

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การจำลองเชิงตัวเลขของการปรับปรุงเตาเผาในกระบวนการชุบอบแห่นสปริง Numerical Modeling of Improvement of a Leaf-Spring Heat Treatment Furnace

วัชรินทร์ หนูทอง¹, วราคม เน็ดน้อย¹, ยี่งยัง แก้วก่อเกียรติ¹, พงษ์เจต พรหมวงศ์² และ ภูติพิช ชัยดิกลพัฒน์กุล²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ผู้ติดต่อ: watchari@mut.ac.th, โทรศัพท์: 0 2988 3655 ต่อ 3102, โทรสาร: 0 2988 3655 ต่อ 3106

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงเตาเผาในกระบวนการปรับคุณสมบัติแห่นสปริงโดยวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยแห่นสปริงจะต้องถูกนำไปเผาเพื่อให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 900°C ก่อนที่จะทำการชุบแข็งและอบคลายเครียด แต่เนื่องจากเตาเผาปัจจุบันที่ใช้มีการสูญเสียความร้อนทางปล่องไอเสียมากและการอุ่นแห่นสปริงในช่วงต้นของเตาก่อนทำการเผาไม่มีประสิทธิภาพจึงทำการเสนอแนะแบบปรับปรุงเตาเผาใหม่เพื่อให้มีการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น แบบปรับปรุงเตาเผาที่นำเสนอคือทำการปรับย้ายปล่องไอเสียไปไว้ช่วงต้นของเตาเผาเพื่อให้อากาศร้อนไหลไปสู่ด้านหน้าเตาเพื่อทำหน้าที่อุ่นเหล็กแห่นให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงเผา ทั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเตาเผาก่อนปรับปรุงกับผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานภายในเตาเผาพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับผลการวัด จากแบบจำลองเตาเผาปรับปรุงใหม่นั้นพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 33%

คำหลัก: แห่นสปริง เตาเผา การปรับคุณสมบัติเหล็ก การจำลองเชิงตัวเลข

Abstract

This study conducts numerical modeling to improve the heat treatment furnace in leaf-spring forming process. The leaf-springs have to be heated up until their inside temperature are not less than 900°C before entering the quenching and tempering processes. Since the present furnace has a lot of heat loss at the exhaust chimney and the heating up mechanism at the preheating zone is not effective, the proposed improvement is to move the chimney from the heating zone to the front of the furnace or preheating zone. Therefore the hot flue gas can flow to the preheating zone to heat up the leaf-spring's temperature before entering the heat zone. The model is validated with data obtained from measuring at the present furnace. Consequently, the proposed model has more improvement by reducing the consumption energy approximately 33%.

Keywords: Leaf-spring, Furnace, Heat Treatment, Numerical Modeling

1. บทนำ

ในการขึ้นรูปแหวนสปริงสำหรับรถยนต์นั้นจะต้องผ่านกระบวนการปรับคุณสมบัติเหล็กโดยมีขั้นตอนการเผาเหล็กแผ่นให้ร้อนโดยที่อุณหภูมิภายในของแหวนสปริงจะต้องสูงกว่า 900°C จากนั้นทำการขึ้นรูปร้อนแล้วจึงทำการชุบและอบคลายเครียดเพื่อให้แหวนสปริงมีค่าความแข็งตามที่กำหนด เนื่องจากขั้นตอนการเผาเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานมากที่สุดจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงเตาเผาเพื่อหาทางเพิ่มประสิทธิภาพและลดปริมาณการใช้พลังงานลง

โดยทั่วไปแล้วพลังงานมากกว่า 90% ที่ใช้ในการเผาหรือเพิ่มความร้อนให้กับแผ่นเหล็ก หรือแหวนสปริงนั้นจะได้มาจากการแผ่รังสี [1, 2] การแผ่รังสีจากอากาศร้อนภายในเตาเผาและจากผนังเตาที่ร้อนจะกระทบและถูกดูดซึมลงไปในแหวนสปริง การดูดซึมการแผ่รังสีนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและแพร่ต่อไปในเนื้อแหวนสปริงโดยวิธีการนำความร้อน

