

วิเคราะห์ผลกระทบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพื่อลดความร้อนสูญเสียของเตา ในสถานะสมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตเหล็ก

ชำนาญ ใจประดิษฐ์ธรรม*

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวิจัยของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจำแนกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เพราะว่ามีสาเหตุมาจากการรบกวนในระบบที่มีคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นในการอาร์คจะเกิดขึ้นเนื่องจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ทำการวัดสัญญาณแรงดันกระแสพร้อมด้วยการจำลองแบบ Novel Arc Furnace โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PSCAD/ EMTDC ช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อใช้เป็นแนวทางศึกษาการทำงานของเตาหลอมนี้ และวิธีแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้ง Static Var Compensate ที่ระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ผลการวัดสัญญาณแรงดันกระแสเพื่อพบว่าทำให้เกิดสัญญาณแรงดันเปลี่ยนแปลงไปในช่วงที่แคบลงและมีสัญญาณลดน้อยลงในระบบ และส่วนที่ 2 นำเสนอถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยการทดลองการหลอมเหล็ก เพื่อหาปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา ปริมาณการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ ปริมาณการสูญเสียความร้อนออกจากเตาทั้งหมด เป็นต้น ทำให้ลดความร้อนสูญเสียในสถานะสมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตเหล็ก โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมไปสู่บารับน้ำเหล็กเพื่อลดการสูญเสียความร้อนให้ต่ำลงประมาณ 2.89 กิโลวัตต์ ผลการวิเคราะห์และการทดลองในการปรับปรุงพบว่าการใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านี้ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ประมาณ 99.56 %

คำสำคัญ : เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า, การปรับปรุง, การใช้พลังงาน, ความร้อนสูญเสีย

Analysis of Electric Arc Furnace Effects for Power Quality of System and Increasing Energy Efficiency to Reduce Heat Loss in The Energy Balance Condition of Steelmaking Process

Chamni Jaipradidtham^{*}

Abstract

This paper presents the research of an electric arc furnace classified into 2 part. The first is analysis of the impact of the electric arc furnace which is a harmonic source. It is caused by a disturbance in a system with non-linear characteristics of the arcs is caused due to an electric arc furnace. Ripple voltage measurement relies on replication of Novel Arc Furnace model by using PSCAD/EMTDC help in the analysis, which is used as a guide to study the function of this furnace and how to fix the problem by installing the Static Var Compensate the system of industrial steel production. Measurement results signal that causes the ripple voltage signal changes in a small range, and the signal is reduced in the system. The second, presented to enhance energy efficiency by experimental melting steel to find the amount of heat loss through the wall furnace. Loss of heat from burning. Loss of heat from the stove to heat all the losses in energy homeostasis, a smelting process is controlled by the temperature of the steel which is poured from the furnace to the crucible and steel to reduce heat loss is reduced by approximately 2.89 kW, the resulting analysis and experiments to improve the energy of electric arc furnaces, this paper can increase energy efficiency by approximately 99.56 %.

Keywords : Electric Arc Furnace, Improvement, Energy, Heat loss

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) ที่มีความสำคัญมาจากการรบกวนเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง และจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆของผู้ใช้ไฟฟ้า เนื่องจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ การทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ การเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้าและพฤติกรรมของโหลดบางชนิดในระบบ สิ่งเหล่านี้จะไปสร้างผลกระทบต่อกับโหลดที่มีความไว (Sensitive) ต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งโหลดประเภทเหล่านี้ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลาย เช่น ระบบที่ใช้กระบวนการควบคุม ระบบคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งเป็นแหล่งผลิตของฮาร์มอนิกที่สำคัญ อุปกรณ์เหล่านี้สร้างสัญญาณรบกวนฮาร์มอนิกขึ้นมาซึ่งฮาร์มอนิกจะเกิดจากอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load) ได้แก่ เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric arc furnace) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamps) และเครื่องแปลงผัน (Converter) เป็นต้น โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเกิดขึ้นมีผลทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลกลับเข้ามาในระบบทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ จึงส่งผลกระทบต่อระบบมีคุณภาพกำลังไฟฟ้าลดลง และการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานหลักที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เพื่อให้เศษเหล็กหลอมละลายได้ ปริมาณพลังงานที่ใช้ไปจะขึ้นอยู่กับวิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการหลอมเหล็กในแต่ละ โรงงานจะมีเทคนิคที่นิยมใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาหลอม เช่น ลดการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิต่ำลง การควบคุมปริมาณอากาศเผาไหม้ส่วนเกินของ

เตาหลอม [1] และนำความร้อนที่สูญเสียจากการปล่อยทิ้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในระบบ และทดลองโดยการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพในกระบวนการหลอมเหล็กที่ใช้เบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า การใช้เบ้ารับน้ำเหล็กนี้จะต้องมีการอุ่นเบ้าจนได้อุณหภูมิที่พอเหมาะ เพื่อขจัดความชื้นออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กก่อน [2-4] วัตถุประสงค์ภายในของงานนี้เมื่อมีความร้อนสูญเสียและนำไปคำนวณในสภาวะสมดุลพลังงานความร้อนของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ทำให้มีค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาหลอมสูงขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้มากขึ้นและทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงจากการปรับปรุงเตา

2. หลักการ

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่สำคัญของอุตสาหกรรมผลิตเหล็กแสดงดังรูปที่ 1 เป็นอุปกรณ์สร้างปัญหาคุณภาพไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้นทุกวัน ปัญหาที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยกระแสฮาร์มอนิกทำให้มีแรงดันของระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติไปจากลักษณะรูปสัญญาณคลื่นไซน์ อีกปัญหาหนึ่งคือจะมีแรงดันกระเพื่อม (Ripple voltage) เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงเป็นช่วงๆ จึงส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าในขณะที่หลอมโลหะคือทำให้เกิดแรงดันลดลงตามช่วงจังหวะในการหลอมมีผลทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สั้นน้อยลง ดังนั้นหน่วยงานของการไฟฟ้าฯ ได้มีข้อกำหนดคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแรงดัน %THD_v ของเตาหลอมอยู่ในช่วง 0.5-10.5 % และมีค่ากระแส %THD_i ของเตาหลอมอยู่ในช่วง 1.5-45.5 % โดยควบคุมไม่ให้เกิดการรบกวนในระบบและส่งผลเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ในขณะที่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ขนาดความจุ 1 ตันน้ำเหล็ก [5]

2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเมื่อเกิดความร้อนสูญเสียต่างๆ มีดังนี้

2.1.1 การสูญเสียความร้อนจากก๊าซเสียและก๊าซเผาไหม้

จะมีปริมาณความร้อนที่มีสัดส่วนเป็นปริมาณสูงสุดของความร้อนสูญเสียทั้งหมด การลดการสูญเสียความร้อนสามารถทำได้โดยการปรับปรุงสภาพการเผาไหม้ให้เหมาะสม มีดังนี้ [6]

