



การวิเคราะห์ผลกระทบตำแหน่งหัวเผาต่อการส่งผ่านความร้อนภายใน
เตาหล่อพระพุทธรูปโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Influence analysis of burner position on heat transfer
in Buddha Image casting furnace by using finite element method

นายธีรภัทร อนรรฆศิริกุล
นายจักรกฤษณ์ กิตินันท์
นายอดิสร ปฏิเก

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ.....14/ก.ค. 2553.....
เลขทะเบียน.....15077066.....
เลขเรียกหนังสือ.....5646.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองโครงการวิจัย

หัวข้อโครงการ : การวิเคราะห์ผลกระทบตำแหน่งหัวเผาต่อการส่งผ่านความร้อนภายในเตาหล่อ
พระพุทธรูปโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
(Influence analysis of burner position on heat transfer in Buddha Image casting
furnace by using finite element method)

ผู้ดำเนินโครงการ : นายธีรภัทร อนรรฆสิริกุล รหัสบัณฑิต 49360785
: นายจักรกฤษณ์ กิตินันท์ รหัสบัณฑิต 49363458
: นายอดิสร ปฏิเก รหัสบัณฑิต 49363854

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาลงกรณ์ราชวิทยาลัย อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาดตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมเครื่องกล

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ)

หัวข้อโครงการ	: การวิเคราะห์ผลกระทบตำแหน่งหัวเผาต่อการส่งผ่านความร้อนภายในเตาหล่อ พระพุทธรูปโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์		
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายธีรภัทร อนรรฆสรีกุล	รหัสสถิติ	49360785
	: นายจักรกฤษณ์ กิตินันท์	รหัสสถิติ	49363458
	: นายอดิสร ปฏิเก	รหัสสถิติ	49363854
อาจารย์ที่ปรึกษา	: อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์		
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	: 2552		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นโครงการที่เกี่ยวกับการศึกษาการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีต่อการส่งผ่านความร้อนภายในแบบหล่อพระพุทธรูป ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้นำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับค่าของอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากข้อมูลทุติยภูมิพบว่า ข้อมูลมีอุณหภูมิของแบบหล่อ ณ เวลาในการเผาชั่วโมงที่ 20 มีความแตกต่างกัน 3.5% จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของหัวเผาให้สูงขึ้นจากเดิมระยะ 11 ซม. เป็น 40, 60, 75, 80, 90 และ 100 ซม. พบว่าที่ตำแหน่งของหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 ซม. ใช้เวลาในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปจนมีอุณหภูมิถึง 420 °C น้อยที่สุด โดยใช้เวลาในการเผาประมาณ 16 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการเผาลงได้ 4 ชั่วโมงจากแบบเดิม

Project Title : Influence analysis of burner position on heat transfer
in Buddha Image casting furnace by using finite element method

Name : Mr. Teerapat Anankasirikul Code 49360785

: Mr. Chakkrit Kitinan Code 49363458

: Mr. Adisorn Patika Code 49363854

Project Advisor : Mr. Nopparat Seehawong

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2552

Abstract

The objective of the research was to investigate the effects of burner position on Buddha-Image casting-furnace heat transfer by using finite element method. For model validation purpose, the calculated data was also compared with the dissertation from the literature review. First, the effect of the burner position according to the dissertation was studied. It was found that the value of furnace temperature at 20 hour obtained from the calculation was slightly different from the literature review value, approximately 3.5%. In addition, six level of burner position viz. 40, 60, 75, 80, 90 and 100 cm was also utilized as the input of the model. According to the goal temperature, 420°C, it appears that 75-cm position was accounted for the lowest span. The process took about 16 hours, approximately 4 hours less than the value from dissertation.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลนี้สำเร็จล่วงไปด้วยดี คณะผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณบุคคลที่
คอยให้คำแนะนำปรึกษาชี้แนะแนวทาง ช่วยเหลือและอนุเคราะห์ในการดำเนินการ โครงการด้วยดีจนสำเร็จ
ล่วงเป็นอย่างสูง

- พ่อ และแม่ ที่คอยให้กำลังใจ เลี้ยงดูจนเติบโต แลสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา
- อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่คอยให้คำปรึกษาดูแล และคอยช่วยเหลือ
ตลอดมา
- อาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยแนะนำและอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาในเรื่อง
ต่างๆ ตลอดมา
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการ
- เพื่อนๆ ทุกคนสำหรับมิตรภาพและกำลังใจที่ดีตลอดมา

ณ โอกาสนี้จึงขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ จงคุ้มครองปกป้องรักษามุคผลเหล่านี้
ด้วยเทอญ

ธีรภัทร อนรรฆศิริกุล
จักรกฤษณ์ กิตินันท์
อดิศร ปฏิเก

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฎ
 บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขต	1
1.4 กิจกรรมดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 อุปกรณ์	2
1.7 งบประมาณ	2
 บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ขั้นตอนการหล่อองค์พระพุทธรูป	3
2.2 สมบัติของวัสดุ	5
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	6
2.4 ทฤษฎีการนำความร้อน	12
2.5 ทฤษฎีการพาความร้อน	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินงาน	
3.1 การศึกษาข้อมูลส่วนประกอบ ขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป ส่วนประกอบของเตาเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผา แบบหล่อพระพุทธรูป	16
3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป และการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	20
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน และวิเคราะห์ผล	
4.1 ผลการศึกษาการตรวจวัดอุณหภูมิในแบบหล่อพระพุทธรูป	23
4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแบบหล่อพระพุทธรูปโดย ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
4.3 วิเคราะห์ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของตำแหน่งหัวเผาที่มีต่อการกระจาย ความร้อนที่เกิดขึ้น	27
4.4 วิเคราะห์ผลการดำเนินการ	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์	
5.1 สรุปผลการทดสอบ	37
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Flow Simulation	41
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	50

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุ	5
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน	14
ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุ	17
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่ตำแหน่งบริเวณแกนกลาง ของแบบหล่อ	23
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์-เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม	24
ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิภายในแบบหล่อที่ตำแหน่งหัวเผาแบบต่างๆ	28



สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ปืนองค์พระพุทธรูป	3
รูปที่ 2.2 พอกซี่ผึ้ง และติดขนวน	4
รูปที่ 2.3 พอกปูนปลาสเตอร์ครั้งสุดท้าย	4
รูปที่ 2.4 เตาเผา	4
รูปที่ 2.5 เททอง	5
รูปที่ 2.6 วัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่องใน 2 มิติ ที่อยู่ภายใต้การกระทำของแรงกระทำที่จุด (F) และแรงกระจาย (W)	6
รูปที่ 2.7 บริเวณขอบเขตการถ่ายเทความร้อนของปัญหา 2 มิติ	7
รูปที่ 2.8 ก) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (ข) การสูญเสียความร้อนโดยการพาผ่าน i-j	7
รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์ชนิด Line element	10
รูปที่ 2.10 เอลิเมนต์ชนิด Plane element	10
รูปที่ 2.11 เอลิเมนต์ชนิด Solid element (3D)	11
รูปที่ 2.12 การนำความร้อนผ่านผนังเรียบใน 1 มิติ	12
รูปที่ 2.13 การพาความร้อนตามธรรมชาติ	13
รูปที่ 2.14 การพาความร้อน โดยบังคับ	14
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	15
รูปที่ 3.2 การแกะสลักลายชั้นซี่ผึ้ง	16
รูปที่ 3.3 แบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว	17
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (1) อุณหภูมิผิวแบบบริเวณแหล่งความร้อน (2) อุณหภูมิภายในเตา (3) อุณหภูมิในตัวแบบ	18
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา อยู่สูงจากพื้นดิน 11 ซม.	19
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิภายในเตา อยู่สูงจากพื้นดิน 82 ซม.	19
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปอยู่สูงจากพื้น 80.3 ซม.	19
รูปที่ 3.8 แบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป	20
รูปที่ 3.9 เตาเผาแบบหล่อพระพุทธรูป	21

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งหัวเผาความสูงแบบเดิม	24
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม	25
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาที่ตำแหน่งเดิม	25
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในแบบหล่อจากการตรวจวัดจริงกับอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	26
รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิ	27
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิภายในแบบหล่อที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป	28
รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผายู้งสูงจากพื้นดิน 40 ซม.	29
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 40 ซม.	29
รูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผายู้งสูงจากพื้นดิน 60 ซม.	30
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 60 ซม.	30
รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผายู้งสูงจากพื้นดิน 75 ซม.	31
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 ซม.	31
รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผายู้งสูงจากพื้นดิน 80 ซม.	32

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น ภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 80 ซม.	32
รูปที่ 4.15 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผายู่สูงจากพื้นดิน 90 ซม.	33
รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น ภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 90 ซม.	33
รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผายู่สูงจากพื้นดิน 100 ซม.	34
รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น ภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 100 ซม.	34
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิแกนกลางชั้นในของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อ พระพุทธรูป โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผา ผ่านไป 20 ชั่วโมง	35
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิภายในแบบหล่อ ที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อ พระพุทธรูป	36

ลำดับสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่	m^2
[B]	เมตริกซ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า	
Cp	ค่าความร้อนจำเพาะ	(J/kg-K)
[D]	เมตริกซ์สมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ	
f	แรงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน	
$\bar{F}$	แรงภายในรวมในพิกัดรวมระบบ	N
$\{f_0\}$	เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากแหล่งกำเนิดความร้อน	
$\{f_q\}$	เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากการไหลของปริมาณความร้อน	
$\{f_p\}$	เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากการพาความร้อน	
$\{g\}$	เมตริกซ์ความต่างศักย์	
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
i, j, m	ตำแหน่งจุดต่อเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	
k	เมตริกซ์ถ่ายเทความร้อน	
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	(W/m-K)
[R]	เมตริกซ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบ	$W/^\circ C$
L	ความยาว	m
N	ฟังก์ชันรูปร่าง	
q	ปริมาณความร้อน	W/m^2
Q	แหล่งความร้อน	W/m^3
S_2	พื้นที่ผิวบริเวณที่มีปริมาณความร้อน	m^2
S_3	พื้นที่ผิวตรงบริเวณที่สูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน	m^2
t, T	อุณหภูมิ	$^\circ C$
T_∞	อุณหภูมิบรรยากาศ, อุณหภูมิของไหล	$^\circ C, K$
T_s	อุณหภูมิพื้นผิว	K
x_i, y_i, z_i	พิกัดที่จุดต่อ	
x, y, z	พิกัดของแกนเฉพาะที่	
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

จากการศึกษาปริญญานิพนธ์หัวข้อ การปรับปรุงกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของนายนิพล ผาคำ และนาย วิสชุด ศิริสาน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2551 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนภายในแบบหล่อพระพุทธรูป จากผลการวิเคราะห์พบว่า ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีต่อการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องจากผู้จัดทำกำหนดให้ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปได้รับอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว เพื่อเป็นการปรับปรุงการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะทำการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาแบบหล่อพระพุทธรูป เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนภายในแบบหล่อพระพุทธรูป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นภายในในแบบหล่อพระพุทธรูป
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งหัวเผาที่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป

1.3. ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 เป็นการศึกษาการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาแบบหล่อพระพุทธรูปแบบชั่วคราว ซึ่งใช้ในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาด 19 นิ้ว
- 1.3.2 กำหนดให้วัสดุเป็น Homogeneous
- 1.3.3 กำหนดให้วัสดุเป็น Isotropic Material
- 1.3.4 กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนลงสู่พื้นดินและไม่มีการแผ่รังสี

1.4 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

กิจกรรม	2552		2553									
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. จัดทำแบบจำลองไฟ ไนต์เอลิเมนต์ใน ลักษณะต่างๆ												
2. วิเคราะห์ผลกระทบ ของการเปลี่ยนตำแหน่ง หัวเผาต่อการนำความร้อน												
3. วิเคราะห์และสรุปผล การดำเนินงาน												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงลักษณะการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

1.5.2 ทราบถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาต่อการส่งผ่านความร้อน

1.6 อุปกรณ์ที่ใช้

1.6.1 คอมพิวเตอร์

1.6.2 โปรแกรม Flow Simulation 2009

1.7 งบประมาณ

1.7.1 ค่าเช่าเล่มปริญญาบัตร 1000 บาท

1.7.2 ค่าเพิ่มหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ 1500 บาท

1.7.3 ค่าแผ่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ 500 บาท

รวมทั้งสิ้น 3000 บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

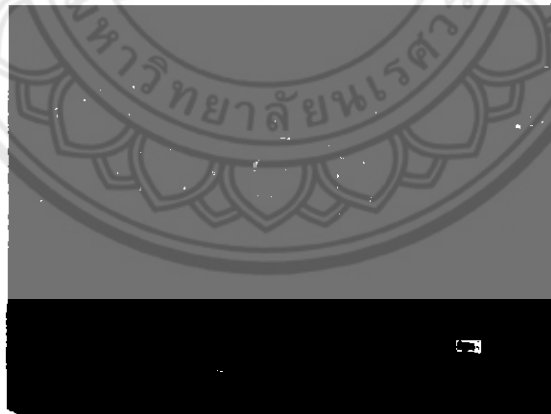
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรายละเอียดตามหัวข้อดังนี้ คือ

1. ขั้นตอนการหล่อองค์พระพุทธรูป
2. ตารางสมบัติ
3. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ทฤษฎีการนำความร้อน
5. ทฤษฎีการพาความร้อน

2.1 ขั้นตอนการหล่อองค์พระพุทธรูป

ขั้นตอนการหล่อพระพุทธรูปโดยสรุปมีดังนี้

2.1.1 ปั่นองค์พระพุทธรูปด้วยปูนปลาสเตอร์ผสมทรายให้ได้สัดส่วนตามแบบ



รูปที่ 2.1 ปั่นองค์พระพุทธรูป

2.2.2 นำขี้ผึ้งมาพอกให้รอบองค์พระ และแกะสลักตามแบบ แล้วทำการติดขนวน โดยที่ขนวนคือ ขี้ผึ้งที่นำมาปั้นเป็นสายเพื่อไว้สำหรับให้ขี้ผึ้งที่พอกกรอบองค์พระไหลออกมาตามสายขนวนนี้ในขณะเผา เป็นรูสำหรับให้อากาศไหลออกในขณะเผาและในขณะเททองอากาศที่ตกค้างจะออกมาทางรูนี้ และไว้เป็นรูสำหรับเททอง



รูปที่ 2.2 พอกจีผึ้ง และติดขนวน

2.1.3 นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายมาพอกให้รอบองค์พระ จากนั้นนำลวดมาพันรอบองค์พระ เพื่อป้องกันการแตกตัวของปูนปลาสเตอร์ในขณะเผา

2.1.4 นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายมาพอกให้รอบองค์พระอีกครั้ง จากนั้นจึงปั้นปากจอกปิด บริเวณปากทางที่จะเททอง โดยที่ปากจอก คือ สายขนวนที่นำมารวมกันดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.3 พอกปูนปลาสเตอร์ครั้งสุดท้าย

2.1.5 นำแบบมาเผาในเตาที่สร้างขึ้นด้วยอิฐจนจีผึ้งละลายออกหมด



รูปที่ 2.4 เตาเผา

2.1.6 จากนั้นเททองที่ได้หลอมไว้แล้วลงไปแบบที่เผาเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 2.5 เททอง

2.1.7 ปล่อยให้ทองในแบบเย็นตัวจึงจัดการทุบปูนพลาสติกออก รื้อแก้ลวดที่รัดแบบออกให้หมดแล้วจึงตกแต่งองค์พระให้สวยงาม

2.2 สมบัติของวัสดุ

ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุ

วัสดุ	อุณหภูมิ (K)	ρ (kg/m^3)	k ($W/m \cdot K$)	C_p ($J/kg \cdot K$)	Melting point ($^{\circ}C$)	Boiling point ($^{\circ}C$)
Paraffin Wax	298.15	900	0.242	2890	48-66	370
ปูน พลาสติก	298.15	1440	0.482	837	-	-
แผ่นเหล็ก	298.15	7900	47	420	1790	-
อิฐ	298.15	2640	1	960	-	-

(ที่มา : Frank P. Incropera & David P. Dewitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th.

