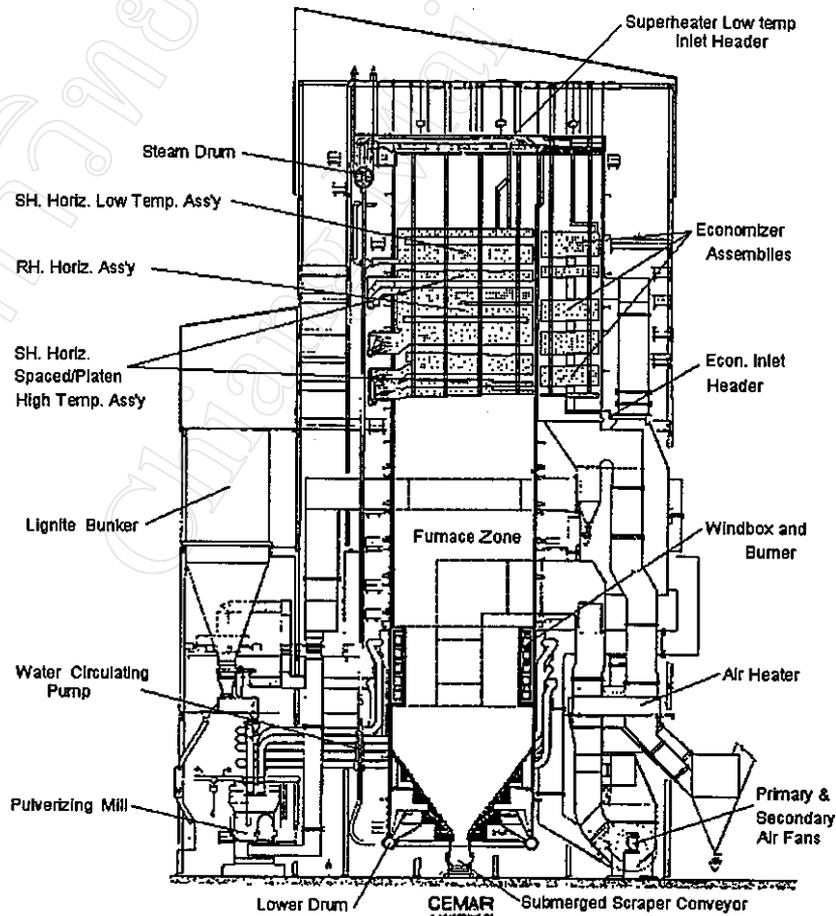


บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาวิจัย

3.1.1 เครื่องกำเนิดไอน้ำ

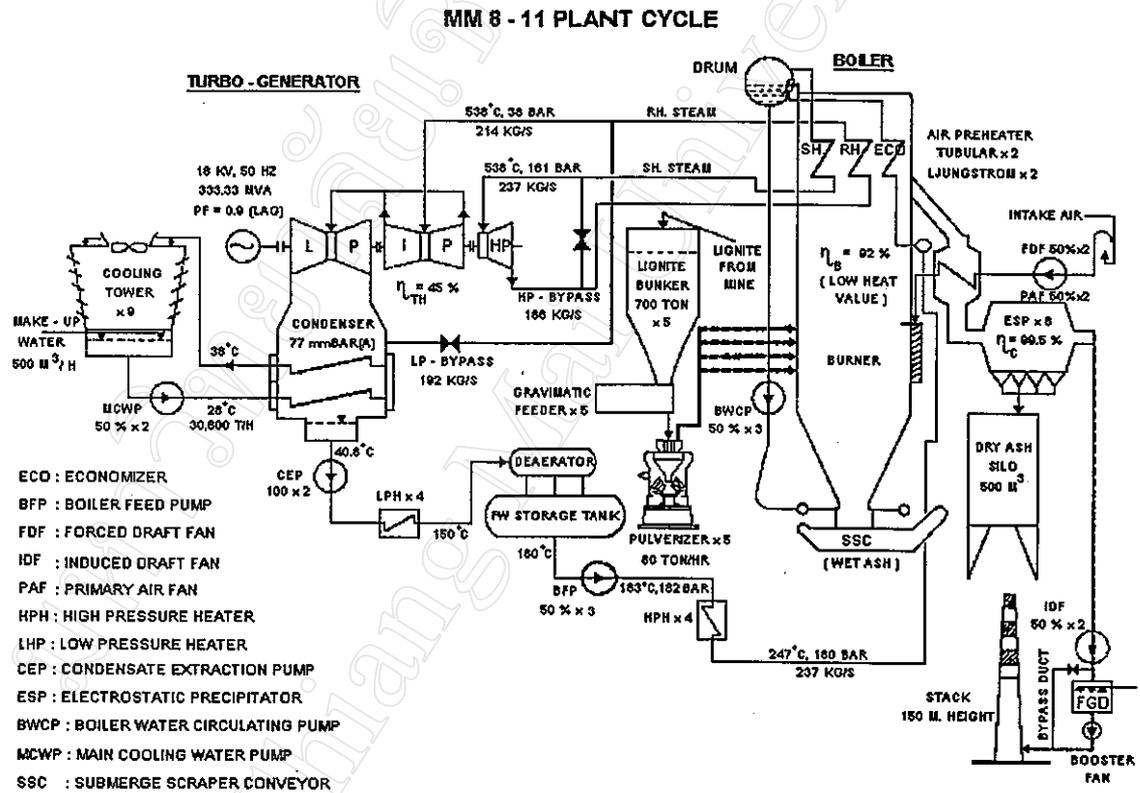
เครื่องกำเนิดไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-13 แสดงในรูปที่ 3.1 เป็นแบบ Forced Circulation Boiler (Water Tube Boiler) ใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Lignite Consumption) 77.1 kg/s อัตราการใช้อากาศในการเผาไหม้ (Total Combustion Air) 371.6 kg/s สามารถผลิตไอน้ำได้ 265 kg/s ความดัน 167 bar อุณหภูมิ 540 °C ที่ 100 % MCR (Maximum Capacity Requirements) ขนาดเครื่องกำเนิดไอน้ำ กว้าง 13.830 เมตร ยาว 15.316 เมตร สูง 67.970 เมตร



รูป 3.1 หม้อกำเนิดไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11

3.1.2 วงจรการทำงานของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8 - 11 มีวงจรการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยน้ำจาก FW. Storage Tank จะถูก Boiler Feed Pump (BFP) บีบส่งผ่าน High Pressure Heater (HPH) ไปยัง Economizer Assembly เข้า Steam Drum ไอน้ำที่ได้จะไปผ่าน Superheater Assembly แล้วออกจากหม้อกำเนิดไอน้ำ จะไปขับ High Pressure Turbine แล้วกลับไปปรับความร้อนที่ Reheater Assembly จากนั้นไปขับ Intermediate Pressure Turbine และ Low Pressure Turbine ไปควบแน่นที่คอนเดนเซอร์ แล้วถูก Condensate Extraction Pump บีบผ่าน Deaerator ไปที่ Feed Water Storage Tank ก่อนที่จะหมุนเวียนต่อไป



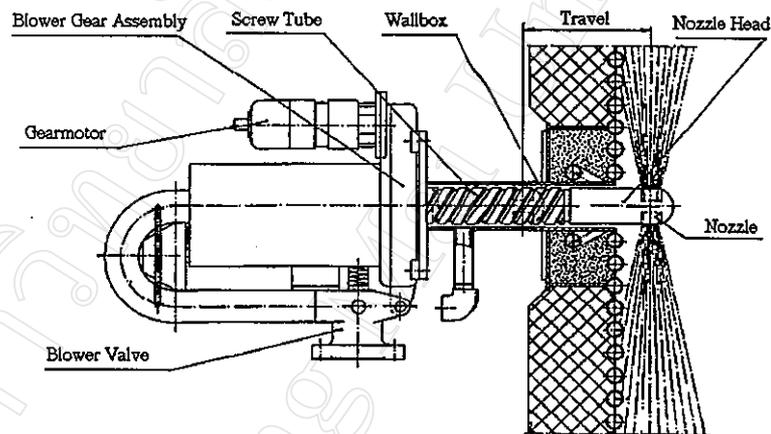
รูป 3.2 วงจรการทำงานของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11

3.1.3 เครื่องเป่าเถ้า (Soot Blower)

หม้อกำเนิดไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11 จะมีเครื่องเป่าเถ้า ทั้งหมด 182 ตัวต่อหน่วย โดยแยกเป็น เครื่องเป่าเถ้า ที่ทำความสะอาดผนังเตาบริเวณ Furnace Zone จำนวน 98 ตัว ซึ่งเรียกว่า Short Retracting Blower และเครื่องเป่าเถ้า ที่ทำความสะอาด Superheater Coil, Reheater Coil และ Economizer Coil หรือ Convection Zone มีจำนวน 84 ตัว จะเรียกว่า Long Retracting Blower ดังแสดงในรูป 3.3 และ 3.4 สำหรับ ข้อมูลของเครื่องเป่าเถ้าแต่ละแบบ จะแสดงในตารางที่ 3.1

