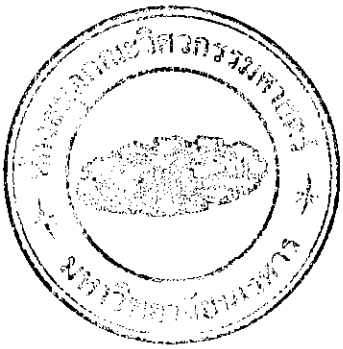


การปรับปรุงกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The improvement in burning process of casting Buddha Image
by using finite element method

นายนิพล ผาคำ

นายวิศรุต ศิริสาน

ที่ทำการบรรณสารวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 10 ก.ย. 2552
เลขทะเบียน 5200095
เลขเรียกหนังสือ
มหาวิทยาลัยนเรศวร

j5074471 e.2
ปร.
น647ก.
2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2551

ใบรับรองโครงงานวิจัย

หัวข้อโครงงาน : การปรับปรุงกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
(The improvement in burning process of casting Buddha Image by using finite element method)

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายนิพล ผาคำ รหัสนิสิต 48380220
: นายวิศรุต ศิริสาน รหัสนิสิต 48380330

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรมเครื่องกล

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์สิทธิโชค ผูกพันธุ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์นินนาท ราชประดิษฐ์)

หัวข้อโครงงาน : การปรับปรุงกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายนิพล ผาคำ รหัสนิสิต 48380220

: นายวิศรุต ศิริสาน รหัสนิสิต 48380330

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2551

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นโครงงานเกี่ยวกับการปรับปรุงการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปมีจุดประสงค์เพื่อลดเวลา และปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปให้ลดน้อยลง โดยการพิจารณาการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาเปรียบเทียบกับการเผาแบบดังเดิมที่วางตำแหน่งหัวเผาไว้บริเวณด้านล่างของเตา โดยที่ได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิในเตาเผาและแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนตำแหน่งของหัวเผาให้สูงขึ้นจากเดิม พบว่าการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปจะมีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหัวเผา ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่แบบหล่อพระพุทธรูปได้รับส่วนใหญ่ จะมาจากการพาความร้อนของอากาศร้อนภายในเตาเป็นหลัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหัวเผาจะไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป

Project Title : The improvement in burning process of casting Buddha Image by using finite element method

Name : Mr. Nipol Pakum Code 48380220

: Mr. Wisarut Sirisan Code 48380330

Project Advisor : Mr. Nopparat Seehawong

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2008

Abstract

This project studied about the improvement in burning process of casting Buddha Image by using finite element method. The purpose was to decrease burning time and LPG consumption in the burning process of casting Buddha Image. Heat distribution that occured in of casting Buddha Image was consider by using finite element method. Burners at difference position was compared with the original position. Which located at bottom of furnace. Temperature was measured inside the furnace and in the casting Buddha Image sizing 19 inch, the collected data were analized by using finite element method. Then the burner position was changed to higher location. The finite element method was used to analyse the heat distribution. This method found that heat distribution that occurred in casting Buddha Image had insignificant effect when the burner position was change. The analyse data show that heat distribution casting Buddha Image majority caused from convection heat of hot air within a furnace. Inconclusion changing the position of burner unaffected on heat distribution that occurred in casting Buddha Image.

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงงาน	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 กิจกรรมการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 อุปกรณ์	3
1.7 งบประมาณ	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ขั้นตอนการหล่อองค์พระพุทธรูป	5
2.2 ตารางคุณสมบัติ	8
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	8
2.4 ทฤษฎีการนำความร้อน	14
2.5 ทฤษฎีการพาความร้อน	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอน และวิธีการดำเนินงาน

3.1 การจัดเก็บข้อมูล ส่วนประกอบ ขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป และอุณหภูมิส่วนต่างๆ ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป 18

3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป และการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 23

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน และวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในแบบหล่อพระพุทธรูป 29

4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 30

4.3 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน 38

บทที่ 5 สรุป

5.1 สรุปผลการทดสอบ 43

5.2 ข้อเสนอแนะ 44

เอกสารอ้างอิง 45

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 47

ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ 114

ภาคผนวก ค อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป 131

ภาคผนวก ง รายละเอียดของเตาเผา 138

ประวัติผู้ทำโครงงาน 141

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุ	8
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน	16
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ	19
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเครื่อง Data Logger รุ่น Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit	22
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิบริเวณผิวแบบหล่อพระพุทธรูป	29
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิภายในเตา	30
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป	30
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม	31
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 40 cm	32
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 60 cm	33
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 cm	34
ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 80 cm	35
ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 90 cm	36
ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 100 cm	37

สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 ตำแหน่งการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ	2
รูปที่ 2.1 ปั้นองค์พระพุทธรูป	5
รูปที่ 2.2 พอกขี้ผึ้ง และติดชนวน	6
รูปที่ 2.3 เริ่มพอกปูนปลาสเตอร์	6
รูปที่ 2.4 เข้าลวด	6
รูปที่ 2.5 พอกปูนปลาสเตอร์ครั้งสุดท้าย	7
รูปที่ 2.6 ปั้นปากจอก	7
รูปที่ 2.7 เตาเผา	7
รูปที่ 2.8 เททอง	7
รูปที่ 2.9 วัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่องใน 2 มิติที่อยู่ภายใต้การกระทำของแรงกระทำที่จุด (F) และแรงกระจาย (W)	8
รูปที่ 2.10 บริเวณขอบเขตการถ่ายเทความร้อนของปัญหาหาสองมิติ	9
รูปที่ 2.11 (ก) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม	10
รูปที่ 2.11 (ข) การสูญเสียความร้อนโดยการพาด้าน i-j	10
รูปที่ 2.12 เอลิเมนต์ชนิด Line element	12
รูปที่ 2.13 เอลิเมนต์ชนิด Plane element	13
รูปที่ 2.14 เอลิเมนต์ชนิด Solid element (3D)	13
รูปที่ 2.15 การนำความร้อนผ่านผนังเรียบใน 1 มิติ	14
รูปที่ 2.16 การพาความร้อนตามธรรมชาติ	15
รูปที่ 2.17 การพาความร้อนโดยบังคับ	16
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	17
รูปที่ 3.2 องค์พระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว ที่พอกด้วยขี้ผึ้งเรียบร้อยแล้ว	18
รูปที่ 3.3 แบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว	19
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ	20
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิผิวแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา	21
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิภายในเตา	21
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป	21

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.8 ชุดสาย Thermo Couple Type K วัดอุณหภูมิความร้อนสูง	22
รูปที่ 3.9 เครื่อง Data Logger ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ	22
รูปที่ 3.10 คอมพิวเตอร์	23
รูปที่ 3.11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป	23
รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์ด้วย COSMOSWorks	24
รูปที่ 3.13 ชนิดของการวิเคราะห์	25
รูปที่ 3.14 รูปแบบของการวิเคราะห์	25
รูปที่ 3.15 กำหนดคุณสมบัติของชิ้นงาน	26
รูปที่ 3.16 กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของแบบหล่อพระพุทธรูป	26
รูปที่ 3.17 กำหนดอุณหภูมิผิวแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณหัวเผา	27
รูปที่ 3.18 กำหนดอุณหภูมิของอากาศภายในเตา	27
รูปที่ 3.19 ทำการแบ่งเอลิเมนต์	28
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งหัวเผาความสูงแบบเดิม	31
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม	31
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 40 cm	32
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 40 cm	32
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 60 cm	33
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 60 cm	33
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 75 cm	34
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 cm	34
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 80 cm	35
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 80 cm	35
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 90 cm	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 90 cm	36
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 100 cm	37
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 100 cm	37
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิบริเวณแกนกลางชั้นในของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 ชั่วโมง	38
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปโดยวางตำแหน่งหัวเผาแตกต่างกัน	39
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปโดยวางตำแหน่งหัวเผาแตกต่างกัน	39
รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr	40
รูปที่ 4.19.1 การกระจายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นใน โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr	41
รูปที่ 4.19.2 การกระจายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นขี้ผึ้ง โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr	41
รูปที่ 4.19.3 การกระจายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นนอก โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr	42

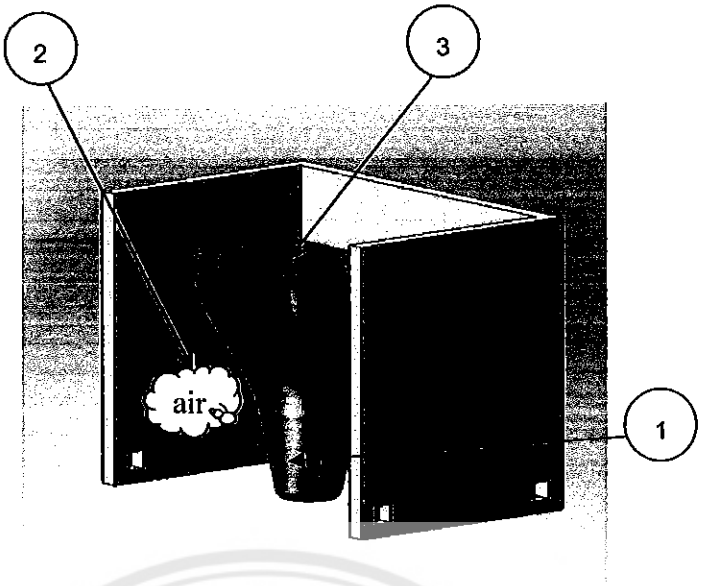
ลำดับสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่	m^2
[B]	เมตริกซ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า	
C_P	ค่าความร้อนจำเพาะ	(J/kg-K)
[D]	เมตริกซ์คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ	
f	แรงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน	
$\overline{F}$	แรงภายในรวมในพิกัดรวมระบบ	N
$\{f_Q\}$	เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากแหล่งกำเนิดความร้อน	
$\{f_q\}$	เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากการไหลของปริมาณความร้อน	
$\{f_h\}$	เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากการพาความร้อน	
{g}	เมตริกซ์ความต่างศักย์	
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2.{}^oC$
i, j, m	ตำแหน่งจุดต่อเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	
k	เมตริกซ์การถ่ายเทความร้อน	
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	(W/m-K)
$\left[\overline{K}\right]$	เมตริกซ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบ	$W/{}^oC$
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	^oC
T_∞	อุณหภูมิบรรยากาศ, อุณหภูมิของไหล	^oC, 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 ความสำคัญ และที่มาของโครงงาน

เนื่องจากปัจจุบันนี้โรงหล่อพระพุทธรัตน ต.อรัญญิก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ได้ประกอบธุรกิจเกี่ยวกับการหล่อพระพุทธรูป พระเครื่อง และรูปหล่อทองเหลืองทุกชนิด โดยในกระบวนการผลิตนั้นได้ใช้เตาเผาในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป และใช้ปูนปลาสเตอร์กับขี้ผึ้งในการทำแบบหล่อพระพุทธรูปเป็นหลัก ปัญหาหนึ่งที่พบในกระบวนการหล่อพระพุทธรูป คือ การเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดใหญ่ที่มีขนาดหน้าตัก 19 นิ้วขึ้นไปของทางโรงหล่อพระพุทธรัตนจะไม่สามารถที่จะนำเข้าเตาเผาปกติได้ จำเป็นจะต้องทำการสร้างเตาเผาขึ้นมาเพื่อเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดใหญ่นี้โดยเฉพาะ ซึ่งจะทำการสร้างด้วยอิฐบล็อกก่อ 2 ชั้น และทำการเจาะรูที่บริเวณด้านใต้ของตัวผนังเพื่อใช้ในการสอดหัวเผาให้ความร้อนกับตัวแบบหล่อพระพุทธรูป เนื่องจากส่วนฐานของพระพุทธรูปซึ่งเป็นส่วนที่หนาที่สุดจะอยู่ด้านบนของเตาเผา ดังนั้นการป้อนความร้อนในลักษณะนี้จะทำให้การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปจนกระทั่งแบบสุกทั่วทั้งแบบจะใช้เวลานานและสิ้นเปลืองปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป เพื่อเป็นการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต ทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดในการลดเวลาและปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป โดยการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป เมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของหัวเผาในลักษณะต่างๆ เพื่อเลือกตำแหน่งการวางตำแหน่งหัวเผาที่ทำให้เวลาที่ใช้ในการเผาและปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ลดน้อยลง ซึ่งจะทำให้กำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้นและเป็นการลดต้นทุนการผลิต



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (1) อุณหภูมิผิวแบบบริเวณแหล่งความร้อน (2) อุณหภูมิภายในเตา (3) อุณหภูมิในตัวแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปพร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางหัวเผาที่มีต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป ซึ่งจะทำให้ได้ตำแหน่งการวางหัวเผาที่ทำให้เกิดการกระจายความร้อนในแบบหล่อพระพุทธรูปที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขต

การศึกษาการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการนำความร้อนในแบบหล่อพระพุทธรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้วัสดุทั้งหมดเป็น Isotropic Material ซึ่งจะมุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของตำแหน่งการวางหัวเผาที่มีต่อลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปเพื่อกำหนดตำแหน่งของหัวเผาที่จะทำให้กระบวนการเผาสั้นลงและส่งผลให้ปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ลดลง

1.4 กิจกรรมการดำเนินงาน

กิจกรรม	2551							2552		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาข้อมูลการหล่อพระพุทธรูป วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้										
2. ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุ และจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป										
3. จัดทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การเผาในลักษณะต่างๆ										
4. เลือกรูปแบบการเผา										
5. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน										
6. จัดทำรายงาน										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปในระหว่างกระบวนการเผา

1.5.2 ได้รูปแบบการจัดวางตำแหน่งของหัวเผาที่สามารถลดเวลา และปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ในกระบวนการเผา

1.6 อุปกรณ์ที่ใช้

1.6.1 คอมพิวเตอร์

1.6.2 โปรแกรม CosmosWorks

1.6.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ Data Logger รุ่น Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit

1.6.4 สาย Thermo Couple Type K

1.7 งบประมาณ

1.7.1 เพิ่มหน่วยความจำ	1000 บาท
1.7.2 จัดทำรูปเล่ม	1000 บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาในส่วนของหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรายละเอียดตามหัวข้อดังนี้ คือ

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

2.1 ขั้นตอนการหล่อองค์พระพุทธรูป

ขั้นตอนการหล่อพระพุทธรูปโดยสรุปมีดังนี้

2.1.1 ปั้นองค์พระด้วยปูนปลาสเตอร์ผสมทรายให้ได้สัดส่วนตามแบบ

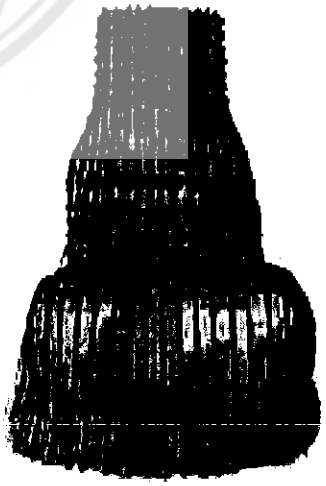
รูปที่ 2.1 ปั้นองค์พระพุทธรูป

2.1.2 นำขี้ผึ้งมาพอกให้รอบองค์พระ และแกะลวดลายตามแบบ แล้วทำการติดชนวน โดยที่ชนวนคือ ขี้ผึ้งที่นำมาปั้นเป็นสายเพื่อไว้สำหรับให้ขี้ผึ้งที่พอกรอบองค์พระไหลออกมาตามสายชนวนนี้ ในขณะเผา เป็นรูสำหรับให้อากาศออกในขณะเผาและในขณะเททองอากาศที่ตกค้างจะออกมาทางรูนี้ และไว้เป็นรูสำหรับเททอง

รูปที่ 2.2 พอกขี้ผึ้ง และติดชนวน

2.1.3 นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายมาพอกให้รอบองค์พระ จากนั้นนำลวดมาพันรอบองค์พระเพื่อป้องกันการแตกตัวของปูนปลาสเตอร์ในขณะเผา

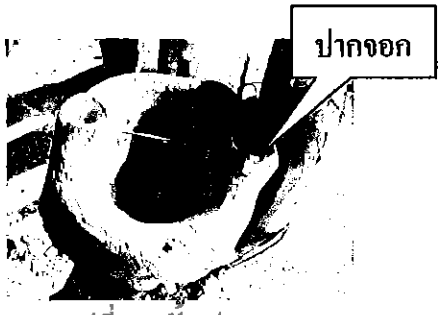
รูปที่ 2.3 เริ่มพอกปูนปลาสเตอร์



รูปที่ 2.4 เข้าลวด

2.1.4 นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายมาพอกให้รอบองค์พระอีกครั้ง จากนั้นจึงปั้นปากจอกปิดบริเวณปากทางที่จะเททอง โดยที่ปากจอก คือ สายชนวนที่นำมารวมกันดังรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.5 พอกปูนปลาสเตอร์ครั้งสุดท้าย



รูปที่ 2.6 ปั้นปากจอก

2.1.5 นำแบบมาเผาในเตาที่สร้างขึ้นเป็นด้วยอิฐจนขี้ผึ้งละลายออกหมด

รูปที่ 2.7 เตาเผา

2.1.6 จากนั้นเททองที่ได้หลอมไว้แล้วลงไปในแบบที่เผาเสร็จเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 2.8 เททอง

2.1.7 ปล่อยให้ทองในแบบเย็นตัวจึงจัดการทุบปูนปลาสเตอร์ออก รื้อแก้ลวดที่รัดแบบออกให้หมด แล้วจึงตกแต่งองค์พระให้สวยงาม

2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุ	อุณหภูมิ (K)	ρ (kg/m^3)	k $(W/m\cdot K)$	C_p $(J/kg\cdot K)$	Melting point (° C)	Boiling point (° C)
Paraffin Wax	300	900	0.240	2890	48-66	370
ปูนปลาสเตอร์	293	1440	0.482	837	-	-

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

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มาจากแนวคิดที่ว่า วัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใดๆ จะสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆได้ โดยแต่ละชิ้นเล็กๆเหล่านั้นสามารถประกอบเป็นวัตถุรูปเดิมได้ และแต่ละชิ้นสามารถพิจารณาแยกกันอย่างอิสระ

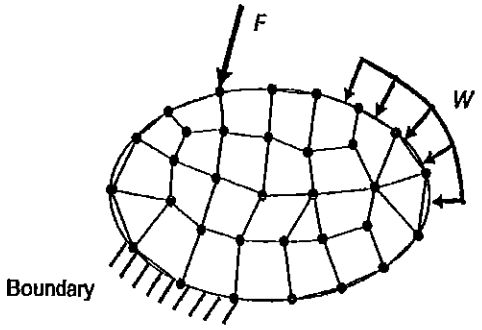
Finite = จำนวนจำกัด

Element = ชิ้นเล็กๆ

Method = วิธีการ

Analysis = การวิเคราะห์

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



รูปที่ 2.9 วัตถุที่มีเนื้อต่อเนื่องใน 2 มิติที่อยู่ภายใต้การกระทำของแรงกระทำที่จุด (F) และแรงกระจาย (W)

จากรูปจะเห็นว่าวัตถุถูกแบ่งเป็นหลายๆเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ต่อเชื่อมกันที่โหนด (Node) โดยจะมีสมการภายในของตัวเอง (Local Element) และจะรวมเป็นฟังก์ชันของค่าที่โหนด เมื่อนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์รวมเข้าด้วยกันก็จะได้สมการรวม (Global Equation) โดเมนจะอยู่ภายใต้สภาพการสมดุลของการกระทำจากภายนอก และมีเงื่อนไขที่ขอบที่สามารถแทนค่าหรือตัดตัวแปรที่เท่ากับศูนย์ที่โหนดได้ ทำการแก้สมการหาค่าที่โหนดโดยแยกหาค่า ณ จุดใดๆ ในแต่ละเอลิเมนต์ได้

2.3.1 สรุปขั้นตอนของ FEM ในการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลอง

ก. แบ่งโครงสร้างแบบจำลองออกเป็นชิ้นเล็กๆที่ประกอบโดยเอลิเมนต์และโหนด

ข. เขียนสมการความสัมพันธ์ถึงปริมาณความสัมพันธ์ทางฟิกสิกส์ของแต่ละเอลิเมนต์

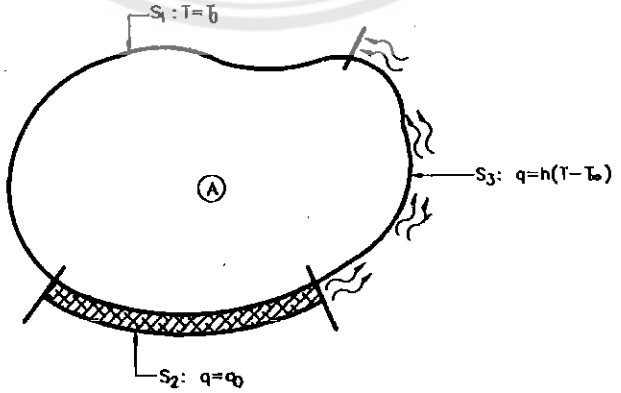
ค. ประกอบ (Assembly) ทุกๆเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน โดยใช้หมายเลขโหนด (ถ้าแต่ละโหนดมีหลายตัวแปร จะใช้หมายเลขตัวแปรร่วมพิจารณาด้วย) เป็นตัวกำหนดของการวางตำแหน่ง Global stiffness matrix

ง. จัดสมการ โดยหักล้างเงื่อนไขที่ขอบออก

จ. แก้สมการเพื่อหาค่าที่ไม่ทราบค่าที่โหนดต่างๆ จะได้ค่าที่ต้องการ เช่น การขจัด (Displacement)

ฉ. คำนวณหาค่าอื่นๆที่ต้องการเช่น การกระจายความร้อน การพาหรือการนำความร้อน เป็นต้น

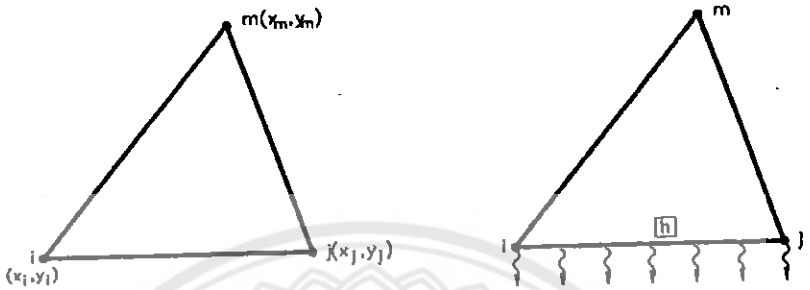
2.3.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน



รูปที่ 2.10 บริเวณขอบเขตการถ่ายเทความร้อนของปัญหาหาสองมิติ

2.3.2.1 แบ่งเอลิเมนต์ และเลือกชนิดของเอลิเมนต์

เช่น ในกรณีปัญหาสองมิติเมื่อแบ่งระบบการถ่ายเทความร้อนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อคือ i, j และ m ตามรูปที่ 2.11



(ก) (ข)

รูปที่ 2.11 (ก) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (ข) การสูญเสียความร้อนโดยการพาด้าน i-j

2.3.2.2 เลือกฟังก์ชันอุณหภูมิ

เลือกฟังก์ชันอุณหภูมิ T ของเอลิเมนต์ในเทอมของฟังก์ชันรูปร่าง N และ t เป็นอุณหภูมิแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์

$$\{T\}=[N]\{t\} \tag{2.1}$$

ซึ่ง $$\{t\}=[t_1\ t_2\ t_3 \ldots\ldots t_i]^T \tag{2.2}$$

โดยที่ i=จำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์

2.3.2.3 กำหนดความต่างศักย์ของอุณหภูมิ ปริมาณความร้อนและความสัมพันธ์ของความต่างศักย์

เมตริกซ์ของความต่างศักย์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ

$$\{g\}=\begin{Bmatrix}\frac{\partial T}{\partial x}\\ \frac{\partial T}{\partial y}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_i}{\partial x}\\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_i}{\partial y}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}t_1\\ t_2\\ t_3\\ .\\ .\\ .\\ t_i\end{Bmatrix}=[B]\{t\} \tag{2.3}$$

โดยที่ [B] คือ เมตริกซ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์

ปริมาณความร้อน q ในทิศทาง x และ y คือ

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

โดยที่เมตริกซ์ [D] คือคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ

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

2.3.2.4 หาเมตริกซ์การนำความร้อน และฉมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการจากการหาค่าพลังงานศักย์ต่ำสุดเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน คือ

$$\left[\int_v [B]^T [D][B]dv + \int_{s_3} h[N]^T [N]ds\right]\{t\} = \{f_Q\} + \{f_q\} + \{f_h\} \tag{2.6}$$

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

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

$\{f_h\} = \int_{s_3} [N]^T h T_\infty ds$ คือ เมตริกซ์ของแรงเนื่องจากการพาความร้อน (2.9)

S_2 และ S_3 คือ พื้นที่ผิวบริเวณที่มีปริมาณความร้อน และพื้นที่ผิวตรงบริเวณที่สูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน ตามลำดับ

เขียนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปของสมดุลของแรงของแต่ละเอลิเมนต์

$$\{f\}=[k]\{t\} \tag{2.10}$$

จากการเปรียบเทียบสมการ (2.6) และ (2.10) พบว่า

$$[k] = \int_v [B]^T [D][B]dv + \int_{s_3} h[N]^T [N]ds \tag{2.11}$$

โดยที่เมตริกซ์ [k] เป็นเมตริกซ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งเทอมแรกทางขวามือของสมการ (2.11) เป็นเมตริกซ์การนำความร้อน ส่วนเทอมที่สองจะเป็นเมตริกซ์การพาความร้อน

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

2.3.2.5 หาเมตริกซ์รวมของระบบ

หาเมตริกซ์การถ่ายเทความร้อนและเมตริกซ์แรงรวมของระบบ โดยใช้วิธีสติฟเนส ได้เมตริกซ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบดังนี้

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

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

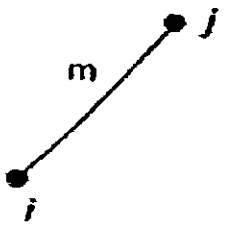
$$[\overline{F}] = \sum_{e=1}^{N} [f] \quad (2.14)$$

ค่าของ $\{\overline{F}\}$ จะมีหน่วยเป็น W หรือ Btu/hr และสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบรวมเขียนได้เป็น

$$\{\overline{F}\} = [\overline{K}]\{t\} \quad (2.15)$$

2.3.3 ชนิดของเอลิเมนต์ใน (FEM)

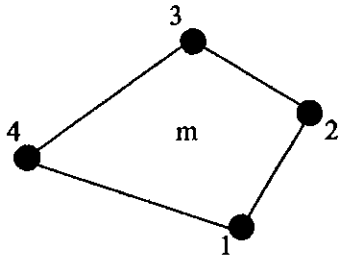
2.3.3.1 Line element



รูปที่ 2.12 เอลิเมนต์ชนิด Line element

โจทย์ปัญหา ได้แก่ ระบบสปริง, โครงสร้าง (Trusses), คาน (Beam), ท่อ (Pipe), อื่นๆ

2.3.3.2 Plane element



รูปที่ 2.13 เอลิเมนต์ชนิด Plane element

โจทย์ปัญหา ได้แก่ Membrane, Plate, Shell, Plane stress, Plane strain

2.3.3.3 Solid element (3D)

รูปที่ 2.14 เอลิเมนต์ชนิด Solid element (3D)

(ที่มา : Dary L.Logan (2001))

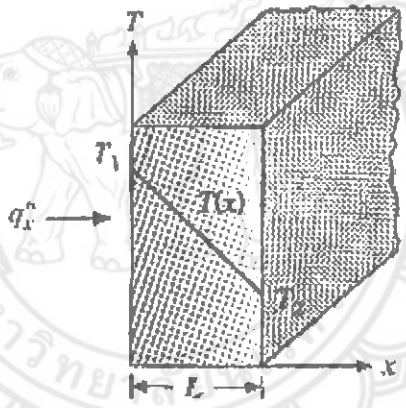
โจทย์ปัญหา 3-D field ได้แก่ อุณหภูมิ, การขจัด, ความเค้น, ความเร็วของการไหล เป็นต้น

สรุป ดังนั้นเนื่องจากแบบจำลองแบบหล่อพระพุทธรูปเป็นแบบ 3 มิติเราจึงเลือกใช้ Solid element (3D) ในการแบ่งโครงสร้างแบบจำลองแบบหล่อพระพุทธรูปออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆนั้น ต้องเลือกชนิดของเอลิเมนต์ที่จะนำไปวิเคราะห์ให้เหมาะสม การเลือกชนิดของเอลิเมนต์จะคำนึงถึงคุณสมบัติหรือโครงสร้างแบบจำลองแบบหล่อพระพุทธรูป และจำนวนแกน (X,Y,Z) ที่ใช้บอกตำแหน่งของเอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ 3 มิติที่ใช้ทั่วไปจะมีหลายชนิดเนื่องจากแบบจำลองแบบหล่อพระพุทธรูปมีส่วนโค้งส่วนเว้ามาก ดังนั้นเอลิเมนต์ 3 มิติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ คือ Ten Node Tetrahedral ซึ่งจะให้คำตอบที่ถูกต้องมากกว่าเอลิเมนต์ Four Node Tetrahedral

2.4 ทฤษฎีการนำความร้อน

การนำความร้อน คือ การส่งถ่ายพลังงานความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายพลังงานความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็งหรือของไหลที่หยุดนิ่งกับที่ เมื่อในตัวกลางนี้มีอุณหภูมิแตกต่างกัน อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางแบบนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law)

2.4.1 Fourier's Law สำหรับอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเรียบใน 1 มิติที่สภาวะคงตัวที่ไม่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายในวัสดุ



รูปที่ 2.15 การนำความร้อนผ่านผนังเรียบใน 1 มิติ

$$q''_x = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2.16}$$

- โดยที่ q''_x คืออัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามแนวแกน x ต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อนนี้
- dT/dx คือผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกน x
- k คือ ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง (Thermal conductivity) มีหน่วยเป็น (W/m-K)
- เครื่องหมาย(-) แสดงว่าการถ่ายเทความร้อนอยู่ในทิศทางการลดลงของอุณหภูมิ
- ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-state) และการกระจายอุณหภูมิเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.15

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

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

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

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

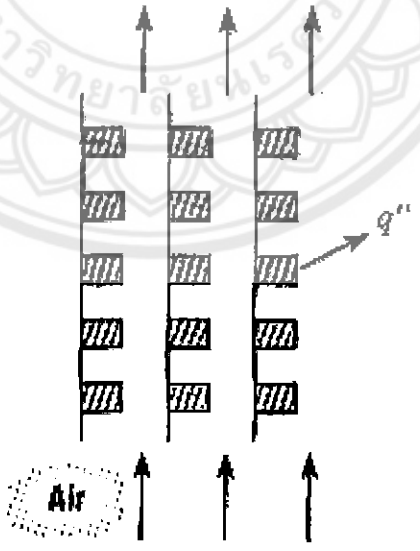
มีหน่วยเป็น W หรือ Btu/hr

2.5 ทฤษฎีการพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดขึ้นระหว่างของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ และพื้นที่ผิวสัมผัสกับของไหลโดยที่ทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกัน

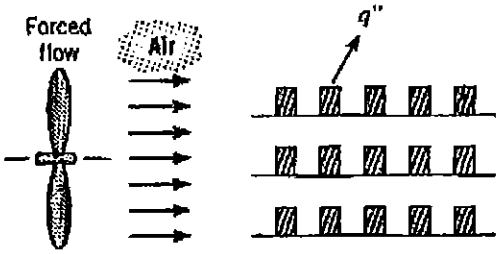
การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection) →การเคลื่อนไหวของของไหลเนื่องจากแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อันเกิดจากมีผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ



รูปที่ 2.16 การพาความร้อนตามธรรมชาติ

2. การพาความร้อนโดยบังคับ (forced convection) →การเคลื่อนไหวของของไหลเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก เช่น เครื่องสูบ เครื่องเป่าลม(blower) ฯลฯ



รูปที่ 2.17 การพาความร้อนโดยบังคับ

สมการคำนวณการถ่ายเทความร้อน โดยการพาจาก Newton' law of Cooling

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \tag{2.18}$$

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

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว

T_∞ คือ อุณหภูมิของไหล

h คือ Convection heat transfer coefficient (W/m^2-K) ขึ้นอยู่กับรูปทรงของพื้นผิว การเคลื่อนที่ของของไหล สมบัติของไหล ค่าโดยทั่วไปของ h แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน

ชนิดของการพาความร้อน	ค่าสัมประสิทธิ์ (W/m^2-K)
การพาตามธรรมชาติ	
➢ก๊าซ	2-25
➢ของเหลว	50-1,000
การพาแบบบังคับ	
➢ก๊าซ	25-250
➢ของเหลว	100-20,000
การพาขณะเปลี่ยนแปลงเฟส (เดือดตัวและควบแน่น)	2,500-100,000

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

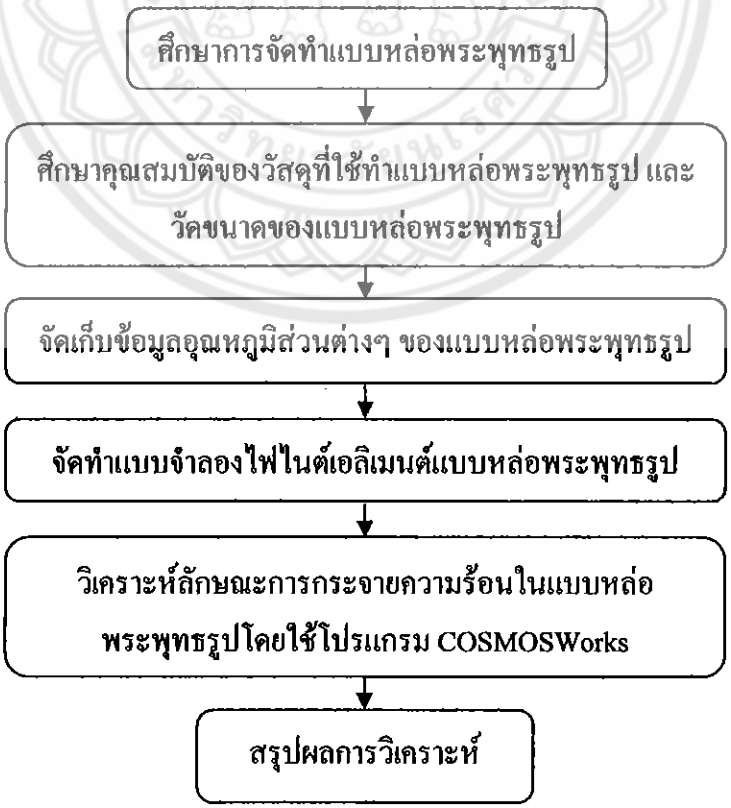
บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุตามจุดประสงค์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 1 ซึ่งจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ คือ

1. การจัดเก็บข้อมูลส่วนประกอบ ขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป และอุณหภูมิส่วนต่างๆ ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

2. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป และการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนการดำเนินงานดังที่กล่าวมาสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของภาพแผนผังได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การจัดเก็บข้อมูล ส่วนประกอบ ขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป และอุณหภูมิส่วนต่างๆ ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

3.1.1 การจัดเก็บข้อมูล ส่วนประกอบ และขนาดของแบบหล่อพระพุทธรูป

จากการศึกษาข้อมูลการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 inch จะได้ข้อมูลดังนี้ แบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 inch จะมีขนาดแบบหล่อพระพุทธรูปส่วนสูง 132.30 cm ฐานกว้าง 94.50 cm ประกอบด้วย 3 ชั้น 1.ชั้นในทำจากปูนปลาสเตอร์ผสมทรายปั้นเป็นแบบองค์พระตามขนาดหน้าตักที่ต้องการ 2.ชั้นกลางทำจากขี้ผึ้งซึ่งเป็นส่วนลวดลายขององค์พระ หลังจากที่ได้ปั้นองค์พระแบบคร่าวๆแล้ว ก็นำขี้ผึ้งมาพอกให้ทั่วรอบองค์พระให้ขี้ผึ้งมีความหนาประมาณ 5 mm จากนั้นก็ทำการแกะลวดลายให้สวยงาม 3.ชั้นนอกทำจากปูนปลาสเตอร์ผสมทราย หลังจากที่ได้ทำการแกะสลักลวดลายเสร็จแล้วนั้นก็นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายมาพอกชั้นขี้ผึ้งให้ทั่วรอบทั้งองค์พระให้มีความหนาประมาณ 2.5 inch จากนั้นก็นำเหล็กเส้นมาเชื่อมรัดปูนปลาสเตอร์ด้านนอกให้แน่นเพื่อป้องกันการขยายตัวจากความร้อน และป้องกันการแตกร้าวของปูนปลาสเตอร์ จากนั้นก็นำปูนปลาสเตอร์ผสมทรายมาพอกให้รอบเหล็กเส้นให้มีความหนาเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 2.5 inch รวมความหนาของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นนอกประมาณ 5 inch

รูปที่ 3.2 องค์พระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 inch ที่พอกด้วยขี้ผึ้งเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 3.3 แบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 inch

วัสดุดังที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งใช้ในการจัดสร้างแบบหล่อพระพุทธรูปจะมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุ	อุณหภูมิ (K)	ρ (kg/m^3)	k $(W/m\cdot K)$	C_p $(J/kg\cdot K)$	Melting point (° C)	Boiling point (° C)
Paraffin Wax	300	900	0.240	2890	48-66	370
ปูนปลาสเตอร์	293	1440	0.482	837	-	-

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

3.1.2 การจัดเก็บข้อมูล อุณหภูมิส่วนต่างๆ ในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

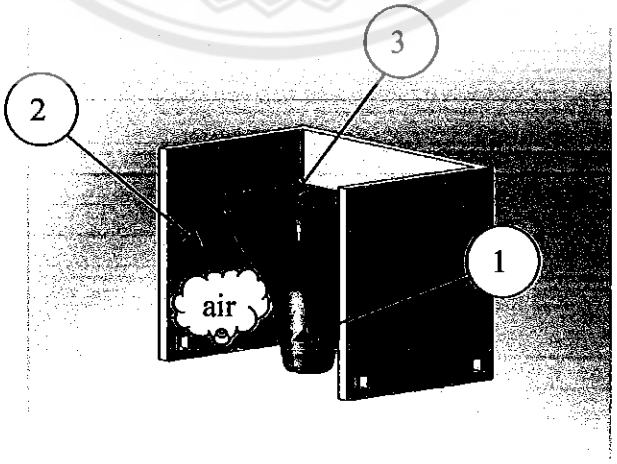
ในส่วนการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิในกระบวนการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปจะพบว่าเวลาและปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปจนกระทั่งแบบสุกทั่วทั้งแบบ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากควันไฟตรงช่องชนวนที่จัดทำไว้สำหรับเททองเหลืองจะไม่มีควันไฟโดยที่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่า โดยทำการจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที จากการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data logger จัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา อุณหภูมิภายในเตา และอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.4

สาเหตุของการจัดเก็บอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ

1. จัดเก็บอุณหภูมิผิวแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา เพื่อต้องการทราบถึงอุณหภูมิของผิวแบบหล่อพระพุทธรูปที่อยู่บริเวณหัวเผาว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร เพื่อที่จะนำข้อมูลนี้ไปจำลองการเผาโดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผา

2. จัดเก็บอุณหภูมิภายในเตา เพื่อต้องการที่จะนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการกำหนดอุณหภูมิของอากาศภายในเตาที่พาความร้อนไปสู่ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปในการจำลองการเผา

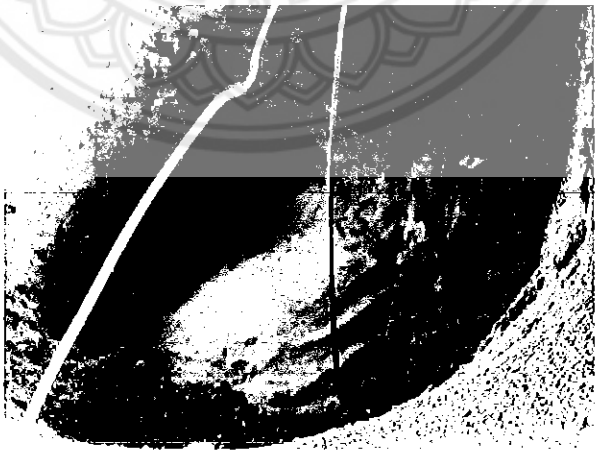
3. จัดเก็บอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป เพื่อต้องการทราบถึงอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่ทำให้แบบหล่อพระพุทธรูปสุกทั่วทั้งแบบ และใช้ในการยืนยันความถูกต้องของอุณหภูมิภายในแกนกลางของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปว่ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปในขณะเผาจริงหรือไม่



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

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิผิวแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา อยู่สูงจากพื้นดิน 11 cm

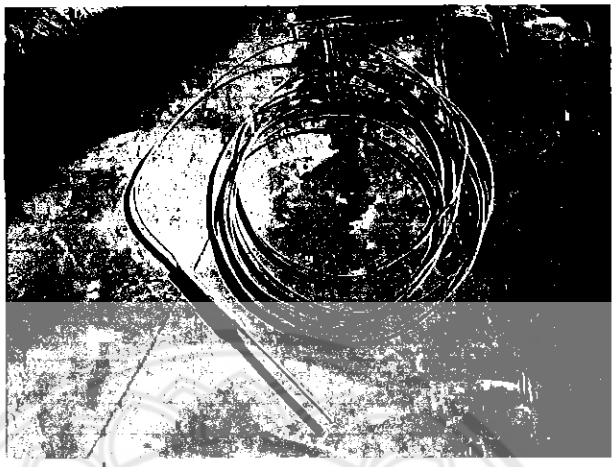
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิภายในเตาอยู่สูงจากพื้นดิน 82 cm



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการจัดเก็บอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปอยู่สูงจากพื้นดิน 80.3 cm

เครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูล

1. สาย Thermo Couple Type K สามารถใช้วัดอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 0-1250^{o}C

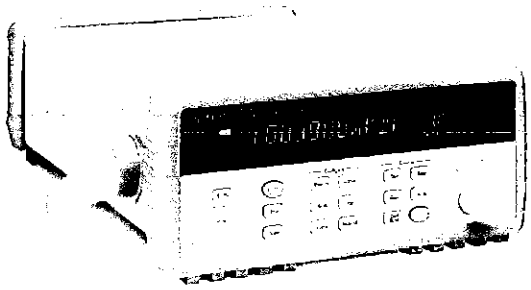


รูปที่ 3.8 ชุดสาย Thermo Couple Type K

2. เครื่อง Data Logger รุ่น Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit ใช้วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ

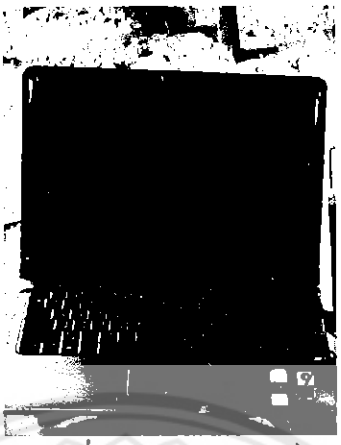
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของเครื่อง Data Logger รุ่น Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit

Number of channel	40
Scanning speed	60 channel/second
Input Voltage	300 V
Maximum input current	1A
Temperature operating	0^{o}C-55^{o}C
Humidity	80%RH



รูปที่ 3.9 เครื่อง Data Logger ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิ

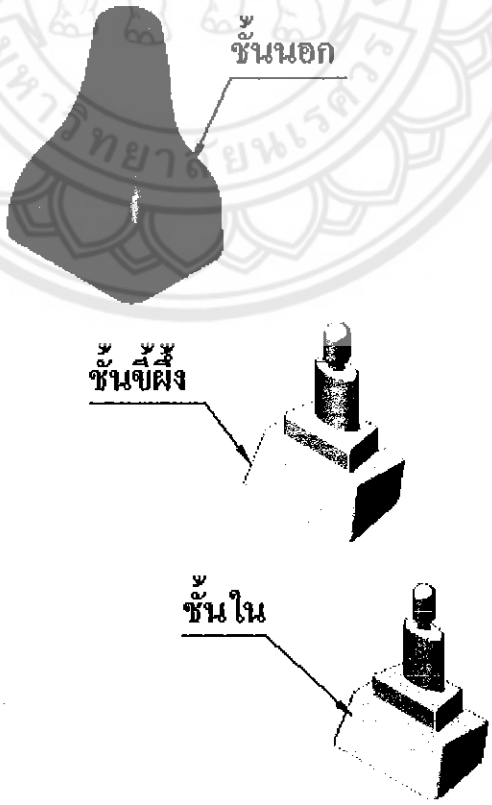
3. คอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.10 คอมพิวเตอร์

3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป และการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป



รูปที่ 3.11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปให้มีลักษณะคล้ายกับของจริง โดยใช้โปรแกรม SolidWorks โดยสร้างชั้นขี้ผึ้งให้มีขนาดความสูง 100.90 cm ฐานกว้าง 79.50 cm ขนาดหน้าตัก 19 inch ชั้นในมีความสูง 99.90 cm ฐานกว้าง 77.05 cm ชั้นนอกสูง 132.30 cm ฐานกว้าง 94.50 cm โดยรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถดูได้จากภาคผนวก ก

3.2.2 เงื่อนไขเริ่มต้นของการวิเคราะห์

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

b) กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 25 ^{o}C

c) กำหนดให้ผิวองค์พระพุทธรูปมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายในเตา

d) เนื่องจากการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรอบองค์พระพุทธรูปที่ถูกต้องนั้นกระทำได้ยาก จึงสมมติฐานให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติรอบองค์พระพุทธรูปมีค่าคงที่เท่ากับ 25 W/(m^2-K) ซึ่งอยู่ในช่วงใช้งานตามตารางที่ 2.2

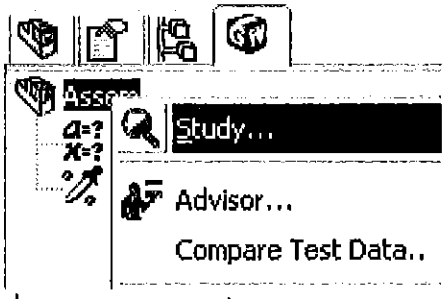
e) ไม่พิจารณาการไหลวนของอากาศร้อนภายในเตาเผา

3.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิเคราะห์ลักษณะการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้โปรแกรม COSMOSWorks มีรายละเอียดดังนี้ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมจากภาคผนวก ข)

a) ทำการเปิดแบบจำลองของแบบหล่อพระพุทธรูปที่สร้างจากโปรแกรม SolidWorks แสดงขึ้นบนโปรแกรม COSMOSWorks

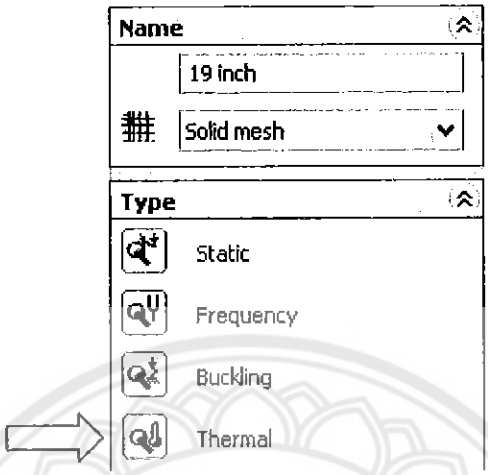
b) คลิกขวาที่ไอคอนชิ้นงานในใบรายการของ COSMOSWorks และเลือก Study



รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์ด้วย COSMOSWorks

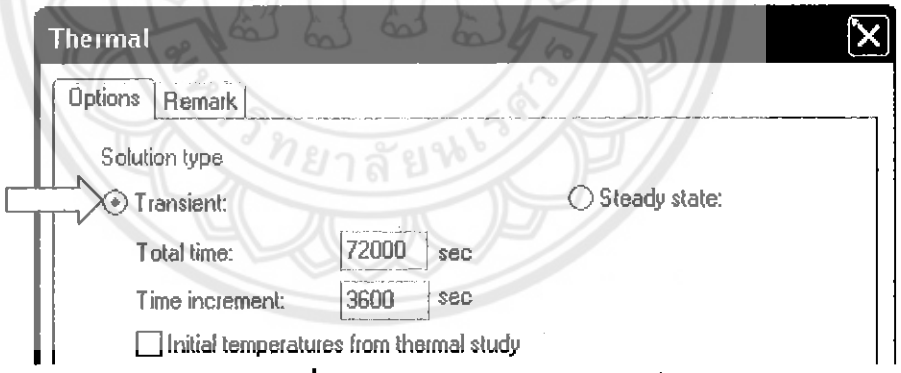
I 5074471. ๔ ๒
5200095

c) ที่กรอบ Name กำหนดชื่อชิ้นงานเพื่อจะทำการวิเคราะห์ เลือกชนิดของเอลิเมนต์ (Mesh Type) เลือกเป็น Solid Mesh และรูปแบบการวิเคราะห์ที่กรอบ Type เลือกเป็น Thermal



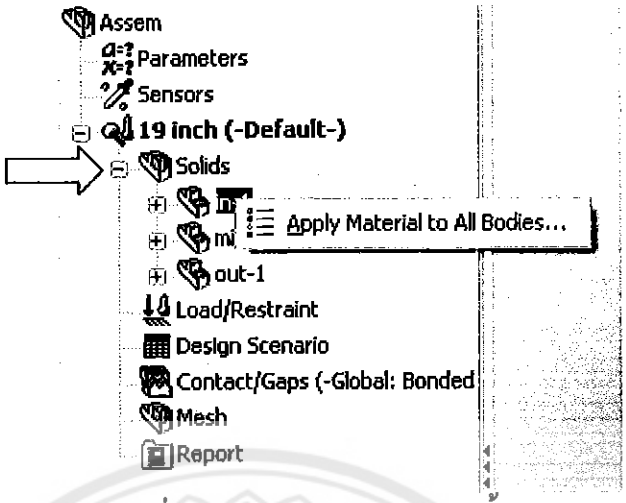
รูปที่ 3.13 ชนิดของการวิเคราะห์

d) คลิกขวาที่คำสั่ง 19 inch (-Default-) แล้วคลิกซ้ายเลือก Properties... จะปรากฏหน้าต่าง Thermal แล้วคลิกเลือก Transient เลือก Total time เท่ากับ 72000 sec และเลือก Time increment เท่ากับ 3600 sec แล้วคลิก OK



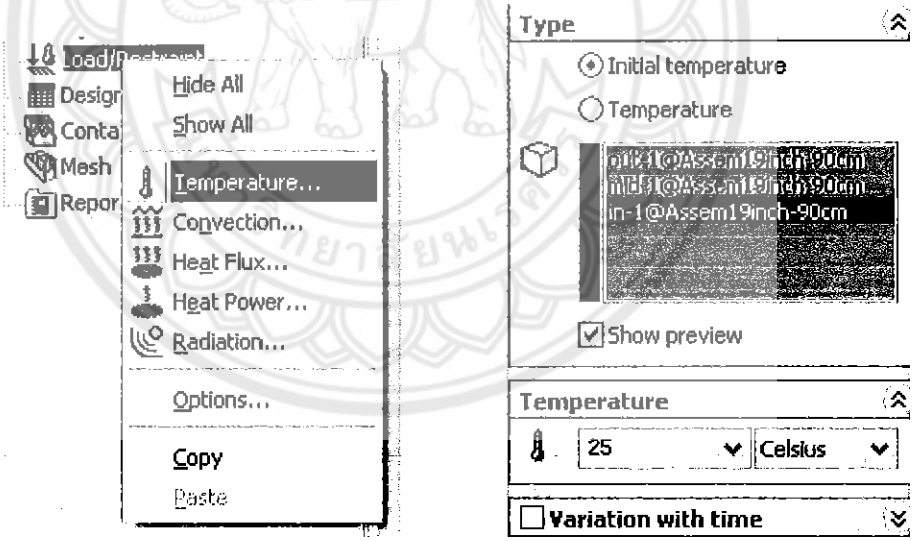
รูปที่ 3.14 รูปแบบของการวิเคราะห์

e) คลิกตรงเครื่องหมายบวก หน้าคำสั่ง Solids กำหนดคุณสมบัติของวัสดุทั้ง 3 ชิ้น โดยคลิกขวาตรงชิ้นงานแล้วคลิกซ้ายตรงคำสั่ง Apply Material to All Bodies ใส่ค่าความหนาแน่น, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความร้อนจำเพาะ ตามตารางที่ 3.1



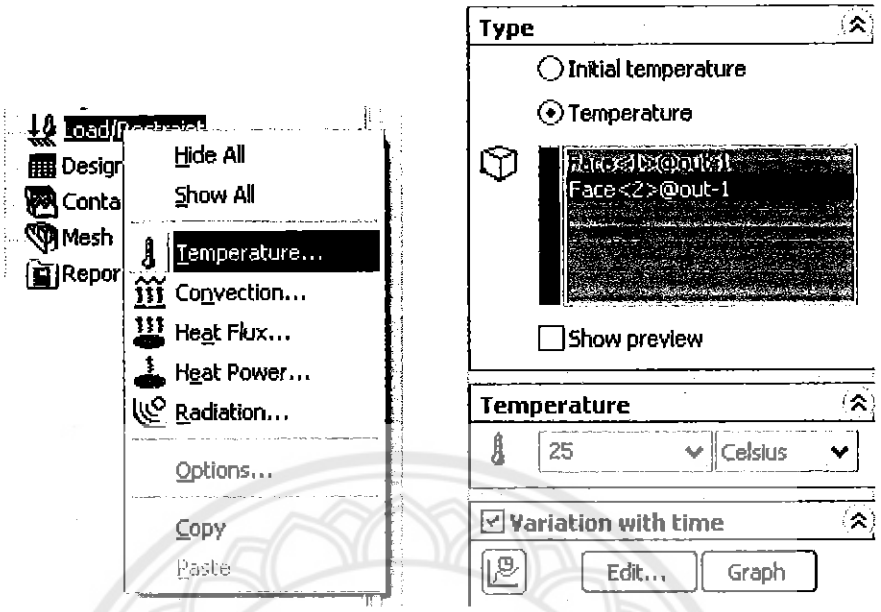
รูปที่ 3.15 กำหนดคุณสมบัติของชิ้นงาน

f) กำหนดอุณหภูมิของแบบหล่อพระพุทธรูป คลิกขวาที่ Load/Restraint คลิกเลือก Temperature ดังรูป กำหนดเป็น 25 °C



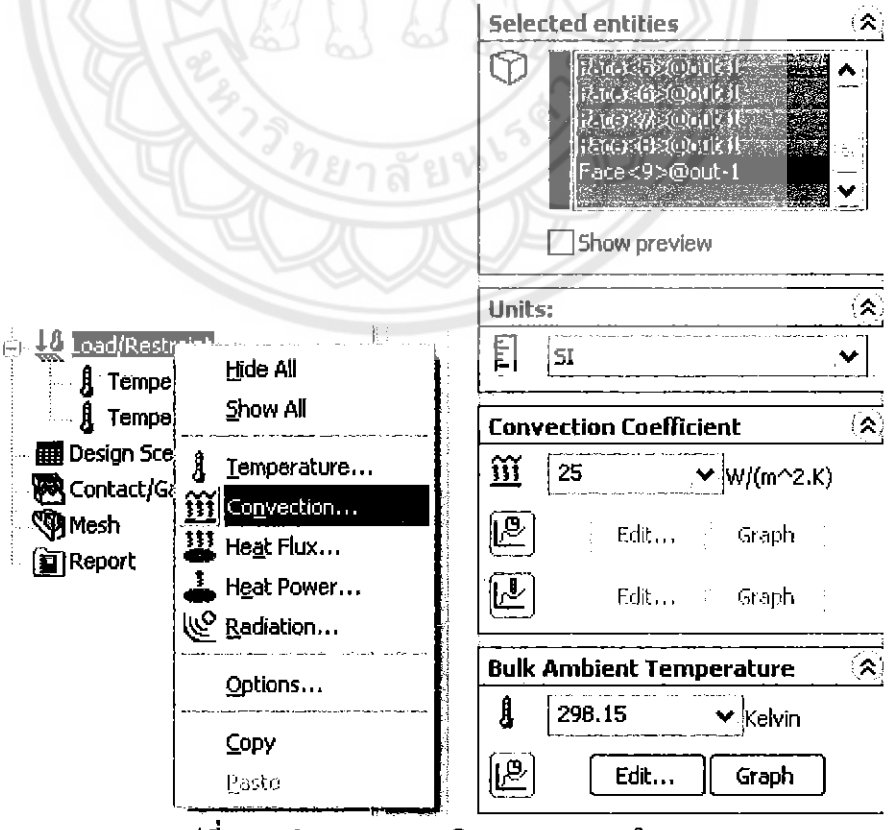
รูปที่ 3.16 กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของแบบหล่อพระพุทธรูป

g) คลิกขวาที่ Load/Restraint คลิกเลือก Temperature ดังรูป กำหนดให้ผิวแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณหัวเผามีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยมีอุณหภูมิเริ่มต้น 25 °C



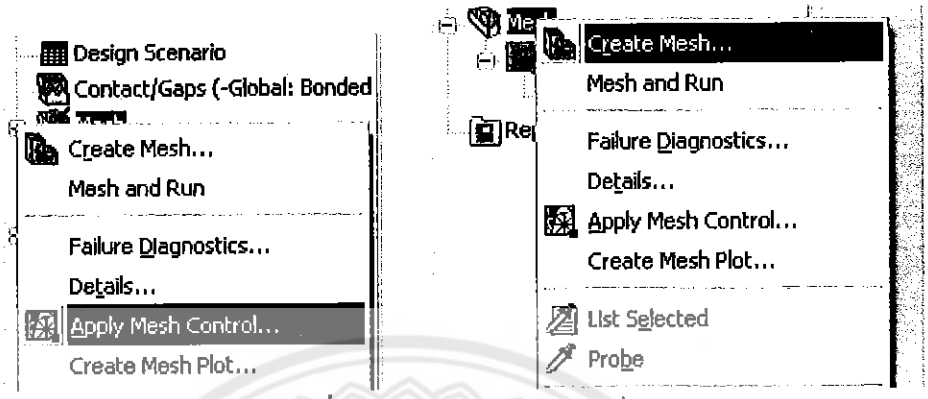
รูปที่ 3.17 กำหนดอุณหภูมิผิวแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณหัวเผา

h) กำหนดให้อากาศภายในเตามีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยมีอุณหภูมิเริ่มต้น 298.15 K และอากาศภายในเตามีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคงที่ 25 W/(m^2-K)



รูปที่ 3.18 กำหนดอุณหภูมิของอากาศภายในเตา

i) ทำการแบ่งเอลิเมนต์ และวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.19 ทำการแบ่งเอลิเมนต์

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะเป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการดำเนินงานตามขั้นตอนและระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยดังแสดงไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อหา และรายละเอียดของผลการทดลองและการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในแบบหล่อพระพุทธรูป

จากผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโดยใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว พบว่าใช้เวลาในการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปจนกระทั้งแบบสุกทั่วทั้งแบบใช้เวลา 20 hr ได้ข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา อุณหภูมิภายในเตา และอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป ดังแสดงตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 (สามารถดูผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิเพิ่มเติมจากภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิบริเวณผิวแบบหล่อพระพุทธรูป

เวลาในการเผา (hr)	อุณหภูมิ (^{o}C)
ก่อนเผา	25.00
5 hr 20 min	620.67
8 hr 20 min	685.60
12 hr	670.04
16 hr	728.43
20 hr	605.60

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิภายในเตา

เวลาในการเผา (hr)	อุณหภูมิ (^{o}C)
ก่อนเผา	25.00
5 hr 20 min	554.78
8 hr 20 min	630.22
12 hr	741.45
16 hr	640.31
20 hr	503.00

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป

เวลาในการเผา (hr)	อุณหภูมิ (^{o}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

น้ำหนัก LPG รวมถัง (kg) ก่อนเผา = 84+87+84+84.8 = 339.8 kg

น้ำหนัก LPG รวมถัง (kg) หลังเผา = 39.8+40+40.5+39.5 = 159.8 kg

ปริมาณการใช้แก๊ส LPG ตลอดการเผา = 339.8-159.8 = 180 kg

4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

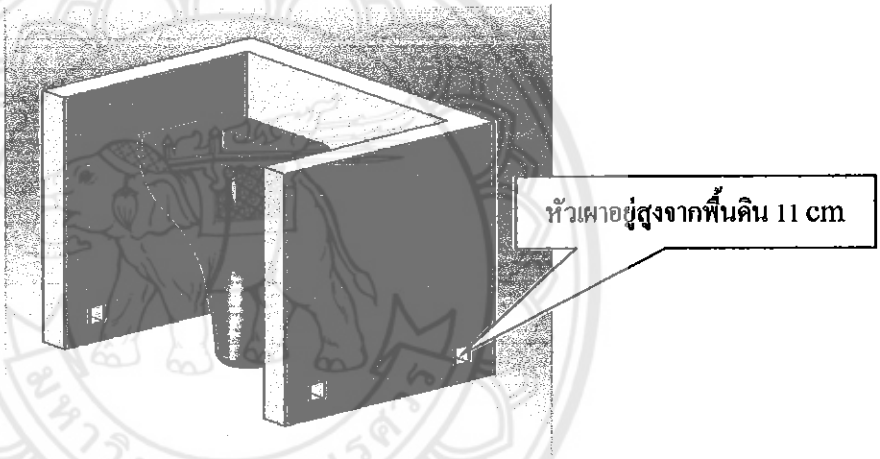
จากที่ได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิในขณะที่เผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อพระพุทธรูป และนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนตำแหน่งของหัวเผาให้สูงขึ้นจากเดิม พบว่าการ

กระจายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการจำลองการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปได้ผลของการจำลองการเผาในแต่ละตำแหน่งความสูงของหัวเผาดังนี้

ตำแหน่งความสูงแบบเดิม ได้ผลดังนี้

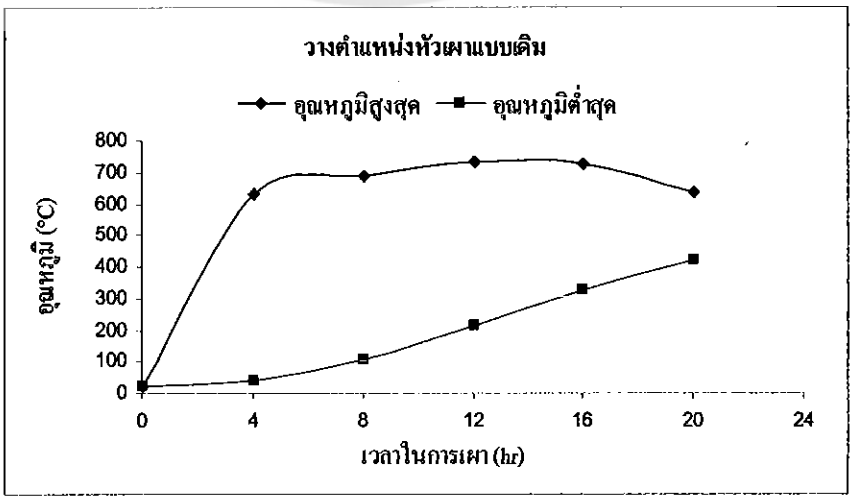
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิสูงสุด (°C)	25	632.40	687.30	731.60	728.40	639.10
อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	25	39.11	109.60	214.20	325.50	420.30



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งหัวเผาความสูงแบบเดิม

จากตารางที่ 4.4 สามารถนำเสนอในรูปของกราฟได้ดังนี้

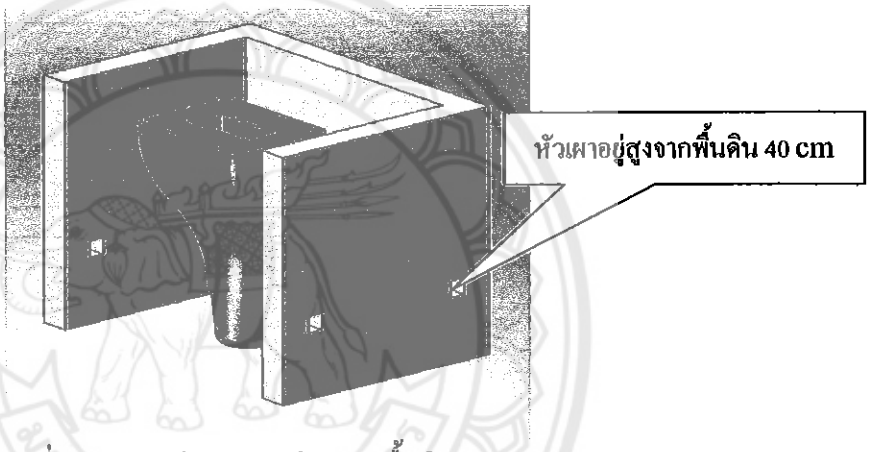


รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิม

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดิน ที่ตำแหน่งความสูง 40 cm ได้ผลดังนี้

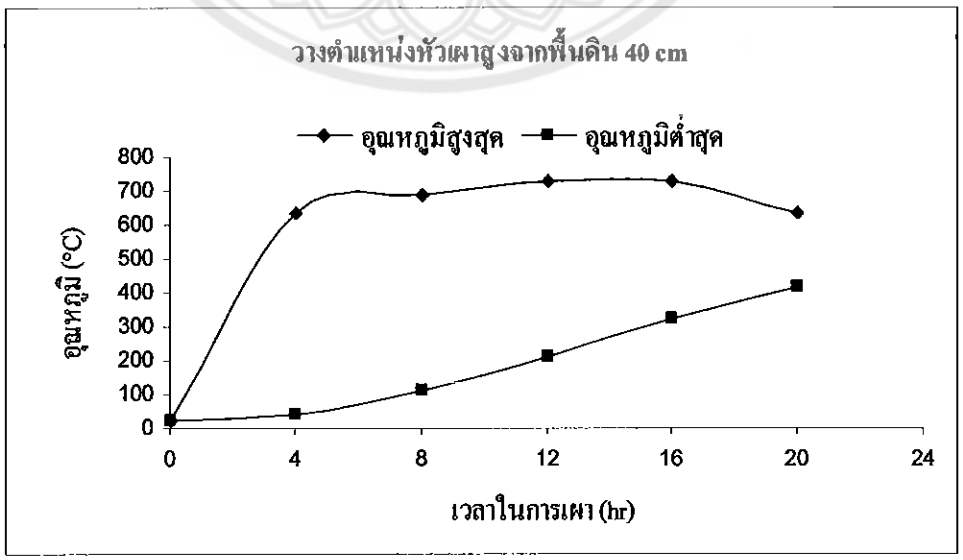
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 40 cm

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิสูงสุด (^{o}C)	25	632.40	687.30	731.60	728.40	635.50
อุณหภูมิต่ำสุด (^{o}C)	25	39.12	109.40	213.90	325.20	420.30



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 40 cm

จากตารางที่ 4.5 สามารถนำเสนอในรูปของกราฟได้ดังนี้

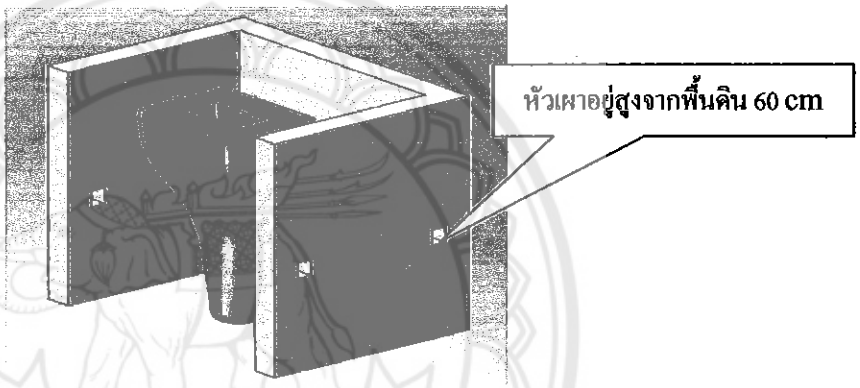


รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 40 cm

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดิน ที่ตำแหน่งความสูง 60 cm ได้ผลดังนี้

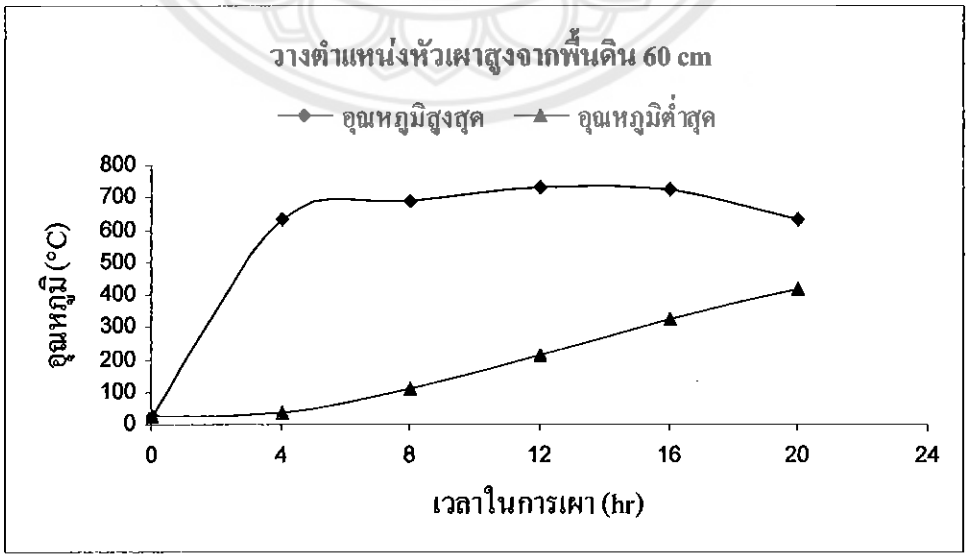
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 60 cm

