วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

บทความวิจัย

ผลของการควบคุมอัตราการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพของเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ไพโรจน์ นะเที่ยง*

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Pairote.n@gmail.com

วันที่รับบทความ: 16 พฤษภาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 17 พฤศจิกายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 20 พฤศจิกายน 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 11 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถลุงและลดการใช้เชื้อเพลิง ทำการทดลองโดยการควบคุมตัวแปร 2 ปัจจัย ได้แก่ (1) ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ส่งอากาศ ในช่วง 10 ถึง 50 เฮิรตซ์ และ (2) การปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ 2 สถานะ ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลพบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อความเร็วลมที่รูลมของชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ผลจากการนำไปประยุกต์ใช้ในการถลุงจริง พบว่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในแต่ละช่วงมีความแตกต่างกัน โดยในช่วงอุ่นเตาถลุงควรกำหนดค่าความถี่ 40 เฮิรตซ์ โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ *3* และปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องปิดระดับ 0 ส่วนในช่วงการถลุงเมื่อระดับอุณหภูมิภายในชั้นเตาปฏิกรณ์ของเตาถลุงคงที่ 1,200 องศาเซลเซียส ควรกำหนดค่าความถี่ 20 เฮิรตซ์ โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 1 เพื่อนำอากาศที่มีปริมาณออกซิเจนหนาแน่นผสมกับอากาศอุ่นที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศซึ่งมีปริมาณออกซิเจนเบาบางกว่า และให้ปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องเปิดระดับ 3 ภายใต้สภาวะการควบคุมตัวแปรนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ทำให้กระบวนการรีดักชั่นมีประสิทธิภาพมากขึ้น และให้ผลผลิตเหล็กอ่อนได้เฉลี่ย 25.55% และลดอัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงจาก 3:1 ส่วนเพียงเหลือ 2:1 ส่วน ได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: เตาถลุงแร่เหล็ก, การควบคุมอัตราการไหลของอากาศ, อุปกรณ์อุ่นอากาศ, ประสิทธิภาพการถลุง

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

Effect of Air Flow Rate Control on the Performance of a Direct Reduction Ironmaking Furnace with an Air Preheater

Pairote Nathiang*

Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: Pairote.n@gmail.com

Received: 16 May 2025; Revised: 17 November 2025; Accepted: 20 November 2025
Online Published: 11 December 2025

Abstract: This research investigated the effects of regulating airflow rates into the reactor chamber of a direct-fired iron ore blast furnace equipped with an air preheater. The primary objectives were to enhance smelting efficiency while concurrently reducing fuel consumption. The experiments were centered on two critical variables: (1) the frequency of electric current supplied to the air supply device, which varied between 10 and 50 Hz, (2) the air delivery pattern, which was adjusted through two settings of the butterfly valve. The analysis of variance conducted on the collected data indicated that both factors significantly impacted the air velocity at the air holes of the blast furnace reactor layer ($p < 0.001$). The findings derived from practical smelting applications demonstrated that optimal operating conditions varied across different phases. During the furnace preheating phase, a frequency of 40 Hz with the standard temperature air inlet throttle at level 3 and the air preheater throttle closed at level 0 yielded the best results. In the smelting phase at 1,200 °C, an optimal frequency of 20 Hz was achieved by setting the standard temperature air inlet throttle to level 1 and the air preheater throttle to level 3, ensuring proper air mixing with a higher oxygen concentration. By effectively managing these variables, the research demonstrated significant improvements in combustion efficiency, thereby enhancing the reduction process. This approach resulted in an average yield of 25.55% mild steel and a notable reduction in the fuel consumption ratio from 3:1 to 2:1.

Keywords: Ironmaking furnace, Air flow rate control, Air preheater, Smelting efficiency