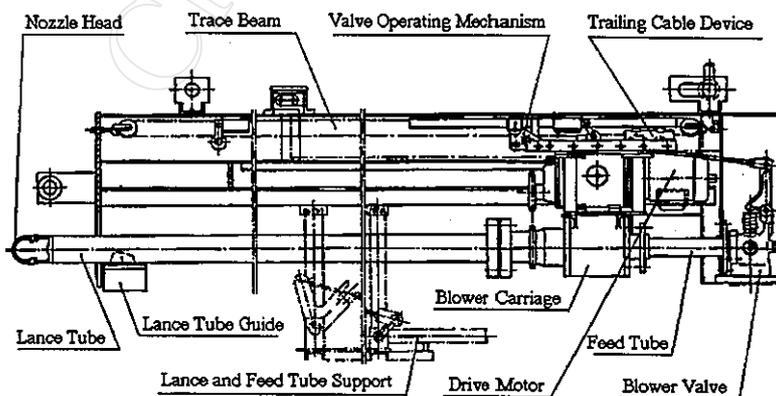
ตาราง 3.1 ข้อมูลของเครื่องเป่าเตาในหม้อกำเนิดไอน้ำ

Soot Blower	Short Retracting Blower	Long Retracting Blower
1. Types	V58	RKS 81 E
2. Number	98	84
3. Power per Blower (kW)	0.25	0.75
4. Blowing Travel (mm)	-	7415
5. Blowing Time per Blower (sec)	10	390
6. Operational Time per Blower (sec)	36	406
7. Steam Condition	174 Bar, 405 °C	174 Bar, 405 °C
8. Blowing Pressure (bar)	10.34	5 – 12



SHORT RETRACTABLE BLOWER

รูป 3.3 เครื่องเป่าเตา Short Retracting Blower Type V58



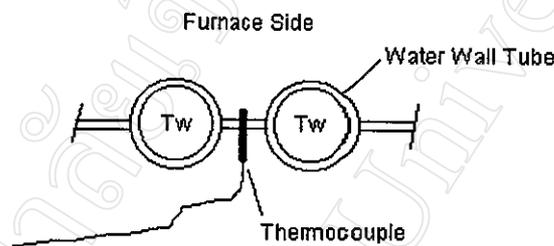
LONG RETRACTABLE BLOWER

รูป 3.4 เครื่องเป่าเตา Long Retracting Blower Type RKS 81 E

3.1.4 เครื่องมือในการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เพื่อเก็บข้อมูลของ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของน้ำ ไอน้ำ และ ก๊าซร้อน ในหม้อกำเนิดไอน้ำ รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติ และส่วนผสมของเถ้า ถ่านหินลิกไนต์ ประกอบด้วย

3.1.4.1 Thermocouple (Type K) : ใช้วัดอุณหภูมิของน้ำ ไอน้ำ ที่ไหลเวียนในหม้อกำเนิดไอน้ำ บริเวณ Economizer Coil, Superheater Coil, Reheater Coil, ท่อผนังเตา และใช้วัดอุณหภูมิของผนังเตา โดยจะติดตั้งที่แนวเชื่อมต่อผนังท่อ (Fin) ของท่อผนังเตาที่แต่ละระดับชั้นของเครื่องเป่าเถ้า (Soot Blower) ดังรูปที่ 3.5



รูป 3.5 การติดตั้ง Thermocouple วัดอุณหภูมิผนังเตา

3.1.4.2 Thermoprobe (Type K) จำนวน 2 EA. : ใช้วัดอุณหภูมิของก๊าซร้อนก่อนเข้า Superheater Coil และ Reheater Coil หรือก่อนเข้า Convection Zone

3.1.4.3 Pyrometer จำนวน 7 EA.: ใช้วัดอุณหภูมิของก๊าซร้อน ที่แต่ละระดับชั้นของเครื่องเป่าเถ้าที่ทำความสะดวกท่อ ใน Furnace Zone

3.1.4.4 Infrared Meter จำนวน 1 EA. : ใช้วัดอุณหภูมิของก๊าซร้อนก่อนเข้าและออกจากแผง Superheater Coil, Reheater Coil และ Economizer Coil

3.1.4.5 Pressure Transmitter : ใช้วัดความดันของน้ำและไอน้ำ ที่ไหลเวียนในหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อส่งไปแสดงผลที่ห้องควบคุม (Control Room)

3.1.4.6 Flow Transmitter : ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำ ที่ไหลเวียนในหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อส่งไปแสดงผลที่ห้องควบคุม (Control Room)

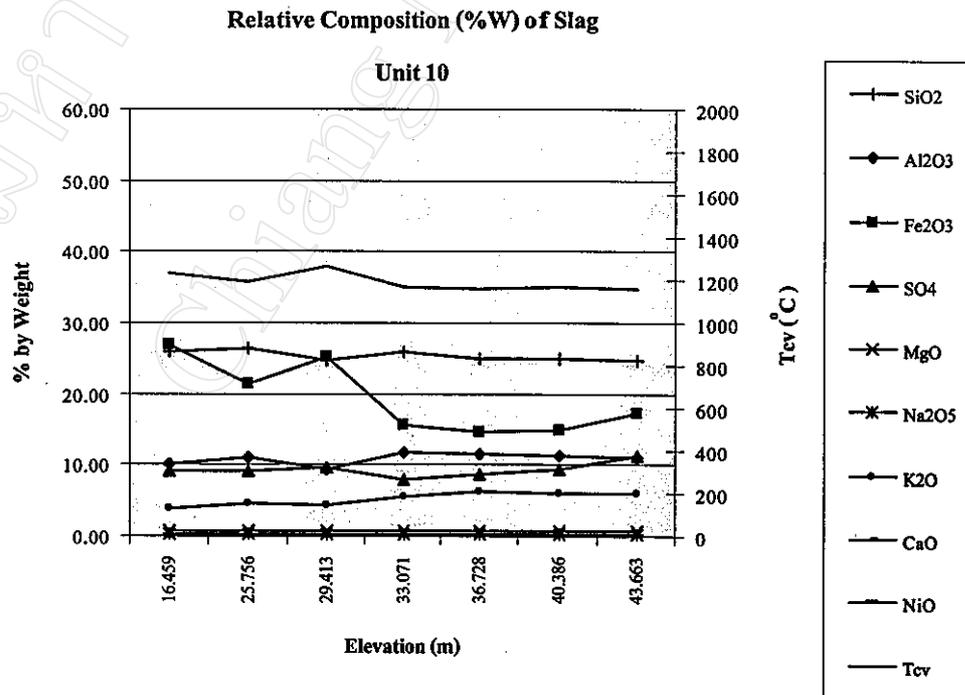
3.2 วิธีกรวิจัย

3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Ash/Slag Characteristics)

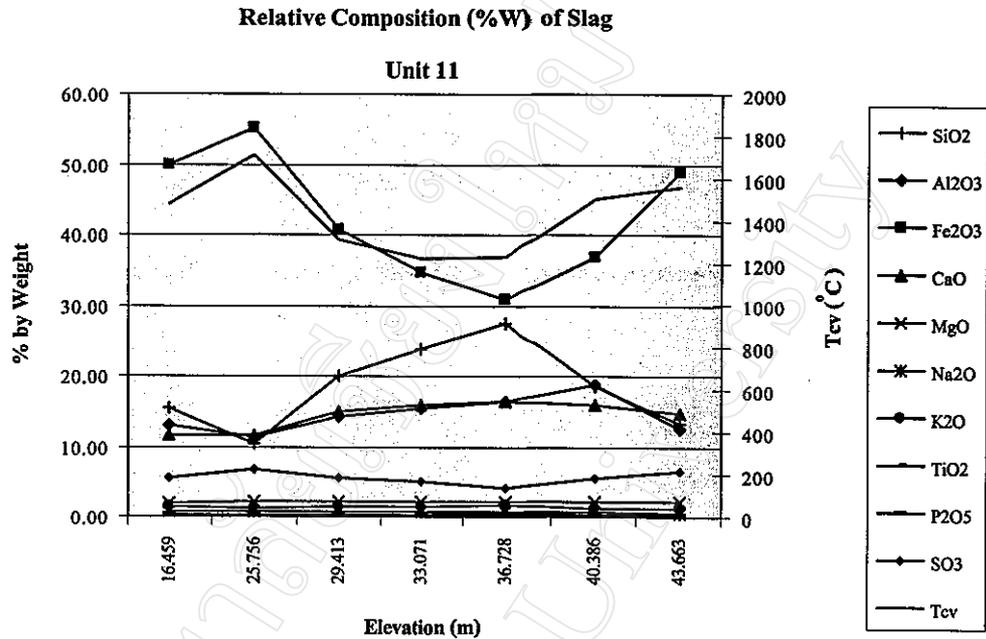
ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเถ้า จะศึกษาที่หม้อกำเนิดไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10-11 โดยทำการเก็บตัวอย่างเถ้าที่เกาะสะสมตัวบนผนังท่อที่ระดับต่างๆ ร่วมกับแผนกกำหนดคุณภาพและมาตรฐานเชื้อเพลิง (ฝ่ายเคมีและวิเคราะห์ กฟผ.) แล้วทางแผนกดังกล่าวนำตัวอย่างเถ้าไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเถ้า ดังนี้

