

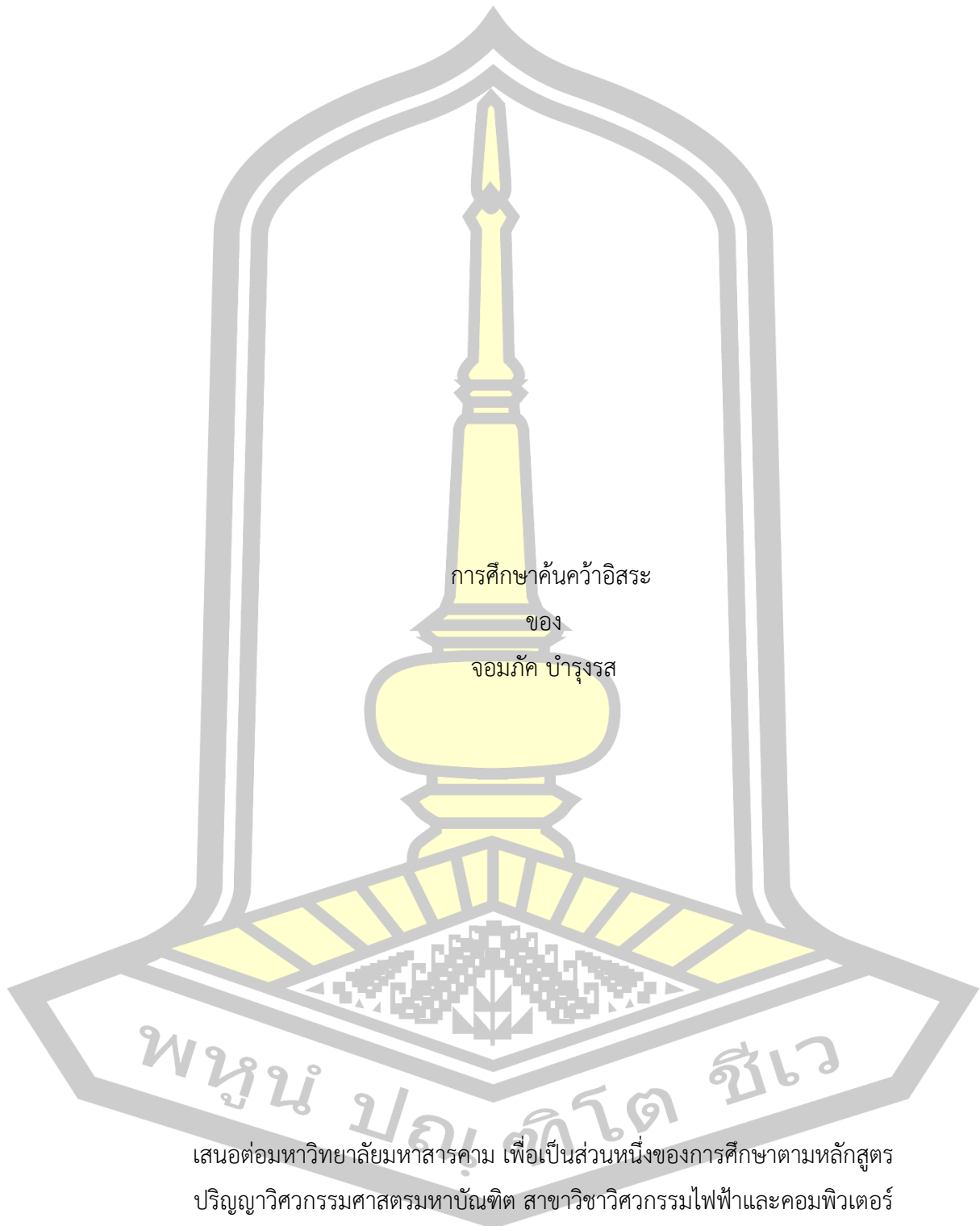
การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในระบบ

การศึกษาค้นคว้าอิสระ  
ของ  
จอมศักดิ์ บำรุงรส

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในระบบ

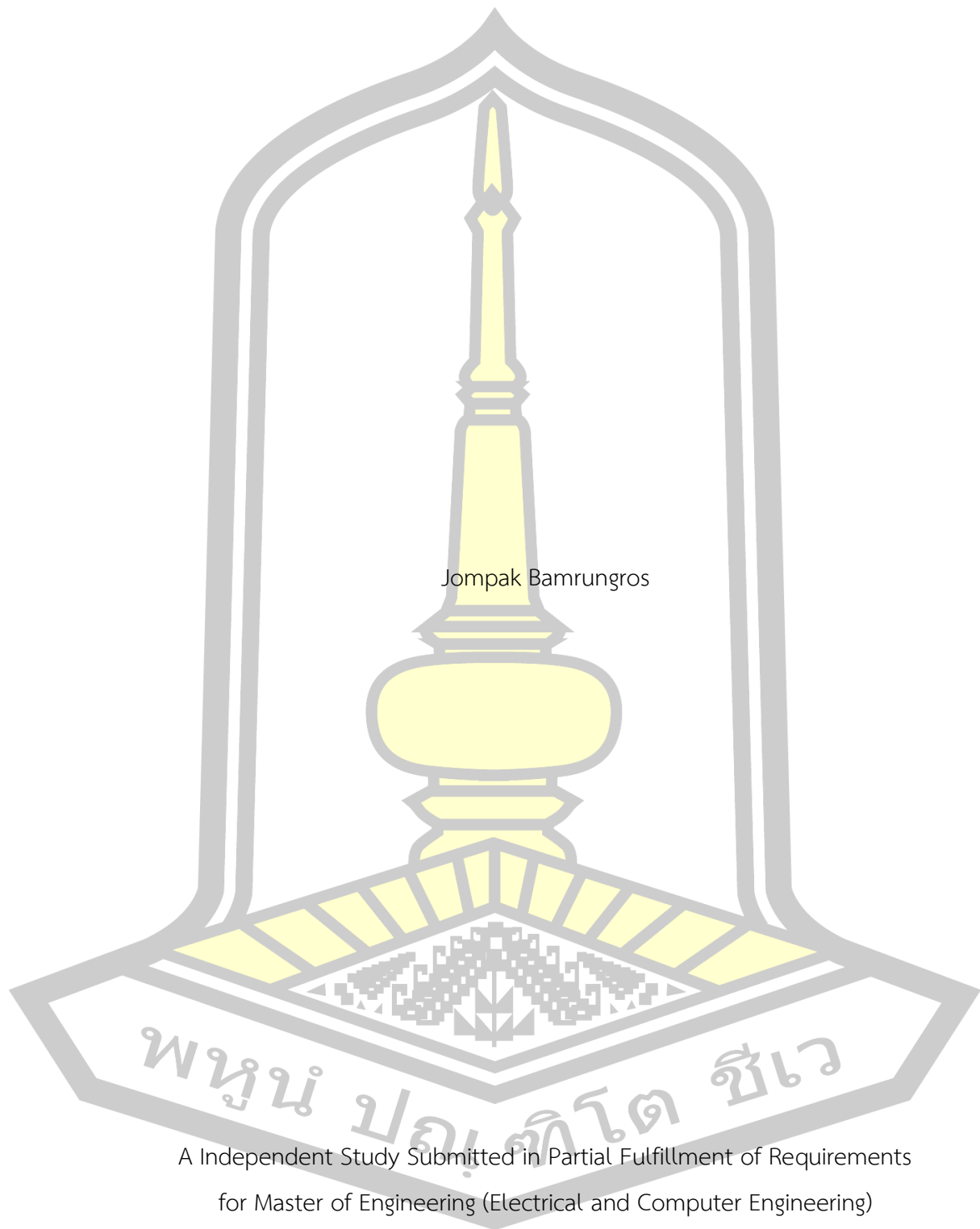


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Analysis and Evaluation of Boiler Efficiency Based on Relevant System Variables



Jompak Bamrungros

A Independent Study Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

November 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบการศึกษาค้นคว้าอิสระ ได้พิจารณาการศึกษาค้นคว้าอิสระของนาย  
จอมกัศ บำรุงรส แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อติเรก จันตะคุณ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. บัญชา วัฒนะ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นวรัตน์ พิลาดง )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

.....  
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวิช )

.....  
(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์ )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

|                  |                                                                                |            |                             |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------|
| ชื่อเรื่อง       | การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยอาศัยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในระบบ |            |                             |
| ผู้วิจัย         | จอมภัก บำรุงรส                                                                 |            |                             |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัญชา วัฒนะ                                             |            |                             |
| ปริญญา           | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต                                                         | สาขาวิชา   | วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ |
| มหาวิทยาลัย      | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                                                           | ปีที่พิมพ์ | 2568                        |

### บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การทำงานหลักกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำชนิดท่อไฟ ขนาดกำลังการผลิตไอน้ำ 22 ตันต่อชั่วโมง ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ข้อมูลได้มาจากเซนเซอร์ในโรงงานผ่านระบบ WinCC และ Node-RED และถูกจัดเก็บในฐานข้อมูล SQL เพื่อการวิเคราะห์ การคำนวณประสิทธิภาพใช้วิธีทางอ้อม โดยอ้างอิงค่าจากเครื่องวิเคราะห์การเผาไหม้ TESTO 350 จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ เพื่อระบุพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ และพัฒนาแบบจำลองการทำนายด้วยการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่แม่นยำที่สุดประกอบด้วยตัวแปรอิสระ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำป้อน (feed water flow) ค่าภาระภายใน (internal load) อุณหภูมิโดยรอบ (ambient temperature) ปริมาณออกซิเจน (oxygen content) และอุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (flue gas temperature) แบบจำลองนี้แสดงศักยภาพการทำนายที่ยอดเยี่ยม โดยมีค่า  $R^2=0.9982$  สะท้อนถึงความแม่นยำสูงและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สำหรับระบบตรวจสอบและควบคุมแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหม้อต้มและการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ, หม้อไอน้ำไอน้ำอุตสาหกรรม, การวิเคราะห์การเผาไหม้, การวิเคราะห์ความสัมพันธ์, แบบจำลองการถดถอย

|                   |                                                                                 |              |                                     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| <b>TITLE</b>      | Analysis and Evaluation of Boiler Efficiency Based on Relevant System Variables |              |                                     |
| <b>AUTHOR</b>     | Jompak Bamrungros                                                               |              |                                     |
| <b>ADVISORS</b>   | Assistant Professor Buncha Wattana , Ph.D.                                      |              |                                     |
| <b>DEGREE</b>     | Master of Engineering                                                           | <b>MAJOR</b> | Electrical and Computer Engineering |
| <b>UNIVERSITY</b> | Maharakham University                                                           | <b>YEAR</b>  | 2025                                |

### ABSTRACT

Boiler efficiency plays a critical role in optimizing energy usage and minimizing fuel consumption in industrial operations. This study investigates the relationship between key operating parameters and the combustion efficiency of natural gas-fired fire-tube steam boilers, each with a capacity of 22 tons per hour. Data from existing plant sensors were collected via the WinCC and Node-RED platforms and stored in a SQL database for further analysis. Efficiency was calculated using the indirect method, as implemented in the TESTO 350 combustion analyzer. A correlation analysis was performed to identify parameters with significant influence on efficiency, followed by multiple linear regression to develop a predictive model. The final, most accurate regression model included feed water flow, internal load, ambient temperature, oxygen content, and flue gas temperature as independent variables. This model demonstrated exceptional predictive capability, with R<sup>2</sup> values of 0.9982 . These results highlight the potential for real-time monitoring and control strategies to significantly improve boiler performance and energy efficiency in industrial settings.

