การศึกษากระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร

A Study of Ceramic-Wares Firing Process in a Dragon Kiln

ณัฐวุฒิ หนูเกื้อ, ปูมยศ วัลลิกุล, บัณฑิต ฟุ้งธรรมสาร
ศูนย์วิจัยการเผากากของเสีย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
บางซื่อ กทม.10800
โทร. 913-2500 ต่อ 8121 โทรสาร 587-0026 Email : pyy@kmitnb.ac.th

N. Nookua, P. Vallikul, B. Fungtammasan
The Waste Incineration Research Center, Department of Mechanical Engineering
King Mongkut 's Institute of Technology North Bangkok
Bangsue Bangkok 10800
Tel : (662)913-2500 Ext 8121 Fax 587-0026 Email : pyy@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

เตา"มังกร"ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่จังหวัดราชบุรี ซึ่งจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ หลังจากกระบวนการเผาพบผลิตภัณฑ์เสียหายต่อเตาประมาณ 20 % บริเวณด้านหน้าของเตาเสียหายมากที่สุดประมาณ 30 % เพื่อความเข้าใจในพฤติกรรมของเตาจึงทำการศึกษาส่วนประกอบของเตา เวลาและกิจกรรมในรอบการทำงาน ความเสียหายเชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์ การใช้เชื้อเพลิง และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน จากการวิเคราะห์ผลการวัดประเมินได้ว่าสาเหตุของความเสียหายเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น-ลงมีสูงมากในบริเวณด้านหน้าเตา ซึ่งจะทำให้ความร้อนถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ สถานการณ์ดังกล่าวสามารถปรับลดได้โดยการใส่อุปกรณ์สะสมความร้อนไว้ระหว่างกะโหลกเตากับห้องเผาผลิตภัณฑ์ห้องที่หนึ่ง การคำนวณเชิงตัวเลขขั้นต้นเพื่อแสดงการหน่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของก๊าซร้อนโดยการใส่อุปกรณ์สะสมความร้อนจำลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแนวทางดังกล่าวในการแก้ปัญหา

Abstract

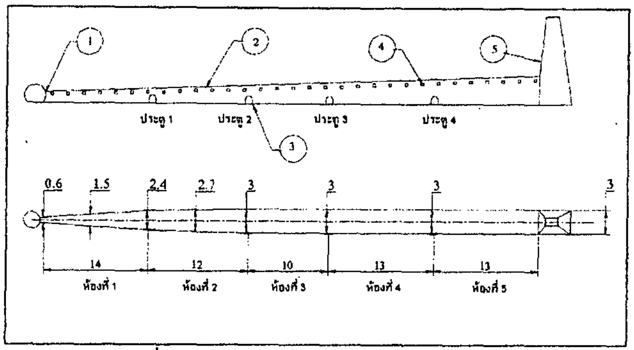
"Dragon" kilns have been used to fire ceramic wares in Ratchaburi Province that vend in and out country. After firing process found the damaged ceramic wares per kiln about 20 %. At the front of the kiln found the damaged ceramic wares about 30 %. To understand the kiln, study the kiln component, time and activity of kiln operation cycle, quantity of damaged ceramic wares, fuel consumption and temperature distribution along the kiln. Analyses of the experimental data shows that the front region where the majority of products damage occurs corresponds to the region where the magnitude and frequency of fluctuation of the rate of change of temperature is highest. The fluctuation can be damped by installing a heat storage box next to the firing box. Numerical simulation of the damping effect on temperature changes resulting from the installation of a pseudo one-dimensional heat storage box is demonstrated. This result points to the potential of using a heat storage device (such as bricks) to reduce the product damage

1. บทนำ

เตามังกรเป็นเตาพื้นบ้านที่ใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผาในจังหวัดราชบุรีโดยใช้เทคโนโลยีจากประเทศจีนซึ่งมีชาวจีนแต้จิ๋วเมื่อประมาณ 60 ปีก่อนเป็นผู้มาสร้างเตา [1] ซึ่งได้พัฒนารูปแบบกระทั่งมาเป็นเตามังกรที่ใช้ในปัจจุบัน ส่วนประกอบของเตาซึ่งแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงความกว้างและความยาวของเตา เตาประกอบด้วย 1. กะโหลกเตาใช้เป็นห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดความร้อน 2. ลำเตาลักษณะคล้ายอุโมงค์ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ก่อนเผาเรียงอยู่ในลำตัวเตา 3. ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์ซึ่งผลิตภัณฑ์จะลำเลียงเข้าออกทางประตูนี้ 4. ตาไฟมีไว้เพื่อสอดฟืนเข้าไปเผาผลิตภัณฑ์ที่บริเวณนั้น 5. ผนังช่องไฟมีลักษณะคล้ายรังผึ้งอยู่ท้ายเตาเพื่อไม่ให้ก๊าซร้อนผ่านออกจากเตาอย่างรวดเร็ว 6. ปล่องไฟจะทำให้ก๊าซร้อนไหลสู่บรรยากาศได้ดี