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

1. บทนำ

แร่เหล็ก (Iron) เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงสูง มีความคงทนตลอดอายุการใช้งานและมีรูปทรงมาตรฐานที่ไม่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อมีแรงกระทำ [1] สำหรับแหล่งแร่เหล็กโบราณที่สำคัญของประเทศไทย อาทิ แหล่งแร่เหล็กน้ำพี้ จังหวัดอุตรดิตถ์ แหล่งแร่เหล็กเมืองลี้ จังหวัดลำพูน และแหล่งแร่เหล็กเมืองลอง จังหวัดแพร่ โดยสินแร่เหล็กที่พบจะจัดอยู่ในกลุ่มของแร่ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และแร่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) [2] ปัจจุบันการนำแร่เหล็กมาใช้ประโยชน์จะใช้ในรูปแบบเพื่อการอนุรักษ์สำหรับการผลิตสินค้าในระดับชุมชนเป็นหลัก จึงทำให้การถลุงสินแร่เหล็กของอุตสาหกรรมเหล็กระดับชุมชนใช้การถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาตรง (Direct Reduced Iron : DRI) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนการผลิตต่ำ [3] โดยใช้หลักการลดออกไซด์ของแร่เหล็กด้วยถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชั่น (Reduction) ทำให้แร่เหล็กในสภาพเหล็กออกไซด์กลายเป็นเหล็กอ่อนบริสุทธิ์ (Wrought Iron) มีคาร์บอนผสมอยู่น้อยกว่า 0.5% [4] ซึ่งต้องทำให้อุณหภูมิภายในห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุงอยู่ในช่วง 1,200-1,300 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมละลายสารมลทินให้เป็นตะกรันเหลว (Liquid Slag) แยกตัวออกมา [5] การเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องปฏิกรณ์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ส่งอากาศเพื่อนำอากาศที่มีออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่อยู่ภายในเตาถลุง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง พบว่างานวิจัยของอนุวัฒน์ จุติลาภถาวร [6] ได้ออกแบบเตาถลุงตามหลักการเตาแบบทาทาระของญี่ปุ่น สามารถทำอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ของเตาถลุงในช่วง 1,200-1,300 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการไหลของอากาศในช่วงอุ่นเตาถลุงในระดับ 850 l/min และลดระดับในช่วงของการถลุงที่ระดับ 650 l/min พบว่าการถลุงแร่เหล็ก 15 กิโลกรัม ได้เหล็กหลังการถลุง 3.16 กิโลกรัม คิดเป็น 21.11% ใช้เวลาในการถลุง 2.30 ชั่วโมง ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ 51.67 กิโลกรัม ส่วนงานวิจัยของพิทักษ์ คล้ายชม และคณะฯ [7] ที่ใช้ระบบการควบคุมอัตโนมัติเพื่อการควบคุมปริมาณอัตราการไหลของอากาศด้วยความเร็วคงที่ในระดับ 650 l/min ทั้งในช่วงการอุ่นเตาและในช่วงของการถลุง พบว่าการถลุงแร่เหล็ก 5 กิโลกรัม ใช้เวลาในการถลุง 1.19 ชั่วโมง ได้เหล็กหลังการถลุง 1.62 กิโลกรัม คิดเป็น 32.33% ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ 53.67 กิโลกรัม และงานวิจัยของอดุลย์ พุกอินทร์ [8] ที่ได้ทำการทดลองถลุงแร่แบบเผาตรงด้วยเตาถลุงที่ปั้นด้วยดินผสมแกลบ ทรายและดินเหนียว ด้วยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ในแต่ละช่วงเวลาของการถลุง โดยช่วงการอุ่นเตาถลุงกำหนดอัตราการไหลของอากาศในระดับ 3.7 m/s ส่วนในช่วงของการถลุงลดอัตราการไหลของอากาศลงที่ระดับ 2.6 m/s และในช่วงของการไล่ตะกรันเหลว (Liquid Slag) ออกจากเตาถลุงได้ลดอัตราการไหลของอากาศในระดับต่ำสุดที่ 1.8 m/s พบว่าการถลุงแร่เหล็ก 20 กิโลกรัม จะได้เนื้อเหล็กหลังการถลุง 2.3 กิโลกรัม คิดเป็น 11.5% โดยใช้เวลาในการถลุง 2.56 ชั่วโมง ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ 58.50 กิโลกรัม ผลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดต่างส่งผล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

ให้อัตราส่วนของเนื้อเหล็กหลังการถลุงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเตาถลุงแบบดั้งเดิมที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเหล็กระดับชุมชนใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่ยังคงใช้ปริมาณถ่านเชื้อเพลิงในการถลุงตามสัดส่วนปกติ คือ ใช้เชื้อเพลิง 3 ส่วน ต่อการถลุงแร่เหล็ก 1 ส่วน [9] จึงไม่สามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นต้นทุนสำคัญในการผลิตลงได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำวิธีวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของเวลา อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำหนักของเชื้อเพลิงต่อปริมาณเนื้อเหล็กหลังการถลุง ซึ่งทำให้สามารถระบุปัจจัยสำคัญและปรับปรุงประสิทธิภาพของการรีดักชั่น (Reduction) ให้สูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ [10]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมายังคงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมปัจจัยเดี่ยว หรือยังไม่ได้พิจารณาการทำงานร่วมกันระหว่างการควบคุมอัตราการไหลของอากาศอย่างละเอียด เช่น การปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังของอุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) และการปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศ ซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) ที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อุ่นอากาศอย่างเป็นระบบ ในทางทฤษฎีการเผาไหม้ (Combustion Theory) ปัจจัยทั้งสองนี้ถือเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมกระบวนการเผาไหม้โดยตรง โดยค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Frequency) จะเป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของอุปกรณ์ส่งอากาศ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศ (Air Volume) ที่เข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง ปัจจัยนี้จึงส่งผลต่ออัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของปฏิกิริยารีดักชั่น ส่วนรูปแบบการส่งอากาศซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของอากาศ (Inlet Air Temperature) ที่ป้อนเข้าสู่เตาถลุง ซึ่งการใช้อากาศร้อนจากอุปกรณ์อุ่นอากาศถือเป็นหัวใจสำคัญของการนำพลังงานความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและลดการใช้เชื้อเพลิงโดยตรง ด้วยเหตุนี้การทำความเข้าใจอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาตรง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลของการควบคุมอุปกรณ์ส่งอากาศที่สามารถกำหนดค่าอัตราการนำอากาศเข้าไปสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง และนำผลการศึกษามากำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศกับการใช้งานเตาถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาทางตรง (Direct Iron Smelting Process) ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศไว้ที่ปลายปล่องเตาถลุงเพื่อนำความร้อนทิ้ง (Waste Heat) กลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศอุณหภูมิปกติให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง [11] โดยมุ่งหวังให้เกิดการลดสัดส่วนของการใช้เชื้อเพลิงในการถลุงตามอัตราส่วนปกติที่ใช้กันโดยทั่วไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

