การเพิ่มประสิทธิภาพเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปลา ด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ

Efficiency Improvement of Cupola Namphi Iron Ore Furnace by Using Automatic Control System

พิทักษ์ คล้ายชม[1*], อภิศักดิ์ พรหมฝาย[1], ไพโรจน์ นะเที่ยง[1]

Pitak Khlaichom[1*], Apisak Phromfaiy[1], Pairote Nathiang[1]

[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ เลขที่ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์

[1]Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, 27 Injaimee Road, Tha It Sub-District, Muang District, Uttaradit Province, Thailand

*Corresponding author. Tel.: +66 5541 6629, Email: pitakkh@hotmail.com

บทคัดย่อ

การถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ยังคงใช้วิธีการแบบโบราณที่สืบทอดกันมา ทำให้ปริมาณและคุณภาพของเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงได้ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปลาด้วยเทคโนโลยีระบบควบคุมอุณหภูมิภายในเตาอัตโนมัติ โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย 1.เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงานประมวลผลควบคุมการทำงานแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติและตั้งค่าการทำงานของระบบ สามารถเลือกโหมดควบคุมด้วยคนและโหมดอัตโนมัติ 2.ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลกับคอมพิวเตอร์โดยรับค่าอุณหภูมิเตาจากเทอร์โมคัปเปิล เพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ใช้ประมวลผล และรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วของเครื่องเป่าลม ผลการวิจัย พบว่า ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ได้แก่ อัตราขยายสัดส่วน (Kp) อัตราขยายปริพันธ์ (Ti) และอัตราขยายอนุพันธ์ (Td) ที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา เท่ากับ 12, 0.6 และ 0.05 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลา ในโหมดอัตโนมัติกับโหมดควบคุมด้วยคน โดยใช้สินแร่เหล็กน้ำพี้ปริมาณ 5 กิโลกรัม พบว่าการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้โหมดอัตโนมัติใช้ปริมาณถ่านไม้เฉลี่ย 53.67 กิโลกรัม น้อยกว่าโหมดควบคุมด้วยคน 13.04% สามารถถลุงเหล็กน้ำพี้ได้ปริมาณ 1.62 กิโลกรัม คิดเป็น 32.33% มีประสิทธิภาพมากกว่าโหมดควบคุมด้วยคน 11.4% จากการทดสอบหาปริมาณธาตุผสมเหล็กน้ำพี้ด้วยชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) พบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ธาตุเหล็ก (Fe) และคาร์บอน (C) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงได้จากทั้ง 2 โหมด ไม่มีความแตกต่าง ทางสถิติ เมื่อทำการเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พบว่าการถลุงเหล็กน้ำพี้โหมดอัตโนมัติมีกำไรเท่ากับ 3,922 บาทต่อรอบการผลิต

Received 27-08-2018
Revised 08-11-2018
Accepted 12-11-2018

มากกว่าโหมดควบคุมด้วยคน 1,791 บาท และวิเคราะห์จุดคุ้มทุน ได้เท่ากับ 29 รอบการผลิต เร็วกว่า 8 รอบการผลิต

คำสำคัญ: ระบบควบคุมเตาอัตโนมัติ เตาคิวโปลา การถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้

Abstract

Namphi iron ore smelting had been conducted with traditional method yielding inadequate quantity and quality of Namphi steel as demanded. Therefore, this research aims to improve efficiency of cupola Namphi iron ore furnace by using automatic temperature control system with 2 functions consisted of : 1) computer displaying operational status, processing, controlling operation, alarming for errors, and setting operatiosn that could be selected as manual or automatic modes; 2) microcontroller transmitting and receiving data from computer, i.e., receiving furnace temperature from Thermo Couple for transmitting to computer for processing and receiving commands from computer for controlling the speed of wind blower. The results revealed that parameters of PID Controller with proportional gain (Kp), integral gain (Ti) and the derivative gain (Td), that were appropriate for controlling furnace were 12, 0.6, and 0.05, respectively. From comparing efficiency of Namphi iron ore smelting by using cupola furnace controlled by manual mode and automatic mode with approximate 5 kilograms of Namphi iron ore, it was found that Namphi iron ore smelting by using cupola furnace controlled by manual mode approximately consumed 53.67 kilograms of charcoal that was lower than that of manual mode by 13.04% and it could smelt around 1.62 kilograms of Namphi steel calculated to be 32.33% therefore it had higher efficiency than that of manual mode by 11.4% from testing to find elements of Namphi steel by using Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS), it was found that percentage of iron (Fe) and carbon (C) mixed in Namphi steel smelted from both modes had no statistical significance. When comparing economic wealthiest, it was found that smelting Namphi steel by using automatic mode provided profit of 3,922 baht per production cycle that was higher than that of manual mode by 1,791 baht whereas its break-even point was calculated to be 29 production cycles that was quicker by 8 production cycles.

