

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา จังหวัดราชบุรี

โครงการย่อยที่ 2

การปรับปรุงกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร

ผู้วิจัย

นาย ปุณยศ วัลลิกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสมนึก ชินภาณวัฒน์ เจ้าของโรงโม่เครื่องศิลป์ 2 ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต พึ่งธรรมสาร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมาโดยตลอดการดำเนินการวิจัย และขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยนายณัฐภูมิ หนูเกื้อ ที่ได้ทำงานหนักเพื่อให้ผลงานวิจัยนี้มีผลออกมาเป็นที่น่าสนใจ ขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมเครื่องกลและคณะวิศวกรรมศาสตร์ในการใช้โปรแกรม Matlab เพื่อการการคำนวณเชิงตัวเลข ขอขอบคุณคุณพิมพ์วัลย์ วัฒนภาส กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จะสำเร็จได้ถ้าไม่มีหน่วยงานสนับสนุนการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และขอบคุณงานส่งเสริมวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนืออำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆมา ณ โอกาสนี้ด้วย

บทคัดย่อ

สัญญาเลขที่ : RDG/0017/2542

ชื่อโครงการ : การปรับปรุงกระบวนการเผาผลิตถ่านเครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร

ผู้วิจัย : นายปุมยศ วลิตกุล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Email Address : pyy@kmitnb.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ปี

วัตถุประสงค์ของโครงการ : เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจขั้นมูลฐานในกระบวนการทางความร้อนที่สัมพันธ์กับการเผาผลิตถ่านเครื่องปั้นดินเผาในเตามังกรและลดความสูญเสียในกระบวนการเผาผลิตถ่านเครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร

วิธีการวิจัย : เก็บข้อมูลภาคสนามของความเสียหายของผลิตภัณฑ์พร้อมกับพฤติกรรมเชิงความร้อนวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายของผลิตภัณฑ์กับพฤติกรรมเชิงความร้อนของเตา เสนอแนวทางการแก้ไขกระบวนการเผาเพื่อลดความเสียหาย

ผลการวิจัย: เตามังกรเป็นเตาที่มีลักษณะเฉพาะของจังหวัดราชบุรีมีขนาดความจุภายในเตา 285 ลูกบาศก์เมตร ตัวเตาพัฒนาขยายขนาดมาจากเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาแบบดั้งเดิม หนึ่งรอบการทำงานของเตามังกรใช้เวลาทั้งสิ้น 72 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาจำแนกได้เป็นสามประเภทคือ เกรดหนึ่ง, เกรดสอง (หลังจากซ่อมแซมแล้วสามารถนำไปจำหน่ายได้) และผลิตภัณฑ์แตกหัก สำหรับงานวิจัยนี้ถือว่าผลิตภัณฑ์เสียหายคือผลิตภัณฑ์เกรดสองและผลิตภัณฑ์แตกหักรวมกัน ความเสียหายของผลิตภัณฑ์มีมากที่สุดบริเวณด้านหน้าเตาซึ่งคิดเป็น 30% ของผลิตภัณฑ์ ณ.บริเวณนั้น เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตามังกรเป็นไม้ฟืนซึ่งมีค่าความร้อนโดยเฉลี่ย 18,014 kJ/kg ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสุ้ไฟที่หัวเตาทั้งสิ้น 2,243 kg และใช้ในการเดินไฟไปท้ายเตา 5,682 kg อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผาคือ 1,274 °C จากการบันทึกอุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ แล้วนำมาประมวลพบว่อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลามีขนาดสูงมากบริเวณด้านหน้าเตา ในขณะที่บริเวณถัดมาอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และจะสูงอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อเดินไฟมาถึงบริเวณนั้น

สรุปผลการวิจัย : จากการวิเคราะห์ผลการวัดประเมินได้ว่าสาเหตุของความเสียหายเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น-ลงมีสูงมากในบริเวณด้านหน้าเตา ซึ่งจะทำให้ความร้อนถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ สถานการณ์ดังกล่าวสามารถปรับลดได้โดยการใส่อุปกรณ์สะสมความร้อนไว้ระหว่างกะโหลกเตากับห้องเผาผลิตถ่านห้องที่หนึ่ง การคำนวณเชิงตัวเลขขั้นต้นเพื่อแสดงการหน่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของก๊าซร้อน โดยการใส่อุปกรณ์สะสมความร้อนจำลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแนวทางดังกล่าวในการแก้ปัญหา

งานที่จะทำในอนาคต : คำนวณออกแบบอุปกรณ์สะสมความร้อนสำหรับการใช้งานในเตาจริงเพื่อหน่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะด้านหน้าเตา และทำการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงการสันดาป

Abstract

Project Code : RDG/0017/2542

Project Title : Improvement of firing process of ceramic ware in a dragon kiln

Investigator : Pumyos Vallikul, Departmet of Mechanical Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok.

Email Address : pyy@kmitnb.ac.th

Project Period : 1 year

Objectives : To study the fundamental thermal process related to the firing of ceramic wares in a "dragon kiln" and to explore possibilities for the reduction of ware damage.

Research Methodology: Data on quantity of ceramic wares damaged, firing load and temperature distribution within the dragon kiln is collected. The relationship between the firing rate and the product damaged is analyzed. Methods for improving the firing process are then determined.

Results: Dragon kiln, a typical type of ceramic furnace in Ratchaburi province, is a large kiln of 285 cubicmeters in volume. It has been developed and its size enlarged from the conventional ceramic kiln used in Thailand. One firing cycle lasts 72 hours, and the quality of the fired products are classified as the first grade, the second grade (minor repair is needed) and the totally damaged products. The last two classes are considered as the damaged products in our study. Most of the damaged products are found at the front part of the kiln and are about 30% at that location. The kiln is fired with wood: 2,243 kg of which is brunt during the preheating process and 5,682 kg during the stroking process along the length of the kiln. The average heating value of the wood is 18,014 kJ/kg. The maximum firing temperature is 1,274 °C. The rate of change of temperature with time along the kiln is found to fluctuate wildly especially in the front chamber of the kiln. The temperature along other parts of the kiln however increases steadily and reaches a maximum, before declining, at the end of stoking.

Conclusion : 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 in the appendix of this report. This result points to the potential of using a heat storage device (such as bricks) to reduce the product damage.

Future research: Detailed calculation and design of an actual heat storage box for damping the hot gas temperature fluctuation and combustion analysis within the kiln will be advanced.

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)
ทุนวิจัยฝ่ายสนับสนุนการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

1. ชื่อโครงการ

การปรับปรุงกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร
Improvement of firing process of ceramic ware in a dragon kiln

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

ชื่อ-สกุล นายปุมยศ วัลลิกุล

Mr. Pumyos Vallikul

หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ที่อยู่ 1518 ถ.พิบูลสงคราม บางซื่อ กทม. 10800

โทรศัพท์ 02 9132500 ต่อ 8321 หรือ 8315

โทรสาร 02 5870026 ต่อ 111

E-mail pyy@kmitnb.ac.th

3. สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

4. งบประมาณทั้งโครงการ 249,300 บาท

5. ระยะเวลาดำเนินงาน 1 ปี

6. ได้เสนอโครงการนี้หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งทุนอื่น
ที่ใดบ้าง

☒ ไม่ได้เสนอต่อแหล่งทุนอื่น

☐ เสนอต่อ.....สำนักงานงบประมาณ

หมวดเงินสนับสนุนวิจัย

งบประมาณประจำปีงบประมาณ 2541

7. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

หลังจากเผาผลิตภัณฑ์ดินเผาในเตามังกรแล้วจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เสียหายประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด และความเสียหายส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าเตา โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่มีเสียหายเกือบทั้งหมด จากการที่บริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับกระโหลกเตาที่เป็นห้องเผาไหม้หลักและความร้อนถ่ายเทสู่ผลิตภัณฑ์โดยตรง กระบวนการทางความร้อนของการเผาผลิตภัณฑ์บริเวณนี้เทียบกับบริเวณอื่นๆของเตาจึงมีความสำคัญและอาจเป็นสาเหตุหลักของความเสียหาย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
หน้าสรุปโครงการ	จ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฉ
บทที่	
1. บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขต	2
วิธีการดำเนินการ	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ลักษณะและการทำงานของเตา	4
ส่วนประกอบของเตา	4
ขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์	10
3. ผลิตภัณฑ์และความเสียหาย	17
ผลิตภัณฑ์ที่เผาในเตามังกร	17
การสำรวจลักษณะความเสียหาย	21
4. พฤติกรรมเชิงความร้อนของเตา	28
การใช้เชื้อเพลิงที่กระโหลกเตา	28
การใช้เชื้อเพลิงช่วงเดินไฟไปท้ายเตา	33
ผลการวัดอุณหภูมิในเตา	37
5. อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน	43
อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนจำลอง	43
สมการครอบคลุม	43
การแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลข	46
ผลการคำนวณ	48
6. สรุปผลการทดลอง	51
ข้อเสนอแนะ	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	54
บทความ การศึกษาเบื้องต้นของเตามังกร: รูปร่างการทำงานและสัดส่วน	
ความเสียหายของผลิตภัณฑ์จากการเผา	55
บทความ การศึกษากระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร	61

คำอธิบายสัญลักษณ์

อักษรอารบิก

A	พื้นที่ผิวที่ถ่ายเทความร้อน
c	ความจุความร้อนจำเพาะ
e	ขอบของไฟไนต์โวลุ่มทางทิศตะวันออก
E	จุดกึ่งกลางของไฟไนต์โวลุ่มที่ติดกันทางทิศตะวันออก
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
L	ความยาวของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน
m	อัตราการไหลเชิงมวล
P	จุดกึ่งกลางของไฟไนต์โวลุ่ม
S	พื้นที่หน้าตัด
t	อุณหภูมิ
T	อุณหภูมิไร้มิติ
v	ปริมาตร
x	ระยะทางตามแนวแกน x
w	ขอบของไฟไนต์โวลุ่มทางทิศตะวันตก
W	จุดกึ่งกลางของไฟไนต์โวลุ่มที่ติดกันทางทิศตะวันตก
y	ระยะทางตามแนวแกน y

อักษรกรีก

ρ	ความหนาแน่น
ξ	ระยะทางไร้มิติ
λ	ความยาวไร้มิติ
η	เวลาไร้มิติ
τ	เวลา
ϕ	เส้นผ่านศูนย์กลาง

ตัวห้อย

0	จุดเริ่มต้น
e	ขอบของไฟไนต์โวลุ่มทางทิศตะวันออก
E	จุดกึ่งกลางของไฟไนต์โวลุ่มที่ติดกันทางทิศตะวันออก

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวห้อย (ต่อ)

f	ก๊าซร้อน
m	วัสดุที่เก็บพลังงานความร้อน
P	จุดกึ่งกลางของไฟไนต์โวลุ่ม
w	ขอบของไฟไนต์โวลุ่มทางทิศตะวันตก
W	จุดกึ่งกลางของไฟไนต์โวลุ่มที่ติดกันทางทิศตะวันตก
$ _x$	ที่ทางเข้าของอีลิเมนต์
$ _{x+\Delta x}$	ที่ทางออกของอีลิเมนต์

บทที่ 1

บทนำ

เตาเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาจังหวัดราชบุรีหรือภาษาพื้นบ้านเรียกว่าเตามังกรเป็นเตาเผาที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์โอ่งมังกรที่พบเห็นกันทั่วไป เตามังกรพัฒนารูปแบบจากเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาจากประเทศจีน [1]

เตาเผาเครื่องปั้นดินเผานี้เป็นเตาเผาแบบดราฟต์แนวนอน (Horizontal draft kiln) มีการเคลื่อนที่ของเปลวไฟจากทางเข้าก๊าซร้อนด้านหน้าเตาไปยังด้านหลังเตาตามแนวดังฉากกับผลิตภัณฑ์ เตาเผาแบบดราฟต์แนวนอนสันนิษฐานว่าเกิดที่ประเทศเกาหลี จีน และญี่ปุ่นพร้อมๆ กัน [2] เตาเผายุคแรกเกิดขึ้นโดยการเจาะเนินดินให้เป็นรูใหญ่พอที่จะให้คนคลานเข้าไปวางผลิตภัณฑ์ดิบได้ และช่วงท้ายของเตาทำเป็นปล่องไฟสู่บรรยากาศ เมื่อสร้างโพรงแล้วจึงสร้างห้องไฟ (Fire box) แล้วจึงปล่อยให้ส่วนต่างๆแห้ง ทำการเผาเตาเพื่อให้เตาเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเตาที่มีลักษณะแข็ง เพื่อที่จะพัฒนาเตาให้ดีขึ้นและสะดวกในการทำงานจึงเปลี่ยนจากเตาที่เจาะอุโมงค์ดินมาเป็นเตาที่สร้างโดยอิฐแทน แบ่งเตาเผาแบบดราฟต์แนวนอนสามารถแบ่งได้เป็นสามชนิดใหญ่ๆ ได้แก่ เตาเผาแบบห้องเดียว เตาเผาแบบหลายห้อง เตาเผาแบบท่อ โดยเตามังกรสามารถจัดอยู่ในชนิดสุดท้าย

จากประวัติจากผลการสำรวจการอุตสาหกรรมและการพาณิชย์กรรมแห่งประเทศไทย [1] พบว่า โรงงานเครื่องปั้นดินเผาเก่าเซ่งหลีเป็นแห่งแรกที่ราชบุรีตั้งอยู่ริมฝั่งแม่น้ำแม่กลองโดยมีนายช่างทำเครื่องปั้นดินเผาชาวจีนแต่จีวชื่อ จือเหม็ง แซ่ฮึง เป็นผู้ก่อตั้งโดยทำเป็นเตาแบบดราฟต์แนวนอนแบบท่อซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาที่ใช้ในปัจจุบัน มีหลักฐานปรากฏใน [1] ว่านายช่างสนั่น โรงโอ่งรุ่งศิลป์เป็นผู้เริ่มขยายเตาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อประมาณพ.ศ. 2531 และมีโรงโอ่งอื่นๆทำตามกันมา ในปัจจุบันโรงงานทำโอ่งของราชบุรีมีประมาณ 50 โรง เกือบทั้งหมดอยู่ในอำเภอเมืองตั้งติดกันคล้ายโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม โดยเตามังกรใช้ผลิตโอ่งและกระถางขนาดต่างๆจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ตลาดต่างประเทศที่สำคัญได้แก่ประเทศญี่ปุ่น ออสเตรเลีย ยุโรปและอเมริกาเหนือ อย่างไรก็ตามในระยะหลังการส่งออกไปยังตลาดเหล่านี้ได้ลดลงอย่างมากเนื่องจากการแข่งขันจากประเทศเพื่อนบ้านโดยเฉพาะประเทศเวียดนามซึ่งได้เปรียบทั้งค่าแรงและค่าต้นทุนวัสดุที่ต่ำกว่าจึงจำเป็นที่อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดราชบุรีต้องลดค่าใช้จ่ายในการผลิตพร้อมทั้งยกมาตรฐานในการผลิตด้วย

เตามังกรเป็นเตาขนาดใหญ่มีปริมาตรภายในเตาโดยรวมประมาณ 285 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งปริมาตรดังกล่าวทำให้เตาชนิดนี้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้ครั้งละจำนวนมาก

แม้ว่าเตามังกรได้ถูกใช้ในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาเป็นเวลานานแต่ยังคงรูปแบบดั้งเดิมที่สืบทอดกันมาไม่ว่าจะเป็นในด้านรูปร่างของเตา หรือในด้านการบวนการเผาให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ซึ่งยังคงใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากจำนวนผลิตภัณฑ์ต่อเตาที่สูงในขณะที่ค่าใช้จ่ายในการผลิตไม่สูงมากเตามังกรจึงยังคงเป็นเตาเผาที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เตามังกรไม่ได้ผ่านการพัฒนาเชิงวิศวกรรมมากนักตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา ตัวเลขประสิทธิภาพเชิงปริมาณการผลิตต่อเตาจึงต่ำ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์มีการแตกร้าวเสียหายประมาณ 20 เปอร์เซนต์ต่อเตา ซึ่งความเสียหายส่วนใหญ่จะอยู่ที่บริเวณด้านหน้าเตาซึ่งเสียหายกว่า 30 เปอร์เซนต์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ที่อยู่บริเวณด้านหน้าเตาเสียหาย 80 เปอร์เซนต์ ตัวเลขแสดงความเสียหายดังกล่าวเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำเตามังกรไปใช้เผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่มีมูลค่าสูง โครงการนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาและทำความเข้าใจขั้นมูลฐานในกระบวนการทางความร้อนที่สัมพันธ์กับการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกรเพื่อลดการสูญเสียของผลผลิต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจขั้นมูลฐานในกระบวนการทางความร้อนที่สัมพันธ์กับการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร
2. เพื่อหาแนวทางการลดการสูญเสียของผลผลิตในกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร

ขอบเขต

1. เตาที่ใช้เป็นเตามังกรที่ตั้งอยู่ในโรงงานเครื่องเคลือบ 2 ของคุณสมนึก ชินภาณุวัฒน์ มีความยาว 62 เมตร กว้าง 3 เมตร สูง 2 เมตร
2. ผลิตภัณฑ์หลังการเผาแบ่งออกเป็นสามประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่ง ผลิตภัณฑ์เกรดสองและผลิตภัณฑ์แตกหัก ในการวิเคราะห์ความเสียหายใช้ผลิตภัณฑ์เกรดสองกับผลิตภัณฑ์แตกหักรวมกัน
3. เชื้อเพลิงที่ใช้ในเผาผลิตภัณฑ์ใช้เฉพาะไม้ยางพาราและไม้เบญจพรรณ
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ใช้อุณหภูมิบันทึกค่าจากกึ่งกลางของหลังคาเตา
5. ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมความเสียหายกับพฤติกรรมเชิงความร้อนโดยใช้การวิเคราะห์อุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่บันทึกจากหลังคา

วิธีการดำเนินการ

1. ตรวจสอบลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์โดยแบ่งเตาออกเป็นห้าส่วนโดยใช้ประตูเตาเป็นตัวแบ่ง

2. บันทึกพฤติกรรมการใช้เชื้อเพลิงภายในเตา เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาแบ่งเป็นหลักๆได้สองส่วนหลักคือเชื้อเพลิงช่วงสุ่มไฟที่กะโหลกเตากับเชื้อเพลิงช่วงเดินไฟไปท้ายเตา โดยบันทึกน้ำหนักของเชื้อเพลิงและเวลาที่ใช้ในขณะนั้น
3. บันทึกอุณหภูมิภายในเตาโดยเจาะรูที่หลังคาเตาแล้วใส่เทอร์โมคัปเปิลลงไป บันทึกอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์เก็บสัญญาณ
4. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของความเสียหายกับพฤติกรรมเชิงความร้อน
5. ใช้ผลวิเคราะห์ข้อ 4 เพื่อเสนอวิธีลดความเสียหายอันเนื่องมาจากพฤติกรรมเชิงความร้อน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบพฤติกรรมเชิงความร้อนของเตามังกร
2. แนวทางลดความสูญเสียในเตามังกร

บทที่ 2

ลักษณะและการทำงานของเตา

ข้อมูลในบทนี้ได้มาจากการปฏิบัติการบันทึกข้อมูลจากโรงงานเรืองศิลป์ 2 ซึ่งอยู่ที่ 34/1 ถนนเพชรเกษม ต.เจดีย์หัก อ.เมือง จ.ราชบุรี ประกอบด้วยลักษณะและส่วนประกอบของเตา ตั้งแต่กะโหลกเตาจนถึงปล่องไฟ ตลอดจนขั้นตอนในการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาตั้งแต่เรียงผลิตภัณฑ์จนถึงเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ออกจากเตา

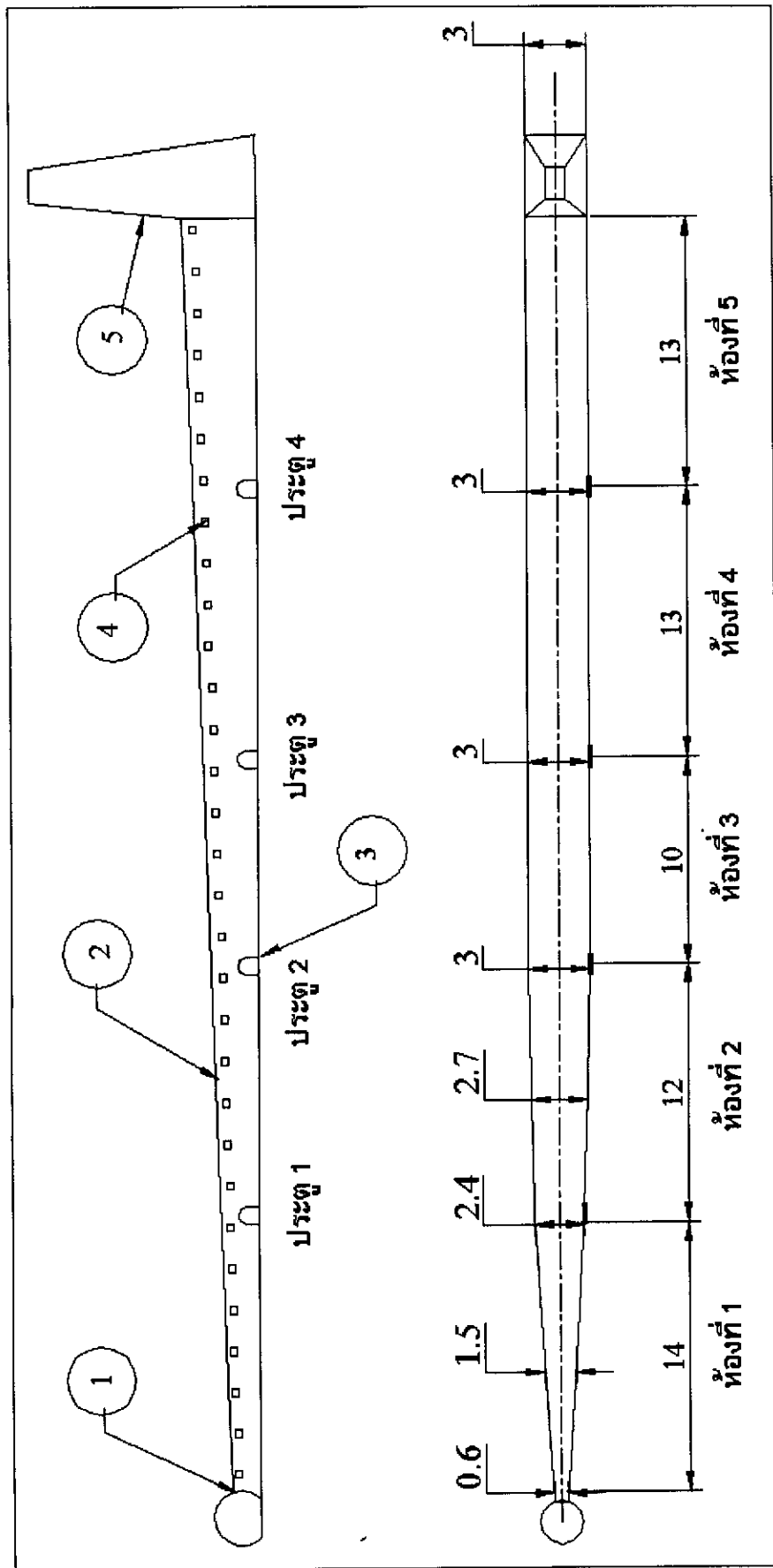
ส่วนประกอบของเตา

เตาเผาเครื่องปั้นดินเผาจังหวัดราชบุรี (เตามังกร) เป็นเตาเผาขนาดใหญ่มีความจุประมาณ 285 ลูกบาศก์เมตร ยาว 62 เมตร ความกว้างภายในใกล้กะโหลกเตากว้าง 0.6 เมตร ขนาดความกว้างขยายขึ้นจนถึงขนาด 3 เมตรที่บริเวณกลางเตาและขนาดคงที่ที่ 3 เมตรจนถึงท้ายเตา ความสูงภายในเตาเพิ่มขึ้นจาก 1.25 เมตรใกล้กะโหลกเตาเป็น 2 เมตรเมื่ออยู่ตรงกลางเตาและคงที่ที่ 2 เมตรไปจนถึงท้ายเตาดังภาพที่ 1 เตามังกรในแต่ละโรงงานมีขนาดไม่เท่ากัน แต่มีลักษณะและส่วนประกอบหลักที่เหมือนกัน

จากภาพที่ 1 เตามังกรสามารถแบ่งได้เป็นส่วนต่างๆคือ 1)กะโหลกเตา, 2)ตัวเตา, 3)ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์, 4)ตาไฟ, 5)ผนังช่องไฟออก และ 6)ปล่องไฟตามลำดับ แต่ละส่วนมีการใช้งานดังนี้ กะโหลกเตาทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้เพื่อให้ได้ก๊าซร้อน ซึ่งก๊าซร้อนถูกดูดโดยอาศัยความดันลดด้วยตราฟต์ธรรมชาติ (Natural draft) ผ่านเข้าสู่ตัวเตาซึ่งมีผลิตภัณฑ์จัดเรียงอยู่ เมื่อก๊าซร้อนไหลผ่านผลิตภัณฑ์จะถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ และขณะเดียวกันพาความร้อนออกจากเตาผ่านผนังช่องไฟออกที่อยู่ท้ายเตา และออกสู่บรรยากาศผ่านปล่องไฟตามลำดับ ลักษณะโดยละเอียดของส่วนต่างๆของเตาสามารถบรรยายได้ดังต่อไปนี้

กะโหลกเตา

กะโหลกเตาอยู่ด้านหน้าสุดของเตาทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนชั้นเริ่มต้นภายในเตาซึ่งเป็นจุดที่ได้รับความร้อนมากที่สุด กะโหลกเตาก่อด้วยอิฐซึ่งมีความหนากว่าส่วนอื่นมาก เพราะต้องเป็นฉนวนป้องกันไม่ให้เกิดความสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม กะโหลกเตาใช้งานในขั้นตอนสุญไฟที่กะโหลกเตา (ดูหัวข้อถัดไป) ลักษณะของกะโหลกเตาเมื่อมองจากด้านนอกเห็นเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมและด้านบนเป็นโดม ด้านหน้ามีช่องใส่ฟืนสองช่องดังภาพที่ 2 ช่องล่างใช้ใส่ฟืนในช่วงแรกที่เริ่มต้นให้ความร้อนกับเตาขณะเดียวกันช่องบนมีแผ่นอิฐปิดไว้ หลังจากได้อุ่นเตาแล้วประมาณ 8 ชั่วโมงจะใส่ฟืนที่ช่องบนซึ่งสามารถใส่ฟืนในปริมาณมาก

