

# การกำหนดอากาศส่วนเกินเพื่อควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟ ที่ก่อให้เกิดการหลอมตัวของถ่าน ในหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าถ่านที่มี แคลเซียมออกไซด์สูง

## Designation of Excess Air for Controlling Flame Temperature Causing Slag Melting of a Power Plant Using Lignite with High Calcium Oxide

พิพัฒน์พงษ์ วงศ์ไพศาลฤทธิ์<sup>1</sup> ธรนิศวรร์ ดีทายาท<sup>2</sup> และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์<sup>2</sup>

Pipatpong Wongpaisanrit<sup>1</sup>, Thoranis Deethayat<sup>2</sup> and Tanongkiat Kiatsiriroat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางคุณภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

<sup>1</sup>Energy Engineering Program, Faculty of Engineering and Graduate School,  
Chiang Mai University, 50200, Thailand

<sup>2</sup>Thermal System Laboratory, Department of Mechanical Engineering,  
Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 50200, Thailand

<sup>1</sup>E-mail: pipatpong.w@egat.co.th, Telephone Number: 054-252313

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอากาศส่วนเกิน ที่มีผลต่ออุณหภูมิเปลวไฟในหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้า ขนาด 300 MW ที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์ ที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง โดยพิจารณาการใช้งานที่อากาศส่วนเกินมีค่า 22.5%-28.5% หรือ % O<sub>2</sub> ที่ 3.85-4.65% เมื่อมีการใช้ถ่านหินลิกไนต์ที่มีองค์ประกอบคาร์บอน (C) 37.05-40.24% และไฮโดรเจน (H) 3.89-4.66% ถ้าอากาศส่วนเกินไม่เหมาะสม อุณหภูมิเปลวไฟจะสูงเกินไป ก่อให้เกิดการหลอมตัวของถ่านบนผนังหม้อไอน้ำ และถ้าอากาศส่วนเกินสูงเกินไป ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำจะลดลง

ค่าอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียเบติก (Adiabatic Flame Temperature, *AFT*) ของถ่านหินข้างต้น ที่อากาศส่วนเกินต่าง ๆ และในช่วงอากาศส่วนเกินที่ใช้งานจริง พบว่า อุณหภูมิเปลวไฟจริง (Flame Temperature, *FT*) สำหรับถ่านหินที่มีส่วนผสมในช่วงที่ใช้งาน มีค่าเฉลี่ยเป็น 0.598 *AFT* และสามารถกำหนดสมการได้ในรูป  $FT = 0.598(540.54x^2 - 1460.8x + 2165.4)$  เมื่อ  $x$  คืออากาศส่วนเกินระหว่าง 22.5-28.5% สมการนี้ไปช่วยกำหนดอากาศส่วนเกินที่ทำให้ *FT* ไม่เกินอุณหภูมิที่ถ่านหลอมละลาย ซึ่งในถ่านชนิดนี้อยู่ที่ 1,100°C ได้ทันที ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบเดิม ที่มีการปรับอากาศส่วนเกินทีละ 5% จากการทดสอบภายใต้การทำงานจริงพบว่า การใช้วิธีการที่พัฒนา สามารถลดระยะเวลาในการควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟ โดยไม่เกิดการหลอมละลายของถ่านได้รวดเร็ว ลดการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน และรักษาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้สูงเกิน 80%

### ABSTRACT

Effect of excess air on flame temperature in a coal-fired boiler of a 300 MW power plant using lignite with high calcium oxide as fuel was considered. In this study, the % Excess Air was in a range of 22.5%-28.5% or % Excess O<sub>2</sub> at 3.85-4.65% and the lignite composition was consisted of 37.05-40.24% carbon (C) and 89-4.66% hydrogen (H). If the % Excess Air was not appropriate, the flame temperature (*FT*) might be too high and the slag in the combustion gas and was melted on the boiler surface. When the excess air was too high, this might reduce the boiler efficiency.

The Adiabatic Flame Temperature, *AFT* of the above lignite at various values of %Excess air could be evaluated. It could be noted that, for the %Excess Air in the actual range, the actual Flame Temperature, *FT* could be found to be  $0.598 AFT$  and an empirical equation could be set in a form  $FT = 0.598(540.54x^2 - 1460.8x + 2165.4)$  where *x* was the %Excess Air during 22.5-28.5%. This equation could be used to denote the value of %Excess Air of which the *FT* was not over the limit of the slag melting which was 1,100°C. Thus the suitable % Excess Air could be set quickly to control the *FT* accurately compared with the manual control by the operator of which the %Excess Air was adjusted with 5% step change. The developed method was tested in two actual cases, and it could be found that the operation could be easily performed. The time to keep the *FT* to be in the limit could be done quickly. Lower lignite consumption was found and the boiler efficiency could be maintained over 80%.

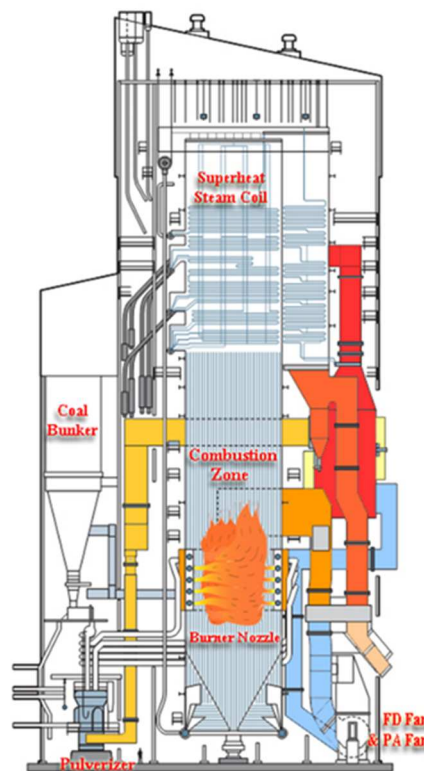
**Keywords:** Coal-fired Boiler, Excess Air, Flame Temperature, Boiler Efficiency, Slag Melting