2. ลักษณะและการทำงานของเตา

เตามังกรมีปริมาตร 285 ลูกบาศก์เมตร ยาว 62 เมตร ความสูงภายในจากด้านหน้าเตา 1.25 เมตรและความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เมตรที่บริเวณกลางเตาและคงที่ไปถึงท้ายเตา ความกว้างภายในด้านหน้าเตา 0.6 เมตรและกว้างขึ้นเป็น 3 เมตรที่บริเวณกลางเตาและคงที่ไปจนถึงท้ายเตา



รูปที่ 1 เตามังกร (1.กะโหลกเตา 2.ลำตัวเตา 3.ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์ 4.ตาไฟ 5.ผนังช่องไฟออก 6.ปล่องไฟ)

การใช้งานของเตาในการเผาผลิตภัณฑ์หนึ่งรอบการทำงานนับตั้งแต่ขนถ่ายผลิตภัณฑ์เข้าเตาจนถึงการนำผลิตภัณฑ์ที่เผาเสร็จแล้วออกจากเตาใช้เวลาประมาณ 48 หรือ 72 ชั่วโมง สำหรับ 72 ชั่วโมงแบ่งเป็นกิจกรรมต่างๆคือ เรียงผลิตภัณฑ์เข้าเตา 4 ชั่วโมง จากนั้นก่ออิฐปิดประตูที่ใช้ขนถ่ายผลิตภัณฑ์ อบผลิตภัณฑ์ในเตาโดยอาศัยก๊าซภายในเตาและผนังเตาที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่โดยปล่อยไว้เป็นเวลาประมาณ 17 ชั่วโมง สุมไฟที่กะโหลกเตาก๊าซร้อนจะไหลเข้าไปในเตาทำให้อุณหภูมิในเตาสูงขึ้นโดยเวลาที่ใช้สุมไฟประมาณ 13 ชั่วโมง จากนั้นใส่เชื้อเพลิงตามตาไฟเพื่อเผาผลิตภัณฑ์สุกตัวโดยเริ่มจากตาไฟแรกก่อนการเดินไฟไปท้ายเตาจากตาแรกถึงตาไฟสุดท้ายใช้เวลาประมาณ 14 ชั่วโมง จากนั้นอบผลิตภัณฑ์ไว้ในเตาปิดอีกประมาณ 13 ชั่วโมง เปิดเตา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นโดยใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง และสุดท้ายลำเลียงผลิตภัณฑ์ออกจากเตาใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงซึ่งกิจกรรมของเตาได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับ 48 ชั่วโมงต่อเตาจะลดเวลาไป 24 ชั่วโมงคือการอบผลิตภัณฑ์ก่อนสุมไฟที่กะโหลกเตา 17 ชั่วโมงและช่วงอื่นรวมกันอีก 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 กิจกรรมและเวลาในการทำงาน

	เวลา(ชั่วโมง)							
กิจกรรม	4	17	13	14	13	2	6	3
เรียงผลิตภัณฑ์	■							
อบผลิตภัณฑ์		■						
สุมไฟที่กะโหลกเตา			■					
เดินไฟไปท้ายเตา				■				
อบผลิตภัณฑ์					■			
เปิดเตา						■		
ปล่อยให้เย็น							■	
ลำเลียงออก								■

3. วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ทดลองเพื่อหาปริมาณความเสียหายและพฤติกรรมเชิงความร้อนภายในเตาซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การตรวจสอบปริมาณความเสียหายของผลิตภัณฑ์ พฤติกรรมการใช้เชื้อเพลิง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา

การตรวจสอบปริมาณความเสียหาย

หลังจากลำเลียงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผา(รูปที่ 2)ออกจากเตาจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกมาเป็น 3 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่งที่มีลักษณะสมบูรณ์ สวยงาม เป็นที่ต้องการของผู้ผลิต, ผลิตภัณฑ์เกรดสองมีความเสียหายจากการเผาเกิดขึ้นเล็กน้อยเช่นมีรอยบิ่นหรือรอยร้าวเล็กๆซึ่งสามารถเอาไปซ่อมแล้วนำมาจำหน่ายได้, และผลิตภัณฑ์แตกหักคือ ผลิตภัณฑ์เสียหายมากไม่สามารถซ่อมได้ต้องนำไปทิ้งอย่างเดียว

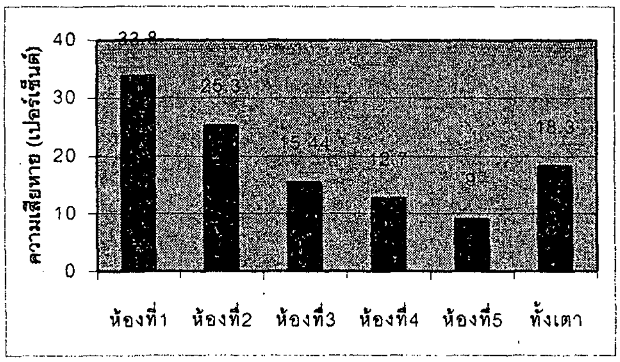
รูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์หลังการเผา

การวิจัยจะทำการหาปริมาณความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่ส่วนต่างๆของเตา โดยแบ่งเตาออกเป็นห้าห้องโดยใช้ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์เป็นตัวแบ่งดังแสดงในรูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์เสียหายคือผลรวมของผลิตภัณฑ์เกรดสองกับผลิตภัณฑ์แตกหัก สำรวจความเสียหายในแต่ละห้องเป็นเปอร์เซ็นต์ ลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์นั้น ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าเตาและความเสียหายลดลงไปเรื่อยๆเมื่อระยะห่างจากกะโหลกเตามากขึ้น ได้ทำการบันทึกลักษณะการเสียหายของผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจากการผลิตสี่เตา ได้ผลดังนี้ ห้องที่หนึ่งเสียหาย 33.8 % ห้องที่สองเสียหาย 25.3 % ห้องที่สามเสียหาย 15.4 % ห้องที่สี่เสียหาย 12.7 % ห้องที่ห้าเสียหาย 9.0 % ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเสียหาย 18.3 % ซึ่งความเสียหายได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3

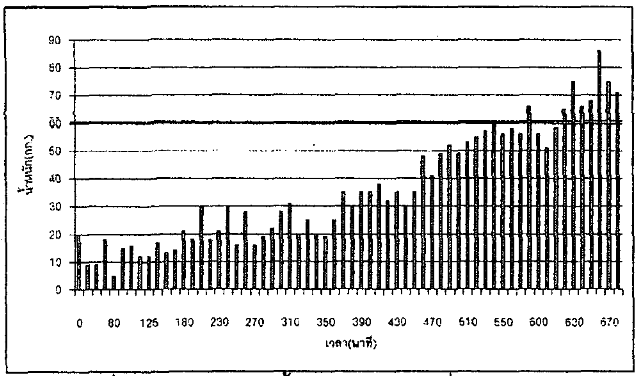
พฤติกรรมการใช้เชื้อเพลิงในเตา

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์คือไม้ 2 ชนิดได้แก่ไม้เบญจพรรณและไม้ยางพาราซึ่งมีค่าความร้อน 17,886.95 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และ 18,142.03 กิโลจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับซึ่งหามาจากเครื่องบอมบ์แคโลริมิเตอร์ [2] การใช้เชื้อเพลิงในเตาจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงเวลาคือเชื้อเพลิงช่วงสุมไฟที่หัวเตาใช้ทั้งไม้เบญจพรรณและไม้ยางพารา และช่วงเดินไฟไปท้ายเตาส่วนใหญ่ใช้ไม้ยางพารา การวิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมการให้เชื้อเพลิงโดยพิจารณาการใช้เชื้อเพลิงสัมพันธ์กับเวลา รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการสุมไฟที่หัวเตาในช่วงแรกเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบทั้งด้านช่วงเวลาและน้ำหนักของฟืน รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงช่วงท้ายเตาจะมากกว่าด้านหน้าเตามากเพราะว่าด้านหลังเตาจะมีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้า