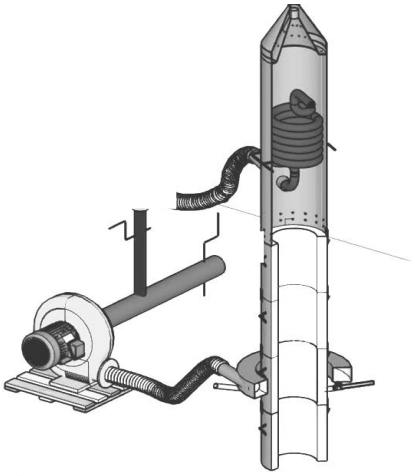
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาผลของการควบคุมอุปกรณ์ส่งอากาศที่จะนำไปใช้ร่วมกับเตาถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาทางตรง (Direct Iron Smelting Process) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

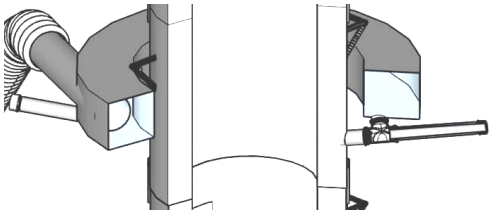
2.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 เตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง

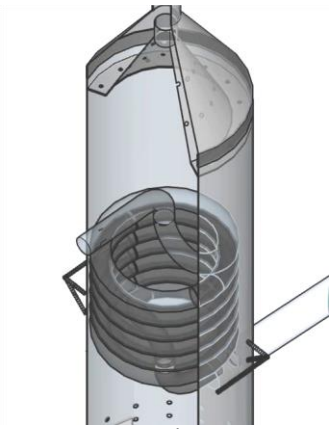
โครงสร้างของเตาถลุงแบ่งเป็นห้าชั้นสามารถถอดประกอบได้ ดังรูปที่ 1 ลักษณะเตาถลุงเป็นรูปทรงกระบอกขึ้นรูปจากเหล็กแผ่นรีดร้อน หนา 2 มิลลิเมตร เปลือกเตาด้านในกรุด้วยซีเมนต์ ทนไฟ หนา 5 เซนติเมตร สามารถทนอุณหภูมิสูงสุด 1,500 องศาเซลเซียส ชั้นที่หนึ่งเป็นฐานสำหรับรองรับตัวเตาถลุงและเป็นช่องทางไหลของตะกรันเหลว (Slag) ชั้นที่สองเป็นชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร เจาะรูลมเข้าที่ผนังเตาถลุงให้สูงจากฐานเตาด้านล่างขึ้นมาถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูลม 280 มิลลิเมตร ในทิศทางตรงกันข้ามกัน โดยรอบตัวเตาถลุงจำนวน 4 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร โดยมีส่วนของห้องลม (Wind Belt) ที่เตาถลุงชั้นที่สองสำหรับใช้ส่งลมเข้าไปยังส่วนด้านในของเตาถลุง ทำจากเหล็กแผ่นมีความหนา 7 มิลลิเมตร ม้วนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกสวมรัดที่ด้านข้างของผนังเตาชั้นที่สอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 533 มิลลิเมตร สูง 152 มิลลิเมตร โดยจะอยู่สูงจากขอบด้านล่างสุดของฐานเตาถลุงชั้นที่สองขึ้นมา 288 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 ส่วนชั้นที่สามจะเป็นชั้นของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็ก ส่วนชั้นที่สี่จะเป็นชั้นสำหรับบรรจุถ่านเชื้อเพลิงเข้าสู่ตัวเตาถลุง และชั้นที่ห้าเป็นส่วนของชุดแลกเปลี่ยนความร้อน(Heat Exchanger) แบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ (Air Preheater) เป็นท่อขดแบบเกลียว (Coiled Tubes) ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร เป็นอุปกรณ์อุ่นอากาศที่มีขนาดเล็กและใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อย [12] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง



รูปที่ 2 ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง (ชั้นที่ 2)



รูปที่ 3 อุปกรณ์อุ่นอากาศที่อยู่ภายในชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

2.1.2 ชุดควบคุมอากาศไหลเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ผู้วิจัยได้ออกแบบช่องสำหรับดึงอากาศเข้าเตาถลุงเป็นสองทาง คือ ช่องที่ 1 เป็นช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10เซนติเมตร ส่วนช่องที่ 2 เป็นช่องทางของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 โดยช่องสำหรับดึงอากาศไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงจะติดตั้งแผ่นวาล์ว ปีกผีเสื้อไว้ที่ด้านในของท่อส่งอากาศเข้าทั้งสอง เพื่อใช้ควบคุม/บังคับอากาศด้วยการปรับระดับองศาการเอียงของแผ่นวาล์วปีกผีเสื้อออกเป็น 3 ระดับ ดังรูปที่ 5 โดยใช้วิธีการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) เพื่อควบคุมมอเตอร์ของอุปกรณ์ ส่งอากาศขนาด 2 H_P 2 P 50 H_z ที่ค่าความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัดสูงสุด 2,950 rpm ความเร็วลมสูงสุด 26 cmm / 923 cfm และปริมาณลมต่อหน่วยพื้นที่ 225 mm.w.g.