ทั้งนี้ความสำคัญของการวิเคราะห์คุณลักษณะทางความร้อนในเตาเผาที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นได้เพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจากสภาพการแข่งขันทางการเศรษฐกิจที่รุนแรงขึ้นรวมถึงการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน นอกจากนี้ผลกระทบจากเตาเผาต่างๆ ที่มีต่อมลภาวะในอากาศทำให้นักวิจัยให้ความสำคัญโดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนและเพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานเพื่อให้อยู่รอดจากสถานะซบเซาทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการทำความเข้าใจกับการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเตาเผา รวมถึงผลของการแผ่รังสีและการนำความร้อนที่มีต่อคุณภาพของแหวนสปริงจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานในเตาเผา

เนื่องจากในการทดลองต่างๆ เพื่อปรับปรุงเตาเผานั้นมีต้นทุนที่สูงและใช้เวลามาก ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาจึงทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางวิศวกรรมเพื่อทำนายพฤติกรรมทางความร้อนของแหวนสปริงโดยศึกษาถึงการแผ่รังสีภายในเตาเผาเพื่อ

หาการกระจายความร้อนของแหวนสปริงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องเพื่อรับความร้อนภายในเตาเผา รวมถึงการปรับปรุงเตาเผาโดยใช้แบบที่นำเสนอใหม่

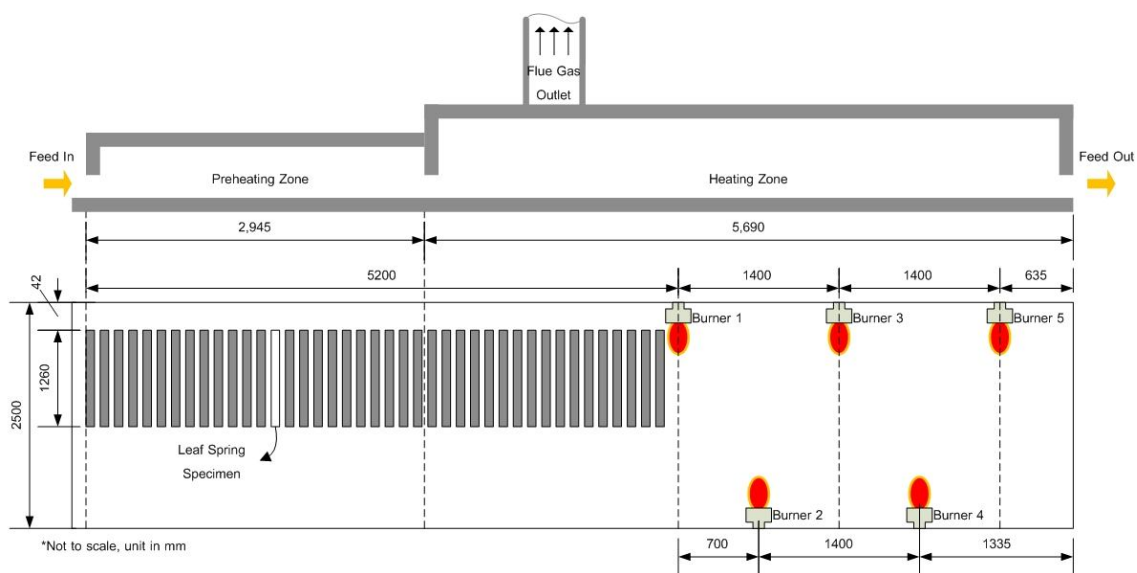
ในปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการจำลองคุณลักษณะทางความร้อนของชิ้นงานที่เป็นเหล็กแผ่นในเตาเผาหลายๆ แบบ [1-3] เช่น Kim และคณะ [4] ได้ทำนายการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา รวมถึงฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นเหล็กโดยใช้การวิเคราะห์ด้วย CFD โดยได้พิจารณาถึงผลของการไหลแบบปั่นป่วนและการแผ่รังสีภายในเตาเผาแบบ Walking Beam

Li และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขถึงการแผ่รังสีของแผ่นเหล็กในเตาเผา ซึ่งความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสีถูกแบ่งออกเป็นช่วงและทำนายการกระจายของอุณหภูมิภายในแผ่นเหล็กจากสมการการนำความร้อนแบบสองมิติ Jacklic และคณะ [6] ใช้วิธีการจำลองแบบ Monte Carlo ในการศึกษาถึงผลกระทบของระยะระหว่างจุดที่วางชิ้นงานต่อผลิตภาพของเตาเผาแบบ Walking Beam