1. ควรใช้อากาศถ่ายเทเข้าไปในการเผาไหม้น้อยที่สุด แต่ไม่เกิดการบวมบนนอกไซด์ เพราะถ้าอากาศเข้าไปในการเผาไหม้มากเกินไปจะเกิดความจำเป็น อากาศส่วนเกินดังกล่าวจะนำความร้อนออกจากเตา

2. ควรให้อุณหภูมิไอเสียที่ออกปด่องไอเสียต่ำที่สุด ถ้าขนาดพื้นที่เผาไหม้เล็กจะใช้เวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย เพื่อให้ไอเสียออกปด่องอุณหภูมิต่ำลง

3. ถ้าอุณหภูมิในเตาสูงของการเผาไหม้ ภายในเตาจะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียออกทางปล่องสูงและทำให้เกิดคุณภาพในการเผาไหม้ต่ำลง

2.1.2 การสูญเสียความร้อนที่สะสมในผนังเตา

วัสดุที่ใช้ทำผนังเตาควรเป็นวัสดุที่มีความจุความร้อนต่ำที่สุด (มีค่าความเป็นฉนวนความร้อนที่สูง)

ถ้าวัสดุทำผนังเดิมมีค่าความจุความร้อนสูงขึ้น ควรแก้ไขโดยการติดตั้งฉนวนกันความร้อนภายในเตา ซึ่งการติดตั้งฉนวนภายในจะส่งผลทำให้การจุดเตาใช้เวลาน้อยลง ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณเชื้อเพลิงที่สูญเสียในขณะที่จุดเตาได้

2.1.3 การสูญเสียความร้อนบริเวณผิวเตา

หมายถึง อุณหภูมิของผิวเตาทั้งด้านบนและด้านข้าง ไม่ควรสูงจนเกินอุณหภูมิมาตรฐานจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซร้อนภายในเตา

2.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

เตาหลอมไฟฟ้าที่มีการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นนั้น สามารถพิจารณาได้จากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับปริมาณผลผลิตที่ได้ [7] ถ้าเตาหลอมไฟฟ้าที่ถูกปรับปรุงแล้วให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ปริมาณผลผลิตที่ได้จะมากขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเท่าเดิมหรือที่ปริมาณผลผลิตเท่าเดิมจะใช้เชื้อเพลิงน้อยลง หมายถึงต้นทุนในการผลิตลดลงที่มีการปรับปรุงเตาเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จะต้องวิเคราะห์ทางการเงินว่าคุ้มหรือไม่และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือไม่

2.3 ปริมาณความร้อนที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าต้องการใช้

2.3.1 คำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผนังของเตา

ในการปรับปรุงเพื่อลดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังของเตาที่สร้างด้วยอิฐ สามารถทำได้โดยการปูผนังด้านในของเตาหลอมด้วย Ceramic fiber การปรับปรุงมีข้อกำหนดเนื่องจากปริมาณของเตาจะลดลง โดยแสดงดังรูปที่ 2 ก่อนที่จะคำนวณหาปริมาณความร้อนควรจะสมมติอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของเตามีดังนี้

- อุณหภูมิ T_s ในเบ้าหลอมควรประมาณ 800°C ในขณะที่ทำการหลอม เพราะจุดหลอมตัวของเหล็ก 660°C

- อุณหภูมิ T_1 ภายในห้อง Heater ของเตาประมาณ 900°C
 - อุณหภูมิ T_a บรรยากาศในห้องทดลองประมาณ 30°C
 - อุณหภูมิ T_{OB} ผนังด้านล่างของโครงเตา, อุณหภูมิ T_{ow} ผนังด้าน, และมีอุณหภูมิ T_{OT} ผนังด้านบนของเตา
- จากความสมดุลการถ่ายเทความร้อนหาได้ดังนี้

$$q = \frac{KA(T_1 - T_0)}{X} \quad (1)$$

กำหนดให้

- q คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนัง หน่วย kcal/h
- X คือ ความหนาของฉนวนความร้อน หน่วย m
- K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนผ่านฉนวน หน่วย kcal/m.h $^\circ\text{C}$
- A คือ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อนผ่านฉนวน หน่วย m^2
- T_1 คือ อุณหภูมิภายในห้อง Heater หน่วย $^\circ\text{C}$
- T_0 คือ อุณหภูมิที่ผนัง โครงเหล็กของเตา หน่วย $^\circ\text{C}$

2.3.2 คำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านพื้นเตา

พื้นเตาหลอมจะรับน้ำหนักของเบ้าประมาณ 16 kg และจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทนความร้อนจึงเลือกใช้ อิฐฉนวนความร้อนพิจารณาจากรูปที่ 2 คำนวณหาดังนี้

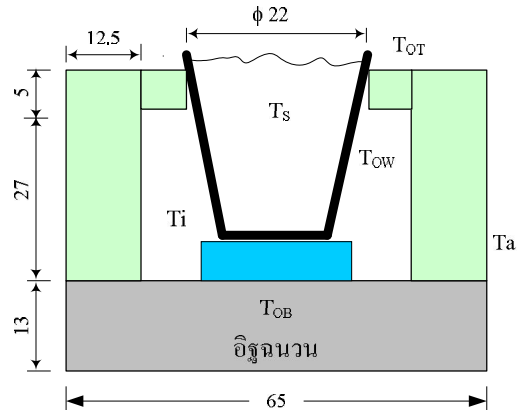
$$q_a = Q_1 A \quad (2)$$

เมื่อ

$$Q_1 = \frac{K(T_1 - T_0)}{X}$$

กำหนดให้

- q_a คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านพื้นของเตาหลอม หน่วย kcal/h
- Q_1 คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่หน้าตัดของเตา หน่วย kcal/m 2 h



รูปที่ 2 อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

2.3.3 คำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผ่านผนังด้านข้างเตาหลอมไฟฟ้า หาได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$q_b = \frac{KA(T_1 - T_{ow})}{X} \quad (3)$$

กำหนดให้

q_b คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผนังด้านข้างของเตาหลอมไฟฟ้า หน่วย kcal/h, kw

2.3.4 คำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผาด้านบนของเตา หาได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$q_c = \frac{KA(T_1 - T_{OT})}{X} \quad (4)$$

กำหนดให้

q_c คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผาด้านบนของเตาหลอมไฟฟ้า หน่วย kcal/h, kw

2.3.5 คำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียโดยการพาความร้อนจากผิวหน้าของเหล็กหลว หาได้จากสมการดังนี้

$$q_d = h_c A (T_S - T_a) \quad (5)$$

กำหนดให้

h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์พาความร้อนหน่วย kcal/m.h $^\circ\text{C}$

q_d คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียโดยการพาความร้อน จากผิวหน้าของเหล็กเหลว หน่วย kcal/h, kw