John Wiley & sons.)

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มาจากแนวคิดที่ว่า วัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใดๆ จะสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ ได้ โดยแต่ละชิ้นเล็กๆ เหล่านั้นสามารถประกอบเป็นวัตถุรูปเดิมได้ และแต่ละชิ้นสามารถพิจารณาแยกกันอย่างอิสระ

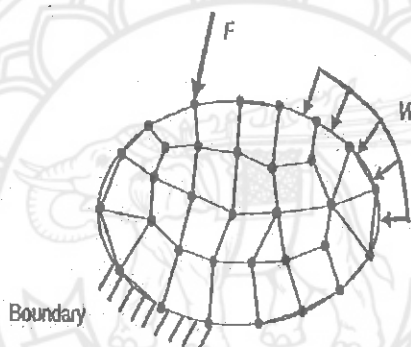
Finite = จำนวนจำกัด

Element = ชิ้นเล็กๆ

Method = วิธีการ

Analysis = การวิเคราะห์

พิจารณาวัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่อง (Continuum domain) ใน 2 มิติ ที่อยู่ภายใต้การกระทำของแรงกระทำที่จุด (F) และแรงกระจาย (W) ดังรูป



รูปที่ 2.6 วัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่องใน 2 มิติ ที่อยู่ภายใต้การกระทำของแรงกระทำที่จุด (F) และแรงกระจาย (W)

จากรูปจะเห็นว่าวัตถุถูกแบ่งเป็นหลายๆเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์เชื่อมต่อกันที่ โหนด (Node) โดยจะมีสมการภายในของตัวเอง (Local Element) และจะรวมกันเป็นฟังก์ชันของค่าที่โหนด เมื่อนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์รวมเข้าด้วยกันก็จะได้สมการรวม (Global Equation) โดเมนจะอยู่ภายใต้สภาวะการสมดุลของการกระทำจากแรงภายนอก และมีเงื่อนไขที่ขอบสามารถแทนค่าหรือตัดตัวแปรที่เท่ากับศูนย์ที่โหนดได้ ทำการแก้สมการหาค่าที่โหนด โดยการแยกหาค่า ณ จุดใดๆ ในแต่ละเอลิเมนต์ได้

2.3.1 สรุปขั้นตอนของ FEM ในการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลอง

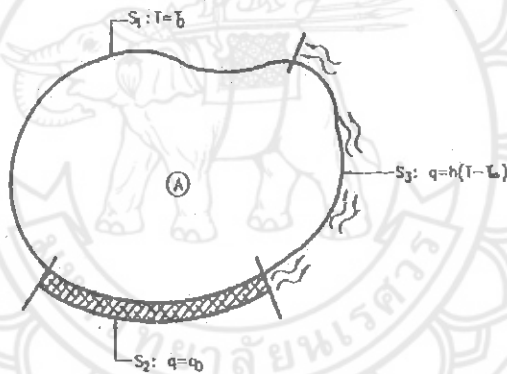
- ก. แบ่งโครงสร้างแบบจำลองออกเป็นชิ้นเล็กๆที่ประกอบ โดยเอลิเมนต์และ โหนด
- ข. เขียนสมการความสัมพันธ์ถึงปริมาณความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ของแต่ละเอลิเมนต์
- ค. ประกอบ (Assembly) ทุกๆเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน โดยใช้หมายเลข โหนด (ถ้าแต่ละ โหนดมีหลายตัวแปร จะใช้หมายเลขตัวแปรร่วมพิจารณาด้วย) เป็นตัวกำหนดของการวางตำแหน่ง Global stiffness matrix

ง. จัดสมการโดยหักล้างเงื่อนไขที่ขอบออก

จ. แก้สมการเพื่อหาค่าที่ไม่ทราบค่าที่ โหนดต่างๆจะได้ค่าที่ต้องการ เช่น การขจัด (Displacement)

ฉ. คำนวณหาค่าอื่นๆที่ต้องการเช่น การกระจายความร้อน การพาหรือการนำความร้อน เป็นต้น

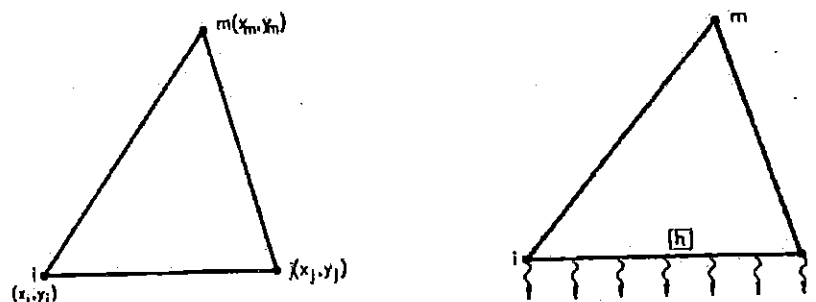
2.3.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน



รูปที่ 2.7 บริเวณขอบเขตการถ่ายเทความร้อนของปัญหา 2 มิติ

2.3.2.1 แบ่งเอลิเมนต์ และเลือกชนิดของเอลิเมนต์

เช่น ในกรณีปัญหาสองมิติเมื่อแบ่งระบบการถ่ายเทความร้อนออกเป็นเอลิเมนต์ สามเหลี่ยมย่อยที่ประกอบด้วย 3 จุด ต่อกันคือ i, j และ m ตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.8 (ก) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (ข) การสูญเสียความร้อนโดยการพาด้าน $i-j$

2.3.2.2 เลือกฟังก์ชันอุณหภูมิ

เลือกฟังก์ชันอุณหภูมิ T ของเอลิเมนต์ในเทอมของฟังก์ชันรูปร่าง N และ t เป็นอุณหภูมิแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์

$$\{T\} = [N]\{t\} \quad (2.1)$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \{t\} = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_i]^T \quad (2.2)$$

โดยที่ i = จำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์

2.3.2.3 กำหนดความต่างศักย์ของอุณหภูมิ ปริมาณความร้อนและความสัมพันธ์ของความต่างศักย์

เมตริกซ์ของความต่างศักย์ที่ได้จากการวิเคราะห์คือ

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_i \end{Bmatrix} = [B]\{t\} \quad (2.3)$$

โดยที่ $[B]$ คือ เมตริกซ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์

ปริมาณความร้อน q ในทิศทาง x และ y คือ

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -[D]\{g\} \quad (2.4)$$

โดยที่เมตริกซ์ $[D]$ คือสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ

$$[D] = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.3.2.4 หาเมตริกซ์ความการนำความร้อน และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการจากการหาค่าพลังงานศักย์ต่ำสุดเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน คือ

$$\int_V [B]^T [D] [B] dv + \int_{s_1} h [N]^T [N] ds \{t\} = \{f_Q\} + \{f_q\} + \{f_h\} \quad (2.6)$$

$$\text{ซึ่ง } \{f_Q\} = \int_V [N]^T Q dv \text{ คือ เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากแหล่งกำเนิดความร้อน} \quad (2.7)$$

$$\{f_q\} = \int_{s_2} [N]^T q dv \text{ คือ เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากการไหลของปริมาณความร้อน} \quad (2.8)$$

$$\{f_h\} = \int_{S_1} [N]^T h T_\infty ds \quad \text{คือ เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากการพาความร้อน} \quad (2.9)$$

S_2 และ S_3 คือ พื้นที่ผิวที่มีปริมาณความร้อน และพื้นที่ผิวตรงบริเวณที่สูญเสียความร้อน เนื่องจากการพาความร้อน ตามลำดับ

เขียนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปของสมมูลของแรงแต่ละเอลิเมนต์

$$\{f\} = [k] \{v\} \quad (2.10)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ (2.6) และ (2.10) พบว่า

$$[k] = \int_V [B]^T [D] [B] dv + \int_{S_1} h [N]^T [N] ds \quad (2.11)$$

โดยที่เมตริกซ์ $[k]$ เป็นเมตริกซ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งเทอมแรกทางขวามือของสมการ (2.11) เป็นเมตริกซ์การนำความร้อน ส่วนเทอมที่สองจะเป็นเมตริกซ์การพาความร้อน

เมตริกซ์ของแรง คือ
$$\{f\} = \{f_D\} + \{f_q\} + \{f_h\} \quad (2.12)$$

2.3.2.5 หาเมตริกซ์รวมของระบบ

หาเมตริกซ์การถ่ายเทความร้อนและเมตริกซ์แรงรวมของระบบ โดยใช้วิธีสติเฟนส ได้เมตริกซ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบดังนี้

$$[\bar{K}] = \sum_{e=1}^N [k] \quad (2.13)$$

ค่าของ $[\bar{K}]$ จะมีหน่วยเป็น $W/^\circ C$ หรือ $Btu/hr - ^\circ F$ และเมตริกซ์แรงรวมของระบบ

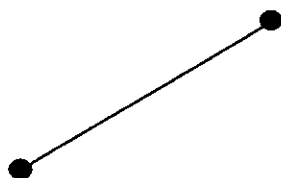
$$[\bar{F}] = \sum_{e=1}^N [f] \quad (2.14)$$

ค่าของ $\{\bar{F}\}$ จะมีหน่วยเป็น W หรือ Btu/hr และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบรวม เขียนได้เป็น

$$\{\bar{F}\} = [\bar{K}] \{v\} \quad (2.15)$$

2.3.3. ชนิดเอลิเมนต์ใน (FEM)

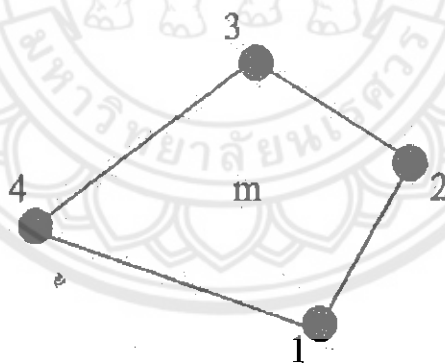
2.3.3.1 Line element



รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์ชนิด Line element

เป็นเอลิเมนต์มิติเดียว นิยมนำไปวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด โจทย์ปัญหาได้แก่ ระบบสปริง, โครงสร้าง (Trusses), กาน (Beam), ท่อ (Pipe), อื่นๆ

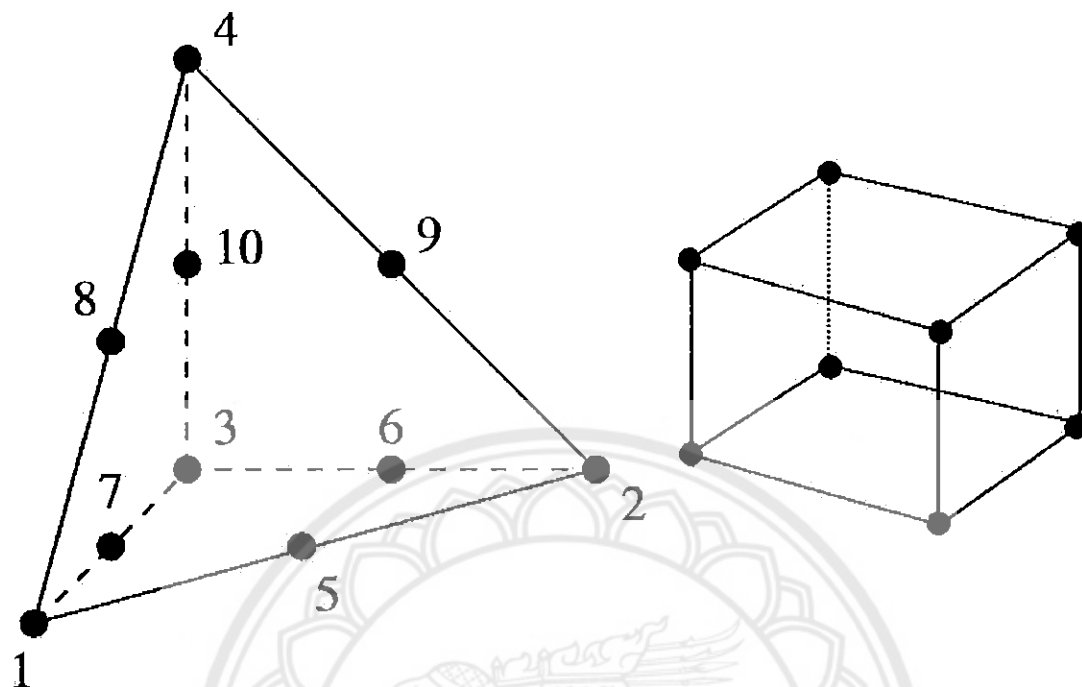
2.3.3.2 Plane element



รูปที่ 2.10 เอลิเมนต์ชนิด Plane element

เป็นเอลิเมนต์สองมิติ ที่มักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดระนาบ โจทย์ปัญหาได้แก่ Membrane, Plate, Shell, Plane stress, Plane strain

2.3.3.3 Solid element



รูปที่ 2.11 เอลิเมนต์ชนิด Solid element (3D)

(ที่มา : <http://www.solidworksthailand.com/webboard/index.php?topic=61.0>)

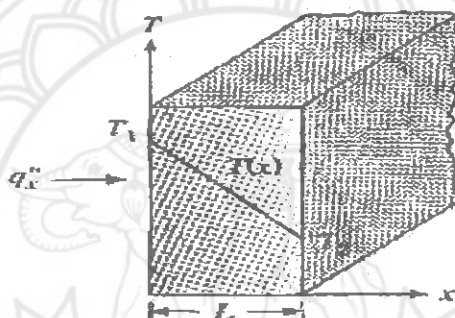
เป็นเอลิเมนต์สามมิติ จะใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป โจทย์ปัญหา 3-D Field ได้แก่ อุณหภูมิ, การขจัด, ความเค้น, ความเร็วของไหล เป็นต้น

เนื่องจากแบบจำลองแบบหล่อพระพุทธรูปเป็นรูปทรง 3 มิติและมีรูปทรงที่เป็นส่วนโค้ง ส่วนเว้ามาก ดังนั้นเอลิเมนต์ 3 มิติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้คือ Ten Node Tetrahedron มีลักษณะเป็น พีระมิดฐานสามเหลี่ยม จะทำให้การวิเคราะห์ในส่วนโค้งและมุม ทำให้คำตอบที่ได้มีความถูกต้องมากกว่า แบบ Four Node Tetrahedron

2.4 ทฤษฎีการนำความร้อน

การนำความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งผ่านความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปสู่โมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็งหรือของไหลที่หยุดนิ่งกับที่เมื่อในตัวกลางมีอุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางแบบนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law)

2.4.1 Fourier's Law สำหรับอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเรียบใน 1 มิติที่สภาวะคงตัวที่ไม่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายในวัสดุ



รูปที่ 2.12 การนำความร้อนผ่านผนังเรียบใน 1 มิติ

$$q''_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

- โดยที่ q''_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามแนวแกน x ต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน
- $\frac{dT}{dx}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกน x
- k คือ ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง (Thermal conductivity) มีหน่วยเป็น (W/m·K)
- เครื่องหมาย (-) แสดงว่าการถ่ายเทความร้อนอยู่ในทิศทางการลดลงของอุณหภูมิ
- ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-state) และการกระจายอุณหภูมิเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.15

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q_x'' = k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านผนังพื้นที่ A คือ $q_x = q_x'' \cdot A = kA \frac{\Delta T}{L}$ (2.17)