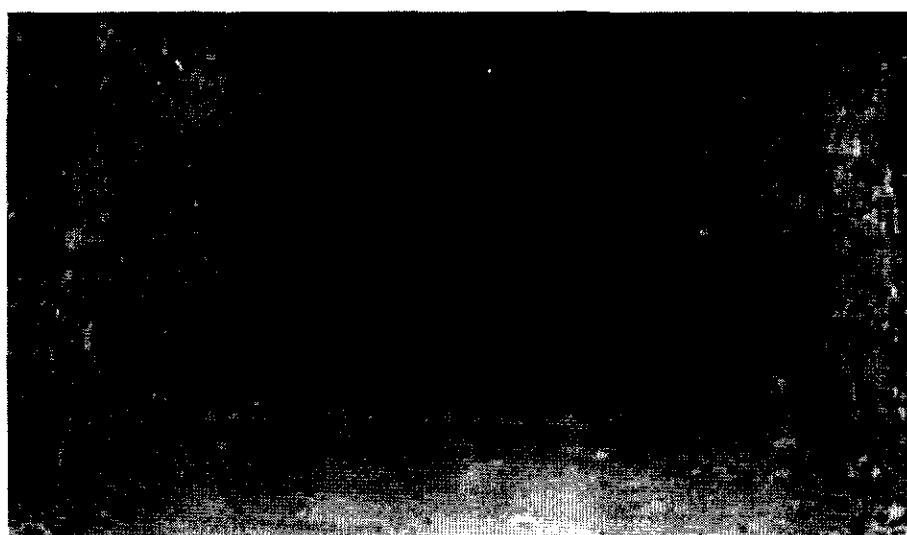


ภาพที่ 1 เดามังกร (1) กะโหลกเดา (2) ตัวเดา (3) ประตูดเา (4) ผนังไฟออก (5) ปล่องไฟ

การใส่ฟืนในช่องบนซึ่งภาษาคนเตาเรียกว่าการให้ไฟใหญ่ทำโดยนำแผ่นอิฐที่อยู่ในช่องบนออกแล้วใส่ฟืนในช่องบน ฟืนที่ใส่สามารถเข้าไปในเตาได้ลึกกว่าและทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่เข้าเตาสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (1,250 องศาเซลเซียส) ด้านหน้าของกะโหลกเตามีลักษณะเหมือนปอที่ต่ำลงไปเพื่อใช้เป็นพื้นที่รองรับฟืนที่ใส่เข้าไป ฟืนที่ใช้ในการสุ่มไฟที่กะโหลกเตาจะวางไว้ข้างๆเตาเพื่อให้ความร้อนจากเตาไล่ความชื้นของฟืนด้วย ภาพที่ 3 แสดงภาพถ่ายด้านในของกะโหลกเตาซึ่งแสดงให้เห็นช่วงการขยายความกว้างของลำตัวเตาและซี่ถ้ำที่เหลือจากการสุ่มไฟที่กะโหลกเตา



ภาพที่ 2 ด้านนอกของกะโหลกเตา



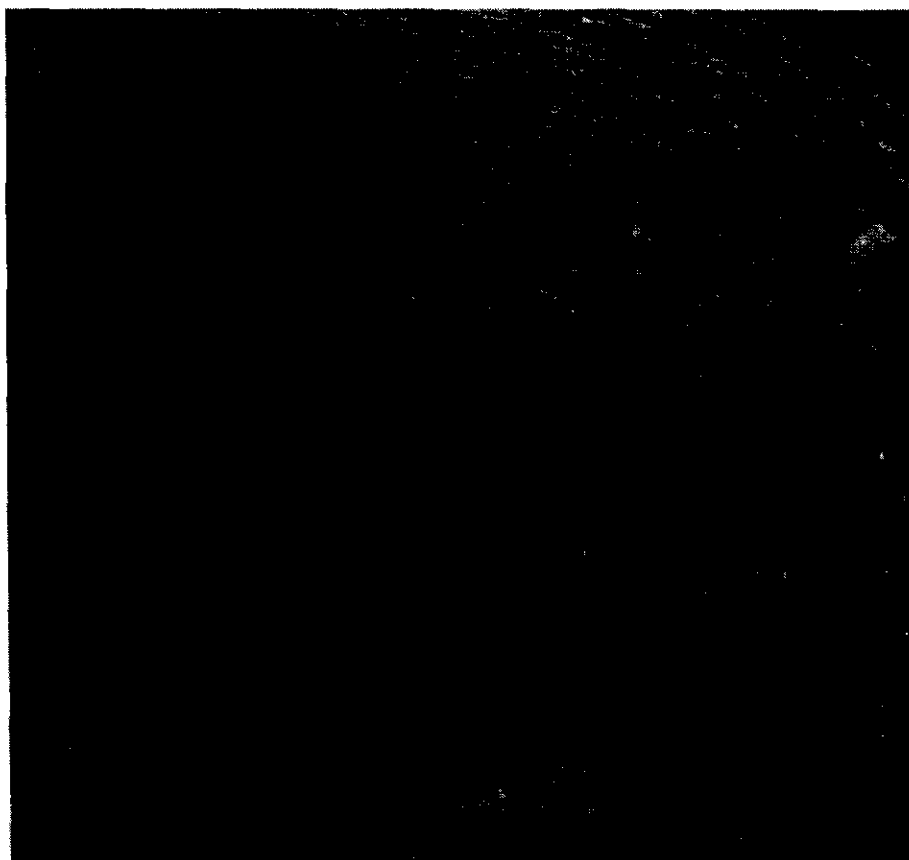
ภาพที่ 3 ด้านในของกะโหลกเตา

ลำตัวเตา

ลำตัวเตาเป็นส่วนที่ยาวที่สุดของเตาใช้บรรจุผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา มีความยาว 62 เมตร มีความจุประมาณ 285 ลูกบาศก์เมตร ด้านหน้าของเตา (ที่ติดกับกะโหลกของเตา) มีความกว้างน้อยกว่าด้านหลังของเตา (ติดกับปล่องไฟ) ลำตัวเตาก่อด้วยอิฐมีความหนาแน่นกว่ากะโหลกเตา หลังคาและพื้นเตามีความเอียงโดยท้ายเตามีความสูงกว่าด้านหน้าตามไหลของก๊าซร้อน พื้นของเตาเป็นทรายผสมกับซีเมนต์เพื่อให้วางขาตั้งสำหรับรองรับผลิตภัณฑ์ได้ดียิ่งขึ้น ถ้าพื้นเตาเป็นอิฐแล้วเตามีความเอียงอย่างที่เป็นอยู่ทำให้การเรียงผลิตภัณฑ์เป็นด้วยความลำบาก ดังนั้นพื้นเตาจึงทำด้วยทรายและซีเมนต์ (ซึ่งเกิดจากเผาไหม้ของฟืน) อิฐก่อขึ้นเป็นรูปทรงของอุโมงค์ ด้านบนของเตาเป็นส่วนโค้งซึ่งรับน้ำหนักได้ดี ด้านบนของเตาจัดทำเป็นที่วางฟืนเพื่อสะดวกในเตานำฟืนมาเป็นเชื้อเพลิงและเพื่อให้ความร้อนจากเตาไล่ความชื้นจากฟืนเพื่อให้ฟืนแห้งดังภาพที่ 4 ด้านข้างของลำตัวเตาด้านหนึ่งเทถนนเพื่อสะดวกในการขนฟืนมาวางบนหลังเตา คนเตานำเครื่องปั้นดินเผาที่พร้อมที่ทำการเผาเข้าไปเรียงในเตาโดยใช้ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามของถนน (อีกด้านหนึ่งของตัวเตา) ด้านในของเตามีลักษณะคล้ายอุโมงค์ดังภาพที่ 5 ผนังด้านในของเตาที่ถูกไฟเผามีคราบเขม่าและรอยไหม้ที่เกิดจากยางของฟืน



ภาพที่ 4 ด้านนอกของลำตัวเตา



ภาพที่ 5 ด้านในของลำตัวเตา

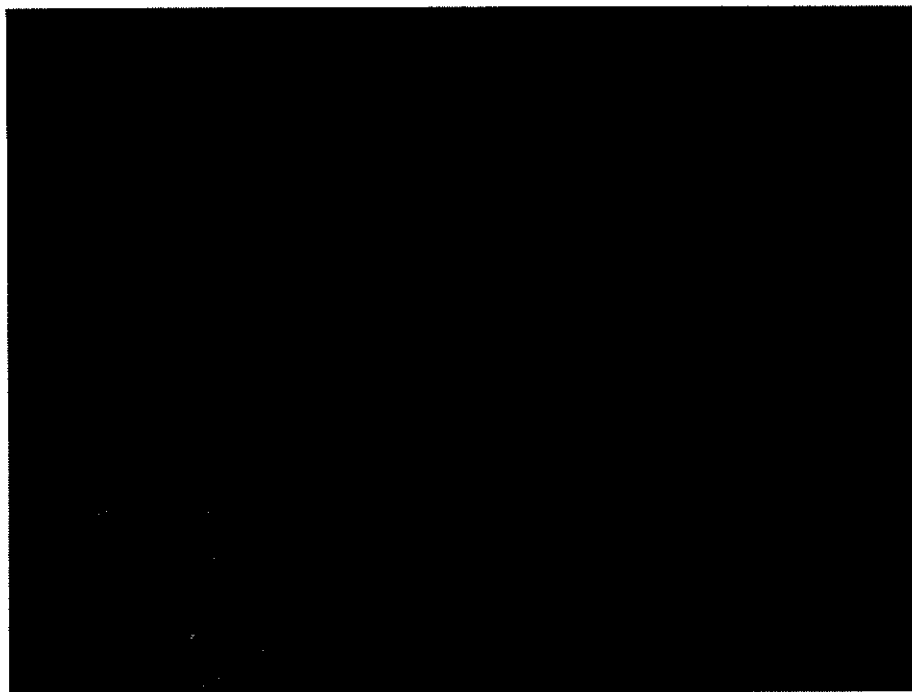
ประตุนกถ่ายผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ก่อนเผาที่นำไปเรียงเพื่อเผาและผลิตภัณฑ์ที่เผาเสร็จแล้วลำเลียงออกผ่านประตุนกถ่ายผลิตภัณฑ์ซึ่งมีอยู่ 4 ประตู ประตูของเตาตั้งอยู่อยู่ด้านเดียวของลำตัวเตา เมื่อมองเข้าไปทางกะโหลกเตาประตูอยู่ด้านขวามือ ประตูอยู่สูงจากพื้นของโรงงานประมาณ 50 เซนติเมตร ประตูของเตาเปิดปิดด้วยการก้ออิฐและใช้อิฐแทนบานประตู ตำแหน่งของประตูทั้งสี่ประตูแสดงอยู่ที่ภาพที่ 1 และภาพที่ 6 แสดงถ่ายประตุนกถ่ายผลิตภัณฑ์ที่เปิดอยู่ขณะลำเลียงผลิตภัณฑ์เข้า/ออกจากเตา

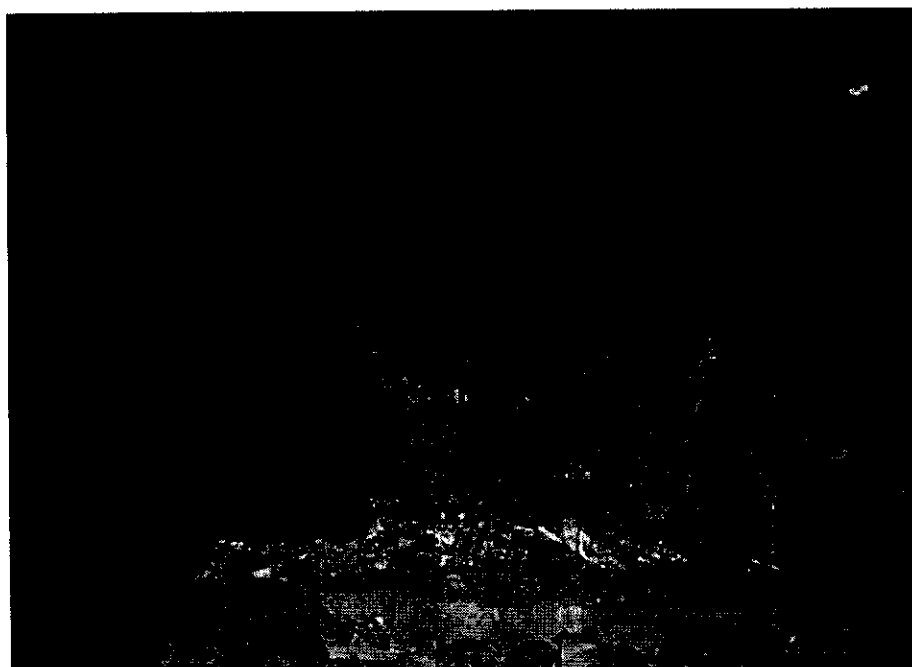
ตาไฟ

ตาไฟเป็นช่องขนาดประมาณ 20 x 30 ตารางเซนติเมตรอยู่บนลำตัวเตามีข้างละ 49 ตา และมีตำแหน่งตรงกันดังภาพที่ 7 ตาไฟมีตำแหน่งต่ำกว่าหลังคาประมาณ 50 เซนติเมตร ตาไฟมีไว้เพื่อสอดฟืนเข้าไปเผาผลิตภัณฑ์ ตอนเริ่มต้นสุ่มไฟที่กะโหลกเตาตาไฟจะปิดอยู่ด้วยอิฐที่มีดินยาไว้เพื่อไม่ให้อากาศไหลเข้าเตา จะไล่เปิดตาไฟครั้งละสามถึงสี่ตาเพื่อใส่ฟืนเผาผลิตภัณฑ์ บริเวณนั้นขณะเดียวกันใช้ตาไฟที่ไม่ได้ใส่ฟืนเพื่อเป็นช่องดูสีของผลิตภัณฑ์ว่าสุกได้ที่หรือไม่

และปิดตาอีกครั้งเมื่อเผาผลิตภัณฑ์ผ่านบริเวณนั้นไปแล้ว จะทำการเปิดตาไฟทั้งหมดอีกครั้งเมื่อต้องการลดอุณหภูมิของเตาก่อนจะลำเลียงผลิตภัณฑ์ออกจากเตา



ภาพที่ 6 ประตุนถ่ายผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 7 ตาไฟ

ผนังช่องไฟออก

ผนังช่องไฟออกมีลักษณะเป็นกำแพงที่มีรูเจาะเป็นสี่เหลี่ยมมีไว้สำหรับป้องกันไม่ให้ก๊าซเสียไหลออกไปอย่างรวดเร็ว ผนังช่องไฟออกอยู่ท้ายเตาก่อนถึงปล่องไฟขนาดความกว้างและความสูงเท่ากันกับความกว้างและความสูงของเตาในตำแหน่งนั้น สูงประมาณ 2 เมตร กว้างประมาณ 3 เมตรดังแสดงในภาพที่ 8 และภาพที่ 10



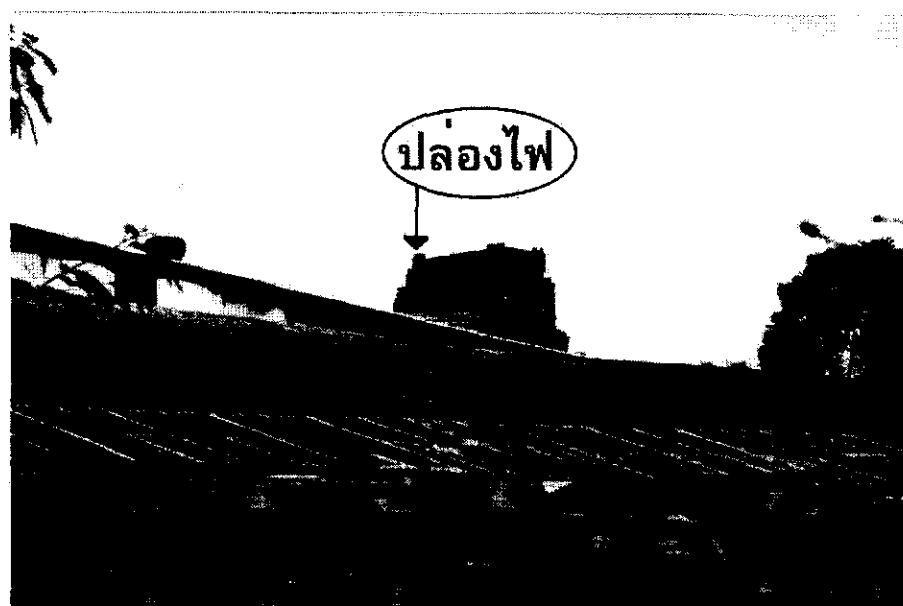
ภาพที่ 8 ผนังช่องไฟออก

ปล่องไฟ

ปล่องไฟมีหน้าที่ปล่อยก๊าซเสียสู่บรรยากาศ ความสูงของของปล่องมีผลต่อความเร็วและความก๊าซเสีย ด้านในปล่องมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังภาพที่ 9

ขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์

การใช้งานของเตาในการเผาผลิตภัณฑ์หนึ่งๆนับตั้งแต่ขนถ่ายผลิตภัณฑ์เข้าเตาจนถึงการนำผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จแล้วออกจากเตาใช้เวลาทั้งสิ้น 48 ชั่วโมง (สองวันเตา) หรือ 72 ชั่วโมง (สามวันเตา) การใช้เวลาในการทำงานของเตาเป็น 48 หรือ 72 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ในขณะนั้นและเวลาการทำงานที่เหมาะสมกับวันหยุดของคนงาน ในการทำงาน 72 ชั่วโมงโดยแบ่งเป็นกิจกรรมต่างๆคือ เรียงผลิตภัณฑ์เข้าเตา 4 ชั่วโมง จากนั้นก่ออิฐปิดประตูที่ใช้ขนถ่ายผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 9 ปล่องไฟ

อบผลิตภัณฑ์ในเตาโดยอาศัยก๊าซภายในเตาและผนังเตาที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ปล่อยไว้เป็นเวลาประมาณ 17 ชั่วโมง เริ่มสูมไฟที่กะโหลกเตา ก๊าซร้อนไหลเข้าไปทำให้อุณหภูมิในเตาสูงขึ้นโดยเวลาที่ใช้สูมไฟประมาณ 13 ชั่วโมงซึ่งทำให้เตามีอุณหภูมิสูงทั่วเตา เริ่มใส่เชื้อเพลิงตามตาไฟเพื่อเผาผลิตภัณฑ์ให้สุกตัวที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,180 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากตาไฟแรกก่อน การเดินไฟจากตาแรกถึงตาไฟสุดท้ายใช้เวลา 14 ชั่วโมง จากนั้นอบผลิตภัณฑ์ไว้ในเตาปิดอีกประมาณ 13 ชั่วโมง เปิดเตาและปล่อยให้เย็นโดยใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมง และสุดท้ายลำเลียงผลิตภัณฑ์ออกจากเตาใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง กิจกรรมทั้งหมดนี้ถือเป็นหนึ่งรอบการใช้งานของเตาดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 สรุปกิจกรรมต่างๆ และเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบใช้งานของเตา สำหรับการทำงานแบบสั้น (48 ชั่วโมงต่อเตา) จะลดเวลาช่วงอบผลิตภัณฑ์ 17 ชั่วโมงออกไปแล้วปรับลดเวลาช่วงอื่นโดยรวม 7 ชั่วโมงซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต้องการดูเลยพินิจของเจ้าของโรงงาน และคนเตาที่ชำนาญ

การเรียงผลิตภัณฑ์

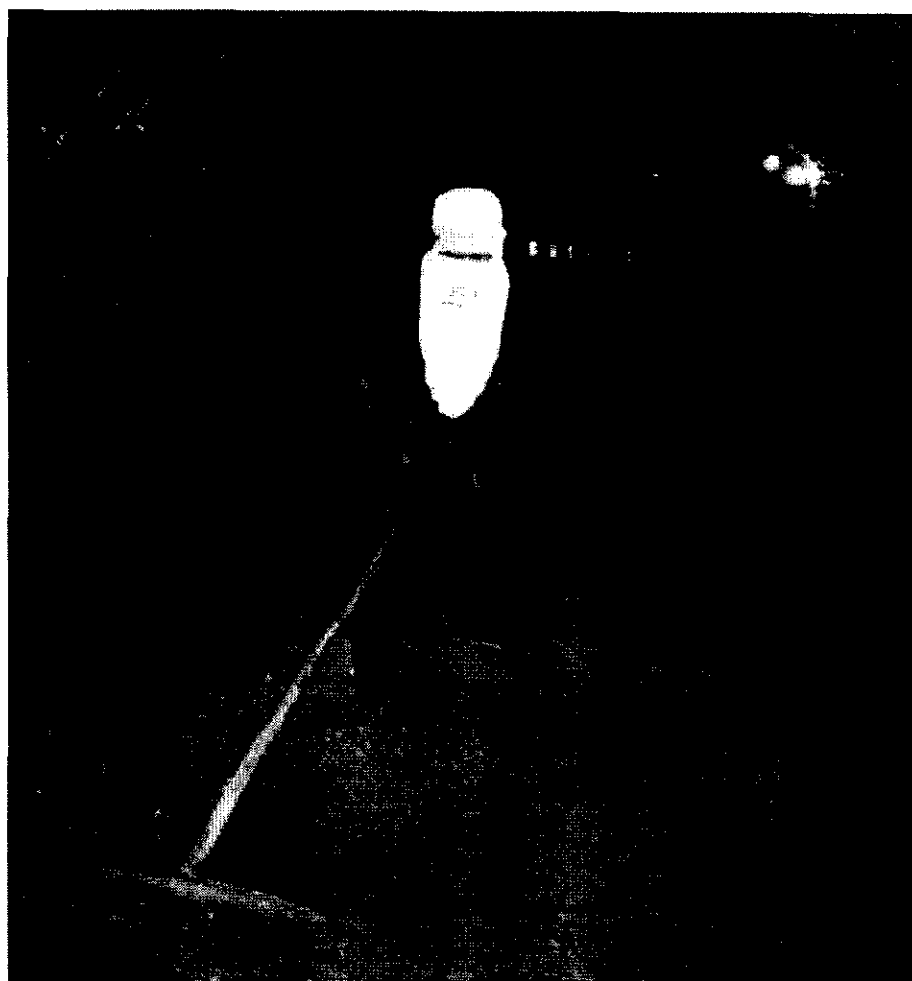
การเรียงผลิตภัณฑ์เริ่มหลังจากการขนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาแล้วออกจากเตา เนื่องจากหลังการขนผลิตภัณฑ์ออกพื้นของเตาเหลือไม้ที่เผาไม่หมดและเศษผลิตภัณฑ์จึงต้องคราดเตาเพื่อนำเอาเศษต่างๆออกไปทั้งดังภาพที่ 10 จากนั้นปรับพื้นเตา การปรับพื้นเตามีผลต่อการเผาอย่างมาก ถ้าพื้นเตาไม่ไต่ระดับทำให้ก๊าซร้อน/เปลวไฟไหลได้ไม่ดีหรืออาจทำผลิตภัณฑ์ลัมได้

การปรับพื้นที่ใช้สอยอาคารปรับพื้นที่ให้ระดับขนานกับช่องใส่พื้นซึ่งอยู่ด้านหน้าสุดของกะโหลกเตา การปรับระดับใช้ประสบการณ์ของคนเตา

ตารางที่ 1 กิจกรรม และช่วงเวลาต่างๆขณะใช้งานเตามังกร

กิจกรรม	เวลา (ชั่วโมง)
เรียงผลิตภัณฑ์	4
อบผลิตภัณฑ์	17
สุมนไฟที่กะโหลกเตา	13
เดินไฟไปท้ายเตา	14
อบผลิตภัณฑ์	13
เปิดเตา	2
ปล่อยให้เย็น	6
ขนผลิตภัณฑ์	3

การเรียงผลิตภัณฑ์จะใช้ขาตั้งซึ่งมีลักษณะคล้ายกระถางเล็กๆมาเป็นตัวรองผลิตภัณฑ์ดังภาพที่ 11 เพื่อเปลวไฟจากพื้นที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์และพื้นเตาจะไม่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง การวางขาตั้งนั้นต้องวางให้มั่นคงเนื่องจากเตามีความเอียง ถ้าวางขาตั้งไม่ดีทำให้ผลิตภัณฑ์ล้มขณะเผาซึ่งทำให้เกิดความเสียหายมากเพราะการล้มนั้นจะเป็นแบบโดมิโน (Domino) ทำให้ผลิตภัณฑ์อื่นล้มตามไปด้วย การป้องกันการล้มแบบโดมิโนสามารถป้องกันได้โดยเรียงขาตั้งมั่นคงและยังสามารถใช้โถง 6, 7 ปืบซึ่งเป็นโถงขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากมาเรียงเป็นกำแพงขวางเป็นช่วงๆ ขาตั้งมีหลายแบบซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะกับขนาดของผลิตภัณฑ์ การเรียงผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เรียงเป็นคู่ๆเอียงปากประกบกัน โดยมีการเรียงลำดับผลิตภัณฑ์ที่อยู่ล่างสุดดังนี้ ผลิตภัณฑ์ใหญ่สุดไว้ด้านล่าง เช่นโถง 6, 7 ปืบ เรียงโดยการคว่ำโถง 6, 7 ปืบ ต้องมีวัสดุ (ตะปั่ว) ขึ้นไว้ไม่เช่นนั้นปากโถงอาจติดกันได้ ถัดจากโถงใช้ของอื่นที่ขนาดเล็กลงมาเช่นมังกร 4 ปืบ นิยมใช้แบบที่เป็นปากหยักมากกว่าเพราะเสียหายน้อยกว่า ด้านบนเป็นผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กที่นำไปจำหน่ายต่างประเทศซึ่งบริเวณนี้มีความเสียหายน้อย การเรียงผลิตภัณฑ์แบ่งเตาออกเป็นส่วนๆภาษาในโรงโถงใช้คำว่าห้อง แบ่งออกเป็นสี่ห้อง โดยใช้คนงานสี่คนเป็นคนคุมห้องเตาและมีลูกทิมคอยช่วยในการลำเลียงเข้า