Keywords: Automatic Furnace Control System, Cupola Furnace, Namphi Steel Smelting

1. บทนำ

จากรายงานวิเคราะห์แร่เหล็กน้ำพี้ และโลหะเหล็กน้ำพี้ด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ทันสมัยของภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [1] และกรมวิทยาศาสตร์ทหารบกโดยการนำเอาตัวอย่างสินแร่จากบ่อพระแสงและบ่อพระขรรค์ ตำบลน้ำพี้ อำเภอตรอน จังหวัดอุตรดิตถ์ พบว่าแร่เหล็กที่ตำบลน้ำพี้ เป็นแร่เหล็กที่มีคุณภาพสูงของเมืองไทย เหมาะแก่การนำมาทำเป็นดาบที่มีความแข็งแรง คงทน จากการทดสอบ [2] เหล็กน้ำพี้จากแหล่งขุดแร่ในปัจจุบันเมื่อถลุงแล้วมีค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็ก 59.06% เป็นชนิดแร่ฮีมาไทต์ (Hematite) มีสูตรทางเคมี Fe_2O_3 ในการถลุงแร่ของชาวบ้านปัจจุบันใช้วิธีการขุดด้วยจอบ เสียม และขวานเจาะ เมื่อได้แร่มาแล้วชาวบ้านจะนำไปถลุงโดยใช้ภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เป็นองค์ความรู้ของชุมชนเพื่อให้ได้เนื้อเหล็กบริสุทธิ์โดยการนำแร่เหล็กมาทุบให้ได้ขนาดพอเหมาะใส่ในเตาถลุงซึ่งปั้นจากดินเหนียวผสมแกลบใช้ถ่านไม้สักเป็นเชื้อเพลิงแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมให้ความร้อนจนแร่เหล็กละลาย จากนั้นจึงแยกเหล็กบริสุทธิ์ออกจากสิ่งเจือปนอื่น ๆ เมื่อเนื้อเหล็กเย็นแล้วจะนำไปหลอมยุบรวมกันเพื่อให้เป็นก้อนขนาดพอเหมาะกับ การใช้งาน [3]

ภูมิปัญญาการถลุงแร่เหล็กน้ำพี้ของชาวบ้านตำบลน้ำพี้นั้น ตามหลักการทางวิทยาศาสตร์แล้วถือว่าเป็นกระบวนการถลุงสินแร่ แบบวิธีการแบบกระบวนการทางตรง (Direct Iron Smelting Process) โดยขั้นตอนการถลุงแร่เริ่มจากการย่อย และทำความสะอาดสินแร่แล้วนำไปผสมกับถ่านตามสัดส่วนที่เหมาะสมในเตาถลุงคือ แร่เหล็กจำนวน 1 ส่วน ถ่านไม้จำนวน 3 ส่วน จากนั้นจึงใส่เชื้อเพลิง และสูบลมเพื่อเร่งอุณหภูมิภายในเตาถลุงให้สูงประมาณ 1,100–1,200 องศาเซลเซียส โดยในขณะทำการถลุงต้องเติมถ่านไม้เพื่อช่วยให้การเผาไหม้ภายในเตาเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาแร่เหล็กอย่างสมบูรณ์ เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีเหล็ก [4] ซึ่งมีส่วนผสมระหว่างเหล็กกับคาร์บอน และธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในลักษณะธาตุเจือปน เช่น ซิลิกอน แมงกานีส และฟอสฟอรัส เป็นต้น [5, 6] ปัจจุบันชาวบ้านยังใช้องค์ความรู้ที่เกี่ยวกับการถลุงแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยวิธีการแบบโบราณที่สืบทอดกันมา จึงทำให้ทั้งปริมาณเนื้อและคุณภาพของเหล็กน้ำพี้ที่ถลุง มีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการนำไปผลิตสินค้าของวิสาหกิจชุมชน และที่สำคัญการถลุงแบบวิธีการโบราณนั้นยังใช้เวลาในการถลุงที่นานและได้เหล็กที่มีขี้ตะกรันปะปนอยู่มาก จึงทำให้ต้องมีการนำแร่มาถลุงซ้ำ ๆ หลายครั้งกว่าจะสามารถกำจัดขี้ตะกรัน ออกจากเนื้อเหล็กได้ [7] และจากผลการทดสอบ [8] ประสิทธิภาพเตาถลุงแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปลา ได้ปริมาณเหล็กเพียง 19%

จากความสำคัญของภูมิปัญญาท้องถิ่นซึ่งถือว่าเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญของจังหวัดอุตรดิตถ์ในด้านการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ หากมีการนำองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ไปประยุกต์ใช้ในการถลุงแร่ ด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถรักษาอุณหภูมิภายในเตาได้อย่างต่อเนื่องด้วยตนเอง ทำให้แร่เหล็กที่ถลุงได้มีประสิทธิภาพและคุณภาพสูงยิ่งขึ้น ช่วยเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุนในการผลิต ควบคุมและวางแผนการผลิตได้ง่ายขึ้น [9] ทีมผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนาเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้จากภูมิปัญญาท้องถิ่นด้วยเทคโนโลยีระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ที่เหมาะสมกับการผลิตของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเตาถลุง

สินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปลาที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบอัตโนมัติ และควบคุมด้วยคนในด้านปริมาณเนื้อเหล็ก และธาตุผสมของเหล็กที่ถลุงได้