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิสูงสุด (^{o}C)	25	632.40	687.30	731.60	728.40	634.90
อุณหภูมิต่ำสุด (^{o}C)	25	39.19	109.80	214.60	326.10	421.30



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 60 cm

จากตารางที่ 4.6 สามารถนำเสนอในรูปของกราฟได้ดังนี้

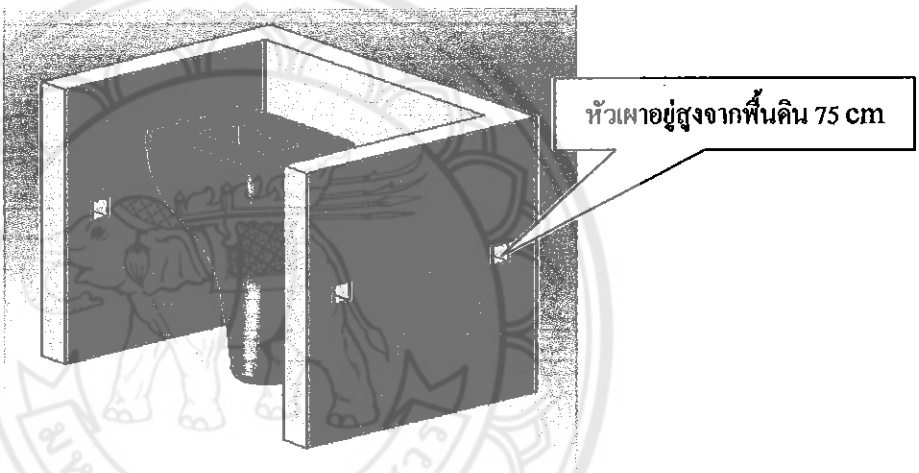


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 60 cm

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดิน ที่ตำแหน่งความสูง 75 cm ได้ผลดังนี้

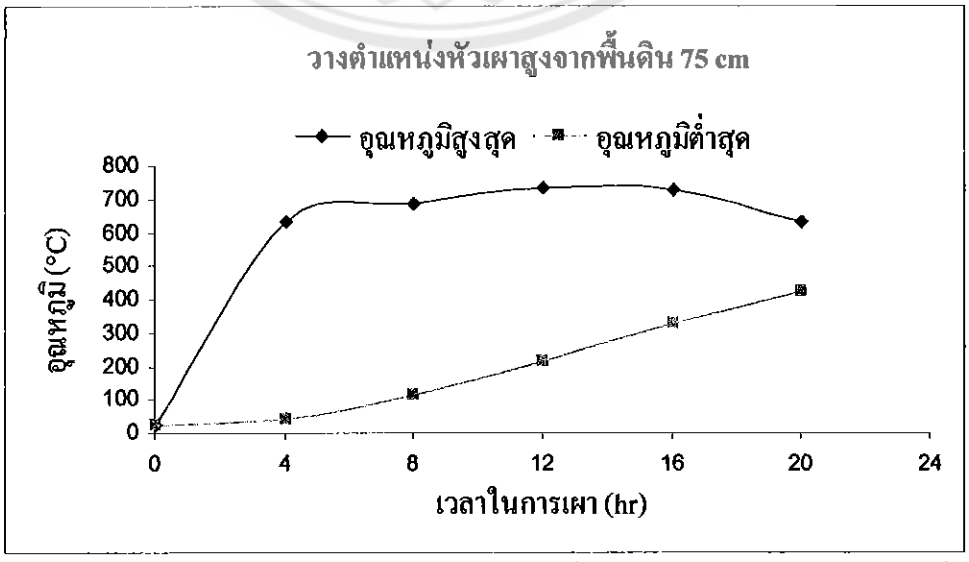
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 cm

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิสูงสุด (°C)	25	632.40	687.30	731.50	728.40	634.80
อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	25	39.60	111.30	216.80	328.30	423.60



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 75 cm

จากตารางที่ 4.7 สามารถนำเสนอในรูปของกราฟได้ดังนี้

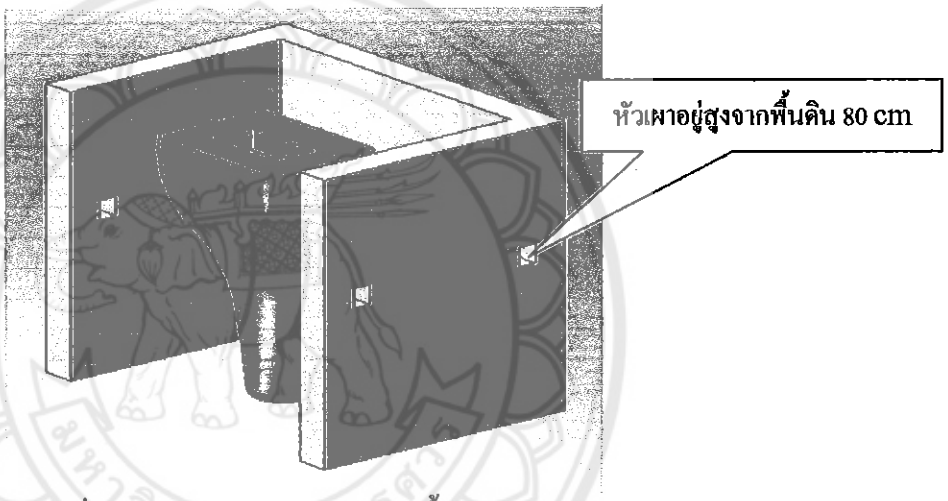


รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 75 cm

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดิน ที่ตำแหน่งความสูง 80 cm ได้ผลดังนี้

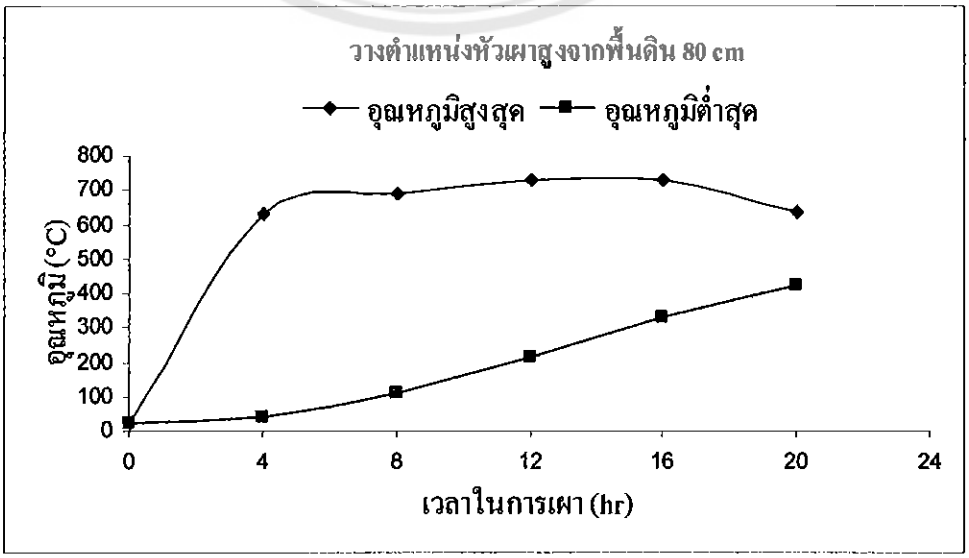
ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 80 cm

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิสูงสุด (°C)	25	632.40	687.30	731.50	728.40	634.90
อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	25	39.58	111.20	216.70	328.30	423.60



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 80 cm

จากตารางที่ 4.8 สามารถนำเสนอในรูปของกราฟได้ดังนี้

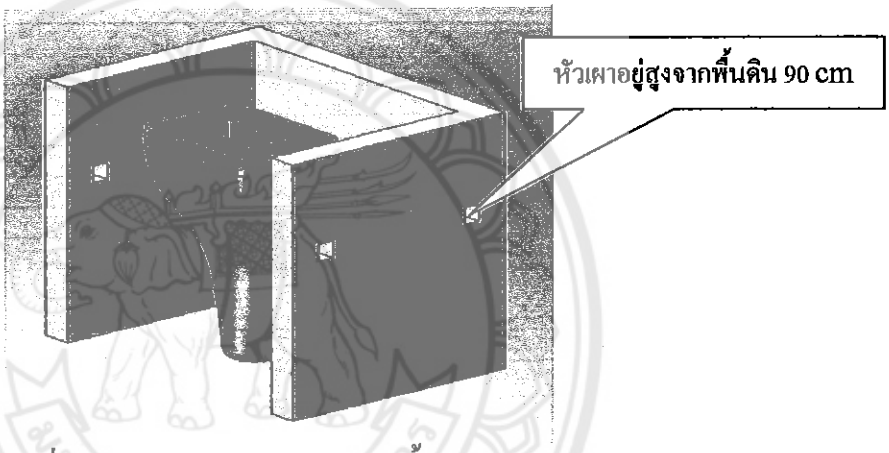


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 80 cm

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดิน ที่ตำแหน่งความสูง 90 cm ได้ผลดังนี้

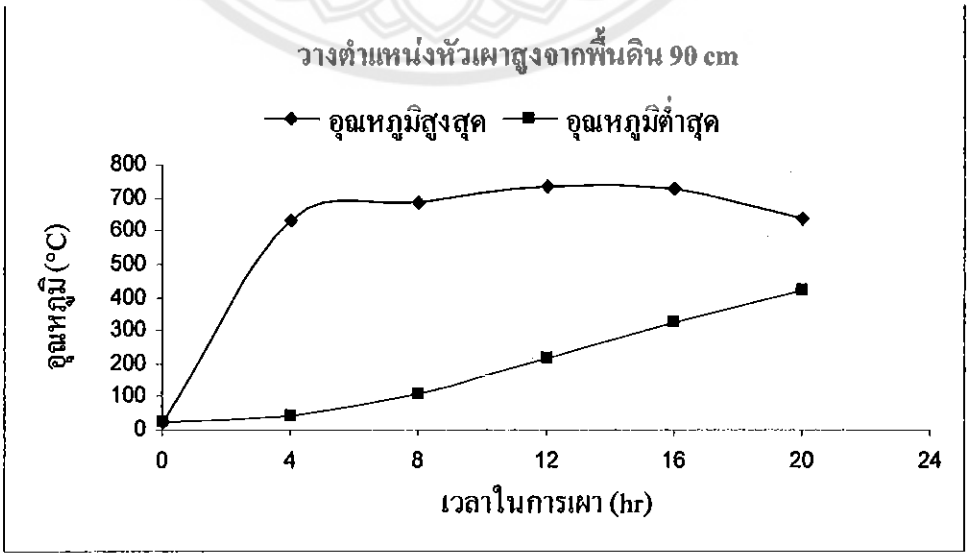
ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 90 cm

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิสูงสุด (^{o}C)	25	632.40	687.30	731.60	728.40	634.90
อุณหภูมิต่ำสุด (^{o}C)	25	39.26	110.10	215.10	326.70	421.90



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 90 cm

จากตารางที่ 4.9 สามารถนำเสนอในรูปของกราฟได้ดังนี้

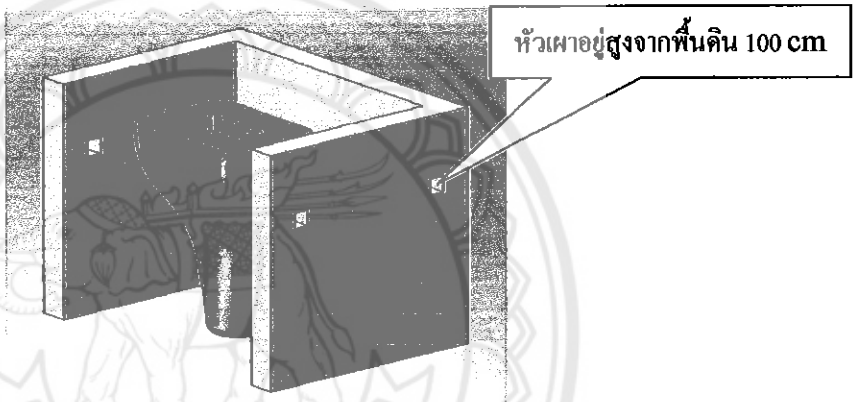


รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 90 cm

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดิน ที่ตำแหน่งความสูง 100 cm ได้ผลดังนี้

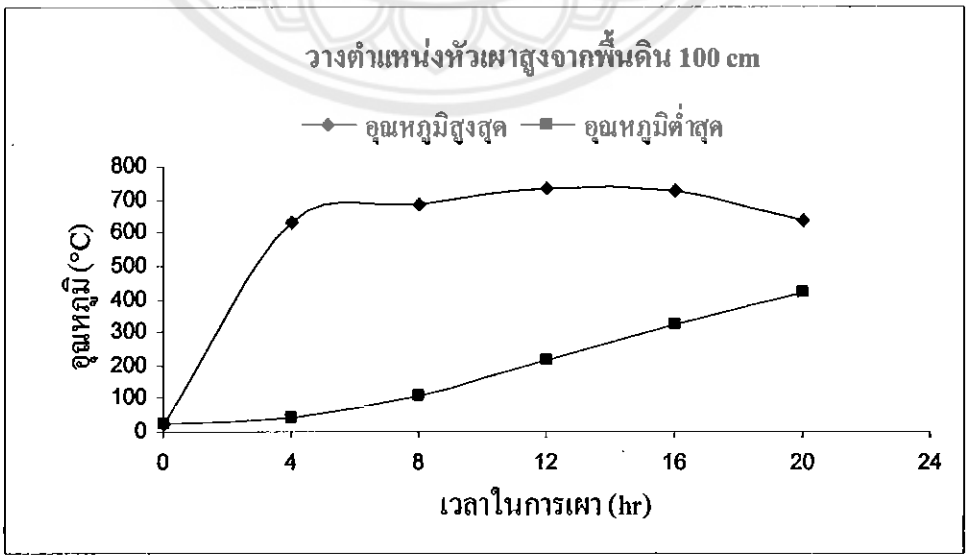
ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 100 cm

เวลาการเผา (ชั่วโมง)	0	4	8	12	16	20
อุณหภูมิสูงสุด (^{o}C)	25	632.40	687.30	731.50	728.40	634.90
อุณหภูมิต่ำสุด (^{o}C)	25	39.16	109.60	214.40	325.90	421



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งหัวเผาอยู่สูงจากพื้นดิน 100 cm

จากตารางที่ 4.10 สามารถนำเสนอในรูปของกราฟได้ดังนี้

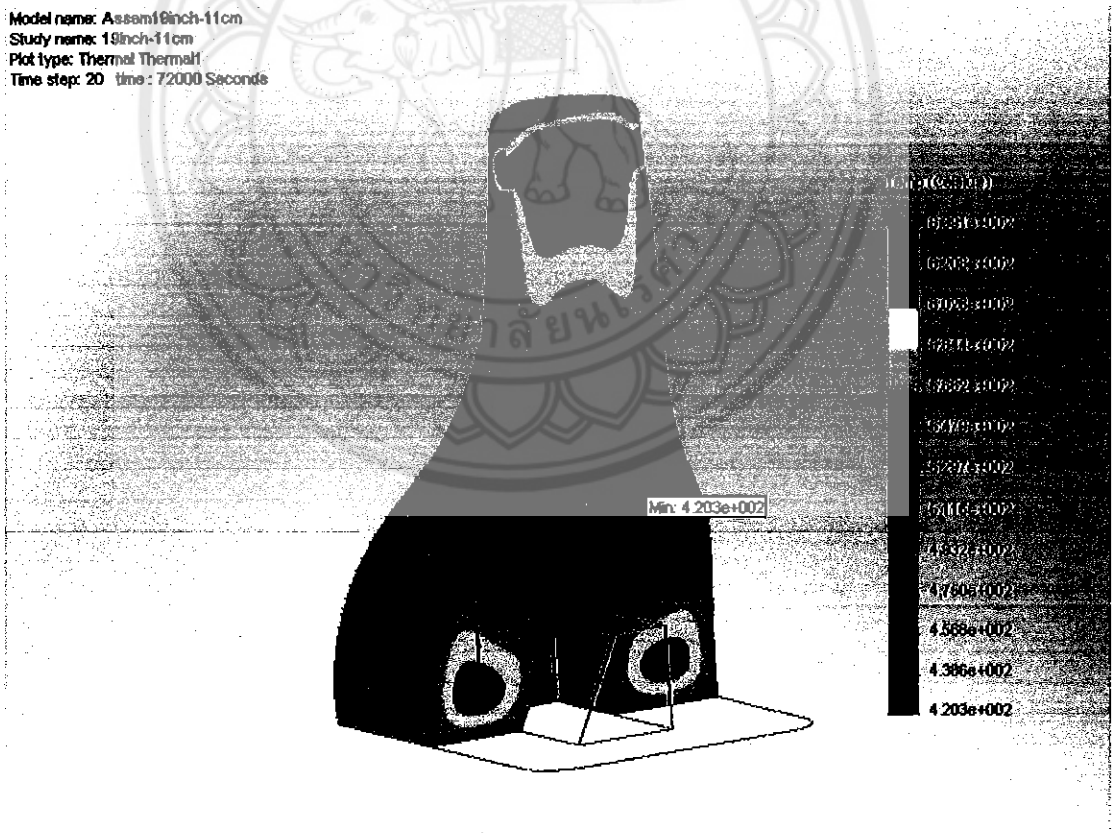


รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบเวลาการเผากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อวางตำแหน่งหัวเผาสูงจากพื้นดิน 100 cm

4.3 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

4.3.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

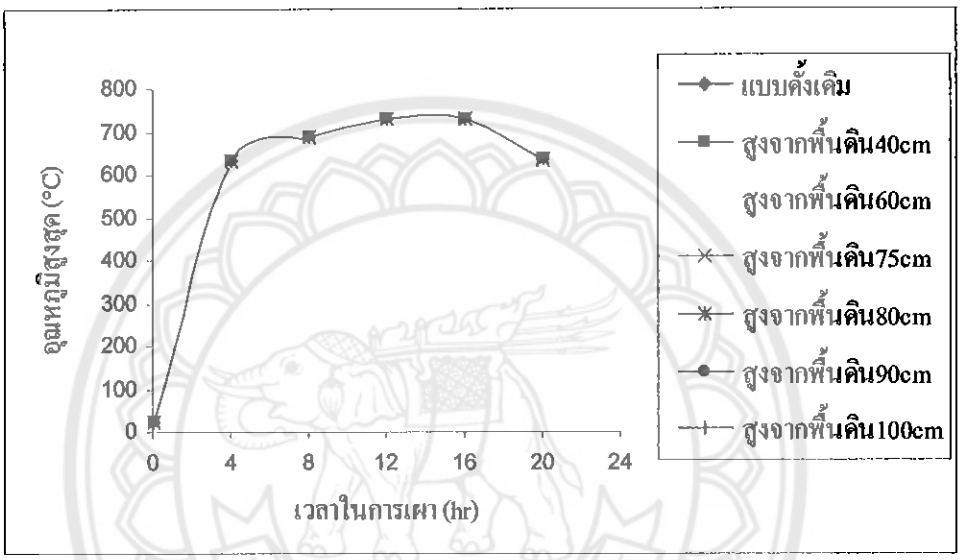
จากข้อมูลอุณหภูมิ และคุณสมบัติของวัสดุที่จัดเก็บเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป และทำการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นจะพบว่าอุณหภูมิของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อจำลองเวลาในการเผาที่ 20 hr จะมีอุณหภูมิบริเวณแกนกลางชั้นในของแบบหล่อพระพุทธรูปประมาณ 420 ^{o}C ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิในขณะเผาจริง ดังนั้นจึงถือว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือเพียงพอจึงได้นำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ไปทำการจำลองลักษณะการเผาโดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาซึ่งเป็นแหล่งความร้อนให้สูงขึ้นจากพื้นดินที่ตำแหน่ง 40, 60, 75, 80, 90 และ100 cm



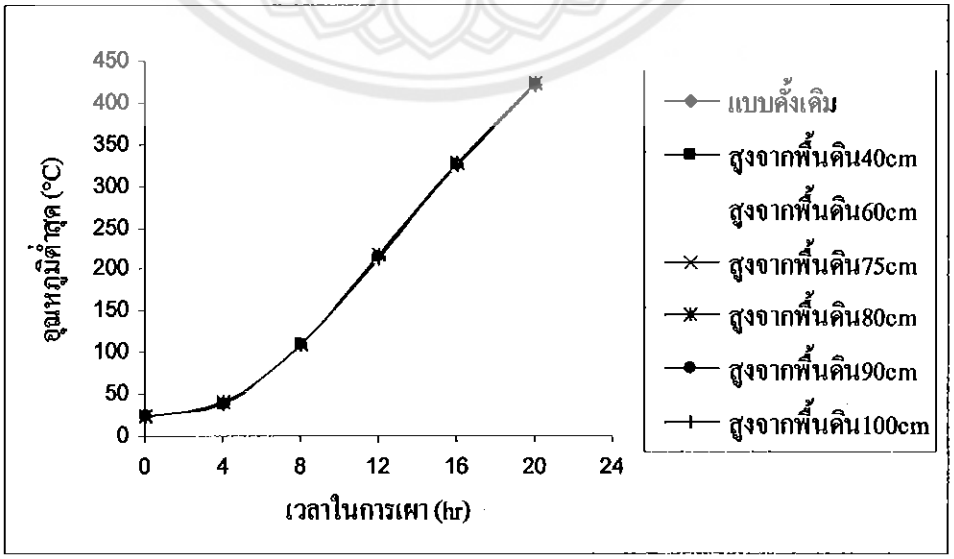
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิบริเวณแกนกลางชั้นในของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr

4.3.2 วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป

วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.16 และ กราฟรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาที่มีผลการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป ณ เวลาการเผา 20 hr



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปโดยวางตำแหน่งหัวเผาแตกต่างกัน

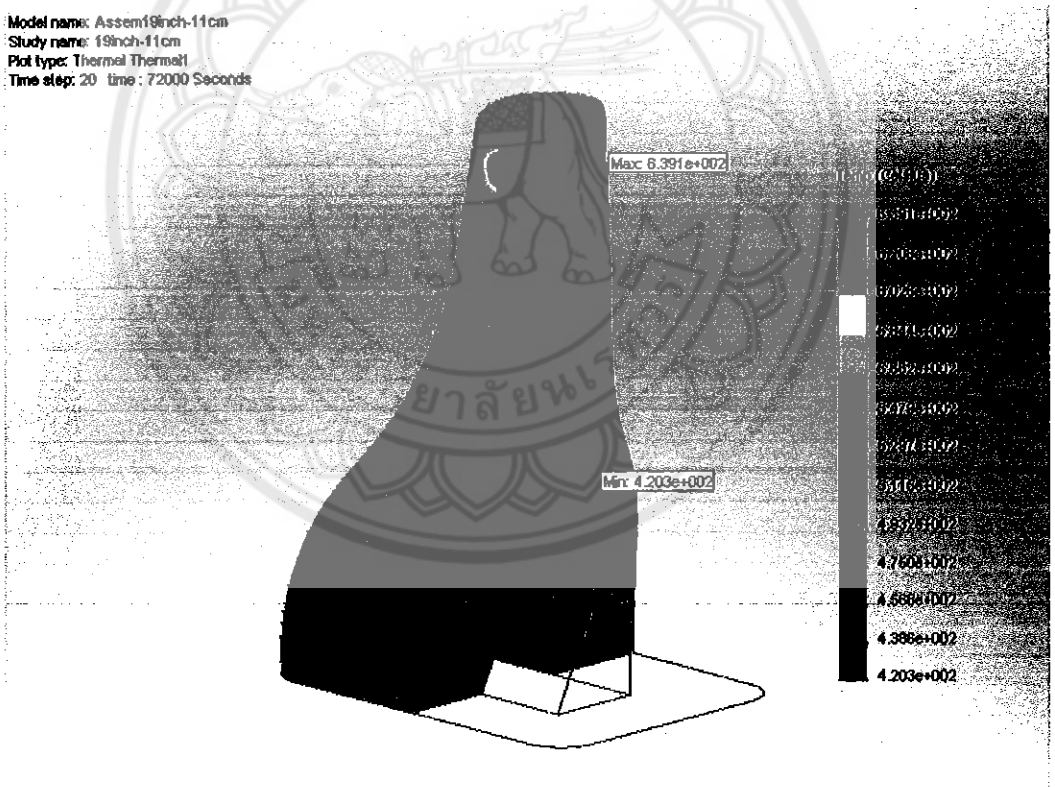


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปโดยวางตำแหน่งหัวเผาแตกต่างกัน

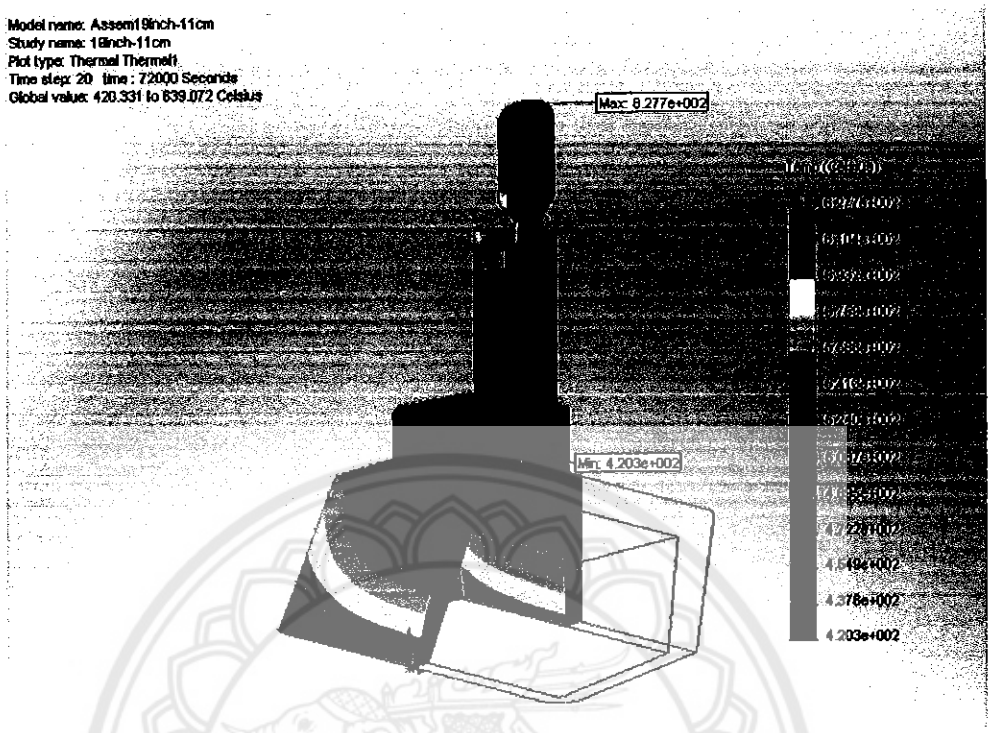
จากรูปที่ 4.16 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปโดยวางตำแหน่งหัวเผาแตกต่างกัน พบว่าใน 4 hr แรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะเส้นตรง หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและไม่ต่างกันมากนัก

จากรูปที่ 4.17 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผากับอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองการเผาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปโดยวางตำแหน่งหัวเผาแตกต่างกัน พบว่าใน 4 hr แรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในลักษณะเส้นตรง หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะเส้นตรงเช่นกัน

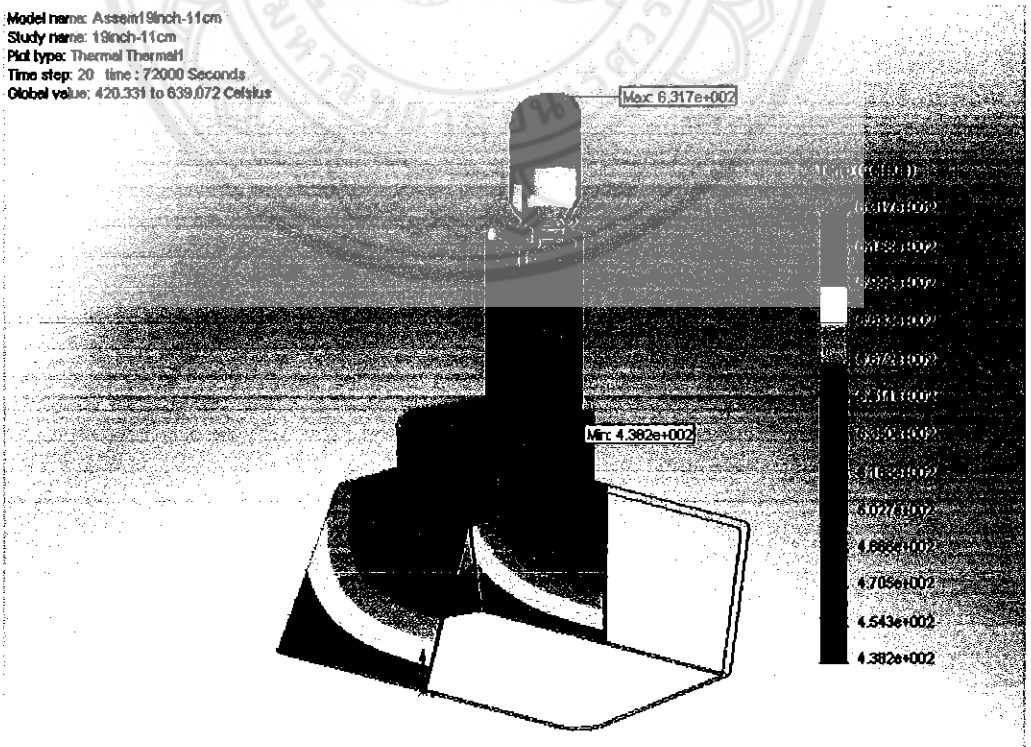
จากการวิเคราะห์ผลทั้งหมดพบว่าการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปจะมีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหัวเผา



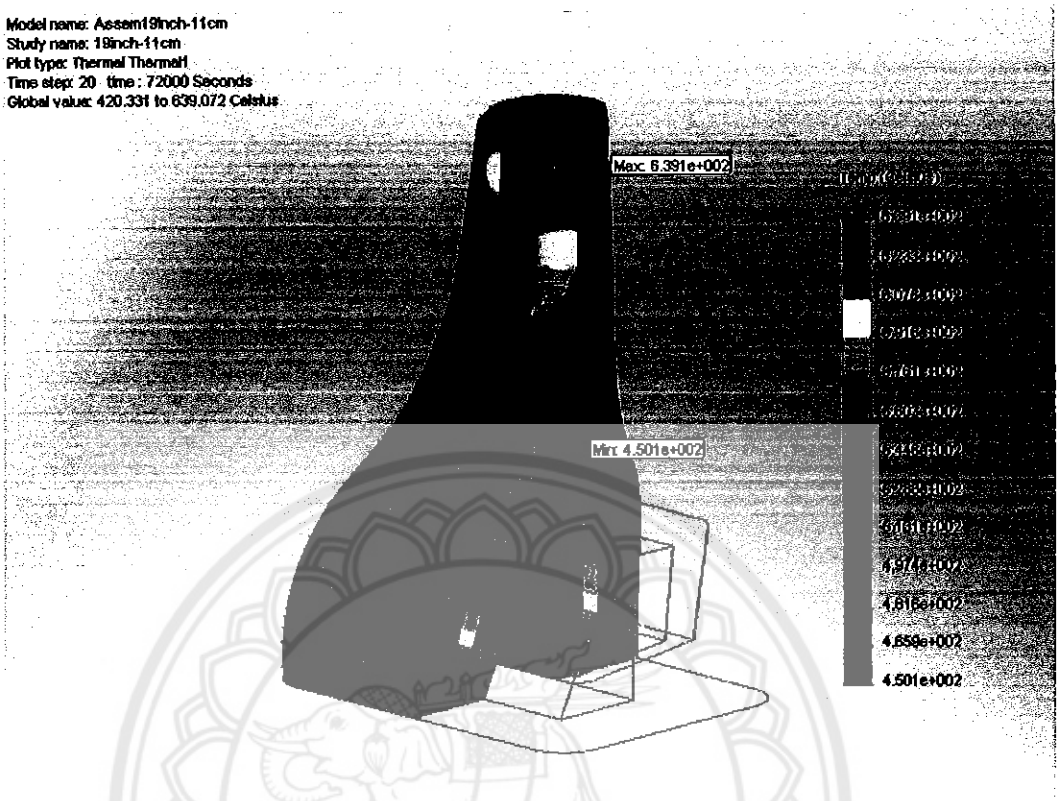
รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูป โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19.1 การกระจายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นใน โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr



รูปที่ 4.19.2 การกระจายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นขี้ผึ้ง โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr



รูปที่ 4.19.3 การกระจายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปชั้นนอก โดยวางตำแหน่งหัวเผาแบบเดิมเมื่อเวลาในการเผาผ่านไป 20 hr

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

การวิเคราะห์แบบจำลองการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ มีวิธีการดำเนินงานประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้การวิเคราะห์ และการหาค่าการกระจายอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้หาตำแหน่งของหัวเผาซึ่งจะมีรายละเอียดสรุปผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

5.1.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการตรวจวัดอุณหภูมิในขณะเผาแบบหล่อพระพุทธรูปขนาดหน้าตัก 19 นิ้ว โดยการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิทั้ง 3 จุด คือ 1.ผิวของแบบหล่อพระพุทธรูปบริเวณตำแหน่งหัวเผา 2.อุณหภูมิภายในเตา และ 3.อุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูป ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น จะพบว่าอุณหภูมิของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อจำลองเวลาในการเผาที่ 20 hr จะมีอุณหภูมิบริเวณแกนกลางชั้นในของแบบหล่อพระพุทธรูปประมาณ 420 $^{\circ}$C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิในขณะเผาจริงดังตารางที่ 4.3 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองการเผาแบบหล่อพระพุทธรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้สร้างขึ้นนั้น มีความถูกต้องน่าเชื่อถือได้

5.1.2 การหาค่าการกระจายอุณหภูมิภายในแบบหล่อพระพุทธรูปที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้หาตำแหน่งของหัวเผา

เมื่อนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหัวเผาที่มีต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูป จะพบว่าผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผาส่งผลน้อยมากต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.9 และ4.10 ซึ่งจากข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบหล่อพระพุทธรูปนั้นมาจากอิทธิพลของการพาความร้อนของอากาศร้อนภายในเตา

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบหล่อพระพุทธรูปที่มีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งหัวเผา พบว่าผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของหัวเผาส่งผลน้อยมากต่อการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งหากมีผู้สนใจในการทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม อาจทำการศึกษาในหัวข้อการวิเคราะห์การกระจายความร้อนที่เกิดจากอิทธิพลของการไหลวนอากาศร้อนภายในเตาเผา ซึ่งจะทำให้สามารถได้ผลที่ถูกต้องที่สุด

เอกสารอ้างอิง

เกียรติศักดิ์ สกุลพันธุ์ และวิทยา พันธุ์เจริญศิลป์. SolidWorks Engineering Drawing Workshop. กรุงเทพฯ : ท้อป, 2550

ประวิทย์ ยิ่งฉลาด, วิเชียร แสงหล้า และ อนุรักษ์ บำรุงคีรี. การวิเคราะห์การกระจายความเค้นในเพลาขับของ TSAE Student Formula โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2550.