3.2.1.1 องค์ประกอบของเถ้า (Ash Composition)

การหาองค์ประกอบของเถ้า จะใช้เครื่อง Atomic Absorption และ Fluorescent X-ray ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , SO_4 , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 และ K_2O โดยเก็บตัวอย่างเถ้าที่ท่อผนังเตาด้านเผาไหม้ ในแต่ละระดับชั้นของบริเวณ Furnace Zone แล้วส่งให้แผนกกำหนดคุณภาพและมาตรฐานเชื้อเพลิง (ฝ่ายเคมีและวิเคราะห์ ฝฟผ.) ทำการวัดหาองค์ประกอบหลักๆ โดยพบว่า โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10 องค์ประกอบส่วนใหญ่ที่พบคือ SiO_2 พบอัตราส่วนในพิสัย 20-30 % ซึ่งในแต่ละระดับชั้นจะมีปริมาณ SiO_2 ใกล้เคียงกัน รองลงมาได้แก่ Fe_2O_3 พบอัตราส่วนเฉลี่ยระหว่าง 10-30 % โดยพบว่าที่ระดับ 30 เมตรขึ้นไปปริมาณ Fe_2O_3 ลดลง ส่วน Al_2O_3 และ SO_4 มีอัตราส่วนใกล้เคียงกัน คือระหว่าง 5-12 % ส่วนองค์ประกอบ Na_2O , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 และ K_2O จะมีอัตราส่วนน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 11 องค์ประกอบที่พบมากที่สุดคือ Fe_2O_3 พบอัตราส่วนในพิสัย 20-60 % โดยพบว่าที่บริเวณอุณหภูมิการเผาไหม้สูง (ระดับ 30 – 40 เมตร) ปริมาณ Fe_2O_3 จะลดลง รองลงมาได้แก่ SiO_2 พบอัตราส่วนเฉลี่ยระหว่าง 10-30 % ถ้าบริเวณอุณหภูมิการเผาไหม้สูง ปริมาณ SiO_2 จะลดลง ส่วน Al_2O_3 และ SO_4 มีอัตราส่วนใกล้เคียงกัน คือระหว่าง 10-20 % ส่วนองค์ประกอบ Na_2O , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 และ K_2O จะมีอัตราส่วนน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.7 สรุปได้ว่าองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ของเถ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ คือ Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 และ SO_4



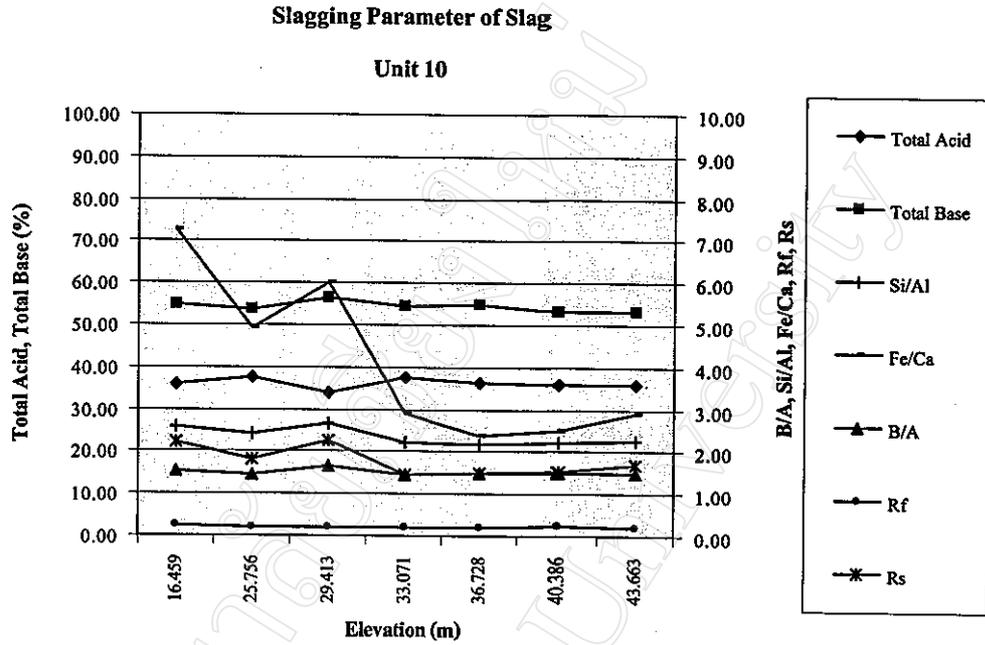
รูป 3.6 องค์ประกอบของเถ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10



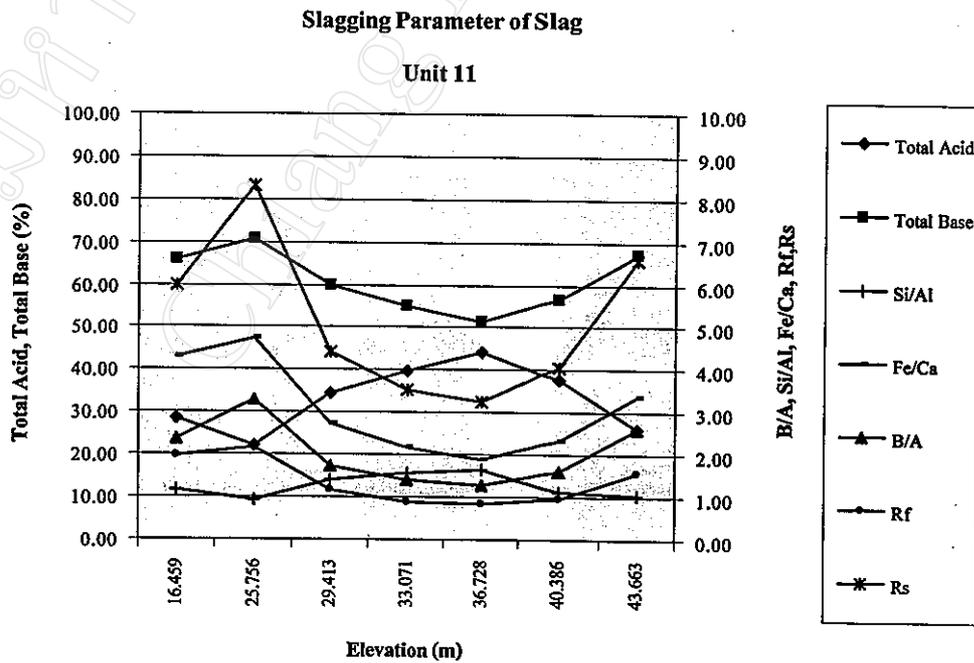
รูป 3.7 องค์ประกอบของเถ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 11

3.2.1.2 Slag Parameters

นำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าจากหัวข้อ 3.2.1.1 มาประเมิน Slag Parameter ตาม Guide line ของ ASME ได้แก่ ค่า Temperature of Critical Viscosity (T_{cv}), Silica to Alumina Ratio (Si/Al), Iron Oxide to Calcium Oxide Ratio (Fe/Ca), Total Acid, Total Base, Base to Acid Ratio (B/A), Slagging Factor (R_s) และ Fouling Factor (R_f) จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_{cv}) ของเถ้า (Slag) ใน Furnace Zone ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10, 11 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 มีค่าประมาณ 1,140-1,265 °C และ 1,136-1,919 °C ตามลำดับ เป็นจุดที่เถ้าเริ่มหลอมละลายและเกิดการไหลตัว ทำให้ยากต่อการทำความสะอาด ค่าอุณหภูมิวิกฤตที่โรงไฟฟ้า หน่วยที่ 10 จะมีค่าคงที่ทุกระดับชั้น ส่วนค่าอุณหภูมิวิกฤตที่โรงไฟฟ้า หน่วยที่ 11 จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น ส่วน Slag Parameters อื่นๆ พบว่า Total Base มีค่าประมาณ 50-70 %, ค่า Total Acid มีค่าประมาณ 25-45 %, Silica to Alumina Ratio มีค่าประมาณ 1.5-2.5 ,Base to Acid Ratio มีค่าประมาณ 1.28-3.28 , Iron Oxide to Calcium Oxide Ratio มีค่าประมาณ 1.9-7.3 , Slagging Factor มีค่าประมาณ 1.5-8.3, Fouling Factor มีค่าประมาณ 0.2-2.2 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะเห็นว่าค่า Slag Parameter มีค่าในพิสัยกว้าง และค่า Slagging Factor มีค่าสูง แสดงว่าระดับปัญหาของเถ้าที่พบจะอยู่ในระดับที่รุนแรง (Severe) ดังนั้นโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิงจะมีปัญหาด้านการเกาะสะสมของเถ้าสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง การใช้เครื่องเป่าเถ้า (Soot Blower) ที่เหมาะสมจึงจำเป็นอย่างยิ่งในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ



รูป 3.8 Slag Parameters ของถ่านในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10