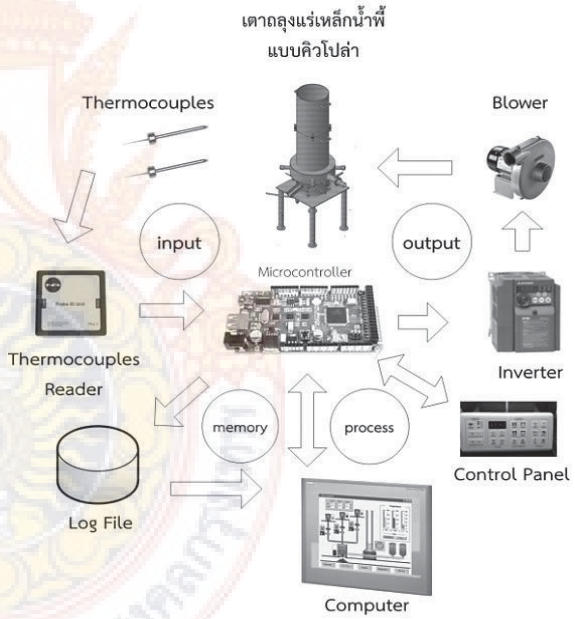
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปล่า

การทำงานของระบบควบคุมอาศัยคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานของระบบโดยรับส่งค่าผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อรับค่าอุณหภูมิภายในเตา และส่งค่าควบคุมเครื่องเป่าลม (Blower) ดังภาพที่ 1 โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย

2.1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่แสดงผลสถานะการทำงาน ประมวลผลควบคุมการทำงาน แจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติและตั้งค่าการทำงานของระบบ โดยโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอุณหภูมิและความดันภายในของเตาคิวโปลามาจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial) ทำการเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ (Set Point) แล้วประมวลผลตัวควบคุม เพื่อส่งค่าไปสั่งงานเครื่องเป่าลมผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทางพอร์ตอนุกรม หากอุณหภูมิภายในเตาต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะเพิ่มความเร็วลมของเครื่องเป่าลมขึ้น ตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิภายในเตาสูงกว่า ค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะลดความเร็วลมของเครื่องเป่าลมลง สามารถเลือกโหมดควบคุมอุณหภูมิได้ 2 โหมด ได้แก่ โหมดควบคุมด้วยคน (Manual) และโหมดอัตโนมัติ (Automatic) และทำการบันทึกข้อมูลการทำงานของระบบควบคุมเตาถลุงเหล็กน้ำพี้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล

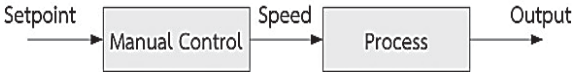
2.1.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่รับส่งค่าข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม โดยรับค่าเซนเซอร์อุณหภูมิเตาถลุงเหล็กน้ำพี้ทั้งภายนอกและภายในเตาจากเทอร์โมคัปเปิล โดยใช้โมดูล Max31856 อ่านค่าอุณหภูมิรับค่าแรงดันเตาได้จากเซนเซอร์แรงดัน และค่าอุณหภูมิของอากาศภายนอกเตา เพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ใช้ประมวลผลและรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วของเครื่องเป่าลม โดยส่งสัญญาณแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ไปยังบอร์ดแปลงสัญญาณเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-10 โวลท์ ส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปควบคุมความเร็วรอบของเครื่องเป่าลม



ภาพที่ 1 ภาพรวมของระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปล่า

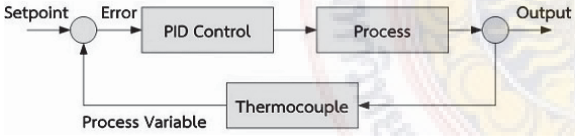
2.1.3 ตัวควบคุมด้วยคน (Manual) เป็นการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ประสบการณ์ของผู้ควบคุมปรับตั้งค่าความเร็วของเครื่องเป่าลม (Speed Blower) เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิภายในเตาที่ต้องการ โดยป้อนค่า

ความเร็วเครื่องเป่าลมในช่วง 0-100% แล้วระบบจะส่งข้อมูลความเร็วไปยังอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วเครื่องเป่าลมโดยตรง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ความเร็วลมคงที่ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวควบคุมของระบบควบคุมด้วยคน

2.1.4 ตัวควบคุมระบบอัตโนมัติ (Automatic) เป็นการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional–Integral–Derivative : PID) โดยเริ่มจากกำหนดค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (Set Point) แล้วระบบจะนำค่าความผิดพลาดระหว่างกำหนดค่าที่ตั้งไว้กับค่าที่วัดได้ (Process Variable) นำมาประมวลผลค่าเอาท์พุตตามค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ อัตราขยายสัดส่วน (Kp) อัตราขยายปริพันธ์ (Ti) และอัตราขยายอนุพันธ์ (Td) จากนั้นระบบจะทำการข้อมูลความเร็ว (Output Blower) ไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วเครื่องเป่าลมวนลูปไปเรื่อย ๆ เพื่อควบคุมให้ค่าอุณหภูมิภายในเตามีค่าเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การควบคุมของตัวควบคุมระบบอัตโนมัติ