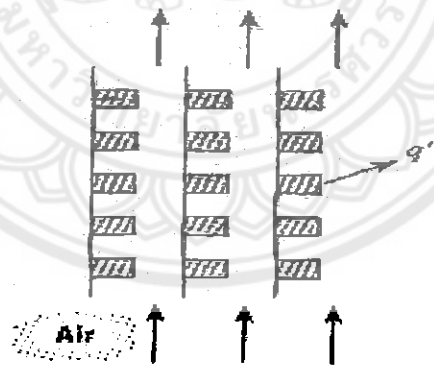
มีหน่วยเป็น W หรือ Btu/hr

2.5 ทฤษฎีการพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดขึ้นระหว่างของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ และพื้นที่ผิวสัมผัสกับของไหล โดยที่ทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกัน

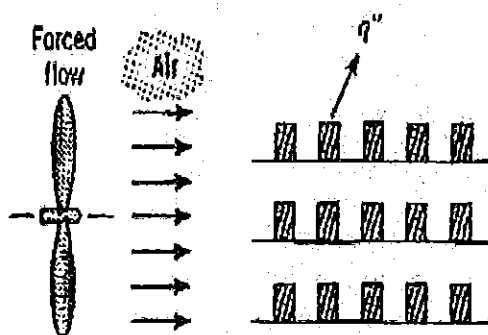
การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) การเคลื่อนไหวของของไหลเนื่องจากแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อันเกิดจากมีผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ



รูปที่ 2.13 การพาความร้อนตามธรรมชาติ

2. การพาความร้อนโดยบังคับ (Force convection) การเคลื่อนไหวของของไหลเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก เช่น เครื่องสูบ เครื่องเป่าลม เป็นต้น



รูปที่ 2.14 การพาความร้อนโดยบังคับ

สมการคำนวณการถ่ายเทความร้อน โดยการพาจาก Newton's law of Cooling

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.18)$$

โดยที่ q'' คือ Convection heat flux (W/m^2) และ $q'' \propto (T_s - T_\infty)$

T_s คือ อุณหภูมิผิว

T_∞ คือ อุณหภูมิของไหล

h คือ Convection heat transfer coefficient ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) ขึ้นอยู่กับรูปทรงของพื้นที่ผิว การเคลื่อนที่ของของไหล สมบัติของไหล ค่าโดยทั่วไปของ h แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน

ชนิดของการพาความร้อน	ค่าสัมประสิทธิ์ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
การพาความร้อนแบบธรรมชาติ	
➤ ก๊าซ	2-25
➤ ของเหลว	50-1,000
การพาความร้อนแบบบังคับ	
➤ ก๊าซ	25-250
➤ ของเหลว	100-20,000
การพาขณะเปลี่ยนแปลงเฟส (เค็ดตัวและควบแน่น)	2,500-100,000

(ที่มา : รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อนฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์, 2548.)

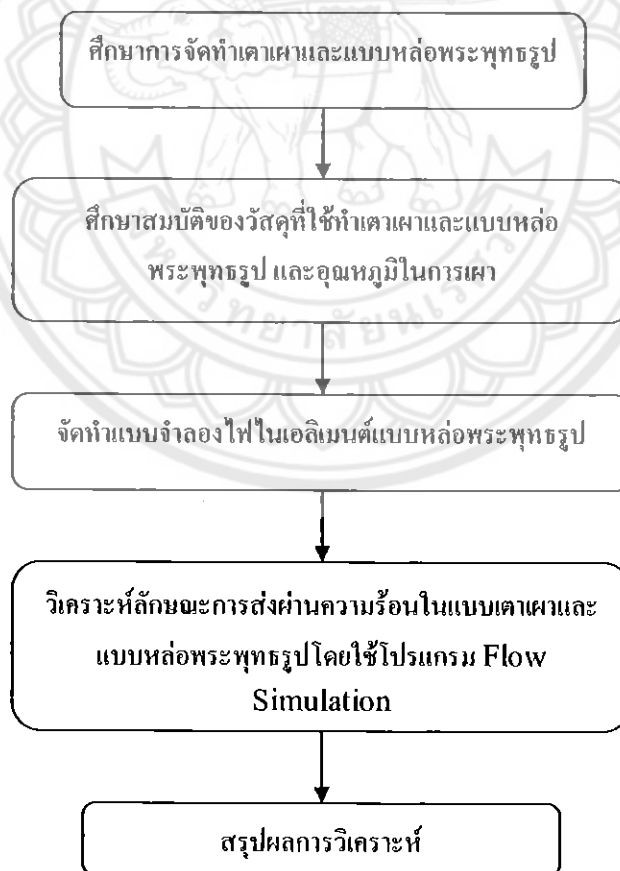
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุตามจุดประสงค์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 1 ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 หัวข้อ คือ

1. การศึกษาข้อมูลส่วนประกอบ ขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป ส่วนประกอบของเตาเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป
2. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเตาเผาและแบบหล่อพระพุทธรูป และวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนการดำเนินงานดังที่กล่าวมาสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของภาพแผนผังได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การศึกษาข้อมูลส่วนประกอบ ขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป ส่วนประกอบของเตาเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

3.1.1 การศึกษาข้อมูลส่วนประกอบ ขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป และส่วนประกอบของเตาเผา

จากการศึกษาข้อมูลการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว จะได้ข้อมูลดังนี้ แบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว จะมีขนาดแบบหล่อพระพุทธรูป ส่วนสูง 132 ซม. กว้าง 94.50 ซม. ประกอบด้วย 3 ชั้น 1. ชั้นในทำจากปูนปลาสเตอร์ผสมทรายป่นเป็นแบบองค์พระตามขนาดหน้าตักที่ต้องการ 2. ชั้นกลางทำจากขี้ผึ้งซึ่งเป็นลวดลายขององค์พระ หลังจากที่ได้ปั้นองค์พระแบบคร่าวๆ แล้วก็นำเอาขี้ผึ้งมาพอกให้ทั่วองค์พระให้ขี้ผึ้งมีความหนาประมาณ 5 มม. จากนั้นก็ทำการแกะลวดลายให้สวยงาม 3. ชั้นนอกทำจากปูนปลาสเตอร์ผสมทราย หลังจากที่ได้ทำการแกะสลักลวดลายเสร็จแล้วก็นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายพอกชั้นขี้ผึ้งให้ทั่วรอบทั้งองค์พระให้มีความหนาประมาณ 2.5 นิ้ว จากนั้นก็นำเหล็กเส้นมาเชื่อมรัดปูนปลาสเตอร์ด้านนอกให้แน่นเพื่อป้องกันการขยายตัวจากความร้อน และป้องกันการแตกร้าวของปูนปลาสเตอร์ จากนั้นก็นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายมาพอกให้รอบเหล็กเส้นให้มีความหนาเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 2.5 นิ้ว รวมความหนาของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นนอกประมาณ 5 นิ้ว และเตาเผาประกอบด้วย ผนังเตาก่อด้วยอิฐสูง 150 ซม. และหนา 19 ซม. และด้านบนปิดด้วยแผ่นเหล็ก ผนังเตามีการเจาะรูเพื่อเป็นทางเข้าของหัวเผาสูงจากพื้นดิน 11 ซม. จำนวน 4 รู วัสดุที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งใช้ในการจัดสร้างแบบหล่อพระพุทธรูปจะมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 การแกะสลักลายชั้นขี้ผึ้ง

แบบหล่อพระพุทธรูปที่
ประกอบด้วยปูนปลาสเตอร์
ชั้นนอก และชั้นใน ชั้นกลาง
คือ ชั้น ขี้ผึ้ง



รูปที่ 3.3 แบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว

ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุ

วัสดุ	อุณหภูมิ (K)	ρ (kg/m^3)	k ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	C_p ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)
Paraffin Wax	298.15	900	0.242	2890	48-66	370
ปูน ปลาสเตอร์	298.15	1440	0.482	837	-	-
แผ่นเหล็ก	298.15	7900	47	420	1790	-
อิฐ	298.15	2640	1	960	-	-

(ที่มา : Frank P. Incropera & David P. Dewitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th .

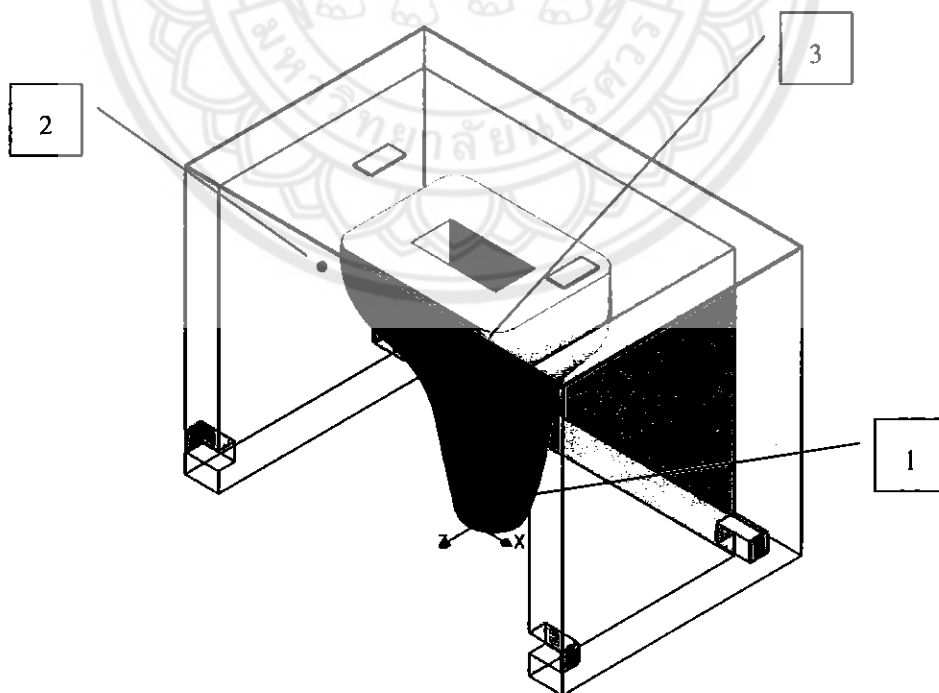
John Wiley & Sons.)

3.1.2 การศึกษาข้อมูล การตรวจวัดและจัดเก็บอุณหภูมิส่วนต่างๆ ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

จากการศึกษาในส่วนของการจัดเก็บข้อมูลในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปพบว่า จะทำการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา อุณหภูมิภายในเตา และอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปดังแสดงในรูปที่ 3.4

สาเหตุของการจัดเก็บอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ

1. จัดเก็บอุณหภูมิ ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา เพื่อต้องการทราบถึงอุณหภูมิของผิวแบบหล่อพระพุทธรูปที่อยู่บริเวณหัวเผ่าว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร เพื่อจะนำข้อมูลนี้ไปจำลองการเผาโดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผา
2. จัดเก็บอุณหภูมิภายในเตา เพื่อต้องการทราบถึงอุณหภูมิภายในเตาว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผา
3. จัดเก็บอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป เพื่อต้องการทราบถึงอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป ที่ทำให้แบบหล่อพระพุทธรูปที่ทำให้สุกทั่วทั้งแบบ และใช้ในการยืนยันความถูกต้องของอุณหภูมิภายในแกนกลางของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปว่ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปในขณะเผาจริงหรือไม่



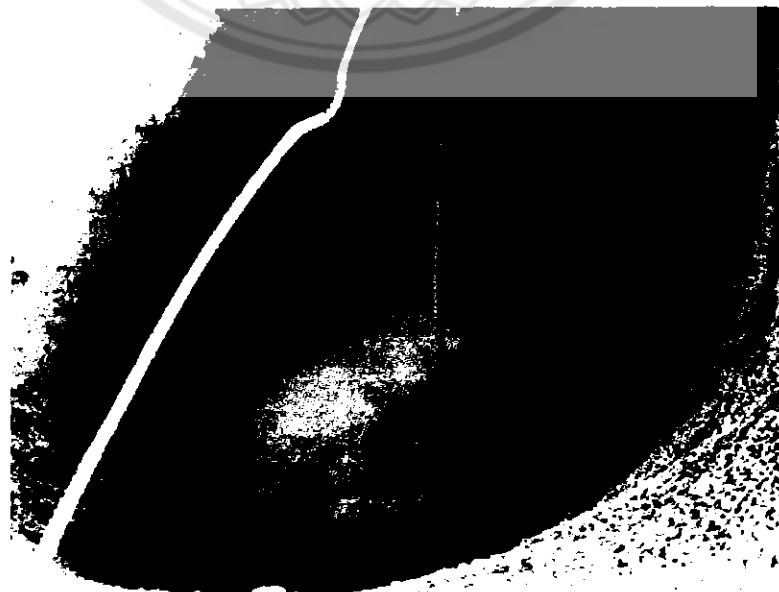
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (1) อุณหภูมิผิวแบบบริเวณแหล่งความร้อน (2) อุณหภูมิภายในเตา (3) อุณหภูมิในตัวแบบ



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิต่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา อยู่สูงจากพื้นดิน 11 ซม.



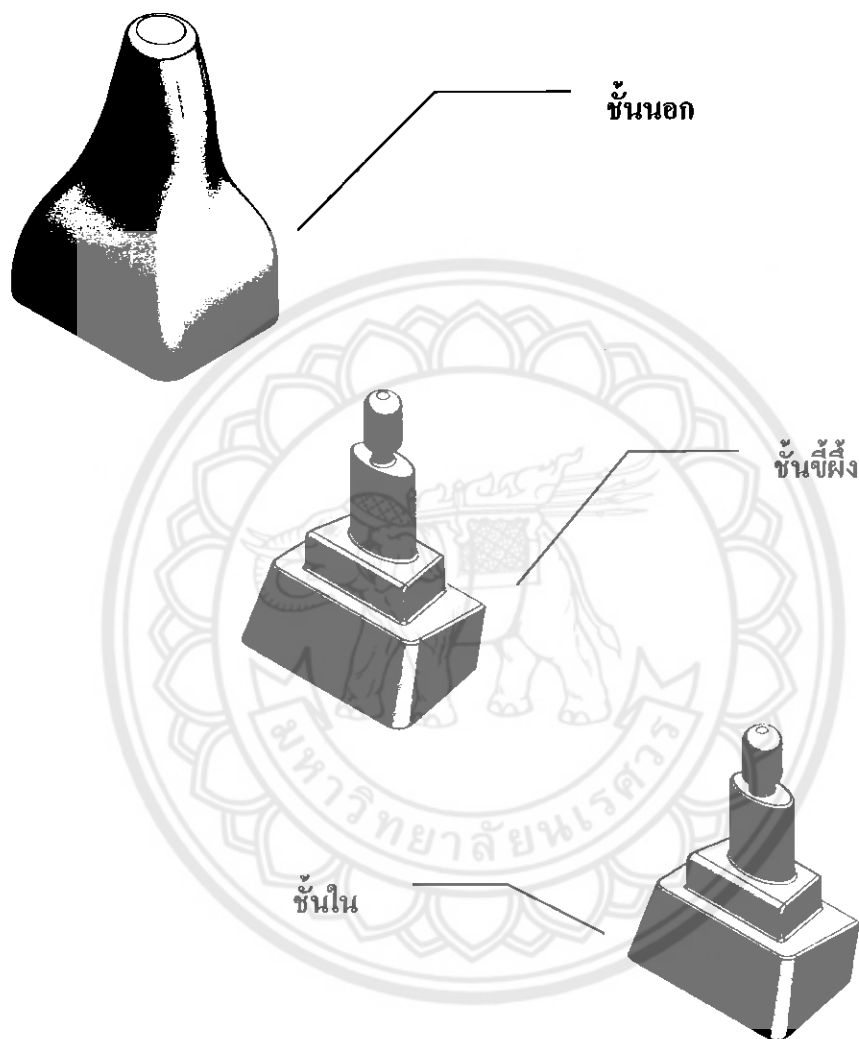
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิกายในเตา อยู่สูงจากพื้นดิน 82 ซม.