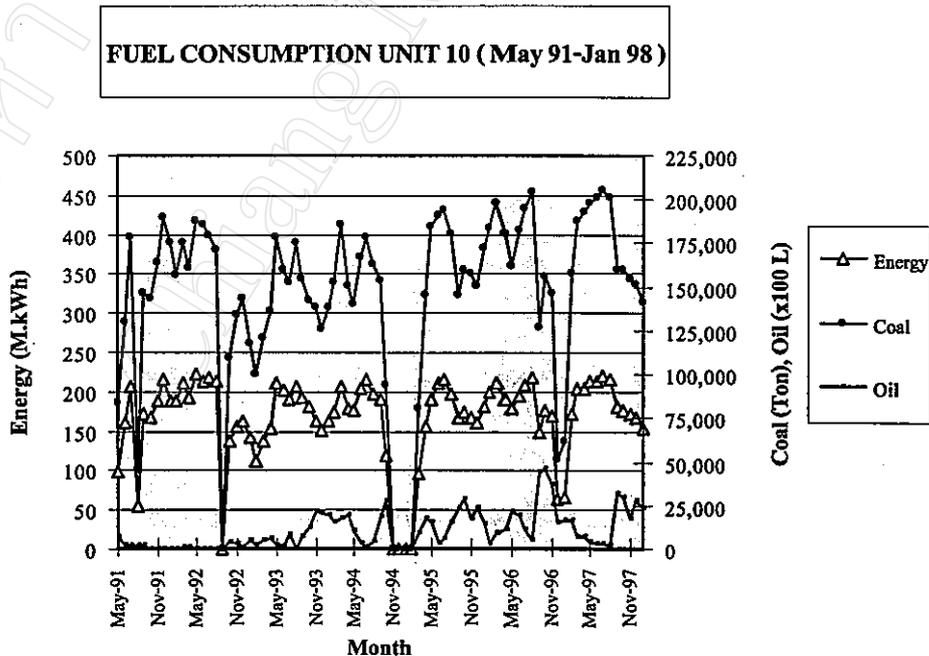


รูป 3.9 Slag Parameters ของถ่านในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 11

3.2.2 ศึกษาสภาพการใช้เชื้อเพลิงและเครื่องเป่าแก้ว

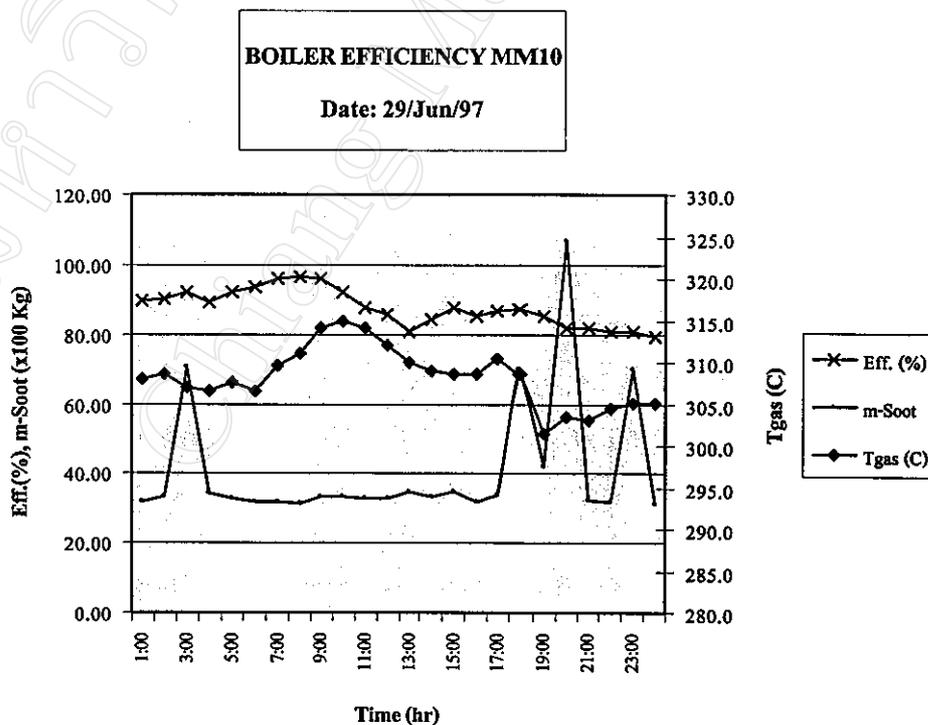
โดยทำการเก็บข้อมูลและศึกษาถึงสภาพการใช้เชื้อเพลิง และการใช้น้ำในการเป่าทำความสะอาดแก้ว ตั้งแต่อดีตที่ผ่านมา จนถึงปัจจุบัน จากการศึกษาพบว่าโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10 ซึ่งมีหม้อกำเนิดไอน้ำเป็นแบบ Forced Circulation Boiler (Water Tube Boiler) มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ 300,000 kg/hr. ที่กำลังการผลิตสูงสุด (300 MW) เริ่มผลิตกระแสไฟฟ้าตั้งแต่เดือน พฤษภาคม 2534 มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์เฉลี่ย 155,491 ตัน/เดือน และใช้น้ำมันดีเซล (Light Oil) เฉลี่ย 1,114,635 ลิตร/เดือน (ข้อมูล : พ.ค. 2534 – ม.ค. 2541) ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ยประมาณ 1,146,935,556 บาทต่อปี การใช้เชื้อเพลิงถ่านหินและน้ำมันดีเซลเปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ แสดงในรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าอัตราการใช้ถ่านหินลิกไนต์จะมากที่สุดในช่วงฤดูร้อน ประมาณ 205,000 ตัน/เดือน และมีการใช้ถ่านหินลิกไนต์น้อยในช่วงฤดูหนาว ประมาณ 140,000 ตัน/เดือน โดยช่วงฤดูหนาวนี้ จะใช้น้ำมันดีเซลเข้ามาทดแทน เพื่อลดปัญหาการเกิดมลภาวะทางอากาศ หลังจากเดินเครื่องโรงไฟฟ้าแล้วจะทำการหยุดเครื่องเพื่อทำการตรวจสอบย่อยและตรวจสอบใหญ่ (Minor Inspection and Major Overhaul) โดยจะหยุดตรวจสอบโรงไฟฟ้า ทุก ๆ 2 ปี ใช้เวลาในการตรวจสอบ 40 และ 60 วันตามลำดับ

สำหรับการใช้เครื่องเป่าแก้วในปัจจุบัน พนักงานเดินเครื่องจะใช้ Short Retracting Blower ทั้งหมด 98 ตัว จำนวน 6 รอบ/วัน (ใช้ปริมาณไอน้ำ 9,408 kg พลังงานไฟฟ้า 1.47 kWh) และใช้ Long Retracting Soot Blower ทั้งหมด 84 ตัว จำนวน 1 รอบ/วัน (ใช้ปริมาณไอน้ำ 74,692.8 kg พลังงานไฟฟ้า 7.105 kWh) โดยจะดู



รูป 3.10 การใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์และน้ำมันดีเซล (Light Oil) ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10

จากอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกจากหม้อกำเนิดไอน้ำ และอุณหภูมิของไอน้ำ (Main Steam) พิจารณาประกอบ การใช้เครื่องเป่าไอน้ำด้วย ถ้าอุณหภูมิของไอน้ำสูงจะใช้ Short Retracting Blower มากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิของก๊าซร้อนสูง ก็จะใช้ ทั้ง Short Retracting Blower และ Long Retracting Blower มากขึ้น เนื่องจากไม่มีเครื่องมือบ่งบอก ความสกปรกที่บริเวณผิวท่อในแต่ละพื้นที่ พนักงานเดินเครื่องจะไม่สามารถใช้เครื่องเป่าไอน้ำให้ตรงกับจุดที่ สกปรกได้ ทำให้การใช้ เครื่องเป่าไอน้ำไม่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังมีการใช้เครื่องเป่า ไอน้ำทำความสะอาดห้องน้สะอาด จะพบว่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกจากหม้อกำเนิดไอน้ำจะลดลงมาอยู่ที่ ประมาณ 300 - 305 °C โดยวัดอุณหภูมิที่ออกจาก Economizer Coil ถ้าไม่มีการใช้เครื่องเป่าไอน้ำทำความสะอาด หรือปล่อยทิ้งช่วงนานๆ จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกจากหม้อกำเนิดไอน้ำสูงขึ้น ไปที่ค่าประมาณ 315 - 320 °C ดังนั้นค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔT) มีค่าประมาณ 15 - 20 °C คิดเป็นพลังงานความร้อนที่หม้อ กำเนิดไอน้ำได้รับเพิ่มขึ้นจากก๊าซร้อนประมาณ 5,488 - 7,318 ฅ ต่อวินาที รูปที่ 3.11 แสดงการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของก๊าซร้อนและประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำในแต่ละชั่วโมง จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ ออกจากหม้อกำเนิดไอน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากเวลา 4.00 น. หลังจากใช้เครื่องเป่าไอน้ำเสร็จ และเมื่อทำความสะอาด ห้องอีกครั้งเวลา 18.00 น. ค่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนก็จะลดลง ส่วนค่าประสิทธิภาพ ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 10 มีค่าประมาณ 80 - 95 % ขึ้นกับสภาวะการเดินเครื่อง