2.2 วิธีการทดลองการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองเอาไว้ 2 ปัจจัยหลัก ประกอบด้วย

ปัจจัยที่ 1. ระดับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า (H_Z) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังของอุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) โดยใช้เครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ซึ่งค่าความถี่นี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบของใบพัด โดยได้กำหนดระดับการทดลองไว้ 9 ระดับ ตั้งแต่ระดับต่ำสุดถึงสูงสุดตามย่านความถี่ของเครื่อง (Inverter) คือ ระดับ10 ถึง 50 H_Z ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ระดับความเร็วลมครอบคลุมการทำงานจริงของเตาถลุงทั้งในช่วงอุ่นเตา ช่วงถลุง และในช่วงของการเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag)

รูปที่ 4 ช่องทางดึงอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุงชั้นที่ 2

(1) (2)

รูปที่ 5 (1) การปรับองศาวาล์วปีกผีเสื้อ 3 ระดับ (2) แผ่นวาล์วปีกผีเสื้อภายในช่องอากาศเข้า

ปัจจัยที่ 2. การปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) โดยกำหนดไว้ 2 สถานะที่แตกต่างกัน ได้แก่ สถานะที่ 1.เป็นการเปิดวาล์วเฉพาะช่องอากาศเข้าที่อุณหภูมิปกติ และสถานะที่ 2.เป็นการเปิดวาล์วเฉพาะช่องอากาศร้อนที่ส่งมาจากอุปกรณ์ อุ่นอากาศ ทั้งนี้ในแต่ละสภาวะการทดลองจะดำเนินการซ้ำจำนวน 3 ครั้ง และทำการวัดอัตราการไหลของอากาศเข้าชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง ดังรูปที่ 6

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

จากนั้นนำข้อมูลที่รวบรวมได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 เพื่อทดสอบความแปรปรวนและวิเคราะห์ค่าระดับความเร็วลมที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์เตาถลุง

2.3 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง

ผู้วิจัยได้นำผลจากการทดลองในขั้นตอนที่ 2.2 มาใช้เพื่อกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง ดังรูปที่ 7 โดยทำการถลุงแร่เหล็กชนิดฮีมาไทต์ (Hematite) Fe_2O_3 จากแหล่งแร่บ้านน้ำพี้ ตำบลน้ำพี้ จังหวัดอุตรดิตถ์ ใช้วิธีการเตรียมแร่เหล็กด้วยการบดให้เป็นเม็ดขนาดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร แล้วนำมาแบ่งใส่ถุงพลาสติกถุงๆละ 1.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ถุง รวม 15 กิโลกรัม ใช้ถ่านไม้จากต้นยูคาลิตัสที่มีขนาดเฉลี่ย 1-2 ลูกบาศก์นิ้ว อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาถลุงเฉลี่ย 15 นาที / การใช้เชื้อเพลิง 1.5 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 1 ช่วงการอ่นุเตาถลุง/ช่วงการสะสมความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศ ใช้ระยะเวลารวม 15 นาที เริ่มจากการใส่ถ่านชาร์ต (เชื้อเพลิงถ่านไม้ที่ติดไฟ) ลงไปในเตาถลุงให้อยู่ในระดับเท่ากับรูลมของเตาปฏิกรณ์เตาถลุงชั้นที่ 2 จากนั้นเติมถ่านเชื้อเพลิงเข้าไปจนเต็มเตาถลุงชั้นที่ 4 (ปริมาณ 20 กิโลกรัม) แล้วทำการอัดอากาศเข้าภายในเตาถลุงด้วยการปรับระดับเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่ระดับ 40 H_z (ค่าระดับความเร็วลม 6.55 m/s) โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้า อุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 3 และปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องปิดระดับ 0

รูปที่ 6 การวัดอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงด้วยเครื่อง (Air Flow Anemometer) รุ่น GM8902

รูปที่ 7 การประกอบ/ติดตั้งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

ขั้นตอนที่ 2 ช่วงของการถลุง เมื่อระดับ อุณหภูมิภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงคงที่ 1,200 องศาเซลเซียส จึงใส่แร่เหล็กครั้งที่ 1 (น้ำหนัก 3 กิโลกรัม) พร้อมกับเติมถ่านเชื้อเพลิงปริมาณ 1.5 กิโลกรัม และทำการปรับระดับความเร็วลมที่เครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่ระดับ 20 H_z (ระดับค่าความเร็วลม 2.36 m/s) ซึ่งเป็นระดับที่พบว่าเหมาะสำหรับการทำปฏิกิริยารีดักชั่นตามผลการทดลองของอดุลย์ พุกอินทร์ [8] โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 1 เพื่อนำอากาศที่มีปริมาณออกซิเจนหนาแน่นผสมกับอากาศอุ่นที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนเบาบางกว่า เพื่อไม่ให้ถ่านภายในเตาถลุงดับ [13] และให้ปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องเปิดระดับ 3 โดยอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านจากอุปกรณ์อุ่นอากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ย 110 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 8 และเมื่อครบเวลา 15 นาที จึงใส่แร่เหล็กครั้งที่ 2 (น้ำหนัก 3 กิโลกรัม) พร้อมกับเติมถ่านเชื้อเพลิงเข้าไปในเตาถลุงปริมาณ 1.5 กิโลกรัม แล้วทำเช่นเดิมเพื่อถลุงแร่เหล็กจนครบจำนวน โดยเว้นระยะเวลาห่างกัน 15 นาที