### 1. บทนำ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 8-13 เป็นโรงไฟฟ้าแบบพลังความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ ขนาดกำลังการผลิต 300 MW ตั้งอยู่ที่จังหวัดลำปางทางตอนเหนือของประเทศไทย มีการติดตั้งและใช้งานหม้อไอน้ำแบบ Pulverized Coal-Fired Boiler ที่มีระบบการเผาไหม้เป็นแบบ Tangential Fired Furnace ดังแสดงในรูปที่ 1

หม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 8-13 สามารถผลิตไอน้ำ 265 kg/s อุณหภูมิไอน้ำ 540°C ที่ความดันไอน้ำ 167 bar (g) จากการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อไอน้ำความดันน้ำ 181 bar (g) ที่อุณหภูมิน้ำ 297°C โดยไอน้ำที่ได้จะนำไปหมุนกังหันไอน้ำ (Turbine) เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ 300 MW [1] โดยกระบวนการเผาไหม้จะต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ มีรายละเอียดดังนี้

ระบบป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ที่ขนาดความละเอียด ขนาด 200 mesh จะป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินอัตราประมาณ 220-300 Ton/h เข้าสู่ระบบการเผาไหม้ของอากาศที่ใช้ในการสันดาป จะถูกป้อนในอัตราประมาณ 335-370 kg/s ทั้งนี้เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้



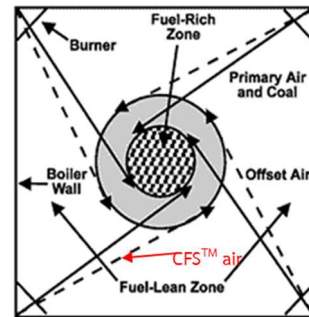
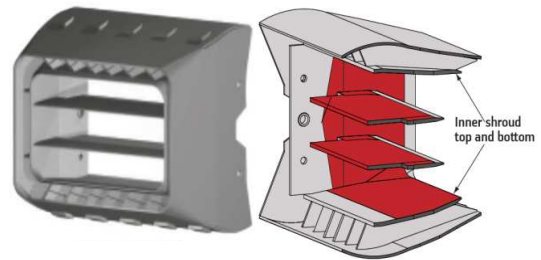
รูปที่ 1 หม้อไอน้ำแบบ Pulverized Coal-Fired Boiler

จากการใช้งานหม้อไอน้ำที่ผ่านมามีคุณภาพของถ่านหินจากบ่อเหมืองแม่เมาะ มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ใช้ในการออกแบบเริ่มต้น ซึ่งมีค่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกิน 20% โดยน้ำหนักแต่ในปัจจุบัน ค่าดังกล่าวในถ่านหินจะมีค่าสูงขึ้นเกินกว่า 23% ซึ่งสูงเกิน

กำหนดที่ได้ออกแบบไว้สำหรับโรงไฟฟ้า ผลที่พบจากการใช้งาน เมื่อเตาที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ได้รับความร้อนภายในห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า  $1100^{\circ}\text{C}$  ก็จะเกิดการหลอมละลายของเถ้า เกิดเป็นตะกรัน (Slag) เกาะบริเวณบนผนังท่อไอน้ำและผนังเตาในขณะใช้งาน ตะกรัน (Slag) ที่หลอมละลายเมื่อเย็นตัวลงจะมีความแข็ง มีน้ำหนักมากเนื่องจากไม่มีรูพรุน บริเวณเนื้อผิวของตะกรันมีผิวสีดำมันวาว ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ทำความสะอาดผนังท่อไอน้ำ (Steam Soot Blower) ไม่สามารถขจัดตะกรันที่เกาะออกไปได้ และเมื่อมีการก่อตัวของตะกรัน (Slag) เป็นปริมาณมาก จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟและแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไปยังผนังเตา (Water Wall) ลดลง เนื่องจากตะกรันจะมีสภาพเป็นฉนวนกั้นความร้อน เมื่อตะกรัน (Slag) เกาะตัวกันเป็นปริมาณมาก ก็จะทำให้น้ำหนักของตะกรันเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถยึดเกาะผนังท่อไอน้ำได้ก็จะถล่มลงมาสู่กันเตาในคราวเดียวเป็นปริมาณมาก มีปัญหาต่อระบบลำเลียงเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ ส่งผลกระทบต่อโรงไฟฟ้า อาจต้องหยุดเดินเครื่องอย่างกะทันหัน (Unplanned Outage) ก่อให้เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก และต้องใช้เวลาในการนำตะกรัน (Slag) ที่ถล่มลงมาออกจากระบบลำเลียงเชื้อเพลิงได้เตา ดังนั้น จึงมีมาตรการแก้ไข โดยการปรับปรุงระบบการเผาไหม้ Combustion (Coal & Air Distribution) ใหม่ [1] เพื่อลดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ให้มีความต่ำกว่า จุดหลอมเหลวของเถ้าที่เกิดจากเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์

วิธีการปรับปรุงระบบการเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 2 โดยการเพิ่มปริมาณ excess air ด้วยการปรับแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็น 2 ส่วน (Separated Over Fired Air, SOFA) และปรับเปลี่ยนระบบจ่ายลม ได้แก่ Main Windbox Nozzle Tips, ติดตั้ง Adjustable Concentric Firing System (CFS) Nozzle Tips, รวมถึงการจัดรูปแบบหัวเผา (Coal Burner) ให้สามารถปรับมุมการพ่นผงถ่านหิน ซึ่งทำให้ส่งผลถึงการปรับเปลี่ยนรูปแบบการกระจายอุณหภูมิภายในเตาใหม่