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิกายในแบบหล่อพระพุทธรูป อยู่สูงจากพื้น 80.3 ซม.

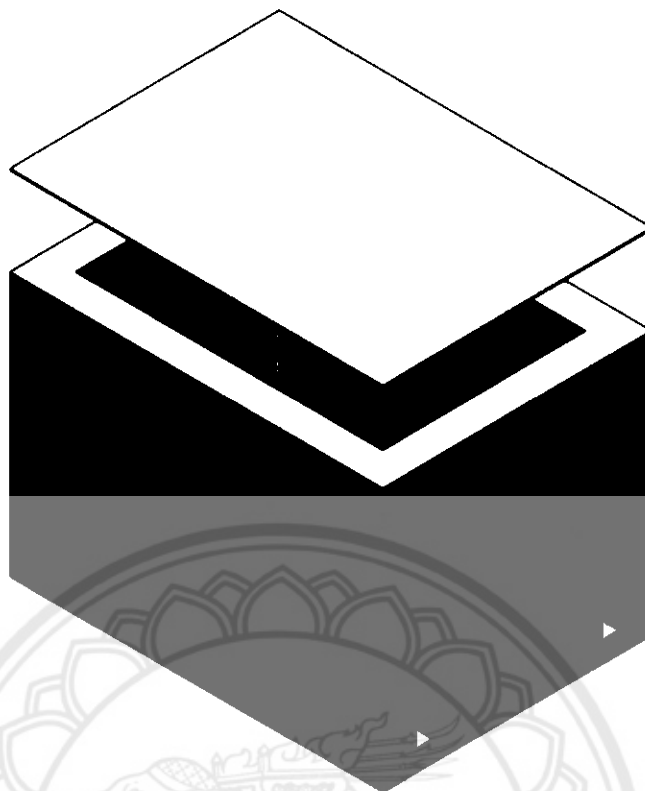
3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป และการวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป



รูปที่ 3.8 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเตาเผาและแบบหล่อพระพุทธรูปให้มีลักษณะคล้ายกับของจริงโดยใช้โปรแกรม Solid Work โดยสร้างชั้นซี่ผึ้งให้ให้มีขนาดความสูง 100.90 ซม. ฐานกว้าง 79.50 ซม. ขนาดหน้าตัด 19 นิ้ว ชั้นในมีความสูง 99.90 ซม. ฐานกว้าง 77.05 ซม. ชั้นนอกสูง 132.30 ซม. ฐานกว้าง 94.50 ซม. และเตามีความสูง 150 ซม. หนา 19 ซม. ด้านบนปิดด้วยแผ่นเหล็ก



รูปที่ 3.9 เตาเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

3.2.2 เงื่อนไขเริ่มต้นของการวิเคราะห์

a) กำหนดให้วัสดุทั้งหมดเป็น Isotropic Material เป็นวัสดุที่มีค่าคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับภาระที่มากระทำในทิศทางใดๆ จะมีค่าคุณสมบัติเท่ากันในทุกทิศทางที่มีภาระมากระทำ เช่น ค่ายังมอดูลัสและค่าอัตราส่วนปัวซอง เมื่อมีโหลดมากระทำในแนวแกน X,Y,Z ในขนาดที่เท่ากัน วัสดุนั้นก็จะยืดออกหรือหดเข้าในแนวแกนทั้งสามที่เท่ากัน

b) กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 25°C

c) เนื่องจากการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรอบเตาเผาที่ถูกต้องนั้นกระทำได้ยาก จึงสมมติฐานให้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติรอบเตาเผามีค่าคงที่เท่ากับ $25\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ซึ่งอยู่ในช่วงใช้งานตามตารางที่ 2.2 และอุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 35°C

d) กำหนดให้อุณหภูมิขาเข้าของหัวเผาเท่ากับ 1840.56°C

e) กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นดินและไม่มีการแผ่รังสี

3.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิเคราะห์ลักษณะการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Flow simulation มีรายละเอียดดังนี้

- a) กำหนดชนิดของของไหลที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ Propane
- b) กำหนดชนิดของวัสดุตามตารางที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย จีพิ้ง ปูนปลาสเตอร์ แผ่นเหล็ก และอิฐ
- c) กำหนดทางเข้า ทางออก ของของไหล กำหนดอุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 1840.56°C ความเร็วทางเข้าเท่ากับ 1.329 m/s ^[2] และกำหนดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกเท่ากับ $25\text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$ ที่อุณหภูมิ 35°C
- d) กำหนดตำแหน่งที่ต้องการจัดเก็บข้อมูลของการวิเคราะห์โดยให้เก็บค่าอุณหภูมิภายในแบบหล่อ ที่ความสูงจากพื้นดิน 80.3 ซม.
- e) กำหนดเวลาในการวิเคราะห์ทั้งหมดเท่ากับ 20 ชั่วโมง เวลาในการเก็บข้อมูลคือทุกๆ 15 นาที และเริ่มทำการวิเคราะห์



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

จากผลการศึกษาข้อมูลการหล่อพระพุทธรูปและการตรวจวัดอุณหภูมิในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองของเตาเผาแบบหล่อพระพุทธรูป และทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ผลการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น ดังนี้

4.1 ผลการศึกษการตรวจวัดอุณหภูมิในแบบหล่อพระพุทธรูป

จากการศึกษาปริณิญาณิพนธ์ เรื่องการปรับปรุงกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของ นายนิพนธ์ ผาคำ และนายวิสูตร ศิริสถาน นิสิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2551 ทำให้เราทราบอุณหภูมิที่วัดได้จริงขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปจนกระทั่งแบบสุกทั่วทั้งแบบใช้เวลา 20 ชั่วโมง มีข้อมูลอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่ตำแหน่งบริเวณแกนกลางของแบบหล่อ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่ตำแหน่งบริเวณแกนกลางของแบบหล่อ

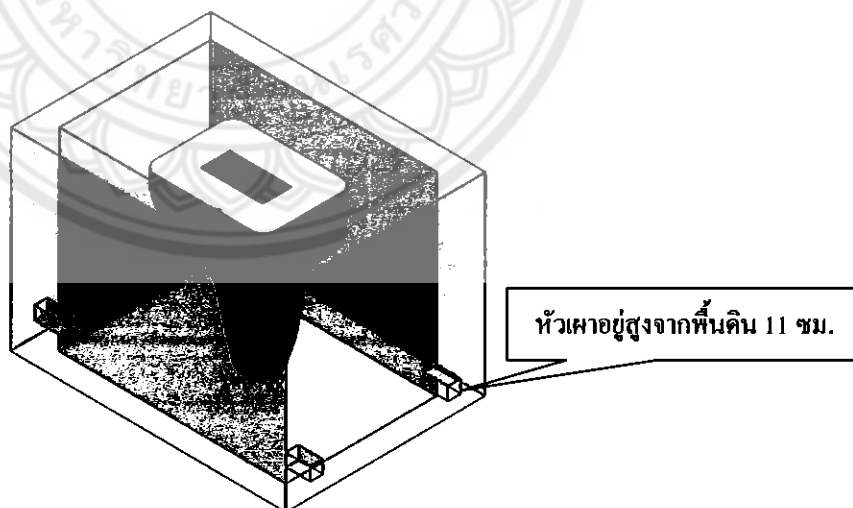
เวลาในการเผา (hr)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
ก่อนเผา	25.00
5 hr 20 min	90.50
8 hr 20 min	97.74
12 hr	171.39
16 hr	144.80
20 hr	419.80

4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการที่ได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิในขณะที่เผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว สมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา และนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในแบบจำลอง โดยข้อมูลในตารางที่ 4.2 จะแสดงอุณหภูมิในแบบจำลองที่ตำแหน่งบริเวณแกนกลางของแบบหล่อพระพุทธรูป ที่เวลาต่างกัน ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงในหัวข้อที่ 4.1 เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

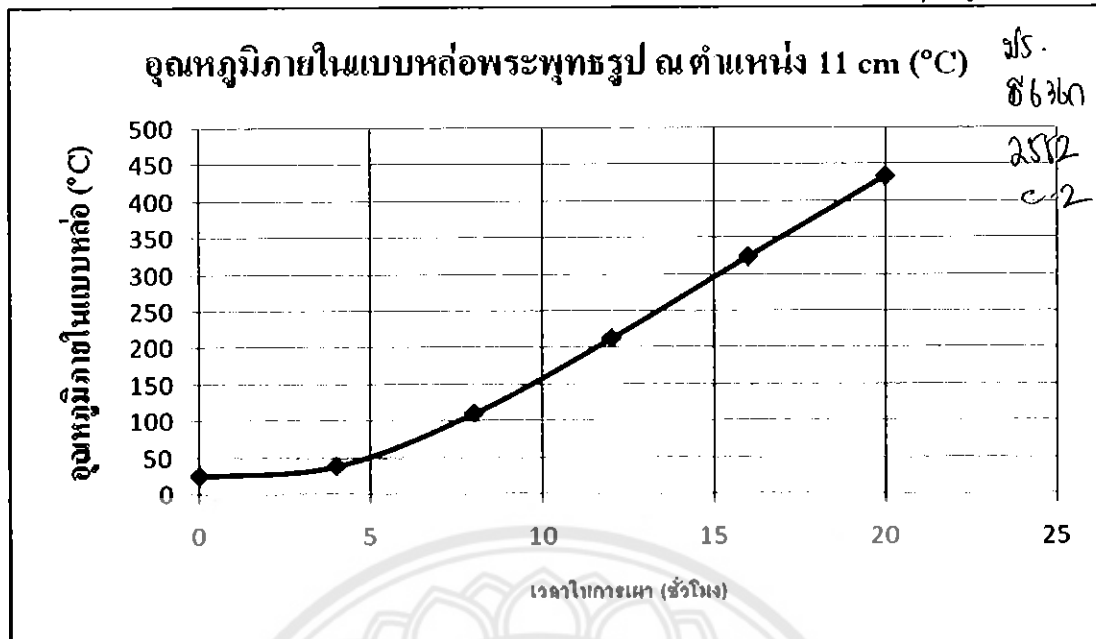
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิ (°C)	25.00	38.88	110.61	212.89	324.41	434.16



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งหัวเผาความสูงแบบเดิม

ปี ๒๐๒๒

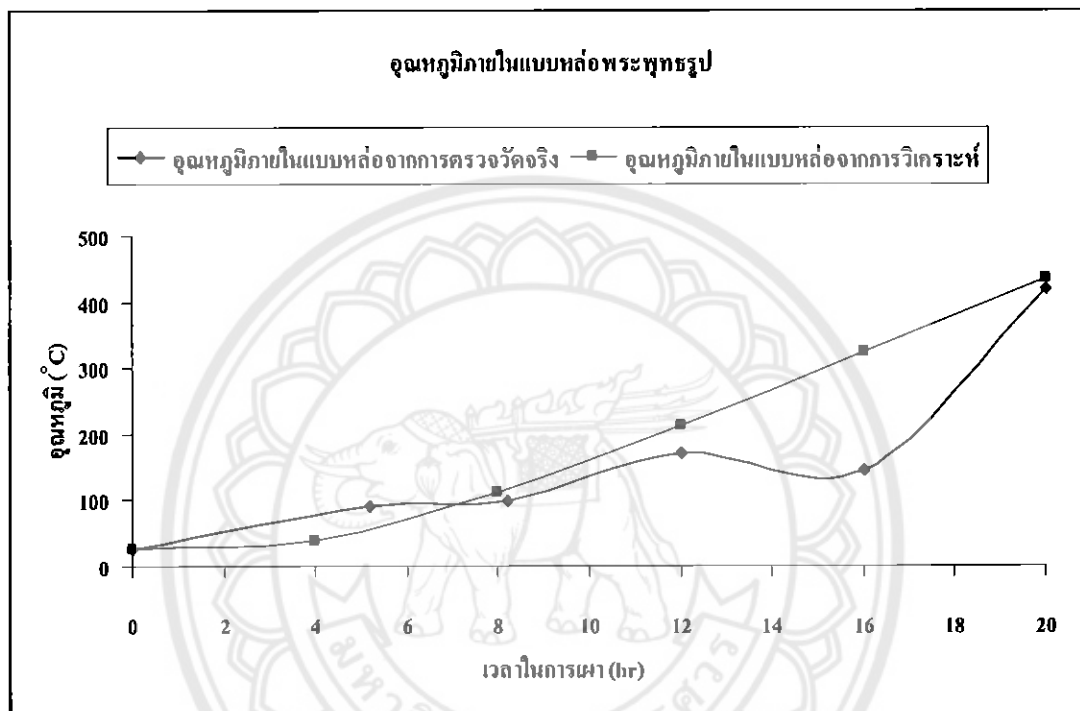


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาที่ตำแหน่งเดิม

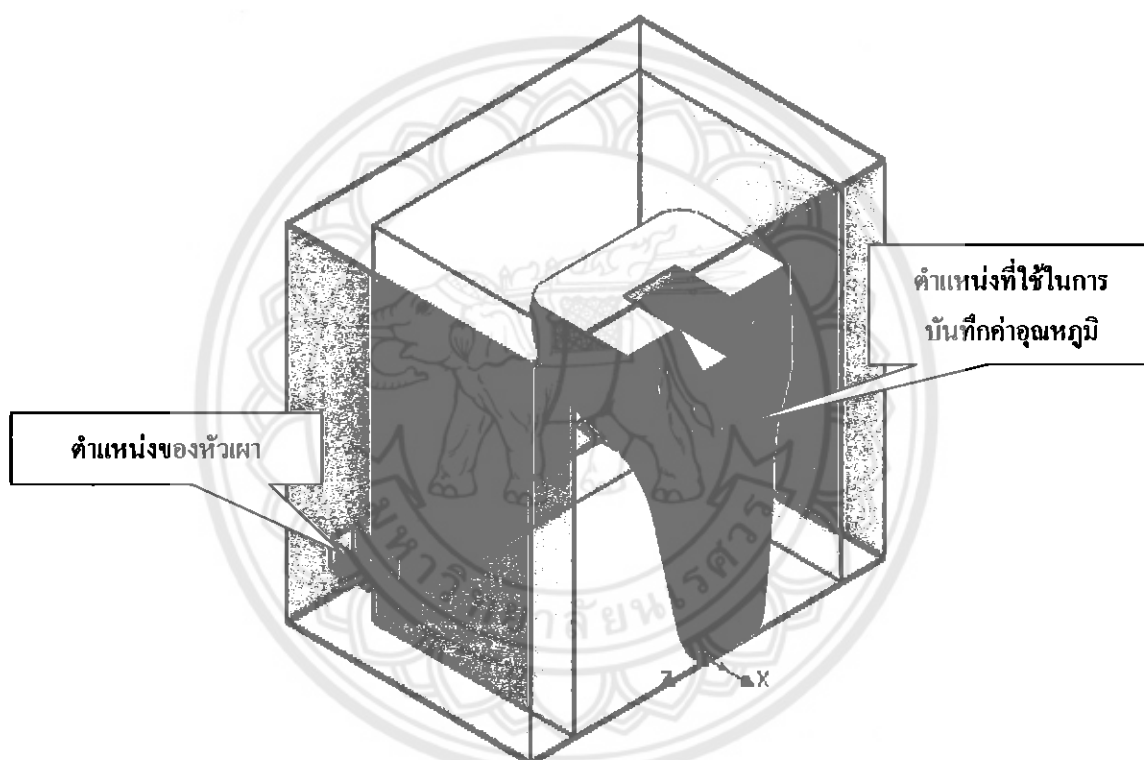
จากผลการวิเคราะห์กระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ตำแหน่งความสูงของของหัวเผาสูงจากพื้นดิน 11 ซม. ซึ่งเป็นตำแหน่งของหัวเผาที่ใช้ในเตาเผาจริง พบว่า อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่ได้จากการตรวจวัดจริง ดังแสดงในกราฟที่ 4.4 ดังนั้น แบบหล่อพระพุทธรูปนี้จึงมีความถูกต้องสามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในแบบหล่อจากการตรวจวัดจริงกับอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยอิทธิพลของตำแหน่งหัวเผาที่มีต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น