ขั้นตอนที่ 3 ช่วงการเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag) ดำเนินการหลังจากใส่แร่เหล็กครั้งที่ 5 ลงไปในเตาถลุง 15 นาที จากนั้นเติมถ่านเชื้อเพลิงต่อไปจนครบเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 15 นาที/เชื้อเพลิง 1.5 กิโลกรัม พร้อมกับเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag) ออกจากเตาถลุงทุกๆ 15 นาที โดยให้ทำการปรับระดับเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) และปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าในระดับเดียวกับขั้นตอนที่ 2

รูปที่ 8 การวัดระดับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านมากจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ขั้นตอนที่ 4 ช่วงปิดเตาถลุง หยุดเติมถ่านเชื้อเพลิงหลังจากการเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag) ครั้งสุดท้าย แล้วปล่อยให้เชื้อเพลิงที่เหลือภายในเตาถลุงเผาไหม้จนหมด โดยทำการปรับระดับปริมาณอากาศไหลเข้าภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงด้วยการปรับระดับเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่ระดับ 20 H_z (ค่าระดับความเร็วลม 2.36 m/s) โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 3 และให้ปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องปิดระดับ 0 จากนั้น เมื่อเตาถลุงเย็นตัวลงจึงทำการยกเพื่อแยกชั้นเตาถลุงออกจากกัน เพื่อนำก้อนแร่เหล็กที่ได้ออกจากชั้นปฏิกรณ์เตาถลุง ดังรูปที่ 9

(1) (2)

รูปที่ 9 (1) ตะกรัน (Slag) (2) เหล็กอ่อนบริสุทธิ์ (Wrought Iron) ที่ได้หลังการถลุง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการทดลองการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อช่องอากาศปกติสถานะเปิดระดับ 3 ส่วนช่องอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศสถานะปิดระดับ 0 ดังตารางที่ 1

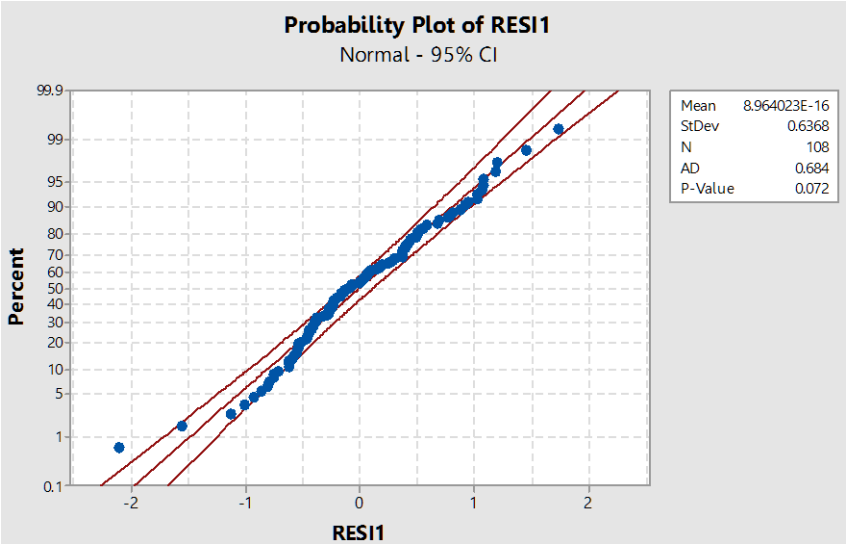
จากตารางที่ 1 ผลจากการตรวจสอบค่าการกระจายตัวแบบปกติเพื่อหาส่วนตกค้างของ ข้อมูลของค่าระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (ชั้นที่2) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติตามแนวเส้นตรง ซึ่งเป็นการแสดงว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น และค่า P-Value ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังรูปที่ 10

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยด้านความถี่ของกระแสไฟฟ้า (H_z) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของอุปกรณ์ส่งอากาศ ปรากฏดังตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยความถี่มีอิทธิพลต่อค่าความเร็วลมที่ไหลเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยค่า F-Value เท่ากับ 102.36 และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมาก แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของระดับความถี่ในช่วงที่ทำการศึกษา (10–50 H_z) ส่งผลต่อความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในเตาถลุงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัด (Blower) และก่อให้เกิดความแตกต่างของอัตราการไหลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญเชิงกลไก

ตารางที่ 1 ค่าระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ความถี่กระแสไฟฟ้า (H_z)	ความเร็วรอบแกนหมุนของ (Blower) (rpm)	ค่าระดับความเร็วลมของรูลมภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (m/s)			
		รูลมที่ 1 (hold)	รูลมที่ 2 (hold)	รูลมที่ 3 (hold)	รูลมที่ 4 (hold)
10	600	1.750	1.770	1.601	1.675
15	900	2.450	2.138	2.196	2.269
20	1,200	3.305	3.372	3.476	4.120
25	1,500	4.485	4.117	4.588	4.465
30	1,800	5.832	4.085	5.401	4.966
35	2,100	5.440	4.754	6.719	5.550
40	2,400	7.226	5.265	7.463	6.266
45	2,700	8.699	6.006	8.571	8.205
50	2,900	8.289	7.485	8.936	8.968