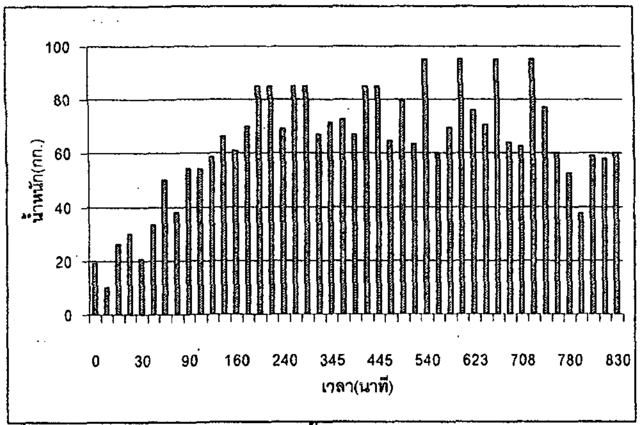
มาก และมีลักษณะเป็นคาบซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์บางตาที่จัดเรียงในเตามีคุณสมบัติเสมือนตัวกักเก็บความร้อน(Thermal Storage)



รูปที่ 2 ลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์แบ่งตามห้อง



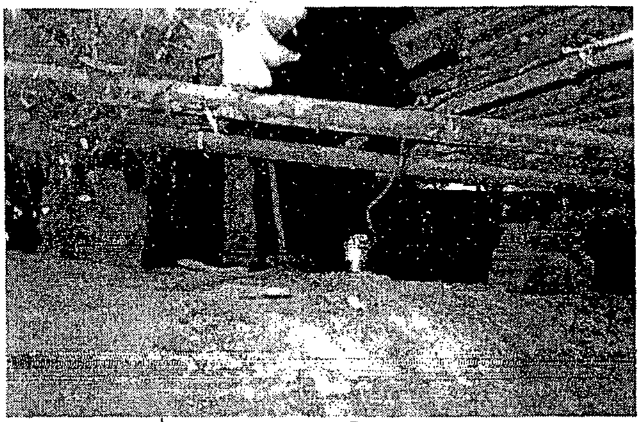
รูปที่ 3 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงช่วงสุมไฟที่กะโหลกเตา



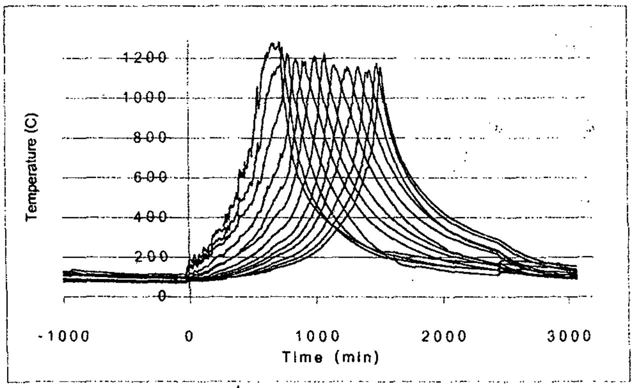
รูปที่ 4 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงช่วงเดินไฟไปท้าย

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา

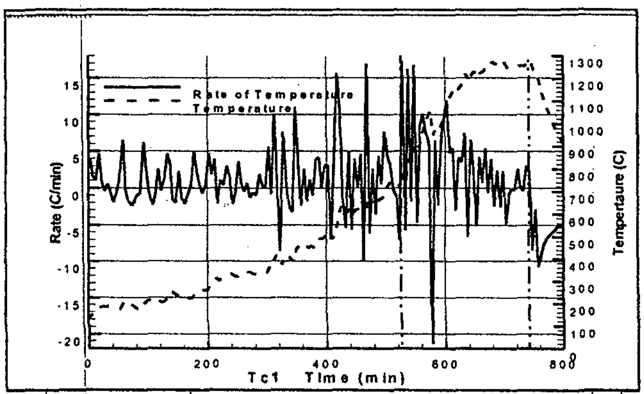
ลักษณะอุณหภูมิภายในเตาทำการวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล type K ปลายหุ้มด้วยเซรามิกซึ่งนำมาวัดอุณหภูมิที่หลังคาเตาดังแสดงในรูปที่ 5 ทำการบันทึกอุณหภูมิ 13 จุดพร้อมๆกันโดยห่างกันจุดละ 4 ตาไฟ (ประมาณ 4.5 เมตร) และบันทึกทุก 5 นาที ผลการวัดอุณหภูมิแสดงอยู่ในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าอุณหภูมิขาขึ้นมีการแกว่งมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่งและสอง เพื่อให้เห็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงได้คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลทุกตัว และแสดงผลเป็นกราฟเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่ง สอง และหกแสดงในรูปที่ 7 ถึง 9 ตามลำดับ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่งและสองเปลี่ยนแปลงสูงมากทั้งในการเพิ่มขึ้นและลดลง ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลตัวที่หกที่อยู่ไกลจากกะโหลกเตาออกไปมีการเปลี่ยนแปลงน้อย และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับเทอร์โมคัปเปิลตัวที่เจ็ดถึงตัวที่สิบสามจึงไม่ได้แสดงผลไว้ในที่นี้