สามารถลดอุณหภูมิเผาไหม้ บริเวณด้านบนของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ ให้ลดลงต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้า



รูปที่ 2 การปรับปรุงหัวเผาของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

การกระทำดังกล่าวทำให้รูปแบบการควบคุมการผลิตไอน้ำ แตกต่างจากการควบคุมแบบเดิม ทำให้พนักงานเดินเครื่องโรงไฟฟ้าซึ่งไม่คุ้นเคยกับรูปแบบการควบคุมระบบการเผาไหม้แบบใหม่ และการควบคุมการเดินเครื่องบางส่วนยังใช้การตัดสินใจจากพนักงานเดินเครื่อง หากมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในการเดินเครื่อง เช่น การป้อนอากาศเข้าสู่ Boiler ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้อุณหภูมิใน Boiler ลดลงเนื่องจากความร้อนถูกพาออกจาก Boiler ทาง Stack ทำให้ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าลดลง ในทางตรงกันข้าม หากปริมาณอากาศที่ป้อนเข้า Boiler น้อยเกินไป เชื้อเพลิงและอากาศก็ไม่เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง จะมีเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ ก่อให้เกิด Unburned Fuel หลงเหลืออยู่จะถูกพาออกจาก Boiler ทาง Stack ก็เป็นพลังงานสูญเปล่าเช่นกัน ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และส่งผลให้ประสิทธิภาพของ Boiler ลดลง จึงจำเป็นต้องมีการหาจุดเหมาะสมในการควบคุมการเดินเครื่อง เพื่อมาใช้ในการตัดสินใจแทนพนักงานควบคุมการเดินเครื่อง

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาการใช้ปริมาณอากาศที่เหมาะสมของระบบการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกำลังการผลิต 300 MW โดยที่อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่บริเวณผนังเตาเหนือห้องเผาไหม้ไม่ก่อให้เกิดการหลอมตัวของซีเมนต์ สำหรับการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาข้อมูลปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับสมรรถนะการทำงานของหม้อไอน้ำ เพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุงวิธีการเดินเครื่องให้สอดคล้องกับรูปแบบการเผาไหม้ที่ปรับเปลี่ยนไป

## 2. ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

การเผาไหม้เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ดังนั้นในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะต้องมีการควบคุมอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปริมาณน้ำหนักเชื้อเพลิง หรือปริมาณน้ำหนักของถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าให้เหมาะสม ค่าทางทฤษฎีได้มาจากการดุลสมการการเผาไหม้ของถ่านหิน และจะมีการกำหนดค่าอากาศส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้หรือค่า Excess Air เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ [2] และการใช้งานของหม้อไอน้ำนั้น ๆ เพื่อให้สมรรถนะของหม้อไอน้ำมีค่าสูง และไม่ก่อให้เกิดมลพิษเกินค่าที่กำหนด

ในงานนี้ การเผาไหม้ถ่านหินจะมีการแบ่งใช้ปริมาณอากาศในการเผาไหม้ออกเป็น 2 ส่วน และต้องควบคุมปริมาณอากาศทั้งหมดที่ก่อให้เกิดเป็นอากาศส่วนเกินที่เหมาะสม [3]

อากาศส่วนที่ 1 (Primary Air) ใช้สำหรับนำพาผงถ่านหินมายัง Burner อากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air) จะช่วยการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ ซึ่งตามหลักการออกแบบต้องตระหนักถึงปริมาณและมุมของหัวฉีดเชื้อเพลิงในการส่งอากาศและผงถ่านไปยังห้องเผาไหม้ ในการเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะต้องพิจารณาค่าดังต่อไปนี้

- Time คือ ระยะเวลาในการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ทั้งหมด จนได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์

- Temperature คือ อุณหภูมิในการเผาไหม้ที่เหมาะสม

- Turbulence คือ การหมุนวนหรือการคลุกเคล้าที่ทั่วถึงของอากาศกับเชื้อเพลิง

ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณและจุดหรือมุมของหัวฉีดเชื้อเพลิงในการส่งอากาศไปยังห้องเผาไหม้เป็นสำคัญ รวมถึงอัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงที่เหมาะสม [4]

ระบบเผาไหม้โดยทั่วไปต้องป้อนปริมาณอากาศที่เกินเพื่อให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การใช้งานเชื้อเพลิงชนิดแข็งในระบบการเผาไหม้จะต้องแบ่งการส่งอากาศออกเป็น 2 ส่วนแล้ว ยังต้องใช้ปริมาณอากาศที่เกินสูงมากถึงประมาณ 15–60% ของปริมาณเชื้อเพลิง และยังแปรผันตามระบบหรืออุปกรณ์ที่ใช้กันด้วย [5]

การใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งจะให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์แล้ว ยังช่วยลดการสูญเสียความร้อนได้ด้วย เพราะหากการเผาไหม้ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ยังส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ที่เรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) [6] และหากการเผาไหม้ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในปริมาณมากเกินไป ปริมาณอากาศส่วนที่เกินพอที่นำเข้ามาใช้ในการเผาไหม้ก็จะออกไปจากระบบโดยไม่ได้ทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ยังส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ที่เรียกว่า การสูญเสียความร้อนสัมผัส (Sensible heat loss) ซึ่งการสูญเสียความร้อนจะถูกนำพาความร้อนไปกับอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ในรูปของ Emission เช่น CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> เป็นต้น [7]