งานวิจัยนี้จะทำการทำนายการถ่ายเทความร้อนภายในแหวนสปริงในเตาเผา และการปรับปรุงเตาเผา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเตาเผาในปัจจุบันกับแบบปรับปรุงที่นำเสนอใหม่ ดังนั้นการคำนวณจึงเน้นที่รูปร่างของผนังเตาและอุณหภูมิของอากาศร้อนจากหัวเผาเพื่อที่จะกำหนดสถานะเงื่อนไขและขอบเขตสำหรับสมการการถ่ายเทความร้อน โดยที่เตาเผาสำหรับการวิจัยนี้จะแบ่งเป็นสองช่วงคือช่วงอุ่น (Preheating Zone) และช่วงเผา (Heating Zone)

2. รายละเอียดของเตาเผา

ในการเผาแหวนสปริงจะเริ่มจากการให้ความร้อนกับชิ้นงานจากอุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้เท่ากับ 950°C ในช่วงเผา (Heating Zone) แหวนสปริงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาและเคลื่อนที่ภายในเตาเผาโดยใช้ Walking Beam ซึ่งมีอัตราการเคลื่อนที่คงที่ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่นี้จะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาทั้งหมดที่แหวนสปริงจะต้องอยู่ภายในเตาเผา

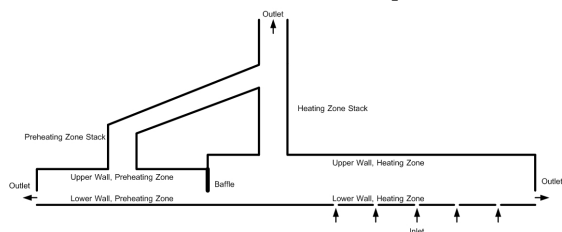


รูปที่ 1 แผนภาพเตาเผาแห้งบสปริง

เตาเผามีความยาวทั้งหมด 8.635 เมตร แหนบสปริงมีขนาด $7 \times 80 \times 1260 \text{ mm}^3$ แหนบสปริงจะถูกวาดติด ๆ กัน โดยเริ่มป้อนตั้งแต่ช่วงอุ่น (Preheating Zone) ที่อุณหภูมิ 40°C แหนบจะค่อย ๆ รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเผาที่อุณหภูมิ 950°C ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการเผาทั้งหมดประมาณ 23 วินาที โดยที่แหนบสปริงจะอยู่ในช่วงเผาประมาณ 14.5 วินาที ทั้งนี้จึงหะในการเคลื่อนที่ของ Walking Beam เท่ากับ 10 – 12 วินาทีต่อการเคลื่อนที่ 1 ครั้ง

เตาเผาแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือช่วงอุ่นและช่วงเผา จากการวัดเพื่อหาประสิทธิภาพของเตาเผาพบว่า อากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งผ่านปล่องไอเสียนั้นมีอุณหภูมิประมาณ 650 – 750°C ส่วนความร้อนที่ให้กับแหบสปริงนั้นประมาณ 37% ของพลังงานทั้งหมดที่ใส่เข้าไป ทั้งนี้จากการวิเคราะห์พบว่าเตาเผาเดิมนั้นปล่องไอเสียอยู่บริเวณช่วงเผาทำให้อากาศร้อนไหลออกสู่ปล่องไอเสียโดยที่ไม่ได้ไหลไปยังช่วงอุ่นทำให้อุณหภูมิช่วงอุ่นต่ำมากประมาณ 50 – 100°C ดังนั้นในการปรับปรุงเตาเผาจึงมีแนวคิดในการย้ายปล่องไอเสียไปยังช่วงอุ่นเพื่อให้อากาศร้อนไหลเข้าสู่ช่วงอุ่น ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการศึกษา

พฤติกรรมทางความร้อนของเตาเผาเดิมเปรียบเทียบกับแบบเตาเผาที่นำเสนอ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองเตาเผาที่ใช้ในการคำนวณ