Keyword : Boiler efficiency, industrial steam boiler, combustion analysis, Correlation analysis, Regression model

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางการเงินจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และ บริษัท สิงห์ เบเวอเรจ จำกัด ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่ดำเนินการวิจัย ทั้งนี้ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยและผู้เขียนร่วมเป็นพิเศษ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลืออันมีค่าในการจัดทำงานวิจัยนี้

จอมภัก บำรุงรส



## สารบัญ

|                                                                                   | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                              | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                           | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                              | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                                       | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                                                  | ฌ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                                                 | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                                 | 1    |
| 1.1 หลักการและเหตุผล .....                                                        | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ .....                                                            | 1    |
| 1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย .....                                                 | 2    |
| 1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย .....                                                    | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                                | 4    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                       | 5    |
| 2.1 การวิเคราะห์การสูญเสียในหม้อต้มไอน้ำ.....                                     | 5    |
| 2.1.1 วิธีการประเมินแบบตรง (Direct Method) .....                                  | 5    |
| 2.1.2 วิธีการประเมินแบบอ้อม (Indirect Method) .....                               | 6    |
| 2.1.3 วิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้เครื่องมือวัด .....                          | 7    |
| 2.2 สหสัมพันธ์ (Correlation).....                                                 | 10   |
| 2.3 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis).....                               | 10   |
| 2.3.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) . | 11   |
| 2.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (Multiple Linear Regression).....        | 11   |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....                                           | 14 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....                                            | 24 |
| 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....                                           | 24 |
| 3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล .....                                    | 25 |
| 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ และ การสร้างสมการตัวแทน ..... | 25 |
| 3.2 การเก็บข้อมูลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง .....                                  | 25 |
| 3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์และทิศทางของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ .....        | 26 |
| 3.4 ทดลองนำตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพมาสร้างสมการตัวแทน .....                 | 26 |
| 3.5 นำสมการตัวแทนที่ได้จากการทดลองมาเทียบผลกับการวัดจริง .....                 | 26 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย .....                                                       | 28 |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ .....                                           | 28 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอย .....                                               | 30 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....                                     | 35 |
| บรรณานุกรม .....                                                               | 37 |
| ประวัติผู้เขียน .....                                                          | 40 |



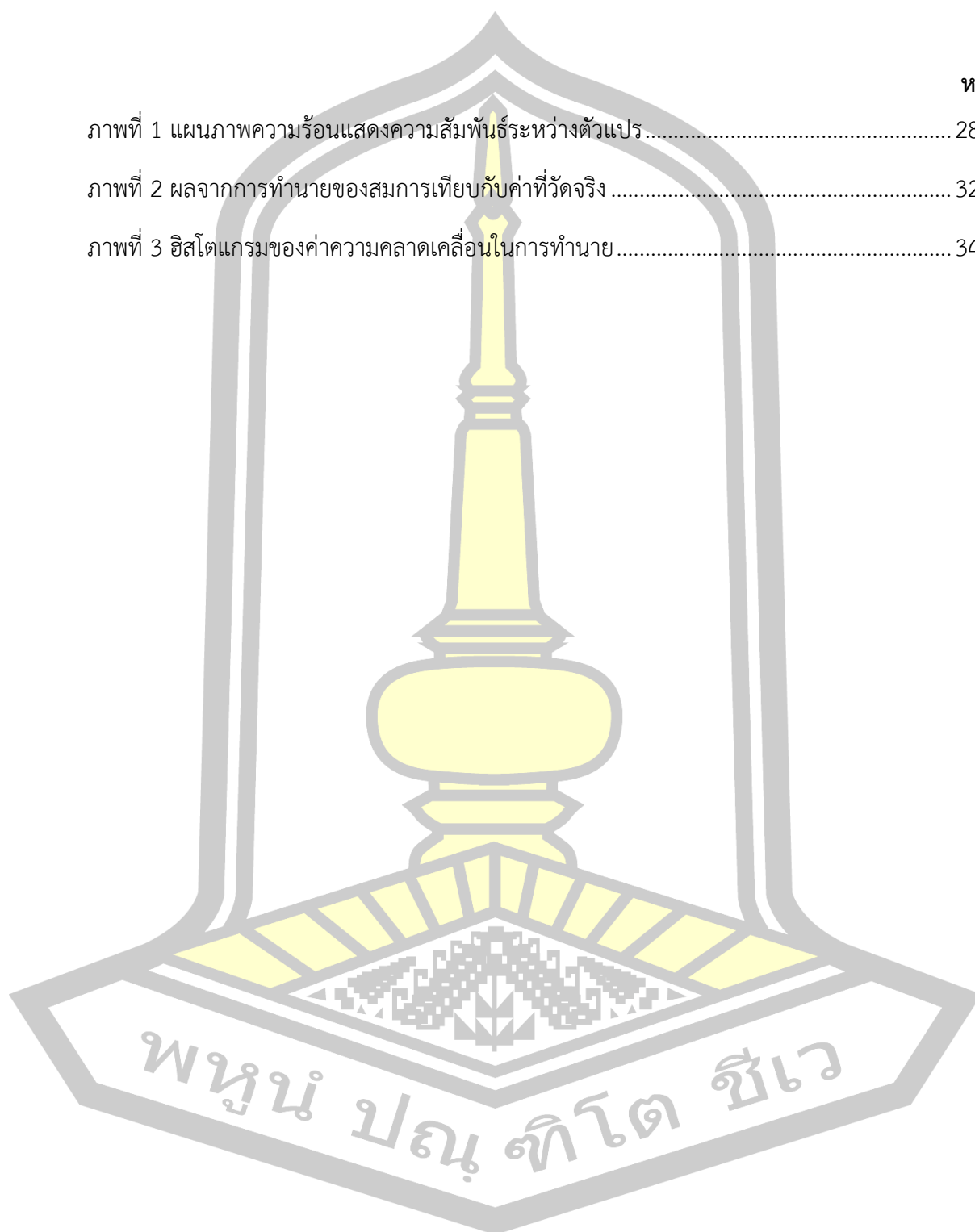
## สารบัญตาราง

|                                                                                        | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....                                                   | 3    |
| ตารางที่ 2 ค่าคงที่และค่าจำเพาะที่เกี่ยวข้อง.....                                      | 9    |
| ตารางที่ 3 ตารางสรุประดับและทิศทางของความสัมพันธ์ของตัวแปรกับประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ .... | 30   |
| ตารางที่ 4 สมรรถนะของแบบจำลอง .....                                                    | 33   |



## สารบัญรูปภาพ

|                                                           | หน้า |
|-----------------------------------------------------------|------|
| ภาพที่ 1 แผนภาพความร้อนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร..... | 28   |
| ภาพที่ 2 ผลจากการทำนายของสมการเทียบกับค่าที่วัดจริง ..... | 32   |
| ภาพที่ 3 ฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย .....   | 34   |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

หม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตไอน้ำสำหรับโรงงานผลิตเบียร์ โดยเฉพาะในขั้นตอนสำคัญต่าง ๆ เช่น การต้มน้ำเพื่อเตรียมวัตถุดิบ การปรับอุณหภูมิในกระบวนการหมักที่ต้องการความแม่นยำเพื่อให้ได้รสชาติที่คงที่ และการใช้ไอน้ำเป็นแหล่งพลังงานในการทำความร้อนสำหรับอุปกรณ์และกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงาน การทำงานของหม้อไอน้ำที่มีประสิทธิภาพและความเสถียร ไม่เพียงแต่ช่วยให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างราบรื่น แต่ยังช่วยลดต้นทุนพลังงาน ลดความสูญเสียทางความร้อน และเพิ่มความสามารถในการควบคุมการผลิต การบำรุงรักษาเชิงป้องกันและการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น ออกซิเจนในก๊าซไอเสีย ( $O_2$ ) และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ช่วยให้เราสามารถตรวจจับปัญหาและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำได้อย่างเหมาะสม

งานวิจัยนี้จึงศึกษามุ่งเน้นการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหม้อไอน้ำ เพื่อศึกษาว่าตัวแปรใดส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมากที่สุด โดยใช้การวัดค่าต่าง ๆ และแสดงผลแบบเรียลไทม์ เพื่อช่วยตรวจสอบและสามารถวางแผนปรับปรุงกระบวนการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการการทำงานของหม้อไอน้ำในโรงงาน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำว่าตัวแปรเหล่านั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในทิศทางใด
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาสมการตัวแทนที่สามารถใช้ประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อย่างแม่นยำ โดยอิงจากตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ
- 1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากสมการที่พัฒนาขึ้นกับค่าที่วัดได้จริงจากระบบหม้อไอน้ำ เพื่อยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินและตรวจสอบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยกำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 งานวิจัยนี้ดำเนินการกับหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ ขนาดกำลังการผลิตไอน้ำ 22 ตันต่อชั่วโมง โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้
- 1.3.2 การประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ใช้วิธีการคำนวณแบบอ้อมโดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350
- 1.3.3 เก็บข้อมูลของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำ
- 1.3.4 ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลและใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถใช้ในการทำนายและประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

### 1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่นและบรรลุตามวัตถุประสงค์ จึงได้ออกแบบแผนการดำเนินงานวิจัยไว้เป็นแนวทางการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาการทำงานของหม้อไอน้ำ
- 1.4.3 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.4 นำข้อมูลที่รวบรวมมาวิเคราะห์
- 1.4.5 สรุปและประเมินผลการดำเนินงานวิจัย



### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้สามารถระบุและวิเคราะห์หัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อย่างชัดเจน
- 1.5.2 ช่วยให้การประเมินและสามารถวางแผนปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำทำได้ง่ายขึ้น
- 1.5.3 เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบและควบคุมระบบหม้อไอน้ำ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หม้อต้มไอน้ำเป็นอุปกรณ์สำคัญในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การผลิตไฟฟ้าและกระบวนการผลิตอื่น ๆ ที่ต้องการพลังงานความร้อน ประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประหยัดพลังงานและลดต้นทุนการผลิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อต้มไอน้ำโดยใช้โมเดลเชิงสถิติและวิธีการที่พัฒนามาจากข้อมูลเชิงลึกที่เกี่ยวข้อง เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง โดยมีทฤษฎีและงานวิจัยในหัวข้อต่อไปนี้

#### 2.1 การวิเคราะห์การสูญเสียในหม้อต้มไอน้ำ

การวิเคราะห์การสูญเสียในหม้อไอน้ำนั้นมีหลายหลายวิธีที่ช่วยในการประเมิน โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอ วิธีการประเมินประสิทธิภาพ 3 รูปแบบ ได้แก่ วิธีการประเมินแบบตรง (Direct Method) วิธีการประเมินแบบอ้อม (Indirect Method) และ การประเมินโดยใช้เครื่องมือ Testo 350

##### 2.1.1 วิธีการประเมินแบบตรง (Direct Method)

วิธีการประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบตรงคำนวณจากเปรียบเทียบพลังงานที่อยู่ในไอน้ำที่ออกจากระบบ (Steam Output) กับพลังงานที่ได้รับจากเชื้อเพลิง ดังสมการที่ (2.1)

$$\eta_{direct} = \frac{Q_w}{Q_c} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

โดยที่

$\eta_{direct}$

คือประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบตรง

$Q_w$

คือพลังงานจากไอน้ำ

$Q_c$

คือพลังงานจากเชื้อเพลิง

การคำนวณประสิทธิภาพแบบตรงต้องการข้อมูลที่แม่นยำจากตัวแปรหลายตัว เช่น อัตราการไหลของน้ำเข้าและออกจากระบบ การไหลของ Blowdown ความดันและอุณหภูมิของกระแสต่าง ๆ การไหลของเชื้อเพลิง และจำเป็นต้องทราบค่าความร้อนสูงสุด (Gross Calorific Value: GCV) ซึ่งรวมถึงการสูญเสียความร้อนที่ระเหยไปจากน้ำ ในการคำนวณพลังงานในเชื้อเพลิงอีกด้วย

การคำนวณพลังงานจากไอน้ำสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.2)

$$Q_w = \sum Mr_{s_{z2}} \cdot (h_{s_{z2}} - h_{E_{z1}}) \quad (2.2)$$

โดยที่

$Mr_{s_{z2}}$  คืออัตราการไหลของมวลของของเหลวที่ออกจากระบบ

$h_{s_{z2}}$  คือเอนทัลปีจำเพาะของของเหลวที่ออกจากระบบ

$h_{E_{z1}}$  คือเอนทัลปีจำเพาะของของเหลวที่เข้าสู่ระบบ

การคำนวณพลังงานที่ได้รับจากเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.3)

$$Q_c = M_{rF} \cdot GCV \quad (2.3)$$

โดยที่

$M_{rF}$  คืออัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง

$GCV$  คือค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิง

#### 2.1.2 วิธีการประเมินแบบอ้อม (Indirect Method)

การคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบอ้อมใช้หลักการพิจารณาการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ โดยถือว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำในอุดมคติคือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ และการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ จะถูกนำมาหักลบออกเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพจริงของหม้อไอน้ำ ข้อดีของการคำนวณประสิทธิภาพทางอ้อมคือหากเกิดข้อผิดพลาดจากการวัดค่าต่างๆ จะไม่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญและยังแยกประเภทของการสูญเสียออกจากกันอย่างชัดเจนอีกด้วย สูตรการคำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\eta_i = 100 - \sum L_n \quad (2.4)$$

$$\sum L_n = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + \dots \quad (2.5)$$

โดยที่

$\eta_{indirect}$  คือประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบอ้อม