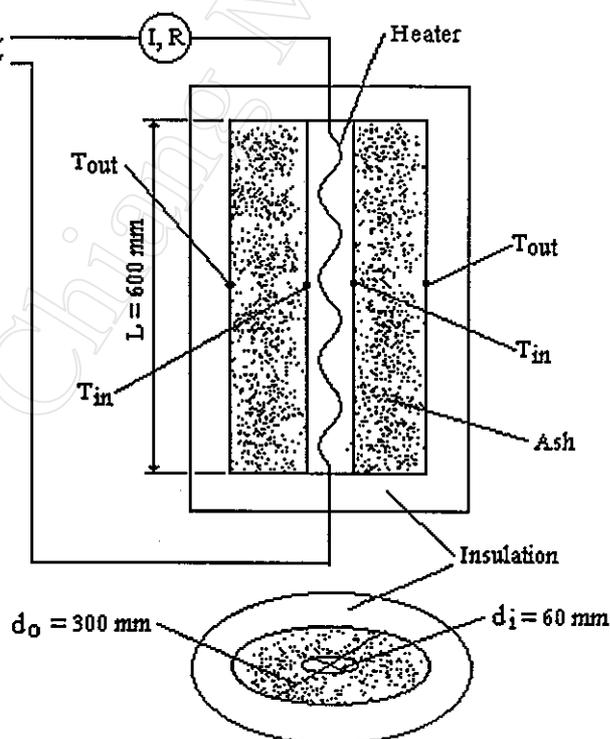
รูป 3.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อนและประสิทธิภาพของหม้อกำเนิดไอน้ำ
เมื่อมีการใช้เครื่องเป่าไอน้ำ (วันที่ 29 มิถุนายน 2540)

3.2.3 การหาค่าการนำความร้อนของเถ้า (k)

ทดลองหาค่าการนำความร้อนของเถ้า (Thermal Conductivity, k) ของเถ้าที่เกาะบนผนังท่อ ในหม้อกำเนิดไอน้ำ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความหนาและปริมาณของเถ้าที่เกาะตัว โดยแยกเป็น เถ้าลอย (Fly Ash หรือ Dry Ash) และเถ้าหนัก (Bottom Ash หรือ Wet Ash) เครื่องมือที่ใช้ทดลองจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (d_o) 300 mm. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (d_i) 60 mm. ความยาว 600 mm. มีฉนวนหุ้มหนา 60 mm. ใช้ Heater ขนาด 1000 W. ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เมื่อให้ความร้อนกับเถ้าจนถึงสภาวะคงที่ (Steady State) นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่า k ได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก ตามสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$q = \frac{(T_{in} - T_{out})}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) / 2\pi k L} \quad (3.1)$$

เมื่อ q คือ พลังงานความร้อนจาก Heater, (Watt) T_{in} และ T_{out} คือ ค่าอุณหภูมิของเถ้าด้านใน (Hot Side) และด้านนอก (Cold Side) ตามลำดับ, ($^{\circ}\text{C}$, K) L คือความยาวของทรงกระบอกที่บรรจุเถ้า, (m)



รูป 3.12 เครื่องมือทดลองหาค่าการนำความร้อนของเถ้า (k)

ดังนั้นจะได้ค่าการนำความร้อนของเตา (k) ตามสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$k = \left(\frac{q}{2\pi L} \right) \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{(T_{in} - T_{out})} \quad (3.2)$$

3.2.4 การหาค่าความต้านทานความร้อน (R_t)

โดยทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์หาค่าความต้านทานความร้อน (Heat Resistance, R_t) ของเตาที่เกาะบนผนังท่อของหม้อกำเนิดไอน้ำในสภาวะการเดินเครื่องปกติ โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ (ผสมแต่ละเกรด) ค่า Coal Fineness 70-75 % ผ่านตะแกรง 200 mesh ค่า Burner Tilting Position -5 ถึง +5 องศา ค่า Excess Air 20 % โดยการแยกพิจารณาเตาที่บริเวณ Furnace หรือท่อผนังเตา (Radiation Zone) และบริเวณ Superheater Coil, Reheater Coil และ Economizer Coil (Convection Zone) โดยแยกพิจารณาที่บริเวณต่างๆ ดังนี้

3.2.4.1 ค่าความต้านทานความร้อนบริเวณ Furnace Zone

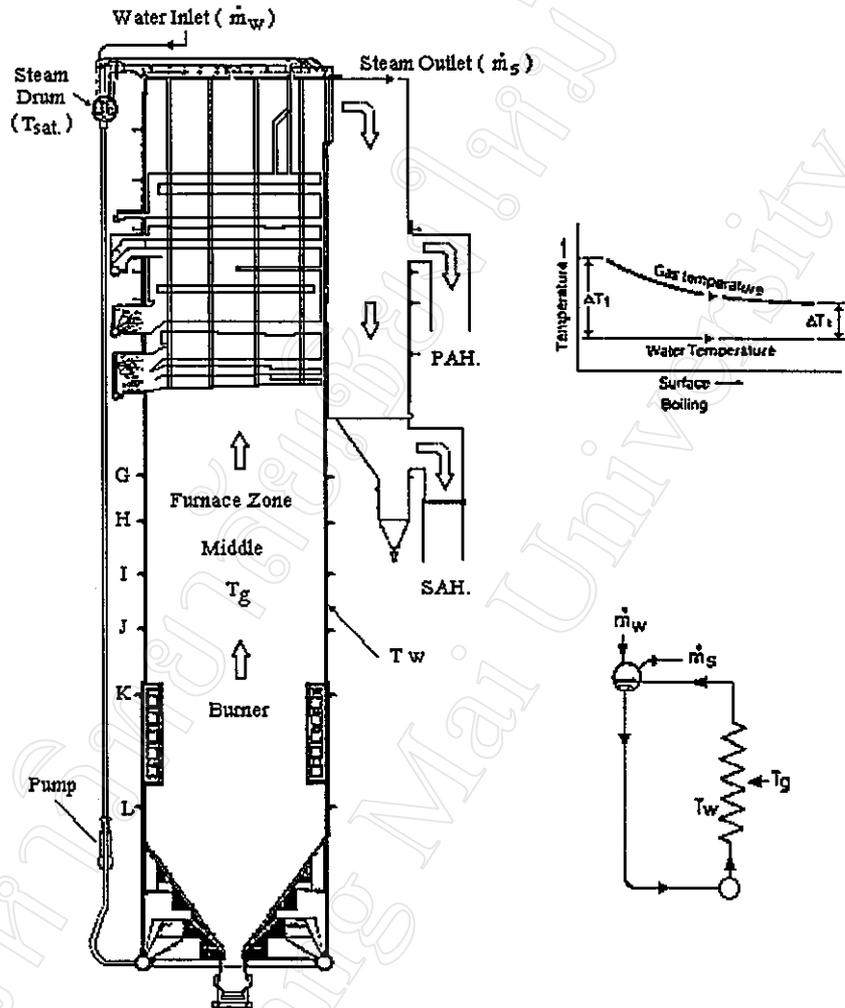
บริเวณ Furnace Zone ดังรูปที่ 3.13 น้ำในท่อผนังเตามีอุณหภูมิ T_w เมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแล้ว ที่มีอุณหภูมิ T_g จะไปยัง Steam Drum เพื่อแยกเอาไอน้ำออกไปยัง Superheater Assembly เมื่อพิจารณาวงจรทางความร้อน ในรูปที่ 3.13 จะได้สมการการถ่ายเทความร้อน ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$Q_{wall} = UA \Delta T = UA(T_g - T_w) \quad (3.3)$$

$$Q_{wall} = \dot{m} \cdot Q_L \quad (3.4)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลของไอน้ำ, (kg/s) Q_L คือ ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ (Latent Heat), (kJ/kg) U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, (m^2) T_g คือ อุณหภูมิของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้, ($^{\circ}C, K$) T_w คือ อุณหภูมิของน้ำในท่อ ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิในการระเหยเป็นไอ T_{sat} , ($^{\circ}C, K$) ดังนั้น จากสมการ (3.3) และ (3.4) จะได้ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) ดังสมการที่ 3.5

$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{(T_g - T_w)}{\dot{m} \cdot Q_L} \quad (3.5)$$



รูป 3.13 บริเวณ Furnace Zone (Water Wall Tube)

3.2.4.2 ค่าความต้านทานความร้อนบริเวณ Convection Zone
 แยกพิจารณาออกเป็นพื้นที่ใหญ่ๆ ได้ 4 พื้นที่ดังนี้

ก. Economizer Assembly : ดังรูปที่ 3.14

ทำการวัดอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำร้อนที่ไหลเข้าที่ Economizer Inlet Header และที่ Economizer Outlet Header แล้ววัดอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซร้อน คำนวณอุณหภูมิ T_{wc} จากความร้อนที่ ก๊าซร้อน ให้อกับน้ำเท่ากับความร้อนที่น้ำได้รับ ทั้งนี้สมมุติว่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียมีค่าน้อย จะ ได้

$$Q_{gas} = Q_{water}$$

$$\dot{m}_g C_{p,g} (T_{g,in} - T_{g,out}) = \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,out} - T_{wc})$$