3. สมการควบคุม

ในการศึกษานี้ตั้งสมมติฐานว่ามีการถ่ายเทความร้อนสู่ແໜ່ນສປຣິງโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อนแบบสม่ำเสมอเท่านั้น ในขณะที่การนำความร้อนนั้นเกิดขึ้นเฉพาะภายในແໜ່ນສປຣິງ การกระจายความร้อนภายในແໜ່ນສປຣິງคำนวณโดยใช้สมการการนำความร้อนแบบสองมิติดังต่อไปนี้

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

โดย ρ , C , T , และ k คือค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ อุณหภูมิ และค่าการนำความร้อนของแหวนสปริงตามลำดับ

โดเมนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับแผนบสปริง
แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยกำหนดให้ขอบเขตสภาวะ

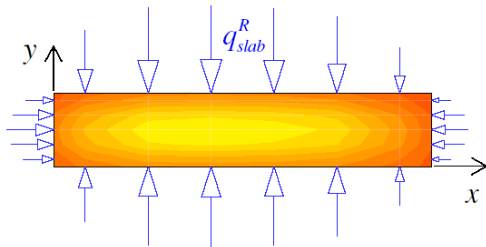
เงื่อนไขที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ดังรูปที่ 3 โดยใช้ฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีที่มีต่อแผ่นสปริงหรือ q_{slap}^R เป็นสภาวะเงื่อนไขในการแก้สมการที่ (1) ดังนี้

$$q_{slap}^R = \int_{\omega=4\pi} I(P_w, P) (P \cdot h_w) d\omega \quad (2)$$

โดย $I(P_w, P)$ คือความเข้มในการแผ่รังสีที่ผิว P_w ของแผ่นสปริง และทิศทาง P, h_w คือยูนิตเวกเตอร์ที่ผิวของแผ่นสปริง ฟลักซ์ความร้อนนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$q_{slap}^R = \varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad (3)$$

โดย ε_g คือค่า Emissivity ของอากาศร้อน σ คือค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$) และ T_g คืออุณหภูมิอากาศ (K)

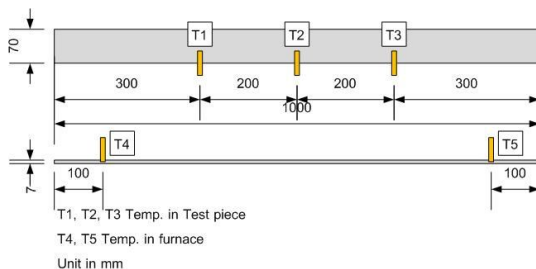


รูปที่ 3 โดเมนการคำนวณของหน้าตัดแผ่นสปริงที่ได้รับฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสี

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

4.1 การถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นสปริง

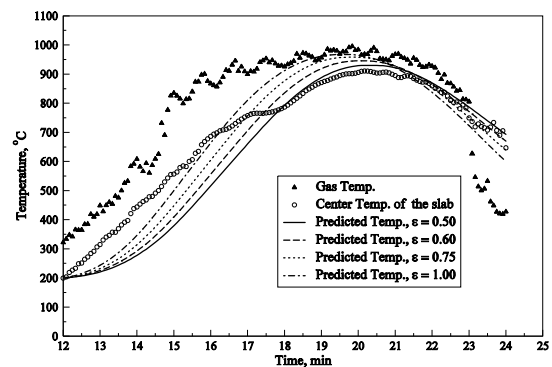
ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นสปริงเมื่อเคลื่อนที่ภายในเตาเผาแบบปัจจุบันซึ่งปล่อยไอเสียอยู่ที่ช่วงเผา ดังรูปที่ 1 โดยใช้เทอร์โมคัปเบิลชนิด K ติดลงไปบนแผ่นสปริงที่เป็นชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 4 แล้วป้อนเข้าไปในเตาเผาและทำการวัดอุณหภูมิภายในแผ่นสปริงและอุณหภูมิภายในเตาเผาเทียบกับเวลา



รูปที่ 4 ชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิในแผ่นสปริงและในเตาเผา

จากนั้นทำการจำลองการรับความร้อนของแผ่นสปริงตามโดเมนในรูปที่ 3 จากนั้นทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิชั่วขณะภายในแผ่นสปริงที่ได้จากการวัดในเตาเผาและจากการจำลองเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเผาผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5 โดยในการจำลองนั้นได้ทำการปรับค่า Emissivity ของอากาศร้อนเพื่อทำนายการรับความร้อนของแผ่นสปริง พบว่าค่า Emissivity เท่ากับ 0.5 ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดมากที่สุด