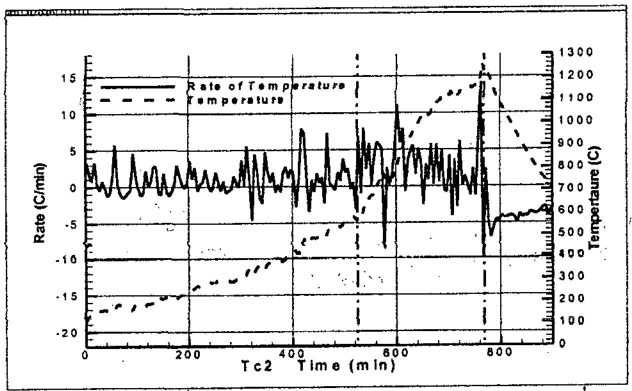
รูปที่ 5 การประกอบเทอร์โมคัปเปิลลงบนเตา



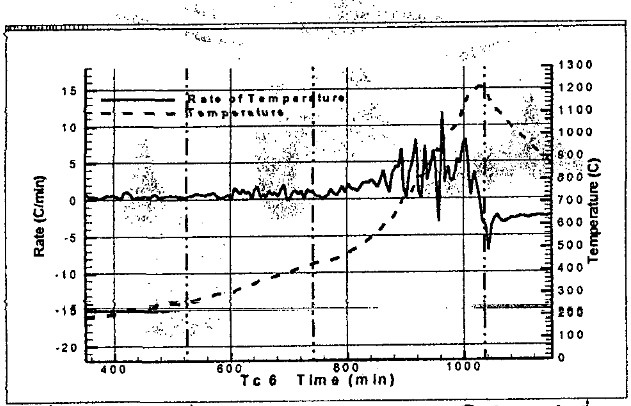
รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในเตา



รูปที่ 7 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่ง



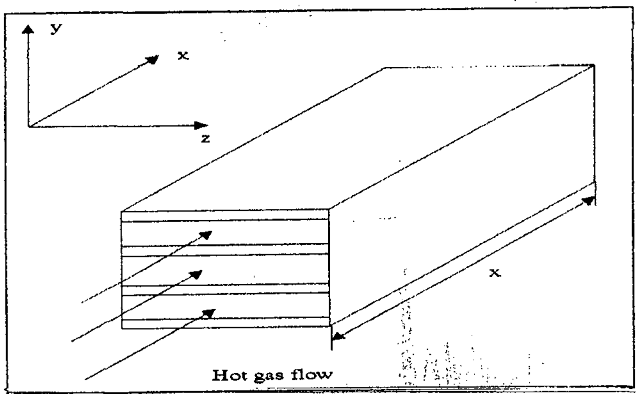
รูปที่ 8 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคับเปิลตัวที่สอง



รูปที่ 9 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคับเปิลตัวที่หก

4. แนวทางการแก้ไข

เพื่อลดอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อนจึงได้ศึกษาเชิงตัวเลขในติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน [3] โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 วัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน

แบ่งวัสดุเก็บความร้อนเป็น element เล็กๆ โดยมีสมการครอบคลุมของก๊าซร้อนเมื่อไหลผ่านวัสดุกักเก็บความร้อนดังนี้

$$\frac{hA\Delta x}{L}\left(t_m - t_f\right) + m_f c_f t_f\big|_x = m_f c_f t_f\big|_{x+\Delta x} + S_f \Delta x \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau}$$

