

การประมาณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

Temperature Estimation of melting steel in Induction Furnace

รัชทิน จันทรเจริญ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล ประพันธ์ พิกุลทอง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10300
โทร 218-6642, โทรสาร 218-6642, E-mail : pikuldong78@hotmail.com

Ratchatin Chancharoen, Mingsak Tangtakul, Praphun Pikultong
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Pyathai Road, Patumwan, Bangkok, 10300, Thailand
Tel : 218-6642, Fax : 218-6642

บทคัดย่อ

โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าทางอ้อม การวัดอุณหภูมิทางตรงด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเพราะน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงถึง 1500 องศาเซลเซียส ประกอบกับมีสิ่งเจือปนในน้ำเหล็ก หัววัดจะมีอายุการใช้งานสั้น หากแช่อยู่ในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงนานเกินไป การที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องทำให้การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะทำการหลอมไม่มีประสิทธิภาพมากเท่าที่ควร ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ไม่ได้กำลังการผลิตตามที่ควร และอาจมีผลกับคุณภาพของน้ำเหล็ก

บทความนี้ได้นำเสนอการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทางอ้อม โดยการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม เทคนิคการประมาณอาศัยการพิจารณาสมการสมดุลความร้อนของเตาและใช้การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเตาในระหว่างกระบวนการ เพื่อประมาณหาการสูญเสียความร้อนของเตาเพื่อประกอบการคำนวณสมการสมดุลความร้อน เป็นผลทำให้สามารถประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมได้อย่างแม่นยำ บทความได้แสดงเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจริงกับค่าที่ประมาณด้วยวิธีการที่นำเสนอซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของวิธีการ

1. บทนำ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสมรรถนะในการหลอมโลหะของเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ระบบควบคุมที่ออกแบบขึ้นนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและเพิ่มคุณภาพของน้ำเหล็กโดยควบคุมให้กระบวนการหลอมมีความ

สม่ำเสมอขึ้น ปัญหาสำคัญของขบวนการหลอมก็คือไม่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างขบวนการอย่างต่อเนื่องได้ ปัจจุบันบริษัท ใช้การวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทางตรงด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลซึ่งไม่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องได้เนื่องจากน้ำเหล็กจะได้รับการหลอมจนมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ประกอบกับน้ำเหล็กมีสิ่งเจือปน เช่นสนิม เป็นต้น การวัดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้อย่างต่อเนื่องจะทำให้หัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลเสียหาย อีกทางเลือกหนึ่งในการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กก็คือการวัดการแผ่รังสี การวัดแบบนี้ทำให้หัววัดไม่ต้องสัมผัสกับโลหะหลอมละลายอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดการแผ่รังสีจะมีความคลาดเคลื่อนในกรณีที่มีควัน หรือสิ่งสกปรก บังวิสัยทัศน์ของหัววัด และเตาอาจต้องมีช่องเปิดเพื่อให้รังสีผ่านออกมาที่หัววัดได้ตลอดเวลา ช่องเปิดนี้อาจทำให้ความร่อนสูญเสียของเตามากขึ้น

เพื่อพัฒนาขบวนการหลอมโลหะให้มีสมรรถนะสูงขึ้น ทั้งในเรื่องของการประหยัดพลังงาน กำลังการผลิต และคุณภาพของโลหะหลอมละลาย จำเป็นที่จะต้องทราบอุณหภูมิของน้ำโลหะอย่างต่อเนื่อง และจากข้อจำกัดในการวัดอุณหภูมิทางตรงด้วยวิธีการต่างๆ ในตอนต้น คณะวิจัยนี้จึงได้ออกแบบวิธีการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะขึ้น วิธีการวัดที่นำเสนออาศัยการประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะจากการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และทำการทดลองเพื่อประมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างขบวนการ จากนั้น จึงนำค่าต่างๆ เหล่านี้มาประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน

บทความที่นำเสนอนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 ส่วน ส่วนแรกหรือส่วนนี้เป็นบทนำ บทที่สองกล่าวถึงบริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทในโครงการวิจัย บทที่สามกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมา บทที่สี่กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ห้ากล่าวถึงรายละเอียดการทดลอง บทที่หกแสดงถึงผลลัพธ์และการอภิปราย บทที่เจ็ดกล่าวถึงผลสรุปของวิธีการที่น่าเสนอ

2. บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด

บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด หรือ SBM ก่อตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2518 ด้วยเงินลงทุน 34 ล้านบาท ดำเนินงานหล่อเหล็กเหนียว งานหล่อเหล็กกล้าสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนต่างๆ โดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากบริษัทอาซาฮิเทค คอปอเรชั่น ประเทศ ญี่ปุ่น ต่อมาในปี 2538 บริษัทได้ขยายงานระบบการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ CNC ด้วยเงินลงทุนอีก 40 ล้านบาท สำหรับการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วน ผลิตภัณฑ์หลักของบริษัท คือ ดรัมเบรค ดิสก์เบรค ฟลายวีว เอ็กซอท ฮับ เกียร์บีเอ็กซ์ และทามมิ่งคัพเวอร์

ในส่วนของการหล่อเหล็กเหนียว ปัจจุบันบริษัทมีเตาหลอมโลหะแบบใช้ไฟฟ้า (Induction furnace) ทั้งหมด 3 เตา ประกอบด้วยเตาขนาด 2 ตัน จำนวน 2 เตา และเตาขนาด 5 ตัน จำนวน 1 เตา ใช้กำลังไฟฟ้ารวม 3,600 กิโลวัตต์ และมีกำลังการผลิต 11,400 ตันต่อปี จากการสำรวจการใช้พลังงานเบื้องต้นของบริษัท พบว่า เตาหลอมไฟฟ้าใช้กำลังงานคิดเป็นสัดส่วนถึง เกือบ 60 เปอร์เซ็นต์ของการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งหมด หรือใช้ไฟฟ้าถึง 10,935,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือคิดเป็นเงินว่า 20 ล้านบาท ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก

การควบคุมเตาหลอมของโรงงานในปัจจุบันอาศัยความชำนาญของผู้ควบคุมเตา โดยการวัดอุณหภูมิของเหล็กในเตาจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลจุ่มลงไปบนน้ำเหล็กอุณหภูมิสูง การวัดด้วยวิธีนี้ไม่สามารถให้หัววัดจุ่มอยู่ในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้เนื่องจากจะทำให้อายุการใช้งานสั้น ทำให้ผู้ควบคุมเตาใช้การวัดเพียงบางตำแหน่งของขบวนการ และใช้ประสบการณ์ในการประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็ก จากการสังเกตการวัด 10 ครั้งพบว่าอุณหภูมิในเตาเกินค่าที่ต้องการถึง 8 ครั้ง เป็นผลทำให้สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์และกำลังการผลิตไม่ได้ตามที่ต้องการ และเมื่ออุณหภูมิในเตาเกินค่าที่ต้องการก็จะต้องลดอุณหภูมิในเตาลงโดยทิ้งให้น้ำเหล็กระบายความร้อนโดยธรรมชาติสู่สิ่งแวดล้อม เป็นผลให้เพิ่มมลพิษโดยไม่จำเป็น การวัดอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่องจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้

คณะวิจัยได้นำเสนอการพัฒนาการใช้ไฟฟ้าในเตาหลอมโลหะด้วยวิธีการควบคุมความร้อน ซึ่งจะเป็นการศึกษาออกแบบและดำเนินการควบคุมการใช้ไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะ เพื่อให้ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมขึ้นในประเทศ โครงการนี้นอกจากจะทำให้บริษัทลดภาระค่าประกอบการจากการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพขึ้น ยังจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมเพื่อให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้ โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการความร่วมมือระหว่าง บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สถาบันเพิ่มผลผลิต

แห่งชาติ (TPI) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนียวไฟฟ้าของบริษัทฯ

3. งานวิจัยที่ผ่านมา

Sun Yanguang และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบการควบคุมของ Ladle Furnace วิธีการที่น่าเสนอใช้สมการสมดุลความร้อนเพื่อคำนวณอุณหภูมิเหล็ก พลังงานป้อนเข้าที่เหมาะสม และการควบคุมที่เหมาะสม Sun Yanguang และคณะแนะนำว่าอุณหภูมิในเตาหลอมมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้า และได้สรุปว่าการทำนายอุณหภูมิในเตาหลอมโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเตากับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบ Regression นั้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิในเตาได้อย่างแม่นยำนัก เนื่องจากความซับซ้อนระหว่างอุณหภูมิในเตากับค่าพลังงานป้อนเข้า เหล็กที่หลอมละลาย และเวลา และได้พัฒนาระบบ Intelligent Ladle Furnace (ILF) เพื่อประมาณหาอุณหภูมิในเตากับค่าพลังงานป้อนเข้า ซึ่งจะแม่นยำกว่าวิธีแรก ระบบควบคุมที่น่าเสนอช่วยลดพลังงานไฟฟ้าต่อตันเหล็กถึง 14%