2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมแบบ PID จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ Kp, Ti และ Td ที่เหมาะสม ซึ่งผู้วิจัยใช้วิธีหาค่าพารามิเตอร์ตามทฤษฎีของ Ziegler-Nichols โดยกำหนดค่า Ti และ Td เป็นศูนย์ และตั้งค่า Kp น้อย ๆ ทดลองการทำงานของลูปควบคุมในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา ให้เข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้ 1,200 องศาเซลเซียส เพื่อดูการตอบสนองของระบบ ทำการเพิ่มค่า Kp ไปเรื่อย ๆ จนถึงค่าที่ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเกิดการแกว่งขึ้น/ลงต่อเนื่องไปตลอด (Oscillate) ค่า Kp ในขณะนั้นเรียกว่า Critical Gain (Ku) และคาบเวลาในการแกว่ง เรียกว่า Corresponding Period (Pu) ทำการคำนวณหาค่า พารามิเตอร์ Kp, Ti และ Td ตามตารางที่ 1

ทำการทดลองระบบควบคุมโดยใช้ค่า Kp, Ti และ Td ตามที่คำนวณได้เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการปรับค่าด้วยมือและสังเกตการณ์การควบคุมอุณหภูมิภายในเตา จนระบบสามารถเข้าสู่ค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ได้อย่างรวดเร็วแม่นยำ และมีเสถียรภาพเป็นที่น่าพอใจ

ตารางที่ 1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ตามทฤษฎีของ Ziegler-Nichols [10]

Controller	Kp	Ti	Td
P	0.50Ku	-	-
PI	0.4Ku	0.8Pu	-
PID	0.60Ku	0.5Pu	0.125Pu

2.3 ขั้นตอนการทดลองถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปล่า

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสับถ่านไม้ที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงในการถลุง (โดยใช้ถ่านไม้เนื้อแข็ง) ซึ่งถ่านที่ใช้จะมีขนาดประมาณ 1 ลูกบาศก์นิ้ว และนำถ่านไม้ใส่ถุงพลาสติกไว้ถุงละ 1 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมสินแร่เหล็กน้ำพี้ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักแบ่งใส่ถุงพลาสติกถุงละ 1 กิโลกรัม จำนวน 5 ถุงต่อการทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มทำการจุดไฟเตาถลุง เพื่ออุ่นเตาถลุงโดยใช้ถ่านไม้เนื้อแข็งเป็นเชื้อเพลิงใช้เวลาในการอุ่นเตาถลุง 30 นาที

ขั้นตอนที่ 4 เมื่ออุ่นเตาถลุง 30 นาที ถ่านไม้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเริ่มยุบตัวแล้วจึงทำการเติมถ่านไม้ลงไปในเตาถลุง ในกรณีทำการทดลองถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโบลาแบบควบคุมด้วยคนให้เริ่มเป่าอากาศด้วยเครื่องเป่าลม (Blower) ความเร็วลม 650 ลิตร/นาที จากนั้นใช้ประสบการณ์ของผู้ควบคุมปรับความเร็วลม ส่วนกรณีทำการทดลองแบบควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ ให้เริ่มกำหนดอุณหภูมิภายในเตาที่ต้องการเท่ากับ 1,500 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที จึงเริ่มทำการใส่สินแร่เหล็กน้ำพี้ลงไปในเตาถลุงครั้งละ 1 กิโลกรัม และเติมถ่านไม้จนเต็มเตา โดยให้ใส่สินแร่เหล็กน้ำพี้และเติมถ่านไม้ทุก ๆ 15 นาที หลังจากการใส่แร่เหล็กน้ำพี้ลงไปแล้วให้สังเกตการหลอมของแร่เหล็กผ่านช่องมอง เพื่อดูว่ารูลมเป่ามีการอุดตันจากขี้ตะกรัน (Slag) หรือไม่ ถ้ามีการอุดตันให้ใช้แท่งเหล็กเจาะผ่านช่องมองเพื่อให้รูลมไม่ตัน จนสินแร่เหล็กน้ำพี้ที่เตรียมไว้ทั้ง 5 ถุงหมดลง

ขั้นตอนที่ 6 หลังจากเติมสินแร่เหล็กน้ำพี้ครั้งสุดท้ายแล้ว ให้ทำการเจาะรูระบายน้ำตะกรัน (Slag Hole) ออก และจึงปิดช่องรูระบายน้ำตะกรัน (Slag Hole) ด้วยดินเหนียวอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 7 ปล่อยให้ถ่านเผาไหม้จนหมด จึงปิดเครื่องเป่าลม แล้วทิ้งเหล็กให้อยู่ภายในเตาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 8 เมื่อถึงเวลาที่กำหนดให้เปิดก้นเตา และใช้ชะแลงเหล็กกระทุ้งก้อนเหล็กให้ออกจากเตาให้หมด