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012



รูปที่ 10 แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติส่วนตกค้างของข้อมูล (จากตารางที่ 1)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าระดับความเร็วลม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hz	8	521.88	65.2355	102.36	0.000
Error	99	63.09	0.6373		
Total	107	584.98			

การวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_Z) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังของ (Blower) จากเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัดของ (Blower) เมื่อทำการแบ่งกลุ่มโดยใช้วิธีการของ Fisher LSD Method ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าที่ระดับค่าความถี่ 50 H_z และ 45 H_z มีค่าเฉลี่ยของระดับค่าความเร็วลมสูงที่สุด 8.42008 m/s และ 7.87050 m/s ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม A ซึ่งบ่งบอกว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_Z) อื่นๆ ระดับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า 40 H_z มีค่าเฉลี่ยความเร็วลมลดลงเล็กน้อย 6.55525 m/s อยู่ในกลุ่ม B ซึ่งต่างจากระดับ 50 H_z และ 45 H_z อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงมีค่าความเร็วลมสูง และที่ค่าระดับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_Z) ที่ต่ำลง เช่น 40 H_z, 35 H_z ไปจนถึง 10 H_z มีค่าเฉลี่ยของความเร็วลมลดลงตามลำดับ ซึ่งมีการแยกกลุ่มที่ชัดเจนระหว่างในแต่ละระดับของค่าความถี่ (H_Z) โดยผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อค่าความถี่ (H_Z) มีค่าสูงขึ้นจะมีผลทำให้ระดับค่าความเร็วลมสูงขึ้นตามไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 3

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

ตารางที่ 3 การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่ของค่ากระแสไฟฟ้า (H_Z) โดยใช้วิธีการของ Fisher LSD Method

ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_Z)	N	Mean	Grouping
50	12	8.42008	A
45	12	7.87050	A
40	12	6.55525	B
35	12	5.61608	C
30	12	5.07117	C
25	12	4.41408	D
20	12	3.56867	E
15	12	2.26367	F
10	12	1.69908	F

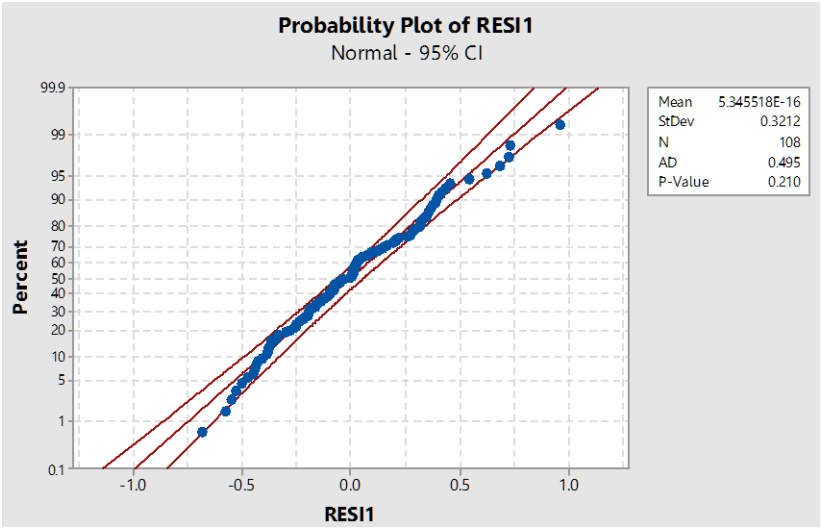
ผลการทดลองการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อช่องอากาศปกติสถานะปิดระดับ 0 ส่วนช่องอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศสถานะเปิดระดับ 3 ดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 ผลจากการตรวจสอบค่าการกระจายตัวแบบปกติเพื่อหาส่วนตกค้างของข้อมูลค่าของค่าระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (ชั้นที่2) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติตามแนวเส้นตรง ซึ่งเป็นการแสดงว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองนี้ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น และค่า P-Value ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังรูปที่ 11

ตารางที่ 4 ค่าระดับความเร็วลมไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_Z)	ความเร็วรอบแกนหมุนของ (Blower) (rpm)	ค่าระดับความเร็วลมของรูลมภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (m/s)			
		รูลมที่ 1 (hold)	รูลมที่ 2 (hold)	รูลมที่ 3 (hold)	รูลมที่ 4 (hold)
10	600	1.388	1.212	1.676	1.293
15	900	1.976	1.659	2.106	1.742
20	1,200	2.582	2.003	2.599	2.255
25	1,500	3.085	2.656	3.305	3.268
30	1,800	3.780	2.474	4.278	3.506
35	2,100	4.429	3.309	4.821	4.574
40	2,400	4.878	4.363	5.695	5.703
45	2,700	6.001	5.261	6.295	6.551
50	2,900	7.378	6.251	8.205	7.611