## 2.1 อุณหภูมิเปลวอะเดียเบติก (Adiabatic Flame Temperature: AFT)

ในการหาอุณหภูมิของการเผาไหม้ในสภาวะที่กระบวนการเผาไหม้ที่ไม่มีการสูญเสียค่าความร้อน (Adiabatic) จะพิจารณาจากการทำสมดุลสมการทางเคมีของเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และพิจารณาเอนทัลปีของตัวทำปฏิกิริยา (Reactants, R) จนกระทั่งได้เอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา (Products, P) โดย

$$H_{P2} - H_{R1} = 0 \quad (1)$$

$$\text{หรือ } H_{P2} - H_{R1} = (H_{P2} - H_{P0}) + \Delta H_0 + (H_{R0} - H_{R1}) \quad (2)$$

ทั้งนี้

$$(H_{P2} - H_{P0}) = \sum_P m_i c_{pi} (T_2 - T_0) = (T_2 - T_0) \sum_P m_i c_{pi} \text{ และ}$$

$$(H_{R0} - H_{R1}) = \sum_R m_i c_{ri} (T_0 - T_1) = (T_0 - T_1) \sum_R m_i c_{ri}$$

อุณหภูมิ  $T_2$  จะเป็นอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติก  $H$  คือเอนทัลปีที่สภาวะต่าง ๆ และ  $\Delta H_0$  คือ Enthalpy of Reaction ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง

ค่า Adiabatic Flame Temperature  $T_2$  จะหาได้จากสมการ (2) เมื่อกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศ และอุณหภูมิเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ  $T_1$

## 2.2 สมรรถนะของหม้อไอน้ำ [8]

ค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจะเป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่น้ำเปลี่ยนรูปเป็นไอน้ำ เทียบกับพลังงานทั้งหมดที่ให้กับหม้อไอน้ำส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ที่สภาวะคงตัวโดย

$$\text{Boiler Eff.} = \frac{\text{Heat absorbed by working fluid}}{\text{Heat in fuel} + \text{Heat credits}} \times 100 \quad (3)$$

โดย Heat adsorbed by working fluid =

$$\dot{m}_{SH} (h_{SH} - h_{FW}) + \dot{m}_{RH} (h_{HRH} - h_{CRH}) + \dot{m}_{SHS\text{Spray}} (h_{SH} - h_{SHS\text{Spray}}) + \dot{m}_{RHS\text{Spray}} (h_{HRH} - h_{RHS\text{Spray}}) \quad (4)$$

$\dot{m}_{SH}$  คือ อัตราการไหลของ Superheated Steam kg/s

$\dot{m}_{RH}$  คือ อัตราการไหลของ Reheated Steam kg/s

$\dot{m}_{SHS\text{Spray}}$  คือ อัตราการไหลของ Superheated Spray kg/s

$\dot{m}_{RHS\text{Spray}}$  คือ อัตราการไหลของ Reheated Spray kg/s

$h_{SH}$  คือ เอนทัลปีของ Main Steam kJ/kg

$h_{FW}$  คือ เอนทัลปีของน้ำป้อนเข้า Boiler kJ/kg

$h_{HRH}$  คือ เอนทัลปีของ Hot Reheated Steam kJ/kg

$h_{CRH}$  คือ เอนทัลปีของ Cold Reheated Steam kJ/kg

$h_{SHS\text{Spray}}$  คือ เอนทัลปีของ Superheated Spray kJ/kg

$h_{RHS\text{Spray}}$  คือ เอนทัลปีของ Reheated Spray kJ/kg

## Heat in Fuel

= อัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน  $\times$  ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านหิน

## Total Heat Credits

= ค่าความร้อนสัมผัสในเชื้อเพลิง + ค่าพลังงานจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในหม้อไอน้ำ + ค่าความร้อนของอากาศที่ป้อนเข้า

ค่าความร้อนจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

= กำลังไฟฟ้าที่ใช้งานในหม้อไอน้ำ  $\times$  ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

## 3. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการนำผลการศึกษาเพื่อนำเทียบกับข้อมูลการใช้งานจริง ซึ่งที่มาข้อมูลใช้งานได้จากการเก็บข้อมูลกระบวนการเผาไหม้และข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำรายนาที่ โดยใช้อุปกรณ์ของตัวโรงไฟฟ้าซึ่งเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายข้อมูลโรงไฟฟ้าและถูกบันทึกไว้ ทั้งนี้สมบัติของถ่านหินที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Lignite Coal Ultimate Analysis (ข้อมูลในงานวิจัยนี้)

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Carbon (%)	34.46	34.16	34.95	40.04	40.32	39.66	40.59	41.03	40.58	40.73
Hydrogen (%)	4.25	4.04	4.17	4.47	4.57	4.75	4.61	4.6	4.82	4.81
Nitrogen (%)	1.41	1.28	1.25	1.42	1.45	1.49	1.5	1.45	1.52	1.49
Sulfur (%)	3.25	3.23	3.14	3.58	3.48	3.64	3.26	3.18	3.8	4.22
Oxygen (%)	23.67	19.47	20.25	20.98	22.05	21.44	21.12	21.44	21.02	19.94
CaO free SO <sub>3</sub> (%)	27.83	23.80	22.98	29.00	23.02	27.20	29.49	27.97	26.85	29.19
HHV (kJ/kg)	12,397	12,313	12,041	12,233	12,518	10,697	12,325	12,376	12,409	12,715

สำหรับการวิจัยครั้งนี้จะนำข้อมูลการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าช่วงเดินเครื่องที่กำลังผลิต 300 MW โดยมีการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีอัตราการป้อน 260 Ton/hours จะได้อิอนน้ำตามคุณลักษณะของหม้อไอน้ำดังแสดงในตารางที่ 2