Tadeusz M. Drzewiecki, R. Michael Phillippi and Charles E. Paras [2] ได้ทำการศึกษาวิธีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่นในโรงงานและอุตสาหกรรมเหล็ก พบว่าถ้ามีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจะช่วยประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

บริษัท INDUCTOTHERM [3] ผู้ผลิตและพัฒนาเตาหลอมโลหะแบบเหนียวไฟฟ้า (Induction Furnace) ได้ประดิษฐ์คิดค้น Computer monitoring and control for charging, melting and holding operations โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพลังงานป้อนเข้ากับ อุณหภูมิในเตาหลอม ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทำนายอุณหภูมิในเตาได้แม่นยำขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ลงได้

Roy Elliott [4] ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพโดยทั่วไปของเตาหลอมโลหะแบบเหนียวไฟฟ้าไว้ว่า เตาหลอมฯ โดยทั่วไปจะใช้พลังงานไฟฟ้า 430 kWh ในการหลอมเหล็ก 1 ตัน จากอุณหภูมิห้องถึงสภาวะหลอมเหลวอุณหภูมิ 1538 °C คิดเป็น 75% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนพลังงานที่เหลือจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น และการแผ่รังสีความร้อน

บริษัท RADYNE [5] เป็นบริษัทซึ่งดำเนินงานเกี่ยวกับการออกแบบและผลิตเตาหลอมโลหะแบบเหนียวไฟฟ้ามาเป็นเวลากว่า 30 ปี ได้ทดลองและสร้างกราฟสมรรถนะ (Performance curve) ของเตาในการหลอมโลหะต่างๆ จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิที่ใช้งาน จากกราฟสมรรถนะ ที่ได้จากการทดลองพบว่าเหล็กน้ำหนัก 1000 กิโลกรัม ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมประมาณ 470 kWh ในการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1450 °C

Yamada Katsuhito และคณะ [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมของอุณหภูมิเหนี่ยมหลอมเหลวในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากการศึกษาพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิของอุณหภูมิเหนี่ยมหลอมเหลวได้อย่างแม่นยำ โดยที่ทำการวัดอุณหภูมิของอุณหภูมิเหนี่ยมหลอมเหลวโดยเทอร์โมคัปเปิ้ลเพียงครั้งเดียวแทนการวัดซ้ำๆ หลายๆ ครั้ง แล้วปรับกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ระบบนี้จะสามารถทำนายอุณหภูมิของอุณหภูมิเหนี่ยมหลอมเหลวได้อย่างแม่นยำโดยใช้โมเดลทางความร้อนและการปรับเปลี่ยนกำลังไฟที่ใช้อย่างอัตโนมัติ

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมดุลความร้อน

ในการพิจารณาสมดุลความร้อนของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะพิจารณาเตาหลอมแบบ crucible ชนิดความถี่สูง โดยจะอาศัยสมการสมดุลความร้อน ดังนี้

$$\text{Energy input} = \text{Energy output} + \text{Energy loss} \quad (1)$$

Energy input ที่ใส่เข้าไปในเตาในที่นี้ก็คือค่าพลังงานป้อนเข้า (Power input) ในส่วนของพลังงานออก (Energy output) ก็คือความร้อนที่ให้กับเหล็กในเตาทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้น ความร้อนส่วนนี้แบ่งเป็น Sensible heat กับ Latent heat เมื่อพิจารณาถึงความร้อนสูญเสีย (Energy loss) ของเตาหลอม พบว่า จะประกอบด้วยลักษณะการสูญเสียความร้อน 2 แบบ คือ ความร้อนสูญเสียจากระบบไฟฟ้า (Electrical loss) และความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (Heat loss) โดยที่ความร้อนสูญเสียจากระบบไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง (transformer loss) ความร้อนสูญเสียใน inverter) ความร้อนสูญเสียในสายไฟ (wiring loss) ความร้อนสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำ (coil loss) และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (other loss) ขณะที่ความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนจากผนังเตาไปสู่ระบบหล่อเย็น (conduction loss) ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีบริเวณปากเตา (radiation loss) และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (other loss) พฤติกรรมของพลังงานความร้อนในส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พฤติกรรมของพลังงานความร้อนต่างๆ