2.3.6 คำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียออกจากเตาทั้งหมด หาค่าได้จากสมการที่ (6) ดังนี้

$$q_{loss} = q_a + q_b + q_c + q_d \quad (6)$$

2.3.7 คำนวณปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในอิฐฉนวนของพื้นเตา หาค่าได้จากสมการที่ (7) ดังนี้

$$q_e = MC(T_h - T_c) \quad (7)$$

กำหนดให้

- q_e คือ ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในอิฐ หน่วย kcal
- M คือ น้ำหนักของวัสดุใช้ทำเตา หน่วย kg
- C คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ หน่วย kcal/ kg^oC
- T_h คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุได้รับความร้อนหน่วย^oC
- T_c คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุสภาพปกติก่อนใช้งาน

3. ศึกษาวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะต้องเข้าใจถึงวัฏจักรการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อน หักเผาที่ใช้ส่วนมากในงานอุตสาหกรรมจะใช้เชื้อเพลิงเป็นน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ โดยการพ่นเปลวไฟจากหัวเผาเข้าไปในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ไปปะทะรวมกันที่ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะแผ่ออกและไหลย้อนกลับไปตามผนังออกมาที่ปากของเบ้าจะถูกพ่นทิ้งออกไปจากปากเปิดของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยตรง การใส่เศษเหล็กลงในเตาหลอมที่ก่ออิฐฉนวนเสร็จใหม่ ๆ จะถูกนำมาเผาด้วยหัวเผาแบบแนวตั้งในสถานีที่ 1 ตามวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยพิจารณาจากรูปที่ 3 เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากผนังเบ้าทำให้วัสดุที่ใช้ก่ออิฐฉนวนเกิดการแข็งตัวโดยเบ้านี้มีความหนาประมาณ 20 mm และมีน้ำหนักประมาณ 6 kg

ภายหลังจากการอุ่นได้ระยะช่วงหนึ่งเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกนำไปยังสถานีที่ 2 เพื่อให้แผ่นเลื่อนเปิด - ปิดโดยการถ่ายเทน้ำเหล็กออกจากเบ้า ขั้นตอนต่อไปเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกนำไปเผาด้วยหัวเผาที่สถานีที่ 3 อิฐฉนวนทนไฟมีการปรับระดับอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กให้เพียงพอแล้วถูกนำมารับน้ำเหล็กจากเตาหลอมในสถานีที่ 4 หลังจากนั้นน้ำเหล็กจะถูกเทออกไปจากเตาหลอมทันที เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายมาสถานีที่ 5 เพื่อถ่ายเทน้ำเหล็กออกสู่อ่างรับน้ำเหล็ก และนำไปหล่อเป็นเหล็กแท่งต่อไปในสถานีนี้ น้ำเหล็กที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องมีอุณหภูมิที่ไม่ต่ำกว่า 1550^o C เพื่อไม่ให้ น้ำเหล็กแข็งตัวก่อนถ่ายเทออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กของเตาหลอม ซึ่งพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องมีอุณหภูมิสูงเพื่อป้องกันความเสียหายของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีลักษณะการทำงานตามวัฏจักรแสดงดังรูปที่ 3 และใช้ข้อมูลการสมดุลพลังงานความร้อนของเตาหลอมแสดงตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเบ้าหลอมและอุณหภูมิของอิฐ

รายการ	ข้อมูล
1. อุณหภูมิของอิฐฉนวนความร้อน	
Cold Crushing Strength	60 kg/cm ²
Bulk Density	1.2 g/cm ³
Temperature Limit of Application	1,400 °C
Thermal Conductivity at 600 °C	0.05 kcal/m.h °C
Specific Heat	0.21 kcal/ kg °C
2. คุณสมบัติเบ้าหลอมของกราไฟท์ (Graphite)	
Thermal Conductivity	4.32 kcal/m.h °C
Bulk Density	2.1 g/cm ³
Specific Heat	0.197 kcal/ kg °C

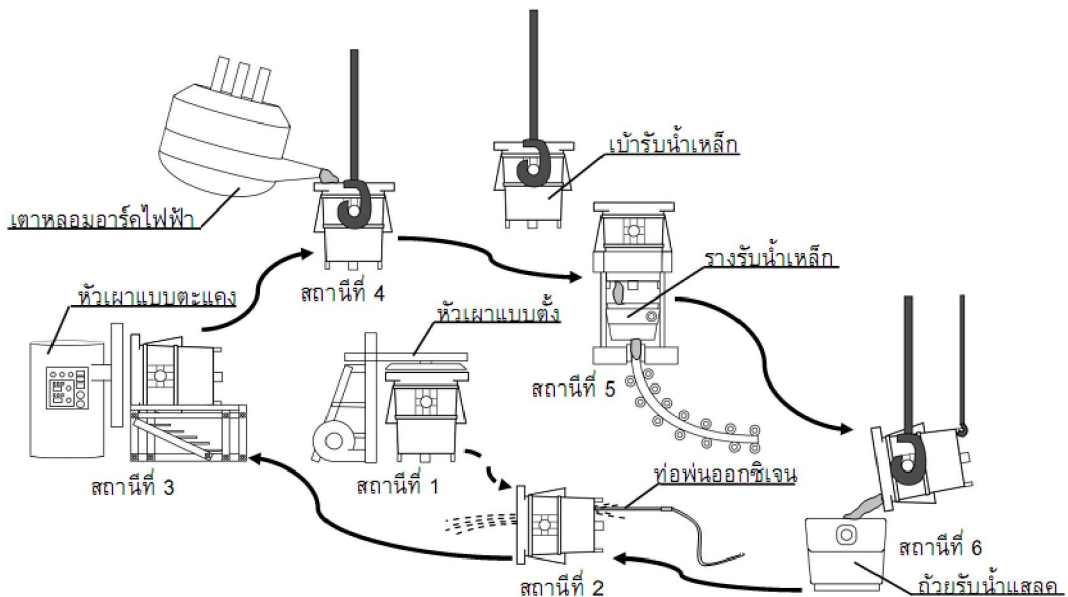
ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

รายการ	ข้อมูล
ปริมาณเหล็กที่หลอม	30 ตัน/วัน
อุณหภูมิในการหลอม	1,470 °C
ความร้อนที่ใช้ในการหลอม (QL)	490 kcal/kg
อัตราส่วนเศษเหล็ก	60 %
ค่าความร้อนค่าสุด (HL)	9,700 kcal/kg
ความถ่วงจำเพาะ	0.95
ปริมาณออกซิเจนของปล่องก๊าซเสีย	8 %

