Bulb temperature	°C	29.1	Fuel	Natural Gas	
Ambient Pressure	mbar	9.8	Ambient Temperature	°C	33
Hot Water Temperature	°C	41.8	Ambient Pressure	mmHg	760
Cold Water Temperature	°C	32.0	Ambient Humidity	RH%	75
Cooling Range	°C	9.8	Power Output at Reference Condition		
Approach Temperature	°C	2.9	Gross Power Output, Base Load	kW	767,600
Fan Power Consumption/Cell	kW	183	Gross Power Output, 75% Load	kW	579,200
Basin Dimension-Width	mm	34,740	Gross Power Output, 50% Load	kW	391,200
Basin Dimension-Length	mm	68,280			

4. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

4.1 การเปรียบเทียบผลจากการศึกษาและผลจากการเดินเครื่องจริง

ในการศึกษานี้ได้ทดลองปรับลดจำนวนพัดลมที่การเดินเครื่องจริงของโรงไฟฟ้า โดยกำหนดให้โรงไฟฟ้าเดินเครื่องที่กำลังการผลิตฐาน แต่ในการทดสอบนั้นสามารถปิดพัดลมได้เพียง 1 หน่วย เนื่องมาจากข้อจำกัดด้านการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าที่ต้องควบคุมปริมาณกำลังการผลิตในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ซึ่งการปิดพัดลมจะส่งผลต่อปริมาณกำลังการผลิตของกังหันไอน้ำ ผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากแบบจำลองโรงไฟฟ้าและผลจากการเดินเครื่องจริง

ข้อมูลการทดสอบ	หน่วย	ผลจากการทดสอบแบบจำลองโรงไฟฟ้า				ผลจากการทดสอบจริง		
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2				
		ไม่ปิดพัดลม	ปิดพัดลม 1 หน่วย	ไม่ปิดพัดลม	ปิดพัดลม 1 หน่วย	ไม่ปิดพัดลม	ไม่ปิดพัดลม*	ปิดพัดลม 1 หน่วย
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	องศาเซลเซียส	25.0	25.0	25.0	25.0	23.7	25.5	25.5
ความชื้นสัมพัทธ์	เปอร์เซ็นต์	60	60	50	50	59.0	49.7	49.7
อุณหภูมิกระเปาะเปียก	องศาเซลเซียส	19.5	19.5	17.9	17.9	18.1	18.1	18.1
กำลังการผลิตกังหันไอน้ำ	กิโลวัตต์	279,950	279,695	279,730	279,504	273,982	273,060	272,766
กำลังงานที่ใช้ในการขับพัดลม	กิโลวัตต์	2,121	1,950	2,135	1,963	2,215		2,045
กำลังการผลิตกังหันไอน้ำลดลง	กิโลวัตต์	255		226		294		
กำลังงานที่ใช้ในการขับพัดลมลดลง	กิโลวัตต์	171		172		171		

จากตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองโรงไฟฟ้าและผลจากการทดสอบเดินเครื่องจริง ที่สภาวะเดียวกัน ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก 18 องศาเซลเซียส เมื่อปิดพัดลม 1 หน่วย ผลการทดสอบจริงของโรงไฟฟ้า พบว่ากำลังการผลิตของกังหันไอน้ำลดลง 294 กิโลวัตต์ และผลจากการทดสอบแบบจำลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 กำลังการผลิตของกังหันไอน้ำลดลงเช่นเดียวกัน คือ 255 และ 226 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 กับผลที่ได้จากการเดินเครื่องจริง เปอร์เซ็นต์ของกำลังการผลิตของไอน้ำที่ลดลงมีค่า 0.09 %, 0.08% และ 0.11% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลจากการทดสอบทั้งสองวิธีมีลักษณะสอดคล้องและให้ผลในทิศทางเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าผลจากการทดสอบแบบจำลองให้ผลใกล้เคียงกับการเดินเครื่องจริง