รองศาสตราจารย์ดร.เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2548.

รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อนฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. กรุงเทพ : วิทยพัฒน์, 2548.

วิทยา จักรเครือ, โจ อำไพจิตร, สามารถ บุญยิ่ง และ สุริยา ทองจีน. การปรับปรุงเตาหล่อพระเพื่อนำขี้ผึ้งกลับมาใช้ใหม่. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2550.

Frank P. Incropera & David P. Dewitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th. John Wiley & Sons.

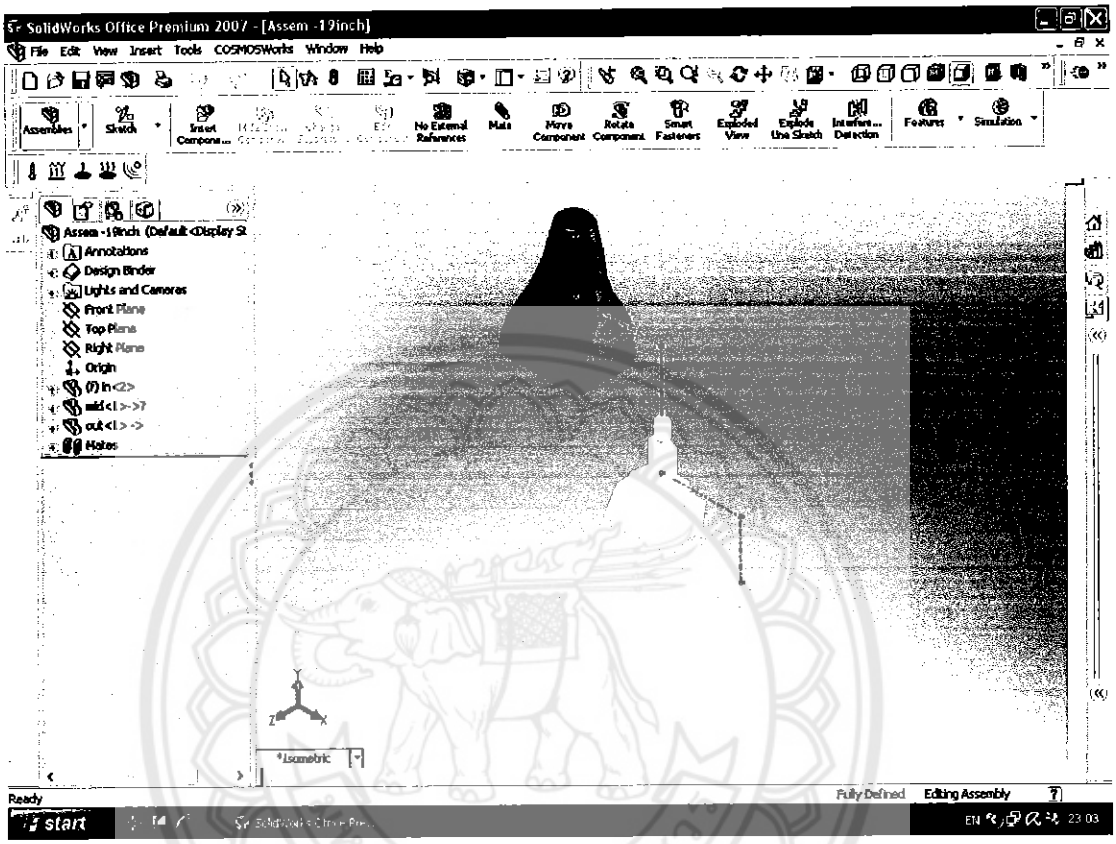
http://www.siamsouth.com/smf/index.php?topic=3890.0

http://www.boonluen.com/images/punpra/main-punpra.htm

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks



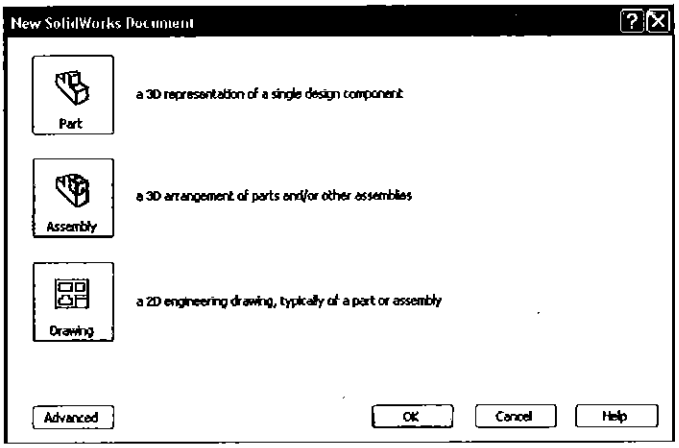
สร้างแบบจำลองให้เหมือนดังรูป โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างชั้นใน

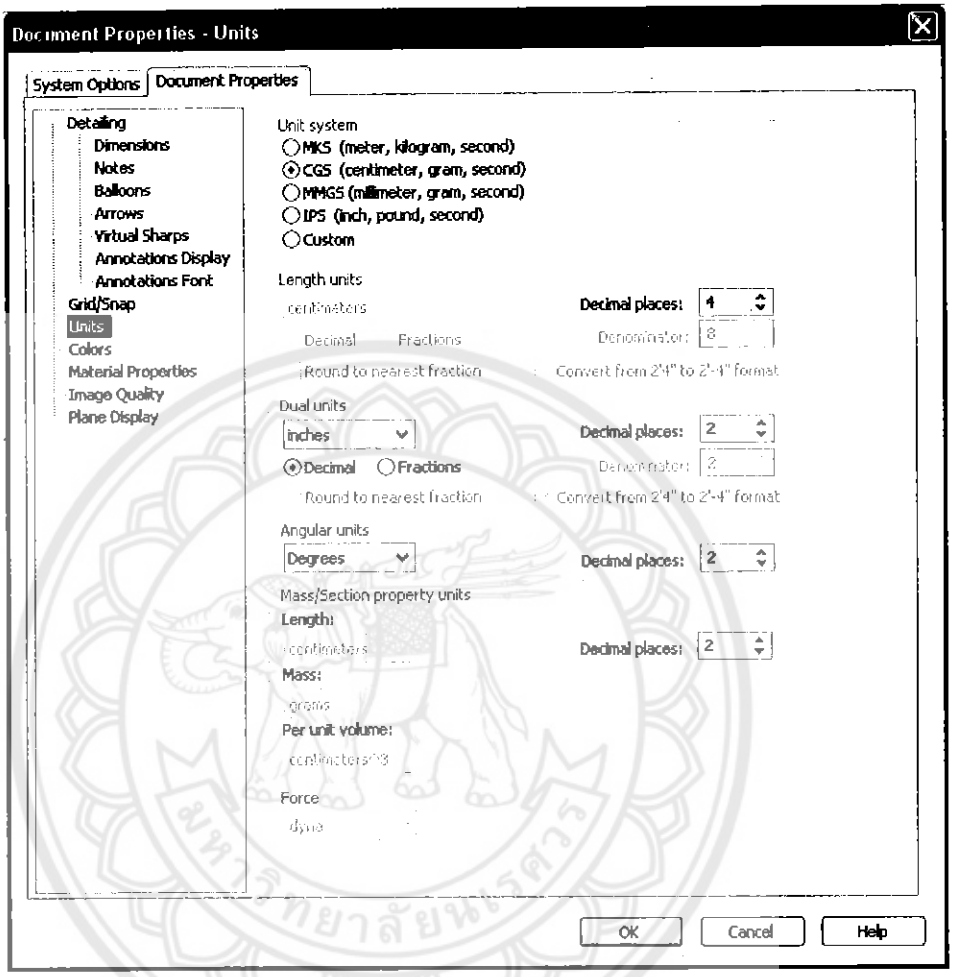
1.1 เข้าสู่โปรแกรมโดยการดับเบิลคลิกที่ Icon SolidWorks 2007 SP0.0 ที่ Desktop

1.2 คลิก New จะปรากฏ Dialog box New SolidWorks Document ขึ้นมา

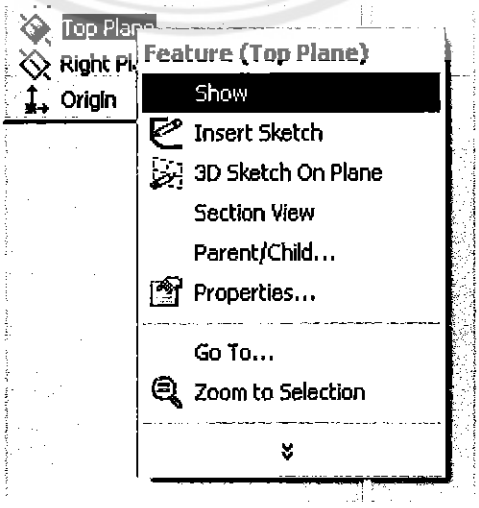
1.3 เลือกคลิก Part จากนั้นคลิกปุ่ม OK



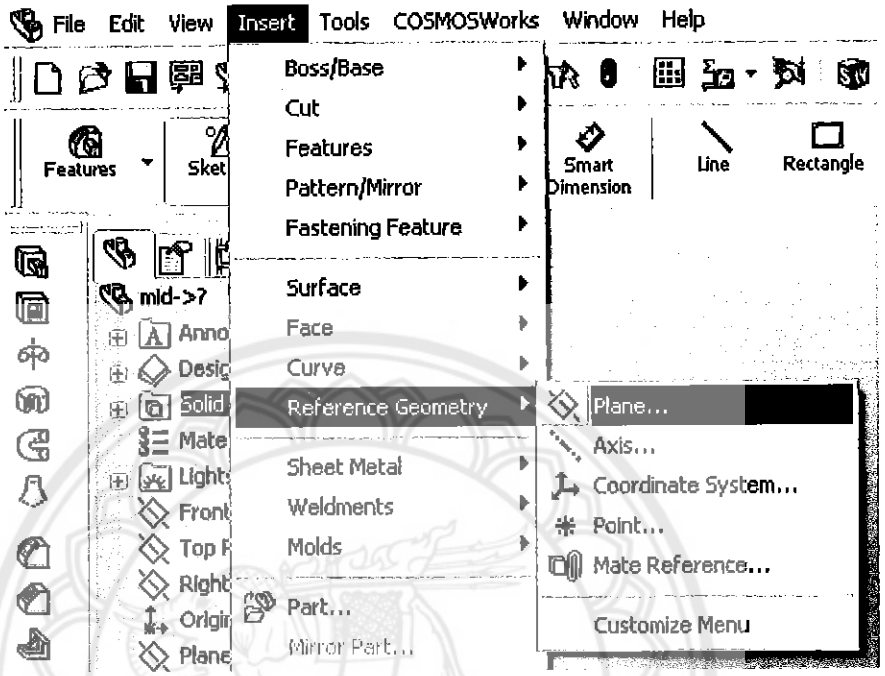
1.4 คลิกปุ่ม Options [Tab] Document Properties ทำการเลือก Units คลิกเลือก CGS (centimeter, gram, second) ปรับ Decimal places ให้เท่ากับ 4 จากนั้นคลิกปุ่ม OK



1.5 คลิกขวาที่ระนาบ Top แล้วเลือก Show จากเมนูลัด



1.6 คลิกระนาบ Top แล้วเลือก Insert→Reference Geometry →Plane จะมีใบรายการ Plane แสดงขึ้นมา

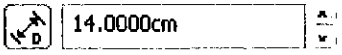


1.7 ที่ช่อง Offset Distance ใส่ค่าเป็น 27.4 cm (ระยะห่างของระนาบ)

1.8 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

1.9 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 1 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 27.4 cm

1.10 **สร้าง Plane 2** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 1 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบ Plane 1

1.11กำหนด Offset Distance  ใส่ค่าเป็น 14 cm (ระยะห่างของระนาบ)

1.12 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

1.13 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 2 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 14 cm

1.14 **สร้าง Plane 3** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 2 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบPlane 2

1.15 กำหนด Offset Distance ใส่ค่าเป็น 33 cm (ระยะห่างของระนาบ)

1.16 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

1.17 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 3 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 33 cm

1.18 **สร้าง Plane 4** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 3 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบ Plane 3

1.19 กำหนด Offset Distance ใส่ค่าเป็น 4 cm (ระยะห่างของระนาบ)

1.20 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

1.21 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 4 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 4 cm

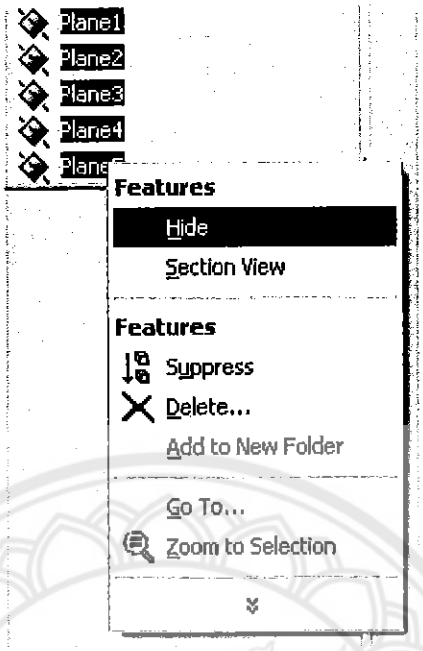
1.22 **สร้าง Plane 5** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 4 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบ Plane 4

1.23 กำหนด Offset Distance ใส่ค่าเป็น 3 cm (ระยะห่างของระนาบ)

1.24 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

1.25 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 5 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 3 cm

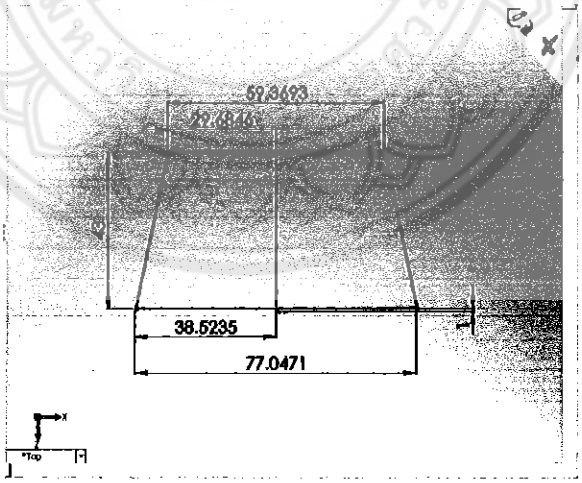
1.26 คลิกขวาที่ Plane 1, 2, 3, 4 และ 5 คลิก hide



1.27 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Top

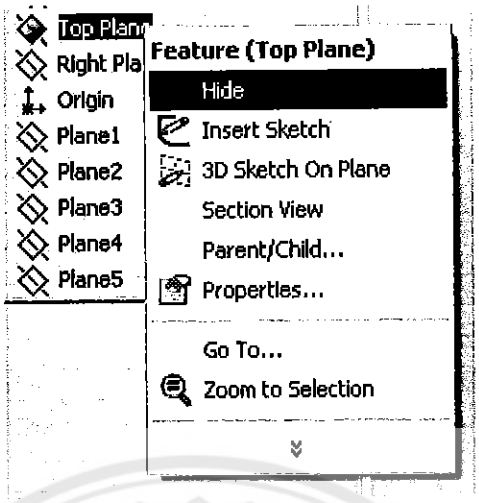
1.27.1 คลิกขวาบนระนาบ Top แล้วเลือก Insert Sketch โดยระนาบ Top จะหันมาตั้งฉากกันหน้าจอ

1.27.2 สร้างเส้นร่างดังรูปโดยใช้คำสั่ง Line และ Smart Dimension ดังรูป



1.27.3 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

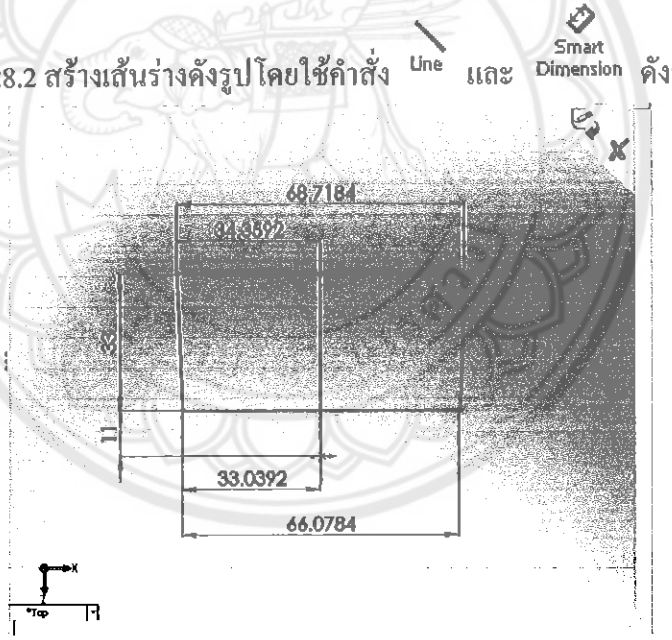
1.27.4 คลิกขวาที่ระนาบ Top แล้วคลิก Hide



1.28 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 1

1.28.1 คลิกขวาบนระนาบ Plane 1 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

1.28.2 สร้างเส้นร่างดังรูปโดยใช้คำสั่ง Line และ Smart Dimension ดังรูป

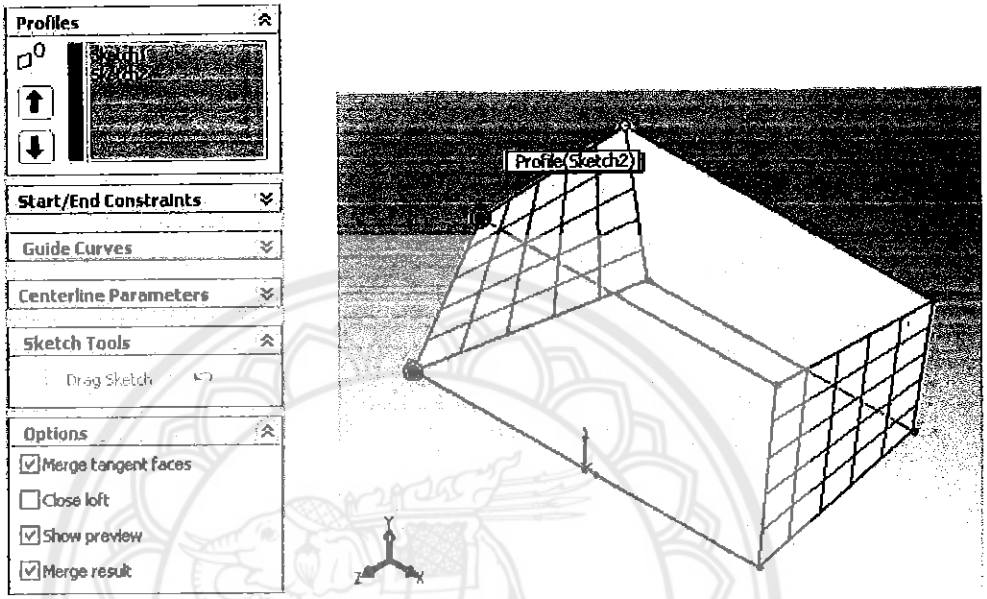


1.28.3 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

1.28.4 คลิกขวาที่ระนาบ Plane 1 แล้วคลิก Hide

1.29 คลิก Loft Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

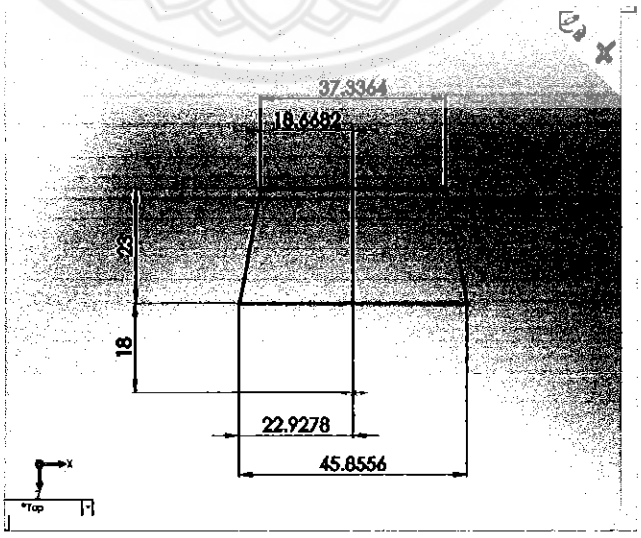
1.30 ในส่วนของช่อง Profiles นำเมาส์ไปคลิกเลือกเส้นร่างทั้ง 2 ที่ได้สร้างขึ้นใน Graphic Area ตามลำดับโดยให้คลิกเลือกบริเวณเดียวกันหรือแนวเดียวกันทั้งหมด ในส่วนของ Options คลิกเลือกตามรูปด้านล่าง



1.31 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง

1.32 คลิกขวาบนระนาบ Plane 1 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

1.33 สร้างเส้นร่างดังรูปโดยใช้คำสั่ง Line และ Smart Dimension ดังรูป



1.34 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

1.35 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

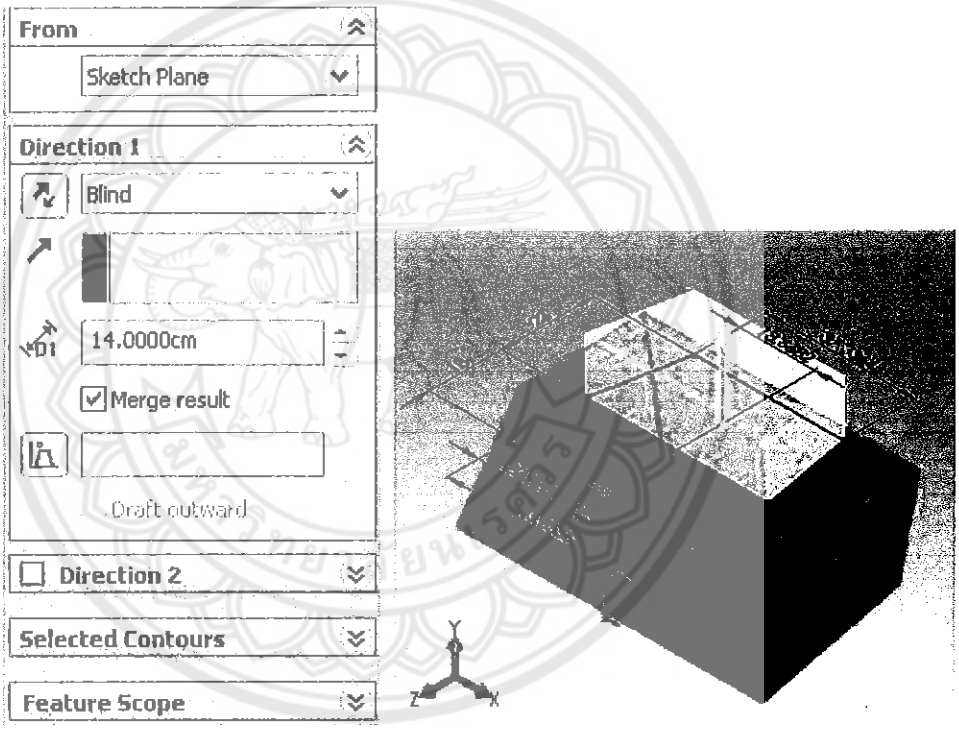
1.35.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

1.35.2 ในส่วนของ Direction 1

1.35.2.1) กำหนด End Condition เป็น Blind

1.35.2.2) กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 14 cm

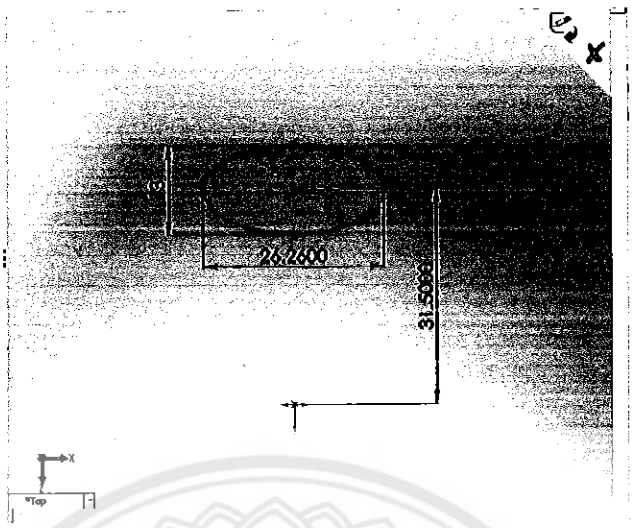
1.35.2.3) คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน



1.35.2.4) คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

1.36 คลิกขวาบนระนาบ Plane 2 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

1.37 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 2 โดยใช้คำสั่งEllipse และ Smart Dimension ตามขนาดดังรูปด้านล่าง



1.38 เมื่อสร้างเสร็จแล้ว คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

1.39 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

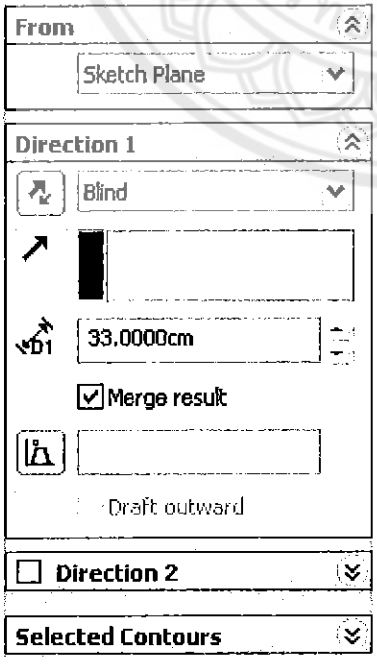
1.39.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

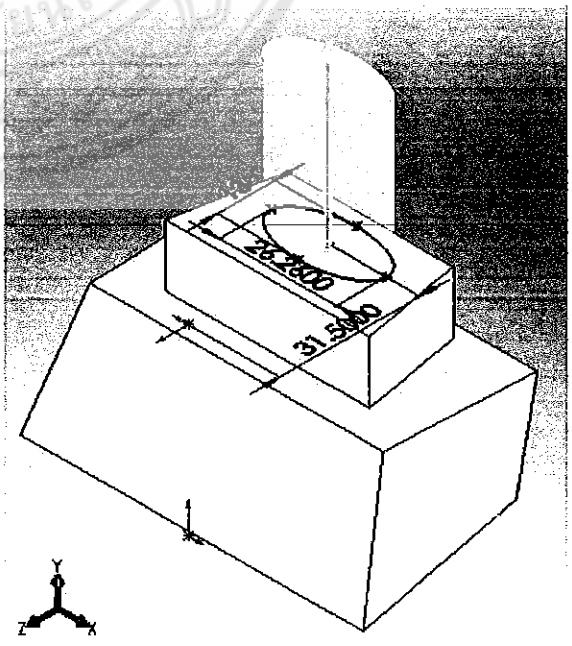
1.39.2 ในส่วนของ Direction 1

1.39.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

1.39.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 33 cm

1.39.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน

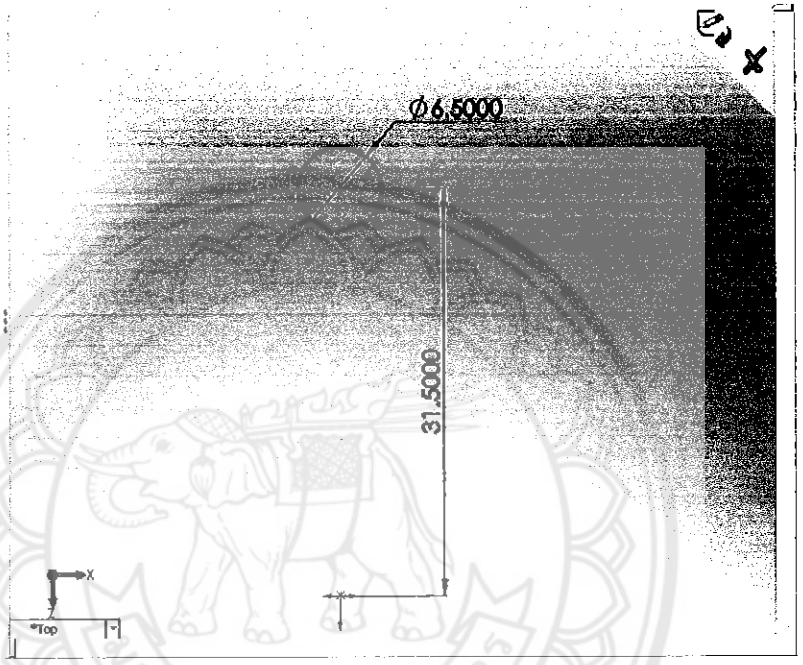




1.39.2.4 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

1.40 คลิกขวาบนระนาบ Plane 3 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

1.41 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 3 โดยใช้คำสั่ง Circle และ Smart Dimension ตามขนาดดังรูปด้านล่าง



1.42 เมื่อสร้างเสร็จแล้ว คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

1.43 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

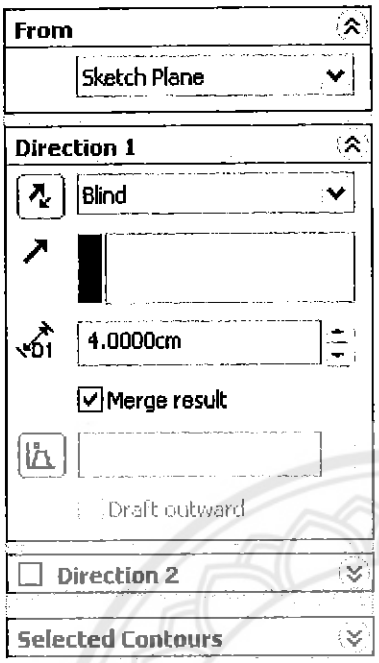
1.43.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

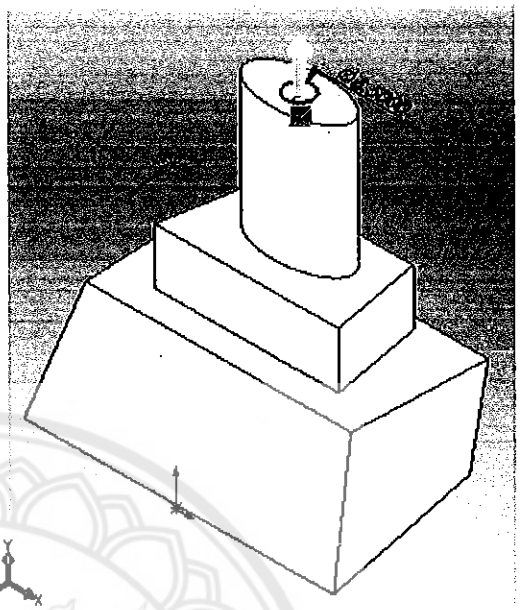
1.43.2 ในส่วนของ Direction 1

1.43.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

1.43.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 4 cm

1.43.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน

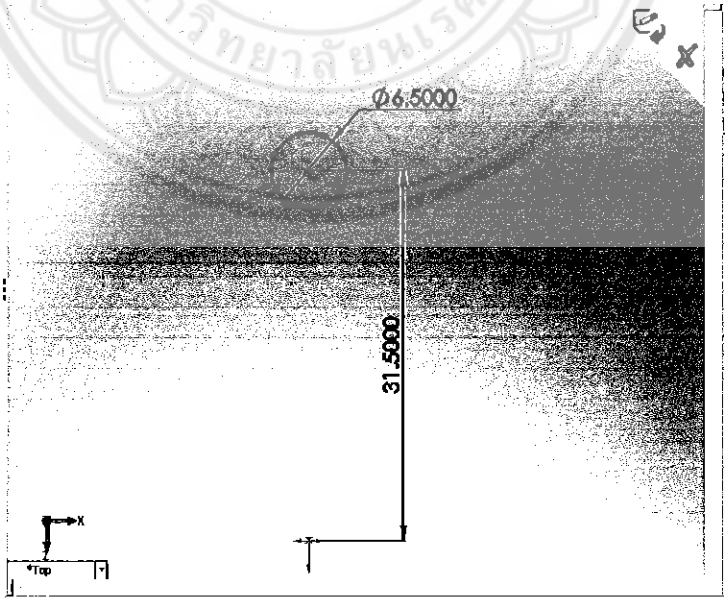




1.43.2.4 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

1.44 คลิกขวาบนระนาบ Plane 4 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

1.45 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 4 โดยใช้คำสั่ง Circle และ Smart Dimension ตามขนาดดังรูปด้านล่าง



1.46 เมื่อสร้างเสร็จแล้ว คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

1.47 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

1.47.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

1.47.2 ในส่วนของ Direction 1

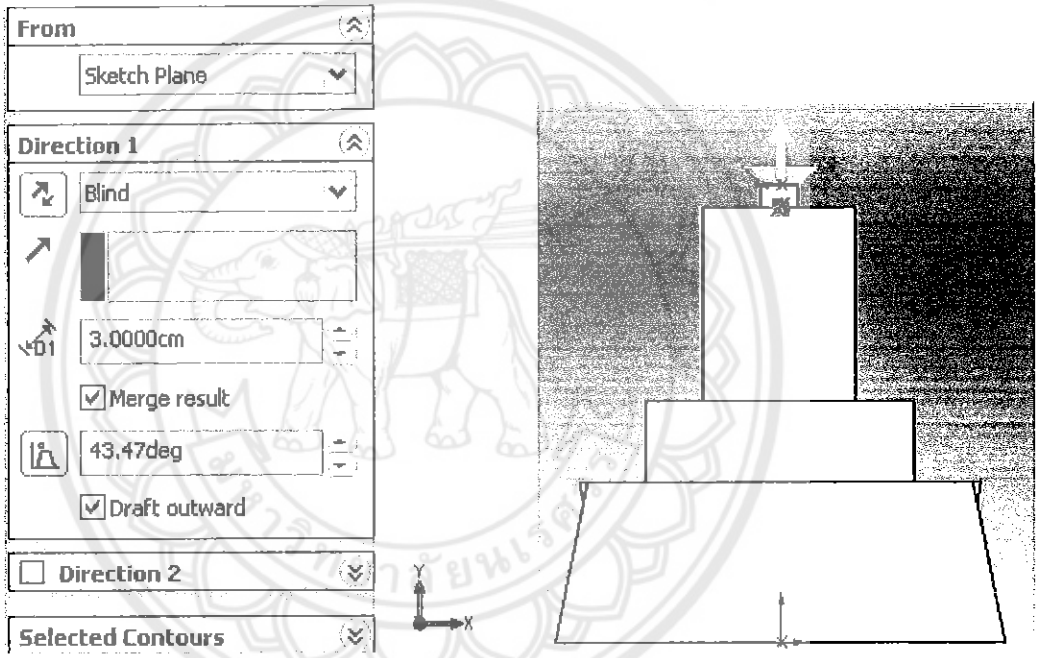
1.47.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