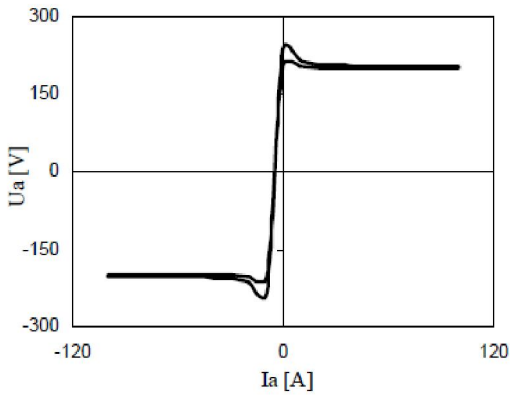
4. การจำลองเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในส่วนที่ 1

ในส่วนที่ 1 ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าพบว่าผลจากการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าของระบบ ทำให้เกิดปัญหาขึ้นของแรงดันกระแสเพื่อสูงเกินขีดจำกัดตามมาตรฐานแรงดันกระแสที่บริเวณระบบแรงดัน 115 kV ซึ่งจะเชื่อมต่อกับโรงงานอุตสาหกรรมหลอมเหล็ก จึงเห็นสมควรที่จะศึกษาหา

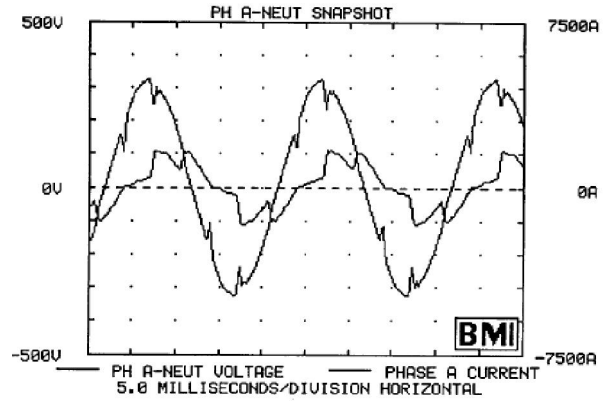
แนวทางการแก้ไขปัญหาให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเริ่มจากสร้างแบบจำลองของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับใช้งานจริงซึ่งมีคุณสมบัติเป็นโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน เมื่อได้แบบจำลองระบบนี้แล้วจึงศึกษาผลกระทบต่อระบบแล้วเลือกใช้รูปแบบซึ่งเรียกว่า “Dynamic Behavior” ที่มีสัญญาณของแรงดันอาร์คที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าแสดงรูปที่ 4 ทำการออกแบบจำลองของเตาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป EMT/PDC/PSCAD แสดงดังรูปที่ 5 จากนั้นศึกษาปัญหาแรงดันกระแสเพิ่มเติมที่เกิดขึ้นในระบบ 115 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีโรงงานอุตสาหกรรมหลอมเหล็กที่ใช้อุปกรณ์หลัก คือ เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าขนาด 60 MVA, 400 V ถูกเชื่อมต่อกับระบบ 115 kV Short Circuit MVA มีค่า 1,480 MVA และมี Fixed Capacitor Bank เท่ากับ 150 MVAR โดยผลจากการจำลองระบบแสดงดังรูปที่ 6 คือผลสัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดันกระแสเพื่อ



รูปที่ 3 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในกระบวนการหลอมเหล็ก [3]

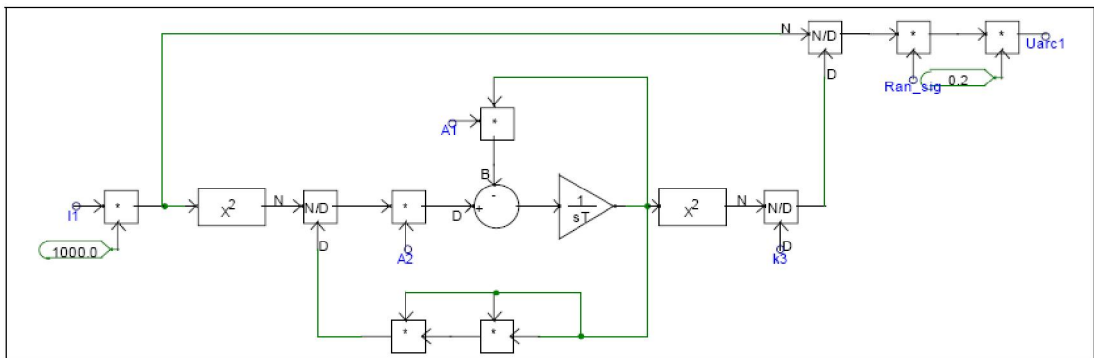


(ก) v-i characteristic ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

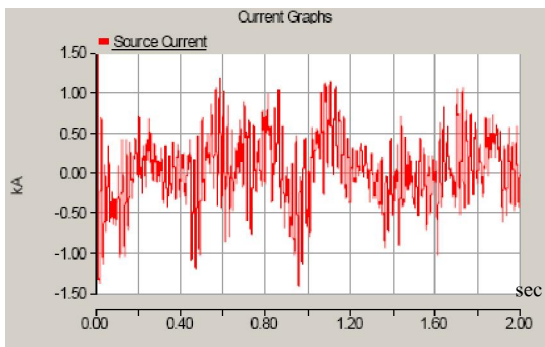


(ข) สัญญาณแรงดันของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

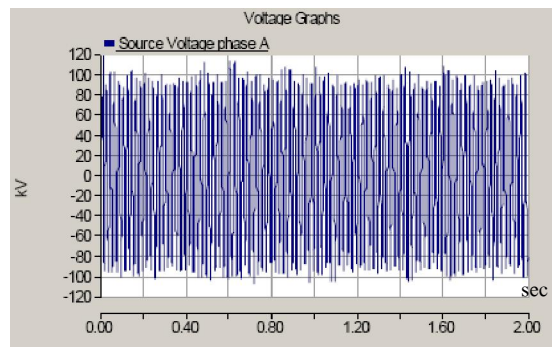
รูปที่ 4 คุณลักษณะรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า



รูปที่ 5 แบบจำลองของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม EMTDC/PSCAD