จากรูปที่ 5 พบว่าการรับความร้อนของแผ่นสปริงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่วินาทีที่ 12 โดยมีอุณหภูมิภายในเท่ากับ 200°C จนกระทั่งอุณหภูมิภายในแผ่นสปริงมีค่าสูงสุดเท่ากับ 880°C ที่วินาทีที่ 20 จากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลง อุณหภูมิของอากาศร้อนจุดสูงสุดนั้นอยู่ที่ 940°C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิกำหนดของเตาเผา



รูปที่ 5 อุณหภูมิภายในแผ่นสปริงจากการวัดและ

จากแบบจำลองเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเผา

จากนั้นทำการตรวจสอบการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดแผ่นสปริงจากการจำลองผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ในช่วงเริ่มต้นของการเผา (วินาทีที่ 13) อุณหภูมิที่กึ่งกลางของแผ่นสปริงจะต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวนอก (รูปที่ 6 (ก)) เมื่อเวลาผ่านไปแผ่นสปริงจะรับความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในเพิ่มสูงขึ้นมากจนกระทั่งสูงสุดที่ประมาณวินาทีที่ 20 (รูปที่ 6 (ค)) แผ่นสปริงมีอุณหภูมิภายในประมาณ 940°C ทั่วทั้งแผ่น หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนดังนั้นการชุบต้องกระทำ

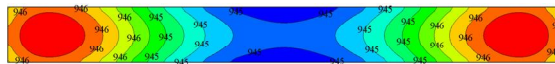
ภายในทันทีหลังจากแหวนสปริงได้รับความร้อนสูงสุด เพื่อให้ได้ค่าความแข็งตามกำหนด



(ก) วินาทีที่ 13



(ข) วินาทีที่ 18



(ค) วินาทีที่ 20



(ง) วินาทีที่ 22

รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิภายในแหวนสปริงที่
ช่วงเวลาต่างๆ

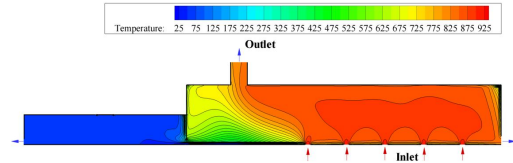
4.2 พฤติกรรมทางความร้อนในเตาเผา

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเตาเผาทั้งแบบ การแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนจะเน้นไปที่ การถ่ายเทความร้อนชั่วขณะใดขณะหนึ่งเนื่องจากการพลั๊กความร้อนที่แผ่ออกมามีผลต่ออุณหภูมิของ แหวนสปริง การศึกษานี้จะแบ่งออกเป็นสองแบบคือ แบบที่ปล่อยไอเสียอยู่ในช่วงเผาและแบบนำเสนอที่ ปล่อยไอเสียอยู่ในช่วงอุ่น ทั้งสองแบบจะต้องให้อุณหภูมิแก่แหวนสปริงที่ 927°C และเตาเผาจะต้อง อยู่ในสภาวะเงื่อนไขปกติซึ่งมีสภาวะเงื่อนไข ดังต่อไปนี้ มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สำหรับ หัวเผาทั้งหมดเท่ากับ 0.513 kg/s การสูญเสียความร้อนที่ผนังเตาเท่ากับ $1,730 \text{ W/m}^2$ ความร้อนที่ให้กับ แหวนสปริงเท่ากับ $22,131 \text{ W/m}^2$ แบบจำลองทั้งสอง แบบเป็นดังต่อไปนี้

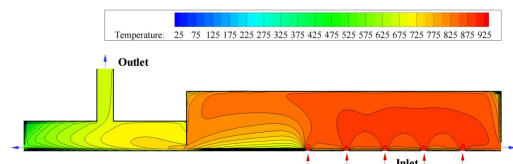
1. การรับความร้อนของแหวนสปริงเกิดขึ้นภายในช่วงเผาเท่านั้นซึ่งเป็นสภาพปัจจุบันของเตาเผา
2. การรับความร้อนของแหวนสปริงเกิดขึ้นทั้งในช่วงอุ่นและในช่วงเผาตามแบบที่นำเสนอ