1.47.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 3 cm

1.47.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน

1.47.2.4 กำหนดมุมยืดเรียว Draft เป็น43.47 องศา

1.47.2.5 คลิกเลือก Draft outward

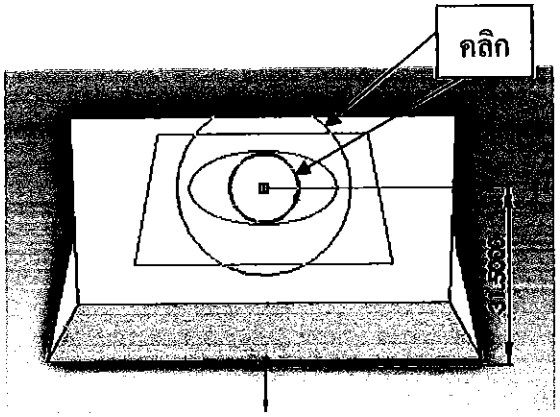


1.47.2.6 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

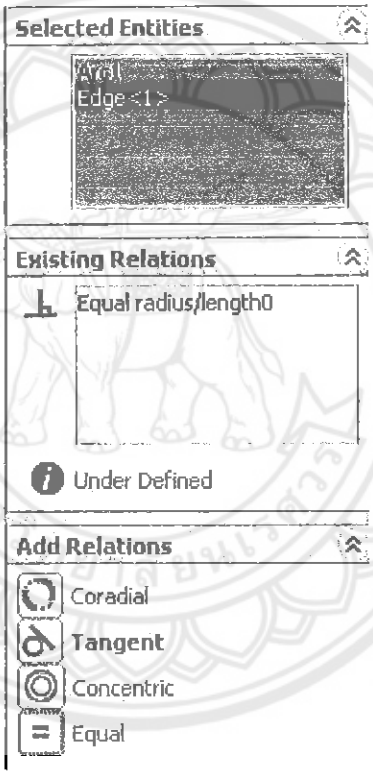
1.48 คลิกขวาบนระนาบ Plane 5 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

1.49 เขียนวงกลมขึ้นมา 1 วง โดยใช้คำสั่ง Circle และใช้ Smart Dimension วัดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ห่างจากจุด Origin เท่ากับ 31.5 cm

1.50 คลิก Add Relations จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมาในส่วนของกรอบ Selection Entities ให้นำเมาส์ไปคลิกที่เส้นร่างของของวงกลม และเส้นขอบวงกลมด้านบน ดังรูป



1.51 ในส่วนของกรอบ Add Relations กำหนดความสัมพันธ์เป็น Equal = ให้เส้นร่างของวงกลมที่สร้างขึ้นมาใหม่มีขนาดเท่ากับเส้นขอบวงกลมด้านบน



1.52 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง

1.53 คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Featuresจะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

1.54 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

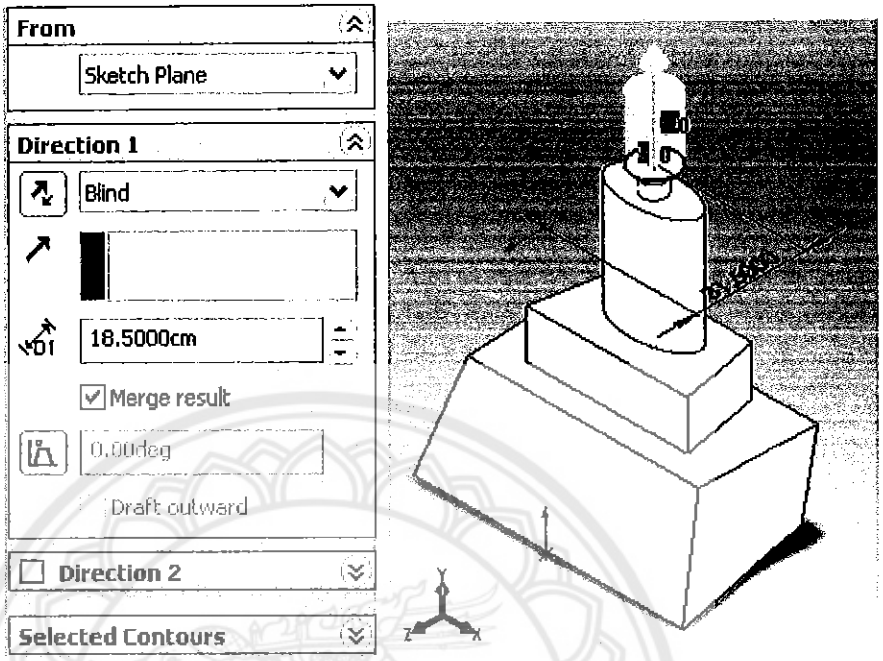
1.54.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

1.54.2 ในส่วนของ Direction 1

1.54.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

1.54.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 18.5 cm

1.54.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน



1.54.2.4 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

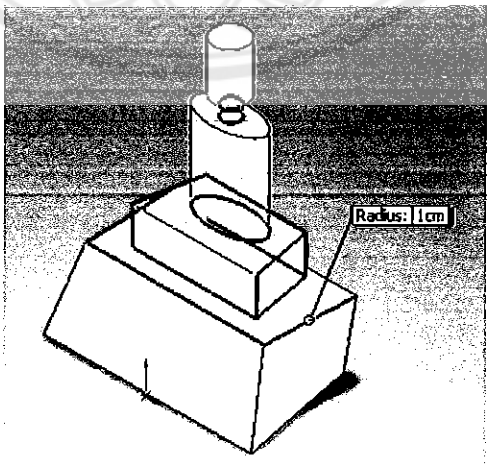
1.55 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

1.55.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

1.55.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

1.55.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 1cm

1.55.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



1.55.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

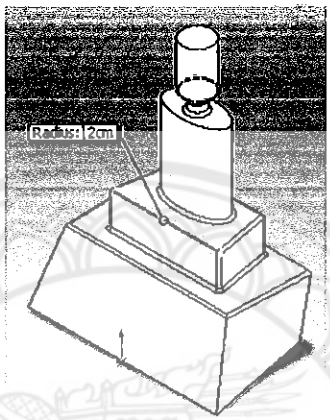
1.56 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

1.56.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

1.56.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

1.56.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 2 cm

1.56.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



1.56.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

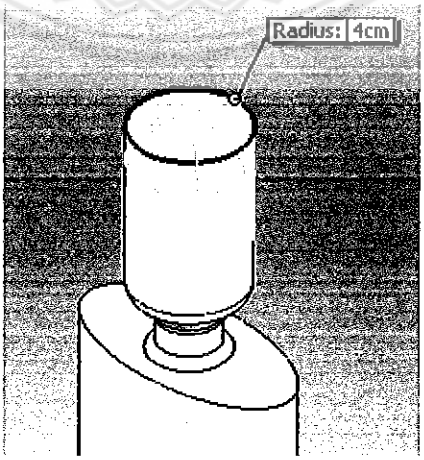
1.57 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

1.57.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

1.57.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

1.57.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 4 cm

1.57.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



1.57.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

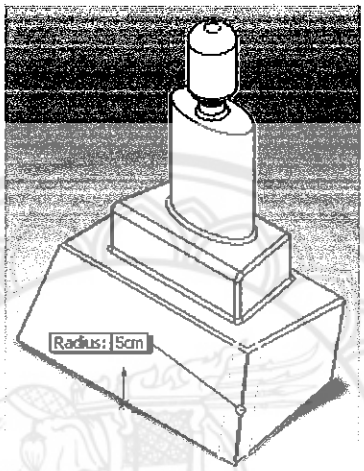
1.58 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

1.58.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

1.58.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

1.58.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 5 cm

1.58.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



1.58.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

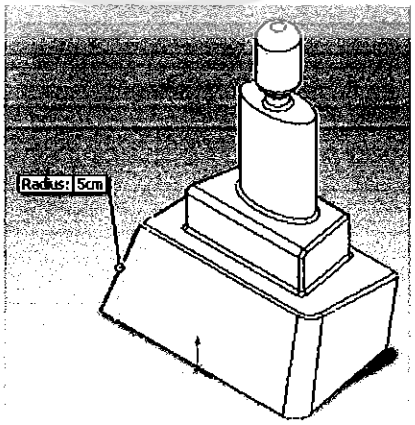
1.59 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

1.59.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

1.59.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

1.59.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 5 cm

1.59.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



1.59.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

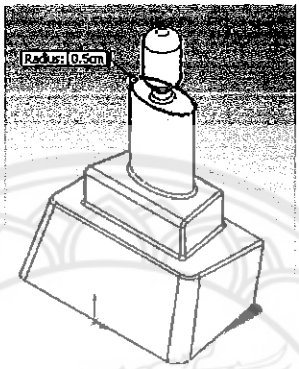
1.60 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

1.60.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

1.60.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

1.60.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 0.5 cm

1.60.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



1.60.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

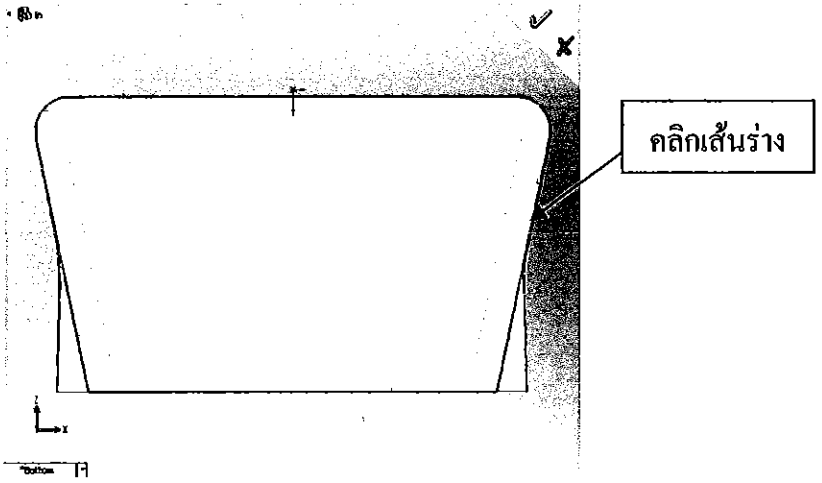
1.61 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : in 1

1.62 คลิกปุ่ม Save

1.63 คลิกขวาที่ระนาบ Top เลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Bottom เพื่อเขียนเส้นร่าง

1.64 คลิกคำสั่ง Offset ทางซ้ายมือจะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Offset ขึ้นมา

1.65 ที่ช่อง ใส่ระยะ offset เป็น 4 cm ให้นำเมาส์ไปคลิกที่เส้นร่างดังรูป คลิกเครื่องหมายถูกข้างหน้า Reverse ☑Reverse ออก



1.66 คลิก OK เพื่อยอมรับ และคลิก Exit Sketch เพื่อออกจากคำสั่ง

1.67 คลิกระนาบ Top แล้วเลือก Insert→Reference Geometry →Plane จะมีใบรายการ Plane แสดงขึ้นมา

1.68 ที่ช่อง Offset Distance 22.4000cm ใส่ค่าเป็น 22.4 cm (ระยะห่างของระนาบ)

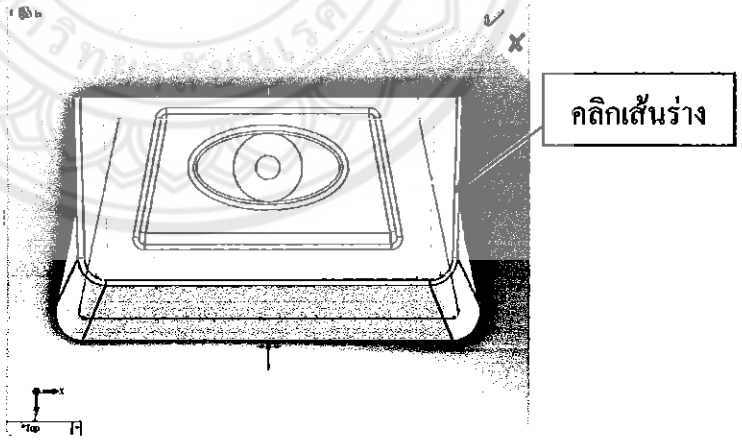
1.69 ที่ช่อง Number of Planes to Create 1 ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

1.70 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 6 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 22.4 cm

1.71 คลิกขวาบนระนาบ Plane 6 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

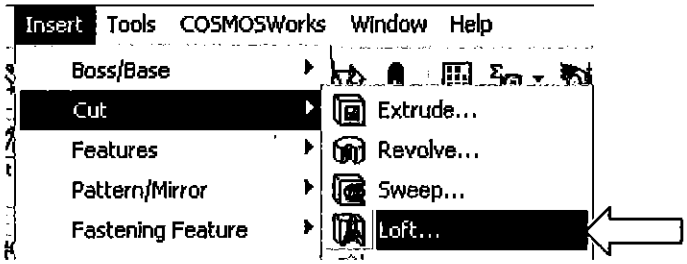
1.72 คลิกคำสั่ง Offset ทางซ้ายมือจะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Offset ขึ้นมา

1.73 ที่ช่อง ใส่ระยะ offset เป็น 4 cm ให้นำเมาส์ไปคลิกที่เส้นร่างดังรูป คลิกเครื่องหมายถูกข้างหน้า Reverse ☑Reverse ออก

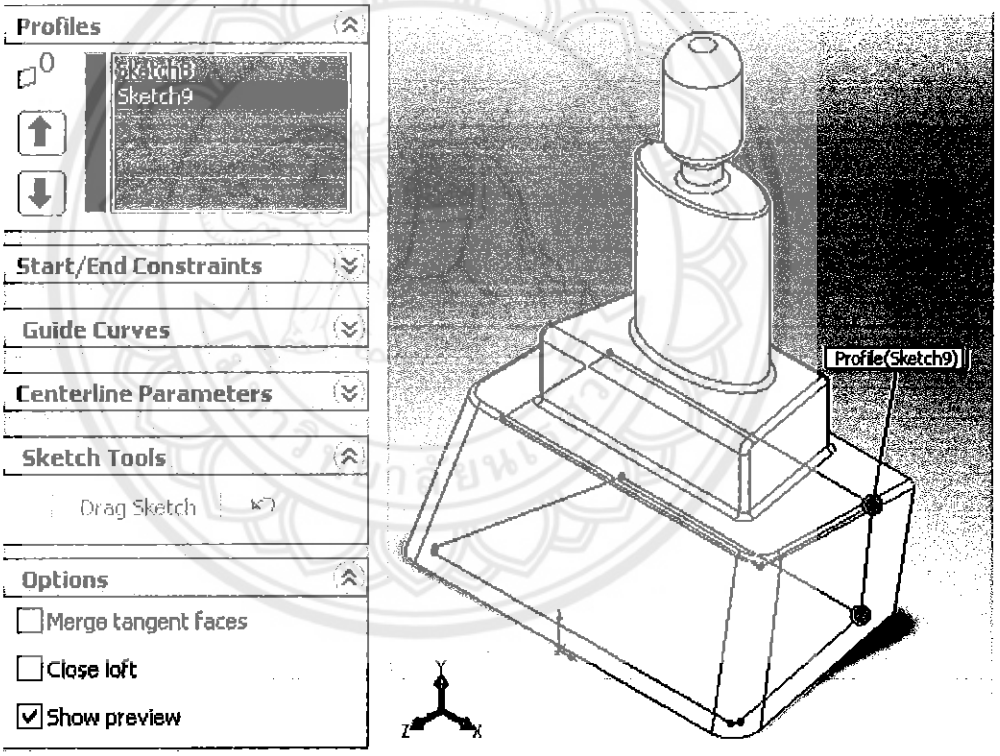


1.74 คลิก OK เพื่อยอมรับ และคลิก Exit Sketch เพื่อออกจากคำสั่ง

1.75 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →Insert → Cut →Loft...จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา



1.76 ในส่วนของช่อง Profiles นำเมาส์ไปคลิกเลือกเส้นร่างทั้ง 2 ที่ได้สร้างขึ้นใน Graphic Area ตามลำดับ โดยให้คลิกเลือกบริเวณเดียวกันหรือแนวเดียวกันทั้งหมด ในส่วนของ Options คลิกเลือกตามรูปด้านล่าง



1.77 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง

1.78 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →Save As.. เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in :ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : in

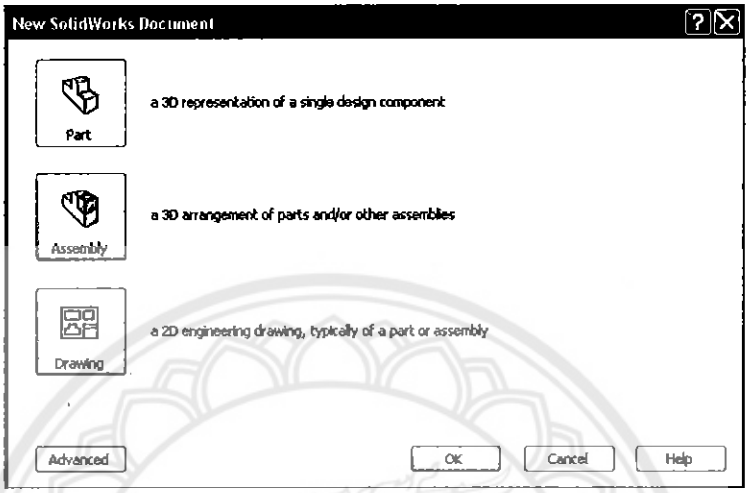
1.79 คลิกปุ่ม Save

1.80 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

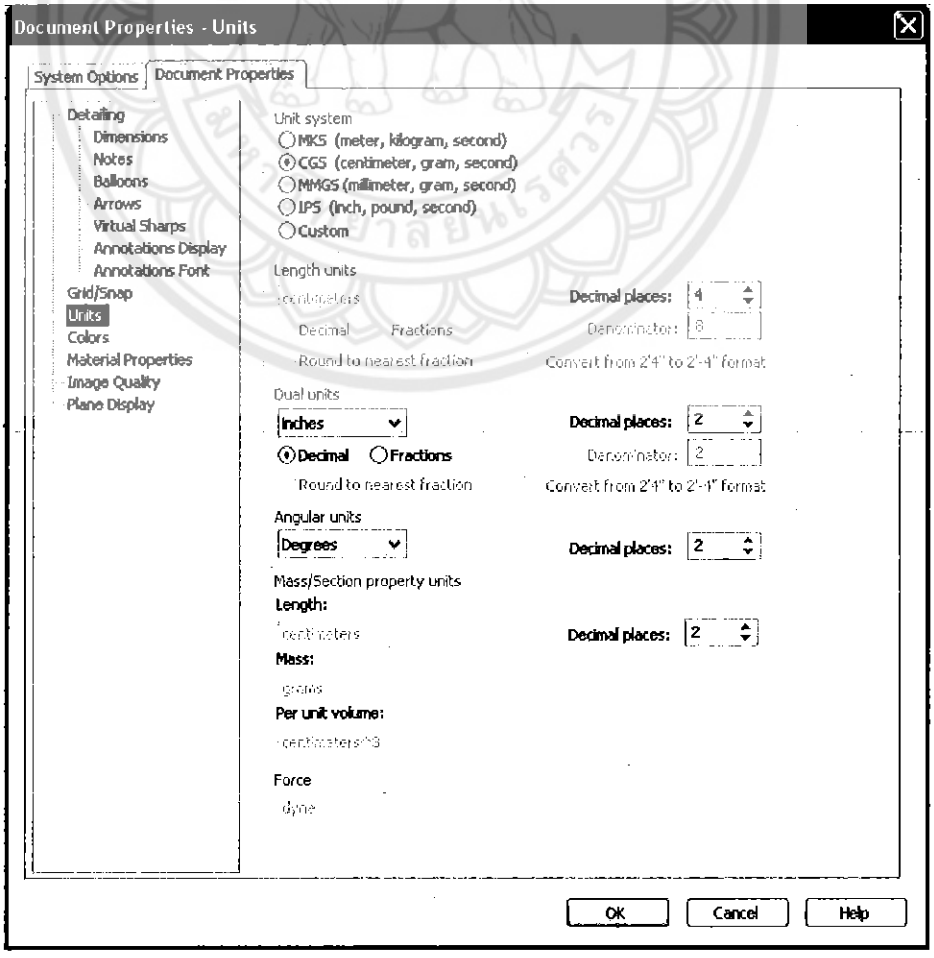
2. สร้างชั้นขี้ผึ้ง

2.1 คลิก New ☐ จะปรากฏ Dialog box New SolidWorks Document ขึ้นมา

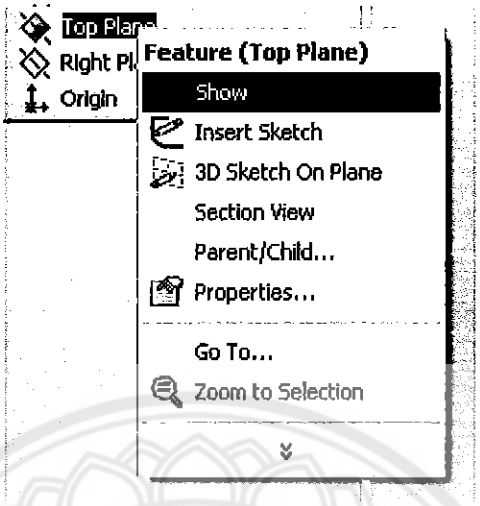
2.2 เลือกคลิก Part จากนั้นคลิกปุ่ม OK



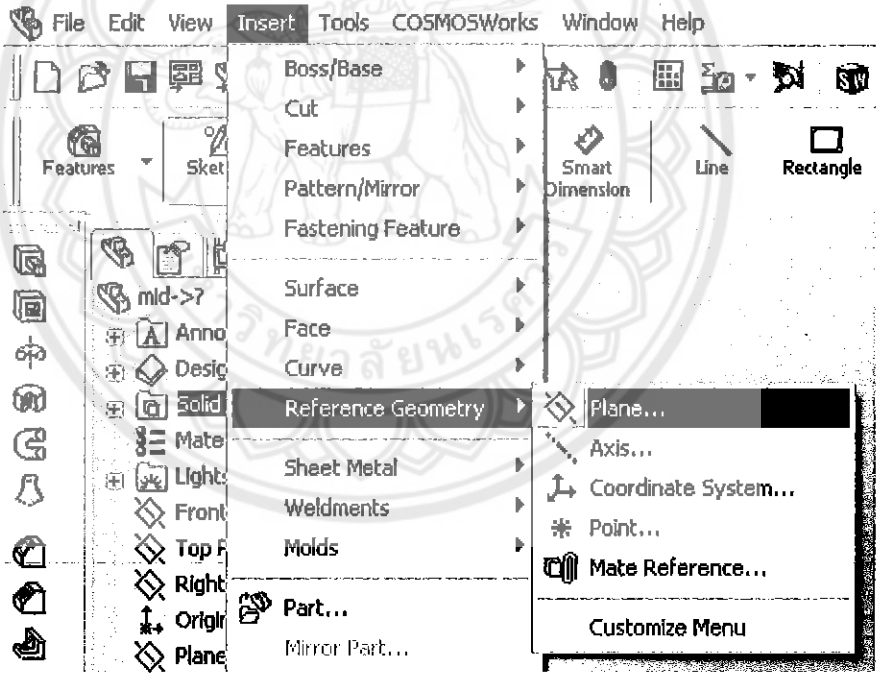
2.3 คลิกปุ่ม Options [Tab] Document Properties ทำการเลือก Units คลิกเลือก CGS (centimeter, gram, second) ปรับ Decimal places ให้เท่ากับ 4 จากนั้นคลิกปุ่ม OK



2.4 คลิกขวาที่ระนาบ Top แล้วเลือก Show จากเมนูลัด



2.5 คลิกระนาบ Top แล้วเลือก Insert→Reference Geometry →Plane จะมีใบรายการ Plane แสดงขึ้นมา



2.6 ที่ช่อง Offset Distance

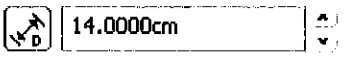
ใส่ค่าเป็น 28.4 cm (ระยะห่างของระนาบ)

2.7 ที่ช่อง Number of Planes to Create

ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

2.8 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 1 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 28.4 cm

2.9 **สร้าง Plane 2** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 1 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบ Plane 1

2.10 กำหนด Offset Distance  ใส่ค่าเป็น 14 cm (ระยะห่างของระนาบ)

2.11 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

2.12 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 2 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 14 cm

2.13 **สร้าง Plane 3** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 2 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบPlane 2

2.14 กำหนด Offset Distance ใส่ค่าเป็น 33 cm (ระยะห่างของระนาบ)

2.15 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

2.16 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 3 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 33 cm

2.17 **สร้าง Plane 4** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 3 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบ Plane 3

2.18 กำหนด Offset Distance ใส่ค่าเป็น 3 cm (ระยะห่างของระนาบ)

2.19 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

2.20 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 4 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 3 cm

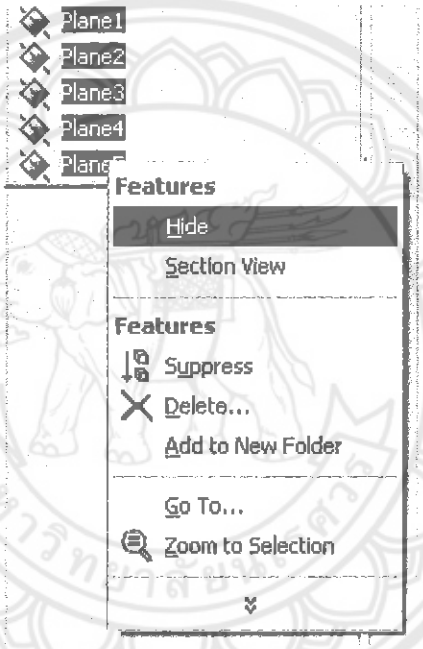
2.21 **สร้าง Plane 5** โดยกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิก Plane 4 (คลิกที่เส้นขอบ) จะเป็นการ Copy ระนาบ Plane 4

2.22 กำหนด Offset Distance ใส่ค่าเป็น 3 cm (ระยะห่างของระนาบ)

2.23 ที่ช่อง Number of Planes to Create ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

2.24 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 5 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 3 cm

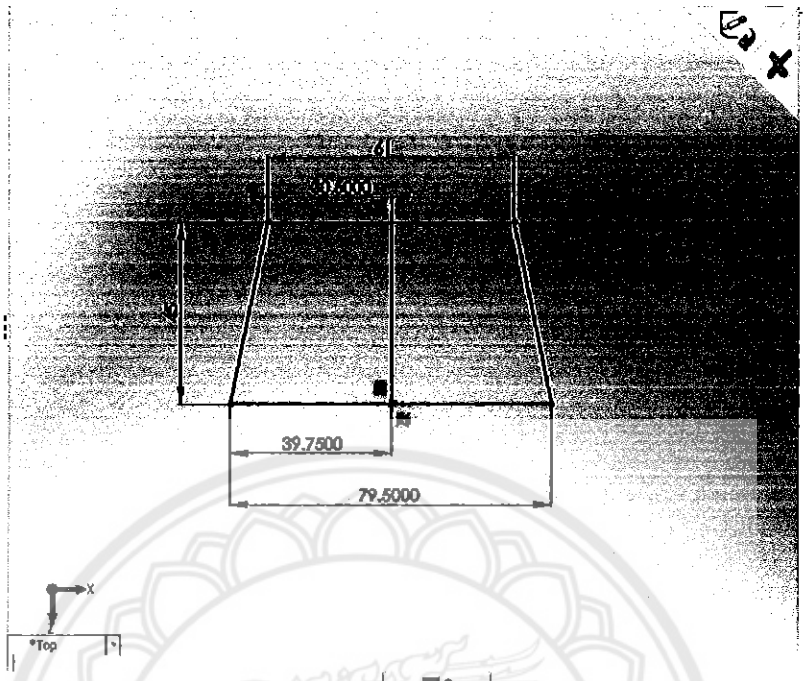
2.25 คลิกขวาที่ Plane 1, 2, 3, 4 และ 5 คลิก hide



2.26 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Top

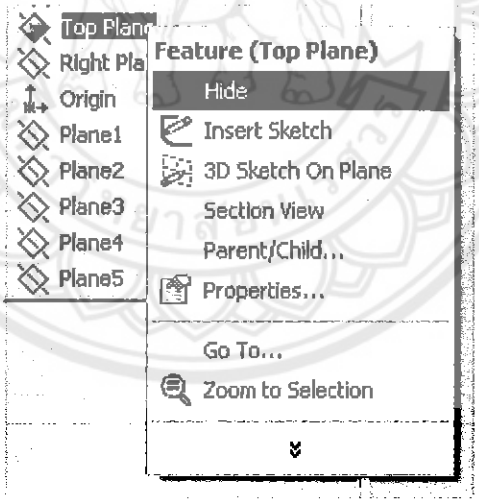
2.26.1 คลิกขวาบนระนาบ Top แล้วเลือก Insert Sketch โดยระนาบ Top จะหันมาตั้งฉากกันหน้าจอ

2.26.2 สร้างเส้นร่างดังรูปโดยใช้คำสั่ง และ ดังรูป



2.26.3 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

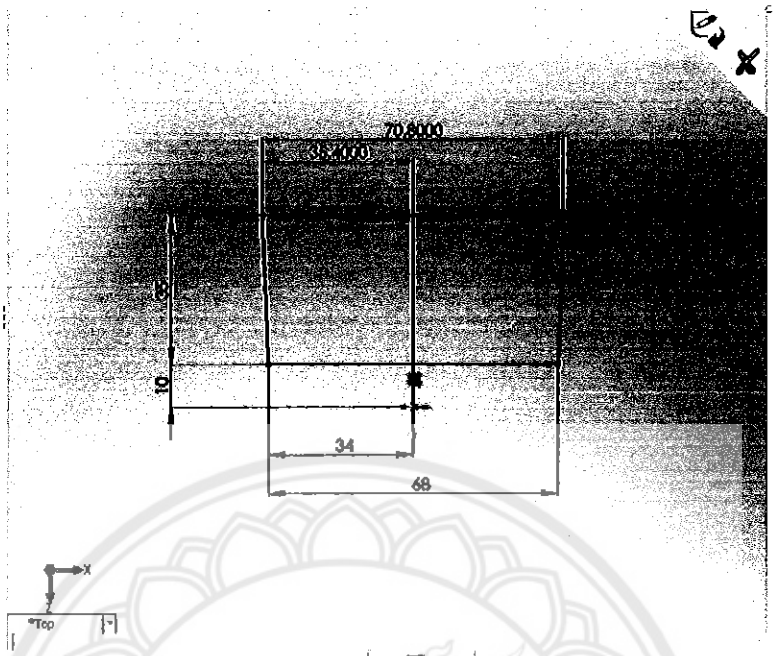
2.26.4 คลิกขวาที่ระนาบ Top แล้วคลิก Hide



2.27 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 1

2.27.1 คลิกขวาบนระนาบ Plane 1 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

2.27.2 สร้างเส้นร่างดังรูปโดยใช้คำสั่ง Line และ Smart Dimension ดังรูป

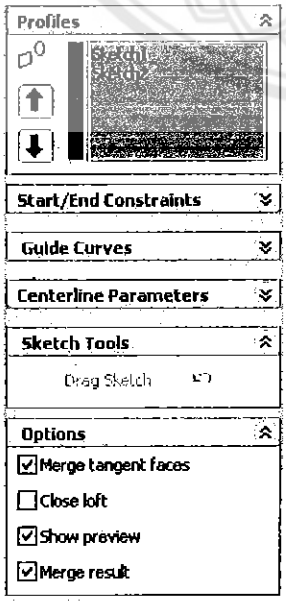


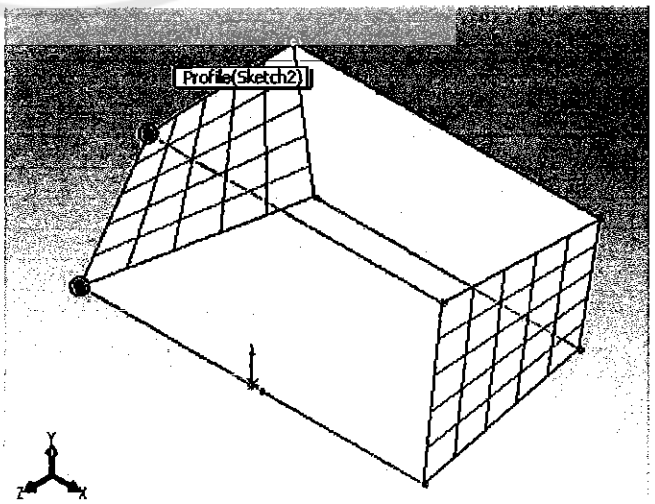
2.27.3 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

2.27.4 คลิกขวาที่ระนาบ Plane 1 แล้วคลิก Hide

2.28 คลิก Loft Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

2.29 ในส่วนของช่อง Profiles นำเมาส์ไปคลิกเลือกเส้นร่างทั้ง 2 ที่ได้สร้างขึ้นใน Graphic Area ตามลำดับ โดยให้คลิกเลือกบริเวณเดียวกันหรือแนวเดียวกันทั้งหมด ในส่วนของ Options คลิกเลือกตามรูปด้านล่าง

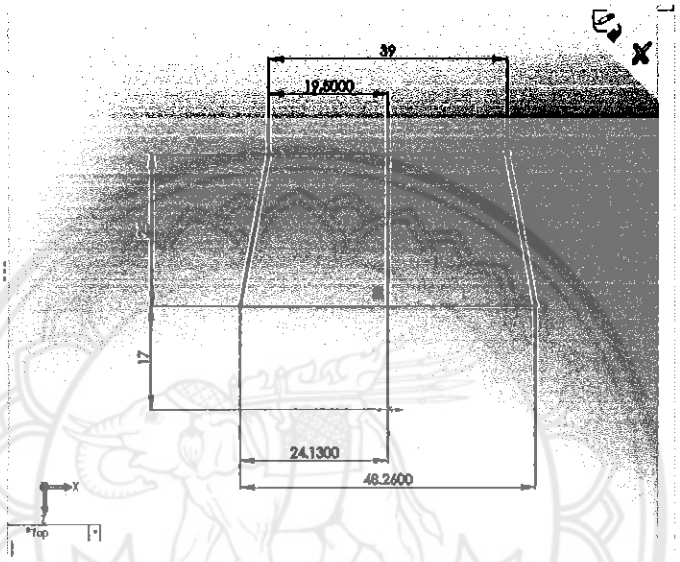




2.30 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง

2.31 คลิกขวาบนระนาบ Plane 1 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

2.32 สร้างเส้นร่างดังรูปโดยใช้คำสั่ง Line และ Smart Dimension ดังรูป



2.33 เมื่อสร้างเสร็จแล้ว คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Featuresจะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