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ปรับลดและกำลังการผลิตสุทธิ

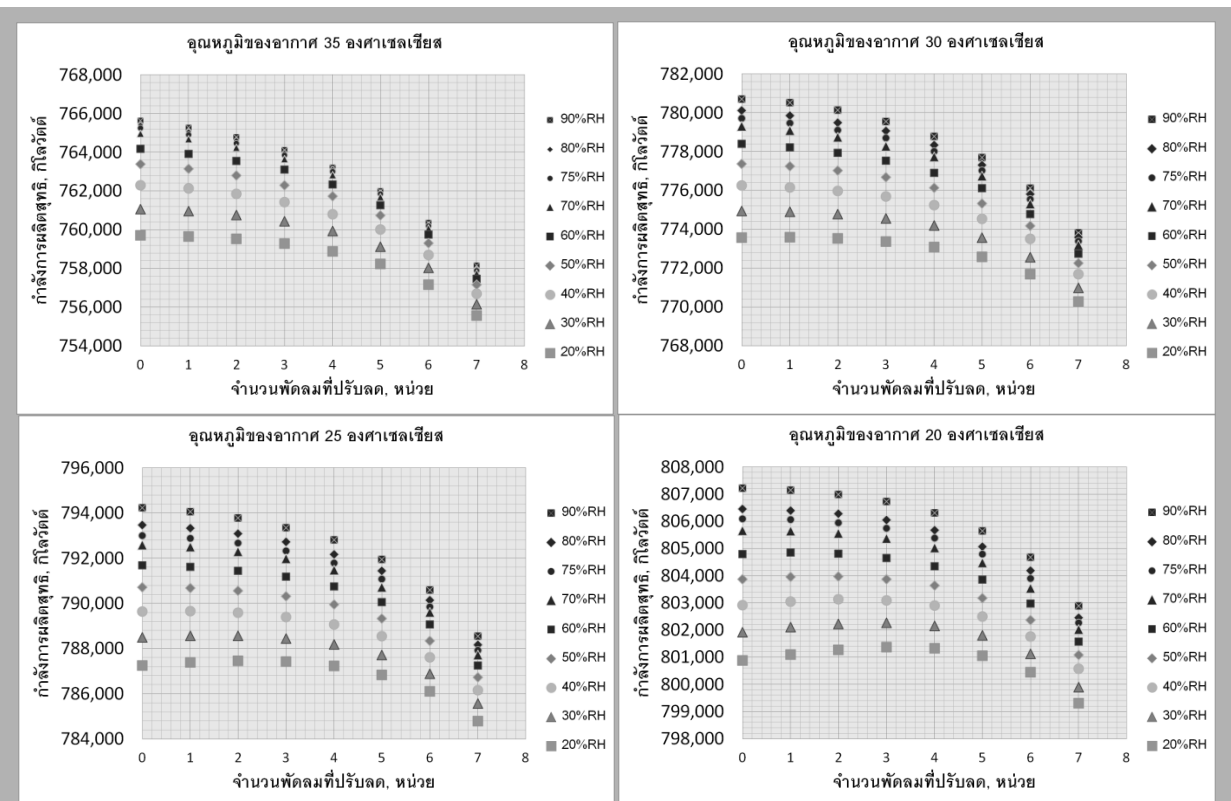
จากการจำลองการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตสุทธิ (กำลังการผลิตรวมที่ได้ของระบบหักด้วยกำลังไฟฟ้าที่ขับพัดลมของหอทำความเย็น) และจำนวนพัดลมที่ทำการปรับลด ในการเดินเครื่อง โดยทำการจำลองสภาวะการเดินเครื่องที่กำลังผลิตร้อยละ 50, 75 และกำลังการผลิตฐาน ผลจากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิกระเปาะแห้งพร้อมทั้งปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะของอากาศ

จากผลการศึกษา ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของอากาศ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ 20, 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส รวมทั้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลดังรูปที่ 4 และพบว่าลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ปรับลดกับกำลังการผลิตสุทธิจะแบ่งออกเป็นสองลักษณะ ดังต่อไปนี้