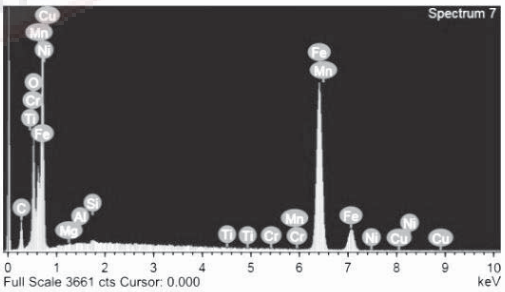
ขั้นตอนที่ 9 ทำการคัดแยกเหล็กออกจากขี้ตะกรันโดยใช้แม่เหล็ก ทำการชั่งน้ำหนักเหล็กและบันทึกผลการทดลองในแต่ละการทดลองกระทำ 3 ซ้ำ ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ ได้แก่ ขนาดและปริมาณของสินแร่เหล็กน้ำพี้ ขนาดและชนิดของถ่านไม้ค่าชี้ผลการทดสอบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กที่ได้จากการถลุงหลังจากการคัดแยก

2.4 การวัดปริมาณธาตุผสมของเหล็กที่ได้จากการถลุง

ขั้นตอนการวัดปริมาณธาตุผสมของเหล็กที่ได้จากการถลุง มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ดำเนินการสร้างชิ้นทดสอบโดยนำเหล็กที่ผ่านการถลุงจากเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้โหมดอัตโนมัติ และโหมดควบคุมด้วยคน อย่างละ 5 ตัวอย่าง ขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยการให้ความร้อนในเตาตีแบบพื้นบ้าน และตัดมีความกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 2 ส่งชิ้นเหล็กทดสอบปริมาณธาตุผสมของเหล็กไปยังห้องปฏิบัติการทดลองศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมของเหล็ก ด้วยชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) โดยใช้หลักการของ Wavelength dispersive X ray Fluorescence รังสีเอกซ์ไปกระทบบนชิ้นงานตัวอย่าง แล้วเกิดเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์จากธาตุเหล่านั้นขึ้นมา ซึ่งจะถูกแยกตามความยาวคลื่นโดยใช้ Crystal ชนิดต่าง ๆก่อนที่จะเข้าสู่ตัวตรวจวัดต่อไป ผลที่ได้จะออกมาเป็นหน่วย % หรือ ppm ของแต่ละธาตุโดยเทียบจากกราฟมาตรฐาน ดังภาพที่ 4



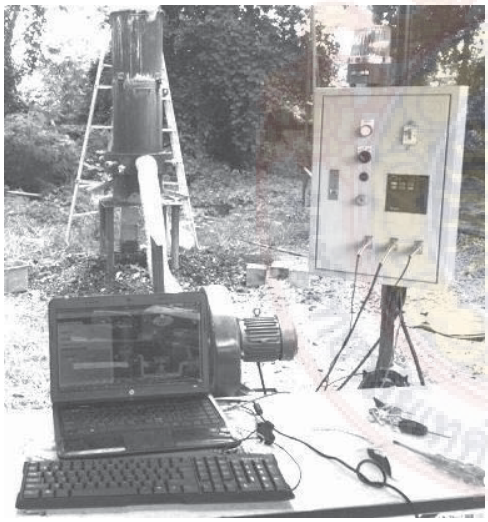
ภาพที่ 4 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมของเหล็กถลุงจากเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้

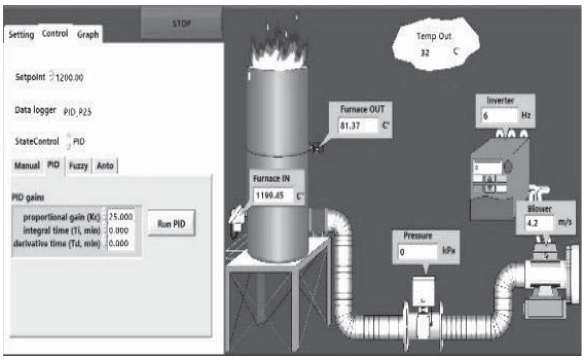
ระบบควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยโปรแกรมควบคุม ตู้ควบคุมหลัก เครื่องเป่าลม ท่อลม เตาคิวโปลาและเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิต่าง ๆ ดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6

ภาพที่ 5 เตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปล่า



ภาพที่ 6 ชุดระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปล่า

โดยโปรแกรมควบคุมซึ่งพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Lab View สามารถแสดงค่าอุณหภูมิภายในเตา ผนังเตาและอากาศภายนอก ค่าความดันภายในท่อลม ค่าความถี่ของเครื่องอินเวอร์เตอร์ และค่าความเร็วลม สามารถเลือกโหมดการควบคุมและตั้งค่าต่าง ๆ ที่จำเป็น ดังภาพที่ 7



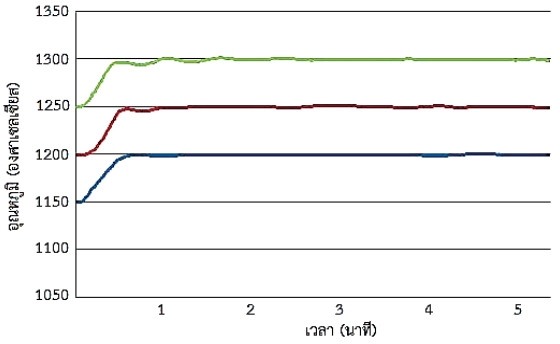
ภาพที่ 7 หน้าจอโปรแกรมควบคุมเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปล่า