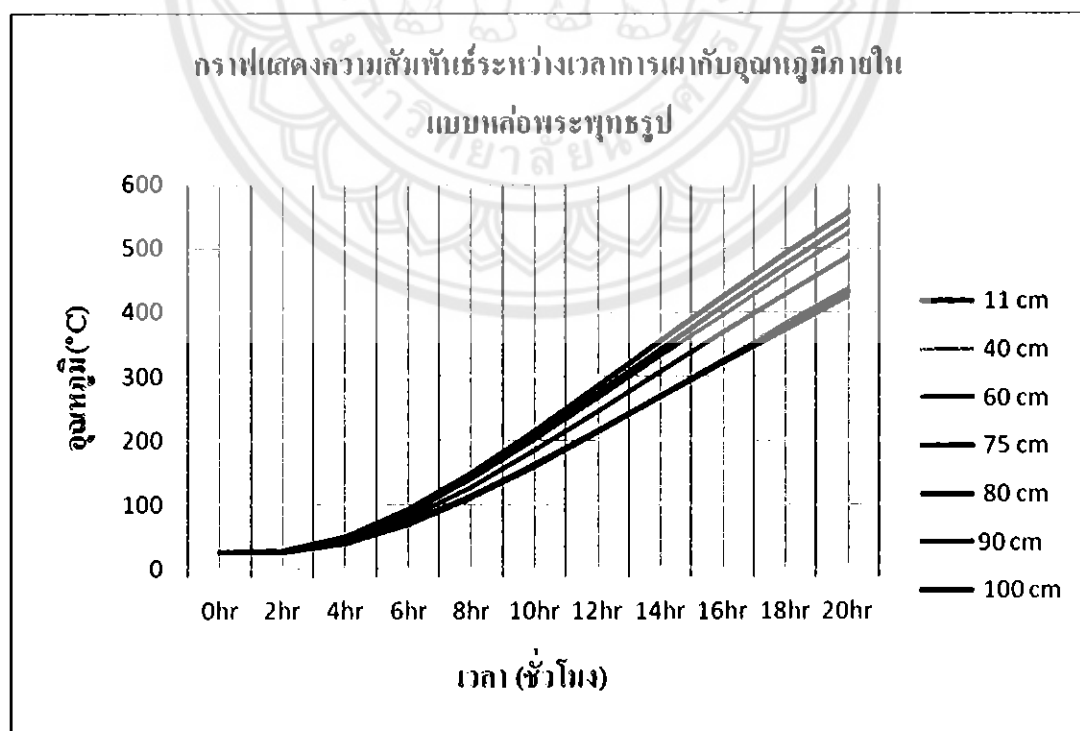
จากแบบจำลองที่ได้ในหัวข้อ 4.2 ได้ทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาให้สูงขึ้น ที่ตำแหน่งความสูงจากพื้นดิน 40, 60, 75, 80, 90 และ 100 ซม. เพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะได้ผลดังนี้



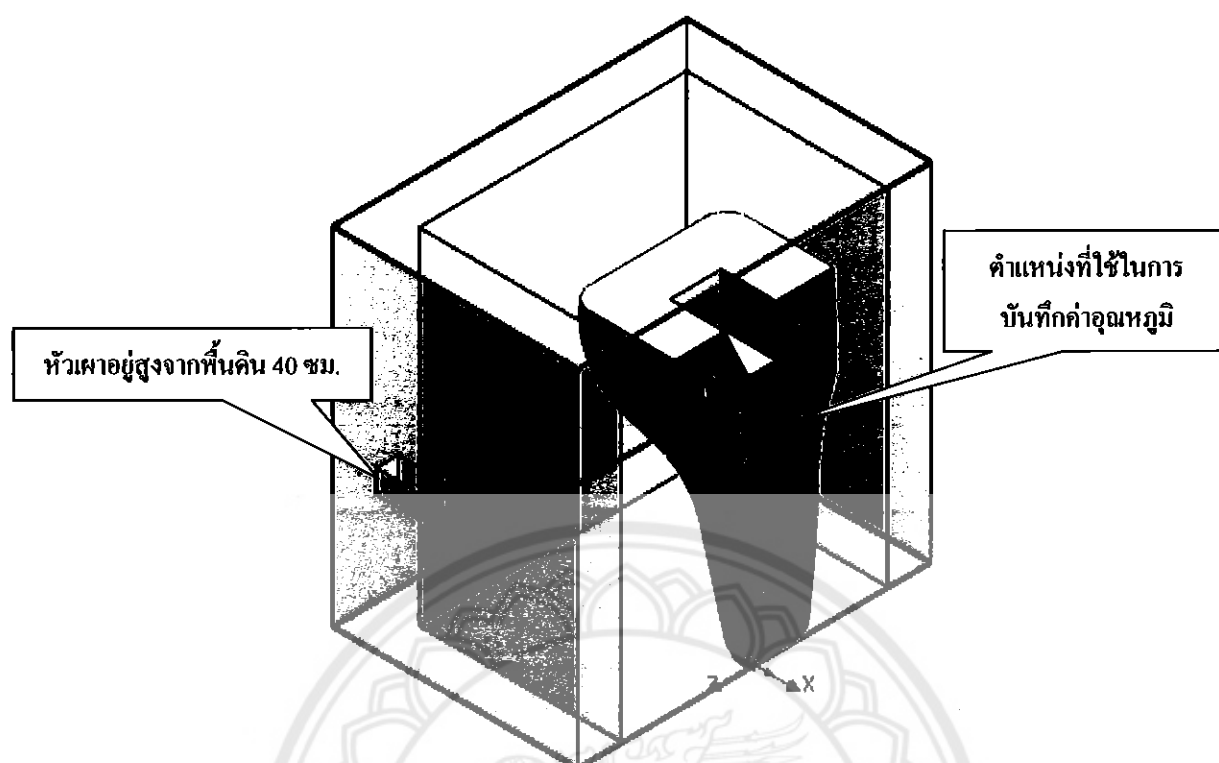
รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิภายในแบบหล่อที่ตำแหน่งหัวเสาแบบต่างๆ

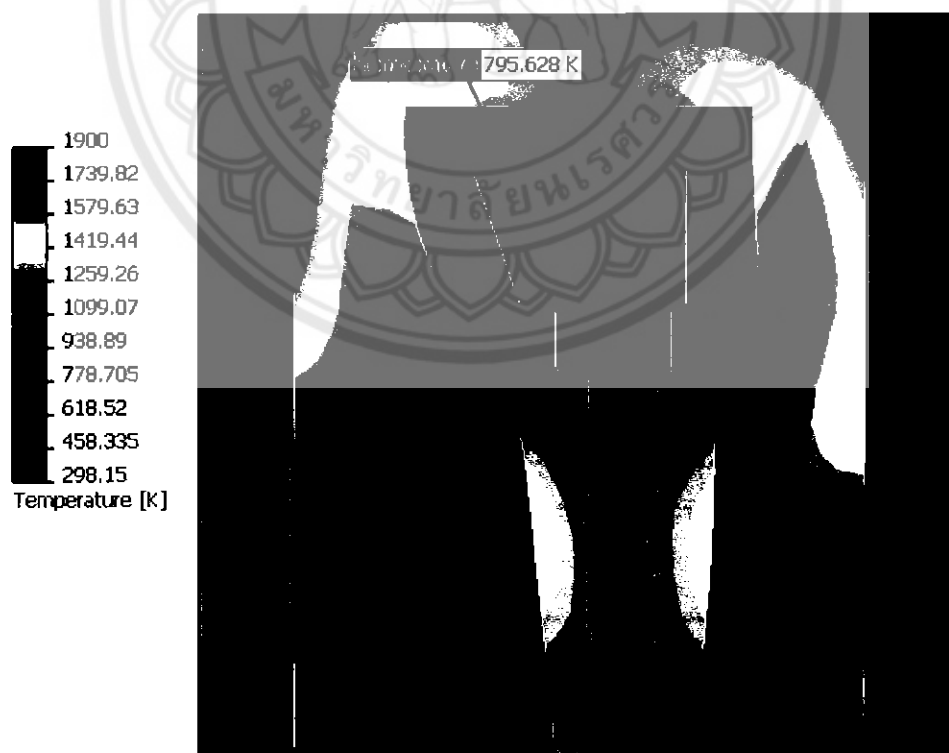
เวลา (hr) \ ความสูงของหัวเสา (cm)	0	4	8	12	16	20
40	25.00	46.67	139.66	264.21	395.45	522.42
60	25.00	42.53	127.94	245.07	368.50	486.76
75	25.00	48.18	149.48	284.63	424.31	555.91
80	25.00	39.64	112.00	215.17	324.85	431.21
90	25.00	46.64	142.36	272.14	408.24	537.66
100	25.00	39.86	112.06	212.17	319.56	424.02



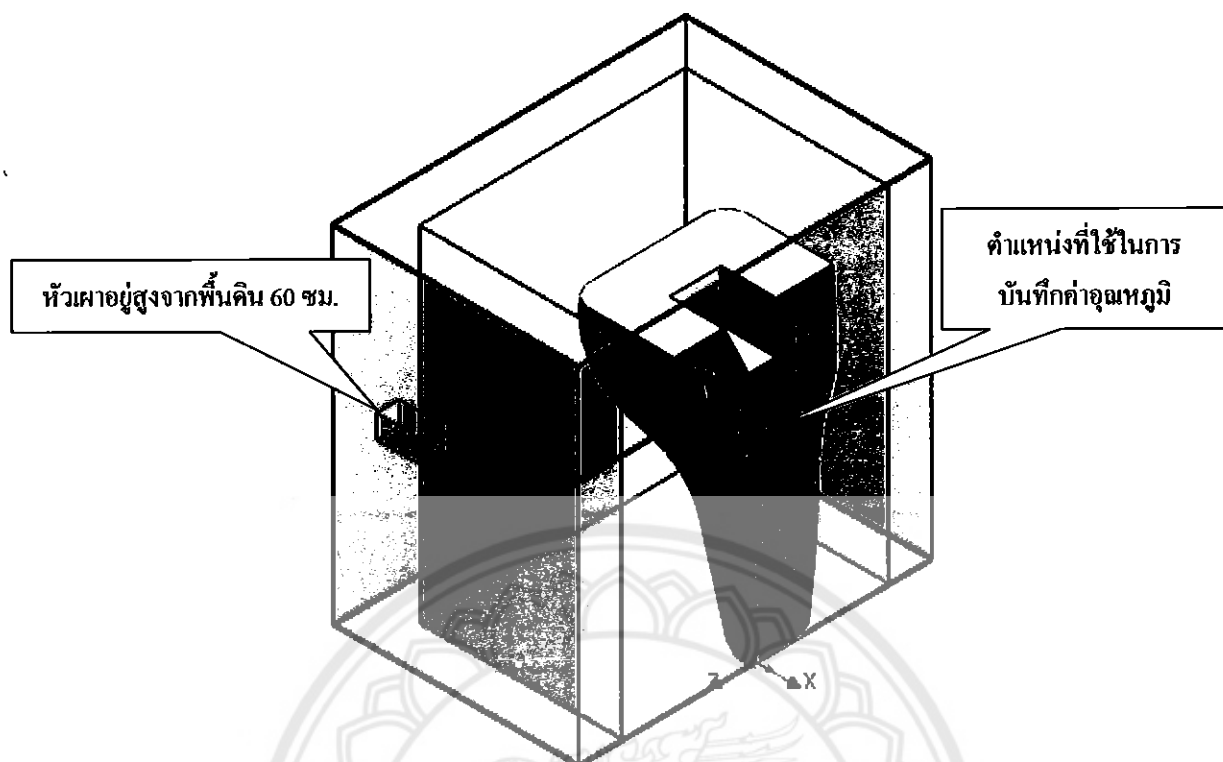
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิภายในแบบหล่อที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟในเคอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป



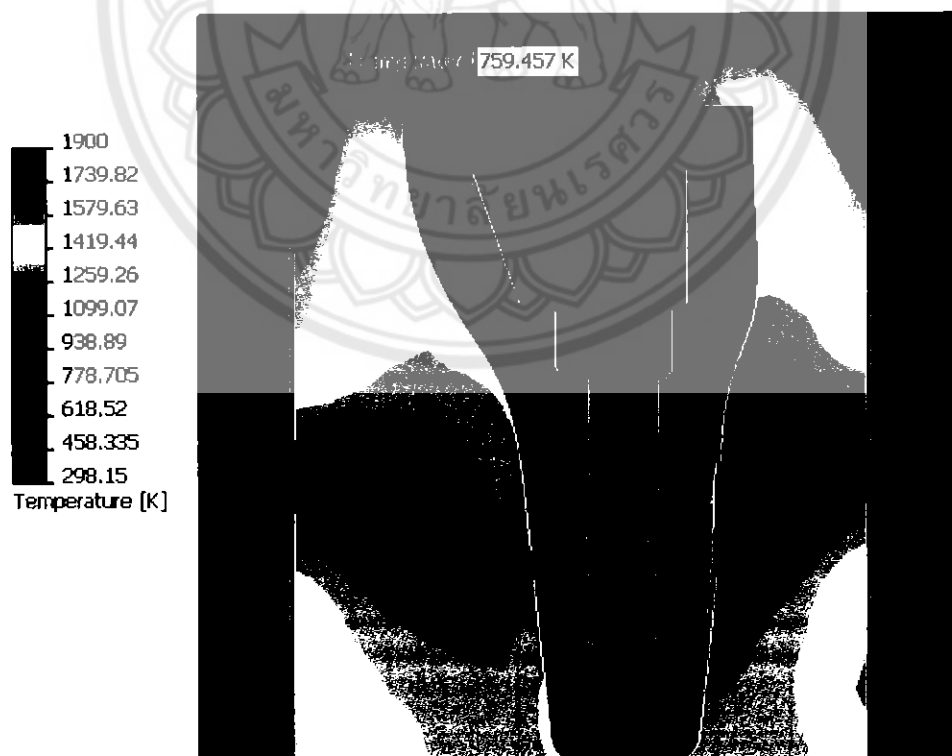
รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผายู้งสูงจากพื้นดิน 40 ซม.



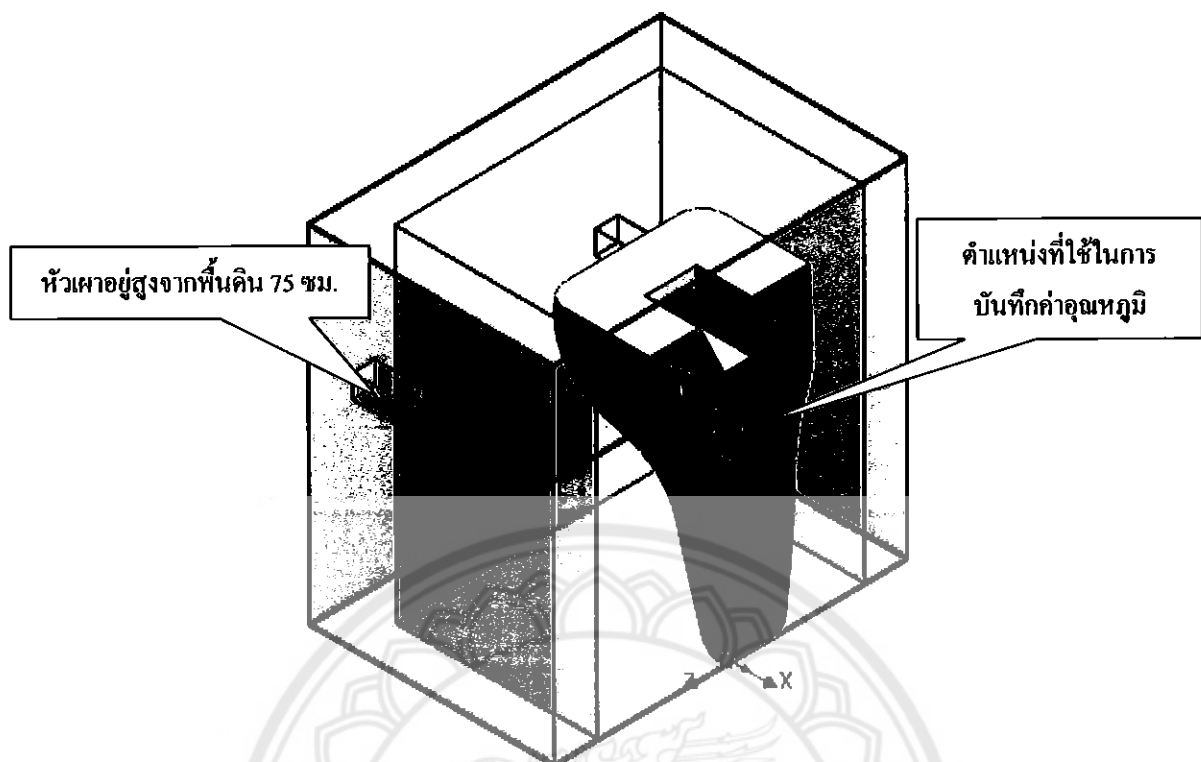
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 40 ซม.



รูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 60 ซม.



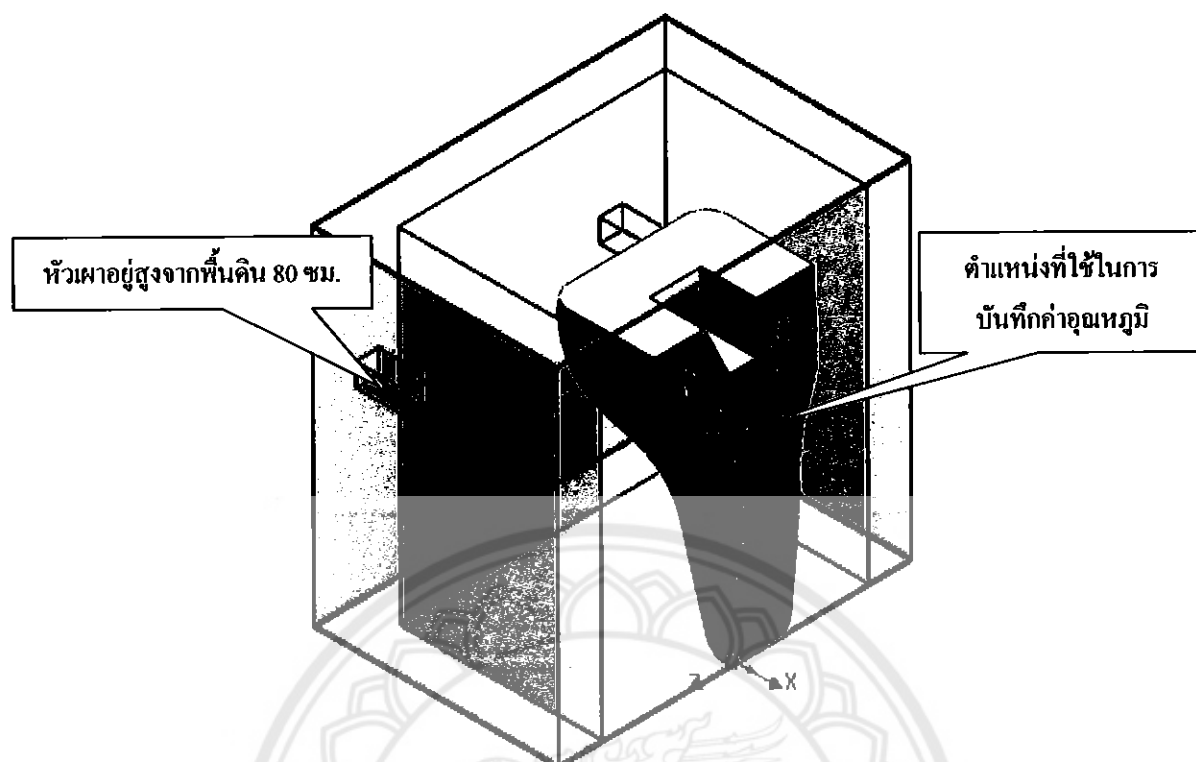
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 60 ซม.



รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 75 ซม.



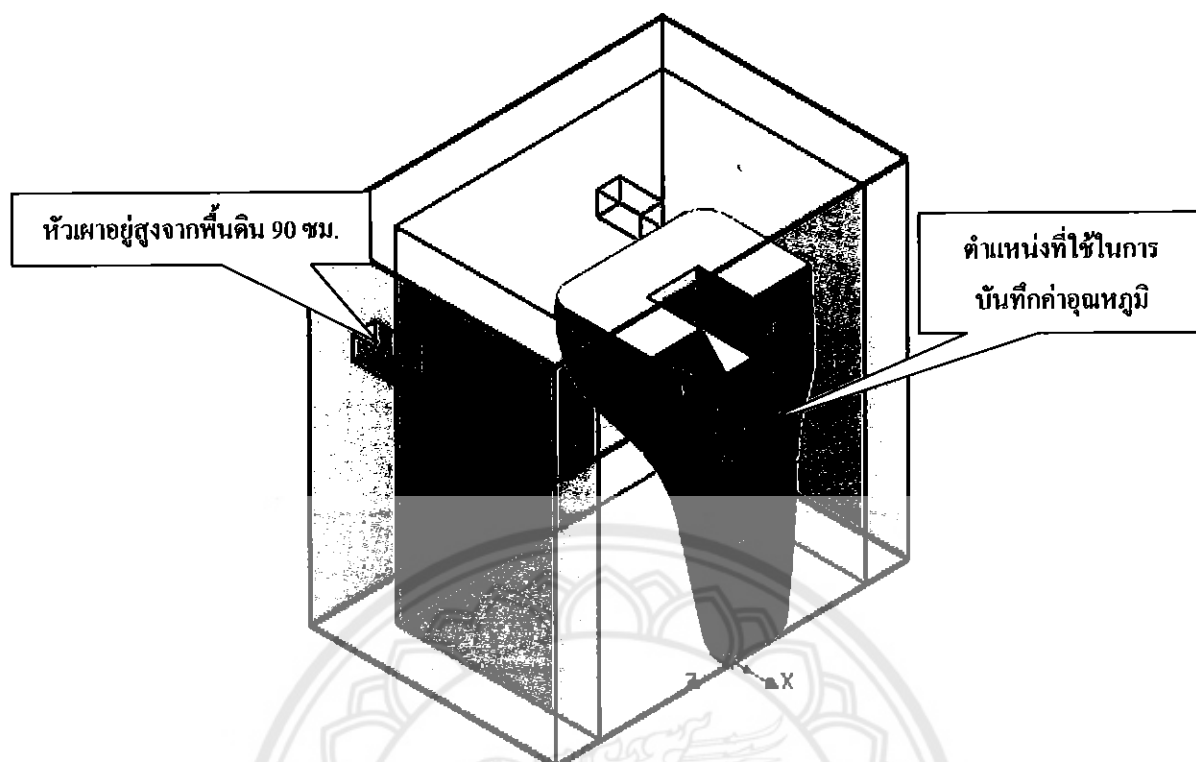
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 ซม.



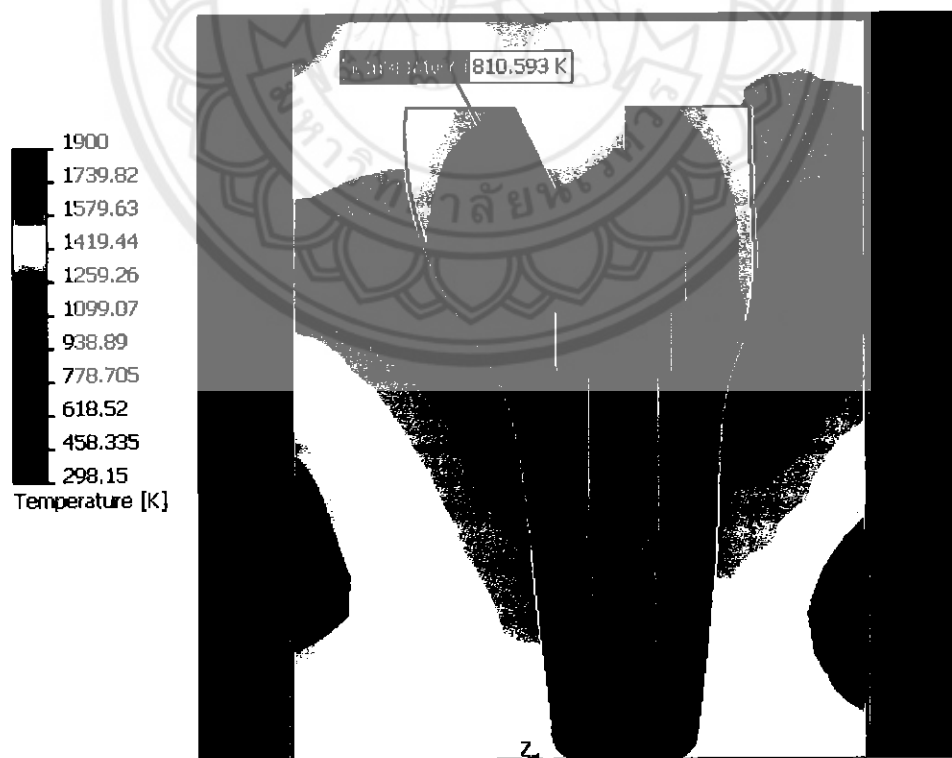
รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 80 ซม.



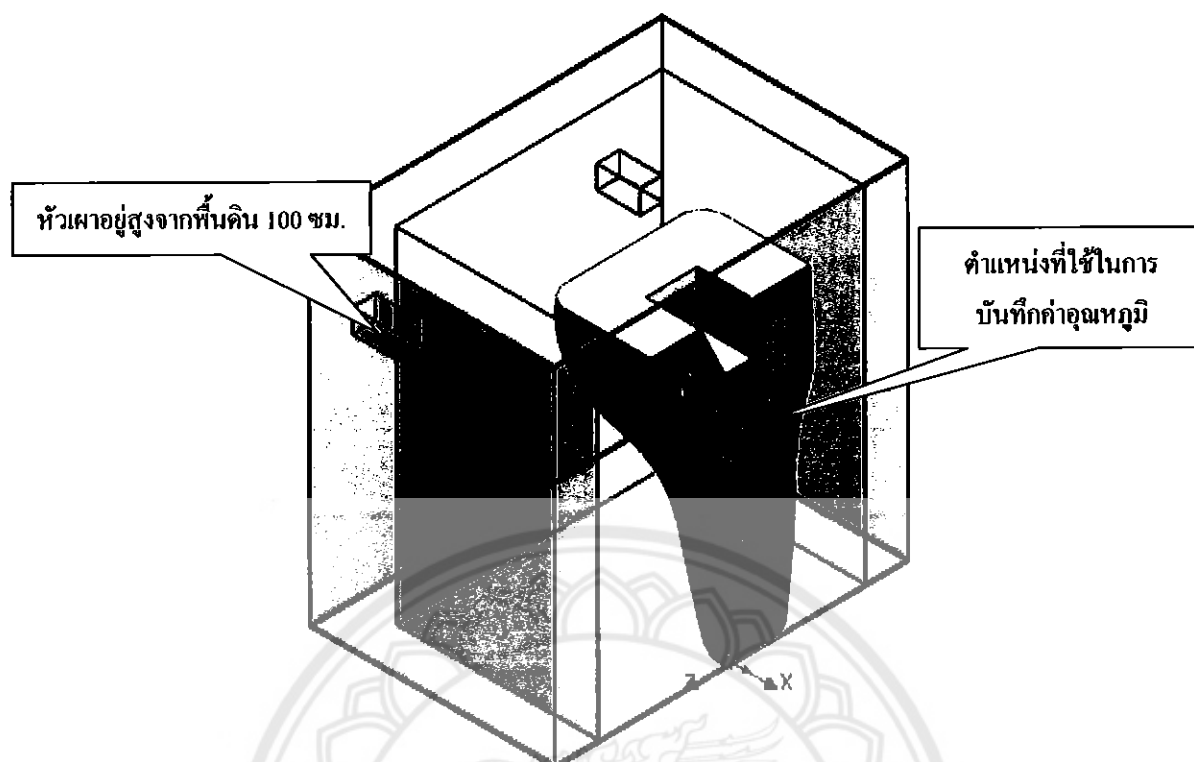
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 80 ซม.



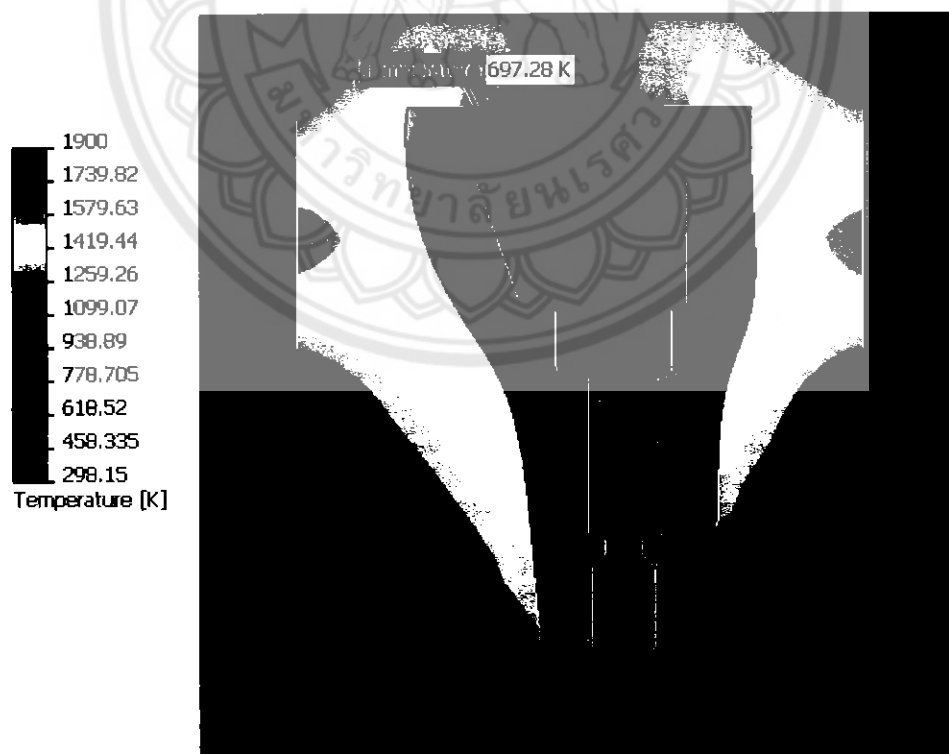
รูปที่ 4.15 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 90 ซม.



รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 90 ซม.



รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 100 ซม.