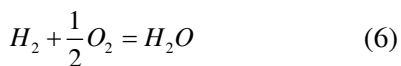
ตารางที่ 2 คุณลักษณะของหม้อไอน้ำที่ศึกษาวิจัย

Parameter	Value
Main Steam Temp (°C)	540
Main Steam Pressure (Bar)	160
Main Steam Flow (kg/s)	265
Reheat Steam Temp (°C)	540
Reheat Steam Pressure (Bar)	38
Reheat Steam Flow (kg/s)	243

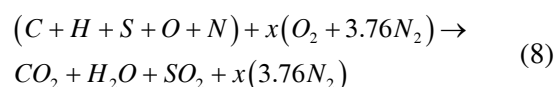
#### 4. ผลการวิจัย

##### 4.1 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

จากทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหินที่สมบูรณ์ องค์ประกอบของธาตุที่ทำปฏิกิริยากับอากาศจะประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์



เมื่อนำสมการเคมีของเชื้อเพลิงถ่านหินและอากาศมาเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์จะได้



เมื่อนำข้อมูลผลวิเคราะห์ถ่านหินแบบ Ultimate analysis ในตารางที่ 1 มาแทนค่าต่าง ๆ ตามสมการ (5-8) จะได้ปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

ตารางที่ 3 แสดงการคำนวณหาค่าอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จากฐานการใช้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม

	Mass	O <sub>2</sub> Required
Carbon (C)	$34.46 \times 100 = 0.3446$	$0.3446 \times \frac{32}{12} = 0.9189$
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	$4.25 \times 100 = 0.0425$	$0.0425 \times \frac{16}{2} = 0.340$
Sulfur (S <sub>2</sub> )	$3.25 \times 100 = 0.0325$	$0.0325 \times \frac{32}{32} = 0.0325$
Oxygen (O)	$23.67 \times 100 = 0.2367$	-0.2367
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	$1.41 \times 100 = 0.0141$	-

การเผาไหม้ต้องการออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ต่อเชื้อเพลิงถ่านหิน 1 กิโลกรัม

$= 0.9189 + 0.340 + 0.0325 - 0.2367 = 1.0547$  kg  
เมื่อออกซิเจน (O<sub>2</sub>) = 23.1%, ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) = 76.9%  
โดยเชิงน้ำหนัก (by Weight)

ดังนั้นการเผาไหม้ต้องการอากาศ  $= \frac{1.0547}{0.231} = 4.56$  kg ต่อ 1 kg เชื้อเพลิงถ่านหิน

หลังจากนำข้อมูลเชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามตารางที่ 1 ทั้ง 10 ตัวอย่างมาคำนวณหาการใช้ปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ พบว่าอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงที่ถูกต้อง (Stoichiometric A/F ratio) โดยเชิงน้ำหนัก (by Weight) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 4.56-5.69 kg ต่อ 1 kg เชื้อเพลิงถ่านหิน

#### 4.2 ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้

ค่าอากาศส่วนเกิน (Excess Air) ซึ่งปริมาตร (by Volume) ในการเดินเครื่องหม้อไอน้ำ สามารถหาค่าได้จากสมการนี้

$$\% \text{ excess air} = \frac{O_2\%}{21 - O_2\%} \times 100 \quad (9)$$

จากสมการ (9) นำมาแทนค่าเพื่อหาค่า % excess air ทั่วไป จะได้ข้อมูลตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่า % excess air สำหรับเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ทั่วไป

% excess air	0	20	40	60	80	100
O <sub>2</sub> %	0	3.5	6.1	8.0	9.4	10.6

ตารางที่ 5 แสดงอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติก (Adiabatic Flame Temperature : AFT) จากการคำนวณตามองค์ประกอบของเชื้อเพลิงถ่านหิน

Summary of Results											
Excess Air	AFT1 (°C)	AFT2 (°C)	AFT3 (°C)	AFT4 (°C)	AFT5 (°C)	AFT6 (°C)	AFT7 (°C)	AFT8 (°C)	AFT9 (°C)	AFT10 (°C)	Aver. AFT (°C)
0.0%	2175.44	2176.38	2176.99	2176.78	2176.68	2176.41	2176.36	2176.84	2176.41	2176.67	2176.50
10.0%	2018.63	2019.34	2019.88	2019.57	2019.51	2019.39	2019.24	2019.63	2019.37	2019.59	2019.42
20.0%	1883.63	1884.17	1884.65	1884.27	1884.25	1884.24	1884.02	1884.33	1884.20	1884.38	1884.21
40.0%	1663.08	1663.38	1663.78	1663.31	1663.34	1663.47	1663.16	1663.37	1663.42	1663.54	1663.39
60.0%	1490.51	1490.67	1491.00	1490.50	1490.55	1490.77	1490.42	1490.56	1490.71	1490.80	1490.65
80.0%	1351.81	1351.87	1352.15	1351.64	1351.70	1351.96	1351.60	1351.69	1351.91	1351.97	1351.83
100%	1237.88	1237.87	1238.12	1237.61	1237.68	1237.97	1237.60	1237.66	1237.91	1237.95	1237.83

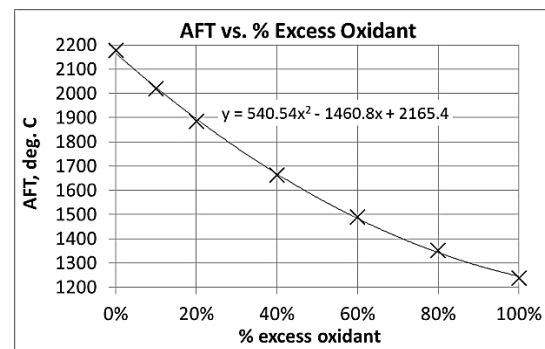
ในงานนี้ได้ทำการคำนวณค่าอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติก จากข้อมูลตัวอย่างถ่านหินทั้ง 10 กลุ่มตัวอย่างในแต่ละช่วงค่า % Excess Air ที่นำมาศึกษาทั้งหมด พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนแตกต่างกันไม่เกิน 0.01% จากค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วง ดังนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติกเป็นตัวแทนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ตามรูปที่ 3