ลักษณะแรก กำลังการผลิตสุทธิจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มจำนวนการปิดพัดลม จากรูปที่ 4 (ซ้ายบน) พบว่าที่อุณหภูมิของอากาศ 35 องศาเซลเซียส ที่ทุกระดับของความชื้นสัมพัทธ์ กำลังการผลิตสุทธิจะมีค่าสูงสุดเมื่อไม่ปิดพัดลม เนื่องจากการลดปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านหอทำความเย็นส่งผลให้สมรรถนะของหอทำความเย็นลดลง

ลักษณะที่สอง กำลังการผลิตจะมีค่าสูงสุดเมื่อปิดพัดลมที่จำนวนหนึ่ง จากรูปที่ 4 (ขวาล่าง) ที่อุณหภูมิของอากาศ 20 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ปิดพัดลมกำลังการผลิตสุทธิที่ได้คือ 800,875 กิโลวัตต์ หากปิดพัดลมจำนวน 3 หน่วย ส่งผลให้กำลังการผลิตสุทธิ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 801,364 กิโลวัตต์ และเมื่อปิดพัดลมจำนวน 7 หน่วย กำลังการผลิตจะลดลงเหลือ 799,305 กิโลวัตต์ จากลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าวเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะเปียกซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมรรถนะของหอทำความเย็น โดยอุณหภูมิของน้ำเย็นจะต้องต่ำเพียงพอที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิที่ระบอบได้ประโยชน์สูงสุด แต่หากการระบายความร้อนของน้ำหล่อเย็นทำให้ความดันภายในคอนเดนเซอร์ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมจนเกิดการสูญเสียพลังงานของไอน้ำจะทำให้กำลังการผลิตจากที่ได้จากกังหันไอน้ำลดลง