2.34 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

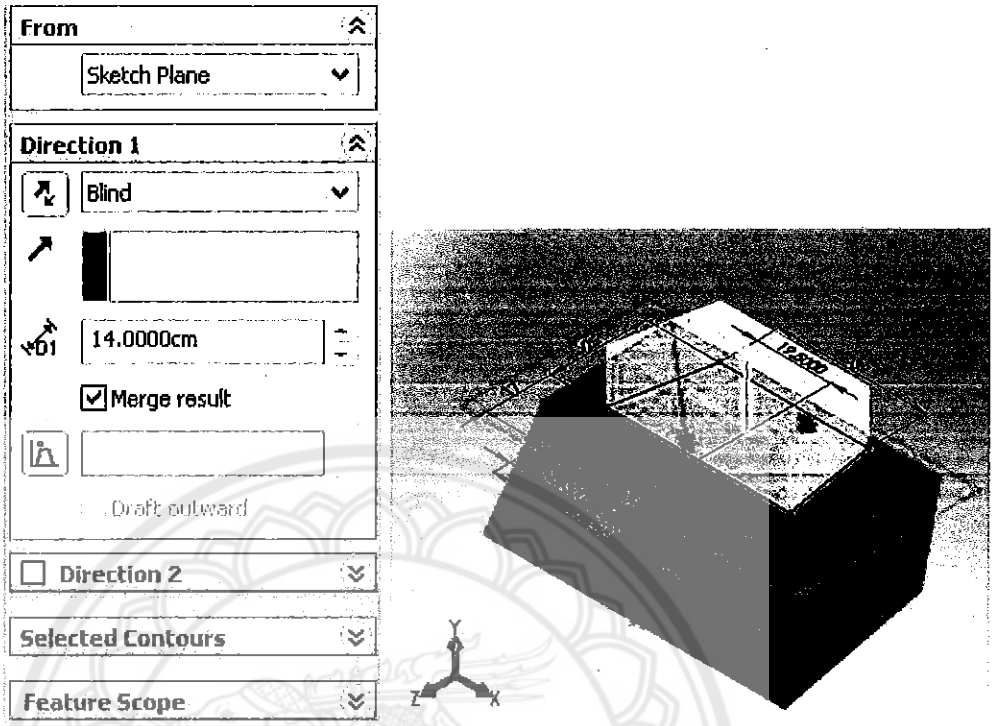
2.34.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

2.34.2 ในส่วนของ Direction 1

2.34.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

2.34.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 14 cm

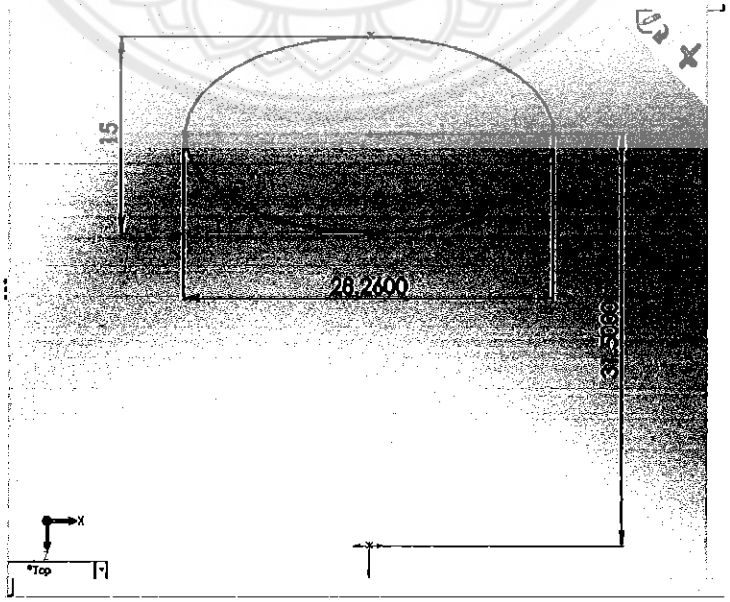
2.34.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน



2.34.2.4 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

2.35 คลิกขวาบนระนาบ Plane 2 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

2.36 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 2 โดยใช้คำสั่ง Ellipse และ Smart Dimension ตามขนาดดังรูปด้านล่าง



2.37 เมื่อสร้างเสร็จแล้ว คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

2.38 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

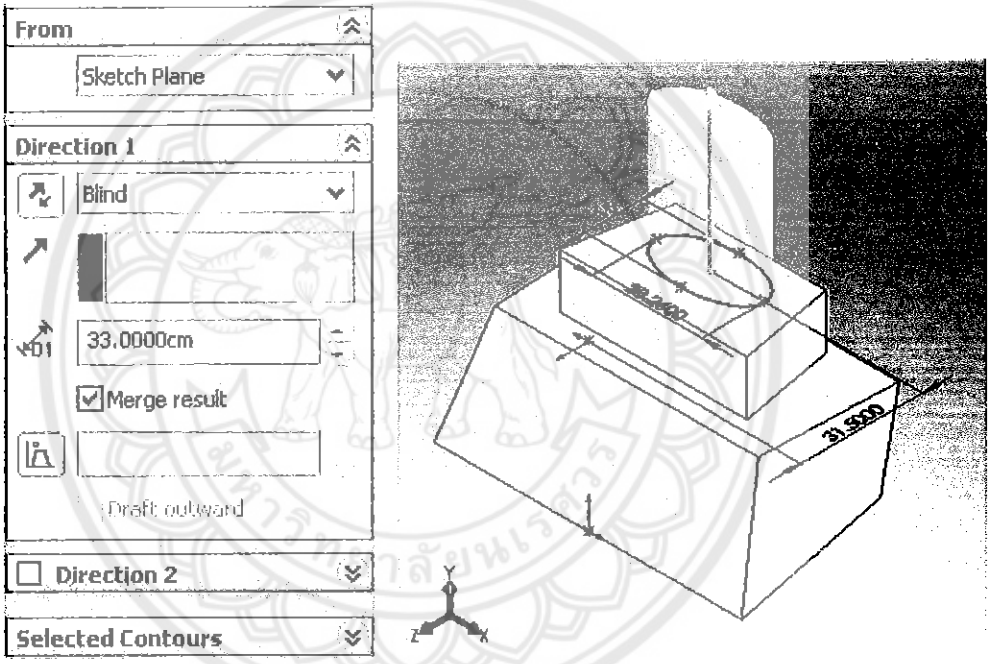
2.38.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

2.38.2 ในส่วนของ Direction 1

2.38.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

2.38.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 33 cm

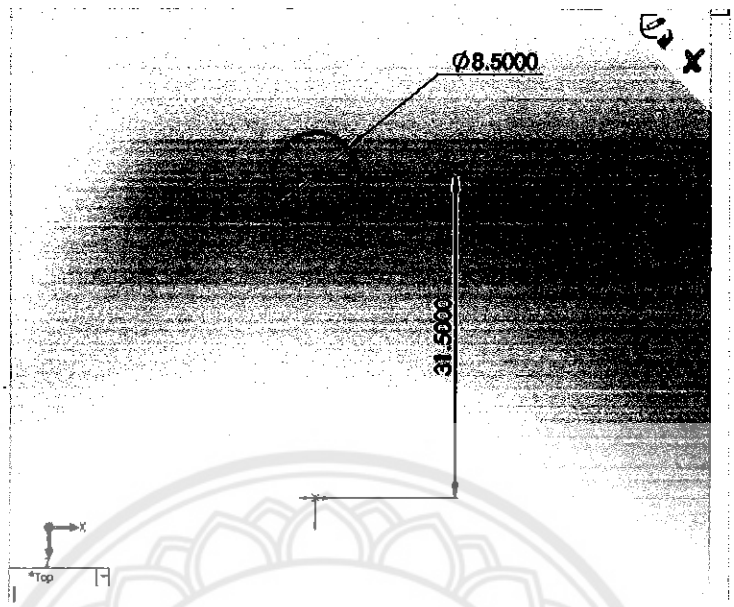
2.38.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน



2.38.2.4 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

2.39 คลิกขวาบนระนาบ Plane 3 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

2.40 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 3 โดยใช้คำสั่ง Circle และ Smart Dimension ตามขนาดดังรูปด้านล่าง



2.41 เมื่อสร้างเสร็จแล้ว คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Featuresจะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

2.42 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

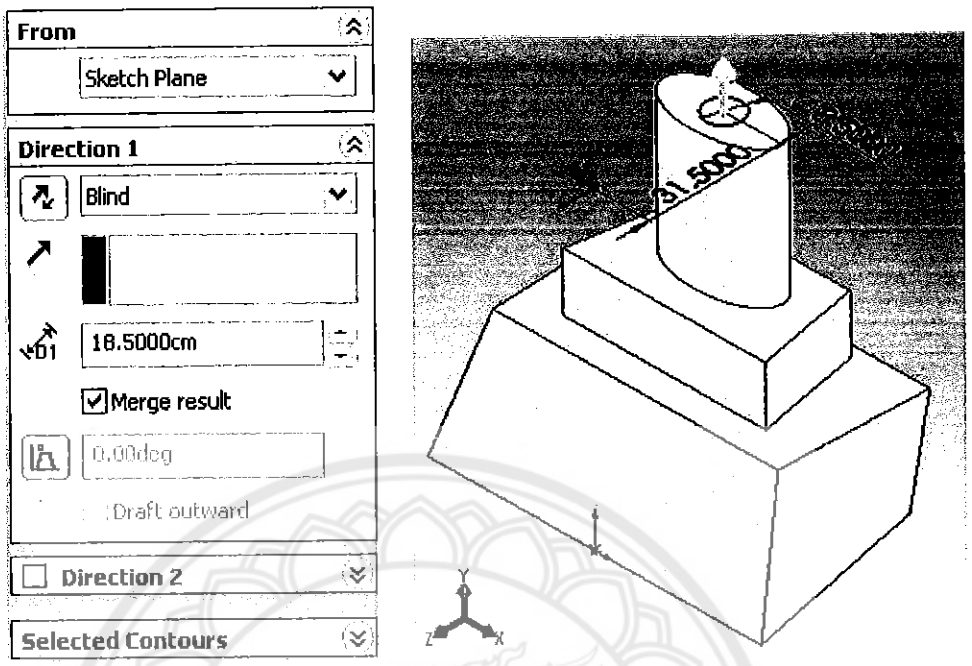
2.42.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

2.42.2 ในส่วนของ Direction 1

2.42.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

2.42.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 3 cm

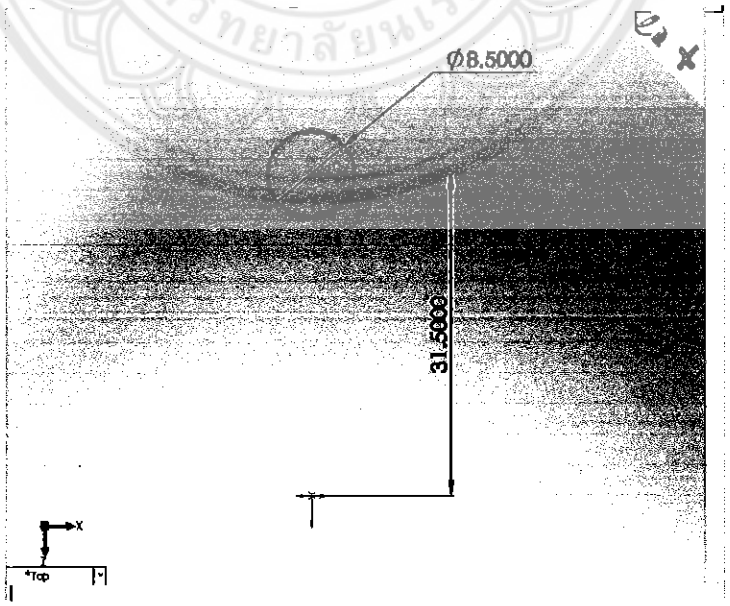
2.42.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน



2.42.2.4 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

2.43 คลิกขวาบนระนาบ Plane 4 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

2.44 สร้างเส้นร่างบนระนาบ Plane 4 โดยใช้คำสั่ง Circle และ Smart Dimension ตามขนาดดังรูปด้านล่าง



2.45 เมื่อสร้างเสร็จแล้ว คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Featuresจะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

2.46 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

2.46.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

2.46.2 ในส่วนของ Direction 1

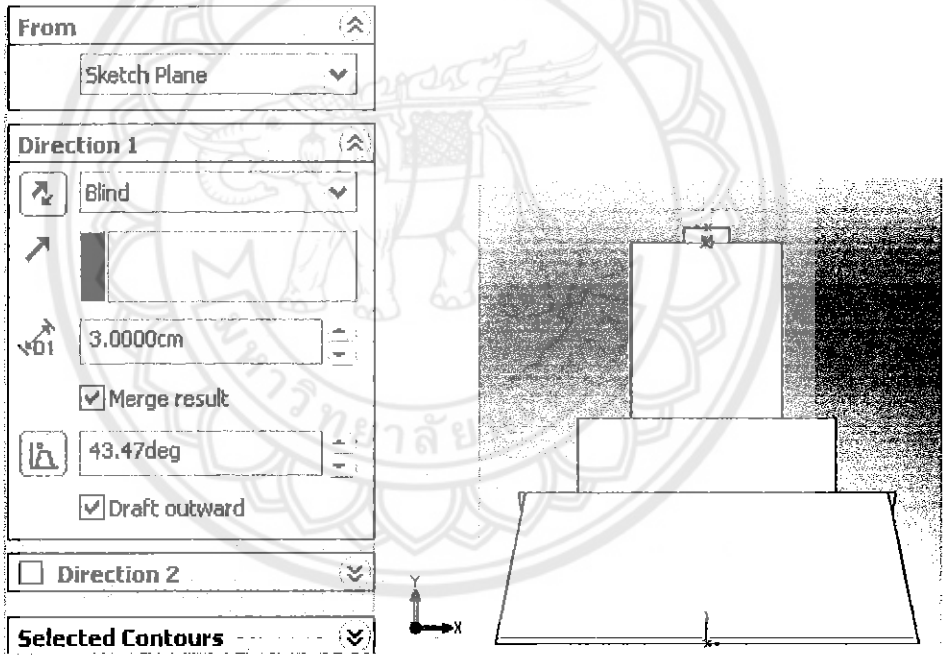
2.46.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

2.46.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 3 cm

2.46.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน

2.46.2.4 กำหนดมุมยืดเรียว Draft เป็น43.47 องศา

2.46.2.5 คลิกเลือก Draft outward

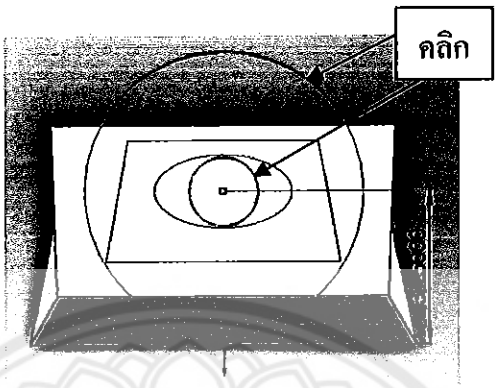


2.46.2.6 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

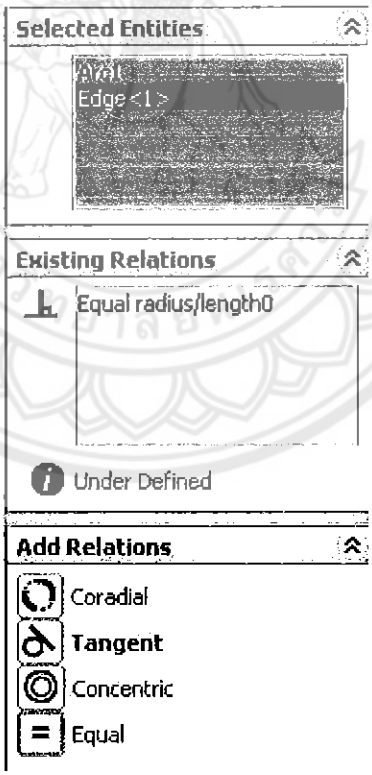
2.47 คลิกขวาบนระนาบ Plane 5 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Top เพื่อเขียนเส้นร่าง

2.48 เขียนวงกลมขึ้นมา 1 วง โดยใช้คำสั่ง Circle และ Smart Dimension ใช้วัดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ห่างจากจุด Origin เท่ากับ 31.5 cm

2.49 คลิก Add Relations จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมาในส่วนของกรอบ Selection Entities ให้นำเมาส์ไปคลิกที่เส้นร่างของของวงกลม และเส้นขอบวงกลมด้านบน ดังรูป



2.50 ในส่วนของกรอบ Add Relations กำหนดความสัมพันธ์เป็น Equal ให้เส้นร่างของวงกลมที่สร้างขึ้นมาใหม่มีขนาดเท่ากับเส้นขอบวงกลมด้านบน



2.51 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง

2.52 คลิก Extrude Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Featuresจะมีความหนาขึ้นมาในแนวแกน Y

2.53 ทางซ้ายมือจะแสดง ใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Extruded ขึ้นมา

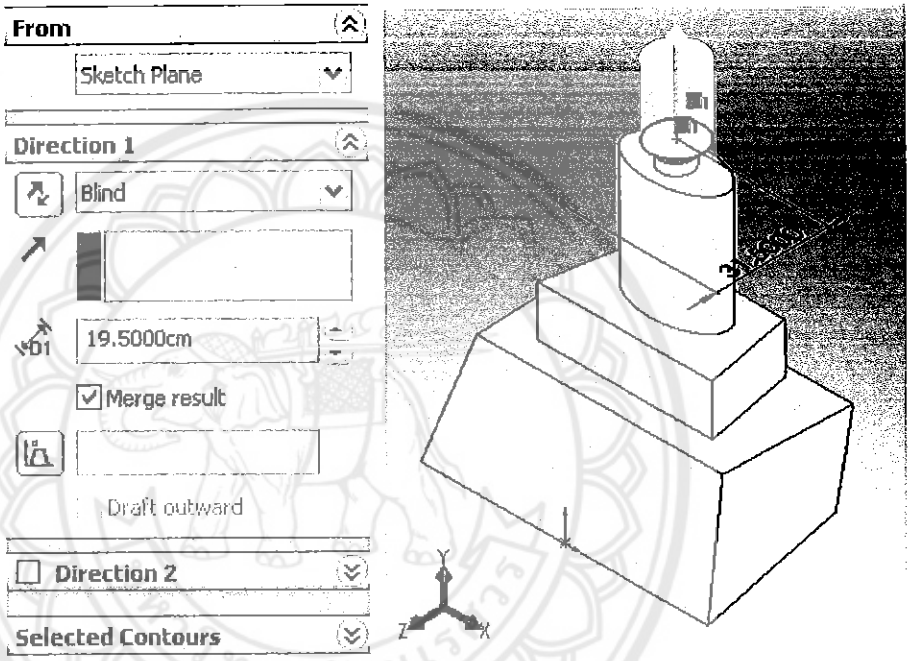
2.53.1 ในส่วนของ From กำหนด Start Condition เป็น Sketch Plane

2.53.2 ในส่วนของ Direction 1

2.53.2.1 กำหนด End Condition เป็น Blind

2.53.2.2 กำหนดระยะการยืดที่ Depth เป็น 19.5 cm

2.53.2.3 คลิกเลือก Merge result เพื่อให้ชิ้นงานรวมเป็นชิ้นเดียวกัน



2.53.2.4 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง Extrude

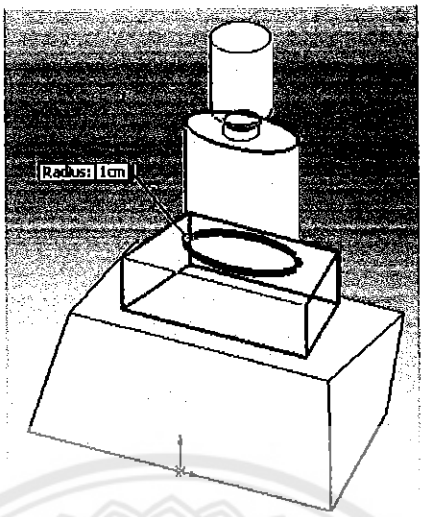
2.54 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

2.54.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

2.54.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

2.54.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 1cm

2.54.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



2.54.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

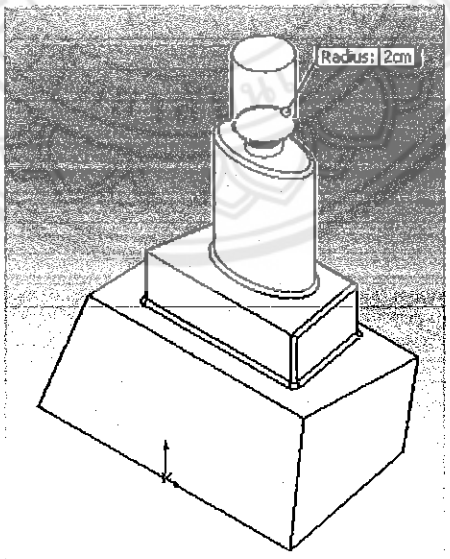
2.55 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

2.55.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

2.55.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

2.55.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 2 cm

2.55.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



2.55.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

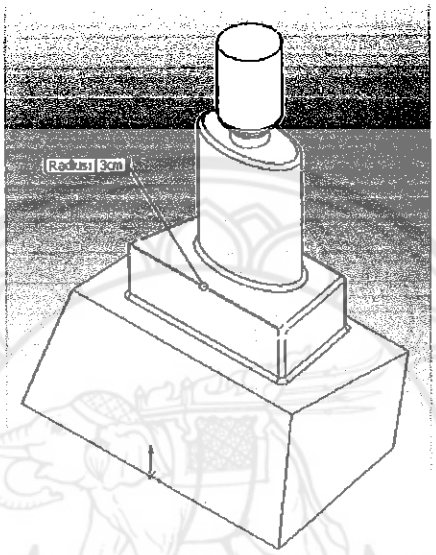
2.56 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

2.56.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

2.56.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

2.56.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 3 cm

2.56.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



2.56.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

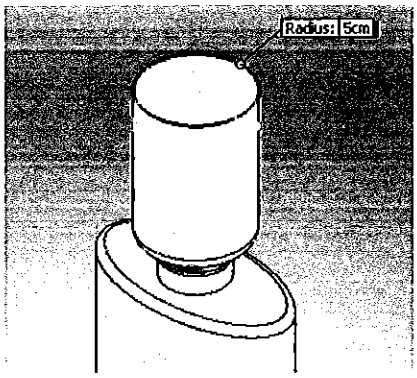
2.57 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

2.57.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

2.57.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

2.57.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 5 cm

2.57.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



2.57.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

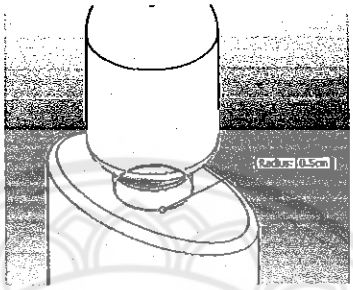
2.58 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

2.58.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

2.58.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

2.58.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 0.5 cm

2.58.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



2.58.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

2.59 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in :ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : mid 1

2.60 คลิกปุ่ม Save

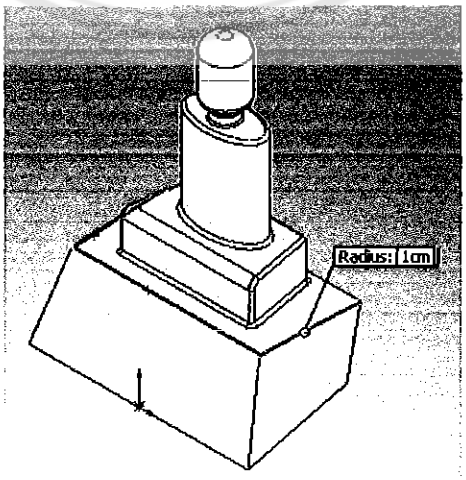
2.61 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

2.61.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

2.61.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

2.61.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 1 cm

2.61.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



2.61.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

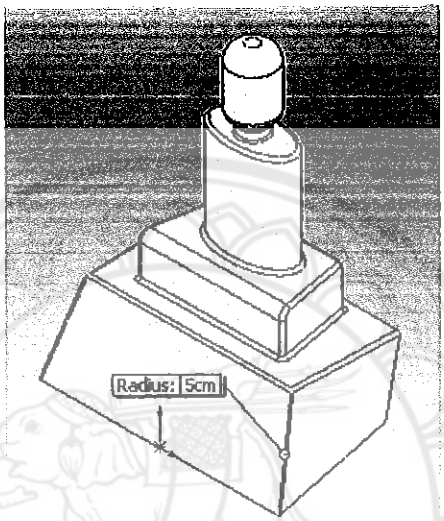
2.62 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

2.62.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

2.62.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

2.62.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 5 cm

2.62.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



2.62.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

2.63 คลิก File→Save As เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : mid

2.64 คลิกปุ่ม Save

2.65 คลิก File→Save As เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : mid 2

2.66 คลิกปุ่ม Save

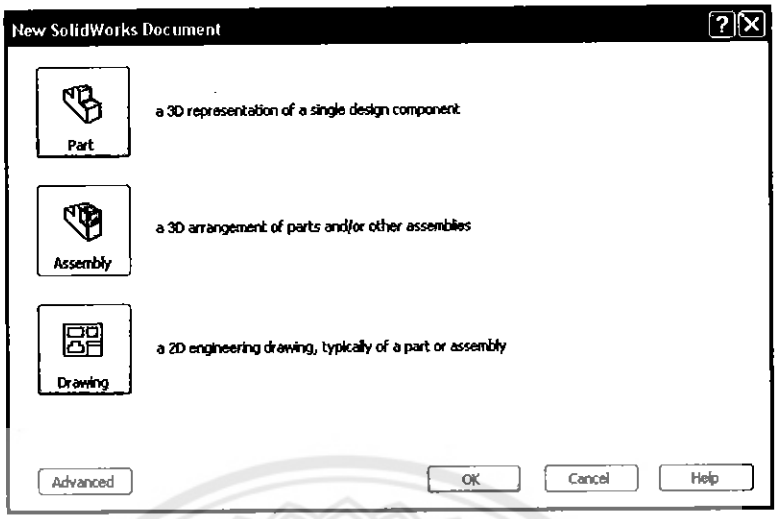
2.67 คลิก File→Save As เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : mid 3

2.68 คลิกปุ่ม Save

2.69 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

2.70 คลิก New จะปรากฏ Dialog box New SolidWorks Document ขึ้นมา

2.71 เลือกคลิก Assembly จากนั้นคลิกปุ่ม OK



2.72 จะเข้าสู่คำสั่ง Insert Component คลิกปุ่ม Browse

2.73 เลือกชิ้นงาน C:\Project > in 1

2.74 คลิกปุ่ม open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่าง Assembly

2.75 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →View →Origin เพื่อแสดงจุดกำเนิด จากนั้นนำเมาส์ไปวางที่ Origin คลิกเมาส์ซ้ายเพื่อวางชิ้นงาน

2.76 คลิก Insert Component จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

2.77 ในส่วนของกรอบ Part/Assembly to Insert

2.77.1 คลิกปุ่ม Browse จะปรากฏกล่องข้อความ Open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่างการประกอบภาพ

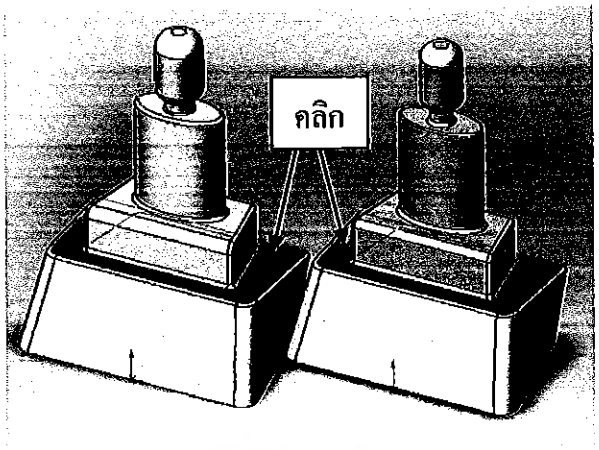
2.77.2 เลือกชิ้นงานจาก C:\Project > mid จากนั้นคลิกเมาส์เพื่อวางชิ้นงานในบริเวณใกล้ๆ กับชิ้นงานก่อนหน้านี้

2.78 คลิก Mate จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

2.79 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

2.79.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in 1 ดังรูป

2.79.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid ดังรูป



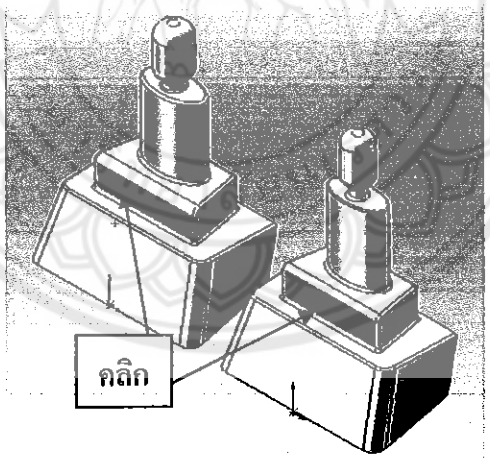
2.80 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel **ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน**

2.81 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

2.82 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

2.82.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in 1 ดังรูป

2.82.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid ดังรูป



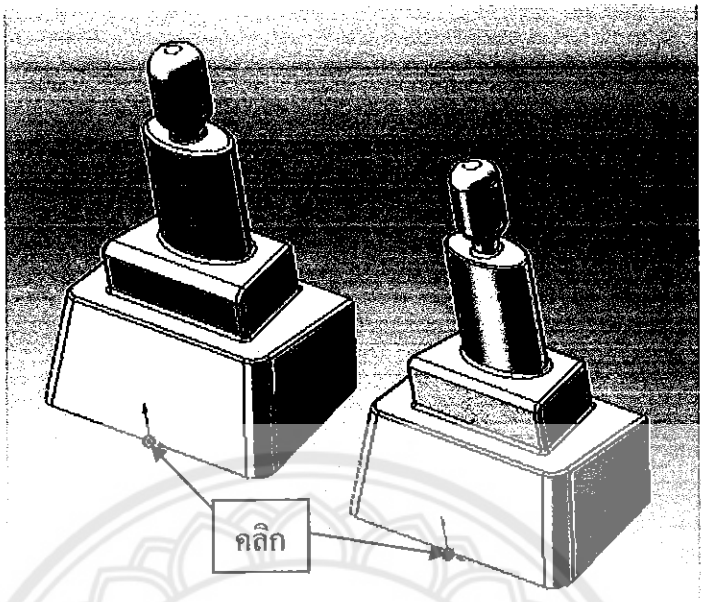
2.83 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

2.84 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

2.85 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

2.85.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in 1 ดังรูป

2.85.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid ดังรูป



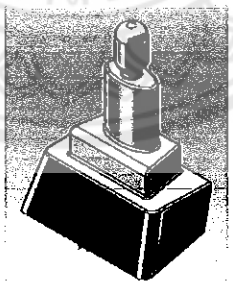
2.86 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Coincident ให้ชิ้นงานทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน

2.87 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ และคลิกปุ่ม OK เพื่อออกจากคำสั่ง Mate

2.88 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : Assembly in 1-mid

2.89 คลิกปุ่ม Save

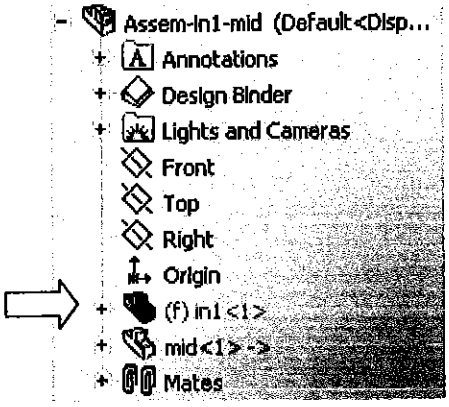
2.90 คลิกที่พื้นผิวดังรูป



2.91 คลิก Edit Component จากแถบเครื่องมือ Assembly

2.92 นำเมาส์ไปที่ Manu bar →Insert →Molds →Cavity จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

2.93 ที่กรอบ Design Component คลิกเครื่องหมาย (+) หน้าชื่อ Assembly in-mid ในใบรายการคุณสมบัติ นำเมาส์มาคลิกเลือก in 1 ดังรูป



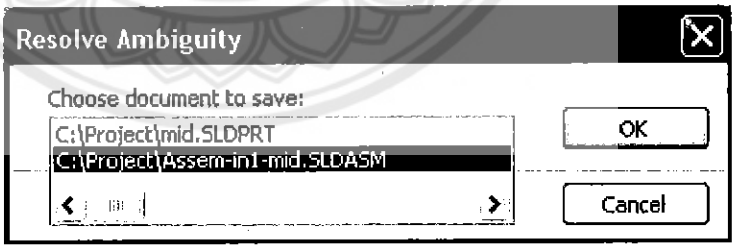
2.94 คลิก OK และคลิก Save

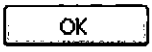
2.95 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือก C:\Project\mid.SLDPRT ดังรูป

2.96 คลิก OK

2.97 คลิก Save

2.98 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือก C:\Project\Assembly in1-mid.SLDASM ดังรูป



2.99 คลิก OK 

2.100 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

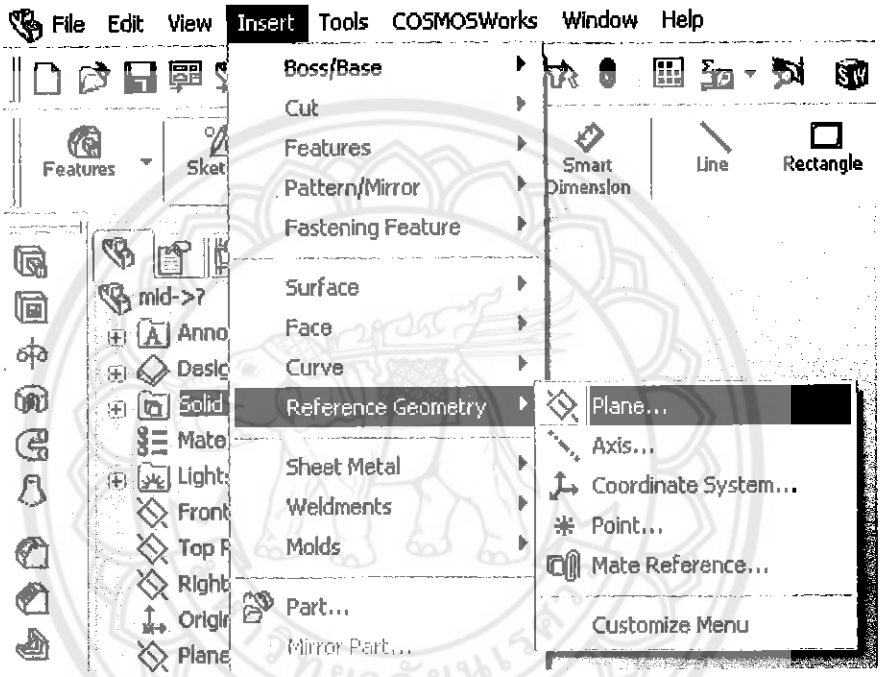
3. สร้างชั้นนอก

3.1 คลิก Open จากแถบเครื่องมือ Standard จะปรากฏ Dialog Box Open ขึ้นมา

3.2 เลือกชิ้นงาน C:\Project > mid1

3.3 คลิกปุ่ม Open

3.4 คลิกระนาบ Top แล้วเลือก Insert→Reference Geometry →Plane จะมีใบรายการ Plane แสดงขึ้นมา