ความร้อน (kW)	สัญลักษณ์และสมการ
ความร้อนเข้า	P_{in}
ความร้อนที่ให้กับเหล็ก	$Q_S = \frac{M_s * L}{t} + \frac{M_s * C_{p,s} * \Delta T_s}{t} \quad (2)$
ความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง	$Q_T = 4 * I_{INV}^2 * R_{CU} \quad (3)$
ความร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น	$Q_W = M_w * C_{p,w} * \Delta T_w \quad (4)$
ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อน	$Q_C = \frac{T_s - T_w}{R} * 10^{-3} \quad (5)$
ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี	$Q_R = 5.67 * 10^{-3} * A * \varepsilon * \left(\frac{T_s}{100}\right)^4 \quad (6)$
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_{th}

โดยที่ M_s = มวลของเหล็ก (kg)
 m_w = อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s)
 $C_{p,s}$ = ค่าความจุความร้อนของเหล็ก (kJ/kg °C)
 $C_{p,w}$ = ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg °C)
 L = ค่าความร้อนแฝงของเหล็ก (kJ/kg)
 T_s = อุณหภูมิของเหล็ก (K)
 T_w = อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)
 t = เวลาที่ใช้หลอม (s)
 R = ค่าความต้านทานความร้อนของผนังเตา (kW/K)
 ε = ค่า Emissivity
 A = พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี (m²)
 R_{CU} = ความต้านทานของลวดตัวนำในหม้อแปลง (โอห์ม)
 I_{INV} = กระแสอินเวอร์เตอร์ (Amp)

ดังนั้นสมการสมดุลความร้อนจะเขียนได้ดังนี้

$$P_{in} = Q_S + Q_T + Q_W + Q_C + Q_R + Q_{th} \quad (7)$$

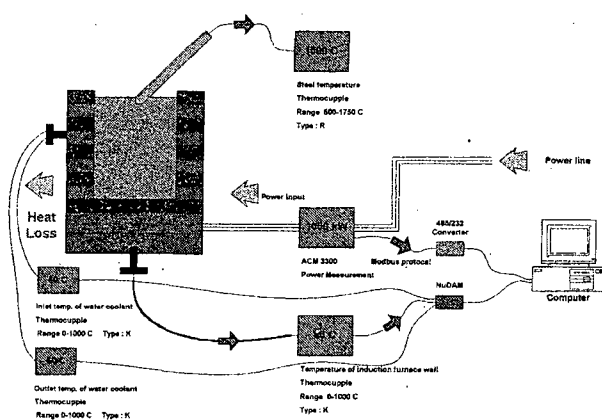
5. การทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนี่ยวนำความร้อนทางอ้อม การวัดอุณหภูมิทางอ้อมทำได้โดยการวัดการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และทดลองเพื่อหาแบบจำลองของการสูญเสียความร้อนของเตา การทดลองแบ่งออกเป็นสองตอน ตอนแรกเป็นการวัดการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่

ผนังเตาด้านนอก และค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ จากนั้น นำค่าต่างๆ เหล่านี้มาประมวลหาแบบจำลองการสูญเสียความร้อนของเตาผ่านทางสมการสมดุลความร้อน ตอนที่สองจะใช้แบบจำลองการสูญเสียความร้อนของเตา พลังงานที่ป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อประมวลหาอุณหภูมิของน้ำโลหะผ่านทางสมการสมดุลความร้อน