3.2 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของตัวควบคุม PID

เมื่อเพิ่มค่า Kp จนมีค่าเท่ากับ 25 (Ku) พบว่าระบบเกิดการแกว่งขึ้น/ลงต่อเนื่องไปตลอด สามารถหาค่าคาบเวลาของการแกว่งขึ้น/ลง ได้เท่ากับ 27.3 วินาที (Pu) จากนั้นนำค่า Ku และ Pu มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ Kp, Ti และ Td ตามตารางที่ 1 จะได้ 15 13.5 วินาที (0.225 นาที) และ 3.36 วินาที (0.056 นาที) ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ไปทดลอง การทำงานของระบบ พบว่าอุณหภูมิภายในเตาค่อนข้างแกว่งขึ้น/ลง รอบ ๆ อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส แสดงว่าระบบควบคุมยังมีความคลาดเคลื่อนสูง จึงต้องทำการปรับค่าด้วยมือและสังเกตการณ์การควบคุมอุณหภูมิภายในเตา จนระบบสามารถเข้าสู่ค่าที่กำหนดตั้งไว้ได้อย่างรวดเร็วแม่นยำ และมีเสถียรภาพเป็นที่น่าพอใจ พบว่าได้ค่า Kp, Ti และ Td เท่ากับ 12, 0.6 นาที และ0.05 นาที ตามลำดับ

ผลจากการหาประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในเตา เมื่อมีการตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาที่ต้องการเท่ากับ 1,200 1,250 และ 1,300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

50 องศาเซลเซียส มีค่าช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) น้อยไม่มีค่าโอเวอร์ชูต (Over Shoot) มีเวลาสู่สมดุล (Setting Time) น้อย ไม่มีความผิดพลาดสถานะคงตัว (Steady-State Error) และมีเสถียรภาพดีมาก ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติแบบ PID สำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้

3.3 ผลการทดลองถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคนและโหมดอัตโนมัติ

ผลการทดลอง การถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคน พบว่าในการถลุงแต่ละครั้งใช้เวลาเฉลี่ย 119.33 นาที ใช้ถ่านไม้ปริมาณเฉลี่ย 60.67 กิโลกรัม สามารถถลุงเหล็กพรุนลักษณะดังภาพที่ 9

ภาพที่ 9 เหล็กพรุนที่ได้จากการถลุงแร่เหล็กน้ำพี้

โดยมีปริมาณเหล็กเฉลี่ยเท่ากับ 1.05 กิโลกรัม คิดเป็น 20.93 % สามารถคำนวณอัตราการผลิตเหล็กน้ำพี้ได้เท่ากับ 0.51 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ต่อการผลิตเหล็กน้ำพี้ 1 กิโลกรัม เท่ากับ 57.78 กิโลกรัม ส่วนผลการทดลองการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาในโหมดอัตโนมัติ พบว่าในการถลุงแต่ละครั้งใช้เวลาเฉลี่ย 110.67 นาที ใช้ถ่านไม้ปริมาณเฉลี่ย 53.67 กิโลกรัม สามารถถลุงได้ปริมาณเหล็กเฉลี่ยเท่ากับ 1.62 กิโลกรัม คิดเป็น 32.33 % สามารถคำนวณอัตรา การผลิตเหล็กน้ำพี้เท่ากับ 0.88 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ต่อการผลิตเหล็กน้ำพี้ 1 กิโลกรัมเท่ากับ 33.13 กิโลกรัม

3.4 การเปรียบเทียบธาตุผสมของเหล็กที่ได้จากการถลุงด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคนและโหมดอัตโนมัติ

ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ธาตุเหล็ก (Fe) และคาร์บอน (C) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงด้วยเตาคิวโปลาที่ควบคุมอุณหภูมิในโหมดควบคุมด้วยคนและโหมดอัตโนมัติ อย่างละ 5 ชิ้นงานทดสอบ พร้อมทั้งผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 พบว่าในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคน มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เหล็ก (Fe) เป็น 81.67% และคาร์บอน (C) 7.78% มากกว่า ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงด้วยเตาคิวโปลาในโหมดอัตโนมัติ ที่มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ธาตุเหล็ก (Fe) เป็น 79.83% และคาร์บอน (C) 7.47% จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ธาตุเหล็ก (Fe) และคาร์บอน (C) ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคนกับโหมดอัตโนมัติไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ธาตุเหล็ก (Fe) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคนและโหมดอัตโนมัติ

โหมดควบคุม	ส่วนผสมของธาตุเหล็ก (Fe) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ (%)			
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	S.D
ด้วยคน	70.98	87.92	81.67a	6.99
อัตโนมัติ	70.86	86.83	79.83a	5.82

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยในตารางในแนวตั้ง ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใช้ LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