เมื่อ \dot{m}_g และ \dot{m}_w คือ อัตราการไหลของก๊าซร้อน และ น้ำ (Feed Water), (kg/s) $C_{p,g}$ และ $C_{p,w}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซร้อน และ น้ำ, (kJ/kg.K) $T_{g,in}$ และ $T_{g,out1}$ คือ อุณหภูมิของก๊าซร้อนด้านเข้าและด้านออก, ($^{\circ}\text{C},\text{K}$) $T_{w,out}$ และ T_{wc} คือ อุณหภูมิของน้ำด้านเข้าและที่จุดกึ่งกลาง (Center), ($^{\circ}\text{C},\text{K}$)

จะได้ค่าอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลาง T_{wc} ดังสมการที่ 3.6

$$T_{wc} = T_{w,out} - \left(\frac{\dot{m}_g C_{p,g} (T_{g,in} - T_{g,out1})}{\dot{m}_w C_{p,w}} \right) \quad (3.6)$$

พิจารณาที่ Economizer Upper Assembly จากวงจรความร้อนในรูปที่ 3.15 น้ำด้านเข้าอุณหภูมิ T_{wc} รับความร้อนจากก๊าซร้อน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น $T_{w,out}$ อุณหภูมิก๊าซร้อนจาก $T_{g,in}$ จะลดจากเหลือ $T_{g,out1}$ ดังนั้นค่าความร้อนที่น้ำได้รับจะได้ ดังสมการที่ 3.7 และ 3.8

$$Q_{\text{ECO-UP}} = \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,out} - T_{wc}) \quad (3.7)$$

และ

$$Q_{\text{ECO-UP}} = UA \Delta T_m = \frac{UA (\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.7 และ 3.8 จะสามารถหาค่าได้ค่า Heat Resistance (R_t) ได้ดังสมการที่ 3.9

$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right) \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,out} - T_{wc})} \quad (3.9)$$

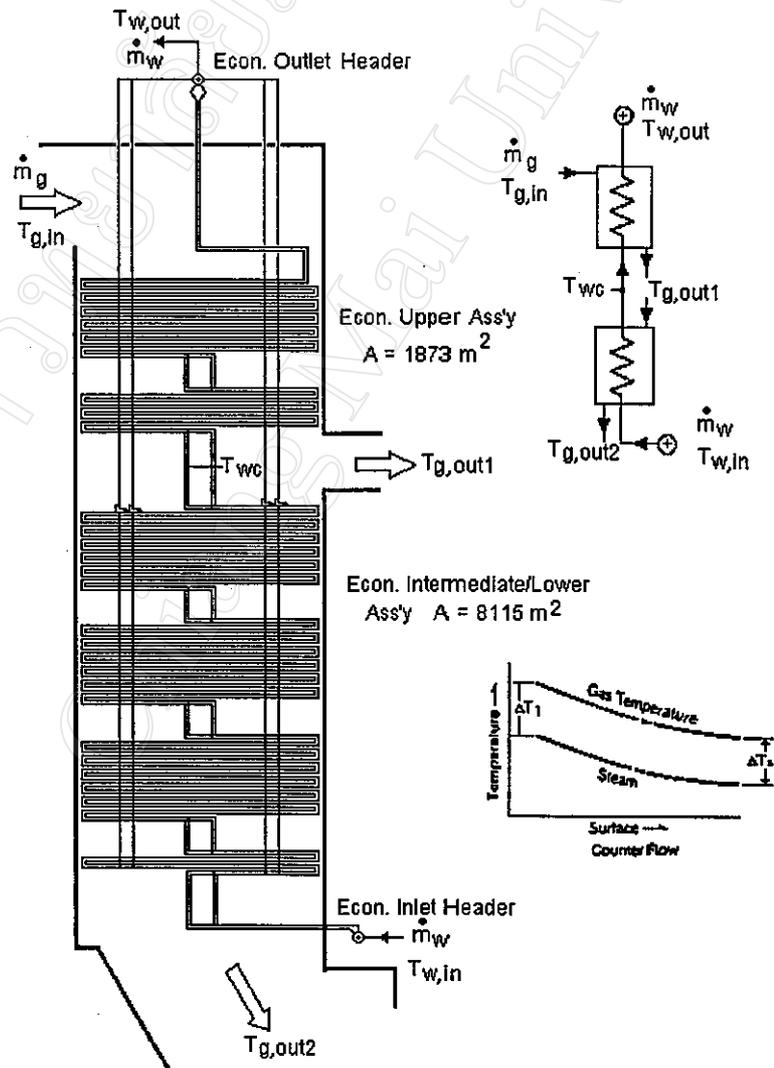
พิจารณาที่ Economizer Intermediate/Lower Assembly จากวงจรความร้อนในรูปที่ 3.15 น้ำด้านเข้าอุณหภูมิ $T_{w,in}$ รับความร้อนจากก๊าซร้อน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น T_{wc} อุณหภูมิก๊าซร้อนจาก $T_{g,out1}$ จะลดจากเหลือ $T_{g,out2}$ ดังนั้นค่าความร้อนที่น้ำได้รับจะได้ ดังสมการที่ 3.10 และ 3.11

$$Q_{\text{ECO-LOW}} = \dot{m}_w C_{p,w} (T_{wc} - T_{w,in}) \quad (3.10)$$

$$Q_{\text{ECO-LOW}} = UA\Delta T_m = \frac{UA(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 จะสามารถหาค่าได้ค่า Heat Resistance (R) ได้ดังสมการที่ 3.12

$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) \dot{m}_w C_{p,w} (T_{wc} - T_{w,in})} \quad (3.12)$$



รูป 3.14 แผน Economizer Upper/Intermediate/Lower Assembly

ข. SH. Horizontal Spaced Low Temperature Assembly : ดังแสดงในรูปที่ 3.15

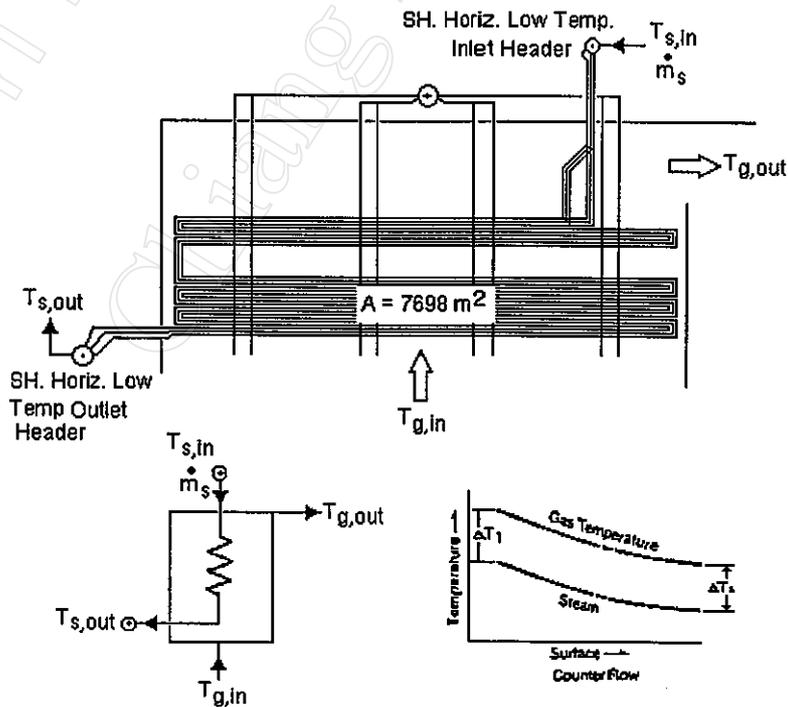
จากวงจรความร้อนในรูปที่ 3.15 ไอน้ำมีอัตราการไหล \dot{m}_s มีอุณหภูมิด้านเข้า $T_{s,in}$ อุณหภูมิด้านออก $T_{s,out}$ ได้รับความร้อนจากก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิด้านเข้า $T_{g,in}$ และอุณหภูมิด้านออก $T_{g,out}$ ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไอน้ำได้รับจากก๊าซร้อน สามารถหาได้จากสมการ ที่ 3.13 และ 3.14

$$Q_{SHL} = \dot{m}_s C_{p,s} (T_{s,out} - T_{s,in}) \tag{3.13}$$

$$Q_{SHL} = UA\Delta T_m = \frac{UA(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \tag{3.14}$$

จากสมการที่ 3.13 และ 3.14 จะสามารถหาค่าได้ค่า Heat Resistance (R_t) ได้ดังสมการที่ 3.15

$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) \dot{m}_s C_{p,s} (T_{s,out} - T_{s,in})} \tag{3.15}$$