วิธีการที่นำเสนอนี้พยายามที่จะใช้อุปกรณ์เดิมที่บริษัทฯ ได้ติดตั้งไว้เพื่อควบคุมเตา และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเท่าที่จำเป็นเท่านั้น โดยค่าพลังงานป้อนเข้าจะวัดผ่านเครื่อง ACM 3300 Power Measurement ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เดิม และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus กับเครื่องวัดฯ ผ่านตัวแปลง RS485/232 การวัดอุณหภูมิด้านนอกจะวัดอุณหภูมิที่ด้านล่างของเตาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ติดเข้าไปในผิวใต้เตาชั้นอิฐทนไฟ และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM ซึ่งมีโปรโตคอล แบบ RS485 ในส่วนของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นนั้นจะวัดด้วยเครื่อง Ultrasonic Flowmeter ซึ่งอัตราการไหลนี้จะมีค่าคงที่ตลอดขบวนการ และจะวัดอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็นด้วยเทอร์โมคัปเปิล และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM อุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาจะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type R ของบริษัทซึ่งไม่สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง และวัดโดยผ่านอุปกรณ์ของโรงงานที่ติดตั้งอยู่เดิม

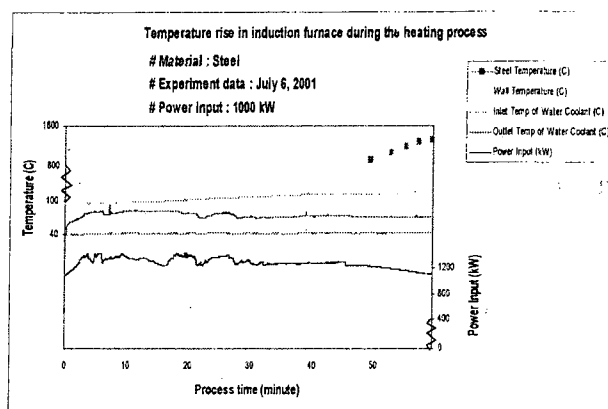
จากนั้น จะนำค่าต่างๆ ที่วัดได้นี้มาประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นบน LabVIEW โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะทำการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus กับเครื่อง ACM 3300 และสื่อสารด้วยโปรโตคอล RS485 กับอุปกรณ์ NuDAM และประมวลผลข้อมูลต่างๆ เพื่อประมวลหาอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง

6. ผลการทดลองและการอภิปราย

รูปที่ 2 แสดงค่าพลังงานความร้อนป้อนเข้า อุณหภูมิที่ผนังด้านนอก อุณหภูมิเข้าและออกของระบบน้ำหล่อเย็น และอุณหภูมิของน้ำโลหะ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการปรับพลังงานป้อนเข้าคงที่มา 6 การทดลอง ได้แก่ ที่ 1100, 1000, 900, 800, 700, 500 kW โดยในรูปแสดงผลการทดลองปรับพลังงานป้อนเข้าคงที่ 1000 kW หลังจากให้น้ำเหล็กเริ่มหลอมเหลว

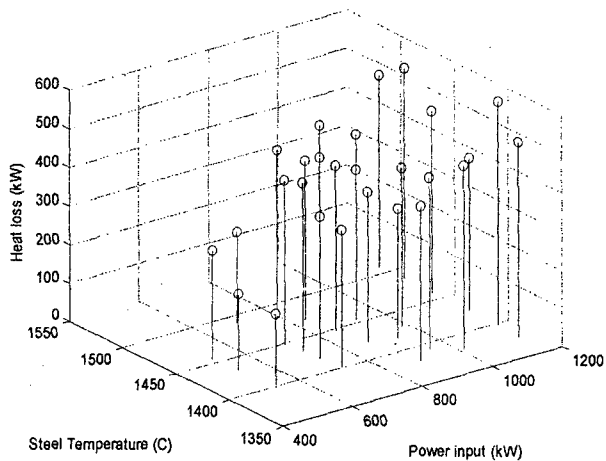


รูปที่ 2 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขบวนการหลอม โดยปรับพลังงานป้อนเข้าคงที่ 1000 kW

เมื่อนำค่าที่วัดได้นี้แทนลงไปในสมการสมดุลความร้อน จะสามารถประมาณความร้อนสูญเสียของเตาหลอมได้ จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าความร้อนสูญเสียมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้าอย่างชัดเจน และยังมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็ก

เพื่อให้แบบจำลองของความร้อนสูญเสียมีความแม่นยำขึ้น จึงได้ทดลองให้ความร้อนกับน้ำเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ โดยปรับค่าพลังงานป้อนเข้าตั้งแต่ 500 จนถึง 1000 kW ในขณะที่น้ำเหล็กมีอุณหภูมิระหว่าง 1400 ถึง 1500 °C จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ป้อนเข้าสมการสมดุลความร้อนเพื่อประมาณหาความสัมพันธ์ของความร้อนสูญเสียที่สัมพันธ์กับพลังงานป้อนเข้า ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 3 จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความร้อนสูญเสียมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้า ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียกับอุณหภูมิของน้ำเหล็กยังไม่ชัดเจนนัก