เทอมทางซ้ายมือได้แก่ความร้อนที่วัสดุกักเก็บความร้อนถ่ายทอดให้กับก๊าซร้อนบวกกับพลังงานความร้อนของก๊าซร้อนที่เข้า Element เทอมทางขวามือประกอบด้วยพลังงานความร้อนของก๊าซร้อนที่ออกจาก Element บวกกับพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ใน Element ซึ่งมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้ ส่วนสมการครอบคลุมของวัสดุกักเก็บความร้อนคือ

$$\frac{hA\Delta x}{L}\left(t_f - t_m\right) = S_m \Delta x \rho_m c_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau}$$

เทอมทางซ้ายคือความร้อนที่ก๊าซร้อนถ่ายเทสู่วัสดุกักเก็บความร้อน ส่วนเทอมทางขวาคือพลังงานความร้อนที่สะสมในวัสดุกักเก็บความร้อน เพื่อให้ง่ายต่อการหาคำตอบของระบบสมการจึงทำการเปลี่ยนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติโดย T_f คืออุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อน T_m คืออุณหภูมิไร้มิติของวัสดุเก็บความร้อน ξ คือระยะทางไร้มิติ และ η คือเวลาไร้มิติ ได้สมการในรูปตัวแปรไร้มิติดังนี้

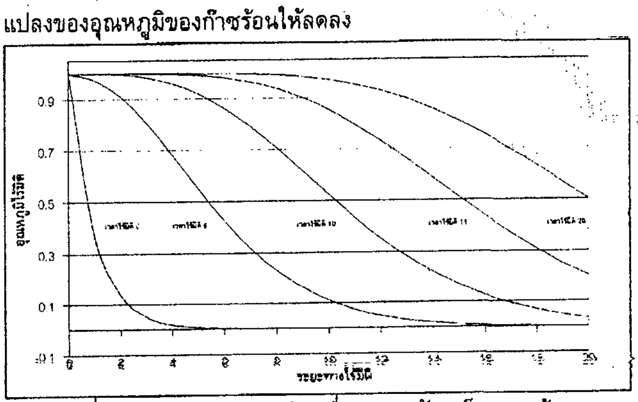
ก๊าซร้อน $$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f$$

วัสดุกักเก็บความร้อน $$\frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_f - T_m$$

โดยมีเงื่อนไขดังนี้ $\eta = 0 \quad T_m = 0$

$\xi = 0 \quad T_f = 1$

นำตัวอย่างการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งคำนวณโดยวิธี Finite Volume [4] และ Runge Kutta [5] กำหนดให้วัสดุกักเก็บความร้อนที่มีความยาวไร้มิติ $\xi = 20$ นำมาวางขวางการไหลของก๊าซร้อน เริ่มต้นระบบอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนที่อุณหภูมิไร้มิติ 0 หน่วย และเปลี่ยนอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนที่ทางเข้าทันทีทันใดจาก 0 เป็น 1 นำผลการคำนวณเชิงตัวเลขของอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนที่ระยะทางต่างๆ ในวัสดุเก็บความร้อนมาแสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางออกค่อยๆเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วัสดุกักเก็บความร้อนลงในเตาสามารถหน่วงให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของก๊าซร้อนให้ลดลง



รูปที่ 11 อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางออกวัสดุเก็บความร้อน

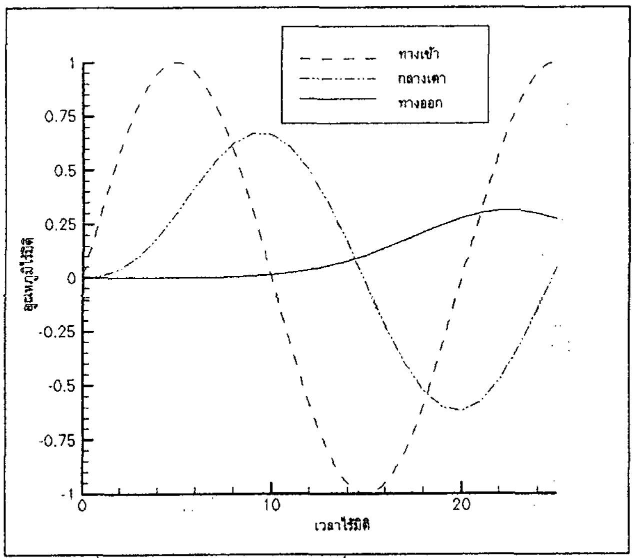
เปลี่ยนรูปแบบทางเข้าให้เป็นแบบ Sine wave โดยมีเงื่อนไขใหม่ดังนี้สมการดังนี้