3.5 ที่ช่อง Offset Distance 12.7000cm ใส่ค่าเป็น 12.7 cm (ระยะห่างของระนาบ)

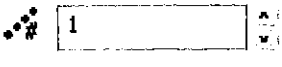
3.6 ที่ช่อง Number of Planes to Create 1 ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

3.7 คลิกเครื่องหมายถูกหน้า Reverse direction ☑Reverse direction

3.8 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 6 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 12.7 cm

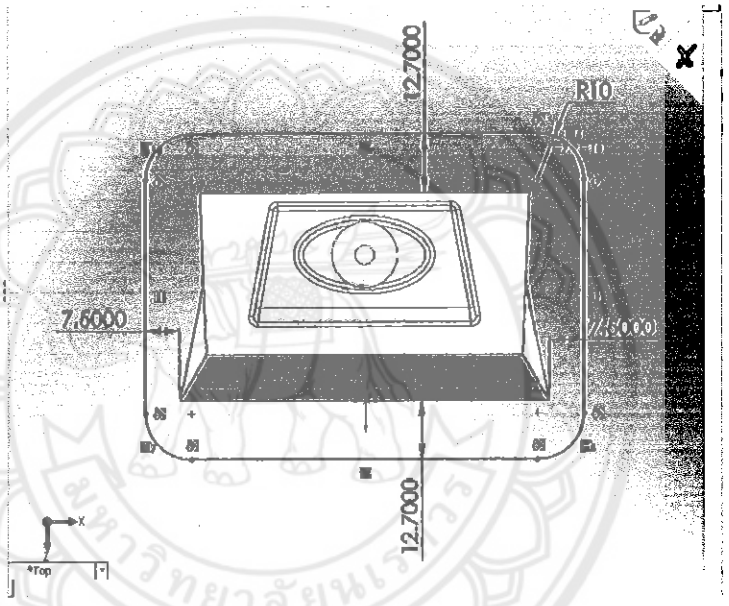
3.9 คลิกระนาบ Top แล้วเลือก Insert→Reference Geometry →Plane จะมีใบรายการ Plane แสดงขึ้นมา

3.10 ที่ช่อง Offset Distance 119.6000cm ใส่ค่าเป็น 119.6 cm (ระยะห่างของระนาบ)

3.11 ที่ช่อง Number of Planes to Create  ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

3.12 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 7 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 119.6 cm

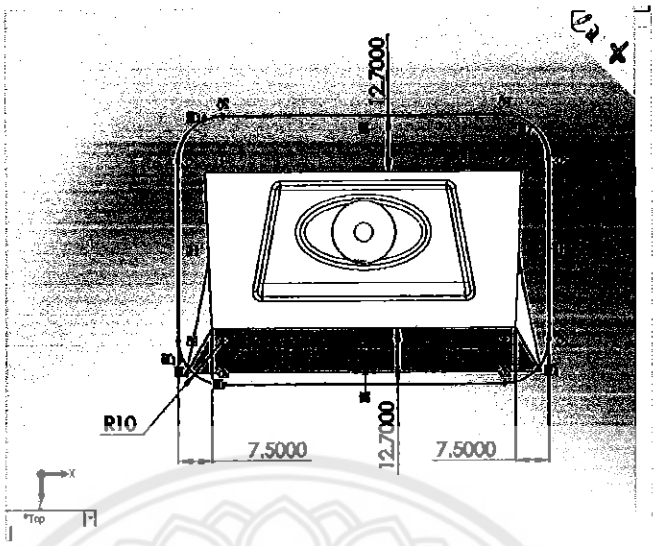
3.13 คลิกขวาที่ระนาบ Plane 6 แล้วคลิก Insert Sketch สร้างเส้นร่างด้วยคำสั่ง , และ Sketch fillet ดังรูป



3.14 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก

3.15 คลิกขวาที่ระนาบ Top คลิก Insert Sketch สร้างเส้นร่างตามหัวข้อ 3.8 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก

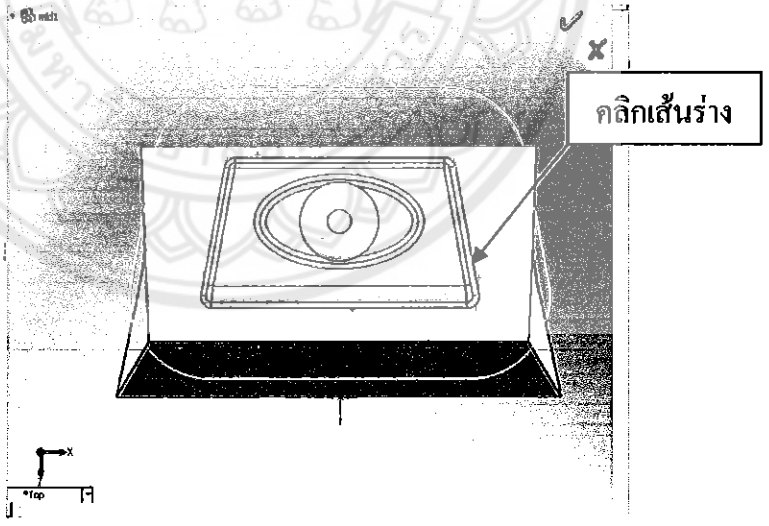
3.16 คลิกขวาที่ระนาบ Plane 1 คลิก Insert Sketch สร้างเส้นร่างด้วยคำสั่ง , และ Sketch fillet ดังรูป



3.17 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

3.18 คลิกขวาที่ระนาบ Plane 2 คลิก Insert Sketch คลิกคำสั่ง Offset ทางซ้ายมือ จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Offset ขึ้นมา

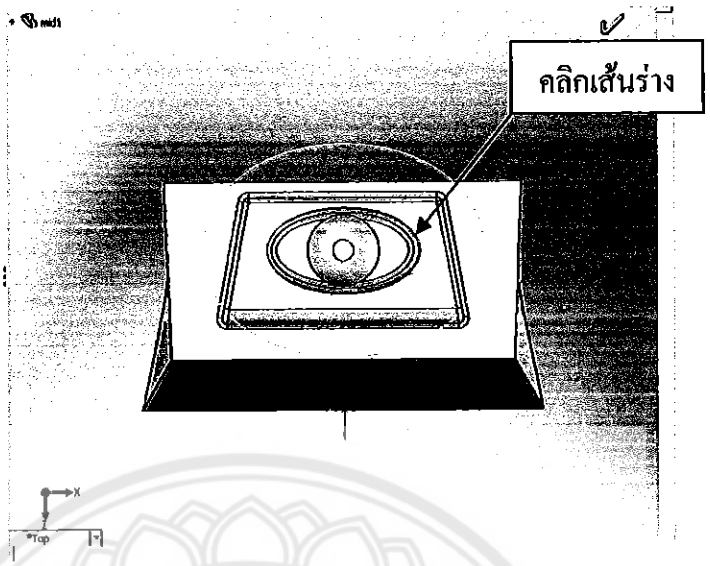
3.19 ที่ช่อง D ใส่ระยะ offset เป็น 10 cm ให้นำเมาส์ไปคลิกที่เส้นร่างดังรูป คลิกเครื่องหมายถูกข้างหน้า Reverse ☑Reverse ออก



3.20 คลิก OK เพื่อยอมรับ และคลิก Exit Sketch เพื่อออกจากคำสั่ง

3.21 คลิกขวาที่ระนาบ Plane 4 คลิก Insert Sketch คลิกคำสั่ง Offset ทางซ้ายมือ จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Offset ขึ้นมา

3.22 ที่ช่อง D ใส่ระยะ offset เป็น 10 cm ให้นำเมาส์ไปคลิกที่เส้นร่างดังรูป คลิกเครื่องหมายถูกข้างหน้า Reverse ☑Reverse ออก



3.23 คลิก OK เพื่อยอมรับ และคลิก Exit Sketch เพื่อออกจากคำสั่ง

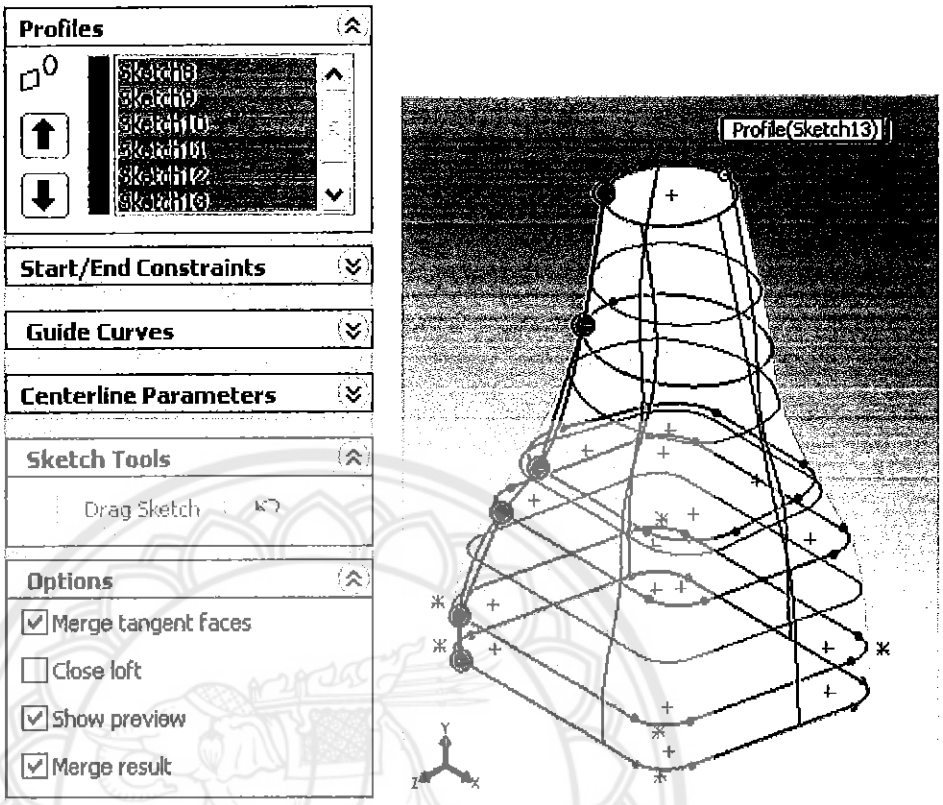
3.24 คลิกขวาที่ระนาบ Plane 7 คลิก Insert Sketch คลิกคำสั่ง Offset ทางซ้ายมือ จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่ง Offset ขึ้นมา

3.25 ที่ช่อง ใส่ระยะ offset เป็น 12.7 cm ให้นำเมาส์ไปคลิกที่เส้นร่างดังรูป คลิกเครื่องหมายถูกข้างหน้า Reverse ☑Reverse ออก

3.26 คลิก OK เพื่อยอมรับ และคลิก Exit Sketch เพื่อออกจากคำสั่ง

3.27 คลิก Loft Boss/Base จากแถบเครื่องมือ Features จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.28 ในส่วนของช่อง Profiles นำเมาส์ไปคลิกเลือกเส้นร่างทั้ง 6 ที่ได้สร้างขึ้นใน Graphic Area ตามลำดับโดยให้คลิกเลือกบริเวณเดียวกันหรือแนวเดียวกันทั้งหมด ในส่วนของ Options คลิกเลือกตามรูปด้านล่าง



3.29 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง

3.30 คลิกระนาบ Top แล้วเลือก Insert→Reference Geometry →Plane จะมีใบรายการ Plane แสดงขึ้นมา

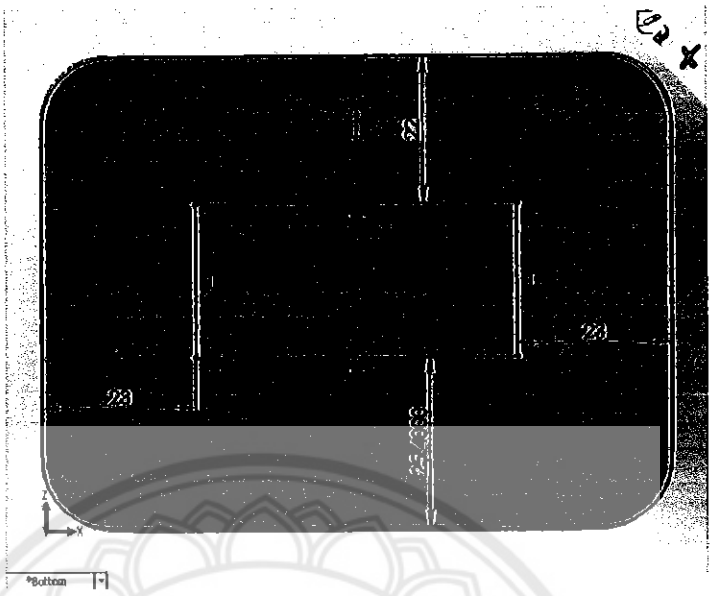
3.31 ที่ช่อง Offset Distance 9.7000cm ใส่ค่าเป็น 9.7 cm (ระยะห่างของระนาบ)

3.32 ที่ช่อง Number of Planes to Create 1 ใส่ค่าเป็น 1 ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างระนาบใหม่ขึ้นมาอีก 1 ระนาบ

3.33 คลิก OK เพื่อทำการยืนยันค่าระนาบใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีชื่อว่า Plane 8 โดยระนาบจะมีระยะห่าง 9.7 cm

3.34 คลิกขวาบนระนาบ Plane 6 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Bottom เพื่อเขียนเส้นร่าง

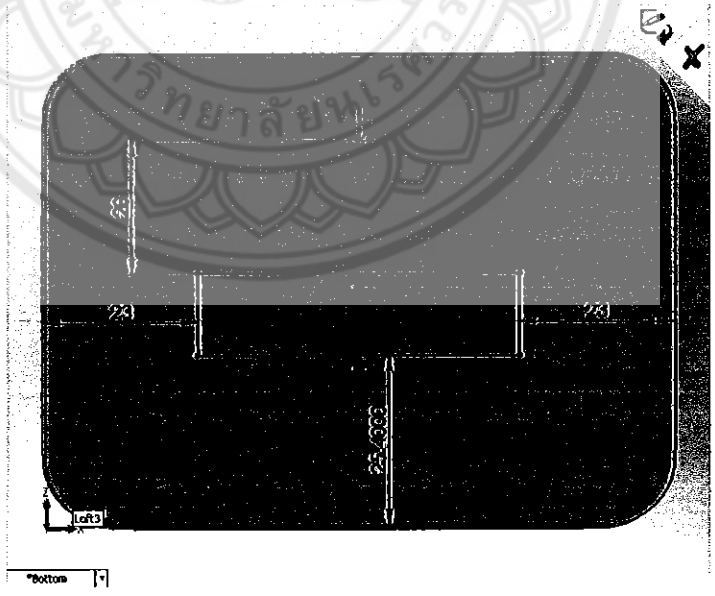
3.35 สร้างเส้นร่างด้วยคำสั่ง Rectangle และ Smart Dimension ดังรูป



3.36 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

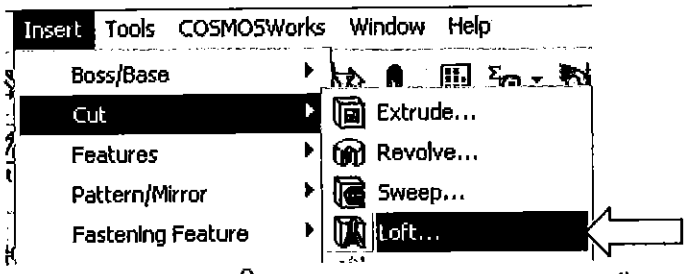
3.37 คลิกขวาบนระนาบ Plane 8 แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น Bottom เพื่อเขียนเส้นร่าง

3.38 สร้างเส้นร่างด้วยคำสั่ง Rectangle และ Smart Dimension ดังรูป

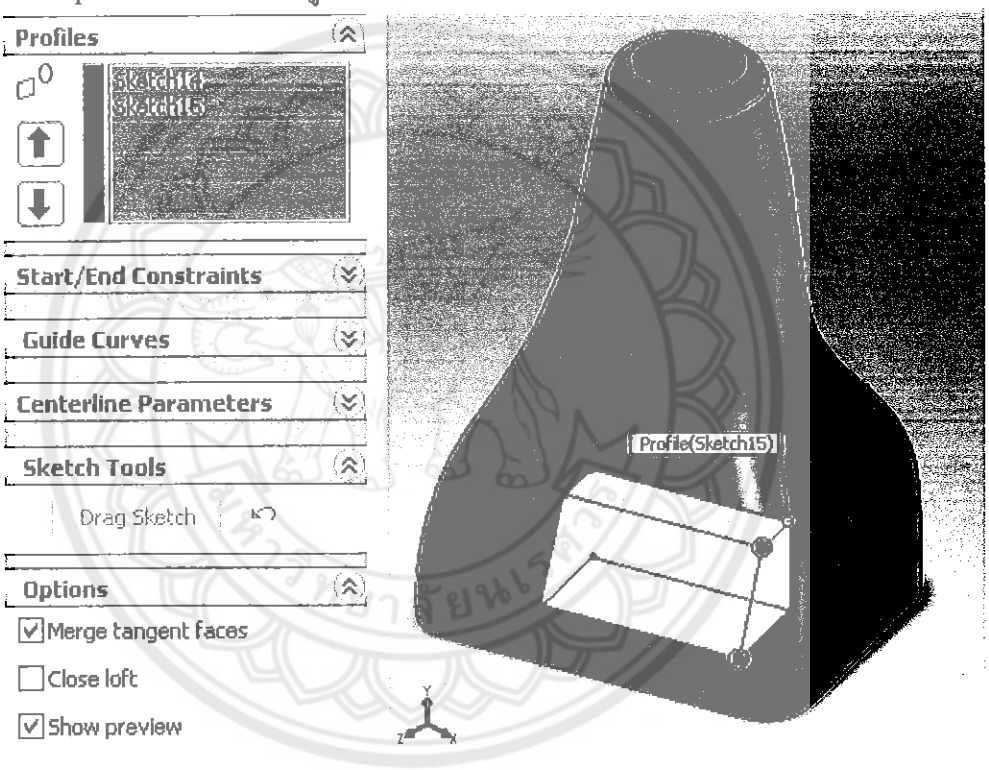


3.39 เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

3.40 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →Insert → Cut →Loft...จะแสดงใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา



3.41 ในส่วนของช่อง Profiles นำเมาส์ไปคลิกเลือกเส้นร่างทั้ง 2 ที่ได้สร้างขึ้นใน Graphic Area ตามลำดับโดยให้คลิกเลือกบริเวณเดียวกันหรือแนวเดียวกันทั้งหมด ในส่วนของ Options คลิกเลือกตามรูปด้านล่าง



3.42 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง

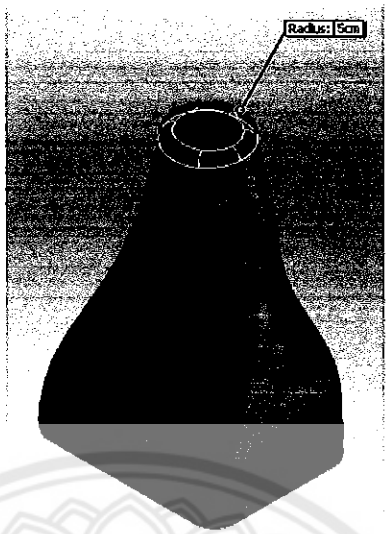
3.43 คลิกคำสั่ง Fillet จากแถบเครื่องมือ Features

3.43.1 กรอบของ Fillet Type เลือกเป็น Constant radius

3.43.2 กรอบของ Item to Fillet กำหนดค่าต่างๆดังนี้

3.43.2.1 กำหนดค่ารัศมีการลบมุม Radius เป็น 5 cm

3.43.2.2 ทำการเลือกขอบชิ้นงาน ดังรูป



3.33.2.3 คลิก OK เพื่อยอมรับ และออกจากคำสั่ง fillet

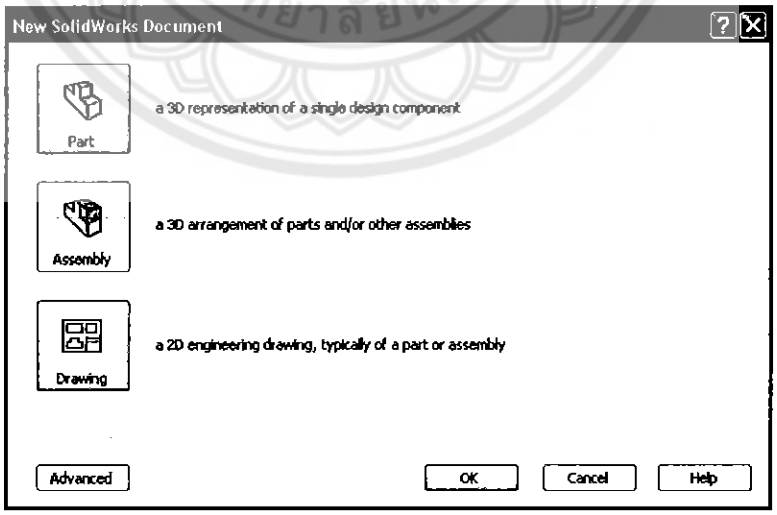
3.44 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : out

3.45 คลิกปุ่ม Save

3.46 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

3.47 คลิก New จะปรากฏ Dialog box New SolidWorks Document ขึ้นมา

3.48 เลือกคลิก Assembly จากนั้นคลิกปุ่ม OK



3.49 จะเข้าสู่คำสั่ง Insert Component คลิกปุ่ม Browse

3.50 เลือกชิ้นงาน C:\Project > in

3.51 คลิกปุ่ม open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่าง Assembly

3.52 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →View →Origin เพื่อแสดงจุดกำเนิด จากนั้นนำเมาส์ไปวางที่ Origin คลิกเมาส์ซ้ายเพื่อวางชิ้นงาน

3.53 คลิก Insert Component จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.54 ในส่วนของกรอบ Part/Assembly to Insert

3.54.1 คลิกปุ่ม Browse จะปรากฏกล่องข้อความ Open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่างการประกอบภาพ

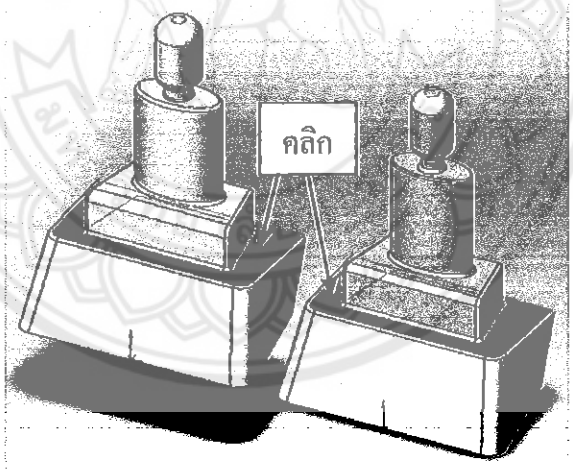
3.54.2 เลือกชิ้นงานจาก C:\Project > mid 2 จากนั้นคลิกเมาส์เพื่อวางชิ้นงานในบริเวณใกล้ๆ กับชิ้นงานก่อนหน้านี้

3.55 คลิก Mate จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.56 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.56.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in ดังรูป

3.56.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid2 ดังรูป



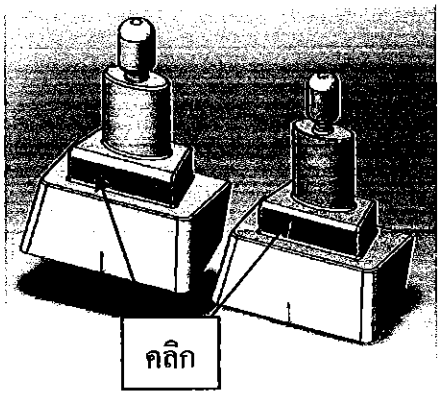
3.57 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

3.58 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

3.59 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.59.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in ดังรูป

3.59.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid2 ดังรูป



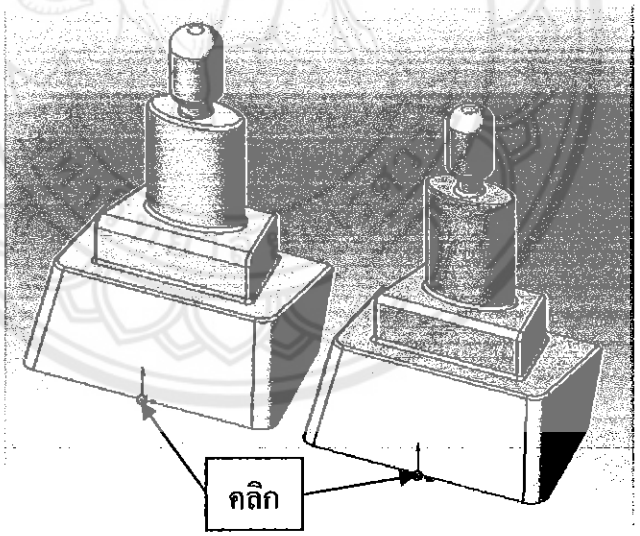
3.60 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

3.61 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

3.62 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.62.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in ดังรูป

3.62.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid2 ดังรูป



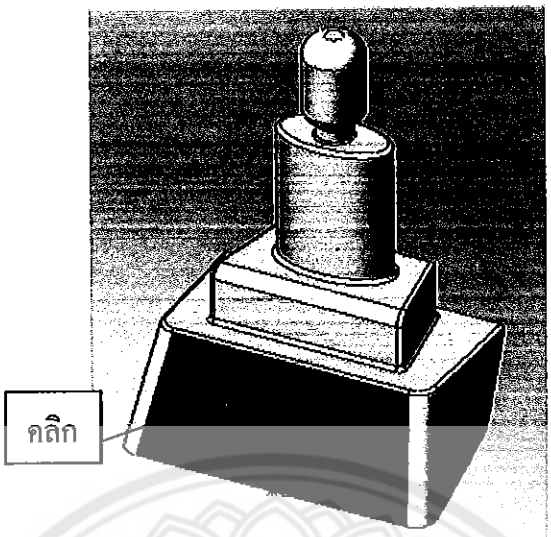
3.63 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Coincident ให้ชิ้นงานทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน

3.64 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ และคลิกปุ่ม OK เพื่อออกจากคำสั่ง Mate

3.65 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : Assembly-in-mid 2

3.66 คลิกปุ่ม Save

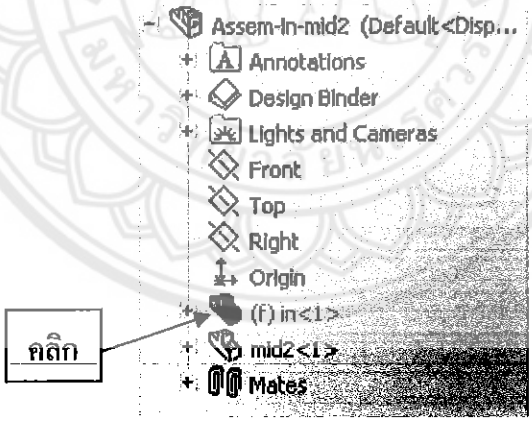
3.67 คลิกที่พื้นผิวดังรูป



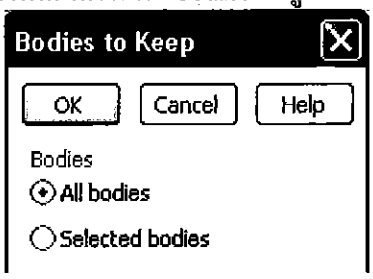
3.68 คลิก Edit Component จากแถบเครื่องมือ Assembly

3.69 นำเมาส์ไปที่ Manu bar →Insert →Molds →Cavity จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.70 ที่กรอบ Design Component คลิกเครื่องหมาย (+) หน้าชื่อ Assembly-in-mid2 ในใบรายการคุณสมบัติ นำเมาส์มาคลิกเลือก mid2 ดังรูป

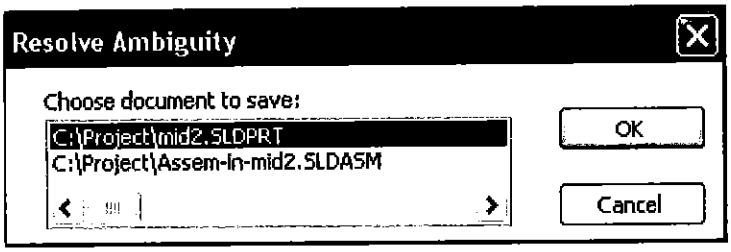


3.71 คลิก OK แล้วคลิกเลือก All bodies ดังรูป และคลิก OK



3.72 คลิก Save

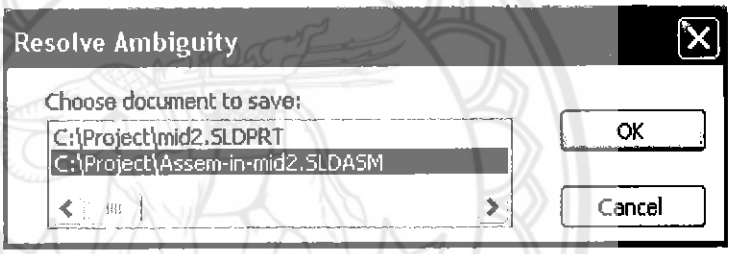
3.73 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือก C:\Project\mid2.SLDPRT ดังรูป



3.74 คลิก OK

3.75 คลิก Save

3.76 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือกC:\Project\Assembly-in-mid2.SLDASM ดังรูป



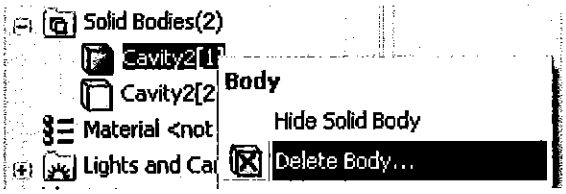
3.77 คลิก OK

3.78 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

3.79 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Open

3.80 เลือกชิ้นงานจาก C:\Project\mid2 และคลิกปุ่ม Open

3.81 คลิกเครื่องหมาย (+) หน้า Solid Bodies(2) →คลิกขวาที่ Cavity2[1]→Delete Body →คลิก

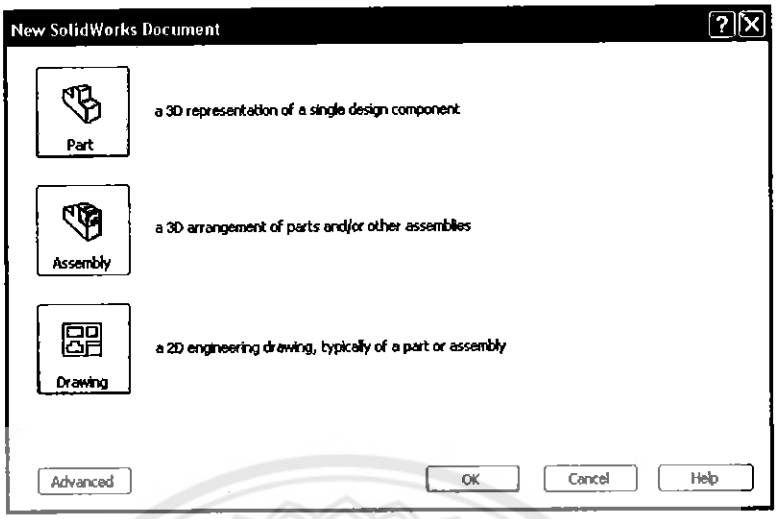


3.82 คลิก Save

3.83 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

3.84 คลิก New จะปรากฏ Dialog box New SolidWorks Document ขึ้นมา

3.85 เลือกคลิก Assembly จากนั้นคลิกปุ่ม OK



3.86 จะเข้าสู่คำสั่ง Insert Component คลิกปุ่ม Browse

3.87 เลือกชิ้นงาน C:\Project > mid3

3.88 คลิกปุ่ม open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่าง Assembly

3.89 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →View →Origin เพื่อแสดงจุดกำเนิด จากนั้นนำเมาส์ไปวางที่ Origin คลิกเมาส์ซ้ายเพื่อวางชิ้นงาน

3.90 คลิก Insert Component จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.91 ในส่วนของกรอบ Part/Assembly to Insert

3.91.1 คลิกปุ่ม Browse จะปรากฏกล่องข้อความ Open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่างการประกอบภาพ

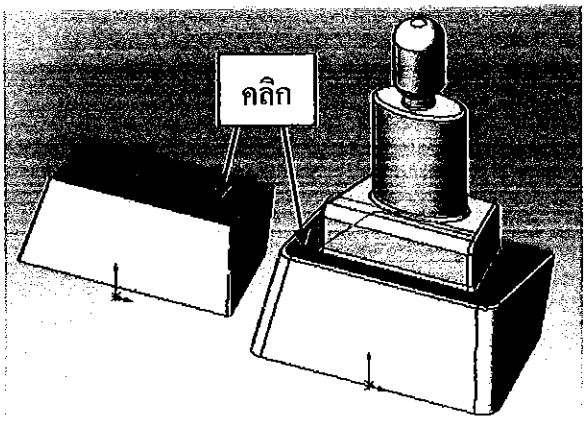
3.91.2 เลือกชิ้นงานจาก C:\Project > mid 2 จากนั้นคลิกเมาส์เพื่อวางชิ้นงานในบริเวณใกล้ๆ กับชิ้นงานก่อนหน้านี้

3.92 คลิก Mate จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.93 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.93.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid3 ดังรูป

3.93.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid2 ดังรูป



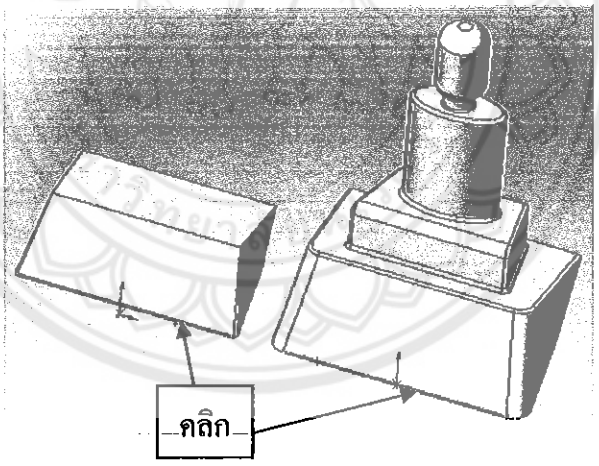
3.94 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

3.95 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

3.96 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.96.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid3 ดังรูป

3.96.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid2 ดังรูป



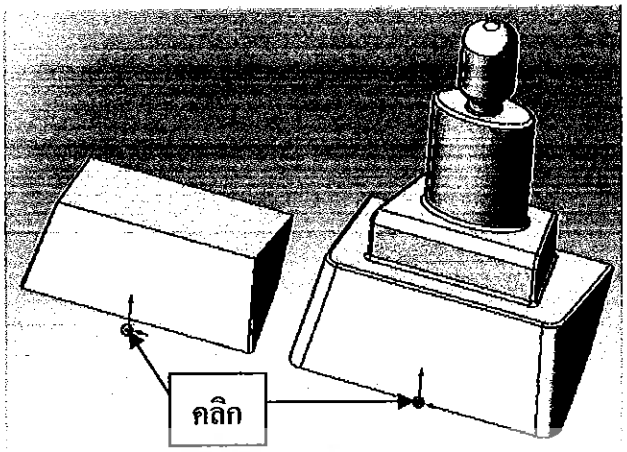
3.97 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