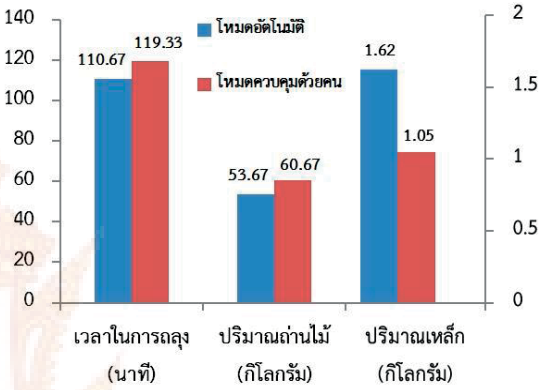
ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ธาตุคาร์บอน (C) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคน และโหมดอัตโนมัติ

โหมดควบคุม	ส่วนผสมของธาตุคาร์บอน (C) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ (%)			
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	ค่าเฉลี่ย	S.D
ด้วยคน	7.05	9.27	7.78a	0.87
อัตโนมัติ	6.80	8.71	7.47a	0.73

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยในตารางในแนวตั้ง ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใช้ LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. การอภิปรายผลและวิจารณ์

จากการทดลองการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดควบคุมด้วยคน โดยเป่าอากาศด้วยเครื่องเป่าลม (Blower) ส่วนใหญ่ใช้ความเร็วลมคงที่ วัดด้วยเครื่องความเร็วลม (Anemometer) บริเวณช่องลมเข้า คำนวณปริมาณลมได้ 650 ลิตร/นาที และเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดอัตโนมัติ โดยตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาเท่ากับ 1,500 องศาเซลเซียส ในการทดลองทั้ง 2 โหมดใช้สินแร่เหล็กน้ำพี้ปริมาณ 5 กิโลกรัม โดยแบ่งออกเป็น 5 ถุง ถุงละ 1 กิโลกรัม นำใส่เตาทุก ๆ 15 นาที สลับกับการเติมถ่านไม้ให้เต็ม ผลการเปรียบเทียบการทดลองการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดอัตโนมัติ และโหมดควบคุมด้วยคน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กราฟแสดงผลการทดลองการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดอัตโนมัติและโหมดควบคุมด้วยคน

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบประสิทธิภาพเตาถลุงเหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดอัตโนมัติกับผลการวิจัยของ [8] ที่ทำการศึกษาผลการพัฒนาประสิทธิภาพเตาสำหรับถลุงแร่เหล็กน้ำพี้ตามหลักการถลุงด้วยเตาคิวโปล่า (Cupola Furnace) ทำการทดลองถลุงแร่เหล็กน้ำพี้ครั้งละ 5 กิโลกรัม ใช้เวลาในการถลุง 1 ชั่วโมง 19 นาที ได้ปริมาณเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงได้เฉลี่ย 0.95 กิโลกรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหล็กที่ได้ 19 % พบว่าการถลุงเหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดอัตโนมัติ ใช้เวลาในการถลุงเหล็กน้ำพี้มากกว่าการถลุงแร่เหล็กน้ำพี้ตามหลักการถลุงด้วยเตาคิวโปล่าแบบเดิม เพียง 30 นาที ซึ่งสามารถทำการถลุงเหล็ก

ได้ปริมาณมากกว่าเดิม 0.67 กิโลกรัม คิดเป็น 13.33 % และเมื่อคำนวณอัตราการผลิตเหล็กน้ำพี้ได้เท่ากับ 0.88 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ต่อการผลิตเหล็กน้ำพี้ 1 กิโลกรัมเท่ากับ 33.13 กิโลกรัม และเมื่อทำการเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ โดยคิดค่าใช้จ่ายต่อรอบการผลิตที่ถลุงเหล็กน้ำพี้ 5 กิโลกรัม พบว่าการถลุงเหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดอัตโนมัติ มีค่าใช้จ่ายต่อรอบการผลิต ได้แก่ ค่าถ่านไม้มะขาม ค่าไฟฟ้า ทั้งสิ้น 938.26 บาท ส่วนค่าใช้จ่ายต่อรอบการผลิตที่ใช้เตาคิวโปลาที่ทำงานโหมดควบคุมด้วยคนทั้งสิ้น 1,019.38 บาท ซึ่งการถลุงเหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานโหมดอัตโนมัติมีค่าใช้จ่ายต่อรอบการผลิตน้อยกว่า 81.12 บาท และสามารถสร้างรายได้ กำไรต่อรอบการผลิตที่มากกว่า โดยมีรายได้ต่อรอบการผลิต 4,860 บาท กำไรต่อรอบการผลิต 3,922 บาท และมีจุดคุ้มทุน 28.94 รอบการผลิต

5. บทสรุป

ผู้วิจัยได้ศึกษาต้นแบบเตาคิวโปล่า และดำเนินการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปล่า โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานของระบบอาศัยการรับส่งค่าผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อรับค่าอุณหภูมิภายในเตา และส่งค่าควบคุมเครื่องเป่าลม

ผลการทดลองการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานในโหมดอัตโนมัติ ซึ่งใช้เวลาปริมาณถ่านไม้ในการถลุงน้อยกว่า และสามารถถลุงเหล็กน้ำพี้ได้ปริมาณมากกว่าการถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลา ที่ทำงานในโหมดควบคุมด้วยคน และเมื่อทำการวิเคราะห์เหล็กน้ำพี้ที่ได้จากการถลุงพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ธาตุเหล็ก, คาร์บอน, ออกไซด์, ซิลิคอน, อลูมิเนียม, ทองแดง, แมงกานีส, แมกนีเซียม, โครเมียม, สังกะสี และนิกเกิล ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและคุณสมบัติกายภาพของเหล็กน้ำพี้ [11] และ [12] เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ธาตุเหล็ก (Fe) และคาร์บอน (C) ที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้ำพี้ที่ถลุงด้วยเตาคิวโปลาในโหมดควบคุมด้วยคนและโหมดอัตโนมัติ พบว่าไม่แตกต่างกัน

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า การถลุงเหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานโหมดอัตโนมัติมี ประสิทธิภาพในการผลิต ที่สามารถให้ปริมาณเหล็ก และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในรอบการผลิต ดีกว่าการถลุงเหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานโหมดควบคุมด้วยคน ซึ่งมีความเหมาะสมที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากแร่เหล็กน้ำพี้ ตำบลน้ำพี้ อำเภอทองแสนขัน จังหวัดอุตรดิตถ์ สามารถนำเทคโนโลยีการถลุงเหล็กน้ำพี้ด้วยเตาคิวโปลาที่ทำงานโหมดอัตโนมัติ ไปปรับใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มปริมาณการถลุงเหล็กน้ำพี้ และลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ช่วยเพิ่มรายได้และกำไรให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากแร่เหล็กน้ำพี้

อย่างไรก็ตามเนื่องจากอุณหภูมิภายในเตามีค่าสูงมากกว่า 1,500 องศาเซลเซียส ควรเลือกเทอร์โมคัปเปิล Type R และไม่ควรยื่นเข้าไปลึกมาก เนื่องจากจะทำให้เทอร์โมคัปเปิลเกิดความเสียหายขณะเผาไหม้ได้ง่าย รวมถึงต้องออกแบบ ระบบควบคุมให้ทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่าง ๆ เนื่องจากระบบควบคุมที่ทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ มีความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน และในการวิจัยครั้งต่อไปควรมุ่งเน้นการทดลอง ตัวแปรที่ต้องใช้กับระบบควบคุมอัตโนมัติ เช่น อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ปริมาณลม ขนาดและปริมาณของสินแร่เหล็กน้ำพี้ และถ่านไม้ การกำจัดแสลก เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยทดลองในครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพโรจน์ นะเที่ยง ที่ให้ข้อมูลต้นแบบเตาคิวโปลา และขอขอบคุณ นายธนาวัฒน์ หนุนนาค และนายจักรกฤษณ์ เหมืองทอง นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้จนประสบความสำเร็จ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ดาบเหล็กน้ำพี้ เหล็กน้ำพี้ในทางของวิทยาศาสตร์. [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 2560 พฤศจิกายน 20]. เข้าถึงได้จาก: http://www.ดาบเหล็กน้ำพี้.com/article/22/เหล็กน้ำพี้ในทางของวิทยาศาสตร์.

[2] อดุลย์ พุกอินทร์. เหล็กน้ำพี้ของดีเมืองอุตรดิตถ์. พิษณุโลก: พิษณุโลกดอทคอม; 2560.

[3] ไวพจน์ เพ็งเปิ้น. การถลุงแร่เหล็กน้ำพี้ของชาวบ้านตำบลน้ำพี้. [สัมภาษณ์]. เมื่อ 7 กรกฎาคม 2560.

[4] สุรพล นาถะพินธุ. โบราณวิทยาเรื่องโลหะสมัยก่อนประวัติศาสตร์ในประเทศไทย. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่อง นิทรรศการโบราณคดี; 24-25 สิงหาคม 2544; ภาควิชาโบราณคดี คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร. กรุงเทพฯ; 2544.

[5] Bronson, Daniel A. Metallurgy fundamentals. South Holland: The Goodheart–WillcoxCompany, INC; 1985.

[6] Hodges H. Artifacts: an introduction to early materials and technology. London: John Baker; 1981.

[7] องค์การบริหารส่วนตำบลน้ำพี้. เหล็กน้ำพี้. [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 2559 พฤษภาคม 18]. เข้าถึงได้จาก: http://www.namphi.go.th/เหล็กน้ำพี้.

[8] ไพโรจน์ นะเที่ยง. การจัดการความรู้และพัฒนาชุดความรู้ทางวิทยาศาสตร์จากภูมิปัญญาท้องถิ่นเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้ อุตรดิตถ์. อุตรดิตถ์: มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์; 2557.

[9] ระบบควบคุมอัตโนมัติ [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 2559 ตุลาคม 12]. เข้าถึงได้จาก: http://www.men.neu.ac.th/web%20%20control/control1.html.

[10] Okata M. “Modern Control Engineering” 3rd ed. Prentice-Hall: int; 1997.

[11] สิงหเดช แตงจวง. การศึกษาองค์ประกอบของธาตุและสมบัติทางกายภาพของเหล็กน้ำพี้ในชุมชนบ้านน้ำพี้.กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ; 2550.

[12] อดุลย์ พุกอินทร์. การพัฒนาคุณภาพเหล็กน้ำพี้จากเหล็กน้ำพี้ถลุงใหม่. อุตรดิตถ์: มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์; 2559.