จากข้อมูลการศึกษาทดลองระบบการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง พบว่ามีการปรับค่าอากาศส่วนเกินอยู่ในช่วง 22.5-28.5% โดยมีค่าดังตารางที่ 6

จากการบันทึกข้อมูลการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้พบว่าโรงไฟฟ้ามีการเดินเครื่องที่ค่า % excess air ระหว่าง 22.5-28.5% หรือ 3.85-4.65% O<sub>2</sub>

#### 4.3 อุณหภูมิเปลวไฟของห้องเผาไหม้

จากข้อมูลเชื้อเพลิงถ่านหินตามตารางที่ 1 เมื่อไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิของการเผาไหม้ในสภาวะที่กระบวนการเผาไหม้ที่ไม่มีการสูญเสียค่าความร้อน (Adiabatic) ตามสมการ (2) และกำหนดให้มีการป้อนอากาศส่วนเกินที่ค่า 0-100% ตามตารางที่ 4 จะได้ค่าตามที่แสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 3 อุณหภูมิเปลวอะเดียเบติกของการเผาไหม้ในสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่มีการสูญเสียค่าความร้อน

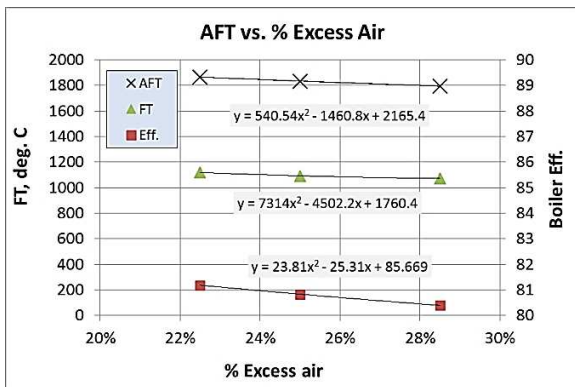


ตารางที่ 6 Flame Temperature จากการทดสอบของ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 8 เมื่อวันที่ 26 ต.ค. 2558

Summary of Results		
% Excess Air	FT (°C)	Boiler Eff
22.5%	1118	81.18%
25.0%	1092	80.83%
28.5%	1071	80.39%

เมื่อนำข้อมูลค่าอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติกเฉลี่ยจากการคำนวณตามตารางที่ 5 ในช่วง 22.5-28.5% มาพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงค่า % excess air ระหว่าง 22.5-28.5% แสดงตามตารางที่ 6

จากรูปที่ 4 เห็นได้ว่าการป้อนปริมาณอากาศส่วนเกินในปริมาณสูงเกิน จะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟมีค่าลดลงและยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ และเมื่อพิจารณาในช่วงของ % Excess air 22.5-28.5% จะพบว่าสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงของ % Excess air ทุก 1% จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเปลี่ยนแปลงตามโดยมีค่าประมาณ 0.13%



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติกของการเผาไหม้ กับอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

เมื่อพิจารณาสมการจากกราฟรูปที่ 4 ระหว่างอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติก (AFT) กับอุณหภูมิเปลวไฟจากการใช้งานจริง (FT Actual)

รูปที่ 4 แสดง อุณหภูมิเปลวอะเดียเบติก ในช่วง % excess air 22.5-28.5%

$$AFT = 540.54 x^2 - 1460.8 x + 2165.4 \quad (10)$$

อุณหภูมิเปลวไฟจากการใช้งานจริง จากรูปที่ 4 ในช่วง % excess air  $x = 22.5-28.5\%$  สามารถกำหนดในรูป

$$FT = 7314 x^2 - 4502.2 x + 1760.4 \quad (11)$$

นำข้อมูลอุณหภูมิเปลวอะเดียเบติก (AFT) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิเปลวไฟจากการใช้งานจริง (FT Actual) ในแต่ละค่าของ % Excess Air ในช่วง 22.5-28.5% จะได้ตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงค่าอุณหภูมิการเผาไหม้ และผลต่างของอุณหภูมิที่ได้

Detail	1	2	3	Aver.
% excess air	22.5%	23.6%	28.5%	-
AFT (°C)	1864	1834	1793	-
FT (°C)	1118	1092	1071	-
FT/AFT	0.600	0.595	0.598	0.598

ค่าอุณหภูมิเผาไหม้ที่ใช้งานจริง อาจคำนวณได้จาก AFT โดย

$$FT = 0.598(540.54x^2 - 1460.8x + 2165.4) \quad (12)$$

จากสมการ (12) จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่รู้ค่าที่ใช้น้ำมันที่มีสามารถกำหนดองค์ประกอบของเชื้อเพลิง และสัดส่วน A/F หรือ % excess air ต่าง ๆ จะสามารถหา AFT ได้ และจาก AFT ถ้าสามารถกำหนดความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเปลวไฟจริง FT จะสามารถทำนายอุณหภูมิ FT ได้ และจากสมการ ถ้ากำหนด FT ที่ 1,100°C จะสามารถกำหนด % excess air ได้เลย สำหรับเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบที่รู้ค่า