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012



รูปที่ 11 แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติส่วนตกค้างของข้อมูล (จากตารางที่ 4)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของทั้งสองปัจจัย ได้แก่ ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (H_Z) และสถานะการเปิด–ปิดของวาล์วปีกผีเสื้อ ต่อค่าความ เร็วลม (m/s) พบว่า ปัจจัยความถี่ของกระแสไฟฟ้ามีค่า F-Value เท่ากับ 161.31 และค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าความถี่ของกระแสไฟฟ้ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง นอกจากนี้สถานะการเปิด–ปิดของวาล์วปีกผีเสื้อเมื่อช่องอากาศปกติที่ปิดระดับ 0 และช่องอากาศจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่เปิดระดับ 3 ยังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเร็วลมเช่นเดียวกัน เนื่องจากค่า P-Value ต่ำกว่า 0.05 ตามผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5

จากการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่ของค่ากระแสไฟฟ้า (H_Z) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังจากเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่สัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัด (Blower) เมื่อทำการแบ่งกลุ่มโดยใช้วิธีการของ Fisher LSD Method

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าระดับความเร็วลม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hz	8	376.785	47.0982	161.31	0.000
Error	99	28.90	0.2920		
Total	107	405.690			

ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าที่ระดับค่าความถี่50 H_z มีค่าเฉลี่ยของระดับค่าความเร็วลมสูงที่สุด 7.36142 m/s และอยู่ในกลุ่ม A ซึ่งบ่งบอกว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่า H_z อื่นๆ ส่วนระดับค่าความถี่ H_z ที่ต่ำลง เช่น 45 H_z, 40 H_z, 35 H_z ไปจนถึง 10 H_z มีค่าเฉลี่ยของระดับค่าความเร็วลมที่ลดลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ (H_z) มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าระดับความเร็วลม โดยผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อค่าความถี่ (H_z) มีค่าสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความเร็วลมสูงขึ้นตามไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 6

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

ตารางที่ 6 การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่ของค่ากระแสไฟฟ้า (H_Z) โดยใช้วิธีการของ Fisher LSD Method

ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_Z)	N	Mean	Grouping
50	12	7.36142	A
45	12	6.02708	B
40	12	5.16025	C
35	12	4.28375	D
30	12	3.50983	E
25	12	3.07875	E
20	12	2.36000	F
15	12	1.98367	F
10	12	1.39258	G

3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง

จากการที่ผู้วิจัยได้ทำการถลุงแร่เหล็กตามกรรมวิธีการในขั้นตอนที่ 2.3 โดยดำเนินการทดลองซ้ำ (Replication) ทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งเป็นจำนวนที่พิจารณาจากข้อจำกัดด้านต้นทุนการดำเนินงานและระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้งที่ยาวนาน ผลการทดลองพบว่าภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมทำให้ปริมาณเหล็กที่ได้หลังการถลุงมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยเฉลี่ยแล้วสามารถผลิตเนื้อเหล็กได้ 3.83 กิโลกรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหล็กเฉลี่ย 25.55% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) สำหรับน้ำหนักเหล็กเพียง 0.25 กิโลกรัม ซึ่งค่าที่ต่ำนี้บ่งชี้ว่ากระบวนการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงมีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพสูง ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการถลุงแร่เหล็กน้ำหนัก 15 กิโลกรัม

ครั้งที่	เวลาถลุง (ชม.)	เวลาทั้งหมด (ชม.)	แร่ (กก.)	ถ่าน (กก.)	เหล็ก (กก.)	% เหล็ก
1	1.15	2.45	15	35	3.80	25.33
2	1.15	2.45	15	35	3.60	24.00
3	1.15	2.45	15	35	4.10	27.33
ค่าเฉลี่ย (Mean)					3.83	25.55
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)					0.25	1.68

จากการทดลองนี้พบว่าการควบคุมอัตราการไหลของอากาศร่วมกับการใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ ทำให้ได้ผลผลิตเหล็กเฉลี่ย 25.55% ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าให้ผลผลิตที่สูงกว่างานวิจัยของ อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร [6] และอดุลย์ พุกอินทร์ [8] ที่ได้ผลผลิต 21.11% และ 11.5% ตามลำดับ โดยอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิของอากาศร้อนจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงถึง 110 องศาเซลเซียส ในช่วงของการถลุงน่าจะมีส่วนช่วยให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Karamarkovic และคณะ [14] และส่งผลดีต่อกระบวนการรีดักชั่นภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง อย่างไรก็ตามผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังคงต่ำกว่างานวิจัยของพิทักษ์ คล้ายชม และคณะฯ [7] ซึ่งใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติและได้ผลผลิตสูงถึง 32.33% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้มีความเร็วคงที่ด้วยระบบอัตโนมัติยังคงเป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