$L_n$  คือค่าการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ

ตัวอย่างของการคำนวณการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ

การสูญเสียความร้อนผ่านก๊าซไอเสียแห้ง (Dry Flue Gas Loss :  $L_1$ )

$$L_1 = \frac{m_{FG} \cdot C_{pFG} \cdot (T_{FG} - T_a)}{GCV} \times 100 \quad (2.6)$$

การสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (Moisture and Hydrogen Loss :  $L_2$ )

$$L_2 = \frac{9 \times H_2 \times (584 + C_p \times (T_{FG} - T_a))}{GCV} \times 100 \quad (2.7)$$

การสูญเสียการสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง (Incomplete Combustion Loss :  $L_3$ )

$$L_3 = \frac{M \cdot (584 + C_p \cdot (T_{FG} - T_a))}{GCV} \times 100 \quad (2.8)$$

### 2.1.3 วิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้เครื่องมือวัด

การประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยใช้เครื่องมือวัดเป็นอีกวิธีที่ช่วยให้ได้ข้อมูลของตัวแปรที่สำคัญเกี่ยวกับการทำงานของหม้อไอน้ำแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกและแม่นยำในการวิเคราะห์ระบบ เครื่องมือที่ใช้ในโรงงานคือ Testo 350 ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้อย่างละเอียดนอกจากนี้ยังมีความสามารถในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยในคู่มือการใช้งานได้ระบุสูตรการคำนวณไว้ดังนี้

$$\begin{aligned} Eff_G = & \left( \frac{(K_{gr} \cdot (T_{FG} - T_a))}{CO_2} \right) \\ & + \left( \frac{(MH_2O + 9 \cdot H) \cdot (2488 + 2.1 \cdot T_{FG} - 4.2 \cdot T_a)}{Q_{gr} \cdot 1000} \right) \\ & + \left( \frac{K1 \cdot CO}{CO_2 + CO} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}
 Eff_N = & \left( \left( \frac{K_{net} \cdot (T_{FG} - T_a)}{CO_2} \right) \right. \\
 & + \left( \frac{(MH_2O + 9 \cdot H) \cdot (210 + 2.1 \cdot T_{FG} - 4.2 \cdot T_a)}{Q_{net} \cdot 1000} \right. \\
 & \left. \left. + \left( \frac{K1 \cdot Q_{gr} \cdot CO}{Q_{net} \cdot (CO_2 + CO)} \right) \right) \right)
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดยที่

$CO$  คือค่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้

$CO_2$  คือค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้เป็นเปอร์เซ็นต์

$K_{gr}, K_{net}, Q_{gr}, Q_{net}, K1, MH_2O, H$  คือค่าคงที่เฉพาะของเชื้อเพลิง

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ นั้นได้จากการคำนวณ ซึ่งในคู่มือการใช้งานของเครื่องได้ระบุวิธีการคำนวณไว้โดยละเอียด ดังนี้

$$CO_2 = CO_{2max} \cdot \frac{O_{2ref} - O_2}{O_{2ref}} - CO \cdot (1 - 0.01881 \cdot CO_{2max}) \quad (2.11)$$

โดยที่

$CO_{2max}$  คือค่าคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่จำเพาะกับเชื้อเพลิง

$O_{2ref}$  คือค่าอ้างอิงของออกซิเจน

$O_2$  คือค่าออกซิเจนที่วัดได้ในหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

ในสมการทั้งหมดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพด้วยเครื่องมือ Testo 350 จะมีทั้งค่าคงที่และค่าจำเพาะที่เกี่ยวข้อง โดยในคู่มือการใช้งานได้ระบุค่าคงที่เหล่านี้ไว้ในรูปแบบของตาราง ซึ่งแต่ละค่าจะถูกกำหนดตามสูตรที่ใช้ในการคำนวณ แต่ละค่าจะเปลี่ยนแปลงตามเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่และค่าจำเพาะที่เกี่ยวข้อง

| Fuel         | $CO_{2max}$<br>[Vol.%] | $O_{2ref}$<br>[Vol.%] | $K_{gr}$<br>[1/K] | $K_{net}$<br>[1/K] | $K1$<br>[-] | $H$<br>[% by<br>weight] | $MH_2O$<br>[% by<br>weight] | $Q_{gr}$<br>[MJ/kg] | $Q_{net}$<br>[MJ/kg] |
|--------------|------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| ก๊าซธรรมชาติ | 11.90                  | 3.00                  | 0.35              | 0.39               | 40.00       | 24.40                   | 0.00                        | 53.42               | 48.16                |
| ดีเซล        | 15.50                  | 3.00                  | 0.48              | 0.51               | 53.00       | 13.00                   | 0.00                        | 45.60               | 42.80                |
| น้ำมันเตา    | 15.80                  | 3.00                  | 0.51              | 0.54               | 54.00       | 11.50                   | 0.20                        | 42.90               | 40.50                |
| ถ่านหิน      | 18.40                  | 7.00                  | 0.62              | 0.65               | 63.00       | 4.00                    | 13.00                       | 26.75               | 25.50                |
| แก๊ส         | 22.40                  | 7.00                  | 0.72              | 0.77               | 76.21       | 3.00                    | 9.80                        | 12.98               | 12.21                |
| ไม้          | 19.90                  | 7.00                  | 0.62              | 0.73               | 67.58       | 3.80                    | 40.00                       | 11.30               | 9.63                 |
| LPG          | 13.80                  | 3.00                  | 0.42              | 0.45               | 48.00       | 18.20                   | 0.00                        | 50.00               | 46.30                |
| ก๊าซทดสอบ    | 0.00                   | 0.00                  | 0.00              | 0.00               | 0.00        | 0.00                    | 0.00                        | 0.00                | 0.00                 |
| ชานอ้อย      | 20.77                  | 7.00                  | 0.57              | 0.61               | 70.60       | 2.90                    | 51.00                       | 10.11               | 9.46                 |

จากการศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบเรียลไทม์ของโรงงานแห่งนี้ พบว่า ปัจจุบันใช้วิธีการประเมินแบบตรง (Direct Method) ซึ่งคำนวณจากพลังงานที่เข้าสู่ระบบ เปรียบเทียบกับพลังงานที่ออกมาในรูปของไอน้ำ อย่างไรก็ตาม มีปัญหาสำคัญเกี่ยวกับ ความไม่ สอดคล้องของเครื่องมือวัดมวลของของเหลวที่เข้าสู่และออกจากระบบ ส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดใน การคำนวณ ทำให้ค่าประสิทธิภาพที่ได้ในบางช่วงเวลาสูงกว่า 100% ซึ่งเป็นไปไม่ได้ทางกายภาพ

เนื่องจาก วิธีการประเมินแบบอ้อม (Indirect Method) มีความแม่นยำสูงกว่า และสามารถ แยกแยะปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้ แต่ข้อจำกัดสำคัญคือ ต้องใช้พารามิเตอร์จำนวนมาก เช่น องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย, ความชื้นในเชื้อเพลิง และข้อมูลอื่น ๆ ที่อาจไม่สามารถวัดได้แบบ เรียลไทม์ ดังนั้น จึงเลือกใช้สูตรของ Testo 350 ซึ่งถูกออกแบบมาให้ลดจำนวนตัวแปรที่ต้องใช้ โดย กำหนดค่า องค์ประกอบของก๊าซไอเสียเป็นค่าคงที่ และใช้เซ็นเซอร์วัดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็น เช่น อุณหภูมิก๊าซไอเสีย, CO, CO<sub>2</sub> ซึ่งช่วยให้สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อย่าง แม่นยำขึ้นและนำไปใช้ได้จริงในระบบ

งานวิจัยนี้จะนำข้อมูลจากเซ็นเซอร์ที่มีอยู่ในระบบมาวิเคราะห์ร่วมกับค่าประสิทธิภาพของ หม้อไอน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรใดส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้

สามารถระบุปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของหม้อไอน้ำได้อย่างเป็นระบบ และสามารถนำไปพัฒนาแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบได้ในอนาคต

## 2.2 สหสัมพันธ์ (Correlation)

สหสัมพันธ์เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม โดยมีเป้าหมายเพื่อพิจารณาว่าตัวแปรที่อยู่ในการวิจัยมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ หากมีความสัมพันธ์กันจะต้องพิจารณาว่ามีระดับความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด และเป็นความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันหรือไม่ ในทิศทางตรงกันข้าม การวิเคราะห์สหสัมพันธ์สามารถประเมินได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง +1 เพื่อบ่งชี้ขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยสามารถแปลผลได้ดังนี้

- (1) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.00 หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์กัน
- (2) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ < 0.40 หมายถึง มีความสัมพันธ์น้อย
- (3) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ระหว่าง 0.40 - 0.60 หมายถึง มีความสัมพันธ์ปานกลาง
- (4) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $\geq 0.60$  หมายถึง มีความสัมพันธ์สูง

ระดับของสหสัมพันธ์นี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางในการคาดการณ์หรือวางแผนการวิจัยต่อไป

## 2.3 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพิจารณาว่าตัวแปรอิสระมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามหรือไม่ หากมีความสัมพันธ์ สามารถวัดระดับความสัมพันธ์ได้มากน้อยเพียงใด นอกจากนี้การวิเคราะห์การถดถอยยังสามารถใช้ประมาณค่าหรือพยากรณ์ค่าของตัวแปรหนึ่งโดยอาศัยตัวแปรอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ อย่างไรก็ตามการพยากรณ์จะต้องอาศัยค่าของตัวแปรอิสระที่ถูกกำหนดหรือทราบล่วงหน้าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงลึกหรือการตัดสินใจต่อไป

### 2.3.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรตาม (Y) และ ตัวแปรอิสระ (X) เพียงหนึ่งตัว โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงในรูปของ โมเดลถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ได้ดังนี้

$$Y = b_0 + b_1X \quad (2.12)$$

โดยที่

$Y$  คือ ตัวแปรตาม

$X$  คือ ตัวแปรอิสระ

$b_0$  คือ ค่าคงที่ หรือค่าของ  $Y$  เมื่อ  $X$  เท่ากับ 0

$b_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ  $Y$  เมื่อ  $X$  เปลี่ยนแปลงไป หนึ่งหน่วย

ในการพิจารณาว่าสมการถดถอยที่ได้จะสามารถใช้พยากรณ์ค่าของตัวแปรตามได้ดีเพียงใดนั้น สามารถทำการทดสอบโดยวิธีทางสถิติต่างๆดังนี้

- (1) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination)  $R^2$  ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ยิ่งมีค่าใกล้ 1 มากเท่าใด ยิ่งแสดงว่าสมการถดถอยที่ได้สามารถอธิบายค่าของตัวแปรตามได้ดี
- (2) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (SEE: Standard Error of Estimate) เป็นค่าทางสถิติที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูลรอบๆ เส้นการถดถอย ถ้ามีค่าน้อยหรือใกล้ศูนย์ แสดงว่าการกระจายของข้อมูลรอบๆ เส้นการถดถอยมีค่าน้อย ซึ่งทำให้ค่าประมาณที่ได้มีความถูกต้องสูง

### 2.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (Multiple Linear Regression)

การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการเพื่อพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม (Y) โดยอาศัยตัวแปรอิสระ (X) ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป สมการพื้นฐานของการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \cdots + b_nX_n \quad (2.13)$$

โดยที่

$Y$  คือ ตัวแปรตาม

$X_1, X_2, \dots, X_n$  คือ ตัวแปรอิสระ

$b_0$  คือ ค่าคงที่

$b_1, b_2, \dots, b_n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

ในการพิจารณาว่าสมการถดถอยที่ได้สามารถใช้พยากรณ์ค่าของตัวแปรตามได้ดีเพียงใด สามารถใช้ค่าทางสถิติต่างๆ ได้แก่

(1) สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{1i} - Y_{2i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{1i} - \bar{Y}_1)^2} \quad (2.14)$$

โดยที่

$R^2$  คือสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

$Y_{1i}$  คือค่าที่วัดได้จริงจากหม้อไอน้ำ

$Y_{2i}$  คือค่าที่ได้จากสมการตัวแทน

$\bar{Y}_1$  คือค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้จริง

$n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

โดย  $0 \leq R^2 \leq 1$  และจะมีค่าไม่เพิ่มขึ้นเสมอไป ถ้าตัวแปรอิสระตัวใหม่ที่เพิ่มเข้ามาในโมเดลไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

(2) Mean Squared Error (MSE)

เป็นค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ใช้ในการวัดว่าค่าที่ได้จากสมการเบี่ยงเบนจากค่าที่วัดได้จริงมากน้อยเพียงใด โดยมีสมการดังนี้