รูป 3.15 แผง SH. Horizontal Spaced Low Temperature Assembly

ค. RH. Horizontal Spaced/Platen Assembly : ดังรูปที่ 3.16

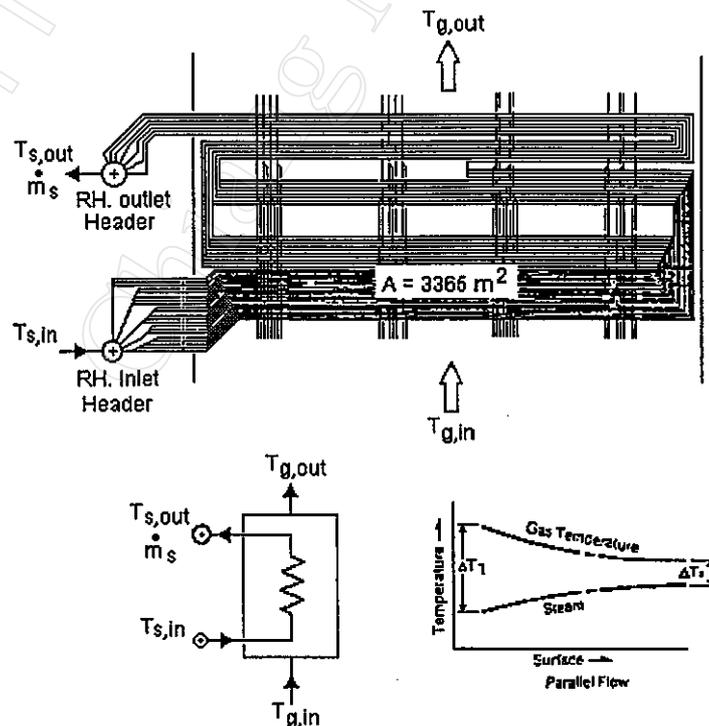
จากวงจรความร้อนในรูปที่ 3.16 ไอน้ำมีอัตราการไหล \dot{m}_s มีอุณหภูมิด้านเข้า $T_{s,in}$ อุณหภูมิด้านออก $T_{s,out}$ ได้รับความร้อนจากก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิด้านเข้า $T_{g,in}$ และอุณหภูมิด้านออก $T_{g,out}$ ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไอน้ำได้รับจากก๊าซร้อน สามารถหาได้จากสมการ ที่ 3.16 และ 3.17

$$Q_{RH} = \dot{m}_s C_{p,s} (T_{s,out} - T_{s,in}) \tag{3.16}$$

$$Q_{RH} = UA\Delta T_m = \frac{UA(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \tag{3.17}$$

จากสมการที่ 3.16 และ 3.17 จะสามารถหาค่าได้ค่า Heat Resistance (R_t) ได้ดังสมการที่ 3.18

$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) \dot{m}_s C_{p,s} (T_{s,out} - T_{s,in})} \tag{3.18}$$



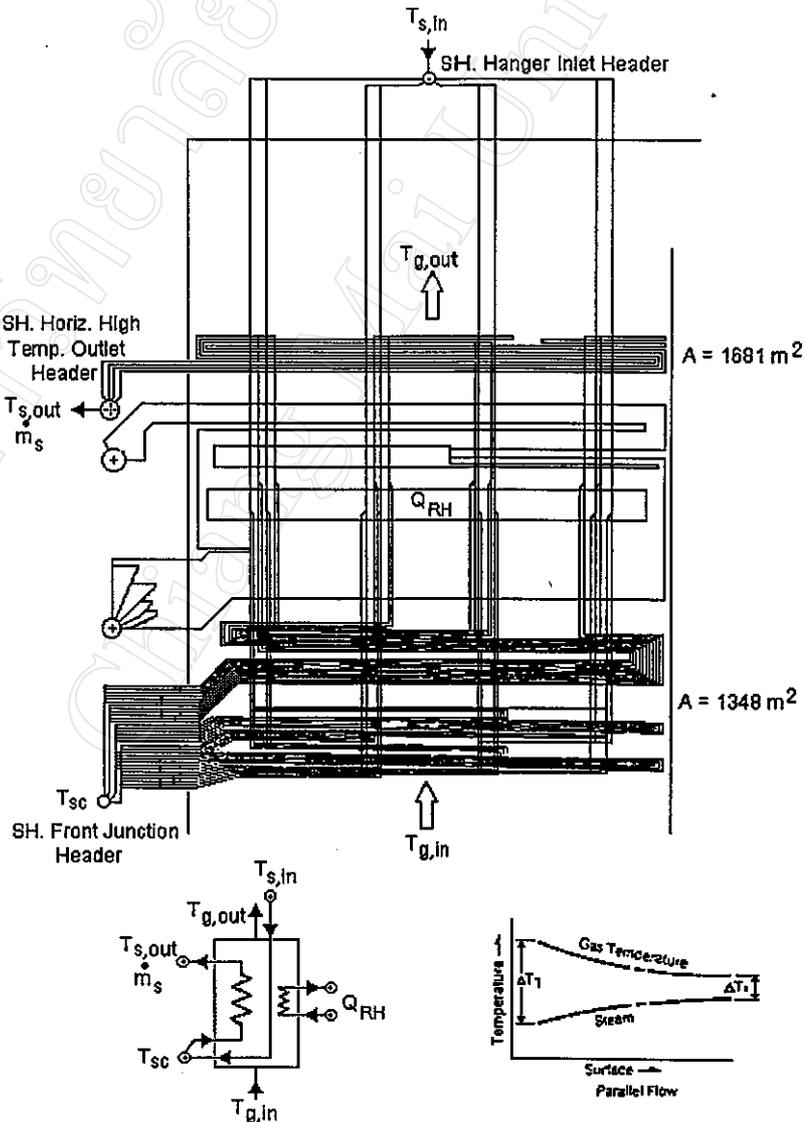
รูป 3.16 แผง RH. Horizontal Spaced/Platen Assembly

ง. SH. Horizontal Spaced/Platen High Temperature Assembly : ดังรูปที่ 3.17

จากวงจรความร้อนในรูปที่ 3.17 ไอน้ำมีอัตราการไหล \dot{m}_s มีอุณหภูมิด้านเข้า $T_{s,in}$ อุณหภูมิด้านออก $T_{s,out}$ ได้รับความร้อนจากก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิด้านเข้า $T_{g,in}$ และอุณหภูมิด้านออก $T_{g,out}$ ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไอน้ำได้รับจากก๊าซร้อน สามารถหาได้จากสมการ ที่ 3.19 และ 3.20

$$Q_{SHH} = \dot{m}_s C_{p,s} (T_{s,out} - T_{s,in}) - Q_{RH} \tag{3.19}$$

$$Q_{SHH} = UA\Delta T_m = \frac{UA(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \tag{3.20}$$



รูป 3.17 แผง SH. Horizontal Spaced/Platen High Temperature Assembly

จากสมการที่ 3.19 และ 3.20 จะสามารถหาค่าได้ค่า Heat Resistance (R_t) ได้ดังสมการที่ 3.21

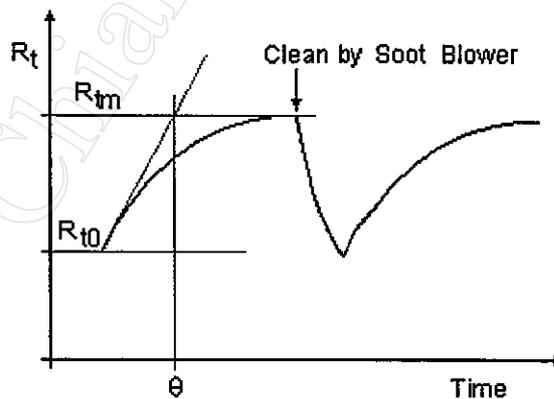
$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right) \left(\dot{m}_s C_{p,s} (T_{s,out} - T_{s,in}) - Q_{RH}\right)} \quad (3.21)$$

3.2.5 รูปแบบการสะสมตัวของเถ้าบนผนังท่อ

การหารูปแบบของการเกิดเถ้าสะสมตัวบนผนังท่อในหม้อกำเนิดไอน้ำ จะใช้สมการ (2.17) และ (2.18) โดยจะนำค่า Heat Resistance (R_t) ที่คำนวณได้จาก 3.2.4 มาเฉลี่ยหาการเปลี่ยนแปลงของ R_t เทียบกับเวลา ตั้งแต่สถานะสะอาดจนถึงสถานะที่มีเถ้าเกาะสะสมบนผิวท่อ เมื่อนำมาวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา จะได้ดังสมการที่ 3.22 และรูปแบบดังกล่าวเมื่อนำมาเขียนกราฟจะให้ความสัมพันธ์ระหว่าง R_t กับเวลา ดังรูปที่ 3.18 โดยในสถานะเริ่มต้นที่ผนังท่อสะอาด ค่า R_t จะมีค่าเท่ากับ R_{t0} เมื่อมีการเกาะสะสมตัวของเถ้า ค่า R_t จะเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงค่า R_{tm} และเมื่อใช้เครื่องเป่าเถ้าทำความสะอาด ค่า R_t จะลดลงมาอยู่ที่ค่า R_{t0}

$$R_t = R_f + R_{t0} = R_f (1 - e^{-\theta}) + R_{t0} \quad (3.22)$$

และ $R_f = R_{tm} - R_{t0}$



รูป 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนกับเวลา

3.2.6 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

ทำการพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ในด้านการใช้เชื้อเพลิงและความสิ้นเปลืองไอน้ำในการทำความสะอาดท่อ เมื่อมีเตาเผาบนผิวท่อ ตามรูปแบบการเกาะสะสมตัวของเถ้าที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อกำหนดมาตรการในการทำความสะอาดเถ้า ที่เกาะสะสมในแต่ละพื้นที่ของหม้อกำเนิดไอน้ำ โดยประเมินค่าความถี่หรือช่วงเวลา (Period) ในการทำความสะอาดที่เหมาะสม โดยตั้งสมมุติฐานว่า ไอน้ำที่ใช้ในการเป่าเถ้าไม่มีผลกระทบกับประสิทธิภาพการทำงานของหม้อกำเนิดไอน้ำ และไม่คิดผลกระทบจากการสึกหรอของท่อเมื่อมีการใช้เครื่องเป่าเถ้า