จากข้อมูลตามเงื่อนไขที่กำหนด แบบแรกต้องทำการเปิดปล่อยไอเสียที่ช่วงเผา ปิดปล่อยไอเสียที่ช่วงอุ่น แล้วทำการคำนวณการกระจายความร้อนบน

แบบจำลองโดยผลการคำนวณได้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดที่เตาเผา ดังแสดงรูปที่ 7



รูปที่ 7 การกระจายความร้อนภายในเตาเผาแบบที่ 1 จากนั้นทำการปรับแบบที่ 1 โดยการปิดปล่อยไอเสียในช่วงเผาและเปิดปล่อยไอเสียในช่วงอุ่น ผลที่ได้จากการคำนวณการกระจายความร้อนได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งทำให้อุณหภูมิของอากาศร้อนภายในช่วงอุ่นเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ $400 - 700^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 8 การกระจายความร้อนภายในเตาเผาแบบที่ 2 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเตาเผาที่มี การนำเสนอให้ย้ายปล่อยไอเสียไปไว้ที่ช่วงอุ่นให้อุณหภูมิในช่วงอุ่นสูงกว่าแบบเตาเผาปัจจุบันซึ่งส่งผลดีต่อการประหยัดพลังงาน กล่าวคือ การย้ายปล่อย ช่วยให้มีการลดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยช่วงอุ่นที่มีอุณหภูมิสูง $400 - 700^{\circ}\text{C}$ จะช่วยให้แหวนสปริงมีการดูดซับความร้อนโดยสามารถทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง $300 - 350^{\circ}\text{C}$ ก่อนเข้าสู่ช่วงเผาทำให้สามารถลดการใช้พลังงานในช่วงเผาลงได้ ทั้งนี้จากการคำนวณพบว่าแบบที่นำเสนอสามารถประหยัดพลังงานที่ต้องได้ประมาณ 33% เมื่อเทียบกับแบบปัจจุบัน โดยคำนวณจากการใช้พลังงานเพื่อเร่งหัวเผาเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในช่วงเผาให้คงที่ที่ 927°C

5. สรุปผล

จากผลของแบบจำลองเพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในแหวนสปริงแสดงให้เห็นว่าการใช้สมการการแผ่รังสีร่วมกับสมการการนำความร้อนชั่วขณะสมารถที่จะใช้เพื่อทำนายการรับความร้อน

ภายในแหวนสปริงได้ทำให้สามารถลดต้นทุนและเวลาในการทดสอบกับชิ้นงานจริงได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการทำนายผลที่คาดว่าจะได้รับจากการปรับปรุงเตาเผาได้

จากการเปรียบเทียบผลของแบบเตาเผาปัจจุบันและแบบเตาเผาที่นำเสนอแสดงให้เห็นว่าการย้ายปล่องไอเสียจากช่วงเผาไปยังช่วงอุ่นทำให้ลดการปล่อยความร้อนทิ้งโดยนำความร้อนจากส่วนเผาไปใช้ในส่วนอุ่นได้ ซึ่งทำให้แหวนสปริงได้รับความร้อนเริ่มต้นตั้งแต่ช่วงอุ่น ดังนั้นการใช้พลังงานในช่วงเผาสามารถลดลงได้ประมาณ 33% เมื่อเทียบกับเตาเผาแบบปัจจุบัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่ได้สนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kim, J.G., Huh, K.Y., and Kim, I.T. (2000). Three dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace in hot strip mills, *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 38, pp. 589 – 609.
- [2] Kim, M.Y. (2007). A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 3740 – 3748.
- [3] Han, S.H., Baek, S.W., Kang, S.H., and C.Y. Kim (2007). Numerical analysis of heating characteristics of a slab in a bench scale reheating furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 2019 – 2023.
- [4] Maki, A.M., Osterman, P.J., and Luomala, M.J., (2002). Numerical study of the pusher-type slab reheating furnace, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 31 pp.81 – 87.
- [5] Li, Z., Barr, P.V., and Brimacombe, J.K., (1988). Computer simulation of the slab reheating

furnace, *Canadian Metallurgy Quarterly*, vol. 27, pp.187 – 196.

- [6] Jaklic, A., Kolenko, T., and Zupancic B., (2004). The influence of the space between the billets on the productivity of a continuous walking-beam furnace, *Applied Thermal Engineering*, vol 25, pp.783 – 795