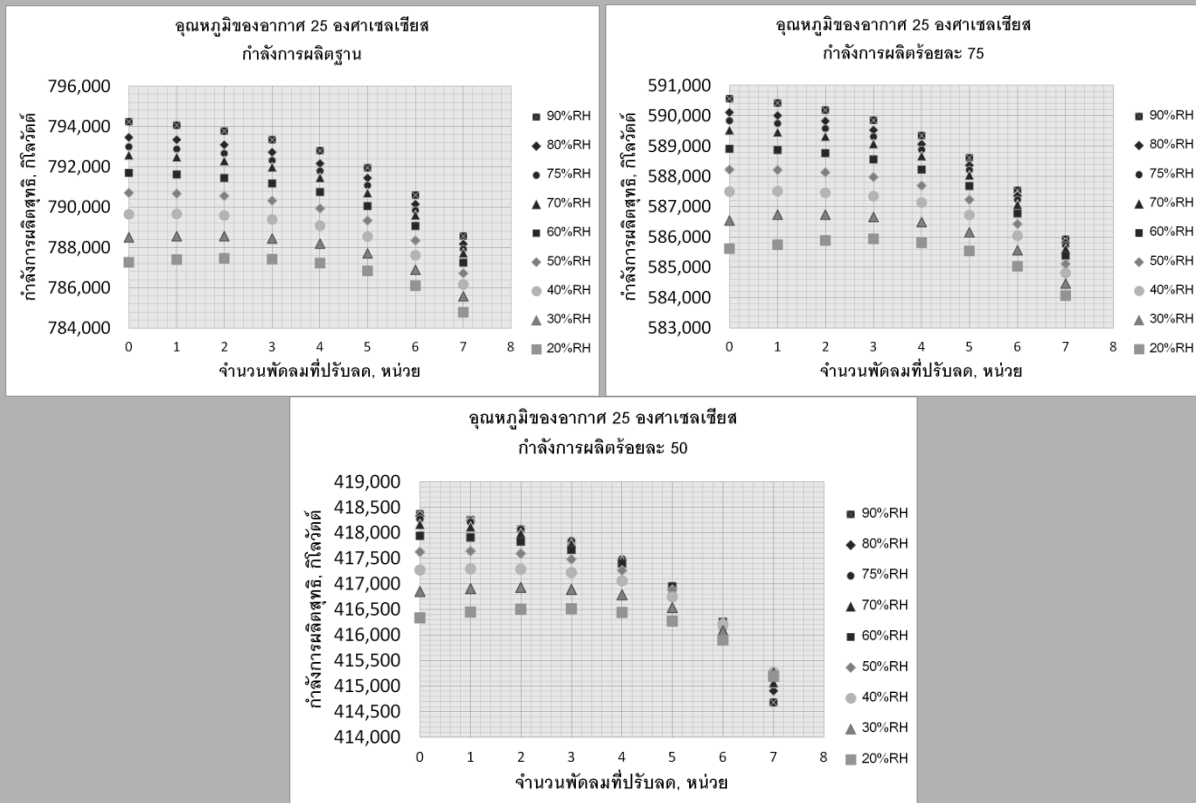


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ปรับลดและกำลังการผลิตสุทธิที่กำลังการผลิตฐาน ที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 35 องศาเซลเซียส (ซ้ายบน) 30 องศาเซลเซียส (ขวบน) 25 องศาเซลเซียส (ซ้ายล่าง) และ 20 องศาเซลเซียส (ขวาล่าง)

4.2.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงร้อยละของกำลังการผลิต

ผลการจำลองการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าที่กำลังการผลิตฐานพบว่าระบบจะได้กำลังการผลิตสุทธิสูงสุดเมื่อปรับลดจำนวนพัดลมลงที่ค่าหนึ่ง แต่เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นแล้วจำนวนพัดลมปรับลดได้จะลดลง ซึ่งจากการจำลองการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าที่กำลังการผลิตร้อยละ 75 และ 50 ก็แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่ในกรณีที่กำลังการผลิตลดลงที่ร้อยละ 50 ดังรูปที่ 5 (ล่าง) เมื่อปรับลดพัดลมจำนวน 6 หน่วย ในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงพบว่า ค่าสูงสุดและต่ำสุดของกำลังการผลิตสุทธิมีค่าแตกต่างกัน 500 กิโลวัตต์ ในขณะที่ค่าแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดของกำลังการผลิตสุทธิที่กำลังการผลิตร้อยละ 75 และกำลังการผลิตฐาน คือ 2,500 และ 5,000 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ดังนั้นการปรับลดจำนวนพัดลมเมื่อเดินเครื่องโรงไฟฟ้าที่ร้อยละของกำลังการผลิตต่ำลงจะส่งผลให้กำลังการผลิตสุทธิลดลง

จากรูปที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลจากกราฟที่สภาวะอากาศเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่กำลังการผลิตร้อยละ 50 จะได้กำลังการผลิตสุทธิสูงสุดเมื่อเปิดพัดลม 3 หน่วย ในขณะที่กำลังผลิตร้อยละ 75 และกำลังการผลิตฐาน ระบบจะได้กำลังการผลิตสุทธิสูงสุดเมื่อเปิดพัดลม 2 หน่วย จากกรณีนี้ทำให้ทราบได้ว่า เมื่อโรงไฟฟ้าเดินเครื่องที่ร้อยละของกำลังการผลิตลดลงจะสามารถปรับลดจำนวนพัดลมได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากภาระทางความร้อนที่หอทำความเย็นได้รับนั้นมีปริมาณลดลง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ปรับลดและกำลังการผลิตสุทธิ ที่กำลังการผลิตฐาน (ซ้ายบน) กำลังการผลิตร้อยละ 75 (ขวาบน) และกำลังการผลิตร้อยละ 50 (ล่าง) ที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 25 องศาเซลเซียส

4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ปรับลดและกำลังการผลิตสุทธิ

จากการจำลองการเดินเครื่องด้วยโปรแกรมในกรณีที่ร้อยละของกำลังการผลิตและสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงโดยปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น สามารถหาจำนวนพัดลมที่ปรับลดได้ในแต่ละสภาวะที่จะทำให้โรงไฟฟ้าได้กำลังการผลิตสุทธิสูงสุด โดยการหาสมการทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ปรับลด (x) กับกำลังการผลิตสุทธิ (y) ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองของแต่ละสภาวะ ซึ่งความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าวมีลักษณะเป็นฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสี่สำหรับสองตัวแปร ดังสมการที่ 2

$$y = f(x) = P_4(x) = a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x + a_5 \quad (2)$$

และการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน ซึ่งจะเป็นจำนวนพัดลมที่สามารถปรับลดได้ ดังสมการที่ 3

$$f'(x) = 0; x \geq 0 \quad (3)$$

ตัวอย่างความสัมพันธ์ของข้อมูลของกรณีศึกษาที่ร้อยละกำลังการผลิตฐาน เมื่ออากาศมีอุณหภูมิ กระเปาะแห้ง 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 75 เปอร์เซ็นต์ แสดงไว้ดังสมการที่ 4

$$y = -3.0531x^4 + 23.469x^3 - 117.81x^2 - 3.9379x + 792993 \quad (4)$$

เพื่อหาจำนวนพัดลมที่สามารถปรับลดได้ที่จะทำให้โรงไฟฟ้าได้กำลังการผลิตสุทธิสูงสุด โดยหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน ได้ดังสมการที่ 5

$$y = f'(x) = -12.2124x^3 + 70.407x^2 - 235.62x - 3.9379 = 0; x \geq 0 \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 จะได้กำลังการผลิตสูงสุดเมื่อไม่ปิดพัดลม ($X = 0$)

จากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมที่ปรับลดและกำลังการผลิตสุทธิที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง แสดงผลการวิเคราะห์จำนวนพัดลมที่ปรับลดได้ที่สภาวะต่างๆ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์จำนวนพัดลมที่ปรับลดที่ทำให้โรงไฟฟ้าได้กำลังการผลิตสุทธิสูงสุดและอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่สภาวะอากาศและร้อยละกำลังการผลิตต่างๆ

ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)											
	20			25			30			35		
	ร้อยละของกำลังการผลิต			ร้อยละของกำลังการผลิต			ร้อยละของกำลังการผลิต			ร้อยละของกำลังการผลิต		
	50	75	100	50	75	100	50	75	100	50	75	100
20	4	4	3	3	3	2	1	1	1	0	0	0
	9.3			12.5			15.7			18.9		
30	3	3	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	10.9			14.4			18.0			21.5		
40	3	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	12.4			16.2			20.1			23.9		
50	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	13.8			17.9			22.0			26.1		
60	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15.1			19.5			23.8			28.2		
70	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16.4			21.0			25.5			30.1		
75	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17.1			21.7			26.3			31.0		
80	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17.7			22.4			27.1			31.8		
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18.9			23.7			28.6			33.5		

5.สรุปผล

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัดลมสำหรับหอทำความเย็นชนิดใช้พัดลมดูดอากาศชนิด Multiple Cells และกำลังการผลิตสุทธิของโรงไฟฟ้า ผ่านโปรแกรมแบบจำลองโรงไฟฟ้า เมื่อปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของหอทำความเย็น คือ สภาวะของอากาศและร้อยละของกำลังการผลิต ทำการทดสอบเมื่อสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงโดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ และพิจารณาเป็นอุณหภูมิกระเปาะเปียกซึ่งเป็นปัจจัยมีความสำคัญต่อสมรรถนะของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบใช้น้ำระเหย เนื่องจากอุณหภูมิกระเปาะ