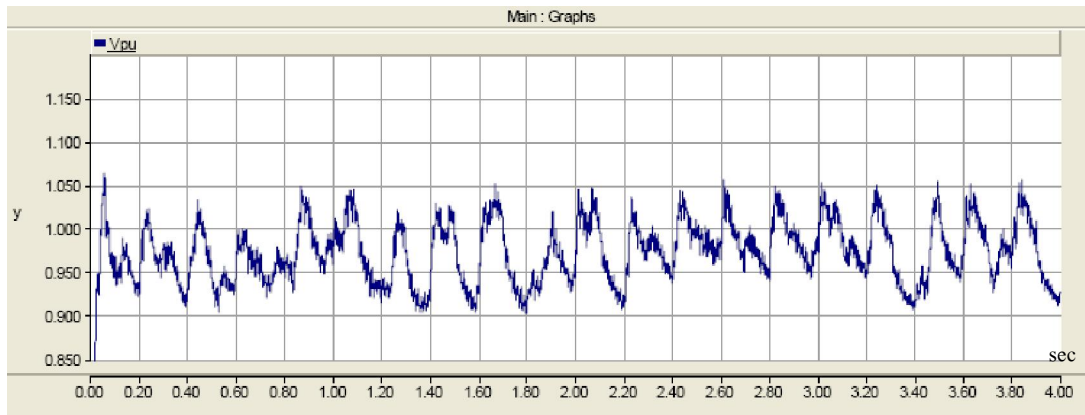


(ก) ผลสัญญาณกระแสที่จุดจ่ายไฟแรงดันระบบ 115 kV

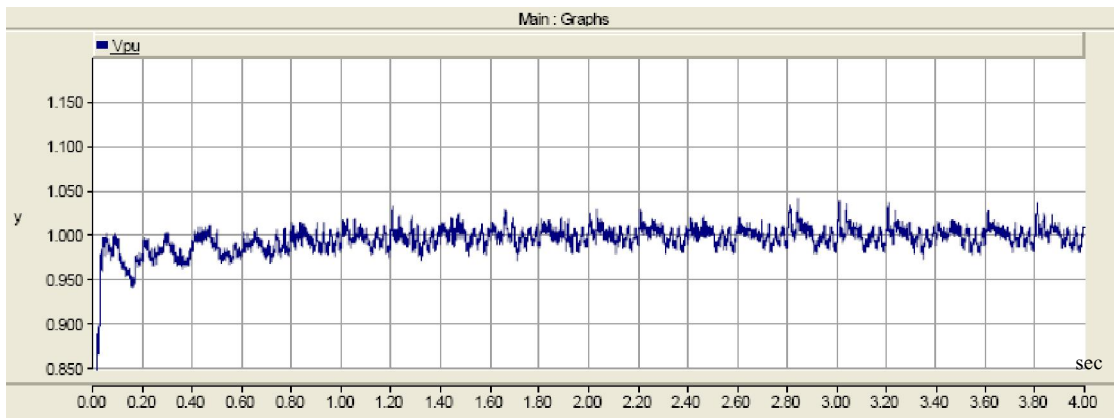


(ข) ผลสัญญาณแรงดันกระแสเพิ่มของระบบ 115 kV

รูปที่ 6 ผลสัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดันกระแสเพิ่มที่ได้จาก Simulation



รูปที่ 7 ผลสัญญาณแรงดันกระแสเฟรมภายหลังจากติดตั้งใช้งาน SVC ในระบบของโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก



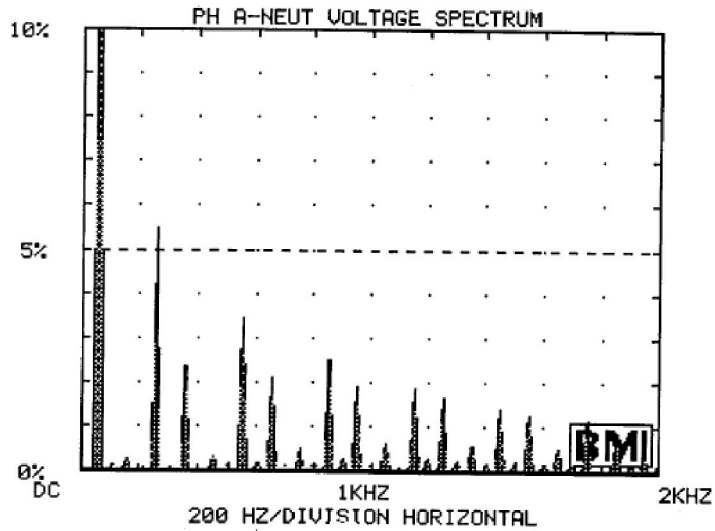
รูปที่ 8 ผลสัญญาณแรงดันกระแสเฟรมภายหลังจากการปรับกำลังรีแอกตีฟ (MVA) ในระบบ

5. ผลการจำลอง

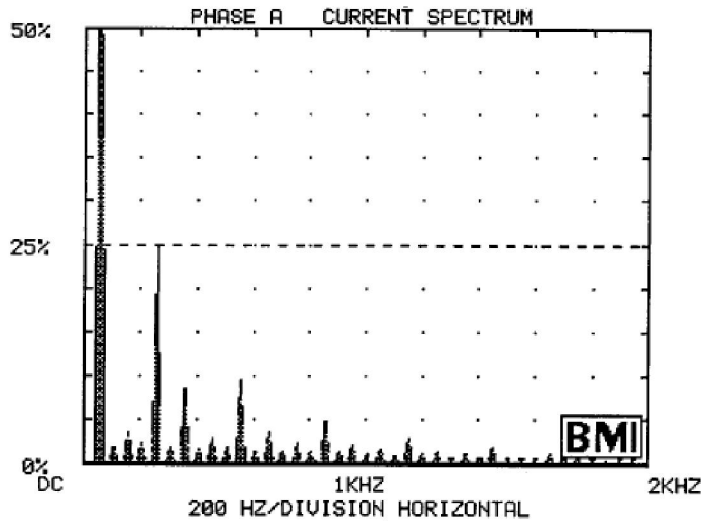
5.1 วิเคราะห์ผลกระทบ

ผลการจำลองระบบพบว่าทำให้เกิดปัญหาแรงดันกระแสเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 6 (ข) ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนจาก Fixed Capacitor Bank เป็น Static Var Compensate (SVC) เข้าไปในระบบของโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก เพื่อช่วยให้สัญญาณแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่แคบลงแสดงดังรูปที่ 7 ภายหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ SVC ปัญหาแรงดันกระแสเฟรมที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถแก้ไขได้

ทั้งหมด ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้พลังงานที่กว้างไปมาสูงของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า การทำงานของ SVC จึงไม่สามารถตอบสนองการใช้กำลังรีแอกตีฟได้เหมาะสม ดังนั้นจึงทดสอบโดยเปลี่ยนค่ากำลังรีแอกตีฟขณะ Short Circuit ที่จุดเชื่อมต่อในระบบ พบว่าเมื่อทำการปรับค่ากำลังรีแอกตีฟเป็น 2,960 MVA ทำให้แรงดันกระแสเฟรมเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.95-1.10 p.u. มีจำนวนลดน้อยลงแสดงดังรูปที่ 8 และผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันในขณะหลอมแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 ผลการวัดหาสเปกตรัมของแรงดัน (V) ในขณะทำการหลอมของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่เฟส A



รูปที่ 10 ผลการวัดหาสเปกตรัมของกระแส (I) ในขณะทำการหลอมของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่เฟส A