ภาพที่ 10 การคราดเตา

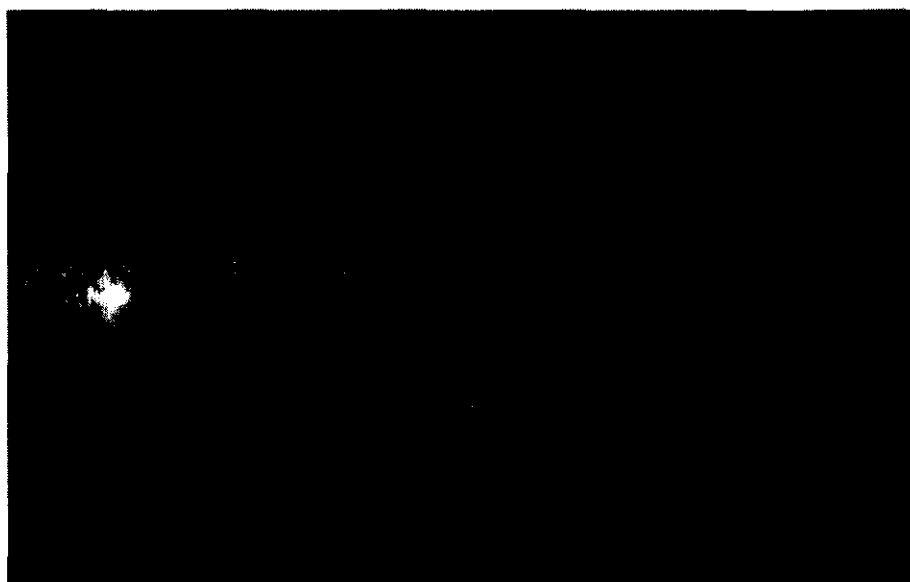
การอบผลิตภัณฑ์

หลังจากเรียงผลิตภัณฑ์เข้าเตาเรียบร้อยแล้วจะปิดเตาทั้งเตา โดยปิดประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์และคาไฟด้วยการเรียงอิฐแล้วใช้ดินเหนียวทาให้ทั่ว ความร้อนในเตาถ่ายเทให้ผลิตภัณฑ์สังเกตได้จากอุณหภูมิของอากาศลดลงและทิ้งให้เตาอยู่ในสภานี้ประมาณ 17 ชั่วโมง ถ้าต้องการเร่งการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาทำได้โดยตัดกระบวนการนี้ออกไปและข้ามไปถึงการสุมไฟที่หัวเตาได้เลย

การสุมไฟที่กะโหลกเตา

หลังจากอบผลิตภัณฑ์เรียบร้อยแล้วทำการสุมไฟที่กะโหลกเตาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาให้สูงขึ้น โดยอุณหภูมิที่ต้องการคือ 1,250 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิก่อนถึงบริเวณที่เรียงผลิตภัณฑ์ด้านหน้าของเตา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจะไล่ความชื้นให้กับผลิตภัณฑ์และเป็นการทำให้ตราพัตร์ธรรมชาติเกิดขึ้นภายในเตา การสุมไฟที่กะโหลกเตาใช้เวลาประมาณ 13 ชั่วโมง ถ้าเวลา

ในการสูมไฟที่กะโหลกเตาเร็วไปอาจทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเกินไปและทำให้เกิดความเสียหายได้ การใส่เชื้อเพลิงดังภาพที่ 12 ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความชำนาญของนายช่างแต่ละคน



ภาพที่ 11 การเรียงผลิตภัณฑ์

การเดินไฟไปท้ายเตา

เป็นการเผาเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สุก โดยอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์สุกประมาณ 1,180 องศาเซลเซียส เชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นไม้ยางพาราไม้เบญจพรรณเล็กน้อย ลักษณะการสุกของผลิตภัณฑ์ใช้การสังเกตด้วยสายตาโดยดูที่ผิวของผลิตภัณฑ์ การใส่ฟืนเริ่มที่ตาที่หนึ่งจากกะโหลกเตาแล้วไล่ไปทางท้ายเตาดังภาพที่ 13 บริเวณด้านหน้าเตาใช้เวลาในการใส่ฟืนน้อยกว่า ใช้คนใส่ฟืนพร้อมๆกันข้างละหนึ่งคนจากตาที่ 1 ไล่ไปตามลำดับจนถึงตาที่ 49 โดยเมื่อตาที่ใส่ฟืนเสร็จแล้วจะใช้อิฐมาปิดแล้วยาด้วยดินไม่ให้อากาศเข้าไปภายใน

การอบผลิตภัณฑ์หลังการเผา

อบผลิตภัณฑ์ครั้งนี้เป็นการอบหลังจากที่เผาเสร็จ เป็นการปล่อยให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงอย่างช้าๆ โดยไม่ให้มีให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าเตา ถ้าผลิตภัณฑ์เย็นตัวเร็วเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร้าวได้



ภาพที่ 12 การสูมไฟที่กะโหลกเตา

การเปิดเตา

หลังจากรอให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงในเตาปิดเป็นเวลา 13 ชั่วโมงแล้วจะทำการเปิดส่วนต่างๆของเตาที่ปิดไว้ด้วยอิฐและยาด้วยโคลนเพื่อระบายความร้อน โดยการเปิดเตาที่ละส่วนใช้เวลา รวมทั้งสิ้น 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เริ่มเปิดที่ตาไฟที่ละตาก่อนแล้วจึงมาเปิดที่ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์โดยค่อยๆเปิดประตูไล่จากด้านบนของประตูลงมา

การปล่อยเตาให้เย็น

เมื่อเปิดเตาแล้วจึงปล่อยให้อากาศถ่ายเทเรื่อยไปจนกระทั่งถึงเวลาจนผลิตภัณฑ์ออกการปล่อยให้เตาเย็นนี้ใช้เวลา 6 ชั่วโมง

การขนผลิตภัณฑ์ออก

ขนผลิตภัณฑ์ออกโดยใช้คนขนงานขนผลิตออกมาด้วยการกลิ้งผลิตภัณฑ์ไปเป็นทอดจากคนงานจากอีกคนหนึ่งไปอีกคนหนึ่งดังภาพที่ 14 แล้วมีคนงานกลุ่มหนึ่งคอยตรวจสอบผลิตภัณฑ์โดยจำแนกเป็นผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่ง เกรดสอง และผลิตภัณฑ์ที่แตกหัก ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่งนำไปขายได้เลย ผลิตภัณฑ์เกรดสองนำไปซ่อมจึงนำไปขาย ผลิตภัณฑ์แตกหักนำไปถมที่หรือนำไปทิ้ง ลักษณะความเสียหายจะได้กล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป



ภาพที่ 13 การเดินไฟไปท้ายเตา



ภาพที่ 14 การลำเลียงผลิตภัณฑ์

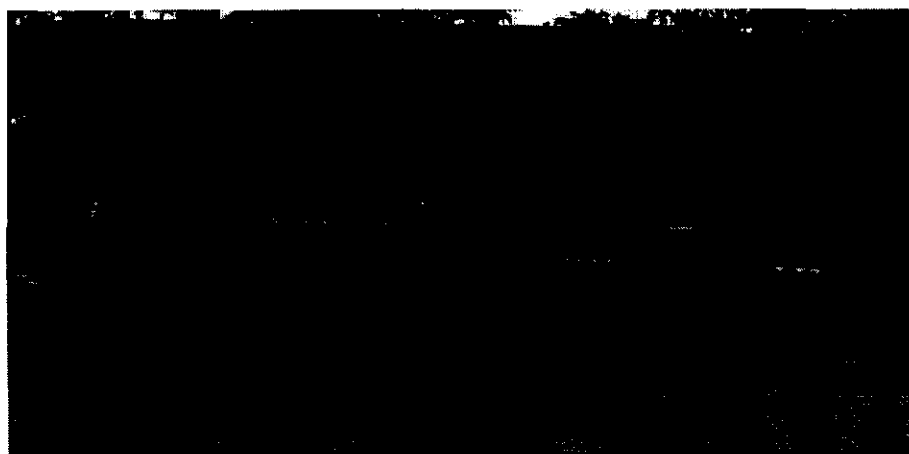
บทที่ 3

ผลิตภัณฑ์และความเสียหาย

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาเริ่มตั้งแต่การขุดดินจากแหล่งดินมาที่โรงงานเตรียมวัตถุดิบ เตรียมเนื้อดิน ช้อนรูป ตกแต่ง เคลือบ และนำไปทำให้แห้ง จากนั้นจึงเอาเข้าเตาเผา ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ผลิตได้จะมีหลายชนิดแตกต่างกันไปทั้งขนาดทั้งรูปทรงเพื่อให้ผู้ใช้มีผลิตภัณฑ์ให้เลือกอย่างมากมาย ดินที่ราชบุรีมีความพิเศษกว่าดินที่อื่นคือสามารถปั้นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ได้จึงได้นำมาปั้นเป็นโอ่งใส่น้ำซึ่งเป็นสินค้าที่มีชื่อของจังหวัดราชบุรี ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลิตภัณฑ์หลังการเผาและการสำรวจความเสียหาย

ผลิตภัณฑ์ที่เผาในเตามังกร

ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผามีผลิตภัณฑ์ที่เผาประจำทุกเตาดังภาพที่ 15 ในตารางที่ 2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ภายในของผลิตภัณฑ์ที่ปากและก้นของผลิตภัณฑ์และแสดงความสูงของผลิตภัณฑ์ทั้งความสูงด้านนอกและด้านในของผลิตภัณฑ์ตารางนี้เรียงตามปริมาตรของผลิตภัณฑ์จากขนาดใหญ่ไปขนาดเล็ก



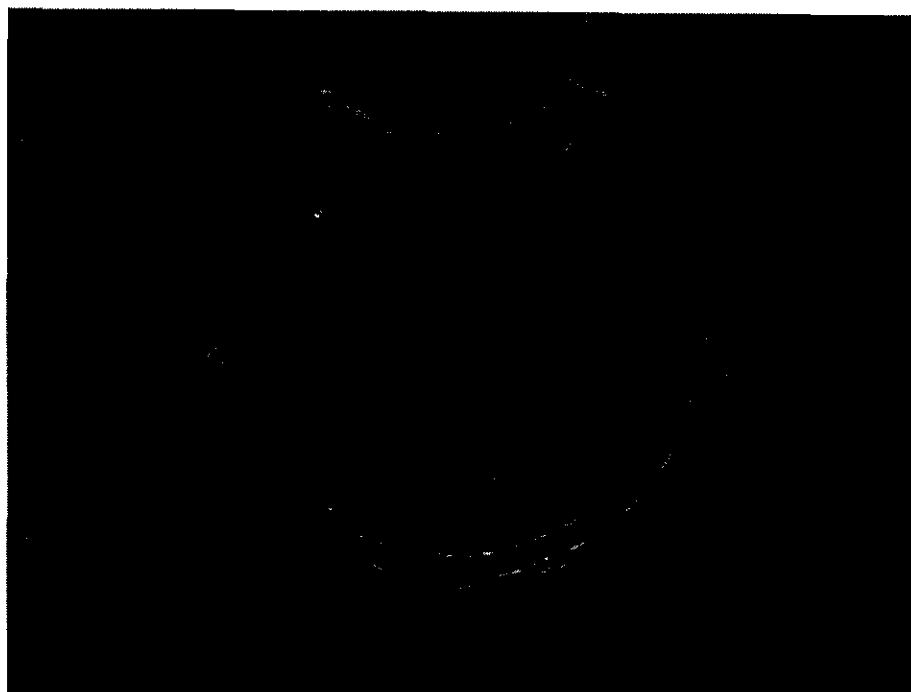
ภาพที่ 15 ผลิตภัณฑ์ที่เผาเป็นประจำ จากซ้ายไปขวาประกอบด้วย
โอ่ง 7 ปี๊บ มังกร 4 ปี๊บ โอ่ง 6 ปี๊บ มังกร 2 ปี๊บ โอ่ง 2 ปี๊บ
มังกร 1 ปี๊บ และไม้กลาง

ตารางที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่เผาเป็นประจำ

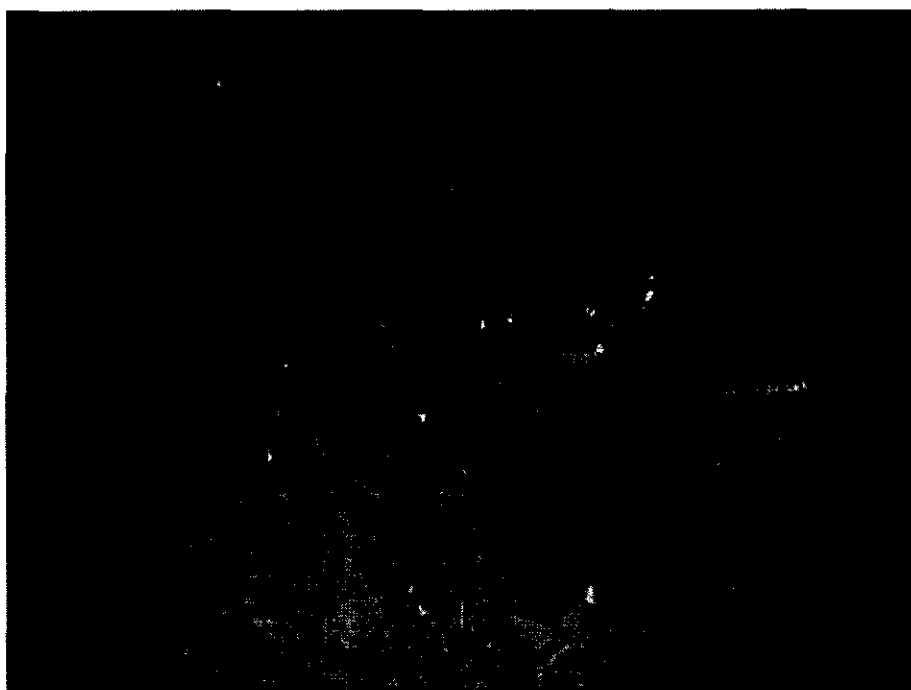
ผลิตภัณฑ์	φ ปาก, นอก (CM)	φ ปาก,ใน (CM)	φ ก้น,นอก (CM)	φ ก้น,ใน (CM)	สูง,นอก (CM)	สูง,ใน (CM)	ปริมาตร (LITER)
ไม้กลาง (No.1)	32.2	25.6	20.2	17.7	26	24.2	9.2
มังกร 1 ปีบ (No.2)	44.1	34.1	26.3	22.5	34.1	31.1	20.4
โอง 2 ปีบ (No.4)	37	29.5	37.5	35.2	59.2	44.1	36.5
มังกร 2 ปีบ (No.3)	54.5	44.5	40.5	31.5	40.5	35.2	41.1
โอง 6 ปีบ (No.6)	47	38.5	47	43.5	63	57.2	75.8
มังกร 4 ปีบ (No.5)	70	57.5	46.8	43.1	55	48.3	97.9
โอง 7 ปีบ (No.7)	52	44	54.5	50	74	67.4	117.4

ผลิตภัณฑ์หลังจากการเผา

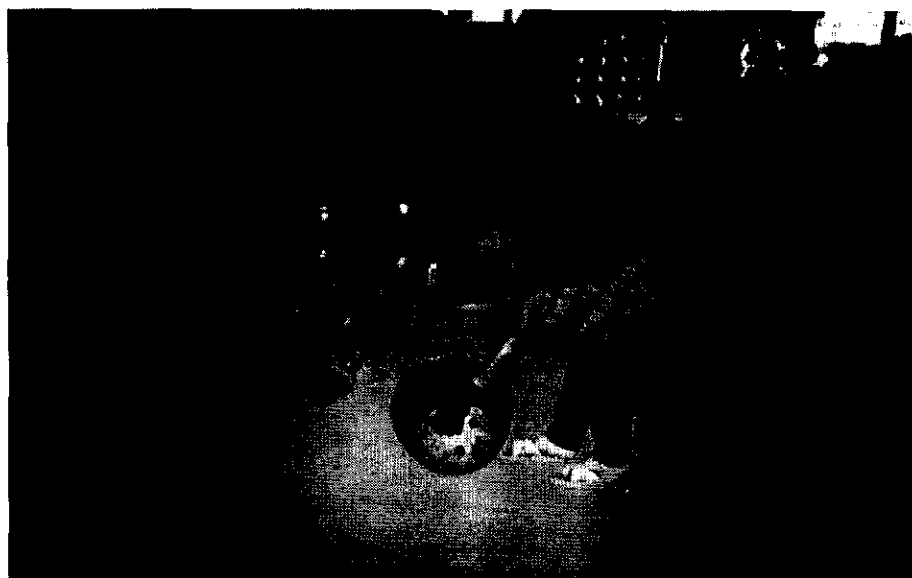
หลังจากล้าเลียงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาออกจากเตา พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกมาเป็น 3 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่งที่มีลักษณะสมบูรณ์ สวยงาม เป็นที่ต้องการของผู้ผลิต, ผลิตภัณฑ์เกรดสองดังภาพที่ 16 มีความเสียหายเกิดขึ้นเล็กน้อยเช่นมีรอยบิ่นหรือรอยร้าวซึ่งสามารถเอาไปซ่อมแล้วนำมาจำหน่ายได้ และผลิตภัณฑ์แตกหักดังภาพที่ 17 คือ ผลิตภัณฑ์เสียหายมากไม่สามารถซ่อมได้ต้องนำไปทิ้งแต่ยังทำประโยชน์ได้โดยนำไปถมที่ ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่งกับผลิตภัณฑ์เกรดสองบางครั้งไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ด้วยสายตา วิธีการแยกความแตกต่างโดยการใช้วัสดุทรงตันที่มีน้ำหนักพอสมควร เช่นเหล็ก นำมาเคาะและขูดภายในขณะที่กำลังผลิตภัณฑ์ออกจากเตาดังภาพที่ 18 ผลิตภัณฑ์ที่มีรอยร้าวมีเสียงแตกต่างผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์



ภาพที่ 16 ผลิตภัณฑ์เกรดสอง



ภาพที่ 17 ผลิตภัณฑ์แตกหัก



ภาพที่18 การตรวจสอบผลิตภัณฑ์

การซ่อมผลิตภัณฑ์เกรดสองทำโดยอุดรอยร้าวที่เกิดจากการเผาและที่เกิดจากการกระแทก (การขนย้ายใช้การกลิ้งเป็นหลัก) หลังจากอุดรอยแล้วทำการแต่งสีของรอยที่ซ่อมให้เหมือนกับสีบริเวณใกล้เคียงดังภาพที่ 19 ก่อนนำไปจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชนิดที่ต้องใส่น้ำไปทดสอบการซึมของน้ำ ถ้าน้ำยังซึมอยู่ให้นำไปซ่อมอีกครั้ง

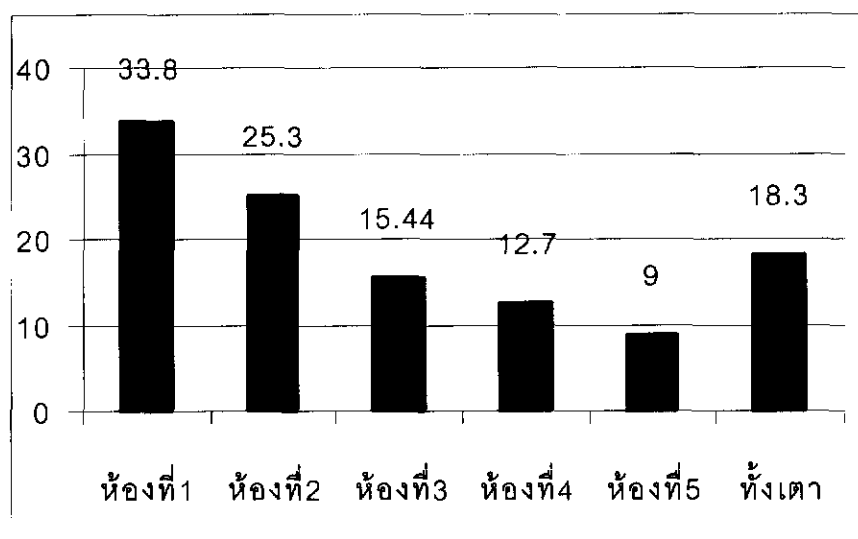


ภาพที่19 การซ่อมผลิตภัณฑ์

การสำรวจลักษณะความเสียหาย

สำรวจลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์โดยแบ่งเตาออกเป็น 5 ส่วน โดยใช้ประตูของเตาเป็นเขต จำแนกผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดออกมาเป็นสามประเภทคือผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่ง ผลิตภัณฑ์เกรดสองและผลิตภัณฑ์แตกหัก โดยทำการสำรวจความเสียหายสี่เตา (รอบการทำงาน) แสดงในตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 6 ตามลำดับ ในตารางประกอบด้วยห้องที่สำรวจ ห้องที่หนึ่งติดกับกะโหลกเตาเรียงไปจนถึงห้องที่ห้าติดกับปล่องไฟ จากข้อมูลพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เผาในแต่ละเตาจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความต้องการตามแผนการผลิต การเรียงผลิตภัณฑ์ในแต่ละห้องได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือผลิตภัณฑ์ใหญ่จะอยู่สูงสุดโดยผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กจะวางซ้อนทับขึ้นไปซึ่งทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในแต่ละห้องไม่ต่างกันมากนัก จำนวนผลิตภัณฑ์หลังการเผาแบ่งเป็นผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่ง, เกรดสอง, และ ผลิตภัณฑ์แตกหัก ส่วนผลิตภัณฑ์เสียหายเป็นผลรวมของผลิตภัณฑ์เกรดสองกับผลิตภัณฑ์แตกหัก

จากข้อมูลของผลิตภัณฑ์เฉลี่ยจำนวนสี่เตาสามารถแสดงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เสียได้ดังแสดงในภาพที่ 20 จากภาพเห็นได้ว่าห้องที่หนึ่งมีการเสียหาย 33.8 % ซึ่งเสียหายมากที่สุดและความเสียหายจะลดลงไปเรื่อยๆจนกระทั่งห้องสุดท้ายมีความเสียหายเพียง 9 % และเมื่อนำทั้งห้าห้องมาคำนวณจะพบว่าผลิตภัณฑ์เสียหาย 18.3 % ของผลิตภัณฑ์ทั้งเตา



ภาพที่ 20 ร้อยละที่เสียหายของผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย

ตารางที่ 3 สํารวจผลิตภัณฑ์หลังการเผาเตาครั้งทีหนึ่ง

ห้องที่ 1	มังกร 1 ปีบ	โหเซอร์	จานไม้ กลาง	รวม
เกรด 1	34	36	3	73
เกรด 2	52	0	30	82
แตกหัก	1	0	1	2
รวม	87	36	34	157
% เสีย	60.9	0.0	91.2	53.5

ห้องที่ 2	โอง 7 ปีบ	ตะกร้า	ไม้กลาง	มังกร 1 ปีบ	โหเซอร์	จาน	รวม
เกรด 1	1	50	100	100	53	32	336
เกรด 2	13	0	32	80	2	28	155
แตกหัก	2	0	0	0	0	0	2
รวม	16	50	132	180	55	60	493
% เสีย	93.8	0.0	24.2	44.4	3.6	46.7	31.8

ห้องที่ 3	ถ้วยบัว	จาน	ตะกร้า	มังกร 2 ปีบ	มังกร 1 ปีบ	ไม้เล็ก	รวม
เกรด 1	36	25	10	21	280	30	402
เกรด 2	2	10	0	11	20	0	43
แตกหัก	0	0	0	0	0	0	0
รวม	38	35	10	32	300	30	445
% เสีย	5.3	28.6	0.0	34.4	6.7	0.0	9.7

ห้องที่ 4	มังกร 2 ปีบ	โอง 7 ปีบ	ไม้เล็ก	ไม้กลาง	จาน	มังกร 4 ปีบ	รวม
เกรด 1	102	16	37	63	33	16	267
เกรด 2	4	8	0	8	7	14	41
แตกหัก	2	0	0	0	0	0	2
รวม	108	24	37	71	40	30	310
% เสีย	5.6	33.3	0.0	11.3	17.5	46.7	13.9

ห้องที่ 5	7 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	มังกร 4 ปีบ	มังกร 1 ปีบ	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	รวม
เกรด 1	9	70	20	12	80	43	314
เกรด 2	2	2	10	0	8	0	30
แตกหัก	1	2	0	0	0	0	3
รวม	12	74	30	12	88	43	347
% เสีย	25.0	5.4	33.3	0.0	9.1	0.0	9.5

ตารางที่ 4 สํารวจผลิตภัณฑ์หลังการเผาเตาครั้งที่สอง

ห้องที่ 1	มังกร 1 ปีบ	ไม้กลาง	ไผ่	ไม้เล็ก	รวม
เกรด 1	45	43	35	35	158
เกรด 2	35	39	0	0	74
แตกหัก	3	0	0	0	3
รวม	83	82	35	35	235
% เสีย	45.8	47.6	0.0	0.0	32.8

ห้องที่ 2	โอ่ง 7 ปีบ	มังกร 1 ปีบ	ไผ่	จาน	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	รวม
เกรด 1	0	73	64	25	78	52	292
เกรด 2	17	48	0	36	5	2	108
แตกหัก	5	0	0	0	0	0	5
รวม	22	121	64	61	83	54	405
% เสีย	100.0	39.7	0.0	59.0	6.0	3.7	27.9

ห้องที่ 3	มังกร 1 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	ไม้กลาง	จาน	รวม
เกรด 1	150	44	55	50	299
เกรด 2	40	16	5	28	89
แตกหัก	10	4	0	5	19
รวม	200	64	60	83	407
% เสีย	25.0	31.3	8.3	39.8	26.5