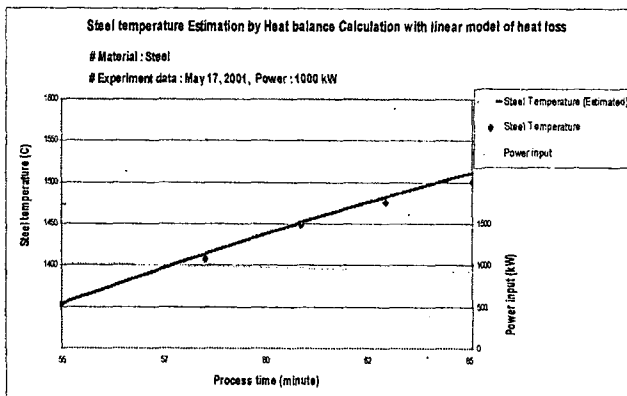
Heat loss as a function of power input and steel temperature



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียกับค่าพลังงานป้อนเข้าและอุณหภูมิของน้ำเหล็ก

เราสามารถประมาณหาแบบจำลองของความร้อนสูญเสียได้โดยใช้วิธี Regression ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\text{Heat Loss} = 0.3783 \cdot (P_{in}) + 0.0407 \cdot (T_s) + 10.9058 \quad (8)$$



รูปที่ 4 ผลการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กสำหรับการทดลองที่พลังงานป้อนเข้าคงที่ 1000 kW

เมื่อนำแบบจำลองความร้อนสูญเสียป้อนกลับเข้ามาในสมการสมดุลความร้อนเพื่อทำนายอุณหภูมิของน้ำโลหะ จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4 วิธีการที่นำเสนอทำให้สามารถประมาณหาอุณหภูมิของน้ำเหล็กได้อย่างต่อเนื่องโดยมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง บวกลบสิบห้าองศาเซลเซียส

7. บทสรุป

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะทางอ้อมโดยประมาณค่าอุณหภูมิจากค่าพลังงานป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และแบบจำลองความร้อนสูญเสียของเตา ค่าที่

วัดต่างๆ นี้ วัดได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับน้ำโลหะอุณหภูมิสูง ทำให้ระบบการวัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และทำให้สามารถทราบอุณหภูมิของน้ำโลหะได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการหลอมโลหะเพื่อทำให้ประสิทธิภาพในการหลอมสูงขึ้น และมีกำลังการผลิตเต็มศักยภาพของเตาหลอม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตและลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลงได้ วิธีการที่นำเสนอสามารถประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมได้อย่างต่อเนื่องและมีความผิดพลาด ± 15 องศาเซลเซียส

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการและอำนวยความสะดวกในการทดลอง ขอขอบคุณ สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ ผู้ประสานงานโครงการทำให้โครงการดำเนินไปได้อย่างราบรื่น และขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้ให้ทุนสนับสนุนโครงการและกำกับดูแลให้โครงการสำเร็จผล

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sun Yanguang, Wang Daixian, Tao Baisheng, Yan Tao, Shi Yang, Fang Shubiao and Wang Yuanhou, "An Intelligent Ladle Furnace Control System", Automation Research Institute of Ministry of Metallurgical Industry, Beijing, 100071, P.R.China.
- [2] Tadeusz M. Drzewiecki, R. Michael Phillippi and Charles E. Paras, "Fluidics-A New Potential for Energy Conservation by Continuous High Temperature Monitoring and Control", Fluid Control Branch Harry Diamond Laboratories Adelphi, Maryland.
- [3] INDUCTOTHERM.
- [4] Roy Elliott, "Cast Iron Technology", 1998.
- [5] RADYNE DOUBLE AXIS TILT INDUCTION MELTING FURNACES, Molly Millars Lane Wokingham Berk Rg11 2PX.
- [6] Yamada Katsuhito, Oshima Masuji, Amano Norihiro, Hasegawa Tamotsu, Souda Kouichi, "Precise temperature control for molten ferrous alloy in induction furnace", SAE Special Publications, Proceeding of the 1997 International Congress and Exposition, Feb 24-7 1997, Detroit, MI, USA.