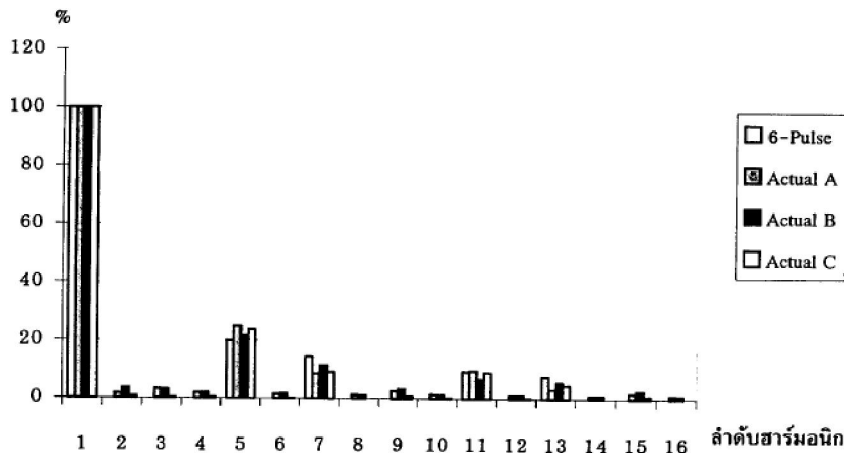
5.2 ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

นำสัญญาณแรงดันและกระแสในเฟสเดียวกันที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความถี่และหาฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ใน

แต่ละลำดับด้วยเครื่อง Disturbance Analyzer ของ กฟภ. แสดงค่าตารางที่ 3 นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟจากการวัดเปรียบเทียบจำลองของเตาหลอมมี Phase control SCR ที่ใช้คอนเวอร์เตอร์ 6 Pulse เป็นตัวควบคุมดังรูปที่ 11

ตารางที่ 3 ค่าแรงดัน กระแส อิมพีแดนซ์ %THDv และ%THDi ในแต่ละลำดับฮาร์มอนิกของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดัน (% Volt)			กระแส (% Amp)			อิมพีแดนซ์ (% Ω)		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	100	100	100	100	100	100	1.000	1.000	1.000
2	0	0.3	0.2	1.4	3.5	0.7	0.000	0.084	0.186
3	0	0.2	0.3	3.2	2.9	0.4	0.000	0.065	0.093
4	0	0.4	0.3	1.6	1.8	0.5	0.000	0.191	0.157
5	5.4	5	5.4	24.3	21.4	23.5	0.231	0.232	0.219
6	0	0.4	0.4	1.5	1.6	0.2	0.000	0.240	0.265
7	2.3	2.4	1.9	8.1	11.1	8.7	0.260	0.231	0.223
8	0	0.2	0.5	1.3	1.3	0	0.000	0.165	0.384
9	0.2	1.1	0.8	2.4	3.2	0.9	0.212	0.331	0.305
10	0	0.4	0.6	1.5	1.4	0.3	0.000	0.284	0.331
11	3.3	2.7	3.2	9.3	6.5	8.6	0.384	0.402	0.392
12	0	0.6	0.5	1.4	1.1	0.3	0.000	0.501	0.417
13	2.1	2.5	1.5	3.2	5.5	4.5	0.457	0.463	0.453
14	0	0.5	0.6	1	1	0	0.000	0.452	0.453
15	0.5	1.3	1.1	1.7	2.5	0.9	0.534	0.501	0.526
16	0	0.5	0.5	1.1	1	0	0.000	0.501	0.542
ค่า rms	228.1	227.5	229	1042.3	1076.1	1084.9	0.210	0.211	0.220
% THD	8.701	8.602	8.903	29.602	27.504	28.005			



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากการวัดที่ลำดับฮาร์มอนิกของเตาหลอมกับคอนเวอร์เตอร์ 6 Pulse

6. การทดลองหลอมเหล็กในส่วนที่ 2

6.1 ขั้นตอนทำการหลอมเหล็ก มีดังนี้

1. ทำการหลอมเหล็กปริมาณ 2.2 กิโลกรัม เพื่อใช้เป็นเชื้อที่จะหลอมเศษเหล็กได้ง่ายขึ้น

2. เนื่องจากเป็นเตาหลอมใหม่ จึงควบคุมเตาหลอมให้มีอุณหภูมิที่ร้อนขึ้นช้าๆ ประมาณ 700 °C ภายในห้องใช้เวลา 1 ชั่วโมง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 60 นาทีแล้ว จึงเร่งเตาหลอมไฟฟ้าให้ร้อนเร็วขึ้น จะสังเกตเห็นได้ว่าถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 700 °C เหล็กยังไม่หลอมตัว เพราะอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำกว่า 660 °C (จุดหลอมตัว)

3. เมื่อเวลา 60 นาทีไปแล้วจึงทำการเร่งเตาหลอมให้ร้อนเร็วขึ้นและให้สังเกตอุณหภูมิในช่วง 850-900 °C พบว่าเหล็กสามารถนำมาหลอมเหลวได้ดีพอสมควร

4. เมื่อเหล็กหลอมเหลวจนหมดแล้ว จึงเริ่มทำการหลอมเศษเหล็กโดยเติมเข้าไปครั้งละ 1 กิโลกรัม

5. ในการหลอมจะไม่ใช้อุณหภูมิสูงเกินไปเพราะว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะทนอุณหภูมิได้ประมาณ 1,200 °C

6. เมื่อมีสิ่งสกปรกและแอสล็ก (Slag) มาก จึงทำการเติมฟลัก Coveral เพิ่มขึ้นเพื่อแยกเหล็กออกจากสิ่งสกปรกและให้ตกลงไปหลอมเหลวในเบ้ารับน้ำเหล็ก

7. ก่อนเทเหล็กเหลวจะต้องไล่แก๊สโดยเติม Degaser

8. ควบคุมอุณหภูมิของเหล็กที่หลอมเหลวแล้วให้มีเหลือประมาณ 680 °C ก่อนที่จะเทแบบลงไป

6.2 บันทึกข้อมูลปฏิบัติการหลอมเหล็ก

1. ทำการบันทึกข้อมูลลงในตารางที่ 4

2. เมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 120 นาทีแล้ว ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนผ่านฉนวนจะอยู่ในสภาวะคงตัว

3. สังเกตที่อุณหภูมิของผนังพื้นหรือด้านล่างของเตาหลอม (T_{OB}) และอุณหภูมิของผนังฝาหรือด้านบนของเตาหลอม (T_{OT}) พบว่าจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับ 50 °C

4. ทำการสังเกตอุณหภูมิผนังด้านข้างของเตาหลอม (T_{ow}) เริ่มมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับ 40 °C

ตารางที่ 4 ผลของอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ไปของเตาหลอม