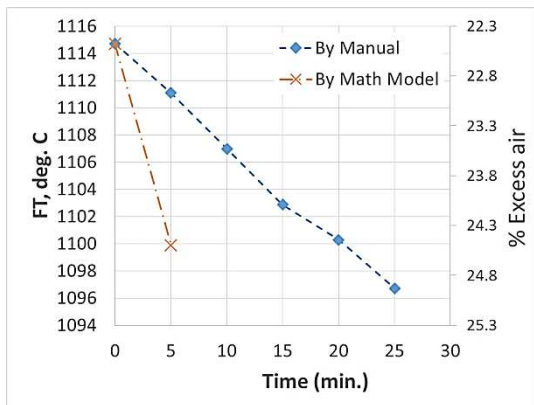
เมื่อนำสมการ (12) ไปเปรียบเทียบกับการใช้งานหม้อไอน้ำที่พนักงานเดินเครื่องควบคุมอุณหภูมิห้องเผาไหม้โดยทั่วไป ดังตัวอย่างในกรณีศึกษาดังต่อไปนี้ ซึ่งพนักงานเดินเครื่องจะใช้วิธีการเปลี่ยนค่า Air Fuel Ratio ด้วยการปรับ % excess air แบบค่อยเป็นค่อยไป เพื่อให้ได้อุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ต้องการ



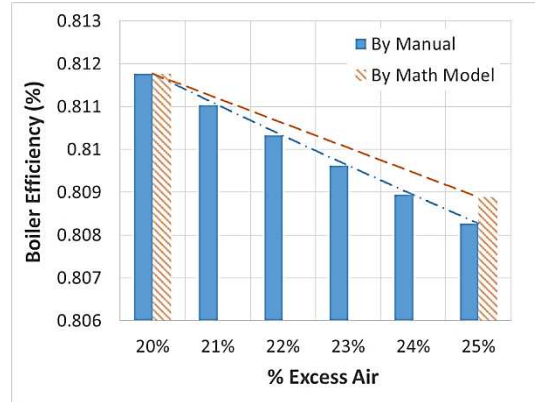
กรณีศึกษาที่ 1 โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินที่มีคุณสมบัติดังนี้

C=40.04, H=4.47, N=1.42, S=3.58, O=20.98  
เมื่อใช้ % excess air ที่ 22.5% พบว่าอุณหภูมิเปลวไฟที่ใช้งาน 1,115°C ต้องการควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟให้ต่ำกว่า 1,100°C เพื่อป้องกันการก่อตัวของเถ้าหลอม (Slag)

ในการควบคุมอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ต่ำกว่า 1,100°C พบว่าการควบคุมแบบเดิมซึ่งพนักงานเดินเครื่องจะไม่สามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ % excess air กับค่าอุณหภูมิเปลวไฟ พนักงานจะปรับค่า % excess air แบบค่อยเป็นค่อยไปในช่วงอุณหภูมิเปลวไฟค่าก่อนปรับลดกับค่าอุณหภูมิเป้าหมายต่างกันไม่เกิน 50°C จะปรับลดค่า % Excess air ครั้งละ 0.5% Excess air ทำให้ต้องปรับค่าถึง 5 ครั้ง ๆ ละ เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1,100°C แต่การควบคุมแบบใช้สมการ (12) สามารถช่วยให้การปรับค่าสามารถปรับเพียงครั้งเดียวก็สามารถควบคุมค่าตามที่ต้องการตามรูปที่ 5 ได้อย่างแม่นยำกว่าและให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า



รูปที่ 5 กรณีศึกษาที่ 1 เปรียบเทียบการควบคุมแบบปกติกับการควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ช่วยปรับอุณหภูมิการเผาไหม้

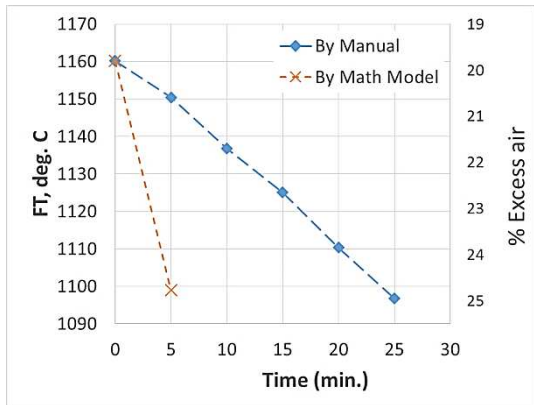


รูปที่ 6 กรณีศึกษาที่ 1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหม้อน้ำกับ % Excess air

จากการปรับค่า % Excess Air โดยการใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยสามารถลดระยะเวลาในการปรับลง 20 นาทีต่อการปรับค่าใน 1 ครั้ง ตามรูปที่ 5 และเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึง 0.108% ตามรูปที่ 6 ทำให้โรงไฟฟ้าเดินเครื่องในตำแหน่งที่หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพสูงกว่าปรับค่าแบบ manual ซึ่งในการเดินเครื่องที่หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ 80.914% จะมีการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน 270.84 ตันต่อชั่วโมง และหากเดินเครื่องที่หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ 80.827% จะมีการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน 271.93 ตันต่อชั่วโมง ฉะนั้นสามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลงได้ถึง 1.1 ตันต่อชั่วโมง หรือ 26.28 ตันต่อวัน (ราคาเชื้อเพลิงถ่านหินลิโกลไนต์ 569.70 บาทต่อตัน) ซึ่งทำให้ลดต้นทุนการผลิตจากค่าเชื้อเพลิงได้ถึง 14,973.36 บาทต่อวัน