4. บทสรุป

การศึกษาผลของการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ เพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ด้วยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศโดยการค่าปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของอุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) ในช่วง 10 ถึง 50 เฮิรตซ์ จำนวน 9 ระดับ ร่วมกับการปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) โดยกำหนดไว้ 2 สถานะที่แตกต่างกัน พบว่าทั้งความถี่ของกระแสไฟฟ้าและการปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อระดับความเร็วลมที่เข้าสู่ภายในห้องปฏิกรณ์ ($p < 0.001$) โดยค่า F-value ที่สูงสำหรับปัจจัยความถี่ชี้ให้เห็นว่าการปรับความถี่เป็นกลไกหลักในการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้ผลการแบ่งกลุ่มค่าเฉลี่ยความเร็วลมด้วยวิธี Fisher LSD Method ยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนของระดับความเร็วลมที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของมอเตอร์อุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กด้วยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศมาใช้ในการกำหนดสภาวะการทำงานของเตาถลุง โดยทำการถลุงแร่ฮีมาไทต์ จำนวน 15 กิโลกรัม ร่วมกับเชื้อเพลิงถ่านไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ 35 กิโลกรัม ภายใต้ระยะเวลาการถลุงเฉลี่ย 2.45 ชั่วโมง ผลการทดลองถลุงซ้ำ 3 ครั้ง พบว่าสามารถผลิตเหล็กอ่อน (Wrought Iron) ได้เฉลี่ย 3.83 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละของเนื้อเหล็กหลังการถลุง 25.55% ผลจากการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ของระบบควบคุมอัตราการไหลของอากาศเมื่อนำไปใช้ร่วมกับเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศไว้ที่ปลายปล่องเตาถลุง ซึ่งการที่อากาศป้อนเข้าสู่เตาถลุงได้รับการอุ่นเบื้องต้นจากความร้อนทิ้งมีผลทำให้กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการรีดักชั่นออกไซด์ของแร่เหล็ก และเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของเหล็กที่ได้หลังการถลุง และยังมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ส่งผลทำให้อัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงลดลงเหลืองเพียง 2 ส่วน ซึ่งต่ำกว่าการถลุงแร่เหล็กด้วยความร้อนโดยทั่วไปที่ใช้เชื้อเพลิงถึง 3 ส่วนต่อการถลุงแร่เหล็กเพียง 1 ส่วน นอกเหนือจากนัยสำคัญทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดจากการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนแล้ว ผลการวิจัยนี้ยังมีคุณค่าในมิติของสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างยิ่ง การที่สามารถลดอัตราการใช้ถ่านเชื้อเพลิงในการผลิตลงได้นั้นไม่เพียงแต่ช่วยลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติ แต่ยังส่งผลโดยตรงต่อการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมลภาวะทางอากาศ ขณะเดียวกันการนำเทคโนโลยีอุปกรณ์อุ่นอากาศมาใช้เพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ถือเป็นหลักการสำคัญของการประหยัดพลังงานและเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่ช่วยให้กระบวนการถลุงเหล็กแบบดั้งเดิมของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเหล็กระดับชุมชนเป็นอุตสาหกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถพัฒนาต่อไปได้อย่างยั่งยืน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Phuk-in, Comparison of alloying elements between nam phi iron ore and iron ore of in uttardit province, Engineering Journal of Research and Development, 2020, 31(2), 191-198.

[2] P. Chaiyaros, Archaeometallurgy of Muang Long: The significance of iron in the history and people of Lanna, Master Degree Thesis, Silpakorn University, Thailand, 2022.

[3] X. Jiang, L. Wang, and F. M. Shen, Shaft furnace direct reduction technology, Advanced Materials Research, 2013, 805-806, 654-659.

[4] S. Yang-Sub and J. Sung-Mo, Conditions for minimizing direct reduction in smelting reduction iron making, International Journal of Engineering Science Technology, 2018, 58(2), 274–281.

[5] J. In-Hyeon, K. Hyun-Soo and S. Yasushi, Trickle flow behaviors of liquid Iron and molten slag in the lower part of blast furnace, International Journal of Engineering Science Technology, 2013, 53(12), 2090–2098.

[6] A. Jutilapthaworn, Constructing of Kiln and nam phi steel smelting, Research Report, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Thailand, 2009.

[7] P. Khlaichom, A. Phromfaiy and P. Nathiang, Efficiency improvement of cupola namphi iron ore furnace by using automatic control system, UTK Research Journal, 2018, 12(2), 49–59.

[8] A. Phuk-in, Thai local nam phi iron ore and furnace smelting combined with sustained ancient method, Engineering Journal of Research and Development, 2018, 29(4), 77–87.

[9] P. Nathiang, Knowledge based for nam-phi iron furnace, Development Thong Saen Khan District Uttaradit, Journal of Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University, 2019, 1(2), 35–51.

[10] I. Sonmez and K. Sahbudak, Optimization of sponge iron (direct reduced iron) production with Box-Wilson experimental design by using iron pellets and lignite as reductant, Revista de Metalurgia, 2023, 59(2), e241.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.12.012

[11] W. Duangsrisen, Development of air heater using pipe heat exchanger, Research Report, Faculty of Agricultural Technology and Agro Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Thailand, 2009.

[12] A. Donmuang, Heat transfer characteristics of helical oscillating heat pipe, Doctor of Philosophy Degree Thesis, Mahasarakham University, Thailand, 2019.

[13] G. Zhang, Y. Li, D.B. Mohammed and D. Toghraie, Optimization of a high-temperature recuperator equipped with corrugated helical heat exchanger for improvement of thermal-hydraulic performance, Journal of Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 33, 101956.

[14] V. Karamarkovic, M. Marašević, R. Karamarković, and M. Karamarković, Recuperator forwaste heat recovery from rotary kilns, Applied Thermal Engineering Journal, 2013, 54, 470-480.