เวลา (min)	ในห้อง Heater (°C)	อุณหภูมิ (°C)		น้ำหนัก เหล็ก (kg)	หมายเหตุ
		ภายนอก เบ้า	ภายใน เบ้า		
5	300	30		2.2	ใส่เหล็ก
17	600	30			
26	540	30			
30	600	30			
48	685	30			
57	700	30			
76	820	30	800		
85*	940	30	780	3.2	*เวลา 85 -
120*	920	40	780	4.2	179 min
144*	950	40	830	5.2	ใส่เหล็ก
155*	840	40	780	6.2	เพิ่มครั้งละ
175*	940	50	800		ทุกๆ 1 kg
179*	850	50	810	7.2	
185	940	50	780		
191	870	50	780		
196	825	50	780		
205	760	50	690		
219	780	50	685		
235	700	50	680		เทลงในแบบ

5. ภายหลังจากเวลาผ่านไป 180 นาที จะไม่มีการให้ความร้อนกับเตาหลอมอีกเลย เพราะว่าได้เตรียมพร้อมสำหรับทำการเทลงในแบบ จะต้องพยายามลดอุณหภูมิเหล็กเหลวให้เหลือน้อยลงประมาณ 680 °C



รูปที่ 12 การหลอมเหล็กเหลวโดยใช้เศษเหล็กลงในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่อุณหภูมิร้อนประมาณ 700 °C

7. ผลการทดลอง

จากการทดลองหลอมเหล็กพบว่าอุณหภูมิของความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา พื้นผิวของเตาหลอมปูด้วย Ceramic fiber มีความหนา 50 mm ด้านนอกผนังจะหุ้มฉนวนที่ทำด้วย Fire bricks จึงทำให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยของ Fire bricks และมีปริมาณความร้อนที่สะสมในผนังของเตาเพิ่มมากขึ้น เหตุผลที่ใช้ Ceramic fiber แทนที่จะใช้ Rock wool ก็เพราะว่ามีอุณหภูมิที่ผิวรอยต่อของวัสดุจะสูงเกินอุณหภูมิที่ปลอดภัย ในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยความร้อนจะมีการใส่เศษเหล็ก (Scrap) ลงไปในเตาจะขึ้นอยู่กับจำนวนถัง ในระหว่างการใส่เศษเหล็กแต่ละถังจะมีการให้พลังงานความร้อนจากการอาร์คไฟฟ้าเพื่อหลอมละลายเศษเหล็ก และมีการใช้พลังงานเคมีในการเผาไหม้โดยฉีดก๊าซธรรมชาติเข้าที่หัว Oxy fuel Burner

เพื่อลดจุดที่มีอุณหภูมิต่ำจนมีเศษเหล็กถูกหลอมละลาย และจากการทดลองพบว่าระหว่างกระบวนการเทเหล็กหลอมเหลวออกจากเบ้าเหล็กหลอมลงบนรางรับน้ำจะต้องวางเบ้าไว้ด้านบนและเปิดช่องถ่ายเหล็กด้านล่าง โดยสังเกตเหล็กหลอมเหลวที่ไหลออกมาไม่ให้มีสแลก (Slag) จะมีการปั่นเป็อนก่อนที่จะหยุดการเทเหล็กกลงไปในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องควรทำการศึกษาอนุรักษ์พลังงานของเตาเผาแบบใหม่ การปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาดเล็ก โดยการใช้ไฟฟ้าและการพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมด้วยเบ้ารับ

ตารางที่ 5 ข้อมูลหาประสิทธิภาพในการหลอมเหล็ก [4]

รายการ	ข้อมูล
Tap to Tap Time	65 min
Tapping Weight	25 ton
Tapping Temperature	1600 Celsius
Specific Energy Consumption	520 kWh/ton
Oxygen Consumption From Burner	7.5-8 Nm ³ /ton
Natural Gas Consumption	4-5 kg/ton
Oxygen Consumption From Lance	28-30 Nm ³ /ton
Carbon Consumption From Lance	30 kg/ton



รูปที่ 13 กระบวนการเทเหล็กเหลวออกจากเบ้าหลอม

8. การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเตาโดยใช้สมมูลพลังงานความร้อน

8.1 กรณีความร้อนเข้า ใช้ข้อมูลตารางที่ 5

- ช่วงเตาหลอมความร้อนจากการเผาไหม้

$$= HL (9,700 \text{ kcal/kg}) \times 7,600 \text{ kg/วัน}$$

$$= 73,720 \times 10^3 \text{ kcal/วัน}$$

- ช่วง Refiner ความร้อนจากการเผาไหม้

$$= HL (10,770 \text{ kcal/kg}) \times 756 \text{ kg/วัน}$$

$$= 8,239.05 \times 10^3 \text{ kcal/วัน}$$

$$\text{รวมความร้อนเข้าทั้งหมด} = (73,720 + 8,239.05) \times 10^3$$

$$= 81,959.05 \times 10^3 \text{ kcal/วัน}$$

8.2 กรณีความร้อนออก ใช้ข้อมูลตารางที่ 5

- ช่วงความร้อนที่ใช้เตาหลอม

$$= QL (490 \text{ kcal/kg}) \times W(30,000 \text{ kg/วัน})$$

$$= 14,700 \times 10^3 \text{ kcal/วัน}$$

- ช่วงความร้อนสูญเสียจากแก๊สเสีย หาดังนี้

$$Q = G + C_{pm} \times (T_g - T_o) \text{ kcal/kg เชื้อเพลิง}$$

$$Q_1 \text{ จากเตาหลอม} = 17.07 \times 0.33 \times (540 - 33) \times 7,600$$

$$= 21,705.46 \times 10^3 \text{ kcal/วัน}$$

$$Q_2 \text{ ในช่วง Refine} = 13.12 \times 0.33 \times (1,400 - 33) \times 765$$

$$= 4,527.701 \times 10^3 \text{ kcal/วัน}$$

$$\text{ความร้อนสูญเสียทั้งหมด} = 26,233.162 \times 10^3 \text{ kcal/วัน}$$

9. สรุปผล

ผลการจำลองเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในส่วนที่ 1 พบว่า แก๊สโซโดยติดตั้งอุปกรณ์ Static Var Compensate (SVC) ที่โรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก จากระบบที่ศึกษาพบว่ายังเกิดปัญหาขึ้น ดังนั้นจึงปรับ/เพิ่มค่ากำลังรีแอกตีฟขณะ Short Circuit (MVA) ที่จุดเชื่อมต่อในระบบ ทำให้ SVC