ห้องที่ 4	โอ่ง 6 ปีบ	มังกร 4 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	อ่าง	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	จาน	รวม
เกรด 1	12	15	107	7	60	50	16	267
เกรด 2	7	5	15	0	10	5	1	43
แตกหัก	0	0	6	0	2	0	1	9
รวม	19	20	128	7	72	55	18	319
% เสีย	36.8	25.0	16.4	0.0	16.7	9.1	11.1	16.3

ห้องที่ 5	โอ่ง 7 ปีบ	มังกร 4 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	มังกร 1 ปีบ	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	อ่างบัวใหญ่	รวม
เกรด 1	16	16	96	12	80	35	2	257
เกรด 2	4	0	8	0	3	5	0	20
แตกหัก	0	0	0	0	0	0	0	0
รวม	20	16	104	12	83	40	2	277
% เสีย	20.0	0.0	7.7	0.0	3.6	12.5	0.0	7.2

ตารางที่ 5 สํารวจผลิตภัณฑ์หลังการเผาเตาครั้งที่สาม

ห้องที่ 1	ไม้กลางเล็ก	ไผ่	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	รวม
เกรด 1	36	35	16	36	123
เกรด 2	30	2	1	1	34
แตกหัก	2	0	0	0	2
รวม	68	37	17	37	159
% เสีย	47.1	5.4	5.9	2.7	22.6

ห้องที่ 2	ไม้กลางเล็ก	ไผ่	ตะกร้า	โอง	จาน	รวม
เกรด 1	67	63	20	12	33	195
เกรด 2	16	0	0	18	6	40
แตกหัก	0	0	0	0	3	3
รวม	83	63	20	30	42	238
% เสีย	19.3	0.0	0.0	60.0	21.4	18.1

ห้องที่ 3	ไม้กลางเล็ก	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	ตะกร้า	จาน	ถ้วยบัว	มังกรเตี้ย	รวม
เกรด 1	171	72	71	10	96	29	10	459
เกรด 2	29	0	2	1	12	3	20	67
แตกหัก	0	0	0	0	2	0	2	4
รวม	200	72	73	11	110	32	32	530
% เสีย	14.5	0.0	2.7	9.1	12.7	9.4	68.8	13.4

ห้องที่ 4	มังกร 4 ปีบ	โอง 7 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	รวม
เกรด 1	18	18	120	67	44	267
เกรด 2	2	8	24	5	0	39
แตกหัก	0	0	4	0	0	4
รวม	20	26	148	72	44	310
% เสีย	10.0	30.8	18.9	6.9	0.0	13.9

ห้องที่ 5	มังกร 4 ปีบ	โอง 6 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	จาน	รวม
เกรด 1	20	23	100	90	23	4	260
เกรด 2	0	9	10	4	0	0	23
แตกหัก	0	0	4	4	0	0	8
รวม	20	32	114	98	23	4	291
% ที่แตกหัก	0.0	28.1	12.3	8.2	0.0	0.0	10.7

ตารางที่ 6 สํารวจผลิตภัณฑ์หลังการเผาเตาครั้งที่สี่

ห้องที่ 1	มังกร 1 ปีบ	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	ไผ่	โอง 6 ปีบ	จวน	รวม
เกรด 1	13	31	75	24	0	25	168
เกรด 2	34	9	12	0	5	2	62
แตกหัก	2	0	5	0	0	0	7
รวม	49	40	92	24	5	27	237
% เสีย	73.5	22.5	18.5	0.0	100.0	7.4	29.1

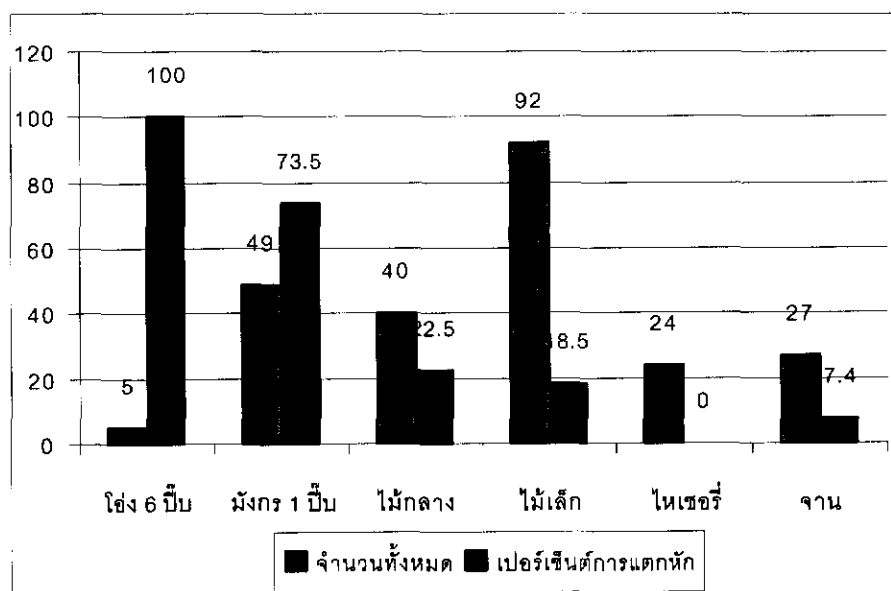
ห้องที่ 2	มังกร 2 ปีบ	โอง 1 ปีบ	โอง 6 ปีบ	มังกร 1 ปีบ	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	ตะกร้า	รวม
เกรด 1	33	50	1	30	75	150	25	364
เกรด 2	45	6	4	10	6	15	0	86
แตกหัก	0	0	0	0	0	5	0	5
รวม	78	56	5	40	81	170	25	455
% เสีย	57.7	10.7	80.0	25.0	7.4	11.8	0.0	20.0

ห้องที่ 3	โอง 1 ปีบ	มังกร 1 ปีบ	ตะกร้า	รวม
เกรด 1	95	78	50	223
เกรด 2	6	10	8	24
แตกหัก	8	2	0	10
รวม	109	90	58	257
% เสีย	12.8	13.3	13.8	13.2

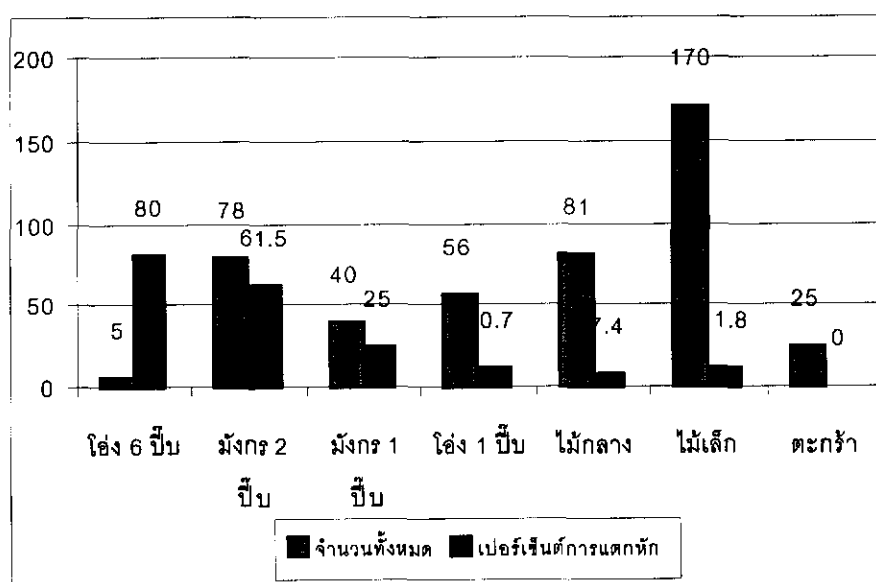
ห้องที่ 4	โอง 6 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	มังกร 1 ปีบ	ไม้กลาง	ไม้เล็ก	ตะกร้า	รวม
เกรด 1	32	263	25	42	22	50	434
เกรด 2	2	44	5	6	0	0	57
แตกหัก	0	3	0	0	0	0	3
รวม	34	310	30	48	22	50	494
% ที่แตกหัก	5.9	15.2	16.7	12.5	0.0	0.0	12.1

ห้องที่ 5	โอง 6 ปีบ	มังกร 2 ปีบ	ไม้กลาง	อย่างบัว	ตะกร้า	รวม
เกรด 1	13	102	80	5	31	231
เกรด 2	3	11	3	3	0	20
แตกหัก	0	0	2	0	0	2
รวม	16	113	85	8	31	253
% เสีย	18.8	9.7	5.9	37.5	0.0	8.7

จากการที่ห้องที่หนึ่งและห้องที่สอง มีความเสียหายเกิดขึ้นมาก จึงทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แยกเป็นประเภทต่างๆในห้องที่หนึ่งและห้องที่สอง ดังแสดงผลในภาพที่ 21 และ 22



ภาพที่ 21 ร้อยละที่เสียหายของผลิตภัณฑ์ในห้องที่หนึ่ง



ภาพที่ 22 ร้อยละที่เสียหายของผลิตภัณฑ์ในห้องที่สอง

ภาพที่ 21 และ 22 แขนนอนเรียงตามขนาดของผลิตภัณฑ์จากใหญ่ไปเล็ก พบว่าผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่เกิดความเสียหายมากกว่าผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก เช่นห้องที่หนึ่ง โอง 6 ปีบเสียหาย 100% มังกร 1 ปีบเสียหาย 73.5% สำหรับห้องที่สอง โอง 6 ปีบเสียหาย 80 % มังกร 2 ปีบเสียหาย 61.5% และผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันเมื่อเผาที่ห้องที่หนึ่งจะเสียหายมากกว่าห้องที่สองเช่น มังกร 1 ปีบห้องที่หนึ่งเสียหาย 73.5% ห้องที่สองเสียหาย 25% ไหมกลางห้องที่หนึ่งเสียหาย 22.5% ห้องที่สองเสียหาย 7.4%

จากตัวเลขความเสียหายที่ห้องที่หนึ่งโดยจำแนกตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ที่มีราคาแพงจะเสียหายมากเมื่อเผาในห้องที่หนึ่งและห้องที่สอง แต่ด้วยข้อจำกัดของการเรียงผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 การเสียหายของผลิตภัณฑ์เหล่านี้จึงหลีกเลี่ยงได้ยาก ในบทต่อไปจะใช้การวิเคราะห์เชิงความร้อนเพื่อหาสาเหตุของการแตกหักต่อไป และขณะเดียวกันจะสำรวจตัวเลขการใช้พลังงานจากฟืนอีกด้วย

บทที่ 4

พฤติกรรมเชิงความร้อนของเตา

ความร้อนที่ใช้ในเตานำมาจากการเผาไหม้ของไม้ เริ่มต้นจากการสุ่มไฟที่กะโหลกเตาจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ (1,250 เซลเซียส) จากนั้นจึงทำการเดินไฟไปท้ายเตา เริ่มตั้งแต่ตาที่ 1 ถึงตาที่ 49 ความร้อนที่ได้จากการสันดาปนี้มาทำให้ผลิตภัณฑ์สุกตัว โดยบทนี้ศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาในหนึ่งรอบการทำงาน การใช้พลังงานภายในเตา และการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาโดยใช้ข้อมูลจากการวัดปริมาณต่างๆขณะทำการผลิตจริงในโรงงาน

การใช้เชื้อเพลิงที่กะโหลกเตา

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์คือไม้พิน ซึ่งใช้ไม้สองชนิดได้แก่ ไม้เบญจพรรณและไม้ยางพารา การใช้เชื้อเพลิงในเตาแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ เชื้อเพลิงช่วงสุ่มไฟที่กะโหลกและช่วงเดินไฟไปท้ายเตา เชื้อเพลิงนั้นขนส่งรถบรรทุกมาจากแหล่งพิน แล้วเก็บพินอยู่กลางแจ้งโดยวางพินเป็นกองใหญ่อย่างเป็นระเบียบดูภาพที่ 23 จากนั้นนำพินที่กองนั้นมาใช้เผาผลิตภัณฑ์ โดยพินช่วงสุ่มไฟที่กะโหลกเตาวางกองอยู่ข้างกะโหลกเตา ส่วนพินช่วงเดินไฟไปท้ายเตานั้นวางไว้บนหลังคาเพื่ออาศัยความร้อนจากตัวเตาไล่ความชื้นออกจากพินช่วยให้ไม้แห้ง

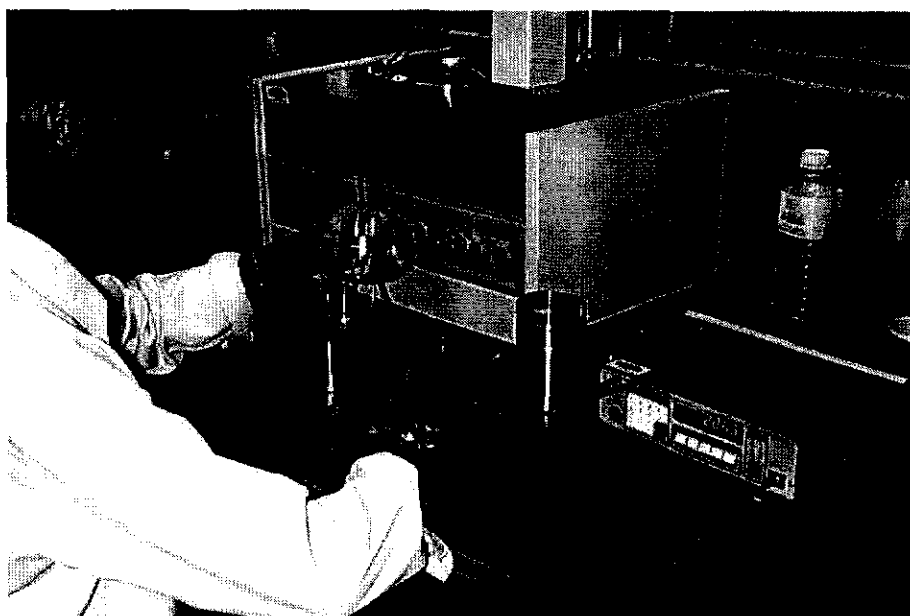


ภาพที่ 23 กองพิน

หลังจากคนลำเลียงผลิตภัณฑ์เข้าไปในกะโหลกเตาเสร็จแล้วทำการปิดประตูและปิดตาไฟทุกตาเพื่อไม่ให้อากาศเข้ามาในเตาและอบผลิตภัณฑ์ไว้เป็นเวลาประมาณ 17 ชั่วโมง จากนั้นเปิดช่องใส่ฟืนทั้งสองช่องที่กะโหลกเตาเพื่อเริ่มต้นดักชี้ถ้า ถ่านและไม้ที่เผาไหม้ไม่หมดจากเตาที่แล้วออกจากกะโหลกเตาเพื่อให้เตามีพื้นที่สำหรับใส่เชื้อเพลิงแล้วจึงเอาเชื้อเพลิงใส่ที่กะโหลกเตา การสุ่มไฟที่กะโหลกเตาเริ่มเวลา 7.30 น. ช่องใส่เชื้อเพลิงมีสองช่องดังภาพที่ 2 ช่วงแรกใส่ช่องล่างส่วนช่องบนนำอิฐวางขวางไว้ หลังจากใส่ฟืนไปประมาณ 8 ชั่วโมงจึงเริ่มทำการให้ไฟใหญ่เพื่อให้ใส่เชื้อเพลิงได้มากขึ้นโดยเปลี่ยนมาใส่เชื้อเพลิงในช่องบน ปริมาณฟืนที่ใส่ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของคนเตาซึ่งไม่มีรูปแบบที่แน่นอนขึ้นอยู่กับประสบการณ์ การบันทึกปริมาณฟืนที่ใช้ทำโดยชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใส่ล่วงหน้าเป็นกองไว้ เมื่อใส่เชื้อเพลิงไปแล้วจึงนำส่วนที่เหลือมาชั่งเพื่อหาส่วนที่ใช้ไป แล้วไปบันทึกเวลาและน้ำหนักของฟืนที่ใช้ในขณะนั้น

ค่าความร้อนของไม้ฟืนที่ใช้ในการเผาหาได้จากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ดังภาพที่ 24 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งโดยใช้หลักการสมดุลความร้อนในระบบปิดมาคำนวณหาค่าความร้อนในเชื้อเพลิง [3] ใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ของ GALLENKAMP Autobomb โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำเชื้อเพลิงที่มารถให้ละเอียดด้วยเครื่องบดไม้แล้วนำมาอัดเป็นก้อนแล้วชั่ง น้ำหนักไว้ ประกอบชุดทดลองด้วยการเติมน้ำลงในเครื่องและอัดออกซิเจนพร้อมเชื้อเพลิงลงในกระบอกทดลอง ทำการจุดระเบิดเชื้อเพลิงด้วยกระแสไฟฟ้า ความร้อนจากเชื้อเพลิงจะทำให้ให้น้ำในเครื่องมีอุณหภูมิสูงขึ้น นำอุณหภูมิที่เพิ่มมาคำนวณค่าความร้อนของไม้ยางพาราและไม้เบญจพรรณเป็น 18,142.03 และ 17,886.95 กิโลจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ

นำค่าความร้อนที่ได้นี้มาหาคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ในการสุ่มไฟที่กะโหลกเตาซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 7 และสร้างเป็นกราฟในภาพที่ 25 โดยประกอบด้วยเวลาที่ใส่เชื้อเพลิงและน้ำหนักของเชื้อเพลิง ความร้อนที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อนเฉลี่ยคือ 18,014.49 กิโลจูลต่อกิโลกรัม น้ำหนักไม้ที่ใช้รวมกันเป็น 2,243 กิโลกรัมคิดเป็น 40,406,501.07 กิโลจูลสำหรับการสุ่มไฟที่กะโหลกเตา ในช่วงแรกของการสุ่มไฟใช้เชื้อเพลิงน้อยและเมื่อให้ไฟใหญ่ใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อให้ได้อุณหภูมิสูง ลักษณะกราฟแสดงให้เห็นว่าการสุ่มไฟที่กะโหลกเตาเป็นไปอย่างไม่มีแบบแผนทั้งด้านปริมาณเชื้อเพลิงที่ใส่คือมีลักษณะขึ้น ๆ ลง ๆ และด้านระยะห่างของเวลาซึ่งการใส่ฟืนนี้ขึ้นกับประสบการณ์ของคนเตาแต่ละคน



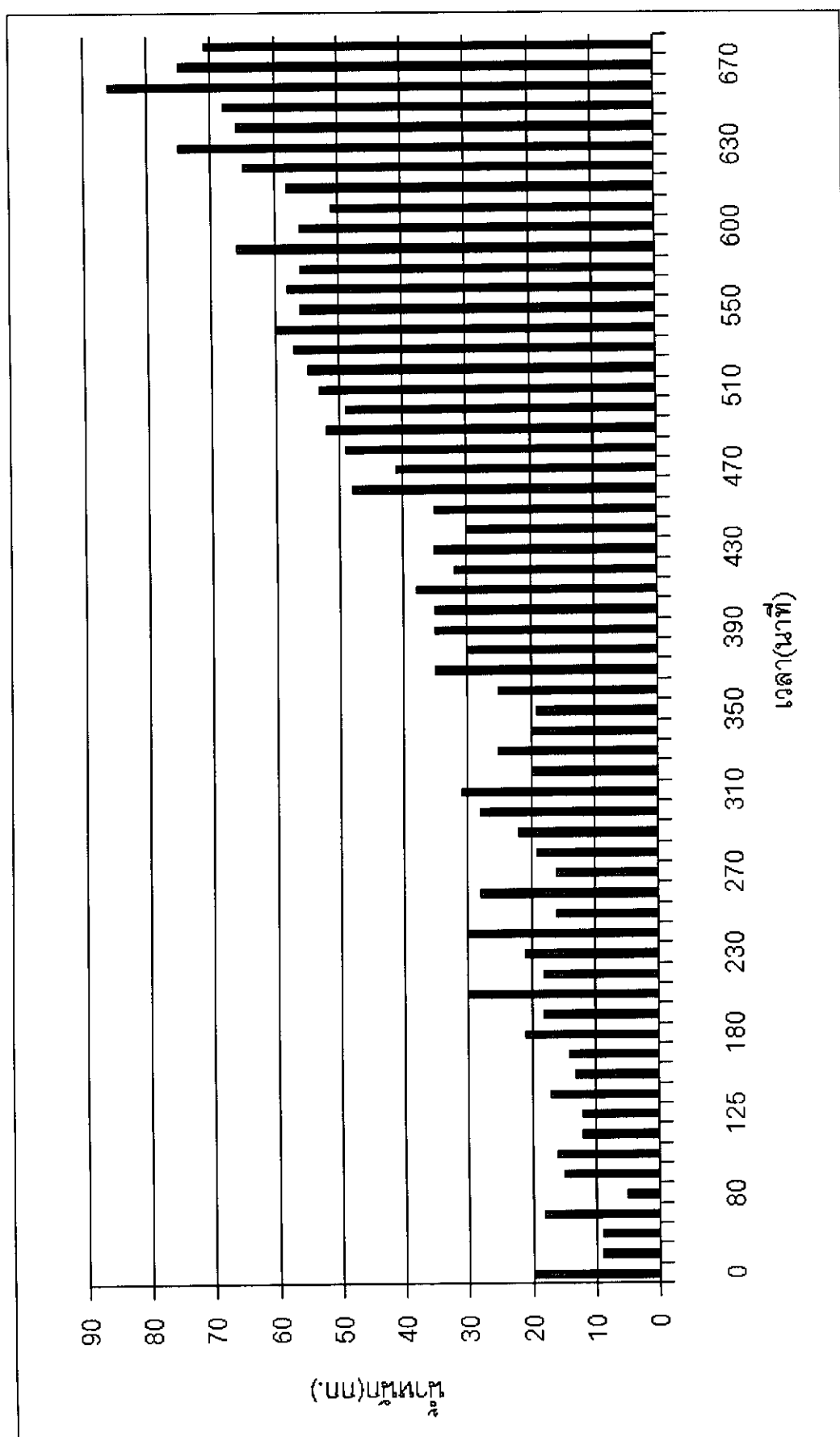
ภาพที่ 24 บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

ตารางที่ 7 เวลาและการใช้เชื้อเพลิงที่กะโหลกเตา

เวลา (นาฬิกา)	ไม้ (กิโลกรัม)	น้ำหนักสะสม (กิโลกรัม)	ความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	ความร้อนสะสม (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
7.30	20	20.00	360,289.80	360,289.80
8.10	9	29.00	162,130.41	522,420.21
8.30	9	38.00	162,130.41	684,550.62
8.40	18	56.00	324,260.82	1,008,811.44
8.50	5	61.00	90,072.45	1,098,883.89
9.13	15	76.00	270,217.35	1,369,101.24
9.15	16	92.00	288,231.84	1,657,333.08
9.30	12	104.00	216,173.88	1,873,506.96
9.35	12	116.00	216,173.88	2,089,680.84
9.50	17	133.00	306,246.33	2,395,927.17
10.00	13	146.00	234,188.37	2,630,115.54
10.15	14	160.00	252,202.86	2,882,318.40
10.30	21	181.00	378,304.29	3,260,622.69
10.40	18	199.00	324,260.82	3,584,883.51
11.00	30	229.00	540,434.70	4,125,318.21
11.11	18	247.00	324,260.82	4,449,579.03
11.20	21	268.00	378,304.29	4,827,883.32
11.30	30	298.00	540,434.70	5,368,318.02
11.40	16	314.00	288,231.84	5,656,549.86
11.50	28	342.00	504,405.72	6,160,955.58
12.00	16	358.00	288,231.84	6,449,187.42

ตารางที่ 7 (ต่อ)

เวลา (นาฬิกา)	ไม้ (กิโลกรัม)	น้ำหนักสะสม (กิโลกรัม)	ความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	ความร้อนสะสม (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
12.10	19	377.00	342,275.31	6,791,462.73
12.20	22	399.00	396,318.78	7,187,781.51
12.30	28	427.00	504,405.72	7,692,187.23
12.40	31	458.00	558,449.19	8,250,636.42
12.50	20	478.00	360,289.80	8,610,926.22
13.00	25	503.00	450,362.25	9,061,288.47
13.10	20	523.00	360,289.80	9,421,578.27
13.20	19	542.00	342,275.31	9,763,853.58
13.30	25	567.00	450,362.25	10,214,215.83
13.40	35	602.00	630,507.15	10,844,722.98
13.50	30	632.00	540,434.70	11,385,157.68
14.00	35	667.00	630,507.15	12,015,664.83
14.10	35	702.00	630,507.15	12,646,171.98
14.20	38	740.00	684,550.62	13,330,722.60
14.30	32	772.00	576,463.68	13,907,186.28
14.40	35	807.00	630,507.15	14,537,693.43
14.50	30	837.00	540,434.70	15,078,128.13
15.00	35	872.00	630,507.15	15,708,635.28
15.10	48	920.00	864,695.52	16,573,330.80
15.20	41	961.00	738,594.09	17,311,924.89
15.30	49	1,010.00	882,710.01	18,194,634.90
15.40	52	1,062.00	936,753.48	19,131,388.38
15.50	49	1,111.00	882,710.01	20,014,098.39
16.00	53	1,164.00	954,767.97	20,968,866.36
16.10	55	1,219.00	990,796.95	21,959,663.31
16.20	57	1,276.00	1,026,825.93	22,986,489.24
16.30	60	1,336.00	1,080,869.40	24,067,358.64
16.40	56	1,392.00	1,008,811.44	25,076,170.08
16.50	58	1,450.00	1,044,840.42	26,121,010.50
17.00	56	1,506.00	1,008,811.44	27,129,821.94
17.15	66	1,572.00	1,188,956.34	28,318,778.28
17.30	56	1,628.00	1,008,811.44	29,327,589.72
17.45	51	1,679.00	918,738.99	30,246,328.71
17.50	58	1,737.00	1,044,840.42	31,291,169.13
17.55	65	1,802.00	1,170,941.85	32,462,110.98
18.00	75	1,877.00	1,351,086.75	33,813,197.73
18.10	66	1,943.00	1,188,956.34	35,002,154.07
18.25	68	2,011.00	1,224,985.32	36,227,139.39
18.30	86	2,097.00	1,549,246.14	37,776,385.53
18.40	75	2,172.00	1,351,086.75	39,127,472.28
18.50	71	2,243.00	1,279,028.79	40,406,501.07