เป๊ยกเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิต่ำสุดของกระบวนการทำงานของหอทำความเย็น จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อโรงไฟฟ้าเดินเครื่องที่ร้อยละกำลังการผลิตฐานและอากาศมีอุณหภูมิกระเปาะเป๊ยกต่ำกว่า 16 องศาเซลเซียส สามารถทำการปรับลดจำนวนพัดลมจากการเดินพัดลมครบทุกหน่วยได้ คือ เมื่ออากาศมีอุณหภูมิกระเปาะเป๊ยกอยู่ในช่วง 14 ถึง 16 องศาเซลเซียส จะสามารถปิดพัดลมได้ 1 หน่วย ซึ่งได้กำลังการผลิตสุทธิสูงกว่าการเปิดพัดลมครบทุกหน่วย เช่นเดียวกับที่กำลังการผลิตร้อยละ 75 และ 50 เมื่ออากาศมีอุณหภูมิกระเปาะเป๊ยกต่ำกว่า 17 และ 18 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากกรณีที่โรงไฟฟ้าเดินเครื่องแตกต่างจากสภาวะที่ออกแบบ ภาระความร้อนที่หอทำความเย็นได้รับจึงมีค่าน้อยกว่าที่สภาวะออกแบบ และในบางกรณีที่หอทำความเย็นได้ถูกออกแบบให้มีพัดลมสำรองไว้เพื่อรองรับสมรรถนะตามสภาวะที่ถูกออกแบบ แต่ในสภาวะการเดินเครื่องจริงนั้นไม่ได้เดินเครื่องที่สภาวะออกแบบ ดังนั้น จึงสามารถที่จะปรับลดจำนวนของพัดลมที่ใช้งานให้เหมาะสมกับภาระที่หอทำความเย็นได้รับ ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า ในกรณีที่โรงไฟฟ้าเดินเครื่องที่กำลังการผลิตร้อยละ 50 และอากาศมีอุณหภูมิกระเปาะเป๊ยกต่ำกว่า 12 องศาเซลเซียส จะสามารถลดจำนวนพัดลมที่ใช้งานได้ 3 หน่วย และทำให้ระบบได้กำลังการผลิตสุทธิเพิ่มขึ้น 180 กิโลวัตต์ จากการใช้งานพัดลมครบทุกหน่วย

จากผลการศึกษาผ่านแบบจำลองโรงไฟฟ้าในครั้งนี้จึงสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมการใช้งานจำนวนพัดลมสำหรับหอทำความเย็น ถึงแม้ปริมาณการใช้พลังงานจากพัดลมมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบแต่ก็เป็นแนวทางหนึ่งในการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการเดินเครื่องระบบในโรงไฟฟ้า

บรรณานุกรม

- [1] R. R. Gay, C. A. Palmer, and M. R. Erbes, Power Plant Performance Monitoring P.O. Box 8520, Woodland, CA 95776: R-Squared Publishing, 2004.
- [2] H. U. Ugwu, "Design of an Efficient Cooling Tower for Alaoji Power Plant, International Organization of Scientific Research Journal of Engineering, vol. 2, pp. 731-737, 2012.
- [3] S. Poomprasert, N. Pannucharoenwong, and C. Benjapiyaporn, "Energy Conservation Technique in Ice Making Machine by Modifying a Blade of Cooling Tower," presented at the Graduate Research Conference Khon Kaen University, 2012.
- [4] M. Lakovic, M. Stojiljkovic, S. Lakovic, V. Stefanovic, and D. Mitrovic, "Impact of the cold end operating conditions on energy efficiency of the steam power plants," Thermal Science, vol. 14, pp. 53-66, 2010.
- [5] J. Koch and L. W. Watson, "An Improved Cooling Tower Optimization Guideline Based on Performance Test Data," presented at the EPRI-Heat Rate Improvement Conference Baltimore, MD, 1998.
- [6] L. GE Enter Software, GateCycle™ 5.4 Getting Started & Installation Guide, ed, 1989 - 2001.
- [7] J. C. Hensley, Cooling Tower Fundamentals. SPX Cooling Technologies, Inc., Overland Park, Kansas USA: SPX Cooling Technologies, Inc., 2009.
- [8] K. Kavney, J. Lesiuk, and J. Wright, "Steam Turbine 34.5-Inch Low-Pressure Section Upgrade," vol. GER-4269, ed. GE Energy Atlanta, GA: GE Energy, 2006.
- [9] "Performance Test Procedure South Bangkok Combined Cycle Power Plant Block III ", ed: Mitsubishi Heavy Industries, LTD., 2010.
- [10] R. C. Reid, J. M. Prausnitz, and B. E. Poling, The properties of gases and liquids. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [11] W. Wagner and A. Kruse, Properties of Water and Steam, The Industrial Standard IAPWS-IF97, ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998.
- [12] J. M.W. Chase, NIST-JANAF Thermochemical Tables Fourth Edition, American Institute of Physics, 1998.