ทำงานได้อย่างเหมาะสม โดยแก้ปัญหาแรงดันกระแสเพื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อใช้เป็นแนวทางแก้ไขปัญหาคอนดักไฟฟ้าของระบบ ซึ่งแสดงผลค่าแรงดัน กระแส %THD_v และ %THD_i ในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกจากผลตารางที่ 3 ในปัจจุบันมีผู้ใช้ไฟฟ้าในกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตเหล็กนี้มีแนวโน้มสูงขึ้นทำให้เกิดปัญหาคอนดักไฟฟ้าและส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ผลจากการทดลองหลอมเหล็กและการวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในส่วนที่ 2 จึงพบว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิงมีความสำคัญมาก จะต้องพิจารณาถึงการควบคุมทำให้เกิดการเผาไหม้เพื่อทำให้เกิดพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงไปเป็นความร้อนจนหมด โดยใช้อากาศเผาไหม้อย่างเหมาะสมต้องมีปริมาณมากพอจากตารางที่ 6 และตารางที่ 7 จะได้ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาคือ 25,984.75 x 10³ kcal/วัน และตารางที่ 8 ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมมูลพลังงานความร้อนของเตาหลอมในกรณีความร้อนเข้าจะมีความร้อนจากการเผาไหม้เท่ากับ 81,959.0 x 10³ kcal/วัน และกรณีความร้อนออกทำให้เกิดความร้อนสูญเสียทั้งหมด 81,595.05 x 10³ kcal/วัน ทำให้มีประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าประมาณ 99.56 % ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่าควรลดการสูญเสียความร้อนออกทางผนังเตาให้ต่ำลง โดยการหุ้มฉนวนหรือทำผนังเตาใหม่ถ้าเกิดการสึกหรอสูง การหุ้มฉนวนที่ดีควรหุ้มฉนวนภายใน อุณหภูมิภายในเตาจะถ่ายเทได้เร็วกว่าการหุ้มฉนวนจากภายนอก เนื่องจากเตาหลอมไม่ต้องการสูญเสียความร้อนให้กับผนังเตาซึ่งเป็นอิฐฉนวนทนไฟได้ การใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจะทำให้มีต้นทุนต่ำและสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

10. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Rampirujipong, S. Jantanuwath, C. Vutisirisat and P. Jaranykon, “Development of Control Assist System of Electric Arc Furnace based on Thermal Condition of the Ladle”, ME-NET#27,Chonburi, 16-18 October 2013.(in Thai)

[2] K. Rampirujipong, C. Vutisirisat, S. Jantanuwath and P. Jaranykon, “Energy Reduction in Steel by Covering the Ladle with a Shield”,ME-NETT26, Chiangrai, 24-27 October 2012,pp.12-15.(in Thai)

[3] C. Vutisirisat, K. Rampirujipong and P. Jarankon, “Control of Ladle Preheating Combined Heat with Electric Arc Furnace”, The 8th Conference of the E-NET, Mahasarakham, 2-4 May 2012.(in Thai)

[4] N. Feuangwrrong and T. Paraprong,“Increasing the Energy Efficiency of Electric Arc Furnace by Improving”, The 7thConference of the E-NET, Phuket, 3-5 May 2011, pp.28-31.(in Thai)

[5] M. Jangrajang, “An Improvement of Heat Crucible Steel in Electric Arc Furnace”, Journal of Energy Research, Bangkok, 2012, pp.33-47. (in Thai)

[6] T. Arunarath, “Journal Research of The Energy Conservation for the Electric Arc Furnace”, M & E Co.,Ltd, Bangkok,19, 2010, pp.58-75.(in Thai)

[7] P. Jaranyakon, “Journal Research of Control of Ladle Preheating Combined with Electrical Arc Furnace for Energy Conservation in Cycles”, M & E Co.,Ltd, Bangkok,19, 2010, pp.91-100.(in Thai)

ตารางที่ 6 ผลความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีของเตาหลอมไฟฟ้ากับอุณหภูมิในสภาวะสมดุลพลังงานความร้อน

บริเวณ	อุณหภูมิผิวเฉลี่ย (T ₁) °C	อุณหภูมิอ้างอิง (T ₂) °C	พื้นที่ผิว (A) m ²	ความร้อนสูญเสีย (Q _r) (ค่า e = 0.9) kcal/hr
<u>เตาหลอม</u>				
ด้านบน	380		26.25	199,517.34
ด้านข้าง	300	33 °C	47.3	205,731.14
ด้านล่าง	150		26.25	26,802.50
<u>ช่วง Refiner</u>				
ด้านบน	420		3.5 x 2	68,212.14
ด้านข้าง	380	33 °C	3.5 x 2	53,204.62
ด้านล่าง	200		3.5 x 2	12,693.26
<u>Regenerator</u>				
ด้านบน	200		15.4	27,925.18
ด้านข้าง	150	33 °C	86.57	88,392.10
รวมปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมด Q _r เท่ากับ 682,478.27 kcal/hr				

ตารางที่ 7 ผลความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ของเตาหลอมไฟฟ้ากับอุณหภูมิในสภาวะสมดุลพลังงานความร้อน

บริเวณ	อุณหภูมิพื้นผิว (Ts) °C	h kcal/m ² h °C	พื้นที่ผิว A (m ²)	ความร้อนสูญเสีย Qc kcal/hr
<u>เตาหลอม</u>				
ด้านบน	380	12.085	26.25	110,079.24
ด้านข้าง	300	8.92	47.3	112,651.57
ด้านล่าง	150	4.93	26.25	15,141.26
<u>ช่วง Refiner</u>				
ด้านบน	420	12.42	7.0	33,645.78
ด้านข้าง	380	9.50	7.0	23,075.5
ด้านล่าง	200	5.40	7.0	6,312.6
<u>Regenerator</u>				
ด้านบน	200	10.06	15.4	25,872.31
ด้านข้าง	150	7.24	86.57	73,442.0
รวมปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมด Qc เท่ากับ 4,000,220.1 kcal/hr				

$$\begin{aligned} \text{รวมความร้อนสูญเสียผ่านผนังของเตา} &= Q_r + Q_c = 1,082.698 \times 10^3 \text{ kcal/hr} \\ &= 25,984.75 \times 10^3 \text{ kcal/วัน} \end{aligned}$$

ตารางที่ 8 ผลการหาประสิทธิภาพ η ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้สมดุลพลังงานความร้อน

วิเคราะห์การทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเมื่อมีความร้อนสูญเสีย					
กรณีความร้อนเข้า	x 10 ³ kcal/วัน	η %	กรณีความร้อนออก	x 10 ³ kcal/วัน	η %
1. ความร้อนจากการเผาไหม้	81,959.0	99.58	2. ความร้อนที่ใช้หลอมเหล็ก	14,700	17.51
			3. ความร้อนผ่านผนัง	25,984.75	31.40
			4. ความร้อนสูญเสียจากก๊าซ	26,233.16	32.31
			5. ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ	15,041.14	18.32
รวมทั้งหมด	81,959.0	99.58	รวมทั้งหมด	81,595.05	99.54

ดังนั้นจะมีประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า η เฉลี่ยโดยประมาณ 99.56 %