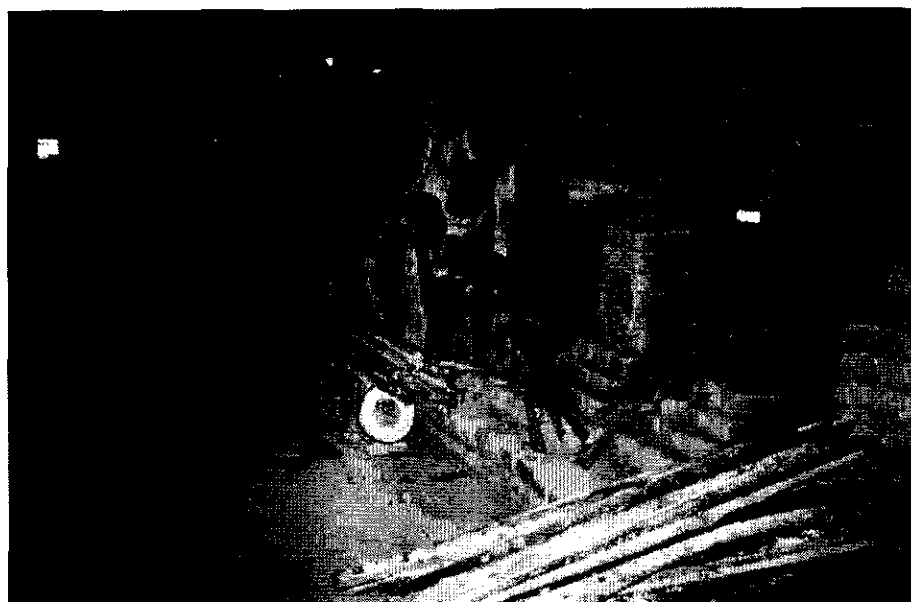


ภาพที่ 25 ปริมาณเรือเพลิงช่วงสุไฟที่กะโหลกเตา

การใช้เชื้อเพลิงช่วงเดินไฟไปท้ายเตา

หลังจากทำอุณหภูมิในกะโหลกเตาได้ประมาณ 1,250 เซลเซียสแล้วจึงเริ่มทำการเดินไฟไปท้ายเตา การเดินไฟไปท้ายเตา เริ่มต้นด้วยการชั่งเชื้อเพลิงไว้ล่วงหน้าดังภาพที่ 26 เมื่อคนเตาใช้เชื้อเพลิงเสร็จสิ้นจึงมาชั่งเชื้อเพลิงส่วนที่เหลือ การบันทึกเชื้อเพลิงในช่วงนี้ทำได้เพียงข้างเดียวคือด้านที่เป็นถนนเพราะอีกด้านพื้นที่น้อยไม่สามารถวางเชื้อเพลิงไว้ล่วงหน้าได้ ปริมาณพื้นที่ใช้สำหรับข้างเดียว 2,841 กิโลกรัม ส่วนอีกข้างหนึ่งของเตาไม่สามารถทำการชั่งน้ำหนักได้เนื่องจากความจำกัดด้านพื้นที่แต่พออนุมานได้ว่าใช้ปริมาณไฟใกล้เคียงกัน การเดินไฟไปท้ายเตาสำหรับการไปบันทึกค่าครั้งนี้เริ่มเวลา 19.00 น. การเดินไฟไปท้ายเตาใช้ประสบการณ์โดยดูลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สุกจากสีของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาของการใช้เชื้อเพลิงในแต่ละตาไม่เท่ากันบริเวณด้านหน้าของเตาจะใช้เวลาน้อยกว่าท้ายเตาเนื่องจากบริเวณด้านหน้ามีพื้นที่เล็กกว่าและได้รับความร้อนจากช่วงสุมไฟที่กะโหลกเตาในช่วงต้นแล้ว ปริมาณไม้และค่าความร้อนที่ให้เตาที่ตาต่างๆในเตาแสดงในตารางที่ 8 และสร้างกราฟดังภาพที่

27



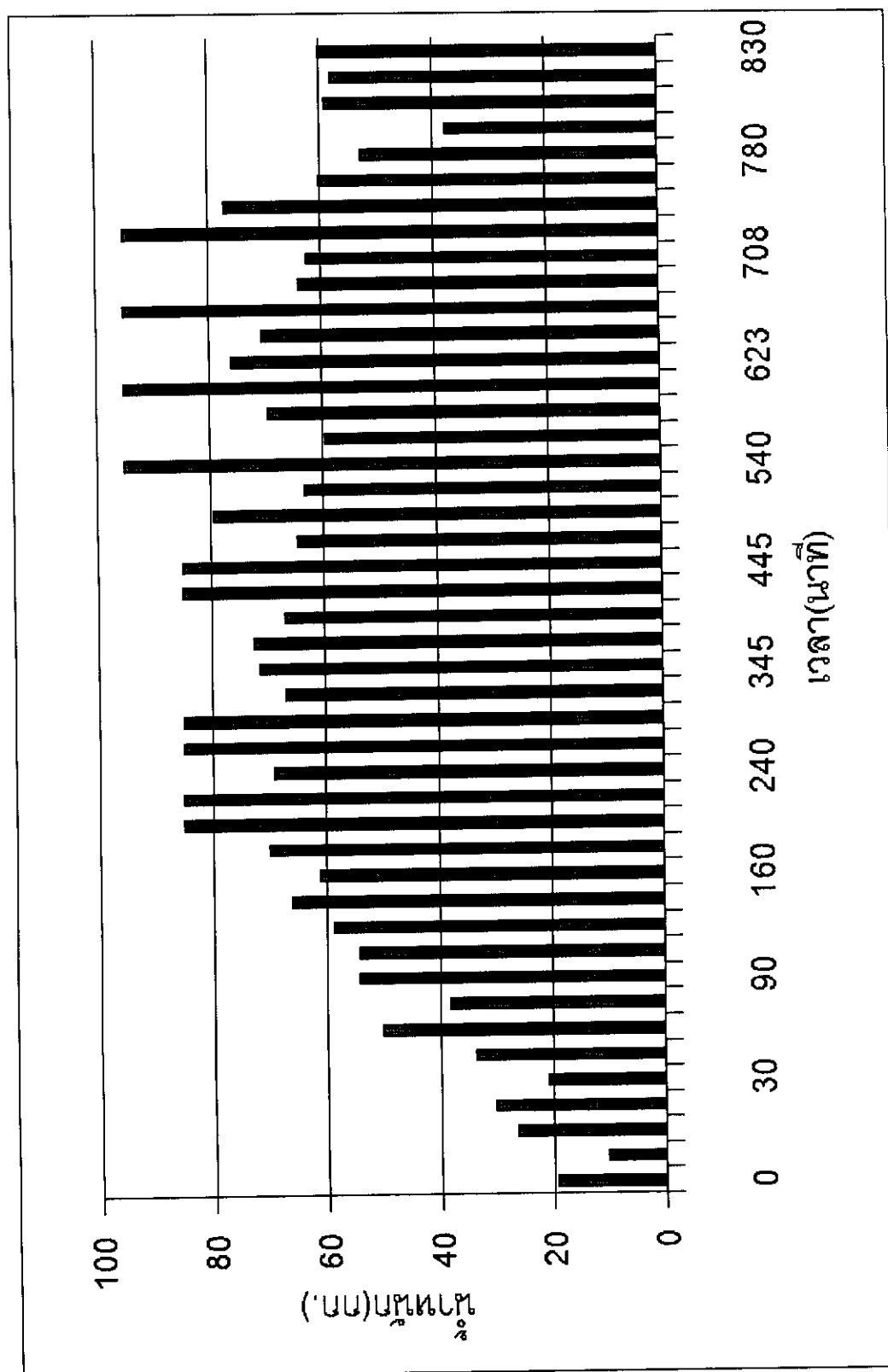
ภาพที่ 26 การชั่งเชื้อเพลิงล่วงหน้า

ตารางที่ 8 เวลาและการใช้เชื้อเพลิงช่วงเดินไฟไปท้ายเตา

ดาที่	เวลา (น.)	น้ำหนัก (KG)	น้ำหนักสะสม (KG)	ความร้อน (KJ)	ความร้อนสะสม (KJ)
1	-	0	0.00	0.00	0.00
2	-	0	0.00	0.00	0.00
3	19.00	19	19.00	342,275.31	342,275.31
4	19.05	10	29.00	180,144.90	522,420.21
5	19.10	26.2	55.20	471,979.64	994,399.85
6	19.20	30	85.20	540,434.70	1,534,834.55
7	19.30	20.5	105.70	369,297.05	1,904,131.59
8	19.40	33.5	139.20	603,485.42	2,507,617.01
9	19.55	50	189.20	900,724.50	3,408,341.51
10	20.15	38	227.20	684,550.62	4,092,892.13
11	20.30	54	281.20	972,782.46	5,065,674.59
12	20.55	54	335.20	972,782.46	6,038,457.05
13	21.05	58.5	393.70	1,053,847.67	7,092,304.71
14	21.25	66	459.70	1,188,956.34	8,281,261.05
15	21.40	61	520.70	1,098,883.89	9,380,144.94
16	22.10	70	590.70	1,261,014.30	10,641,159.24
17	22.30	85	675.70	1,531,231.65	12,172,390.89
18	22.55	85	760.70	1,531,231.65	13,703,622.54
19	23.10	69	829.70	1,242,999.81	14,946,622.35
20	23.30	85	914.70	1,531,231.65	16,477,854.00
21	24.05	85	999.70	1,531,231.65	18,009,085.65
22	0.35	67	1,066.70	1,206,970.83	19,216,056.48
23	0.55	71.5	1,138.20	1,288,036.04	20,504,092.52
24	1.20	72.5	1,210.70	1,306,050.53	21,810,143.04
25	1.40	67	1,277.70	1,206,970.83	23,017,113.87
26	2.05	85	1,362.70	1,531,231.65	24,548,345.52

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ดาที่	เวลา (น.)	น้ำหนัก (KG)	น้ำหนักสะสม (KG)	ความร้อน (KJ)	ความร้อนสะสม (KJ)
27	2.35	85	1,447.70	1,531,231.65	26,079,577.17
28	3.00	64.5	1,512.20	1,161,934.61	27,241,511.78
29	3.30	79.5	1,591.70	1,432,151.96	28,673,663.73
30	3.55	63.3	1,655.00	1,140,317.22	29,813,980.95
31	4.10	95	1,750.00	1,711,376.55	31,525,357.50
32	4.35	59.5	1,809.50	1,071,862.16	32,597,219.66
33	4.53	69.5	1,879.00	1,252,007.06	33,849,226.71
34	5.17	95	1,974.00	1,711,376.55	35,560,603.26
35	5.33	76	2,050.00	1,369,101.24	36,929,704.50
36	5.48	70.5	2,120.50	1,270,021.55	38,199,726.05
37	6.25	95	2,215.50	1,711,376.55	39,911,102.60
38	6.40	64	2,279.50	1,152,927.36	41,064,029.96
39	6.58	62.5	2,342.00	1,125,905.63	42,189,935.58
40	7.22	95	2,437.00	1,711,376.55	43,901,312.13
41	7.44	77	2,514.00	1,387,115.73	45,288,427.86
42	7.55	60	2,574.00	1,080,869.40	46,369,297.26
43	8.10	52.5	2,626.50	945,760.73	47,315,057.99
44	8.20	37.5	2,664.00	675,543.38	47,990,601.36
45	8.35	59	2,723.00	1,062,854.91	49,053,456.27
46	8.50	58	2,781.00	1,044,840.42	50,098,296.69
47	9.00	60	2,841.00	1,080,869.40	51,179,166.09
48	-	0	2,841.00	0.00	51,179,166.09
49	-	0	2,841.00	0.00	51,179,166.09

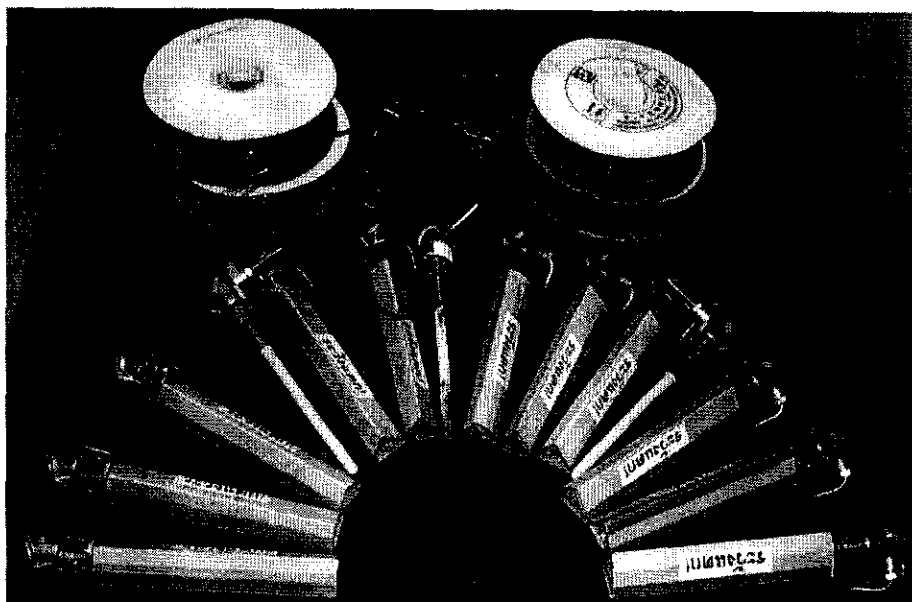


ภาพที่ 27 ปริมาณเชื้อเพลิงช่วงเดินไฟไปท้ายเตา

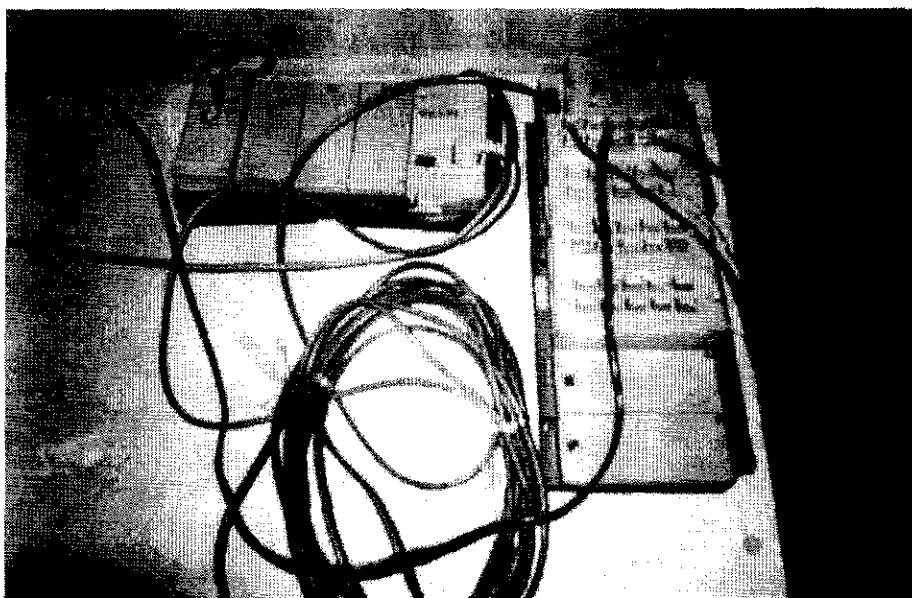
จากข้อมูลการเดินไฟไปท้ายเตา (ตารางที่ 8 ภาพที่ 27) พบว่าในแต่ละตาใช้ฟืนไม่เท่ากันมีลักษณะเป็นคาบซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์บางตาที่จัดเรียงในเตามีคุณสมบัติเสมือนตัวกักเก็บความร้อน (Thermal Storage) อัตราการได้รับความร้อนของผลิตภัณฑ์ในแต่ละบริเวณของเตาจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจต่อไป ผลการวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสุมไฟที่กะโหลกเตา 2,243 กิโลกรัม และเดินไฟไปท้ายเตาข้างละประมาณ 2,841 กิโลกรัม ดังนั้นใช้เชื้อเพลิงประมาณ 7,925 กิโลกรัม

ผลการวัดอุณหภูมิในเตา

อุณหภูมิที่กระจายในเตาวัดค่าโดยบันทึกสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouple type K) โดยมีลักษณะปลายหุ้มเซรามิกแทนที่จะเป็นปลายหุ้มสเตนเลสสตีลเพื่อให้ทนอุณหภูมิได้สูงขึ้นดังภาพที่ 28 อุณหภูมิที่กระจายในเตาได้มาจากสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิลที่บันทึกลงในอุปกรณ์เก็บสัญญาณ (data logger) ของ YOGOKAWA รุ่น DS600 และ DA100 ดังภาพที่ 29 และแปลงสัญญาณออกมาเป็นอุณหภูมิ ซึ่งเครื่องอุปกรณ์เก็บสัญญาณนี้สามารถบันทึกอุณหภูมิได้ถึง 30 จุดในเวลาเดียวกัน การกระจายตัวของอุณหภูมิของเตาทำโดยบันทึกอุณหภูมิตลอดความยาวของเตา ใช้เทอร์โมคัปเปิล 13 ตัว (ที่ใช้เทอร์โมคัปเปิล 13 ตัวเพราะว่าเป็นจำกัดทางด้านราคาของเทอร์โมคัปเปิลและสายสัญญาณ) โดยประกอบเทอร์โมคัปเปิลลงในเตาดังภาพที่ 30 ด้วยการเจาะทะลุหลังคาเตาที่ตำแหน่งต่างๆดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวโดยส่วนใหญ่จะห่างกันโดยประมาณ 4 ตาไฟและตาไฟของเตานั้นมีระยะห่างไม่เท่ากันโดยเฉลี่ย 4 ตาไฟห่างกันประมาณ 4.5 เมตร ใส่เทอร์โมคัปเปิลลงไปจากนั้นใช้ดินเหนียวให้เรียบร้อย ต่อสายสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิลกับอุปกรณ์เก็บสัญญาณและคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกอุณหภูมิ การบันทึกอุณหภูมิบันทึกห่างกันครั้งละ 5 นาที เริ่มตั้งแต่ช่วงอบผลิตภัณฑ์จนถึงช่วงเปิดเตา นำข้อมูลของอุณหภูมิภายในเตาจากเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 13 ตัว มาสร้างเป็นกราฟเพื่อดูลักษณะของอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 31 กราฟเส้นที่หนึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่งและเส้นที่สองเป็นของตัวที่สองจนถึงเส้นที่สิบสามเป็นของตัวที่สิบสาม เมื่อให้เชื้อเพลิงก๊าซร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและจะมีความร้อนมากขึ้น เมื่อการให้เชื้อเพลิงเข้ามาใกล้ตาที่เทอร์โมคัปเปิลติดตั้งอยู่อุณหภูมิสูงขึ้น และจะมีอุณหภูมิลดลงเมื่อการให้เชื้อเพลิงผ่านตานั้นไปแล้ว จากกราฟมีข้อสังเกตคือเส้นที่หนึ่งมีการสั่นมากกว่าเส้นอื่นๆ จึงทำการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลของเทอร์โมคัปเปิลทุกตัวแล้วพบว่าเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่งและสองมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากกว่าตัวอื่นๆ และตั้งแต่เทอร์โมคัปเปิลตัวที่หกไปอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิค่าใกล้เคียงกันมาก นำอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่ง สอง สาม และหกมาแสดงไว้ในภาพที่ 32 ถึง 35 ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มากนี้อาจเป็นหนึ่งในสาเหตุของความเสียหายของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 28 เทอร์โมคัมเบิล



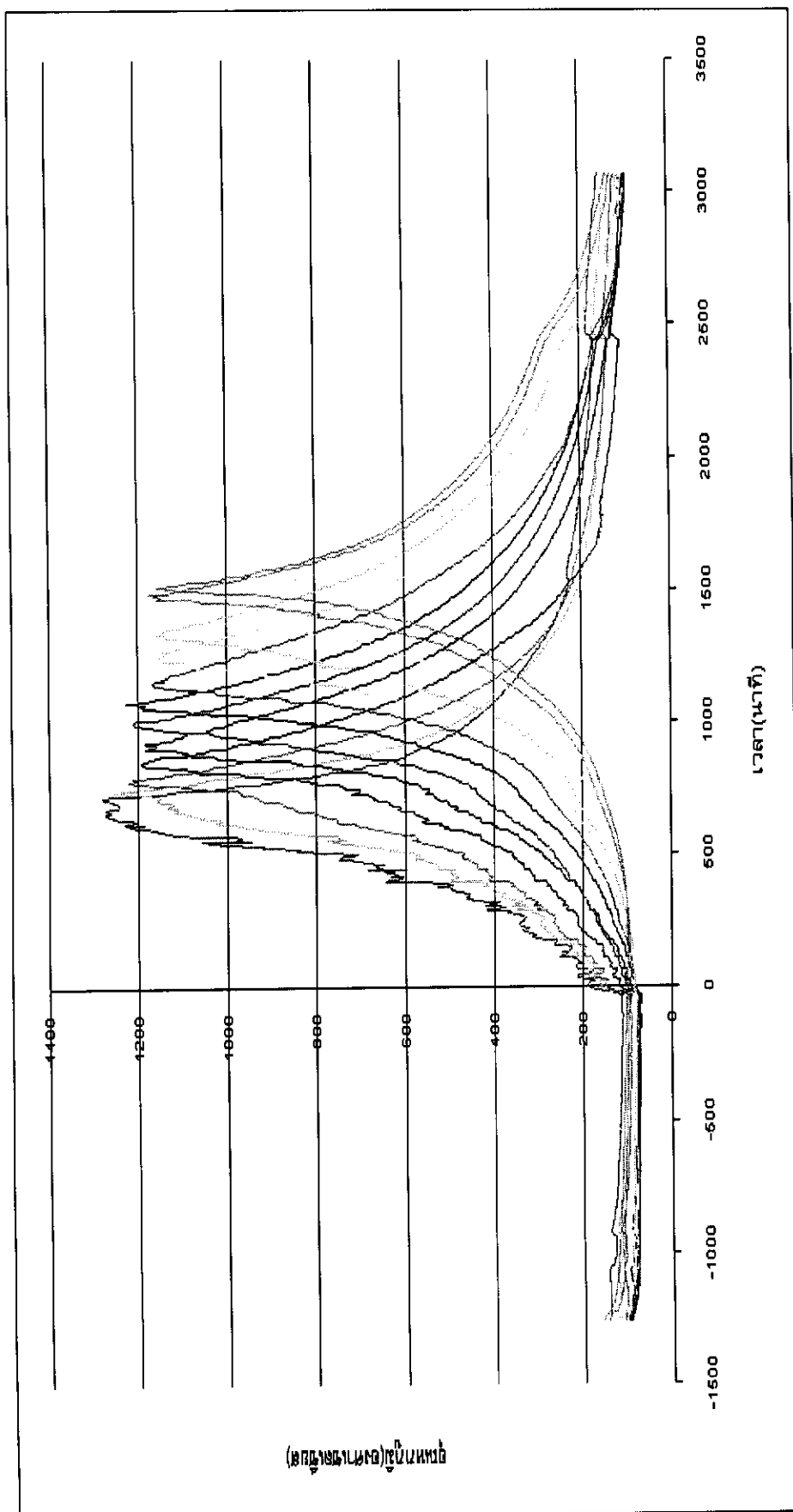
ภาพที่ 29 อุปกรณ์เก็บสัญญาณ



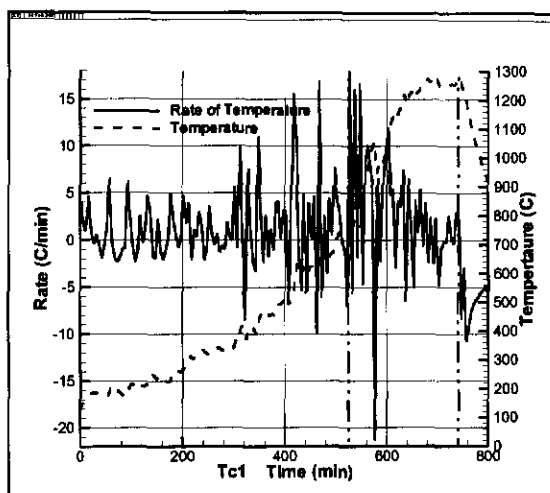
ภาพที่ 30 การประกอบเทอร์โมคัปเปิลลงในเตา

ตารางที่ 9 ระยะห่างของเทอร์โมคัปเปิล

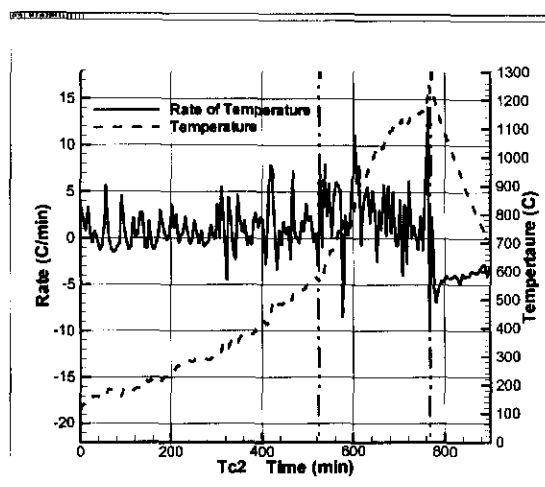
TC	หลังคาที่	ระยะห่าง (เมตร)	ระยะรวม (เมตร)
1	1	4.00	4.00
2	5	3.65	7.65
3	9	3.30	10.95
4	13	4.20	15.15
5	17	3.80	18.95
6	21	4.40	23.35
7	25	5.00	28.35
8	29	4.80	33.15
9	33	5.00	38.15
10	37	4.90	43.05
11	41	5.50	48.55
12	45	5.30	53.85
13	48	3.90	57.75