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_1 - Y_2)^2 \quad (2.15)$$

โดยที่

**MSE** คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

**$Y_1$**  คือ ค่าที่วัดได้จริงจากหม้อไอน้ำ

**$Y_2$**  คือ ค่าที่ได้จากสมการตัวแทน

**$n$**  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

### (3) Root Mean Squared Error (RMSE)

เป็นค่ารากที่สองของค่า MSE ทำให้สามารถแสดงผลความคลาดเคลื่อนในหน่วยเดียวกับข้อมูลจริง ซึ่งสะดวกต่อการตีความ โดยมีสมการดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_1 - Y_2)^2} \quad (2.16)$$

โดยที่

**RMSE** คือ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

**$Y_1$**  คือ ค่าที่วัดได้จริงจากหม้อไอน้ำ

**$Y_2$**  คือ ค่าที่ได้จากสมการตัวแทน

**$n$**  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

### (4) Mean Absolute Error (MAE)

เป็นค่ารากที่สองของค่า MSE ทำให้สามารถแสดงผลความคลาดเคลื่อนในหน่วยเดียวกับข้อมูลจริง ซึ่งสะดวกต่อการตีความ โดยมีสมการดังนี้

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_1 - Y_2| \quad (2.17)$$

โดยที่

$MAE$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย

$Y_1$  คือ ค่าที่วัดได้จริงจากหม้อไอน้ำ

$Y_2$  คือ ค่าที่ได้จากสมการตัวแทน

$n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

## 2.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำจำเป็นต้องใช้เครื่องมือและเทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ซึ่งรวมถึงตัวแปรด้านพลังงาน ความร้อน และการเผาไหม้ ตลอดจนปัจจัยภายนอกที่อาจมีผลกระทบ เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำได้อย่างแม่นยำ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการวิจัยและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ รวมถึงแนวทางในการพัฒนาระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลที่สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสาระสำคัญที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(Baldi et al., 2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การติดตามประสิทธิภาพพลังงานและการเสื่อมสภาพของหม้อไอน้ำแบบคอนเดนซิงในเวลาเรียลไทม์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือในการติดตามประสิทธิภาพและการตรวจจับปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานของหม้อไอน้ำโดยเฉพาะในระบบที่มีการใช้งานในระยะยาว ซึ่งการตรวจจับปัญหาด้วยการวัดประสิทธิภาพในเวลาจริงนั้นเป็นสิ่งสำคัญในการลดการสูญเสียพลังงานและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำ โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือในการติดตามประสิทธิภาพที่ได้รับการออกแบบให้สามารถประเมินความเสื่อมสภาพของประสิทธิภาพ โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ (Dynamic Modeling) และ การตรวจจับข้อบกพร่อง (Fault Detection) แบบเรียลไทม์ ผลการศึกษาพบว่า หม้อไอน้ำแบบคอนเดนซิงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการใช้ความร้อนที่สูญเสียไปจากก๊าซไอเสีย เพื่อทำให้น้ำที่กลับเข้ามาในหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดการควบแน่น ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 10-12% เมื่อเทียบกับหม้อไอน้ำแบบทั่วไปที่ไม่ได้ใช้เทคโนโลยีการควบแน่นการใช้เครื่องมือการประเมินประสิทธิภาพ ในระยะยาวสามารถช่วยตรวจจับการเสื่อมสภาพของประสิทธิภาพได้ โดยการ

ใช้ แบบจำลองทางพลศาสตร์ ซึ่งจะประเมินการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำในเวลาจริง เพื่อตรวจจับการเสื่อมสภาพของประสิทธิภาพและการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากปัญหาต่างๆ เช่น การสะสมของตะกอนหรือการรั่วของน้ำ

(C.L et al., 2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณเพื่อพยากรณ์การสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางสถิติที่สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อย่างแม่นยำ โดยอาศัยค่าการสูญเสียหลักของหม้อไอน้ำ ซึ่งจะช่วยลดภาระและค่าใช้จ่ายจากการใช้วิธีคำนวณแบบดั้งเดิม เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองคือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression; MLR) โดยมีขั้นตอนในการวิจัยเริ่มจากการ เก็บรวบรวมข้อมูลค่าการสูญเสียของหม้อไอน้ำ จากนั้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียแต่ละประเภทกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยใช้ ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation Matrix) จากนั้นทำการทดสอบปัญหา Multicollinearity เพื่อให้แน่ใจว่าตัวแปรที่เลือกมาไม่มีความสัมพันธ์กันมากเกินไป และนำข้อมูลไปสร้างแบบจำลองทางสถิติ จากนั้นนำไปใช้งานจริงและทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ค่าต่าง ๆ เช่น  $R^2$ , MSE และ RMSE

ผลการดำเนินงานวิจัยพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมากที่สุดคือ การสูญเสียเนื่องจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (L2) ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ -0.932 ซึ่งหมายความว่า หากมีไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงมากขึ้น ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจะลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า  $R^2$  มีค่า 0.935 ซึ่งบ่งบอกว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ถึง 93.5% และค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองต่ำ

(Chayalakshmi et al., 2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การประมาณค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยใช้ปริมาณไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา วิธีการคำนวณที่ง่ายขึ้นและมีความแม่นยำสูง สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงกับค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ซอฟต์แวร์ DASY Lab และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) โดยมีขั้นตอนสำคัญของงานวิจัยดังนี้

- (1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากอุตสาหกรรมจริง โดยใช้ข้อมูลจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ JK Cement ซึ่งมีหม้อไอน้ำแบบเผาไหม้ถ่านหินที่สามารถผลิตไอน้ำได้ 110 TPH

- (2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียพลังงานจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ
- (3) ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เพื่อหาเส้นแนวโน้มที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ
- (4) ใช้ Akaike Information Criterion (AIC) เพื่อคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด

ผลการดำเนินงานวิจัยพบว่า การสูญเสียพลังงานที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (L2) มีความสัมพันธ์เชิงลบที่แข็งแกร่งกับค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยมีค่าสหสัมพันธ์ ( $R^2 = 0.927$ ) ซึ่งหมายความว่า หากปริมาณไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจะลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเชิงเส้นเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุดเพียง 0.03% และสูงสุดเพียง 1.82%

โดยสมการที่ใช้สำหรับทำนายค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคือ

$$Eff = 94.61 - (1.559 \times L2) \quad (2.16)$$

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายแบบ AIC แสดงให้เห็นว่าโมเดลเชิงเส้นมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ เช่น แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล หรือพหุนาม

อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักที่พบคือ โมเดลนี้พิจารณาเพียงค่าการสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงเพียงตัวแปรเดียว ซึ่งอาจทำให้ความแม่นยำของแบบจำลองยังสามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้โดยการพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ เช่น อุณหภูมิของกระบวนการเผาไหม้ หรือค่าการสูญเสียทางรังสี นอกจากนี้ อาจนำเทคนิค Machine Learning เช่น Neural Networks หรือ Decision Trees มาใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นสามารถช่วยในการทำนายค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยพิจารณาจากค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถนำไปปรับใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(Kljajić et al., 2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เครือข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) เพื่อการสร้างแบบจำลองและการพยากรณ์ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเครื่องมือที่สามารถประเมินและทำนายประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายจากการทำงานของหม้อไอน้ำ

เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองนี้คือการใช้เครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks - ANN) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถสร้างการเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต โดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจพลังงานของหม้อไอน้ำ 65 ตัวอย่างในเขตภาคเหนือของประเทศเซอร์เบีย ข้อมูลเหล่านี้ได้แก่ ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทของเชื้อเพลิง, ประเภทของหม้อไอน้ำ, ความจุของหม้อไอน้ำ, ช่วงโหลดในการทำงาน และความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซที่ระบายออกจากหม้อไอน้ำ จากนั้นนำข้อมูลเหล่านี้มาสร้างและฝึกแบบจำลองของเครือข่ายประสาทเทียม

ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาด้วยเครือข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำได้อย่างแม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลจริงต่ำ ( $MAPE = 3.18\%$ ) นอกจากนี้การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ยังช่วยให้สามารถระบุปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ เช่น ความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซที่ระบายออก, ความจุของหม้อไอน้ำ และช่วงโหลดในการทำงาน

(Liu et al., 2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำแบบรวมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการประเมินที่สามารถคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำแบบรวมได้อย่างชัดเจนและแม่นยำ โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) และการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster Analysis)

เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้คือ การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) และการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster Analysis) โดยเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลการทดสอบหม้อไอน้ำแบบรวมจาก 20 ตัวอย่างที่มีแบรนด์และความสามารถในการให้ความร้อนแตกต่างกัน จากนั้นใช้การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เช่น ประสิทธิภาพความร้อน, อุณหภูมิการระบาย, ความเข้มข้นของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ของผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ และการทดสอบการวิเคราะห์กลุ่มเพื่อจัดกลุ่มหม้อไอน้ำแบบรวมตามผลการประเมินประสิทธิภาพ

ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบรวมมากที่สุดคือ ประสิทธิภาพความร้อนที่มีค่าสูงสุดเมื่อเครื่องทำงานที่การตั้งค่าที่มากที่สุดในโหมดทำความร้อน และมีความสัมพันธ์ที่สูงกับความเข้มข้นของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ในการเผาไหม้ โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.935 ซึ่ง

แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำแบบรวมได้ถึง 93.5%

(Nikula et al., 2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาและทดสอบกรอบการทำงานที่ใช้ข้อมูลในการติดตามประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยมุ่งหวังที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำในโรงงานพลังงาน โดยใช้ข้อมูลจากการดำเนินงานจริงเป็นการอ้างอิงประสิทธิภาพที่คาดหวัง

เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนารอบการติดตามนี้ประกอบด้วยการจัดอันดับตัวแปร (Variable Ranking) ตามทฤษฎีข้อมูล, การสร้างแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression), การระบุสถานะกระบวนการ (Process States) และการคำนวณประสิทธิภาพที่คาดหวังจากข้อมูลประวัติการทำงาน การติดตามความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพที่คาดหวังและประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจริงใช้กราฟการควบคุมกระบวนการสถิติเพื่อระบุข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น

ผลการศึกษาพบว่า การใช้ข้อมูลจากกระบวนการในอดีตเพื่อคำนวณประสิทธิภาพที่คาดหวังสามารถทำให้การติดตามประสิทธิภาพในระยะยาวมีความแม่นยำ โดยการใช้การจัดอันดับตัวแปรตามทฤษฎีข้อมูล (Information-theoretic variable ranking) พบว่า ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์สูงที่สุดกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคือการสูญเสียความร้อนในก๊าซไอเสีย ซึ่งมีการคาดการณ์ได้ดีในทั้งกรณีของหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินและหม้อไอน้ำประเภท Circulating Fluidized Bed (CFB)

(Ochoa et al., 2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมโดยใช้ระบบการจัดการพลังงานและการคำนวณตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงานตามมาตรฐาน ISO 50001 โดยการประเมินตัวชี้วัดการใช้พลังงานจริง, ดัชนีการใช้พลังงานทฤษฎี, พื้นฐานพลังงาน และดัชนีประสิทธิภาพ 100 โดยใช้ข้อมูลการใช้ก๊าซและการผลิตไอน้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบการจัดการพลังงานและการคำนวณตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงานเพื่อประเมินการใช้พลังงานในหม้อไอน้ำแบบไพโรทูปูลาร์ ตามแนวทางของมาตรฐาน ISO 50001 โดยการประเมินตัวชี้วัดต่าง ๆ เช่น การใช้พลังงานจริง, ดัชนีการใช้พลังงานทฤษฎี และดัชนีประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลจากการบริโภคก๊าซและการผลิตไอน้ำ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการลดความแปรปรวนในการดำเนินงานสามารถทำให้ประหยัดการใช้ก๊าซได้ถึง 20% เท่ากับ 186,633 m<sup>3</sup> ต่อเดือน ซึ่งสามารถประหยัดได้ถึง \$70,920,717 COP ต่อเดือน และลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ได้ถึง 1,318,739.05 กิโลกรัมต่อเดือน การศึกษาได้ใช้สามวิธีการหลัก

ในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำ ได้แก่ การลดความดันการผลิตจาก 250 เป็น 180 psig เพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซและการสูญเสียความร้อนจากหม้อไอน้ำ, การทำให้การระบายอัตโนมัติตามคำแนะนำ UNE-9075/85 เพื่อประหยัดการใช้พลังงาน 0.66%, และการปรับอากาศการเผาไหม้โดยการวัดค่า O<sub>2</sub> โดยตรงเพื่อรักษาค่าการวัดออกซิเจนที่ 3% ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำ

(Pachaiyappan & Dasa Prakash, 2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยการปรับอากาศการเผาไหม้ ซึ่งเน้นการใช้เครื่องมือเพิ่มเติม เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Air Preheater) และเครื่องทำน้ำร้อน (Economizer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการทำงานของหม้อไอน้ำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การปรับอากาศการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำโดยการใช้เครื่องทำน้ำร้อนและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่เข้าไปในหม้อไอน้ำซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้และการลดการใช้พลังงาน ในการศึกษา การประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกคำนวณจากการวัดการไหลของก๊าซและการลดการสูญเสียพลังงานจากการเผาไหม้

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสามารถทำได้โดยการลดการรั่วไหลของอากาศที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการปรับอากาศการเผาไหม้ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียความร้อนและลดการใช้พลังงาน ในกรณีที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการทำงานอย่างเหมาะสม การลดอุณหภูมิของก๊าซจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ประมาณ 2-3%

(Wang et al., 2022) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองกลไกเพื่อหาค่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมในการทำงานของหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหิน โดยมุ่งเน้นที่การเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำและการเพิ่มการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองกลไกที่พิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการหาค่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมในการทำงานของหม้อไอน้ำ โดยใช้วิธีการคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำที่มีการใช้ถ่านหินและการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจากก๊าซที่ถูกปล่อยออกมา ในการศึกษาใช้ข้อมูลจากหม้อไอน้ำที่มีขนาด 660MW เป็นกรณีศึกษา โดยพิจารณาการทำงานภายใต้โหลดที่แตกต่างกันและการเผาถ่านหินชนิดต่าง ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน

การศึกษานี้พบว่า ค่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมสำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ ซึ่งการปรับค่าปริมาณอากาศส่วนเกินมีผลโดยตรงต่อการลดการใช้เชื้อเพลิงและการลดการปล่อย CO<sub>2</sub> นอกจากนี้ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์การทำงานของหม้อไอน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอากาศส่วนเกินและประเภทของถ่านหินมีผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำในลักษณะที่ชัดเจน

(Bacalja et al., 2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวัดการปล่อยก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลทางทะเล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและควบคุมมลพิษที่ปล่อยออกมาจากการเดินเรือจริง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสารมลพิษในท่าเรือ เครื่องมือที่ใช้คือเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350 Maritime ที่ได้รับการรับรองตาม MARPOL Annex VI และ NOx Technical Code 2008 โดยทำการติดตั้งโพรบวัดก๊าซที่ปลายท่อไอเสียของเรือ Juraj Dalmatinac ระหว่างการเดินทางจากท่าเรือ Split ไปยัง Supetar และกลับ รวมระยะเวลา 110 นาที

ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย การวัดก๊าซ NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> และ SO<sub>2</sub> ในสองช่วงการทำงานของเรือ ได้แก่ ช่วง Maneuvering และ ช่วง At Sea ผลการศึกษาพบว่าการปล่อยก๊าซไอเสียมีค่าสูงขึ้นชัดเจนในช่วง Maneuvering เมื่อเทียบกับช่วง At Sea แม้ระยะเวลาการทำงานในช่วง Maneuvering จะสั้นกว่า นอกจากนี้การศึกษายังชี้ให้เห็นว่าการวัดจริงด้วยเครื่องมือสามารถให้ค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่าการประมาณด้วยวิธีเชิงคำนวณแบบ Bottom-up ซึ่งมักใช้ในวรรณกรรม

ข้อค้นพบที่สำคัญคือ การใช้ เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซแบบพกพา TESTO 350 ทำให้สามารถติดตามและควบคุมการปล่อยก๊าซในทุกช่วงการทำงานของเรือได้อย่างแม่นยำ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้กำหนดแนวทางการบำรุงรักษา ปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเดินเรือในเขตท่าเรือ

(Ross-Veitia et al., 2024) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ อัลกอริทึมการถดถอยเชิง Machine Learning เพื่อพยากรณ์การปล่อยก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายค่า CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> และอนุภาคมูลฐานไอเสีย จากข้อมูลการทำงานจริงของหม้อไอน้ำ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและลดการะมลพิษ เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350 ซึ่งทำการเก็บข้อมูลจากหม้อไอน้ำท่อไฟจำนวนกว่า 20 เครื่องที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันเตา โดยกำหนดตัวแปรนำเข้า ได้แก่ อนุภาคมูลฐานไอเสีย ความดันทำงาน อัตราการผลิตไอน้ำ และชนิดเชื้อเพลิง

งานวิจัยได้เปรียบเทียบโมเดลหลายประเภท เช่น Multiple Linear Regression (MLR), Random Forest Regressor (RFR), Gradient Boosting Regressor (GBR) และ Deep Neural Network (DNN) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการทำนาย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า GBR มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้ค่า  $R^2 = 99.80\%$  และ MAE เพียง 0.51 ขณะที่โมเดล DNN ก็มีความแม่นยำเหนือกว่าโมเดลเชิงเส้นแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน

ข้อค้นพบสำคัญคือ การใช้ Machine Learning โดยเฉพาะ GBR สามารถทำนายค่าการปล่อยมลพิษและอุณหภูมิไอเสียได้อย่างแม่นยำและมีเสถียรภาพ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดความถี่ในการตรวจวัดก๊าซจริง ช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากร อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการสนับสนุนการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรม

(Slobodina et al., 2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อมต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบท่อแก๊ส (Gas Tube Boiler) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ว่า ความผันผวนของอุณหภูมิอากาศภายนอกส่งผลต่อสมดุลความร้อน การใช้เชื้อเพลิง และการสูญเสียทางอากาศพลศาสตร์ของระบบจ่ายความร้อนอย่างไร เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ วิธีการคำนวณเชิงทฤษฎี (Thermal Calculation Method) ร่วมกับสูตรสมดุลพลังงาน สมการการถ่ายเทความร้อน และสมการสมดุลความร้อน

ขั้นตอนการศึกษาประกอบด้วยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิของผนังท่อไฟด้านก๊าซ และการสูญเสียทางอากาศพลศาสตร์ในท่อไฟ กับอุณหภูมิแวดล้อม โดยใช้หม้อไอน้ำท่อแก๊สกำลัง 500 kW ที่มีประสิทธิภาพพื้นฐาน 92.6% และอัตราการไหลน้ำ 17.2 ตันต่อชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อ อุณหภูมิแวดล้อมลดลง  $1^{\circ}\text{C}$  การใช้เชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 3% อุณหภูมิผนังท่อเพิ่มขึ้น  $1.7^{\circ}\text{C}$  และการสูญเสียทางอากาศพลศาสตร์เพิ่มขึ้น 0.4 Pa

ข้อค้นพบสำคัญคือ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสภาวะแวดล้อมภายนอก โดยการลดลงของอุณหภูมิอากาศทำให้หม้อไอน้ำต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำจ่ายในเครือข่าย ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการ ควบคุมการทำงานของระบบจ่ายความร้อนและการวางแผนการใช้เชื้อเพลิง ให้เหมาะสมกับฤดูกาลและสภาพภูมิอากาศ

(Alin, 2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ปัญหา Multicollinearity ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายธรรมชาติของ Multicollinearity ผลกระทบที่เกิดขึ้น วิธีการตรวจจับ และแนวทางการแก้ไข ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญของสมมติฐานใน Classical Linear Regression Model (CLRM) ที่กำหนดว่า ตัวแปรอิสระไม่ควรมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันสูงเกินไป

งานวิจัยได้อธิบายถึง ลักษณะของ Multicollinearity ทั้งในกรณีที่สมบูรณ์ (Perfect) และไม่สมบูรณ์ (Imperfect) รวมถึงผลที่ตามมาทางสถิติ เช่น ค่าความแปรปรวนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัมประสิทธิ์มีค่ามากขึ้น ค่าช่วงความเชื่อมั่นกว้างขึ้น ค่าทดสอบ  $t$  ของตัวแปรอิสระอาจไม่แสดงนัยสำคัญทางสถิติ แต่ค่า  $R^2$  ของแบบจำลองกลับสูง นอกจากนี้ยังอธิบายวิธีการตรวจจับ Multicollinearity เช่น การดูค่า Variance Inflation Factor (VIF), Tolerance (TOL), Condition Index และการใช้ Auxiliary Regression

ข้อค้นพบสำคัญคือ Multicollinearity แม้จะไม่ทำให้สมการถดถอยสูญเสียคุณสมบัติ BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) แต่จะทำให้การตีความค่าสัมประสิทธิ์เชิงเดี่ยวของตัวแปรอิสระทำได้ยากขึ้น และอาจทำให้การทำนายหรือการสรุปผลคลาดเคลื่อนได้ แนวทางแก้ไขที่เสนอ ได้แก่ การใช้ข้อมูลเพิ่มเติม การแปลงตัวแปร (เช่น First Difference), การตัดตัวแปรที่มีความสัมพันธ์สูงออก หรือการใช้สมมติฐานเชิงทฤษฎี (a priori information) เพื่อจำกัดรูปแบบความสัมพันธ์

(Taler et al., 2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การเพิ่มประสิทธิภาพการสตาร์ทหม้อไอน้ำโดยคำนึงถึงความเค้นทางความร้อน (Thermal Stress) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในการสตาร์ทจากสถานะเย็น ขณะเดียวกันก็ยังรักษาความปลอดภัยของชิ้นส่วนที่มีผนังหนา เช่น Drum และ Downcomer งานวิจัยนี้ได้พัฒนา แบบจำลองเชิงพลวัต (Non-linear Dynamic Model) ของ Evaporator และห้องเผาไหม้ เพื่อคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมที่สุดในช่วงการสตาร์ท

กระบวนการวิจัยแบ่งเป็นสองช่วง ได้แก่ ช่วงให้ความร้อนน้ำก่อนการเกิดเดือด และ ช่วงการผลิตไอน้ำอิ่มตัว โดยใช้สมการอนุรักษ์มวลและพลังงานควบคู่กับสมการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ ผลการคำนวณถูกตรวจสอบด้วยการทดลองในหม้อไอน้ำ OP-210M (210 Mg/h) และพบว่าผลลัพธ์จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง

ข้อค้นพบสำคัญคือ การควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและไอน้ำใน Drum ตามค่าที่คำนวณด้วยแบบจำลองสามารถลดเวลาในการสตาร์ทได้มาก และช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงหนักลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยยังไม่ทำให้ค่า Circumferential Stress เกินค่าที่อนุญาต ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้คือ การเติมน้ำร้อนจากถังเก็บเข้าระบบในช่วงเริ่มต้นสตาร์ทสามารถย่นเวลาและเพิ่มความยืดหยุ่นในการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าได้

(Saidur, 2011) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การประหยัดพลังงานและการลดการปล่อยมลพิษในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของการใช้เทคโนโลยีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์พัดลม (Variable Speed Drive: VSD) และระบบ Oxygen Trim ในการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ลดการใช้พลังงาน และลดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub>

งานวิจัยใช้ข้อมูลจาก การตรวจสอบพลังงาน (Energy Audit) ของโรงงานอุตสาหกรรม 48 แห่งในมาเลเซีย ซึ่งเก็บข้อมูลการทำงานของมอเตอร์พัดลมหม้อไอน้ำหลายขนาด และนำมาคำนวณปริมาณการใช้พลังงานและศักยภาพในการประหยัดพลังงานหากติดตั้ง VSD และระบบควบคุมอากาศส่วนเกิน

ผลการวิเคราะห์พบว่า

- (1) การลดความเร็วพัดลม 60% สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 268,866 MWh/ปี ที่โหลด 60%
- (2) สามารถลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ได้มากกว่า 134 ล้านกิโลกรัม/ปี
- (3) ระบบ Oxygen Trim ที่ลดอากาศส่วนเกินลง 16.9% สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 549,310,130 GJ/ปี โดยมีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) น้อยกว่า 1 วัน
- (4) การใช้ VSD ในมอเตอร์ขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยมี Payback Period อยู่ระหว่าง 0.23–5.58 ปี

ข้อค้นพบสำคัญคือ การประยุกต์ใช้ VSD และ Oxygen Trim System เป็นมาตรการที่มีศักยภาพสูงในการประหยัดพลังงาน ลดต้นทุน และลดการปล่อยมลพิษของหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับนโยบายพลังงานเพื่อสนับสนุนการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมในภาคอุตสาหกรรมได้

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงกระบวนการดำเนินการศึกษาเพื่อวิเคราะห์และประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรมเครื่องต้ม ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลที่เก็บจากหม้อต้มไอน้ำชนิดท่อไฟความสามารถในการผลิตไอน้ำสูงสุด 22 ตันต่อชั่วโมง และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลัก ตัวแปรที่ถูกเก็บรวบรวมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สหสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำมีทั้งหมด 13 ตัวแปรได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ , อัตราการไหลของไอน้ำ , อัตราการไหลของน้ำป้อน , โหลดของหม้อไอน้ำ , ความเข้มข้นของออกซิเจน , อุณหภูมิของก๊าซไอเสียหลังผ่านอีโคโนไมเซอร์ , อุณหภูมิแวลว้อม , ความชื้น , ปริมาณอากาศส่วนเกิน , ความดันหม้อไอน้ำ , ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ , อุณหภูมิน้ำป้อน และ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยตัวแปรเหล่านี้ถูกเลือกขึ้นมาจากความเป็นไปได้ที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และสมรรถนะโดยรวมของระบบ กระบวนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ถูกแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักดังนี้

- 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.2 การเก็บข้อมูลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
- 3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์และทิศทางของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ
- 3.4 ทดลองนำตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพมาสร้างสมการตัวแทน
- 3.5 นำสมการตัวแทนที่ได้จากการทดลองมาเทียบผลกับการวัดจริง

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ และ การสร้างสมการตัวแทน ซึ่งแต่ละส่วนมีความสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยอย่างยิ่ง ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินงานให้บรรลุเป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพ

### 3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

จากขอบเขตของงานวิจัย งานวิจัยนี้จะเป็นการเก็บข้อมูลของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่มีขนาดการผลิตไอน้ำ 22 ตันต่อชั่วโมง โดยเครื่องมือที่ใช้สำหรับการเก็บข้อมูลมีดังนี้

- (1) WinCC
- (2) Node-Red
- (3) MySQL

### 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ และ การสร้างสมการตัวแทน

งานวิจัยนี้ใช้ python ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์และสร้างสมการตัวแทนโดยที่การวิเคราะห์ความสัมพันธ์จะดำเนินการโดยใช้ Correlation เพื่อตรวจสอบระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและการสร้างสมการตัวแทนใช้ Multiple Linear Regression เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายค่าของตัวแปรตามได้อย่างแม่นยำ

## 3.2 การเก็บข้อมูลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเก็บข้อมูลของงานวิจัยนี้ มีเครื่องมือหลักที่ใช้ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ WinCC, Node-RED และ MySQL ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อรวบรวม ประมวลผล และจัดเก็บข้อมูลของหม้อไอน้ำ

- (1) WinCC ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหม้อไอน้ำ และนำมารวบรวมเพื่อใช้แสดงผลบน HMI อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเหล่านี้ยังไม่ถูกจัดเก็บลงฐานข้อมูล และบางค่าจำเป็นต้องผ่านการคำนวณเพิ่มเติม
- (2) Node-RED ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการประมวลผลข้อมูล โดยรับข้อมูลจาก WinCC ผ่าน HTTP จากนั้นทำการคำนวณค่าที่จำเป็น ก่อนจะส่งข้อมูลผ่านการประมวลผลแล้วไปยังฐานข้อมูล
- (3) MySQL ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลทั้งหมดที่ได้รับจาก Node-RED เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และนำไปใช้งานต่อไป

กระบวนการไหลของข้อมูลเริ่มจาก WinCC ส่งข้อมูลของหม้อไอน้ำไปยัง Node-RED ผ่าน HTTP Node-RED ทำการคำนวณค่าที่จำเป็น จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดบันทึกลง ฐานข้อมูล MySQL เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานต่อได้อย่างเป็นระบบ

### 3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์และทิศทางของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงปริมาณ งานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชัน `.corr()` ของไลบรารี `pandas` ซึ่งเป็นเมธอดที่ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างตัวแปรทั้งหมดในชุดข้อมูล โดยค่าที่ได้จะอยู่ในรูปเมทริกซ์ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตามเกณฑ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation) ผลลัพธ์ดังกล่าวถูกนำมาแสดงผลในรูปแบบ Heatmap ผ่านไลบรารี `seaborn` และ `matplotlib` เพื่อให้สามารถมองเห็นทั้งค่าความสัมพันธ์และทิศทางของตัวแปรได้อย่างชัดเจน โดยใช้สีแสดงค่าเชิงบวกและเชิงลบ พร้อมตัวเลขกำกับในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งช่วยให้สามารถระบุได้ว่าตัวแปรใดมีความสัมพันธ์เชิงบวกหรือลบต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ และตัวแปรใดที่ควรพิจารณาเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างแบบจำลองเชิงทำนายต่อไป

### 3.4 ทดลองนำตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพมาสร้างสมการตัวแทน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการ ถดถอยเชิงเส้นพหุคูณโดยอาศัยฟังก์ชัน `Linear Regression` จากไลบรารี `scikit-learn` เพื่อสร้างสมการตัวแทนสำหรับทำนายค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ จากตัวแปรอิสระหลายตัว

ผลที่ได้จากวิเคราะห์คือสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณซึ่งระบุชัดเจนว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำในทิศทางใด (บวกหรือลบ) และมีค่าน้ำหนักมากน้อยเพียงใด นำเสนอผลด้วยกราฟเปรียบเทียบค่าจริงและค่าที่สมการตัวแทนให้และกราฟ `Residuals Histogram`

สำหรับการวัดผลของแบบจำลอง ใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ 4 ค่า ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ), Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE) และ Mean Absolute Error (MAE)

### 3.5 นำสมการตัวแทนที่ได้จากการทดลองมาเทียบผลกับการวัดจริง

หลังจากพัฒนาสมการตัวแทนที่สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแล้ว จำเป็นต้องทำการทดสอบและตรวจสอบความถูกต้องของสมการดังกล่าวโดยนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากระบบ เพื่อให้แน่ใจว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถสะท้อนพฤติกรรมของระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้เกณฑ์การประเมินทั้งสี่แบบ ได้แก่  $R^2$ , MSE, RMSE และ MAE ตามที่กล่าวไปในหัวข้อ 2.3.2 ร่วมกันช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของความแม่นยำและความสอดคล้องของสมการตัวแทนที่พัฒนาขึ้นได้อย่างรอบด้าน โดยแต่ละเกณฑ์มีบทบาทและจุดเด่นที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

$R^2$  เป็นตัวชี้วัดที่บอกว่าสมการสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลจริงได้มากน้อยเพียงใด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากค่า  $R^2$  มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าสมการสามารถทำนายได้แม่นยำและอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลจริงได้ดี ในขณะที่ค่า  $R^2$  ที่ต่ำบ่งชี้ว่าสมการยังไม่สามารถสะท้อนรูปแบบของข้อมูลได้เพียงพอ

MSE เน้นการตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดมาก เนื่องจากการยกกำลังสอง ทำให้หากมีค่าผิดพลาดสูงเพียงบางจุด ค่าดังกล่าวจะส่งผลให้ MSE มีค่ามากขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้น MSE จึงเหมาะสำหรับการสะท้อนความไวต่อ outlier และการบ่งบอกว่ามีข้อมูลบางช่วงที่สมการอธิบายได้ไม่ดี

RMSE เป็นตัวชี้วัดที่ได้รับความนิยมในงานด้านวิศวกรรม เนื่องจากค่าที่ได้มีหน่วยเดียวกับข้อมูลจริง จึงสามารถตีความได้ง่ายว่าผลการทำนายมีค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเท่าใด หากค่า RMSE มีค่าน้อย แสดงว่าสมการมีความใกล้เคียงกับข้อมูลจริงและสามารถนำไปใช้ในงานประยุกต์ได้โดยตรง

MAE แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ไม่ถูกชักนำด้วยค่าผิดพลาดรุนแรง ทำให้สะท้อนภาพรวมของความแม่นยำได้อย่างสมดุล ค่านี้จึงเหมาะสำหรับใช้ดูคุณภาพโดยเฉลี่ยของสมการโดยไม่ให้ความสำคัญกับความผิดพลาดเพียงไม่กี่จุดมากเกินไป

โดยสรุปหากค่าของทั้ง MSE, RMSE, MAE มีค่าน้อย และค่า  $R^2$  มีค่าสูง แสดงว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อย่างแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือสูงในทางตรงกันข้าม หาก MSE, RMSE และ MAE มีค่าสูง ร่วมกับค่า  $R^2$  ที่ต่ำ แสดงว่าสมการยังมีข้อจำกัดในการสะท้อนค่าจริงของระบบ ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เพียงพอของตัวแปรอิสระในสมการหรือจากปัจจัยแวดล้อมที่ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา การพิจารณาเกณฑ์ทั้งสี่ร่วมกันจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการประเมินคุณภาพและความถูกต้องของสมการตัวแทนที่ใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

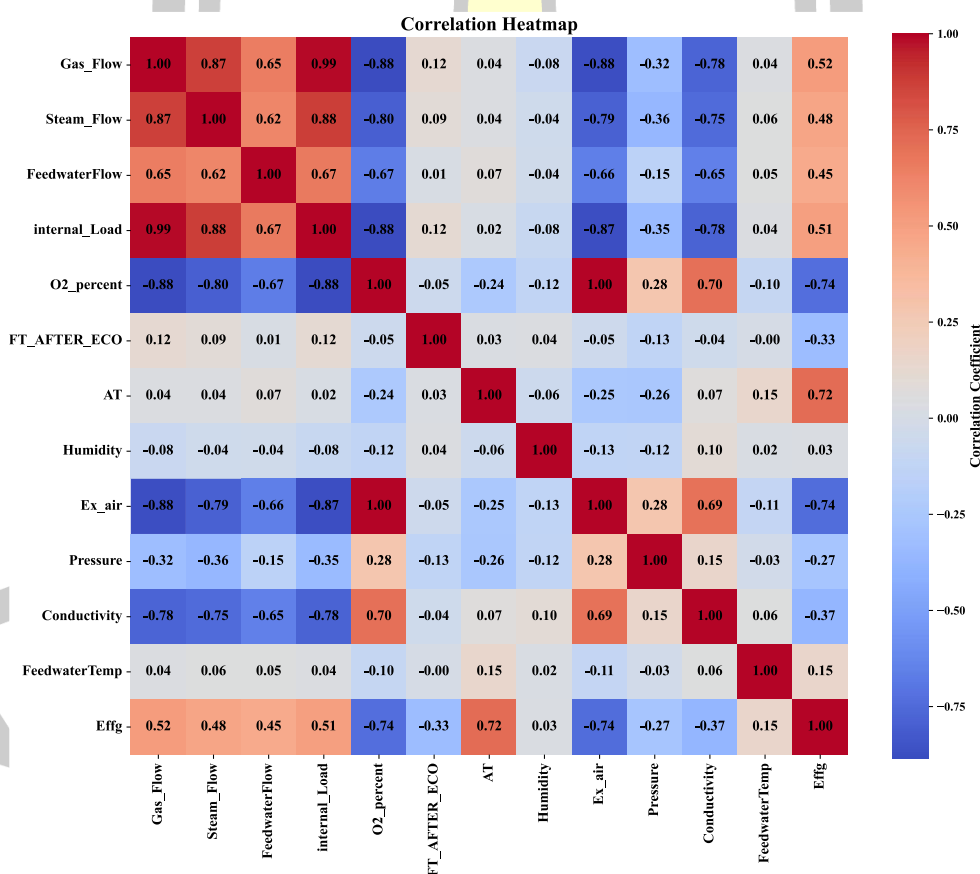
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ผลการศึกษานี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย ชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมดจำนวน 1,802,820 จุด

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับค่าประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ แสดงในรูปแบบแผนภาพความร้อน ซึ่งใช้ช่วงสีตั้งแต่โทนสีแดงเข้มแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกสูงไปจนถึงโทนสีน้ำเงินเข้มแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงลบสูงผลการวิเคราะห์สามารถจัดกลุ่มตัวแปรตามระดับความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ดังนี้



ภาพที่ 1 แผนภาพความร้อนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

โดยที่

|               |                                                |
|---------------|------------------------------------------------|
| Gas_Flow      | คือ อัตราการไหลของก๊าซ                         |
| Steam_Flow    | คือ อัตราการไหลของไอน้ำ                        |
| FeedwaterFlow | คือ อัตราการไหลของน้ำป้อน                      |
| Internal_Load | คือ โหลดของหม้อไอน้ำ                           |
| O2_percent    | คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน                     |
| FT_AFTER_ECO  | คือ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียหลังผ่านอีโคโนไมเซอร์ |
| AT            | คือ อุณหภูมิแวดล้อม                            |
| Humidity      | คือ ความชื้น                                   |
| Ex_air        | คือ ปริมาณอากาศส่วนเกิน                        |
| Pressure      | คือ ความดันหม้อไอน้ำ                           |
| Conductivity  | คือ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ                        |
| FeedwaterTemp | คือ อุณหภูมิน้ำป้อน                            |
| Effg          | คือ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ                    |