$\eta = 0 \qquad T_m = 0$

$\xi = 0 \qquad T_f = \sin(0.1 \times \eta)$

ผลการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงในรูปที่ 12 พบว่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่กลางเตาและที่ทางออกถูกหน่วงเช่นกัน

พฤติกรรมเช่นนี้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงที่วัดได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตา (ดูภาพที่ 7 ถึง 9) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคับเปิลตัวหลัง ๆจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคับเปิลตัวแรกๆ ทั้งนี้ตัวผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านหน้าทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน



รูปที่ 12 อุณหภูมิของก๊าซร้อนเมื่อทางเข้าเป็น Sine wave

5. สรุปผลการทดลอง

หนึ่งรอบการทำงานของเตามังกรใช้เวลาทั้งสิ้น 72 ชั่วโมง ในกรณีที่เร่งการผลิตผู้ผลิตสามารถลดขั้นตอนการอบผลิตภัณฑ์และขั้นตอนอื่นอีก 24 ชั่วโมง ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ต่อเตา 18.3 % ซึ่งห้องที่หนึ่งโดยเสียหายมากที่สุดคือ 33.8 % จากการทดลองประเมินได้ว่าสาเหตุของการเสียหายเกิดเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้น-ลงมีสูงมากในบริเวณห้องที่หนึ่งและสองทำให้ผลิตภัณฑ์ตกอยู่ในสภาวะการถ่ายเทความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอเป็นช่วง สถานการณ์ดังกล่าวสามารถปรับให้เป็นแบบมีการถ่ายเทความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการเพิ่มอุปกรณ์สะสมความร้อนจำลองแสดงให้เห็นถึงการหน่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

6. ข้อเสนอแนะ

การสุมไฟที่กะโหลกเตานั้นใช้ประสบการณ์ของคนเตาเป็นตัวกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงและระยะเวลาในการใส่เชื้อเพลิงซึ่งแต่ละคนมีลักษณะการใส่เชื้อเพลิงต่างกันไปดังนั้นจึงควรมีการศึกษาและควบคุมรูปแบบการใส่ฟืนที่กะโหลกเตาเพื่อให้ได้ลักษณะการสุมไฟที่หัวเตาอย่างเหมาะสมและมีรูปแบบเดียวกัน(มีความสม่ำเสมอมากขึ้น)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลังการเผาในการวิจัยครั้งนี้แบ่งเป็น 5 ส่วนซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในภาพรวมเพื่อให้ทราบรายละเอียดที่ชัดเจนจึงเสนอให้เก็บข้อมูลของผลิตภัณฑ์หลังการเผาและรูปแบบการเรียงผลิตภัณฑ์ในแต่ละตาเพื่อนำข้อมูลนี้พร้อมกับอุหภูมิและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในตานั้นมาวิเคราะห์

ศึกษา ออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์เก็บความร้อนซึ่งมีประโยชน์ในการหน่วงอัตราการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มากเกินไปที่บริเวณด้านหน้าของเตา การออกแบบควรเริ่มจากการจำลองการไหลภายในเตาก่อน ทั้งนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาและเก็บข้อมูลทางด้านการสันดาป, ปริมาณและอัตราก๊าซร้อนที่ไหลเข้าเตาเพื่อจำลองสถานะการณ์อย่างเป็นระบบก่อนที่จะสร้างและติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน

7.กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.)ผู้สนับสนุนทุนวิจัย คุณสมนึก ชินภาณุวัฒน์ เจ้าของโรงงานเรืองศิลป์ 2 ผู้อนุญาตให้ใช้โรงงานเป็นสถานที่วิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] เพื่อความเข้าใจในแผ่นดิน "ราชบุรี". กรุงเทพ : สำนักพิมพ์สารคดี, มิถุนายน 2541

[2] จเร ลิมปนวัสส์ และปิติณัตต์ ตรีวงศ์. การวิเคราะห์และปรับปรุงระบบการวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งด้วยบอมบ์และบอยเลอร์แคโลริมิเตอร์. : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542

[3] Schmidt, Frank W. and Willmott, A. John Thermal energy storage and regeneration. New York : McGraw-Hill, 1981

[4] Versteeg, H.K..and Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dyanamics the Finite Volume Method. New York : John Wiley & Sons, 1995

[5] Kreyszig, Erwin Advanced Engineering Mathematics. : John Wiley & Sons, 1983