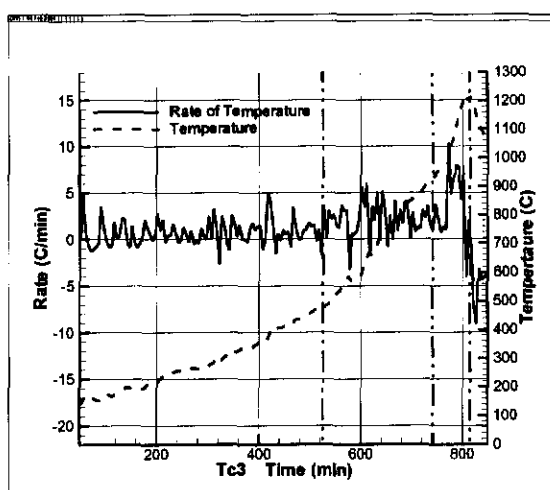
ภาพที่ 31 กราฟข้อมูลภูมิภายในเตา



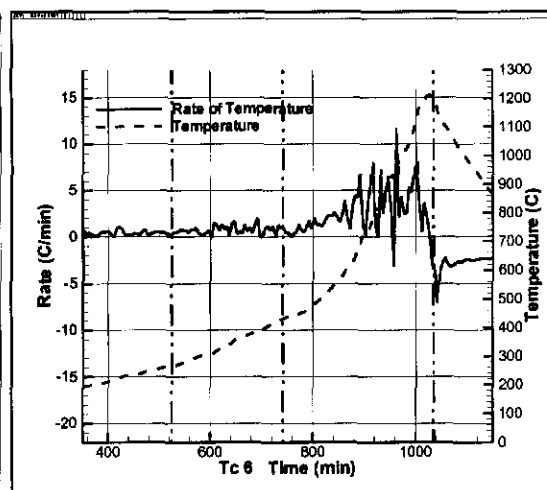
ภาพที่ 32 อัตราการเปลี่ยนแปลงที่ Tc1



ภาพที่ 33 อัตราการเปลี่ยนแปลงที่ Tc2



ภาพที่ 34 อัตราการเปลี่ยนแปลงที่ Tc3



ภาพที่ 35 อัตราการเปลี่ยนแปลงที่ Tc6

จากภาพที่ 32 ถึงภาพที่ 35 แสดงให้เห็นถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่บันทึกจากเทอร์โมคัปเปิล แกนนอนเป็นแกนของเวลา (หน่วยนาทีก) แกนตั้งทางซ้ายมือเป็นแกนของอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (หน่วยองศาเซลเซียสต่อนาทีก) และแกนตั้งทางขวามืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในภาพเริ่มตั้งแต่การสุ่มไฟที่กระโหลกเตาที่เวลา 0 นาทีก แบ่งออกเป็นช่วงดังนี้คือตั้งแต่ 0 นาทีกถึงเส้นตรงในแนวตั้งเส้นที่หนึ่งคือช่วงสุ่มไฟที่หัวเตา ช่วงเส้นที่หนึ่งถึงเส้นที่สองเป็นช่วงสุ่มไฟที่หัวเตาด้วยไฟใหญ่ และเส้นที่สองถึงเส้นที่สามเป็นการเดินไฟไปท้ายเตาถึงบริเวณเตาที่เทอร์โมคัปเปิลติดตั้งอยู่ เส้นประแสดงถึงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในขณะนั้น

จากภาพที่ 32 เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่งพบว่า เมื่อเริ่มทำการสุ่มไฟที่หัวเตาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นลงระหว่างประมาณ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีกับประมาณ -2 องศาเซลเซียสต่อนาที ช่วงเริ่มต้นให้ไฟใหญ่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากที่สุดคือจากประมาณ 15 องศาเซลเซียสต่อนาทีไปยัง -22 องศาเซลเซียสต่อนาทีและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงให้ไฟใหญ่กว้างกว่าช่วงแรกมาก

จากภาพที่ 33 เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่สองพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแคบกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่งโดยเฉลี่ยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ระหว่างประมาณ 11 องศาเซลเซียสต่อนาทีกับประมาณ -8 องศาเซลเซียสต่อนาที

จากภาพที่ 34 และ 35 เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่สามและหกพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแคบกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่สอง อัตราการเปลี่ยนของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หกเป็นต้นไปมีลักษณะคล้ายกันคือในช่วงแรกอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยและจะมากขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงเริ่มเข้ามาถึงบริเวณที่เทอร์โมคัปเปิลติดตั้งอยู่

สาเหตุของอัตราการเปลี่ยนของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอมาจากการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงที่ต้องใส่เป็นช่วงๆไม่สามารถใส่แบบต่อเนื่องได้ และการเผาไหม้ของไม้แบบเป็นช่วงๆนี้เป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแบบไม่สม่ำเสมอซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนระหว่างกะโหลกเตากับห้องเผาไหม้ที่หนึ่งซึ่งแสดงในบทที่ 5

บทที่ 5

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนมีแนวคิดมากจากการประหยัดพลังงาน ก๊าซร้อนที่ผ่านขบวนการอุตสาหกรรมก่อนที่จะปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศจะนำก๊าซร้อนนี้มาผ่านอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนและลดอุณหภูมิของก๊าซที่จะทำไปทิ้งและนำความร้อนที่สะสมในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนมาใช้งาน โครงการนี้จึงได้นำแนวความคิดของการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้มาใช้ในวงจรการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนจำลอง

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน [4] นำวัสดุประเภทอิฐมาเรียงกันเป็นแผ่นตามแนวนอนมีช่องว่างเพื่อให้ก๊าซร้อนที่ได้จากการสันดาปไหลผ่านเข้าไปเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกันดังแสดงในภาพที่ 36 ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้ในการทดลองเชิงหลักการเบื้องต้น ผลการจำลองเชิงตัวเลขจะใช้เป็นตัวบ่งชี้ศักยภาพในการนำอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนมาประยุกต์ในปัญหาการหน่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตามังกรโดยมีสมมติฐานในการแลกเปลี่ยนความร้อนดังนี้

1. คุณสมบัติของก๊าซร้อนและวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนมีค่าคงที่
2. ค่าการนำความร้อนของวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนในแนวแกน y มีค่าอนันต์
3. ค่าการนำความร้อนของวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนในแนวแกน x มีค่าเป็นศูนย์
4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความสม่ำเสมอ
5. การเปลี่ยนอุณหภูมิของก๊าซร้อนเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด
6. อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนมีค่าสม่ำเสมอ
7. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้านข้างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน
8. ความเร็วของก๊าซร้อนมีค่าคงที่

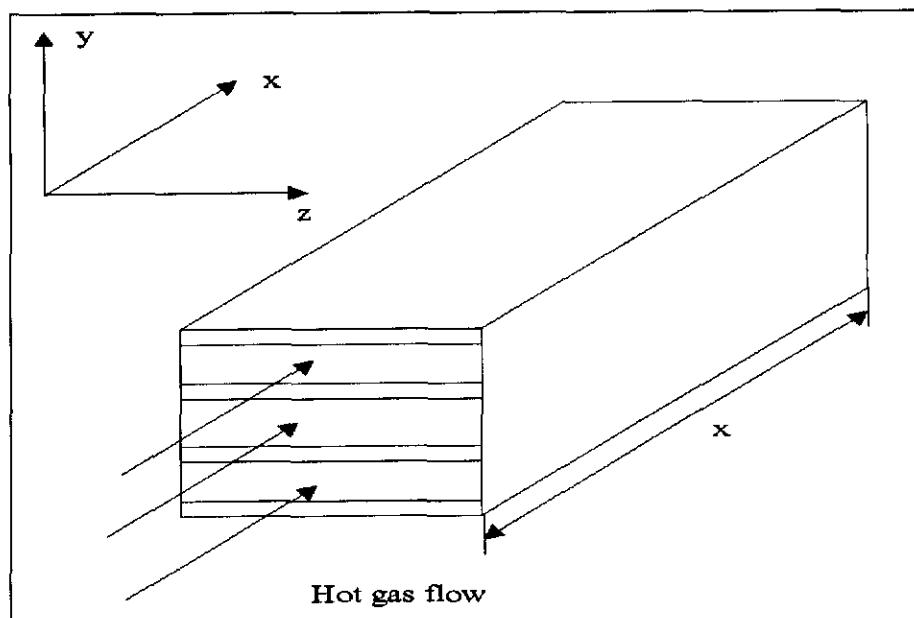
สมการครอบคลุม

อุณหภูมิของก๊าซร้อนและวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนหาได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนหนึ่งมิติดังภาพที่ 37 สมการครอบคลุมของก๊าซร้อนสำหรับอีลิเมนต์ (Element) เล็กๆ มีความยาว Δx คือ

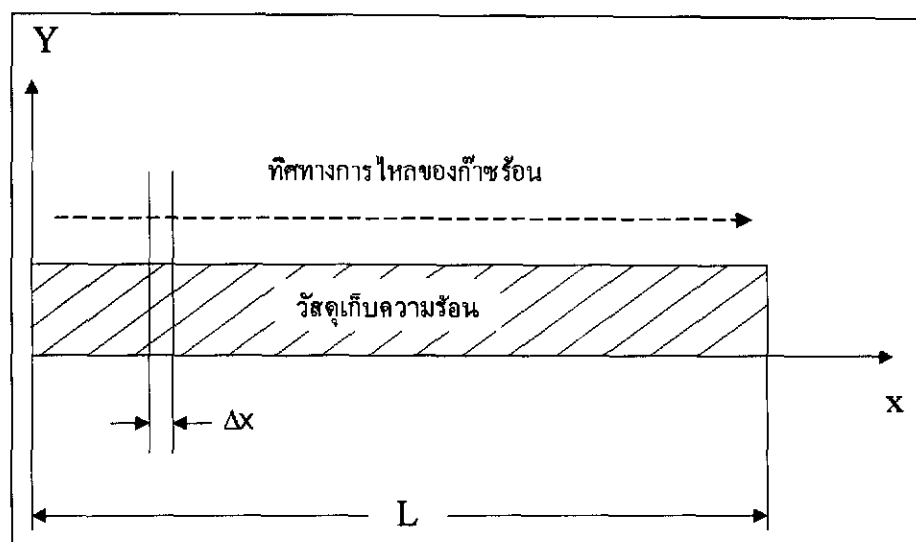
$$\frac{hA\Delta x}{L}(t_m - t_f) + \dot{m}_f c_f t_f|_x = \dot{m}_f c_f t_f|_{x+\Delta x} + S_f \Delta x p_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau} \quad (5.1)$$

เทอมทางซ้ายของสมการแทนความร้อนที่ถ่ายเทจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนสู่ก๊าซร้อนและปริมาณพลังงานของก๊าซร้อนที่ผ่านหน้าตัดทางเข้าของอีลิเมนต์ เทอมทางขวาประกอบด้วยปริมาณพลังงานความร้อนของก๊าซร้อนที่ไหลออกจากอีลิเมนต์ทางหน้าตัดด้านออกและพลังงานที่สะสมในปริมาตร ในทางปฏิบัติพลังงานที่สะสมในก๊าซร้อนมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้ แทนค่า $t_f|_{x+\Delta x} = t_f|_x + \frac{\partial t_f}{\partial x} \Delta x$ ทำให้สมการสุดท้ายของก๊าซร้อนคือ

$$\frac{\dot{m}_f c_f}{hA} \frac{\partial t_f}{\partial x} = (t_m - t_f) \quad (5.2)$$



ภาพที่ 36 อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน



ภาพที่ 37 อิลิเมนต์เล็กๆของวัสดุที่เก็บพลังงานความร้อน

การสมดุลความร้อนในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนคือ

$$\frac{hA\Delta x}{L}(t_f - t_m) = S_m \Delta x \rho_m c_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} \quad (5.3)$$

ทำการเรียงสมการใหม่

$$\frac{S_m \rho_m c_m L}{hA} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = (t_f - t_m) \quad (5.4)$$

เงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

$$\begin{aligned} \tau = 0 & \quad t = t_m = t_0 \\ \tau > 0 & \quad x = 0 \quad t_f = t_{\eta} \end{aligned} \quad (5.5)$$

กล่าวคือที่เวลาเริ่มต้น $\tau = 0$ อุณหภูมิของระบบอยู่ในสภาวะสมดุลที่ t_0 เมื่อเวลา $\tau > 0$ อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางเข้า $x = 0$ เปลี่ยนเป็น t_{η} ทันทีทันใด

เพื่อความง่ายในการหาคำตอบของสมการจึงทำให้สมการอยู่ในแบบของตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\text{ระยะทางไร้มิติ} \quad \xi \equiv \frac{hAx}{\dot{m}_f c_f L} \quad (5.6)$$

$$\text{ความยาวไร้มิติ} \quad \lambda \equiv \frac{hA}{\dot{m}_f c_f} \quad (5.7)$$

$$\text{เวลาไร้มิติ} \quad \eta \equiv \frac{hA\tau}{S_m L \rho_m c_m} \quad (5.8)$$

$$\text{อุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อน} \quad T_f \equiv \frac{t_f - t_0}{t_{\eta} - t_0} \quad (5.9)$$

อุณหภูมิไร้มิติของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน

$$T_m \equiv \frac{t_m - t_0}{t_n - t_0} \quad (5.10)$$

อุณหภูมิของก๊าซร้อนและอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนในสมการ (5.2) และ (5.4) เปลี่ยนรูปแบบให้อยู่ในสมการตัวแปรไร้มิตดังนี้

$$\text{ก๊าซร้อน} \quad \frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f \quad (5.11)$$

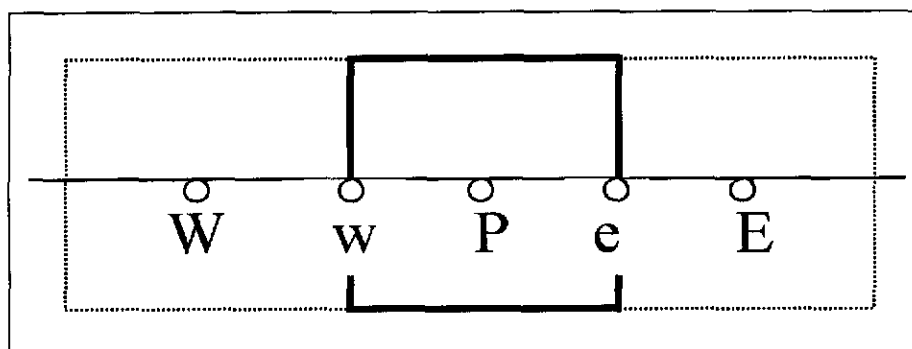
$$\text{อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน} \quad \frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_f - T_m \quad (5.12)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

$$\begin{aligned} \eta = 0 \quad T_m &= 0 \\ \xi = 0 \quad T_f &= 1 \end{aligned} \quad (5.13)$$

การแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลข

ใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขหาคำตอบของสมการ (5.11) โดยใช้วิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite volume) [5] โดยพิจารณาก๊าซร้อนเป็นอีลิเมนต์เล็กๆดังแสดงในภาพที่ 38 กรอบสี่เหลี่ยมเส้นทึบคืออีลิเมนต์ที่จะทำการวิเคราะห์ P คือจุดกึ่งกลาง (Node) ของอีลิเมนต์ e คือขอบทางทิศตะวันออกของอีลิเมนต์ w คือขอบทางทิศตะวันตกของอีลิเมนต์ E คือจุดกึ่งกลางของอีลิเมนต์ที่อยู่ติดกันทางทิศตะวันออก และ W คือจุดกึ่งกลางของอีลิเมนต์ที่อยู่ติดกันทางทิศตะวันตก



ภาพที่ 38 อีลิเมนต์ของไฟไนต์โวลุ่ม

จากสมการของก๊าซร้อนอินทิเกรตเทียบคอนโทรลโวลุ่มและเทียบเวลา

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_{cv} \frac{\partial T_f}{\partial \xi} dv dt &= \int_t^{t+\Delta t} \int_{cv} (T_m - T_f) dv dt \\ \int_t^{t+\Delta t} [(AT_f)_e - (AT_f)_w] dt &= \int_t^{t+\Delta t} (T_{m,p} - T_{f,p}) \Delta v dt \end{aligned}$$

$$A(T_{f,e} - T_{f,w})\Delta t = (T_{f,p} - T_{m,p})\Delta v\Delta t$$

$$A = \Delta y \quad \Delta v = \Delta x \Delta y$$

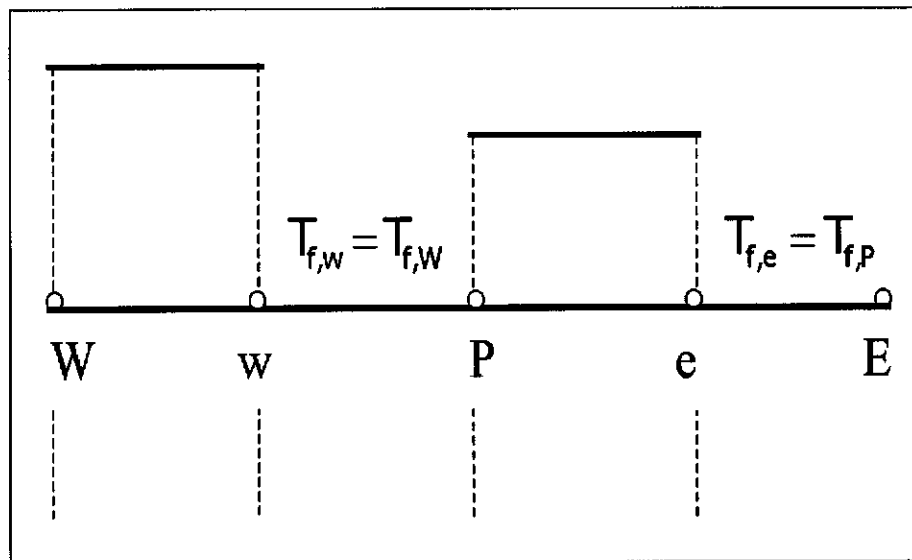
$$\frac{T_{f,e} - T_{f,w}}{\Delta x} = T_{f,p} - T_{m,p} \quad (5.14)$$

สมการ (5.14) $T_{f,e}$ และ $T_{f,w}$ เป็นค่าที่ขอบของอีลิเมนต์ ทำการประมาณค่าของ $T_{f,e}, T_{f,w}$ ด้วยอุณหภูมิของจุดกึ่งกลางอีลิเมนต์โดยวิธีอัปวินด์ (Upwind scheme) ประมาณ $T_{f,w} = T_{f,w}$ และ $T_{f,e} = T_{f,p}$ ดังแสดงในภาพที่ 39 สมการ (5.14) กลายเป็น

$$\frac{T_{f,p} - T_{f,w}}{\Delta x} = T_{f,p} - T_{m,p}$$

และ
$$T_{f,p} = \frac{\Delta x T_{m,p}}{(1 + \Delta x)} + \frac{T_{f,w}}{(1 + \Delta x)} \quad (5.15)$$

สมการ (5.15) เป็นอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนใช้คำนวณ T_f ตลอดทั้งความยาวของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน



ภาพที่ 39 การแทนค่าโดยใช้วิธีอัปวินด์

ส่วนการหาผลเฉลยของอุณหภูมิไร้มิติของวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อนสมการ (5.12) ใช้วิธีรังกัดตะ (RUNGE KUTTA) [6] หาคำตอบของ T_m โดยใช้โปรแกรม Matlab

ขั้นตอนการคำนวณอุณหภูมิของก๊าซร้อนเมื่อไหลผ่านวัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน

1. ที่ $\eta = 0, \xi = 0$ ให้ค่า $T_f = 1$ และคำนวณหา $T_{f(\xi>0)}$ โดยแก้สมการ (5.15) โดยวิธีไฟไนต์โวลุ่ม

2. ที่ $\eta = 0 + \Delta\eta$ นำค่า T_f จากข้อหนึ่งมาคำนวณค่า $T_{m,\eta=0+\Delta\eta}$ โดยแก้สมการ (5.12) ด้วยวิธีรังกัตตะ
3. ทำซ้ำข้อหนึ่งและข้อสองตามลำดับสำหรับเวลาถัดไป

ผลการคำนวณ

กำหนดให้วัสดุที่กักเก็บให้มีความยาวไร้มิติ 20 หน่วย ใช้การการคำนวณที่ $\Delta t = 0.05$ $\Delta X = 1/80$ จากเงื่อนไขในสมการ (5.13) แสดงว่าเริ่มต้นก๊าซร้อนและวัสดุที่กักเก็บพลังงานความร้อนอยู่ที่สถานะสมดุลทางความร้อนมีอุณหภูมิไร้มิติ 0 หน่วย เริ่มการคำนวณเมื่อเวลาไร้มิติ 0 หน่วย โดยเปลี่ยนอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนที่ทางเข้าจาก 0 เป็น 1 ในทันทีทันใด ผลการคำนวณอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนแสดงอยู่ในภาพที่ 40 ซึ่งประกอบด้วยแกนนอนเป็นระยะทางไร้มิติที่ก๊าซร้อนไหลผ่านเข้าไปในวัสดุที่กักเก็บพลังงานความร้อนและแกนตั้งเป็นอุณหภูมิไร้มิติและในภาพนี้ได้เปรียบเทียบการคำนวณเชิงตัวเลขกับการคำนวณด้วยวิธีวิเคราะห์ (Analytical method) ของ Klinkenberg [7] ซึ่งให้ผลที่เทียบเคียงกัน ในภาพนี้แสดงอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนที่ทางออกถูกห้วงให้เพิ่มอย่างช้าๆ

ในการนี้อุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนที่ทางทางเข้าเป็นแบบไซน์เวฟ (Sine wave) โดยให้ $T_{f,\xi=0} = \sin(0.1 \times \eta)$ แทนค่าลงในเงื่อนไขในสมการ (5.13) ได้ระบบสมการที่ต้องหาคำตอบคือ

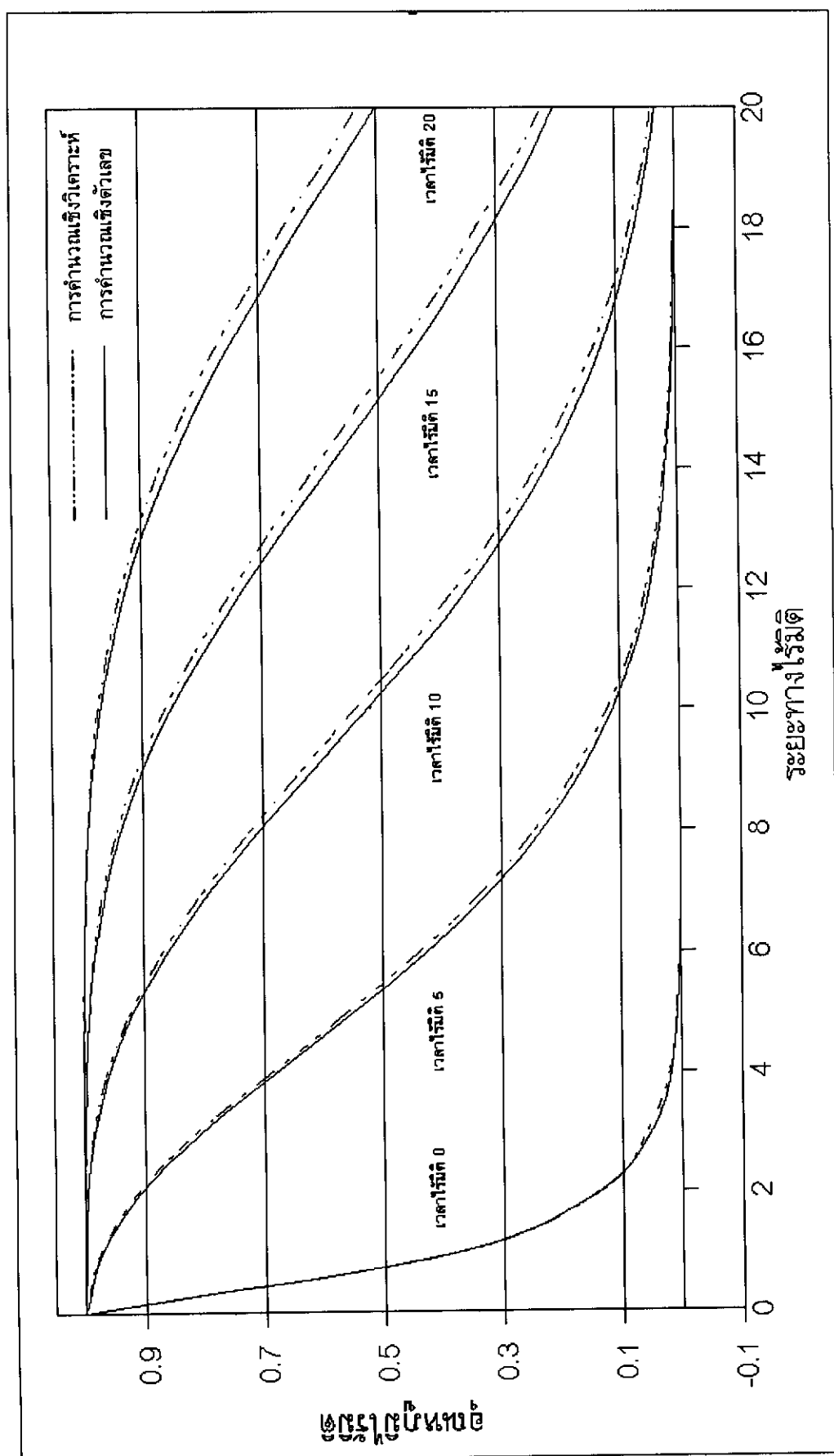
$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f \qquad \frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_f - T_m$$

โดยมีเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

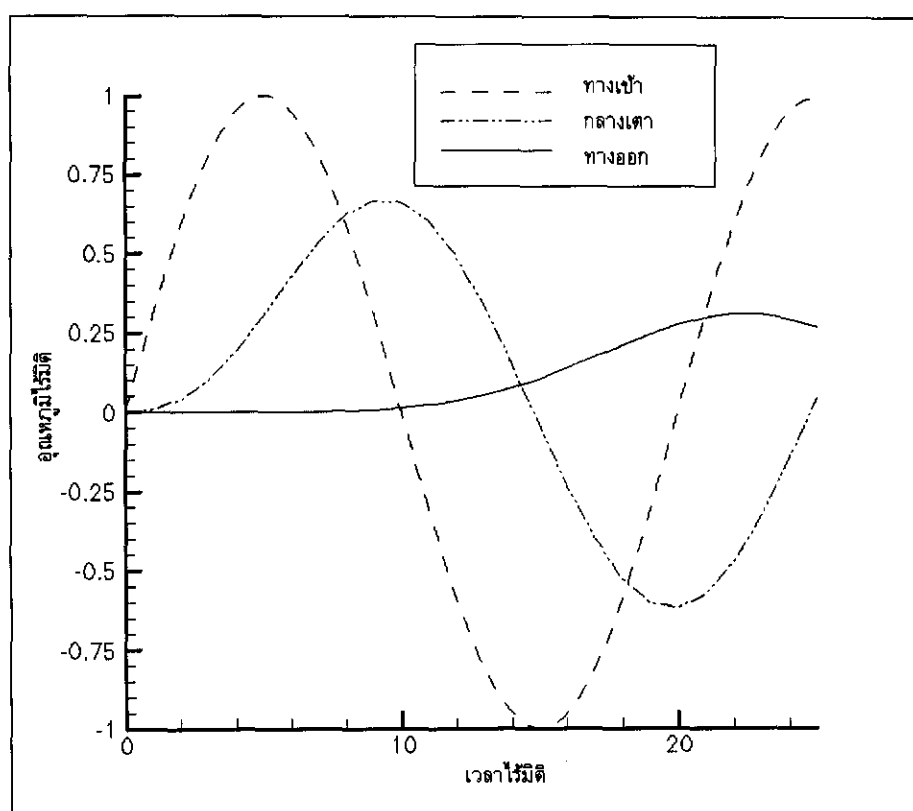
$$\begin{aligned} \eta = 0 \qquad T_m &= 0 \\ \xi = 0 \qquad T_f &= \sin(0.1 \times \eta) \end{aligned}$$

นำคำตอบมาสร้างเป็นกราฟดังแสดงในภาพที่ 41 พบว่าอุณหภูมิที่ทางออกถูกห้วงเช่นกัน

พฤติกรรมเช่นนี้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงที่วัดได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตา (ดูภาพที่ 32 - 35) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลตัวหลังๆจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลตัวแรกๆ ทั้งนี้ตัวผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านหน้าทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน



ภาพที่ 40 เปรียบเทียบอนุกรมวิธานของก๊าซเรือนกระจกที่คำนวณได้กับผลเฉลย



รูปที่ 41 อณูหภูมิไรมิติของก๊าซร้อนเมื่อลักษณะอณูหภูมิไรมิติทางเข้าเป็นไซน์เวฟ

บทที่ 6

สรุปการทดลอง

เตามังกรที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาจังหวัดราชบุรีเป็นเตาเผาที่เผาที่ใช้เทคโนโลยีจากประเทศจีนนำเข้ามาในประเทศไทยโดยชาวจีนแต่จิว ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่จังหวัดราชบุรีประมาณ 50 โรง ซึ่งจำหน่ายทั้งภายในและต่างประเทศซึ่งมีประเทศเวียดนามเป็นคู่แข่งที่สำคัญ เพื่อพัฒนาการผลิตจึงทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงความร้อนและลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

เตามังกรมีความยาว 62 เมตร ภายในสูง 2 เมตรและกว้าง 3 เมตร มีความจุ 285 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ กะโหลกเตา, ตัวเตา, ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์, ตาไฟ, ผังช่องไฟออกและปล่องไฟ ใช้เวลาในการทำงานหนึ่งรอบ 48 ชั่วโมงและ 72 ชั่วโมง ซึ่งใน 72 ชั่วโมงมีขั้นตอนในการผลิตดังนี้ขั้นตอนในการผลิตดังนี้ เรียงผลิตภัณฑ์เข้าเตาประมาณ 4 ชั่วโมง อบผลิตภัณฑ์ก่อนเผาประมาณ 17 ชั่วโมง สุมไฟที่กะโหลกเตาประมาณ 13 ชั่วโมงเดินไฟไปท้ายเตาประมาณ 14 ชั่วโมง อบผลิตภัณฑ์หลังเผาประมาณ 13 ชั่วโมง เปิดเตาและปล่อยให้เย็นประมาณ 8 ชั่วโมงและลำเลียงผลิตภัณฑ์ออกจากเตาประมาณ 3 ชั่วโมง รอบการทำงาน 48 ชั่วโมงนั้นตัดช่วงเวลาอบผลิตภัณฑ์ก่อนเผา 17 ชั่วโมงและช่วงอื่นๆอีก 7 ชั่วโมงออกไป

หลังจากเผาผลิตภัณฑ์ดิบแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาซึ่งแบ่งออกเป็นสามเกรดคือ ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่งผลิตภัณฑ์เกรดสองและผลิตภัณฑ์แตกหัก แบ่งเตาออกเป็น 5 ห้องโดยใช้ประตูเตาเป็นตัวแบ่งเขตพบว่าห้องที่หนึ่งเสียหาย 33.8 เปอร์เซ็นต์ ห้องที่สองเสียหาย 25.3 เปอร์เซ็นต์ ห้องที่สามเสียหาย 15.4 เปอร์เซ็นต์ ห้องที่สี่เสียหาย 12.7 เปอร์เซ็นต์ ห้องที่ห้าเสียหาย 9 เปอร์เซ็นต์ เฉลี่ยทั้งเตาเสียหาย 18.3 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาเฉพาะห้องที่หนึ่งและห้องที่สองพบว่าในห้องเดียวกันผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่เสียหายมากกว่าผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กและผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันเมื่อเผาในห้องที่หนึ่งเสียหายมากกว่าห้องที่สอง

เชื้อเพลิงคือไม้ยางพาราและไม้เบญจพรรณซึ่งมีค่าความร้อน 18,142.03 และ 17,886.95 กิโลจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ ช่วงสุมไฟที่หัวเตาใช้ฟืน 2,243 กิโลกรัม และช่วงเดินไฟไปท้ายเตาข้างฝั่งติดถนนใช้ฟืน 2,841 กิโลกรัม โดยมีลักษณะการใช้ฟืนดังแสดงในภาพที่ 25 และภาพที่ 27 ในบทที่ 4 ตามลำดับ อุณหภูมิในเตาได้มากจากการใช้เทอร์โมคัปเปิล 13 ตัวกระจายอยู่บนหลังคาเตาโดยบันทึกลงในอุปกรณ์เก็บสัญญาณโดยแสดงอยู่ในภาพที่ 31 และพบว่าอัตราการเปลี่ยนของอุณหภูมิในเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ซึ่งอยู่ในห้องที่หนึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากซึ่งสอดคล้องกับลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์ แนวทาง

การแก้ไขคือลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยใช้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อนมาประกอบกับในเตาระหว่างกะโหลกกับลำตัว

ข้อเสนอแนะ

การสุ่มไฟที่กะโหลกเตานั้นใช้ประสบการณ์ของคนเตาเป็นตัวกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงและระยะเวลาในการใส่เชื้อเพลิงซึ่งแต่ละคนมีลักษณะการใส่เชื้อเพลิงต่างกันไปดังนั้นจึงควรมีการศึกษาและควบคุมรูปแบบการใส่ฟืนที่กะโหลกเตาเพื่อให้ได้ลักษณะการสุ่มไฟที่หัวเตาอย่างเหมาะสมและมีรูปแบบเดียวกัน (มีความสม่ำเสมอมากขึ้น)

การเดินไฟไปท้ายเตานั้นคนเตาจะใช้การสังเกตสีและผิวของผลิตภัณฑ์เป็นเกณฑ์ในการดูการสุกตัวซึ่งอุณหภูมิขณะนั้นประมาณ 1,180 องศาเซลเซียสจึงเสนอให้ประกอบอุปกรณ์ที่ใช้อ่านอุณหภูมิที่หลังเตาเพื่อเป็นเกณฑ์เสริมในการดูการสุกตัว

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลังการเผาในการวิจัยครั้งนี้แบ่งเป็น 5 ส่วนซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในภาพรวมเพื่อให้ทราบรายละเอียดที่ชัดเจนจึงเสนอให้เก็บข้อมูลของผลิตภัณฑ์หลังการเผาและรูปแบบการเรียงผลิตภัณฑ์ในแต่ละตาเพื่อนำข้อมูลนี้พร้อมกับอุณหภูมิและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในตานั้นมาวิเคราะห์

ศึกษา ออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์เก็บความร้อนซึ่งมีประโยชน์ในการหน่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มากเกินไปที่บริเวณด้านหน้าของเตา การออกแบบควรเริ่มจากการจำลองการไหลภายในเตาก่อน ทั้งนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาและเก็บข้อมูลทางด้านการสันดาป, ปริมาณและอัตราก๊าซร้อนที่ไหลเข้าเตาเพื่อจำลองสถานะการณ์อย่างเป็นระบบก่อนที่จะสร้างและติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน

ข้อแนะนำสุดท้ายเป็นเรื่องสวัสดิการของคนงานทั้งนี้เพราะผลิตภัณฑ์ในเตาจะเรียงอยู่ใกล้กันไหม้มากเพื่อให้เผาผลิตภัณฑ์ได้มากดังนั้นการเรียงผลิตภัณฑ์มีความสำคัญมาก แต่เนื่องจากหลังเผาแล้วเตายังมีอุณหภูมิสูง (ประมาณ 90 องศาเซลเซียส) จึงเสนอให้มีการให้คนเตาสวมชุดที่สามารถทนความร้อนได้มากขึ้น(ควรใช้ชุดนี้กับการลำเลียงผลิตภัณฑ์ออกด้วย)

เอกสารอ้างอิง

1. เพื่อความเข้าใจในแผ่นดิน "ราชบุรี". กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สารคดี, มิถุนายน 2541
2. Olsen, Frederick L. The Kiln Book. Radnor Pennsylvania : Chilton Book Company, 1983.
3. จเร ลิมปณวัสส์ และปิณฑิตต์ ตริวงศ์. การวิเคราะห์และปรับปรุงระบบการวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งด้วยบอมบ์และบอยเลอร์แคลอรีมิเตอร์. : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542
4. Schmidt, Frank W. and Willmott, A. John Thermal energy storage and regeneration. New York : McGraw-Hill, 1981
5. Versteeg, H.K..and Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method. New York : John Wiley & Sons, 1995
6. Kreyszig, Erwin Advanced Engineering Mathematics. : John Wiley & Sons, 1983
7. Klinkenberg, A. "Heat Transfer in Cross-Flow Heat Exchangers and Packed Beds" Industrial Engineer Chemical Journal. Vol 46 (1954) : 2285

ภาคผนวก

**การศึกษาเบื้องต้นของเตามังกร:
รูปร่างการทำงานและสัดส่วนความเสียหายของผลิตภัณฑ์จากการเผา
ถั้วสุติ หนูเกื้อ และ ปุณยศ วัลลิกุล
ศูนย์วิจัยการเผาภาวของเสีย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**

บทคัดย่อ

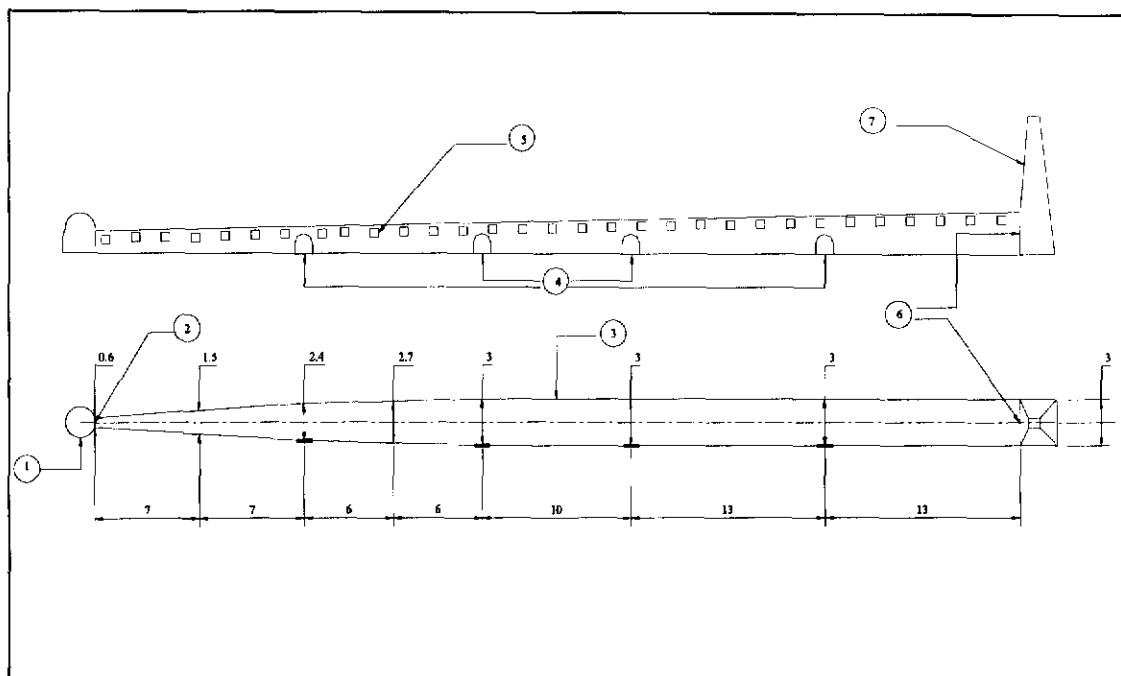
ได้ศึกษารูปร่างและวิธีการใช้เตามังกรในเบื้องต้น และพบว่าเตามังกรมีลักษณะรูปร่างและการทำงานคล้ายกับเตาเผาพื้นบ้านในประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเสียหายของผลิตภัณฑ์จากการเผาโดยเฉลี่ย ซึ่งความเสียหายส่วนมากอยู่ที่ห้องเผาที่หนึ่ง และที่สองถัดจากกะโหลกเตา จากการวิจัยเบื้องต้นทำให้ได้แนวทางการศึกษาเพื่อทดลองหาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความเสียหายของผลิตภัณฑ์ต่อไป

1. บทนำ

เตาเผาเครื่องปั้นดินเผาราชบุรี(เตามังกร) เป็นเตาเผาขนาดใหญ่มีความจุประมาณ 235 m³ การให้ความร้อนแก่เตามังกรใช้หลักการดราฟต์ธรรมชาติ (natural draft) โดยใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง เตามังกรเป็นเตาที่มีลักษณะเฉพาะเป็นของท้องถิ่นจังหวัดราชบุรี การก่อสร้างสืบทอดกันมาโดยที่ไม่สามารถบอกแหล่งกำเนิดหรืออายุที่ชัดเจนได้ [1] อย่างไรก็ตามจากการศึกษารูปร่างและลักษณะการใช้งานของเตามังกร สามารถเทียบเคียงได้กับเตาเครื่องปั้นดินเผาพื้นบ้านของประเทศญี่ปุ่นที่เรียกว่า เตาแทมบา (ดูรูปที่ 2) จากการสืบค้นข้อมูลพบว่า รูปร่างของเตาแทมบา เทคนิคการก่อสร้าง ตลอดจนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเตาไม่เคยเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลา 600 ปีที่ผ่านมา โดยปัจจุบันรัฐบาลประเทศญี่ปุ่นได้อนุรักษ์เตาแทมบาจำนวน 23 เตาไว้เป็นสมบัติทางวัฒนธรรมของชาติ [2]

ในงานวิจัยขั้นต้นที่นำเสนอนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกได้ทำการวัดขนาดรูปร่างของเตามังกรและกำหนดชื่อเรียกบริเวณต่างๆของเตาตามลักษณะการใช้งาน ตลอดจนบันทึกเวลา และลักษณะการใช้งานของเตาในรอบการทำงานหนึ่งๆ ซึ่งรายละเอียดของงานวิจัยขั้นส่วนแรกนี้ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2 ในหัวข้อนี้ยังได้แสดงรูปสเก็ต และลักษณะการใช้งานของเตาแทมบาเพื่อเปรียบเทียบกับเตามังกรด้วย หัวข้อที่ 3 แสดงส่วนที่ 2 ของงานวิจัยโดยได้บันทึกและวิเคราะห์ความเสียหายเชิงปริมาณโดยรวมของผลิตภัณฑ์ จากผลการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่ความเสียหายที่เกิดขึ้นในห้องเผาที่ 1 และห้องเผาที่ 2 ของเตา และหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปเบื้องต้น เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆที่จะใช้ศึกษาผลกระทบต่อการเสียหายของ

ผลิตภัณฑ์ ตลอดจนแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการเผาเครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร



รูปที่ 1 เตามังกร (1) กะโหลกเตา (2) ผนังช่องไฟเข้า (3) เตา (4) ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์ (5) ตาไฟ (6) ผนังช่องไฟออก (7) ปล่องไฟ

2. รูปร่างและการใช้งานของเตามังกร

เตามังกรสามารถแบ่งได้เป็นส่วนต่างๆ คือ 1) กะโหลกเตา, 2) ผนังช่องไฟเข้า, 3) ตัวเตา, 4) ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์, 5) ตาไฟ, 6) ผนังช่องไฟออก และ 7) ปล่องไฟตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 1 โดยแต่ละส่วนถูกใช้งานดังนี้ กะโหลกเตาทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้เพื่อให้ได้ก๊าซร้อน ซึ่งก๊าซร้อนจะถูกดูดโดยอาศัยความดันลดด้วยดราฟต์ธรรมชาติ ก๊าซร้อนผ่านผนังช่องไฟเข้าสู่ตัวเตาซึ่งมีผลิตภัณฑ์จัดเรียงอยู่ ก๊าซร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ และขณะเดียวกันจะพาความชื้นออกจากเตาผ่านผนังช่องไฟออกที่อยู่ท้ายเตา และออกสู่บรรยากาศผ่านปล่องไฟตามลำดับ

การใช้งานของเตาในการเผาผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ นับตั้งแต่ขนถ่ายผลิตภัณฑ์เข้าเตาจนถึงการนำผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จแล้วออกจากเตาใช้เวลาทั้งสิ้น 72 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็นกิจกรรมต่างๆ คือ เรียงผลิตภัณฑ์เข้าเตาจากนั้นก่ออิฐปิดประตูที่ใช้ขนถ่ายผลิตภัณฑ์ อบผลิตภัณฑ์ในเตาโดยอาศัยก๊าซภายในเตาที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ปล่อยไว้เป็นเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง เริ่มสูบลมที่กะโหลกเตาก๊าซร้อนจะไหลขึ้นสู่ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเตาสูงขึ้นโดยเวลาที่ใช้สูบลมทั้งสิ้น 1 ชั่วโมง

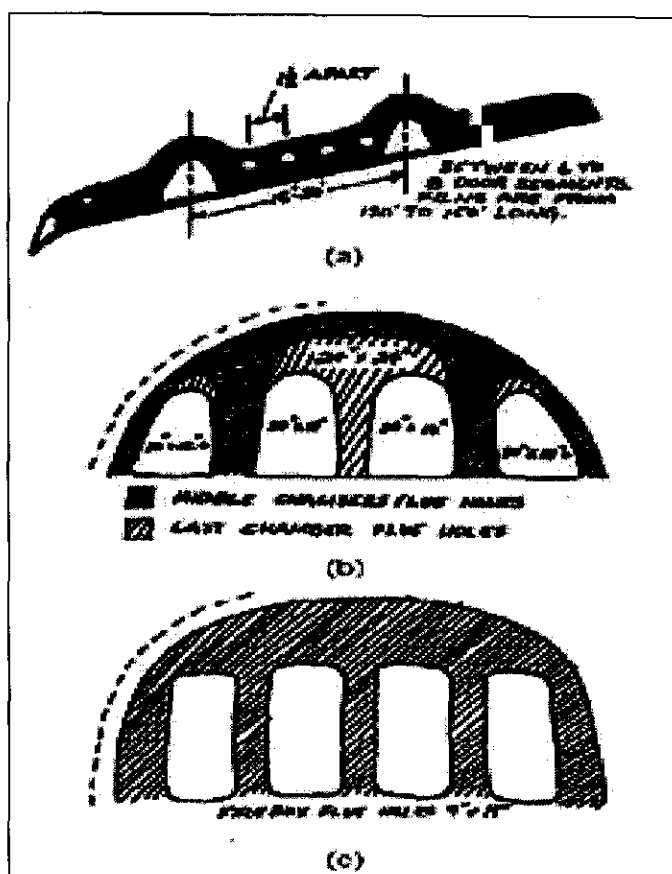
โมงซึ่งทำให้เตามีอุณหภูมิสูงทั่วเตา เริ่มใส่เชื้อเพลิงตามตาไฟเพื่อเผาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นให้ได้คุณภาพตามต้องการ โดยเริ่มจากตาไฟแรกก่อน การเดินไฟจากตาแรกถึงตาไฟสุดท้ายใช้เวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นอบผลิตภัณฑ์ไว้ในเตาปิดอีกประมาณ 9 ชั่วโมง เปิดเตาและปล่อยให้เย็นโดยใช้เวลาประมาณ 11 ชั่วโมง และสุดท้ายลำเรียงผลิตภัณฑ์ออกจากเตาใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง กิจกรรมทั้งหมดนี้ถือเป็นหนึ่งรอบการใช้งานของเตา ตารางที่ 1 สรุปกิจกรรมต่างๆ และเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบใช้งานของเตาเมื่อพิจารณา ขนาด รูปร่าง ลักษณะ ช่วงการทำงาน ของเตามังกรราชบุรีมีลักษณะคล้ายกับเตาแทมบาของญี่ปุ่นที่แสดงไว้ในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงกิจกรรม และช่วงเวลาต่างๆขณะใช้งานเตามังกร

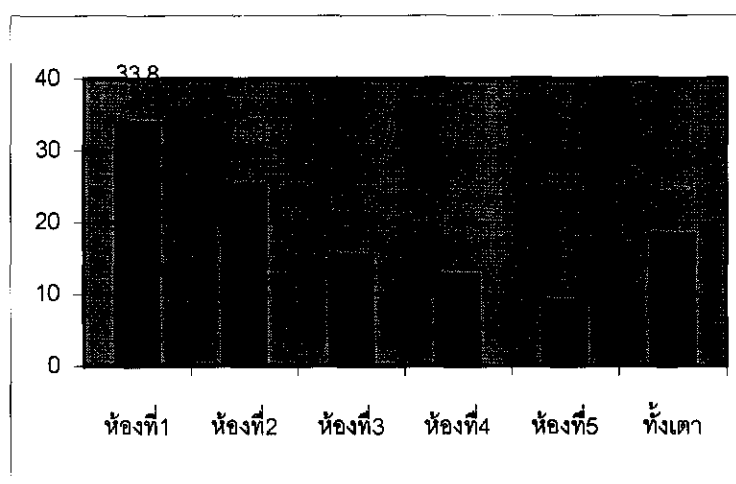
กิจกรรม	เวลา (ชั่วโมง)						
	5	16	11	15	9	11	5
เรียงผลิตภัณฑ์	■						
อบผลิตภัณฑ์		■					
สุ่มไฟที่หัวเตา			■				
เดินไฟไปท้าย				■			
อบผลิตภัณฑ์					■		
เปิดเตา						■	
ขนผลิตภัณฑ์							■

3. การวิเคราะห์ความเสียหายของผลิตภัณฑ์

ในการเผาผลิตภัณฑ์แต่ละครั้งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 3 ประเภท ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่งคือผลิตภัณฑ์ที่สวยงามไม่มีตำหนิเป็นที่ต้องการของผู้ประกอบการและผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์เกรดสองคือผลิตภัณฑ์ที่มีความเสียหายเล็กน้อย เช่น รอยร้าวเล็กๆที่เกิดจากการเผาสามารถที่จะซ่อมได้ ผลิตภัณฑ์แตกหักคือผลิตภัณฑ์ที่เสียหายมากไม่สามารถนำกลับมาซ่อมได้ใหม่ต้องทิ้งอย่างเดียว จากข้อมูลของผลิตภัณฑ์เฉลี่ยจำนวน 4 เตาสามารถแสดงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เสียได้ดังแสดงในรูปที่ 3

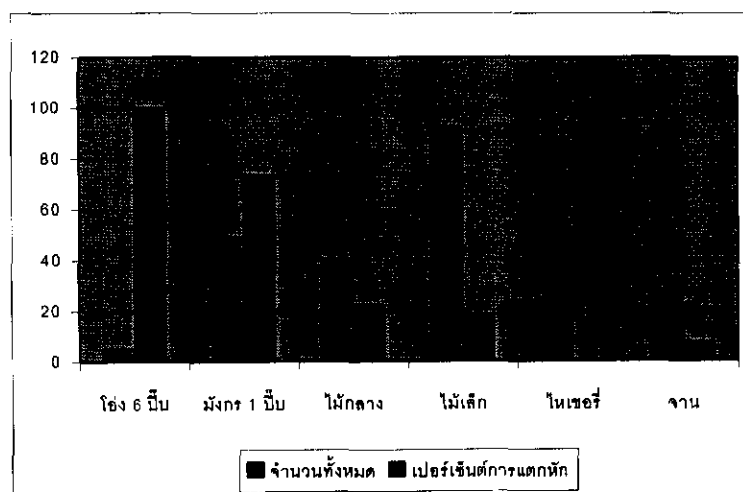


รูปที่ 2 ลักษณะเตาแทมบา

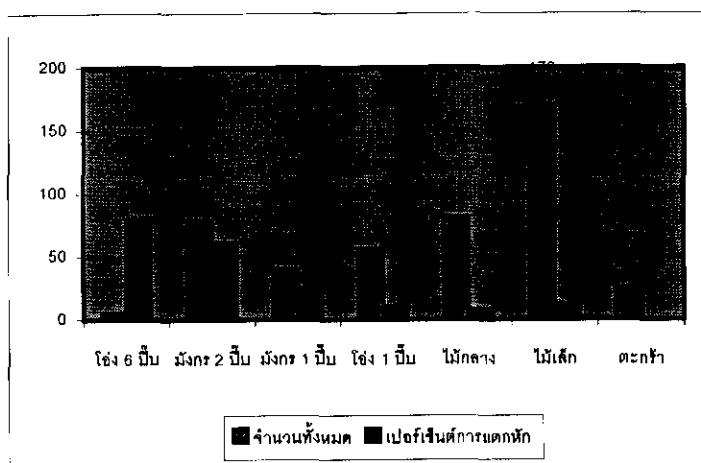


รูปที่ 3 แสดงร้อยละที่เสียหายของผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย

จากกราฟจะเห็นได้ว่าห้องที่ 1 มีการเสียหายเกิด 33.8 % ซึ่งเสียหายมากที่สุด และ ความเสียหายจะลดลงไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงห้องสุดท้ายมีความเสียหายแค่ 9 % เมื่อเทียบกับ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่เสียหาย และเมื่อนำทั้ง 5 ห้องมาคำนวณจะพบว่าผลิตภัณฑ์เสียหาย 18.3 % ของผลิตภัณฑ์ทั้งเตา เมื่อเห็นว่าห้องที่หนึ่ง และห้องที่สอง มีความเสียหายเกิดขึ้นมาก จึง ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แยกเป็นประเภทต่างๆในแต่ละห้อง ดังแสดงผลในรูปที่ 4 และ 5



รูป 4 แสดงร้อยละที่เสียหายของผลิตภัณฑ์ในห้องที่ 1



รูปที่ 5 แสดงร้อยละที่เสียหายของผลิตภัณฑ์ในห้องที่ 2

รูปที่ 4 และ 5 แขนนอนเรียงตามขนาดของผลิตภัณฑ์จากใหญ่ไปเล็ก พบว่าผลิตภัณฑ์ ขนาดใหญ่เกิดความเสียหายมากกว่าผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก เช่นห้องที่หนึ่ง โย่ง 6 ปีบ เสียหาย

80% มากกว่า มังกร 1 ปีบซึ่งเสียหาย 73.5% สำหรับห้องที่สอง มังกร 2 ปีบเสียหาย 61.5% มากกว่า มังกร 1 ปีบซึ่งเสียหาย 26% ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันเมื่อเผาที่ห้องที่หนึ่งจะเสียหายมากกว่าห้องที่สองเช่น มังกร 1 ปีบ ห้องที่หนึ่งเสีย 73.5% ห้องที่สองเสีย 26%, ไม้กลางห้องที่หนึ่ง เสีย 22.5% ห้องที่สองเสีย 7.4%

4.การดำเนินงานในขั้นต่อไป

งานวิจัยขั้นต่อไปส่วนของการวิเคราะห์การเสียหายจะต้องระบุให้ชัดเจนยิ่งขึ้น เช่นเวลาที่ผลิตภัณฑ์เสียหาย บริเวณที่เสียหาย และทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นการกระจายของอุณหภูมิ ความเร็วของการไหลก๊าซร้อน อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งอาจจะมีผลต่อการเสียหายของผลิตภัณฑ์ ในเตา และทำการหาแนวทางการพัฒนาการเทคนิคเผาที่มีการเสียหายน้อย และประหยัดพลังงาน

5.เอกสารอ้างอิง

1. Frederick L. Olsen. The Kiln Book . Chilton Book Company Radnor, Pennsylvania. 1983.
2. ทวี พรหมพฤษ. เตาและการเผา. เอกสารการนิเทศการศึกษานับที่ 245. ภาคพัฒนาตำราและเอกสารวิชาการ. หน่วยศึกษานิเทศก์. กรมฝึกหัดครู. 2525

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ. ดร. บัณฑิต พุ่มธรรมสาร ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำแนะนำที่มีนัยสำคัญมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณสมนึก ชินพานุวัฒน์ ที่ได้ให้ใช้โรงงานผลิตเครื่องปั้นดินเผาเพื่อการศึกษา และที่สำคัญมากคือ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย

การศึกษากระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในเตามังกร

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

ณัฐวุฒิ หนูเกื้อ, ปุณยศ วาลิกุล, บัณฑิต พึ่งธรรมสาร
ศูนย์วิจัยการเผาภาชนะเคลือบ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บางซื่อ กทม.10800

โทร. 913-2500 ต่อ 8121 โทรสาร 587-0026 Email : pyy@kmitnb.ac.th

N. Nookua, P. Valilikul, 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

เตามังกรใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่จังหวัดราชบุรีซึ่งจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ หลังจากกระบวนการเผาพบผลิตภัณฑ์เสียหายต่อเตาประมาณ 20 % บริเวณด้านหน้าของเตาเสียหายมากที่สุดประมาณ 30 % เพื่อความเข้าใจในพฤติกรรมของเตาจึงทำการศึกษารายละเอียดของเตา เวลาและกิจกรรมในรอบการทำงาน ความเสียหายเชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์ การใช้เชื้อเพลิง และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในจากการวิเคราะห์ผลการวัดประเมินได้ว่าสาเหตุของความเสียหายเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น-ลงมีสูงมากในบริเวณด้านหน้าเตา ซึ่งจะทำให้ความร้อนถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ สถานการณ์ดังกล่าวสามารถบรรเทาได้โดยการใส่อุปกรณ์สะสมความร้อนไว้ระหว่างกะโหลกเตากับห้องเผาผลิตภัณฑ์ที่ห้องที่หนึ่ง 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

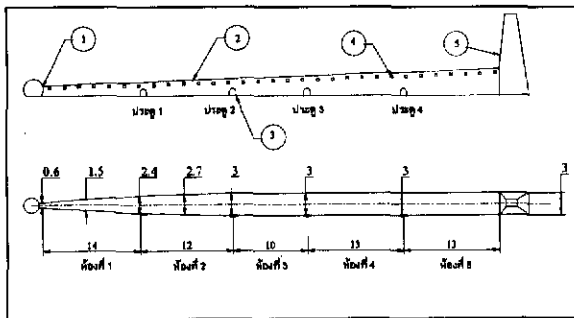
1. บทนำ

เตามังกรเป็นเตาพื้นบ้านที่ใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผาในจังหวัดราชบุรีโดยใช้เทคโนโลยีจากประเทศจีนซึ่งมีชาวจีนแต่ใจเมื่อประมาณ 60 ปีก่อนเป็นผู้มาสร้างเตา [1] ซึ่งได้พัฒนารูปแบบกระทั่งมาเป็นเตามังกรที่ใช้ในปัจจุบัน ส่วนประกอบของเตาซึ่งแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงความกว้างและความยาวของเตา เตาประกอบด้วย 1. กะโหลกเตาใช้เป็นห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดความร้อน 2. ลำเตาลักษณะคล้ายอุโมงค์ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ก่อนเผาเรียงอยู่ในลำตัวเตา 3. ประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์ซึ่งผลิตภัณฑ์จะสไลด์เข้าออกทางประตูนี้ 4. ตาไฟไม้ไว้เพื่อสอดฟืนเข้าไปเผาผลิตภัณฑ์ที่บริเวณนั้น 5. ผนังช่องไฟมีลักษณะคล้ายรังผึ้งอยู่ท้ายเตาเพื่อ

ไม่ให้ก๊าซร้อนผ่านออกจากเตาอย่างรวดเร็ว 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.ส่วตัวเตา 3.ประตูหน้าต่างผลิตภัณฑ์ 4.ตาไฟ 5.ผ่องช่องไฟออก 6.ปล่องไฟ)

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

3. วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ทดลองเพื่อหาปริมาณความเสียหายและพฤติกรรมเชิงความร้อนภายในเตาซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การตรวจสอบปริมาณความเสียหายของผลิตภัณฑ์ พฤติกรรมการใช้เชื้อเพลิง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา

การตรวจสอบปริมาณความเสียหาย

หลังจากลำเลียงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผา (รูปที่ 2) ออกจากเตาจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกมาเป็น 3 ประเภทคือ ผลิตภัณฑ์เกรดหนึ่งที่มีลักษณะสมบูรณ์ สวยงาม เป็นที่ต้องการของผู้ผลิต, ผลิตภัณฑ์เกรดสองมีความเสียหายจากการเผาเกิดขึ้นเล็กน้อยเช่นมีรอยบิ่นหรือรอยร้าวเล็กน้อยซึ่งสามารถเอาไปซ่อมแล้วนำมาจำหน่ายได้, และผลิตภัณฑ์แตกหักคือ ผลิตภัณฑ์เสียหายมากไม่สามารถซ่อมได้ต้องนำไปทิ้งอย่างเดียว

ตารางที่ 1 กิจกรรมและเวลาในการทำงาน

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



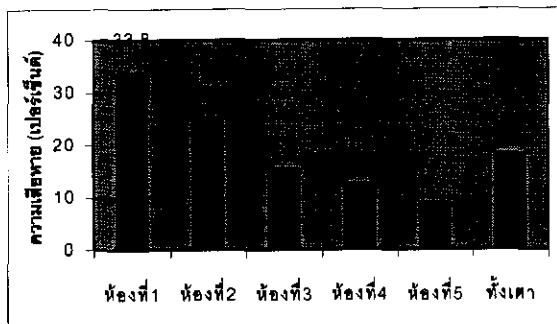
รูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์หลังการเผา

การวิจัยจะทำการหาปริมาณความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่ส่วนต่างๆของเตา โดยแบ่งเตาออกเป็นห้าห้องโดยใช้ประตูหน้าต่างผลิตภัณฑ์เป็นตัวแบ่งดังแสดงในรูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์เสียหายคือผลรวมของผลิตภัณฑ์เกรดสองกับผลิตภัณฑ์แตกหักสำรวจความเสียหายในแต่ละห้องเป็นเปอร์เซ็นต์ ลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์นั้น ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าเตาและความเสียหายลดลงไปเรื่อยๆเมื่อระยะห่างจากกะโหลกเตามากขึ้น ได้ทำการบันทึกลักษณะการเสียหายของผลิตภัณฑ์โดย

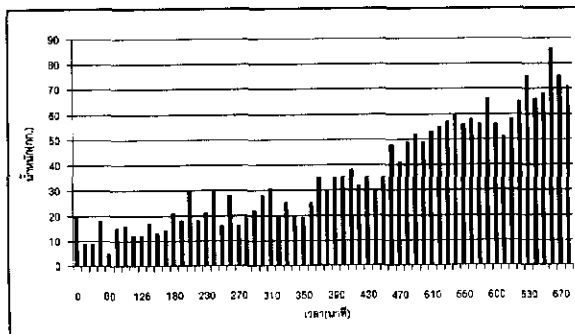
เฉลี่ยจากการผลิตเตา ได้ผลดังนี้ ห้องที่หนึ่งเสียหาย 33.8 % ห้องที่สองเสียหาย 25.3 % ห้องที่สามเสียหาย 15.4 % ห้องที่สี่เสียหาย 12.7 % ห้องที่ห้าเสียหาย 9.0 % ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเสียหาย 18.3 % ซึ่งความเสียหายได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3

พฤติกรรมการใช้เชื้อเพลิงในเตา

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์คือไม้ 2 ชนิดได้แก่ไม้เบญจพรรณและไม้ยางพาราซึ่งมีค่าความร้อน 17,886.95 กิโลจูลตอกิโลกรัม และ 18,142.03 กิโลจูลตอกิโลกรัม ตามลำดับซึ่งหามาจากเครื่องบอมป์แคลอรีมิเตอร์ [2] การใช้เชื้อเพลิงในเตาจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วงเวลาคือเชื้อเพลิงช่วงสุ่มไฟที่หัวเตาใช้ทั้งไม้เบญจพรรณและไม้ยางพารา และช่วงเดินไฟไปท้ายเตาส่วนใหญ่ใช้ไม้ยางพารา การวิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมการใช้เชื้อเพลิงโดยพิจารณาการใช้เชื้อเพลิงสัมพันธ์กับเวลา รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการสุ่มไฟที่หัวเตาในช่วงแรกเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบทั้งด้านช่วงเวลาและน้ำหนักของฟืน รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงช่วงท้ายเตาจะมากกว่าด้านหน้าเตามากเพราะว่าด้านหลังเตาจะมีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้ามาก และมีลักษณะเป็นคาบซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์บางตาที่จัดเรียงในเตามีคุณสมบัติเสมือนตัวกักเก็บความร้อน (Thermal Storage)



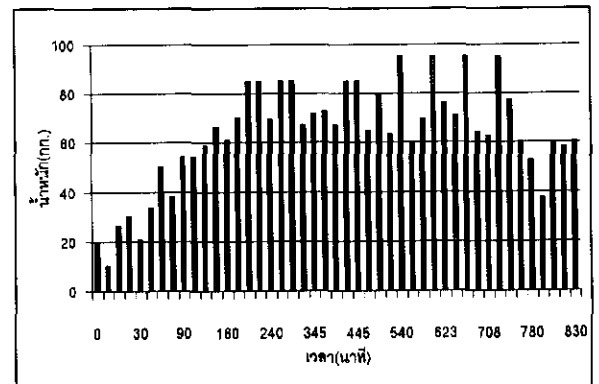
รูปที่ 2 ลักษณะความเสียหายของผลิตภัณฑ์แบ่งตามห้อง



รูปที่ 3 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงช่วงสุ่มไฟที่กะโหลกเตา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา

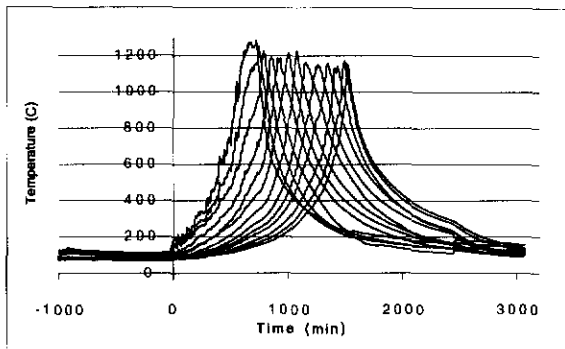
ลักษณะอุณหภูมิภายในเตาทำการวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเบิล type K ปลายหุ้มด้วยเซรามิกซึ่งนำมาวัดอุณหภูมิที่หลังคาเตาตั้งแสดงในรูปที่ 5 ทำการบันทึกอุณหภูมิ 13 จุดพร้อมๆกัน โดยห่างกันจุดละ 4 ตาไฟ (ประมาณ 4.5 เมตร) และบันทึกทุก 5 นาที ผลการวัดอุณหภูมิแสดงอยู่ในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าอุณหภูมิขาขึ้นมีการแกว่งมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เทอร์โมคัปเบิลตัวที่หนึ่งและสอง เพื่อให้เห็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงได้คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเบิลทุกตัว และแสดงผลเป็นกราฟเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเบิลตัวที่หนึ่ง สอง และหกแสดงในรูปที่ 7 ถึง 9 ตามลำดับ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเบิลตัวที่หนึ่งและสองเปลี่ยนแปลงสูงมากทั้งในการเพิ่มขึ้นและลดลง ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเบิลตัวที่หกที่อยู่ไกลจากกะโหลกเตาออกไปมีการเปลี่ยนแปลงน้อยและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับเทอร์โมคัปเบิลตัวที่เจ็ดถึงตัวที่สิบสามจึงไม่ได้แสดงผลไว้ในที่นี้



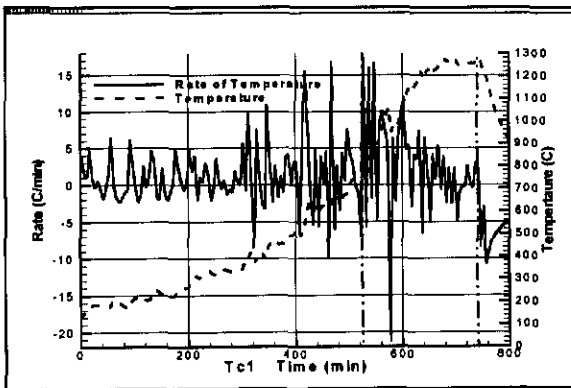
รูปที่ 4 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงช่วงเดินไฟไปท้าย



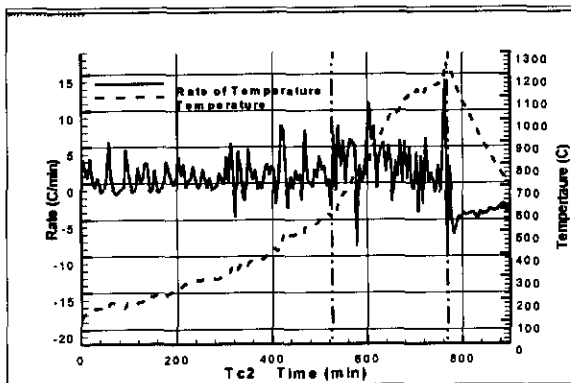
รูปที่ 5 การประกอบเทอร์โมคัปเบิลลงบนเตา



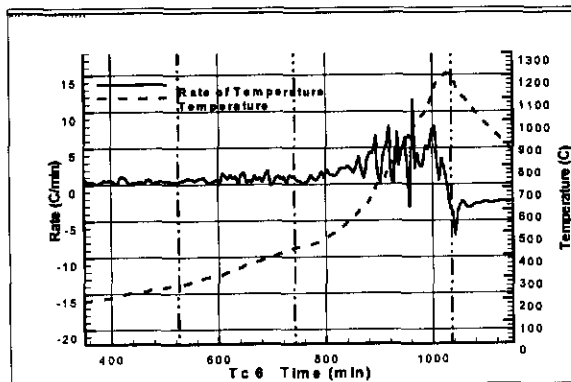
รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในเตา



รูปที่ 7 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หนึ่ง



รูปที่ 8 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่สอง

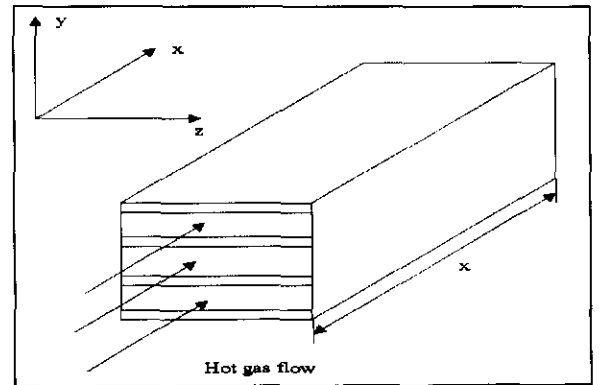


รูปที่ 9 อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลตัวที่หก

4. แนวทางการแก้ไข

เพื่อลดอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อนจึงได้ศึกษาเชิงตัวเลขในติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน [3] โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 10 แบ่งวัสดุเก็บความร้อนเป็น element เล็กๆ โดยมีสมการครอบคลุมของก๊าซร้อนเมื่อไหลผ่านวัสดุกักเก็บความร้อนดังนี้

$$\frac{hA\Delta x}{L}(t_m - t_f) + \dot{m}_f c_{pf} t_f|_x = \dot{m}_f c_{pf} t_f|_{x+\Delta x} + S_f \Delta x \rho_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau}$$



รูปที่ 10 วัสดุกักเก็บพลังงานความร้อน

เทอมทางซ้ายมือได้แก่ความร้อนที่วัสดุกักเก็บความร้อนถ่ายเทให้กับก๊าซร้อนบวกกับพลังงานความร้อนของก๊าซร้อนที่เข้า Element เทอมทางขวามือประกอบด้วยพลังงานความร้อนของก๊าซร้อนที่ออกจาก Element บวกกับพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ใน Element ซึ่งมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้ ส่วนสมการครอบคลุมของวัสดุกักเก็บความร้อนคือ

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

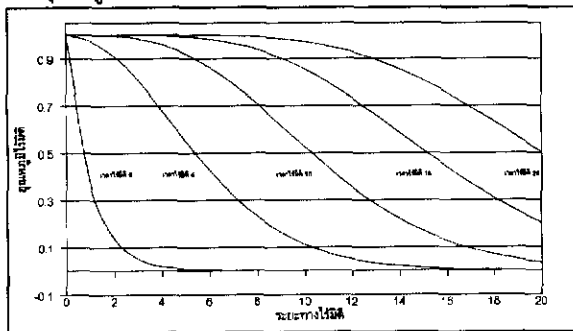
เทอมทางซ้ายคือความร้อนที่ก๊าซร้อนถ่ายเทสู่วัสดุกักเก็บความร้อนส่วนเทอมทางขวาคือพลังงานความร้อนที่สะสมในวัสดุกักเก็บความร้อนเพื่อให้่ายต่อการหาค่าตอบของระบบสมการจึงทำการเปลี่ยนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติโดย T_f คืออุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อน T_m คืออุณหภูมิไร้มิติของวัสดุเก็บความร้อน ξ คือระยะทางไร้มิติ และ η คือเวลาไร้มิติ ได้สมการในรูปตัวแปรไร้มิติดังนี้

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

$$\text{วัสดุเก็บความร้อน} \quad \frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_f - T_m$$

$$\text{โดยมีเงื่อนไขดังนี้} \quad \begin{aligned} \eta &= 0 & T_m &= 0 \\ \xi &= 0 & T_f &= 1 \end{aligned}$$

นำตัวอย่างการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งคำนวณโดยวิธี Finite Volume [4] และ Runge Kutta [5] กำหนดให้วัสดุเก็บความร้อนที่มีความยาวไร้มิติ $\xi = 20$ นำมาวางขวางการไหลของก๊าซร้อน เริ่มต้นระบบอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนที่อุณหภูมิไร้มิติ 0 หน่วย และเปลี่ยนอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนที่ทางเข้าทันทีทันใดจาก 0 เป็น 1 นำผลการคำนวณเชิงตัวเลขของอุณหภูมิไร้มิติของก๊าซร้อนที่ระยะทางต่าง ๆ ในวัสดุเก็บความร้อนมาแสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางออกค่อย ๆ เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วัสดุเก็บความร้อนลงในเตาสามารถหน่วงให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของก๊าซร้อนให้ลดลง



รูปที่ 11 อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ทางออกวัสดุเก็บความร้อน

เปลี่ยนรูปแบบทางเข้าให้เป็นแบบ Sine wave โดยมีเงื่อนไขใหม่ดังนี้สมการดังนี้

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

$$\xi = 0 \quad T_r = \sin(0.1 \times \eta)$$

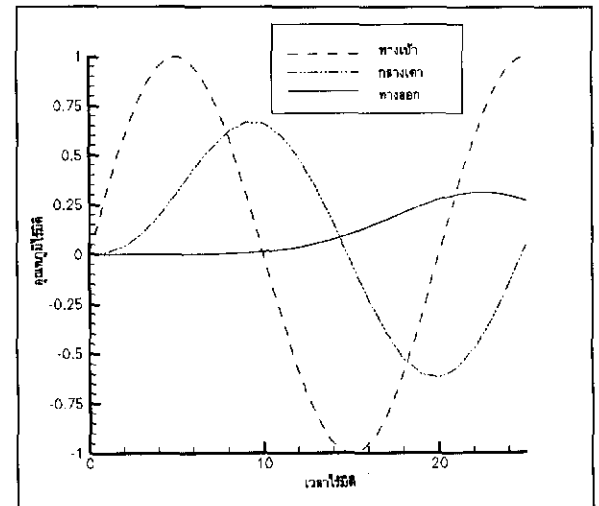
ผลการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงในรูปที่ 12 พบว่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่กลางเตาและที่ทางออกถูกหน่วงเช่นกัน

พฤติกรรมเช่นนี้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงที่วัดได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตา (ดูภาพที่ 7 ถึง 9) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลตัวหลัง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลตัวแรก ๆ ทั้งนี้ตัวผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านหน้าทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน

5. สรุปผลการทดลอง

หนึ่งรอบการทำงานของเตามังกรใช้เวลาทั้งสิ้น 72 ชั่วโมง ในกรณีที่เร่งการผลิตผู้ผลิตสามารถลดขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์และขั้นตอนอื่นอีก 24 ชั่วโมง ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ต่อเตา 18.3 % ซึ่งห้องที่หนึ่งโดยเสียหายมากที่สุดคือ 33.8 % จากการทดลองประเมินได้ว่าสาเหตุของการเสียหายเกิดเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้น-ลงมีสูงมากในบริเวณห้องที่หนึ่งและสองทำให้ผลิตภัณฑ์ตกอยู่ในสภาวะการถ่ายเทความร้อนแบบไม่

สม่ำเสมอเป็นช่วง สถานการณ์ดังกล่าวสามารถปรับให้เป็นแบบมีการถ่ายเทความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการเพิ่มอุปกรณ์สะสมความร้อนจำลองแสดงให้เห็นถึงการหน่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ



รูปที่ 12 อุณหภูมิของก๊าซร้อนเมื่อทางเข้าเป็น Sine wave

6. ข้อเสนอแนะ

การสุ่มไฟที่กะโหลกเตานั้นใช้ประสบการณ์ของคนเตาเป็นตัวกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงและระยะเวลาในการใส่เชื้อเพลิง ซึ่งแต่ละคนมีลักษณะการใส่เชื้อเพลิงต่างกันไปดังนั้นจึงควรมีการศึกษาและควบคุมรูปแบบการใส่ไฟที่กะโหลกเตาเพื่อให้ได้ลักษณะการสุ่มไฟที่หัวเตาอย่างเหมาะสมและมีรูปแบบเดียวกัน(มีความสม่ำเสมอมากขึ้น)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลังการเผาในการวิจัยครั้งนี้แบ่งเป็น 5 ส่วนซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในภาพรวมเพื่อให้ทราบรายละเอียดที่ชัดเจนจึงเสนอให้เก็บข้อมูลของผลิตภัณฑ์หลังการเผาและรูปแบบการเรียงผลิตภัณฑ์ในแต่ละเตาเพื่อนำข้อมูลนี้พร้อมทั้งอุณหภูมิและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในเตานั้นมาวิเคราะห์ศึกษาออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์เก็บความร้อนซึ่งมีประโยชน์ในการหน่วงอัตราการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มากเกินไปที่บริเวณด้านหน้าของเตา การออกแบบควรเริ่มจากการจำลองการไหลภายในเตาก่อน ทั้งนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาและเก็บข้อมูลทางด้าน การสันดาป, ปริมาณและอัตราก๊าซร้อนที่ไหลเข้าเตาเพื่อจำลองสถานการณ์อย่างเป็นระบบก่อนที่จะสร้างและติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานความร้อน

7. กิตติกรรมประกาศ

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

8. เอกสารอ้างอิง

1. เพื่อความเข้าใจในแผ่นดิน "ราชบุรี". กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สารคดี, มิถุนายน 2541
2. จเร ลิมปณวัสต์ และปิติศักดิ์ ศรีวงศ์, การวิเคราะห์และปรับปรุงระบบการวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งด้วยบอมบ์และบอยเลอร์แคลอรีมิเตอร์. : 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 Dynamics the Finite Volume Method. New York : John Wiley & Sons, 1995
5. Kreyszig, Erwin Advanced Engineering Mathematics. : John Wiley & Sons, 1983