3.2.6.1 ค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องเป่าเถ้า ($Cost_{Soot}$)

ค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องเป่าเถ้าเพื่อทำความสะอาดท่อ จะมาจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องเป่าเถ้า ($Cost_E$) ค่าใช้จ่ายจากปริมาณไอน้ำที่ใช้เป่าทำความสะอาดท่อ ($Cost_S$) และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องเป่าเถ้า (Maintenance Cost, $Cost_M$) ดังสมการที่ 3.23

$$Cost_{Soot} = Cost_E + Cost_S + Cost_M \quad (3.23)$$

โดย ค่าใช้จ่ายจากพลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องเป่าเถ้า ($Cost_E$) หาได้จากสมการที่ 3.24

$$Cost_E = W_{motor} \cdot C_E = (N_1 \cdot N_2 \cdot P_E \cdot Time) \cdot C_E \quad (3.24)$$

เมื่อ W_{motor} คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์, (kWh) C_E คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วย kWh, (1.7385 Baht/kWh) N_1 คือ จำนวนครั้งในการใช้เครื่องเป่าเถ้า N_2 คือ จำนวนเครื่องเป่าเถ้า และ P_E คือ กำลังไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์, (kW) ส่วนค่าใช้จ่ายจากปริมาณไอน้ำที่ใช้เป่าทำความสะอาดท่อ ($Cost_S$) คำนวณจากค่าเชื้อเพลิงที่ให้กับไอน้ำในการทำความสะอาดท่อ ($Cost_Q$) รวมกับค่าใช้จ่ายของปริมาณน้ำ ($Cost_w$) ดังสมการที่ 3.25

$$Cost_S = Cost_Q + Cost_w$$

จะได้

$$Cost_S = \frac{m_{soot} (h_s - h_f) C_L}{LHV} + m_{soot} \cdot C_w \quad (3.25)$$

เมื่อ m_{soot} คือ ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาดท่อ, (kg) h_f คือ Enthalpy ของน้ำที่เข้าไปในหม้อกำเนิดไอน้ำ, (kJ/kg) h_s คือ Enthalpy ของไอน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาดท่อ, (kJ/kg) C_L คือ ราคาถ่านหินต่อหน่วยน้ำหนัก, (543 Baht/Ton) C_w คือ ราคาของน้ำต่อหน่วย (42.03 Baht / 1000 kg) LHV คือ ค่า Low Heating Value ของถ่านหินลิกไนต์, (kJ/kg) และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องเป่าเถ้า ($Cost_M$) หาได้จากสมการที่ 3.26

$$\text{Cost}_M = N_1 \cdot N_2 \cdot C_M \quad (3.26)$$

เมื่อ N_1 คือ จำนวนครั้งในการใช้เครื่องเป่าแก้ว N_2 คือ จำนวนเครื่องเป่าแก้ว C_M คือ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องเป่าแก้วต่อครั้ง, (Baht/Time) โดยได้จากค่าบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และค่าบำรุงรักษาแบบแก้ไข (Corrective Maintenance) สำหรับเครื่องเป่าแก้วแบบ Short Retracting Blower ค่า C_M เท่ากับ 5.07 Baht/Time ส่วนเครื่องเป่าแก้วแบบ Long Retracting Blower ค่า C_M เท่ากับ 32.20 Baht/Time

3.2.6.2 ค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงเมื่อมีเต้าสะสม (Cost_f)

ค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงเมื่อมีเต้าสะสม (Cost_f) หาได้จากค่าพลังงานความร้อน (Q_f) ที่ใช้เมื่อมีการสะสมของเต้าบนผนังท่อ ตามสมการที่ 3.27

$$\text{Cost}_f = (Q_f / \text{LHV}) \cdot C_L \quad (3.27)$$

โดย Q_f คือ ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเกาะสะสมตัวของเต้า ($R_f = R_0 + R_f$) จากสภาวะท่อสะอาด ($R_f = R_0$) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{จาก } q_f = \dot{m}_g C_{p,g} (T_{gf} - T_{gc}) \quad (3.28)$$

เมื่อ q_f คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการสะสมตัวของเต้า, (kW) \dot{m}_g คือ อัตราการไหลของก๊าซร้อน, (kg/s) $C_{p,g}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของก๊าซร้อน, (kJ/kg) T_{gf} และ T_{gc} คือ อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่สภาวะมีเต้าเกาะสะสมและที่สภาวะท่อสะอาดตามลำดับ, ($^{\circ}\text{C}$, K) ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำหรือไอน้ำรับจากก๊าซร้อน (q_w , kW) ในเวลา t ชั่วโมง กรณีท่อสะอาดหาได้จากสมการ 3.29 ดังนี้

$$q_w = \frac{(T_{gc} - T_s)}{R_{t0}} \quad (3.29)$$

$$\text{จะได้ } T_{gc} = q_w R_{t0} + T_s$$

และกรณีท่อสกปรกหรือมีการเกาะสะสมของเต้าหาได้จากสมการ 3.30 ดังนี้

$$q_w = \frac{(T_{gf} - T_s)}{R_{t0} + R_f} \quad (3.30)$$

จะได้ $T_{gf} = q_w (R_{t0} + R_f) + T_s$

ดังนั้น $(T_{gf} - T_{gc}) = (q_w (R_{t0} + R_f) + T_s) - (q_w R_{t0} + T_s) = q_w R_f$ (3.31)

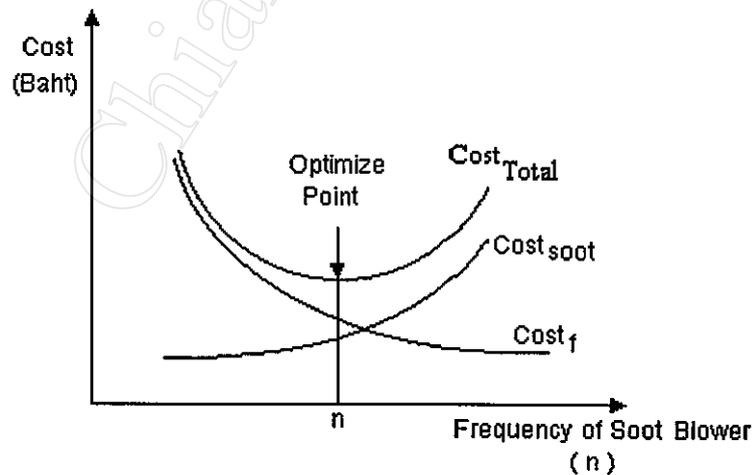
แทนสมการที่ 3.31 และแทนค่า $R_f = R_f^* (1 - e^{-v\theta})$ ในสมการที่ 3.28 จะได้สมการที่ 3.32

$$q_f = \dot{m}_g C_{p,g} q_w R_t^* (1 - e^{-v\theta}) \quad (3.32)$$

จะได้ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเกาะสะสมของเถ้า หาได้จากการ Integrate สมการที่ 3.32 จะได้ค่าความร้อนตามสมการที่ 3.33

$$Q_f = \dot{m}_g C_{p,g} q_w \int_0^t R_t^* (1 - e^{-v\theta}) dt \quad (3.33)$$

เมื่อนำค่า Q_f จากสมการที่ 3.32 ไปแทนในสมการที่ 3.26 ก็จะได้ค่า $Cost_f$ ดังนั้นความถี่ที่เหมาะสม (n) ในการใช้เครื่องเป่าเถ้า (Optimize Point) คือจุดที่ทำให้เกิดค่าให้ใช้จ่ารวม ($Cost_{Total}$) น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยจะพบว่าค่าใช้จ่าจากการใช้เครื่องเป่าเถ้า ($Cost_{Soot}$) จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ความถี่ในการใช้เครื่องเป่าเถ้า ส่วนค่าเชื้อเพลิง ($Cost_f$) จะลดลงเมื่อความถี่ในการใช้เครื่องเป่าเถ้ามากขึ้น



รูป 3.19 ความถี่ที่เหมาะสมในการใช้เครื่องเป่าเถ้า