จากภาพที่ 1 แผนภาพความร้อน (Heatmap) ของค่าสหสัมพันธ์ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ อ้างอิงตาม (พรหมมาพันธุ์, 2018) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ถูกใช้เพื่อแปลความหมายของความแข็งแกร่งของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ 0.00 หมายถึงไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรใด ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่า 0.40 หมายถึงมีความสัมพันธ์ในระดับอ่อน ค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ระหว่าง 0.40 ถึง 0.60 บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ในระดับปานกลาง และค่าสัมประสิทธิ์ที่มากกว่า 0.60 บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่ง ตามเกณฑ์การตีความดังกล่าว ตัวแปรจึงถูกจัดหมวดหมู่ตามความสัมพันธ์ และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำถูกสรุปไว้ในตารางที่ 3 จะชี้ให้เห็นชัดเจนว่าตัวแปรใดมีความสัมพันธ์ระดับใดและมีความสัมพันธ์ในทิศทางใดกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

ตารางที่ 3 ตารางสรุประดับและทิศทางของความสัมพันธ์ของตัวแปรกับประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

| ระดับความสัมพันธ์          | ความสัมพันธ์ทิศทางบวก                                                                                                | ความสัมพันธ์ทิศทางลบ                                                                                 |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ความสัมพันธ์ระดับอ่อน      | ความชื้น (0.03),<br>อุณหภูมิน้ำป้อน (0.15)                                                                           | อุณหภูมิไอเสียหลังอีโคโนไมเซอร์ (-0.33),<br>ความดันหม้อไอน้ำ (-0.27),<br>ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (-0.37) |
| ความสัมพันธ์ในระดับปานกลาง | อัตราการไหลของก๊าซ (0.52),<br>อัตราการไหลของไอน้ำ (0.48),<br>อัตราการไหลของน้ำป้อน(0.45),<br>โหลดของหม้อไอน้ำ (0.51) | -                                                                                                    |
| ความสัมพันธ์แข็งแกร่ง      | อุณหภูมิแวดล้อม (0.72)                                                                                               | ปริมาณออกซิเจน (-0.74),<br>อากาศส่วนเกิน (-0.74)                                                     |

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณออกซิเจนและอากาศส่วนเกิน มีค่าสหสัมพันธ์เชิงลบกับประสิทธิภาพหม้อไอน้ำอยู่ที่ -0.74 และมีความสัมพันธ์กันเองแบบสมบูรณ์ (Correlation Coefficient = 1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งสองตัวแปรสะท้อนข้อมูลเดียวกัน การเลือกใช้เพียงตัวใดตัวหนึ่งจึงเพียงพอในการนำไปใช้สร้างแบบจำลองถดถอย นอกจากนี้พบว่า อัตราการไหลของก๊าซ และโหลดของหม้อไอน้ำ มีความสัมพันธ์กันสูงมาก (Correlation Coefficient = 0.99) จึงเลือกเฉพาะอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพสูงกว่า

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอย

ในการวิเคราะห์การถดถอย ได้ทำการพิจารณาชุดตัวแปรอิสระหลายรูปแบบเพื่อตรวจสอบสมรรถนะในการทำนายค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ โดยในขั้นแรกได้เลือกใช้ตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์ในระดับปานกลางถึงสูงกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (ได้แก่ ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิแวดล้อม อัตราการไหลของก๊าซ อัตราการไหลของไอน้ำ และอัตราการไหลของน้ำป้อน) มาพัฒนาแบบจำลอง เพื่อประเมินผลการมีส่วนร่วมทั้งรายตัวและร่วมกันของตัวแปรเหล่านี้ ได้สมการออกมาดังนี้

$$\begin{aligned}
 Eff_G = & 85.4818 + (-0.2253 \times O_2) \\
 & + (0.0490 \times AT) + (-0.0002 \times GF) \\
 & + (-0.0002 \times SF) + (0.0007 \times FWF)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

โดยที่

|       |                           |
|-------|---------------------------|
| $O_2$ | คือ ปริมาณออกซิเจน        |
| $AT$  | คือ อุณหภูมิแวดล้อม       |
| $GF$  | คือ อัตราการไหลของก๊าซ    |
| $SF$  | คือ อัตราการไหลของไอน้ำ   |
| $FWF$ | คือ อัตราการไหลของน้ำป้อน |

ต่อมาได้พัฒนาแบบจำลองการถดถอยอีกชุดหนึ่งโดยการเพิ่มตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์ในระดับอ่อน แต่ยังคงมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ( $r > 0.3$ ) ได้แก่ อุณหภูมิไอเสียหลังผ่านอีโคโนไมเซอร์ และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายระหว่างแบบจำลองที่ใช้เฉพาะตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงกับแบบจำลองที่เพิ่มเติมตัวแปรอื่น ๆ ที่อาจมีข้อมูลเชิงเสริมเข้ามาร่วมด้วยได้สมการออกมาดังนี้

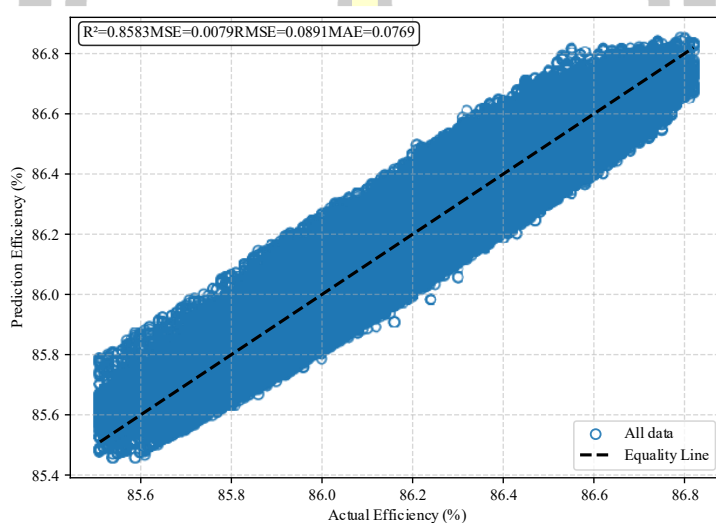
$$\begin{aligned}
 Eff_G = & 90.3794 + (-0.1809 \times O_2) \\
 & + (0.0523 \times AT) + (0.0001 \times SF) \\
 & + (-0.0001 \times FWF) + (-0.0439 \times FT)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

โดยที่

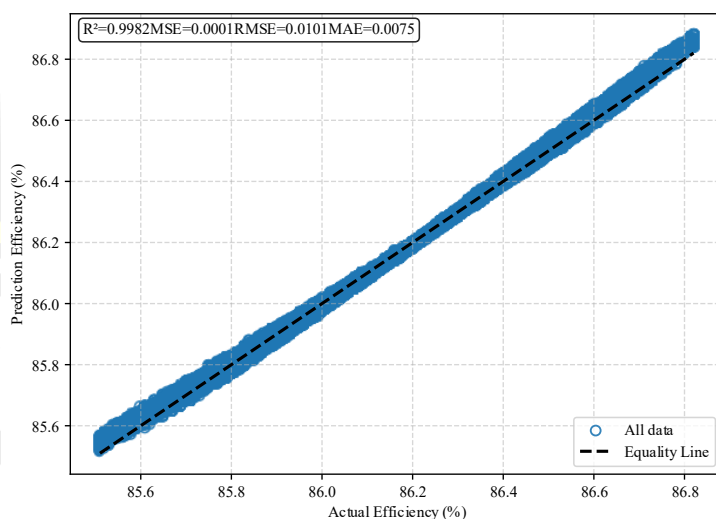
|       |                                         |
|-------|-----------------------------------------|
| $O_2$ | คือ ปริมาณออกซิเจน                      |
| $AT$  | คือ อุณหภูมิแวดล้อม                     |
| $GF$  | คือ อัตราการไหลของก๊าซ                  |
| $SF$  | คือ อัตราการไหลของไอน้ำ                 |
| $FWF$ | คือ อัตราการไหลของน้ำป้อน               |
| $FT$  | คือ อุณหภูมิไอเสียหลังผ่านอีโคโนไมเซอร์ |

จากสมการ (4.2) พบว่าเมื่อเพิ่มค่าอุณหภูมิไอเสียและค่าการนำไฟฟ้ามารวมไว้ในแบบจำลองการถดถอยขยาย สัมประสิทธิ์ของอัตราการใช้ของก๊าซนั้นเปลี่ยนแปลงและสัมประสิทธิ์ของค่าการนำไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยมากจนถือว่าไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นตัวแปรเหล่านี้จึงไม่ได้ถูกนำเสนอในสมการ

เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายระหว่างสมการ 4.1 และสมการ 4.2 ได้ทำการพล็อตค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ได้จากการทำนายเทียบกับค่าที่วัดจริง ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยเส้นประในแต่ละภาพย่อยแสดงถึงเส้นความเท่ากัน ซึ่งบ่งบอกถึงการทำนายที่ถูกต้องสมบูรณ์แบบ



(a)



(b)

ภาพที่ 2 ผลจากการทำนายของสมการเทียบกับค่าที่วัดจริง

ในภาพที่ 2(a) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ 4.1 พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีการกระจายตัวออกห่างจากเส้นความเท่ากันมากกว่า รูปแบบนี้บ่งชี้ถึงค่าความคลาดเคลื่อนตกค้าง ที่สูงขึ้นและความแม่นยำในการทำนายที่ต่ำกว่า

ในทางตรงกันข้าม ภาพที่ 3(b) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4) แสดงให้เห็นการกระจุกตัวของค่าที่ได้จากการทำนายใกล้กับเส้นความเท่ากันมากขึ้นในทุกชุดข้อมูล แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองที่สูงขึ้นและความสามารถในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลใหม่ได้ดียิ่งขึ้นสมรรถนะของแบบจำลองการถดถอยได้ถูกประเมินด้วยค่า MSE, RMSE , MAE และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) โดยผลลัพธ์ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4

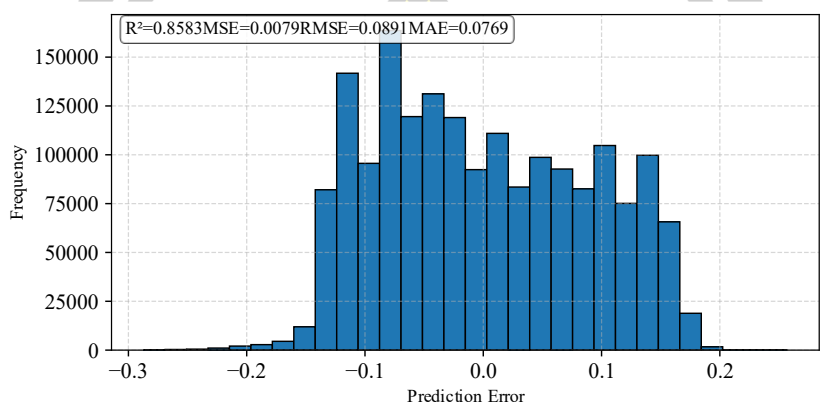
ตารางที่ 4 สมรรถนะของแบบจำลอง

| สมการ        | $R^2$  | MSE    | RMSE   | MAE    |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| สมการที่ 4.1 | 0.8583 | 0.0079 | 0.0891 | 0.0769 |
| สมการที่ 4.2 | 0.9982 | 0.0001 | 0.0101 | 0.0075 |