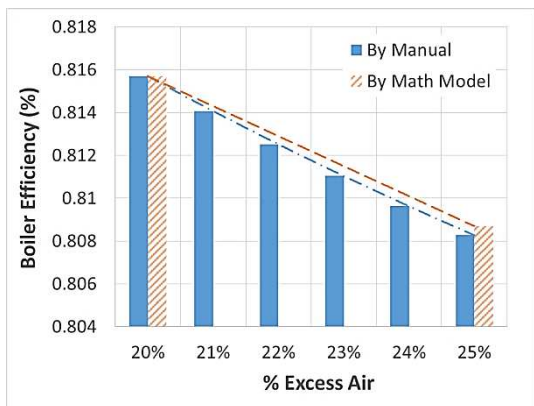
กรณีศึกษาที่ 2 โรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้เชื้อเพลิงถ่านหินที่มีคุณสมบัติดังนี้

C=34.16, H=4.04, N=1.28, S=3.23, O=19.47  
เมื่อใช้ Excess air ที่ 20% อุณหภูมิเปลวไฟที่ใช้งาน 1,160°C ต้องการควบคุมให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมีค่าใกล้เคียง 81% และอุณหภูมิเปลวไฟให้ต่ำกว่า 1,100°C



รูปที่ 7 กรณีศึกษาที่ 2 เปรียบเทียบการควบคุมแบบปกติกับการควบคุมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ช่วยปรับอุณหภูมิการเผาไหม้

ในการควบคุมอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ต่ำกว่า 1,100°C การปรับอุณหภูมิเปลวไฟค่าก่อนปรับลดกับค่าอุณหภูมิเป้าหมาย ต่างกันเกินกว่า 50°C จะปรับลดค่า % Excess air ครั้งละ 1.0% Excess air ทำให้ต้องปรับค่าถึง 5 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1,100°C แต่การควบคุมแบบใช้สมการ (12) สามารถช่วยให้การปรับค่าสามารถปรับเพียงครั้งเดียวก็สามารถควบคุมค่าตามที่ต้องการตามรูปที่ 7 ได้อย่างแม่นยำกว่าและให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า



รูปที่ 8 กรณีศึกษาที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำกับ % Excess air

จากการปรับค่า % Excess Air โดยการใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยสามารถลดระยะเวลาในการปรับลง 20 นาทีต่อการปรับค่าใน 1 ครั้ง ตามรูปที่ 6 และเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึง 0.076% ตามรูปที่ 8 ทำให้โรงไฟฟ้า

เดินเครื่องในตำแหน่งที่หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพสูงกว่าปรับค่าแบบ manual ซึ่งในการเดินเครื่องที่หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ 80.87% จะมีการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน 271.80 ตันต่อชั่วโมง และหากเดินเครื่องที่หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ 80.82% จะมีการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน 271.93 ตันต่อชั่วโมง ฉะนั้นสามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลงได้ถึง 0.13 ตันต่อชั่วโมง หรือ 3.26 ตันต่อวัน (ราคาเชื้อเพลิงถ่านหินลิโกลไนต์ 569.70 บาทต่อตัน) ซึ่งทำให้ลดต้นทุนการผลิตจากค่าเชื้อเพลิงได้ถึง 1,858.30 บาทต่อวัน

จากกรณีศึกษาทั้ง 2 กรณีพบว่า การปรับค่า Excess air ด้วยการใช้สมการที่พัฒนา ช่วยสามารถลดระยะเวลาปรับค่าให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งทำให้ค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมีค่าสูงกว่าการปรับค่าแบบปกติ

### 5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยพบว่าการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลิโกลไนต์แคลเซียมออกไซด์สูงที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนและองค์ประกอบอื่น ๆ ตามตารางที่ 1 จะให้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์สูงสุดไม่เกิน 1,883-1,885°C ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air) 20% และผลต่างของอุณหภูมิกายในห้องเผาไหม้ที่ได้จากการคำนวณแบบการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Adiabatic Flame Temperature: AFT) กับอุณหภูมิที่ได้จากการใช้งานจริงมีค่าเท่ากับ 598-600°C สำหรับการศึกษาในงานนี้พบว่า ค่าการปรับ Excess Air ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะอยู่ในช่วง 22.5-28.5% Excess air และในกรณีที่มีปรับ % Excess Air เพิ่มหรือลดทุก ๆ 1% จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเปลี่ยนแปลงตาม 0.13% เนื่องจากอุณหภูมิเปลวไฟมีการเปลี่ยนแปลงและการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟสามารถทำให้หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 0.076-0.108% และลดการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินได้ 26.28 ตันต่อวัน คิดเป็นราคาเชื้อเพลิงได้ถึง 14,973.36 บาทต่อวัน อีกทั้ง

ยังสามารถลดระยะเวลาในการปรับแต่งค่าอุณหภูมิเปลวไฟได้อย่างแม่นยำกว่าการควบคุมแบบเดิม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และขอขอบคุณหน่วยงานเดินเครื่องโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ทำวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. งานปรับปรุง Boiler โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 8-13 ให้ใช้ถ่านลิกไนต์ที่มีค่า CaO สูง. Unit 12, 2014; 3.
- [2] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. เทอร์โมไดนามิกส์ II. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2531.
- [3] Joseph, G. and Singer, P.E. Combustion Fossil Power (4th Edition). Combustion Engineering Inc., 1991.
- [4] สำเร็จ จักรใจ. การเผาไหม้. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [5] กัญจนา บุญเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [6] Kouprianov, V.I., Tanetsakunvatana, V. Optimization of excess air for the improvement of environmental performance of a 150 MW boiler fired with Thai lignite. *Applied Energy*, 2003; 74: 445-453.
- [7] BOZZUTO, C. Clean Combustion Technologies. A Reference Book on Steam Generation and Emissions Control fifth edition, Alstom Power Inc., 2009.
- [8] The American Society of Engineering. Performance Test Code Steam Generating Units PTC 4.1, 1974.