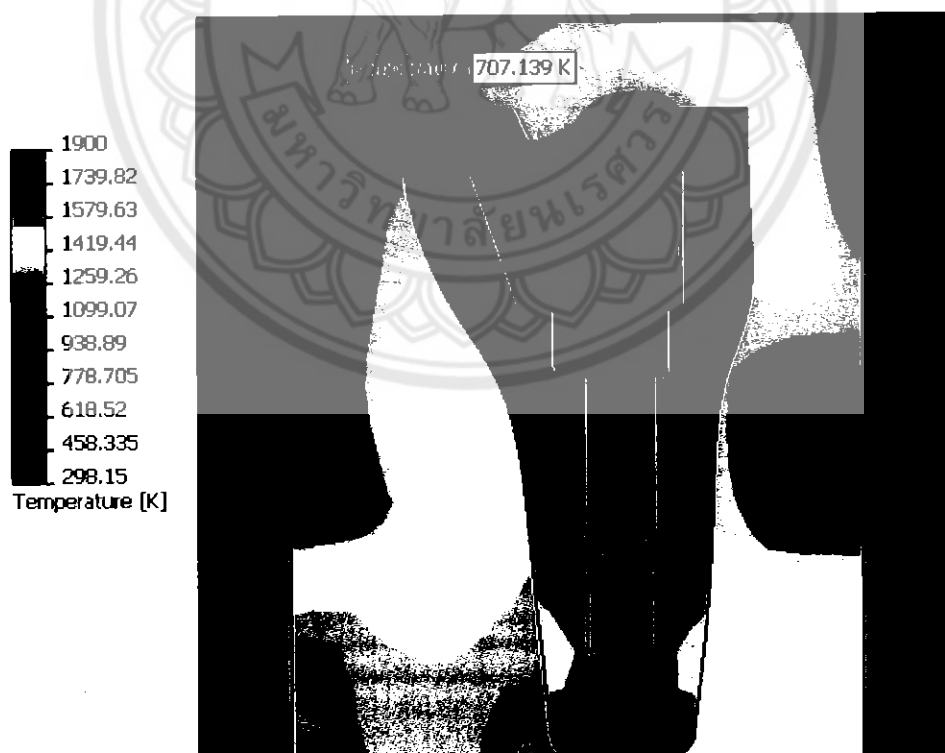


รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 100 ซม.

4.4 วิเคราะห์ผลการดำเนินการ

4.4.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

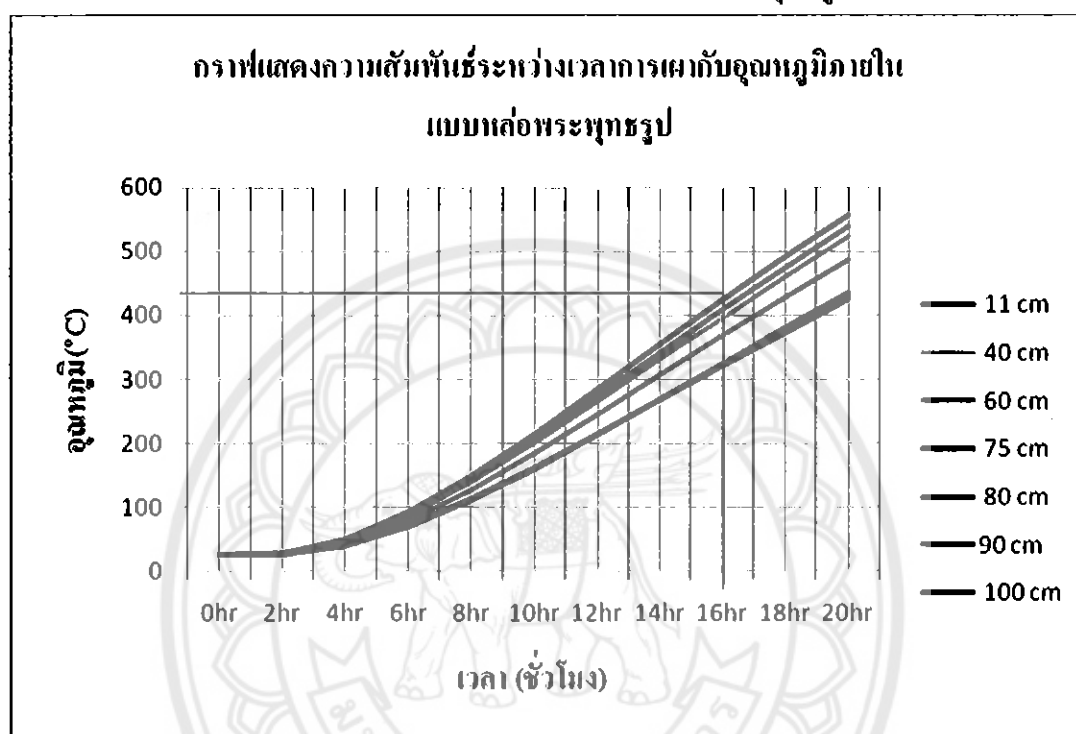
จากข้อมูลอุณหภูมิ และสมบัติของวัสดุที่จัดเก็บเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา และทำการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นจะพบว่าอุณหภูมิของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเวลาในการเผาที่ 20 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิแกนกลางชั้นในของแบบหล่อพระพุทธรูปประมาณ 434°C ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิในขณะเผาจริงที่เวลาเดียวกัน เนื่องมาจาก การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้ทำการกำหนดให้ไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่พื้นดินและไม่มีการแผ่รังสีจึงได้ค่าอุณหภูมิสูงกว่าความเป็นจริง แต่ยังคงอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ซึ่งอยู่ที่ 3.5% เพราะมีความต่างของอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้นจึงถือว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือเพียงพอจึงได้นำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ไปทำการจำลองลักษณะการเผาโดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดินที่ตำแหน่ง 40, 60, 75, 80, 90 และ 100 ซม.



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิแกนกลางชั้นในของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผา ผ่านไป 20 ชั่วโมง

4.4.2 วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา

วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีผลการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปและเตาเผา



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิภายในแบบหล่อที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป

จากรูปที่ 4.20 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิภายในเตาเผาที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป โดยวางตำแหน่งหัวเผาแตกต่างกันพบว่าอุณหภูมิใน 4 ชั่วโมงแรก อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในลักษณะเส้นตรง หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะเส้นตรงเช่นกัน

จากการวิเคราะห์ผลทั้งหมด การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปมีความแตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผา ซึ่งส่งผลมาจากการไหลของอากาศร้อนภายในเตาเผาที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งหัวเผาที่เปลี่ยนแปลง และจะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 75 ซม. เวลาที่ใช้ในการเผาจนแบบหล่อมีอุณหภูมิถึง 420 °C น้อยที่สุด โดยใช้เวลาในการเผาประมาณ 16 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการเผาลงได้ 4 ชั่วโมงจากแบบเดิม

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์

5.1 สรุปผลการทดสอบ

การวิเคราะห์แบบจำลองการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีวิธีการดำเนินงานประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ และการหาอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป เมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งจะมีรายละเอียดสรุปผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

5.1.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิจริงในขณะเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าคัก 19 นิ้ว จาก ปริณูณิพนธ์ หัวข้อเรื่อง การปรับปรุงกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของ นายนิพล ผาคำ และนายวิสรุต ศิริसान เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่เกิดขึ้น จะพบว่า อุณหภูมิของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อจำลอง ณ เวลาการเผาชั่วโมงที่ 20 จะมีอุณหภูมิแกนกลางชั้นในของแบบหล่อพระพุทธรูปประมาณ 434°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิในขณะเผาจริงที่เวลาการเผาชั่วโมงที่ 20 ดังตารางที่ 4.1 อยู่ที่ 3.5 % เนื่องจากในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เรากำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นดิน และไม่มีการแผ่รังสี จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้

5.1.2 การหาอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป เมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผา

เมื่อนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหัวเผามีผลต่อการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป จะพบว่าผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาทำให้การไหลของอากาศร้อนภายในเตาเผามีการเปลี่ยนแปลงไป และการพาความร้อนจากอากาศร้อนภายในเตาสู่แบบหล่อพระพุทธรูป ณ บริเวณเดียวกันจะมีค่าแตกต่างกันเมื่อทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผา ส่งผลให้การส่งผ่านความร้อนในแบบหล่อพระพุทธรูปที่เกิดขึ้น มีค่าไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.3, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 และ 4.18 ซึ่งจากข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งของหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 ซม ใช้เวลาในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปจนแบบหล่อมีอุณหภูมิถึง 420°C น้อยที่สุด โดยใช้เวลาในการเผาประมาณ 16 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการเผาลงได้ 4 ชั่วโมงจากแบบเดิม



เอกสารอ้างอิง

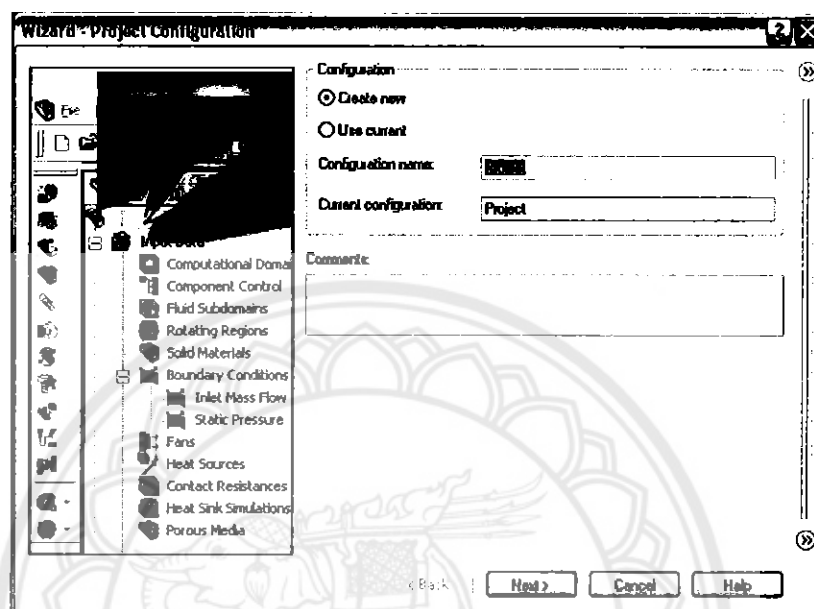
1. นิพล ผาคำ และวิสูตร ศิริसान. การปรับปรุงกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2551.
2. พิศิษฐ์ นาคประเสริฐ และเดช คำรงค์ดี. การจำลองการไหลของอากาศร้อนในเตาเผาอิฐโดยการเปลี่ยนตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. รองศาสตราจารย์ ดร. เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริม กรุงเทพฯ, 2548.
4. รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษม. การถ่ายเทความร้อนแบบเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์, 2548.
5. Frank P. Incropera & David P. Dewitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th. John Wiley & Sons.
6. R. T. WAIBEL. Advanced Burner Technology for Stringent NOx Regulations. John Zink Company Tulsa, Oklahoma : Orlando, 1990.
7. <http://www.solidworksthailand.com/webboard/index.php?topic=61.0>



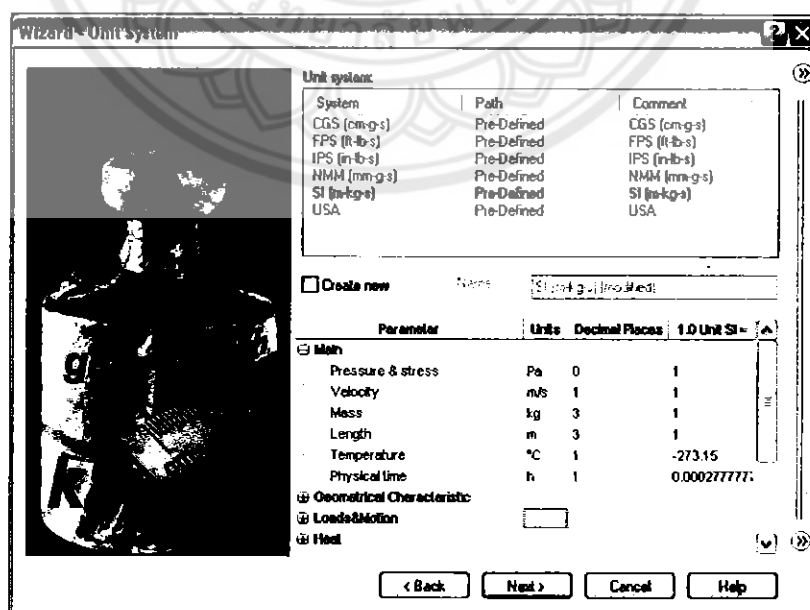


1) ทำการเปิดแบบจำลองของแบบหล่อพระพุทธรูปที่สร้างจากโปรแกรม Flow Simulation แสดงขึ้นบนโปรแกรม Flow Simulation

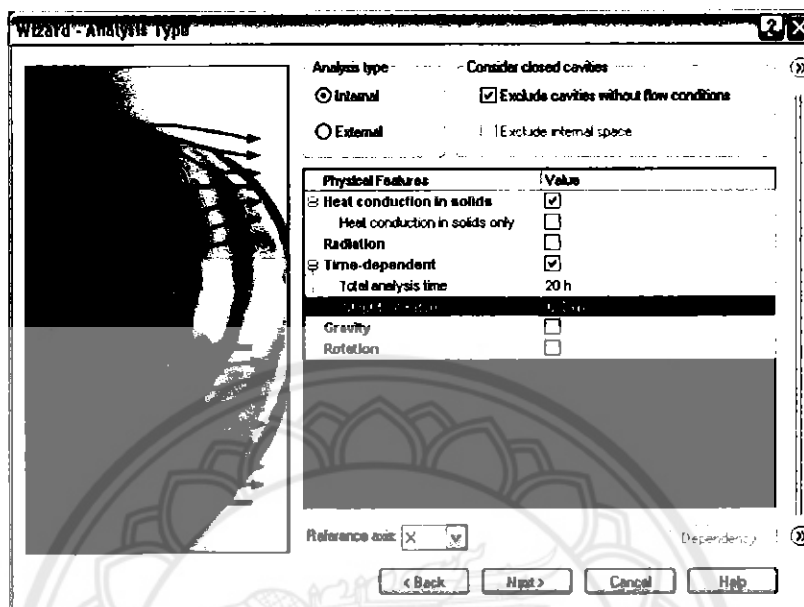
2) คลิกไอคอน  Wizard และตั้งชื่อ Configuration name ว่า Project กด ปะ



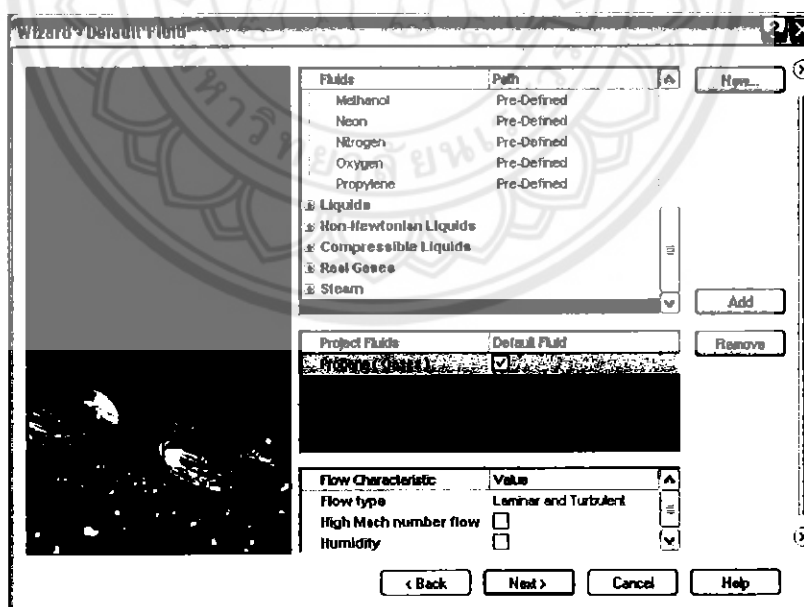
3) เลือก unit system เป็น SI และเปลี่ยน unit ของอุณหภูมิเป็น $^{\circ}\text{C}$ และ Physical time เป็น h และกด next