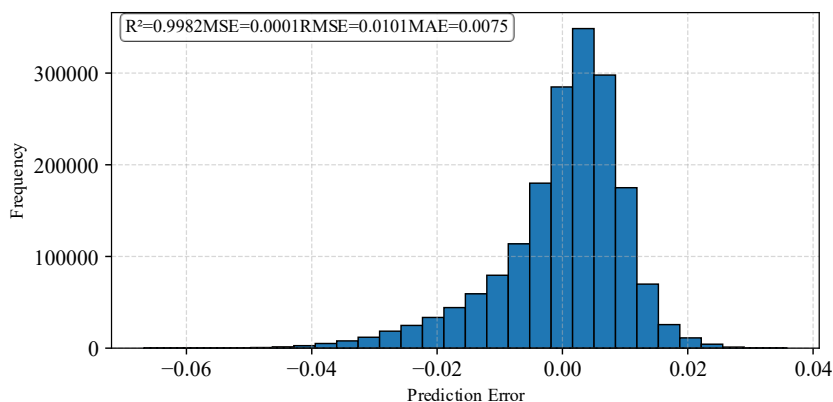
จากตารางที่ 4 สามารถสังเกตได้ว่าสมการ 4.2 แสดงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าสมการ 4.1 อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของสมการ 4.2 ที่มีค่า 0.9982 ซึ่งบ่งบอกถึงความสอดคล้องเกือบสมบูรณ์แบบระหว่างค่าที่ทำนายกับค่าจริง ในขณะที่สมการ 4.1 ให้ค่า  $R^2$  ที่ต่ำกว่าที่ 0.8583 นอกจากนี้ ค่าตัวชี้วัดความคลาดเคลื่อน (MSE, RMSE และ MAE) ของสมการ 4.2 มีค่าน้อยกว่าสมการ 4.1 ถึงระดับหลักจำนวน ทำให้สะท้อนถึงความแม่นยำในการทำนายและความเสถียรของแบบจำลองที่สูงกว่า ผลการวิเคราะห์เหล่านี้ยืนยันได้ว่าสมการ 4.2 เป็นแบบจำลองการถดถอยที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่า สามารถลดทั้งความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มได้ จึงถือว่าเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

แม้ว่ากราฟเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่ทำนายได้จะให้ภาพรวมของความแม่นยำในการทำนาย แต่การทำความเข้าใจสมรรถนะของแบบจำลองอย่างลึกซึ้งซึ่งสามารถทำได้โดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (Residuals) เพิ่มเติม การใช้กราฟฮิสโตแกรมของ Residuals จะช่วยให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นว่าค่าที่ทำนายมีความใกล้เคียงกับค่าจริงเพียงใด และมีการเบี่ยงเบนเชิงระบบหรือการกระจายตัวมากน้อยเพียงใดในผลลัพธ์ของแบบจำลอง

ภาพที่ 3 แสดงฮิสโตแกรมของ Residuals ที่ได้จากชุดข้อมูลการฝึกสำหรับทั้งสองแบบจำลองการถดถอย โดยในภาพที่ 3(a) Residuals จากสมการ 4.1 มีการกระจายตัวกว้างและมีความเบ้เล็กน้อย ซึ่งสะท้อนถึงความแปรปรวนของการทำนายที่สูงกว่าและแนวโน้มที่จะประเมินค่าต่ำเกินไป ในทางตรงกันข้าม ภาพที่ 3(b) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ 4.2 แสดงการกระจายตัวที่แคบกว่า และมีความสมมาตรใกล้เคียงศูนย์มากกว่า สะท้อนถึงความแม่นยำและความเสถียรที่สูงกว่า



(a)



(b)

ภาพที่ 3 ฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย

พหุ ประจักษ์ ชีวะ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมชนิดท่อไฟ ขนาดกำลังการผลิตไอน้ำสูงสุด 22 ตันต่อชั่วโมง โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง วัตถุประสงค์คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการทำงานของระบบกับค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ระบุตัวแปรที่มีอิทธิพลสำคัญ และพัฒนาแบบจำลองการถดถอยที่มีความแม่นยำสูงสำหรับการทำนาย ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปสนับสนุนการเฝ้าติดตามและควบคุมการทำงาน อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลอง พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำมากที่สุด ได้แก่ ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิแวดล้อม อัตราการไหลของไอน้ำ อัตราการไหลของ น้ำป้อน และอุณหภูมิไอเสียหลัง Economizer แบบจำลองการถดถอยที่พัฒนา (สมการที่ 4.2) แสดง ความแม่นยำสูง โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9982 ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการอธิบายความ แปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ยังชี้ให้เห็นถึงตัวแปรที่ส่งผลทั้งเชิง บวกและเชิงลบต่อประสิทธิภาพ ซึ่งสนับสนุนการปรับค่าการทำงานของระบบให้เหมาะสม การเพิ่ม ตัวแปรอุณหภูมิไอเสียเข้าไปในแบบจำลอง (สมการที่ 4.2) ส่งผลให้ความแม่นยำของการทำนายดีกว่า แบบจำลองเริ่มต้น (สมการที่ 4.1) ดังแสดงในภาพที่ 2(b) และภาพที่ 3(b) ทั้งนี้การคำนวณ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ใช้วิธีอ้อม (Indirect Method) ตามหลักการที่มีในเครื่องวิเคราะห์การเผาไหม้ TESTO 350 ซึ่งพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพในการประเมินค่าการทำงาน

#### 5.1 ข้อเสนอแนะเชิงการประยุกต์ใช้

##### 5.1.1 การนำตัวแปรสำคัญไปใช้ในระบบควบคุมการทำงานหม้อไอน้ำ

ควรใช้ข้อมูลตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพสูง เช่น ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิแวดล้อม อัตราการไหลของไอน้ำ อัตราการไหลของน้ำป้อน และอุณหภูมิไอเสียหลัง Economizer เพื่อพัฒนา ระบบควบคุมและเฝ้าติดตามการทำงานของหม้อไอน้ำให้ทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

### 5.1.2 การใช้โมเดลเชิงคาดการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน

แบบจำลองถดถอยที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการทำนายประสิทธิภาพหม้อไอน้ำแบบ Real-time เพื่อช่วยสามารถนำไปสนับสนุนการเฝ้าติดตามและควบคุมการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 5.1.3 ข้อจำกัดในการนำโมเดลไปใช้กับระบบอื่น

เนื่องจากโมเดลนี้พัฒนาจากหม้อไอน้ำขนาด 22 ตัน/ชั่วโมง โดยเชื้อเพลิงที่ใช้คือก๊าซธรรมชาติ หากต้องการนำไปใช้กับหม้อไอน้ำขนาดอื่นหรือใช้เชื้อเพลิงต่างชนิด จำเป็นต้องเก็บข้อมูลใหม่และปรับโมเดลให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานของระบบนั้น

### 5.1.4 ศักยภาพในการขยายผลสู่การใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

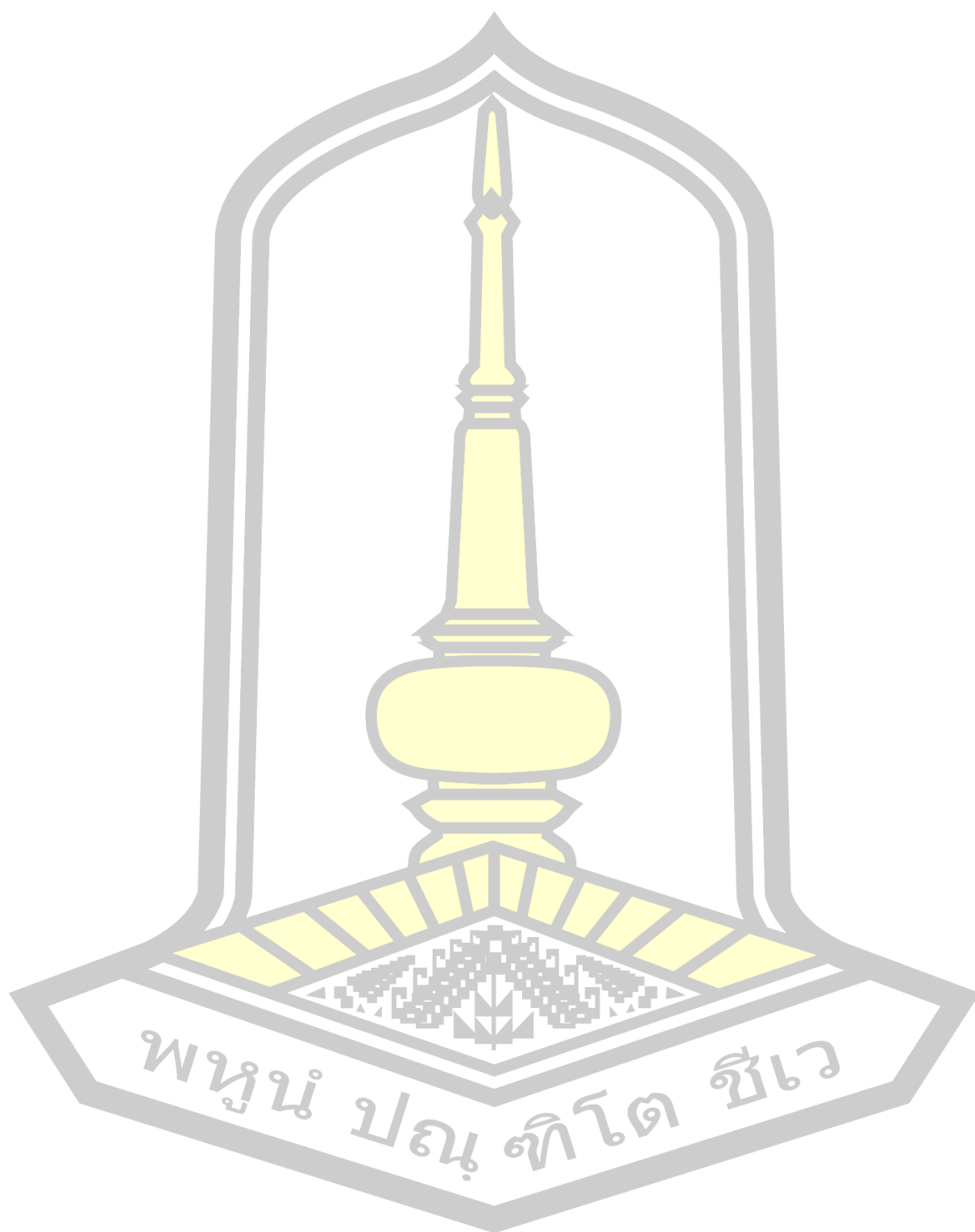
วิธีการและขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานนี้สามารถนำไปประยุกต์กับหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอื่นเพื่อพัฒนาและเฝ้าติดตามการทำงานของหม้อไอน้ำให้ทำงานในช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



## บรรณานุกรม

- Alin, A. (2010). Multicollinearity. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, 2(3), 370-374.
- Bacalja, B., Krcum, M., Peša, T., & Zubčić, M. (2021). The Measurement Of Exhaust Gas Emissions By Testo 350 Maritime – Exhaust Gas Analyzer. *Pedagogika-Pedagogy*, 93, 186-195. <https://doi.org/10.53656/ped21-6s.16mea>
- Baldi, S., Quang, T. L., Holub, O., & Endel, P. (2017). Real-time monitoring energy efficiency and performance degradation of condensing boilers. *Energy Conversion and Management*, 136, 329-339. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.016>
- C.L, C., D.S, J., & Sonoli, S. (2018). Multiple Linear Regression Analysis for Prediction of Boiler Losses and Boiler Efficiency. *International Journal of Instrumentation and Control Systems*, 8(2), 01-09. <https://doi.org/10.5121/ijics.2018.8201>
- Chayalakshmi, C. L., Jangamshetti, D. S., & Sonoli, S. (2015, 10-13 Aug. 2015). Boiler efficiency estimation from hydrogen content in fuel. 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI),
- Kljajić, M., Gvozdenac, D., & Vukmirović, S. (2012). Use of Neural Networks for modeling and predicting boiler's operating performance. *Energy*, 45(1), 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.067>
- Liu, W., Zhou, W., Yang, L., Lü, X., & Liu, G. (2020). Investigation on the performance evaluation of gas-fired combi-boilers with factor analysis and cluster analysis. *SN Applied Sciences*, 2(6). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2931-9>
- Nikula, R.-P., Ruusunen, M., & Leiviskä, K. (2016). Data-driven framework for boiler performance monitoring. *Applied Energy*, 183, 1374-1388. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.072>
- Ochoa, G. V., Rojas, J. P., & Avella, J. C. (2019). Energy Optimization of Industrial Steam Boiler Using Energy Performance Indicator. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(6), 109-117. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8188>





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายจอมภัก บำรุงรส  
วันเกิด 8 ตุลาคม 2544  
สถานที่เกิด เชียงใหม่  
สถานที่อยู่ปัจจุบัน หอพักธัญนิชา 41 หมู่ที่ 10 ตำบลบัวปากท่า อำเภอบางเลน นครปฐม 73130  
ตำแหน่งหน้าที่การงาน วิศวกรรม-ซ่อมบำรุง  
สถานที่ทำงานปัจจุบัน สิงห์ เบเวอเรจ 99 ถนน 3422 หมู่ 10 ตำบลบัวปากท่า อำเภอบางเลน นครปฐม 73130  
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2567 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
พ.ศ. 2568 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ จิโต ชีเว