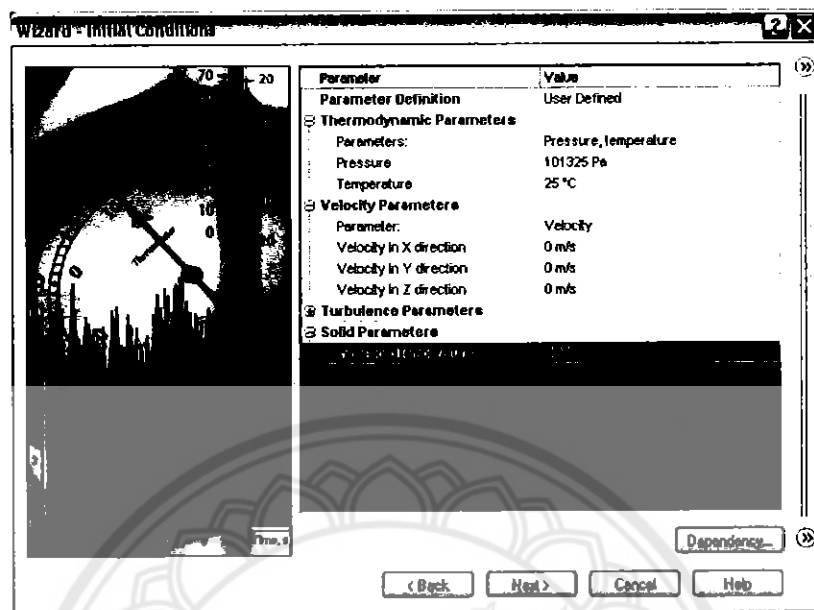
- 4) กดคลิกที่ Heat conduction in solids และ Time dependent เปลี่ยน Total analysis time เป็น 20 h และ Output time step เป็น 0.25 กด next



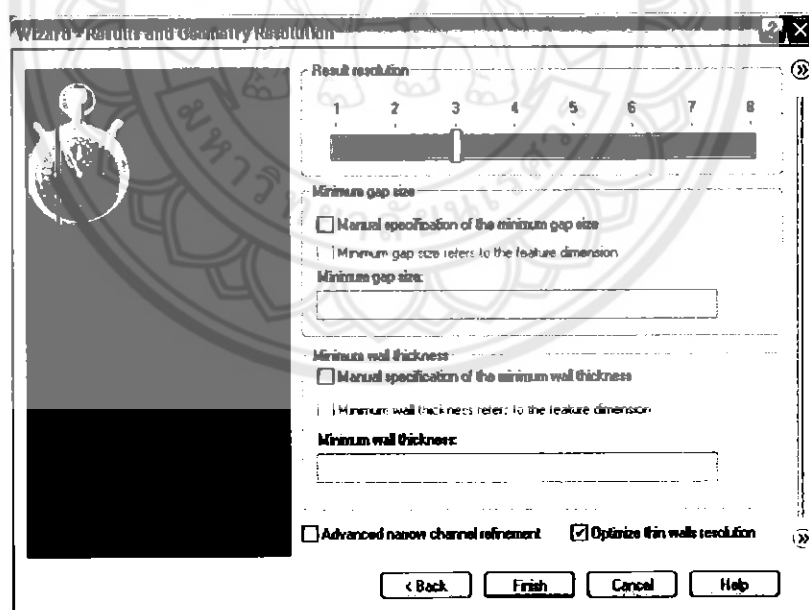
- 5) เลือก Gases และเลือก Propane กด next



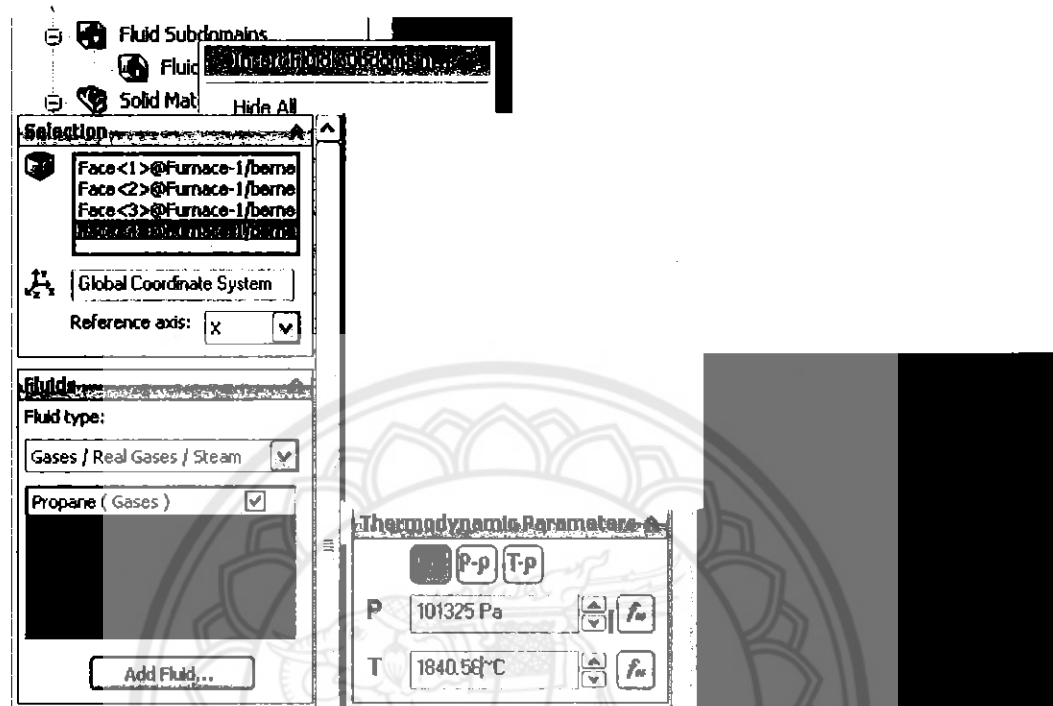
6) เปลี่ยน Temperature และ initial solid temperature เป็น 25°C กด next



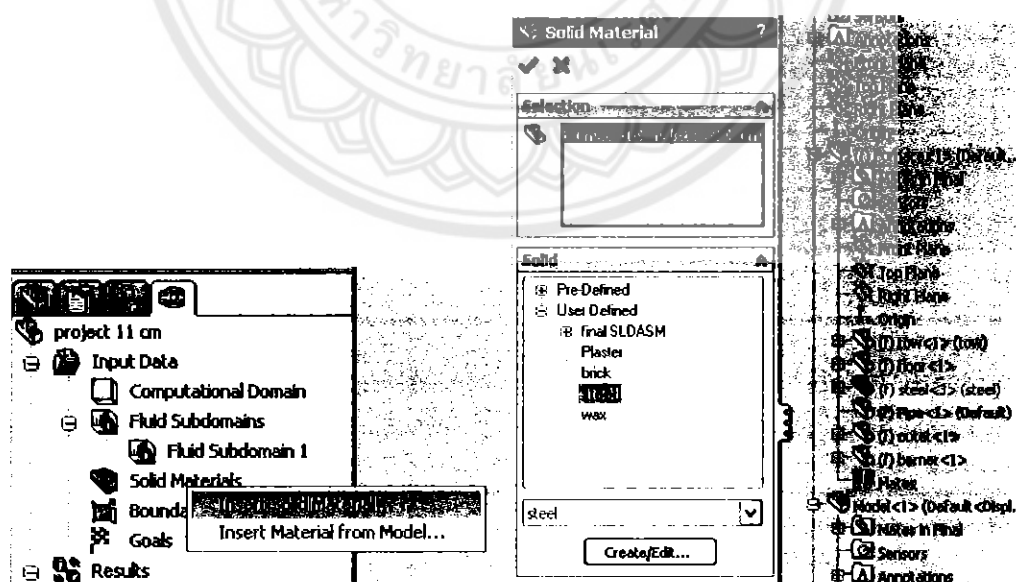
7) กด finish



- 8) คลิกขวา  Fluid Subdomains กดเลือกพื้นผิวบริเวณทางเข้าของหัวเผา และใส่ค่าอุณหภูมิเข้าเป็น 1840.56°C



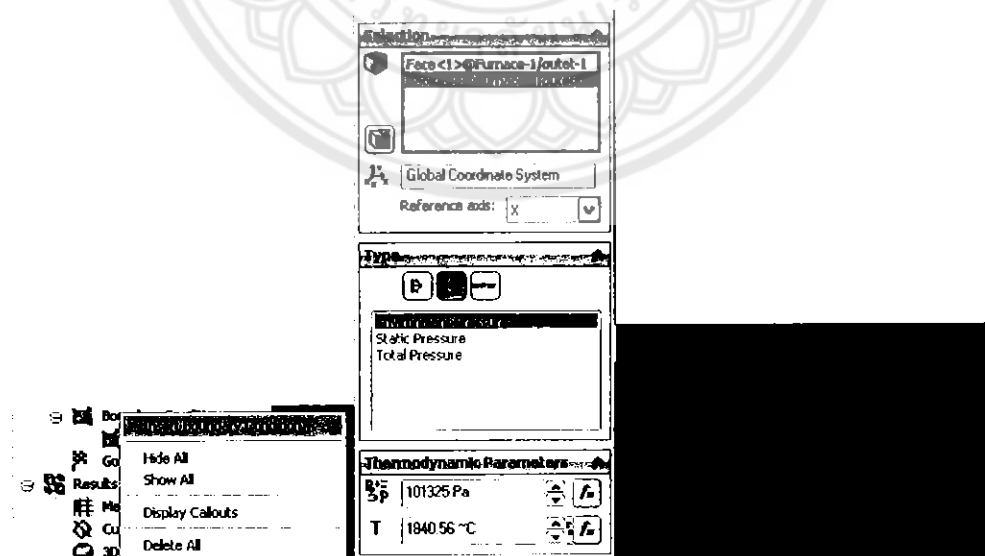
- 9) คลิกขวา  Solid Materials กดเลือกชนิดของวัสดุของเตาเผาและแบบหล่อพระพุทธรูป



- 10) คลิกขวา  **Boundary Conditions** กดเลือกพื้นผิวบริเวณทางเข้าของหัวเผา และเลือกความเร็วเข้าเท่ากับ 1.329 เมตร/วินาที



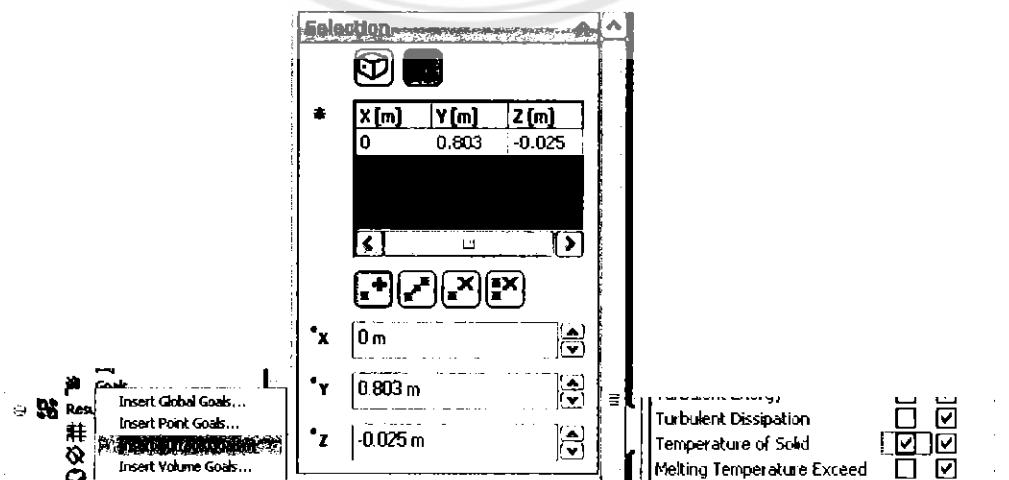
- 11) คลิกขวา  **Boundary Conditions** และเลือกพื้นผิวตามภาพเพื่อกำหนดทางออกของเตาเผา โดยกำหนดให้เป็นความดันบรรยากาศ และเลือกอุณหภูมิเท่ากับ 1840.56 °C



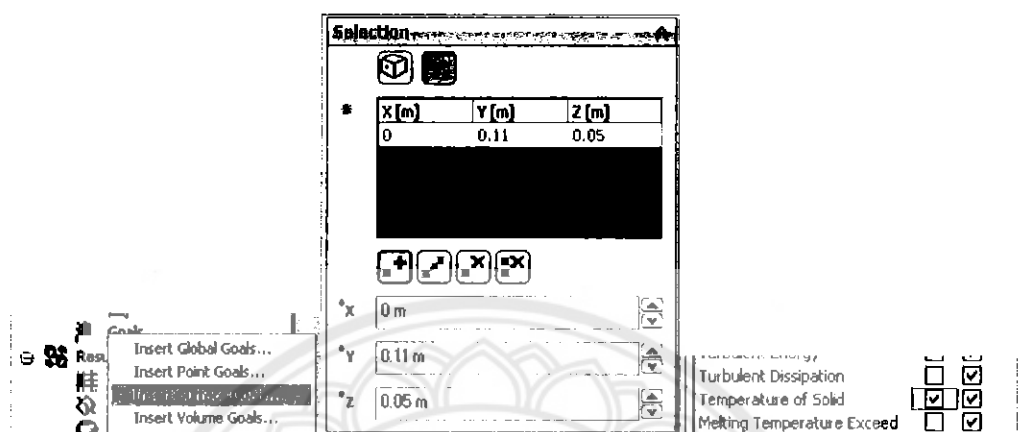
- 12) คลิกขวา  **Boundary Conditions** เลือกพื้นผิวด้านนอกของเตาทั้งหมดและกำหนดให้เป็น Outer wall กำหนดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และให้อุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 35°C



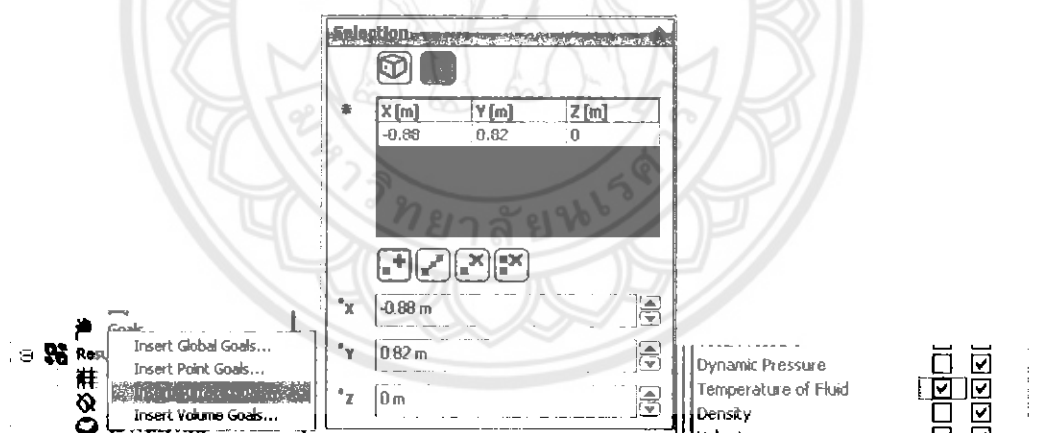
- 13) คลิกขวา  **Goals** เพื่อกำหนดเป้าหมายของการคำนวณ โดยกำหนดให้เป้าหมายการคำนวณเป็นแบบจุด โดยให้เก็บค่าอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป ณ จุดที่อยู่สูงจากพื้น 80.3 ซม.



- 14) คลิกขวาที่  Goals เพื่อกำหนดเป้าหมายของการคำนวณโดยกำหนดให้เป้าหมายการคำนวณเป็นแบบจุด โดยให้เก็บค่าอุณหภูมิ ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวผา ณ จุดที่อยู่สูงจากพื้น 11 ซม.



- 15) คลิกขวาที่  Goals เพื่อกำหนดเป้าหมายของการคำนวณโดยกำหนดให้เป้าหมายการคำนวณเป็นแบบจุด โดยให้เก็บค่าอุณหภูมิภายในเตา ณ จุดที่อยู่สูงจากพื้น 82 ซม.



16) คลิก run เพื่อทำการคำนวณลักษณะการส่งผ่านความร้อน