3.98 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

3.99 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.99.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid3 ดังรูป

3.99.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid2 ดังรูป



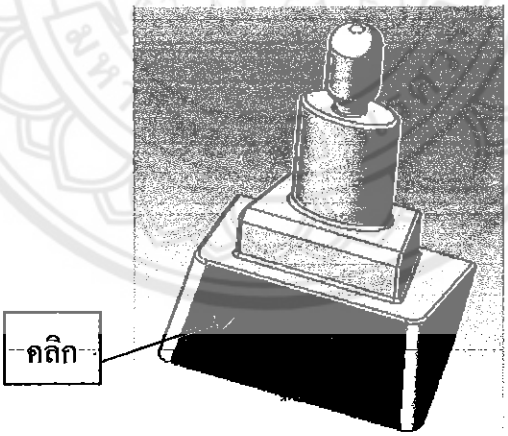
3.100 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Coincident ให้ชิ้นงานทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน

3.101 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ และคลิกปุ่ม OK เพื่อออกจากคำสั่ง Mate

3.102 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : Assembly -mid 2 -mid3

3.103 คลิกปุ่ม Save

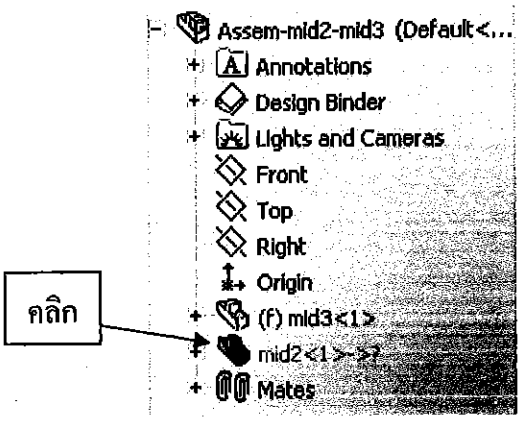
3.104 คลิกที่พื้นผิวดังรูป



3.105 คลิก Edit Component จากแถบเครื่องมือ Assembly

3.106 นำเมาส์ไปที่ Manu bar →Insert →Molds →Cavity จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

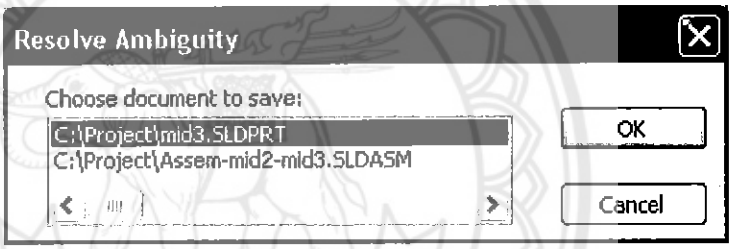
3.107 ที่กรอบ Design Component คลิกเครื่องหมาย (+) หน้าชื่อ Assembly mid-out ในใบรายการคุณสมบัติ นำเมาส์มาคลิกเลือก mid2 ดังรูป



3.108 คลิก OK

3.109 คลิก Save

3.110 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือก C:\Project\mid3.SLDPRT ดังรูป



3.111 คลิก OK

3.112 คลิก Save

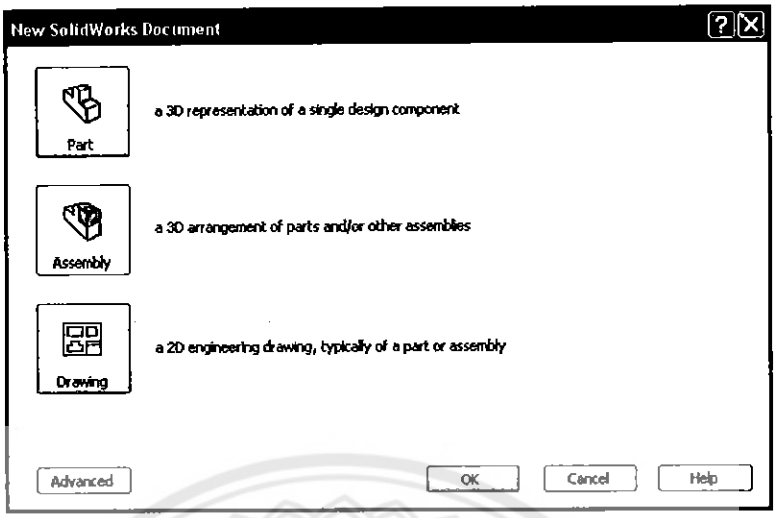
3.113 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือกC:\Project\Assembly-mid2-mid3.SLDASM ดังรูป

3.114 คลิก OK

3.115 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

3.116 คลิก New จะปรากฏ Dialog box New SolidWorks Document ขึ้นมา

3.117 เลือกคลิก Assembly จากนั้นคลิกปุ่ม OK



3.118 จะเข้าสู่คำสั่ง Insert Component คลิกปุ่ม Browse

3.119 เลือกชิ้นงาน C:\Project > mid3

3.120 คลิกปุ่ม open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่าง Assembly

3.121 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →View →Origin เพื่อแสดงจุดกำเนิด จากนั้นนำเมาส์ไปวางที่ Origin คลิกเมาส์ซ้ายเพื่อวางชิ้นงาน

3.122 คลิก Insert Component จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.123 ในส่วนของกรอบ Part/Assembly to Insert

3.123.1 คลิกปุ่ม Browse จะปรากฏกล่องข้อความ Open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่างการประกอบภาพ

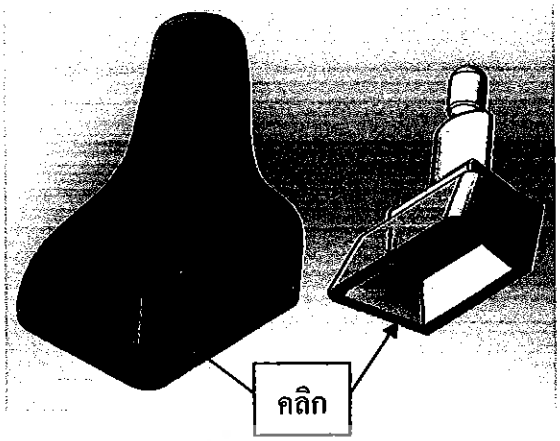
3.123.2 เลือกชิ้นงานจาก C:\Project > out จากนั้นคลิกเมาส์เพื่อวางชิ้นงานในบริเวณใกล้ๆ กับชิ้นงานก่อนหน้านี้

3.124 คลิก Mate จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

3.125 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.125.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid3 ดังรูป

3.125.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ out ดังรูป



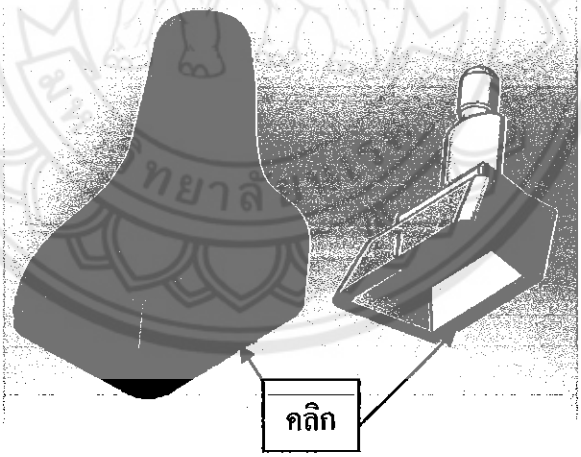
3.126 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

3.127 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

3.128 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.128.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid3 ดังรูป

3.128.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ out ดังรูป



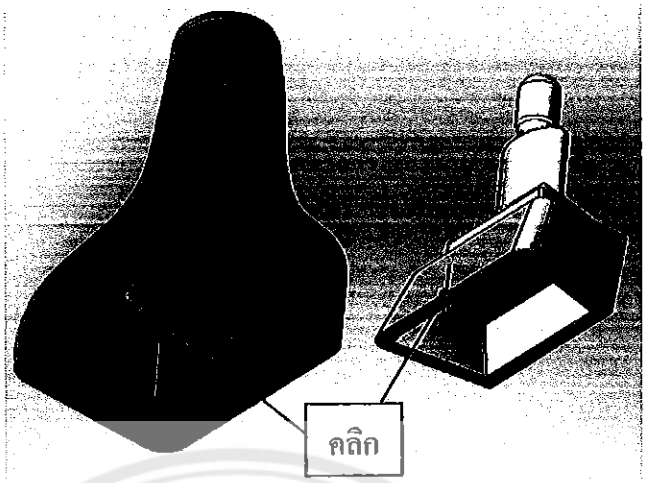
3.129 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

3.130 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

3.131 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

3.131.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid3 ดังรูป

3.131.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ out ดังรูป



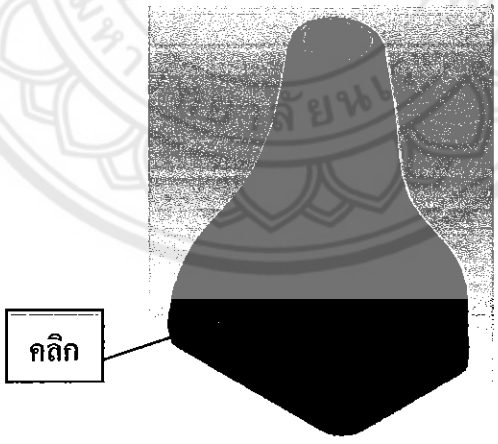
3.132 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Coincident ให้ชิ้นงานทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน

3.133 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ และคลิกปุ่ม OK เพื่อออกจากคำสั่ง Mate

3.134 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : Assembly -mid3-out

3.135 คลิกปุ่ม Save

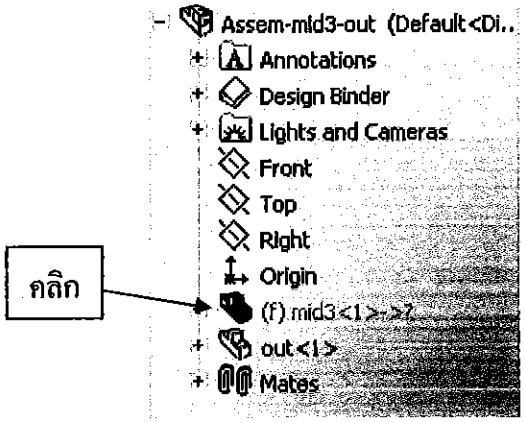
3.136 คลิกที่พื้นผิวดังรูป



3.137 คลิก Edit Component จากแถบเครื่องมือ Assembly

3.138 นำเมาส์ไปที่ Manu bar →Insert →Molds →Cavity จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

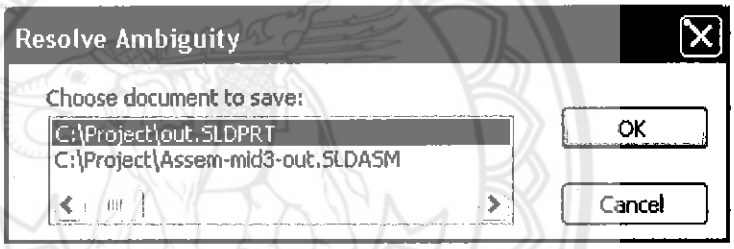
3.139 ที่กรอบ Design Component คลิกเครื่องหมาย (+) หน้าชื่อ Assembly mid-out ในใบรายการคุณสมบัติ นำเมาส์มาคลิกเลือก mid3 ดังรูป



3.140 คลิก OK

3.141 คลิก Save

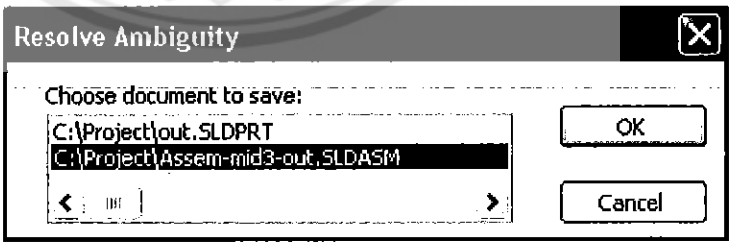
3.142 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือก C:\Project\out.SLDPRT ดังรูป



3.143 คลิก OK

3.144 คลิก Save

3.145 ที่กรอบ Choose document to save: คลิกเลือกC:\Project\Assembly-mid3-out.SLDASM ดังรูป



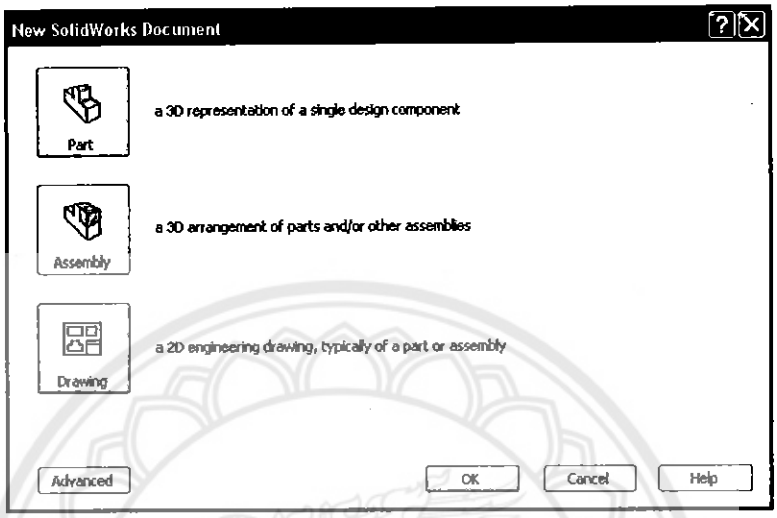
3.146 คลิก OK

3.147 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

4. การรวมชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นเข้าด้วยกัน

4.1 คลิก New จะปรากฏ Dialog box New SolidWorks Document ขึ้นมา

4.2 เลือกคลิก Assembly จากนั้นคลิกปุ่ม OK



4.3 จะเข้าสู่คำสั่ง Insert Component คลิกปุ่ม Browse

4.4 เลือกชิ้นงาน C:\Project > in

4.5 คลิกปุ่ม open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่าง Assembly

4.6 นำเมาส์ไปที่ Menu bar →View →Origin เพื่อแสดงจุดกำเนิด จากนั้นนำเมาส์ไปวางที่ Origin คลิกเมาส์ซ้ายเพื่อวางชิ้นงาน

4.7 คลิก Insert Component จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

4.8 ในส่วนของกรอบ Part/Assembly to Insert

4.8.1 คลิกปุ่ม Browse จะปรากฏกล่องข้อความ Open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่างการประกอบภาพ

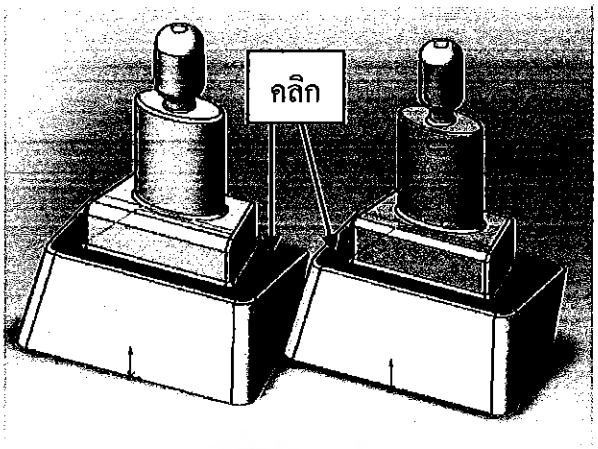
4.8.2 เลือกชิ้นงานจาก C:\Project > mid จากนั้นคลิกเมาส์เพื่อวางชิ้นงานในบริเวณใกล้ๆ กับชิ้นงานก่อนหน้านี้

4.9 คลิก Mate จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

4.10 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

4.10.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in ดังรูป

4.10.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid ดังรูป



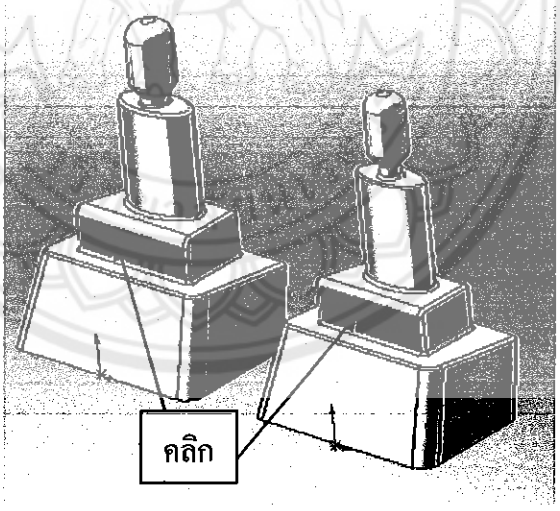
4.11 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

4.12 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

4.13 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

4.13.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in ดังรูป

4.13.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid ดังรูป



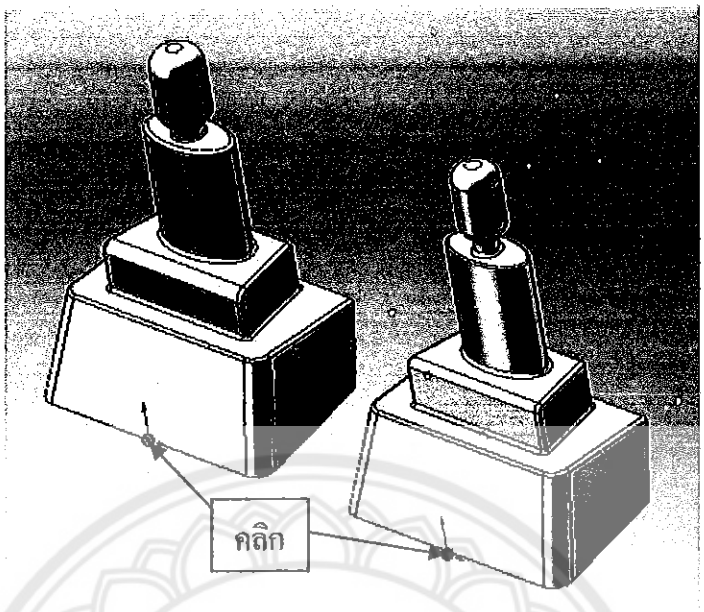
4.14 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

4.15 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

4.16 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

4.16.1 เลือกคลิกพื้นผิวของ in ดังรูป

4.16.2 เลือกคลิกพื้นผิวของ mid ดังรูป



4.17 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Coincident ให้ชิ้นงานทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน

4.18 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ และคลิกปุ่ม OK เพื่อออกจากคำสั่ง Mate

4.19 คลิก Insert Component จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

4.20 ในส่วนของกรอบ Part/Assembly to Insert

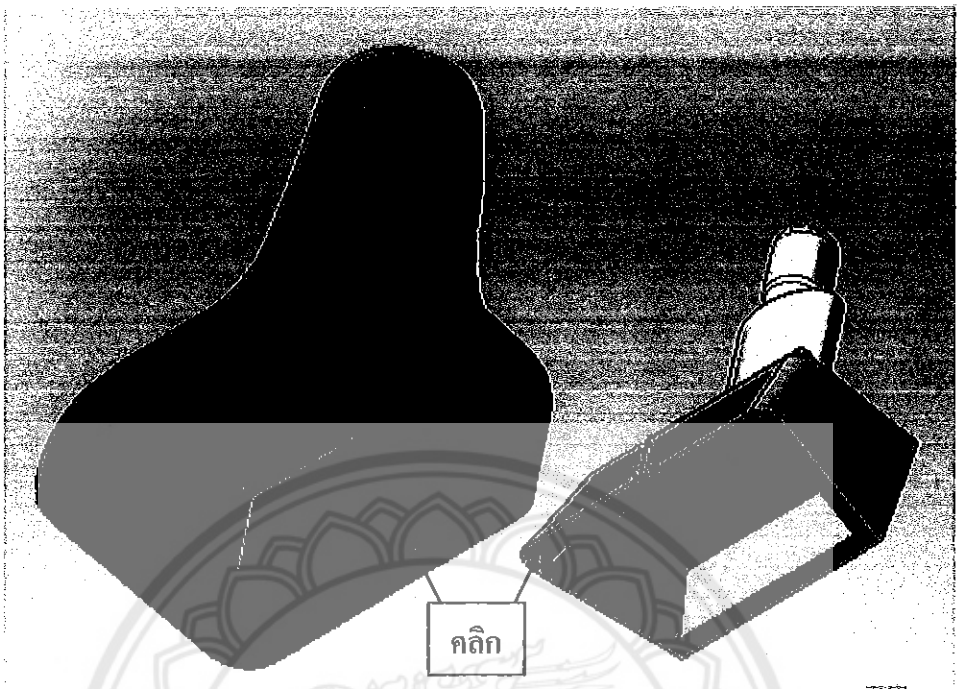
4.20.1 คลิกปุ่ม Browse จะปรากฏกล่องข้อความ Open เพื่อนำชิ้นงานเข้าสู่หน้าต่างการประกอบภาพ

4.20.2 เลือกชิ้นงานจาก C:\Project > out จากนั้นคลิกเมาส์เพื่อวางชิ้นงานในบริเวณใกล้ๆ กับชิ้นงานก่อนหน้านี้

4.21 คลิก Mate จากแถบเครื่องมือ Assembly จะปรากฏใบรายการคุณสมบัติของคำสั่งขึ้นมา

4.22 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

4.22.1เลือกคลิกพื้นผิว ดังรูป

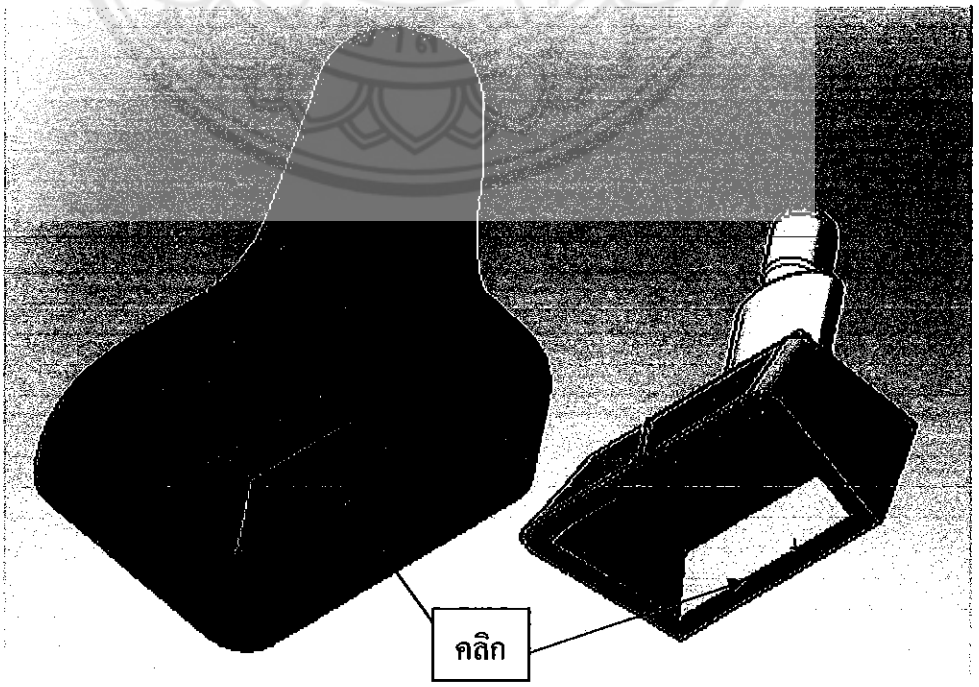


4.23 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel **ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน**

4.24 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

4.25 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

4.25.1 เลือกคลิกพื้นผิว ดังรูป

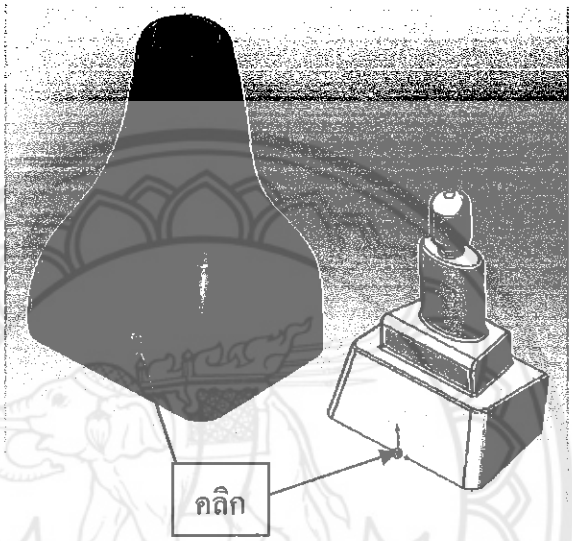


4.26 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Parallel ให้ชิ้นงานทั้งสองขนานกัน

4.27 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ

4.28 ในส่วนของกรอบ Mate Selection

4.28.1 เลือกคลิกพื้นผิว ดังรูป



4.29 ในส่วนของกรอบ Standard Mate กำหนดความสัมพันธ์เป็น Coincident ให้ชิ้นงานทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน

4.30 คลิกปุ่ม OK เพื่อยอมรับ และคลิกปุ่ม OK เพื่อออกจากคำสั่ง Mate

4.31 คลิก Save เลือก Directory ของ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง Save in : ชื่อ C:\Project พิมพ์ชื่อ File ที่ต้องการบันทึกในช่อง File name : Assembly

4.32 คลิกปุ่ม Save

ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

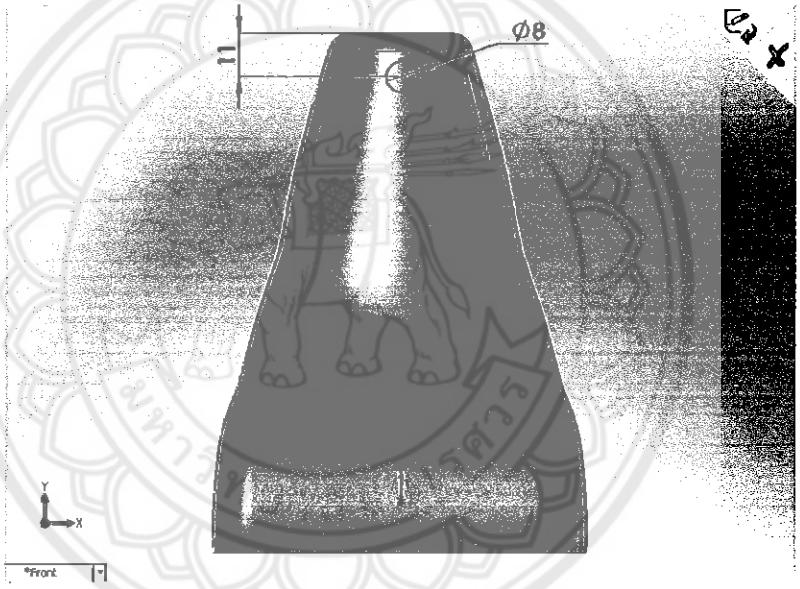
1. เข้าสู่โปรแกรมโดยการดับเบิลคลิกที่ Icon SolidWorks 2007 SP0.0 ที่ Desktop

2. คลิก Open จากแถบเครื่องมือ Standard จะปรากฏ Dialog box Open ขึ้นมา

3. เลือกชิ้นงาน C:\Project > out คลิกปุ่ม Open

4. คลิกขวาบนระนาบ front แล้วเลือก Insert Sketch กด Space bar เปลี่ยนมุมมองเป็น front เพื่อเขียนเส้นร่าง

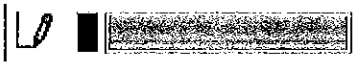
5. ใช้คำสั่ง Circle และ Smart Dimension เขียนเส้นร่างดังรูป



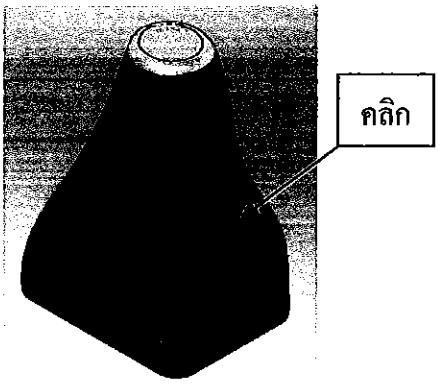
6. เมื่อสร้างเสร็จแล้วคลิก Exit Sketch

7. คลิก Curves จากแถบเครื่องมือ Features คลิก Split Line

8. ที่กรอบ Type of Split คลิกเลือก Projection

9. ที่กรอบ Selections ที่ช่อง  คลิกเส้นร่างวงกลมที่สร้างขึ้นจากข้อที่ 5

10. ที่กรอบ Selections ที่ช่อง คลิกเส้นร่าง ดังรูป

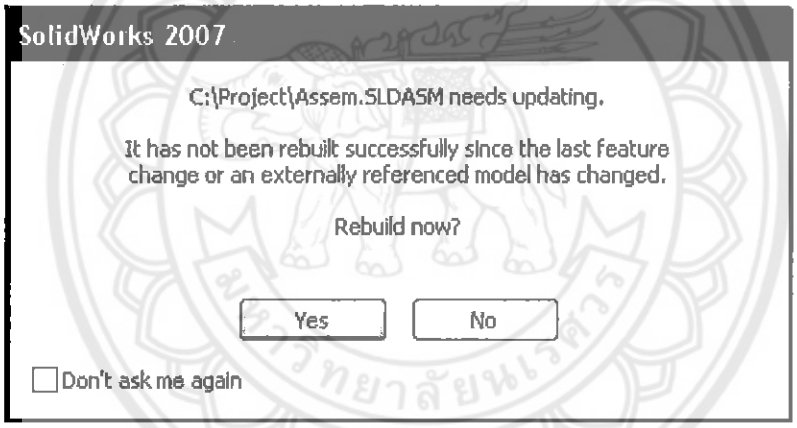


11. คลิก OK และคลิก Save

12. นำเมาส์ไปที่ Menu bar →File →Close

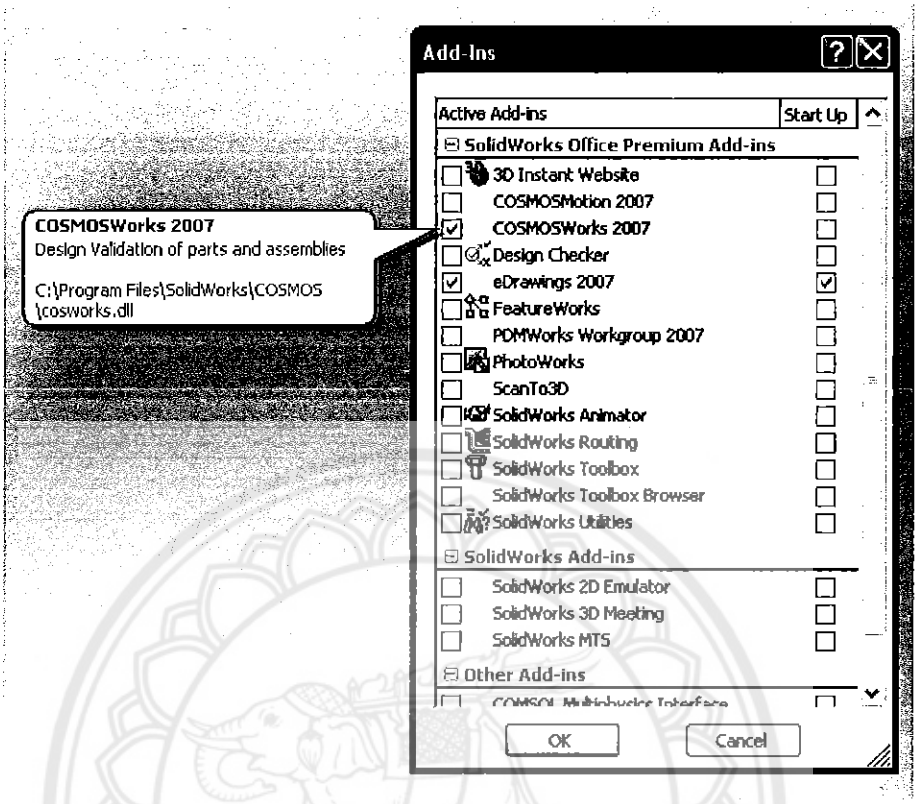
13. คลิก Open จากแถบเครื่องมือ Standard จะปรากฏ Dialog box Open ขึ้นมา

14. เลือกชิ้นงาน C:\Project > Assem คลิกปุ่ม Open จะปรากฏข้อความดังนี้

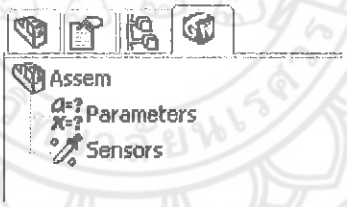


15. คลิก Yes

16. นำเมาส์ไปที่ Menu bar →Tool →Add install และเลือก COSMOSWorks 2007 คลิก OK เพื่อเรียกใช้โปรแกรม COSMOSWorks 2007



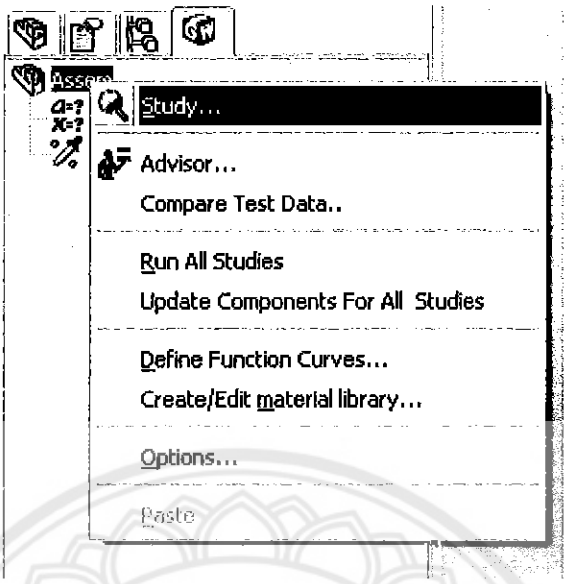
17. แถบ Menu Bar จะเพิ่ม COSMOSWorks ขึ้นมาและที่แผนแสดงใบรายการจะเพิ่ม ด้วยเช่นกัน



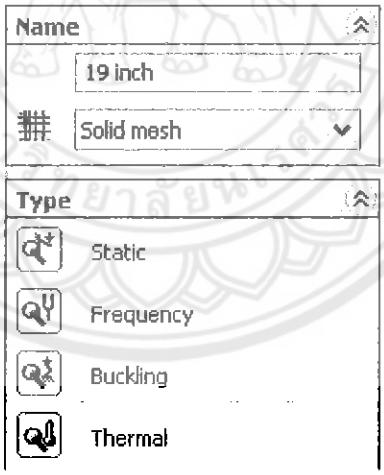
18. การวิเคราะห์แบบจำลองแบบหล่อพระพุทธรูปด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนดังนี้

18.1 Pre-processing

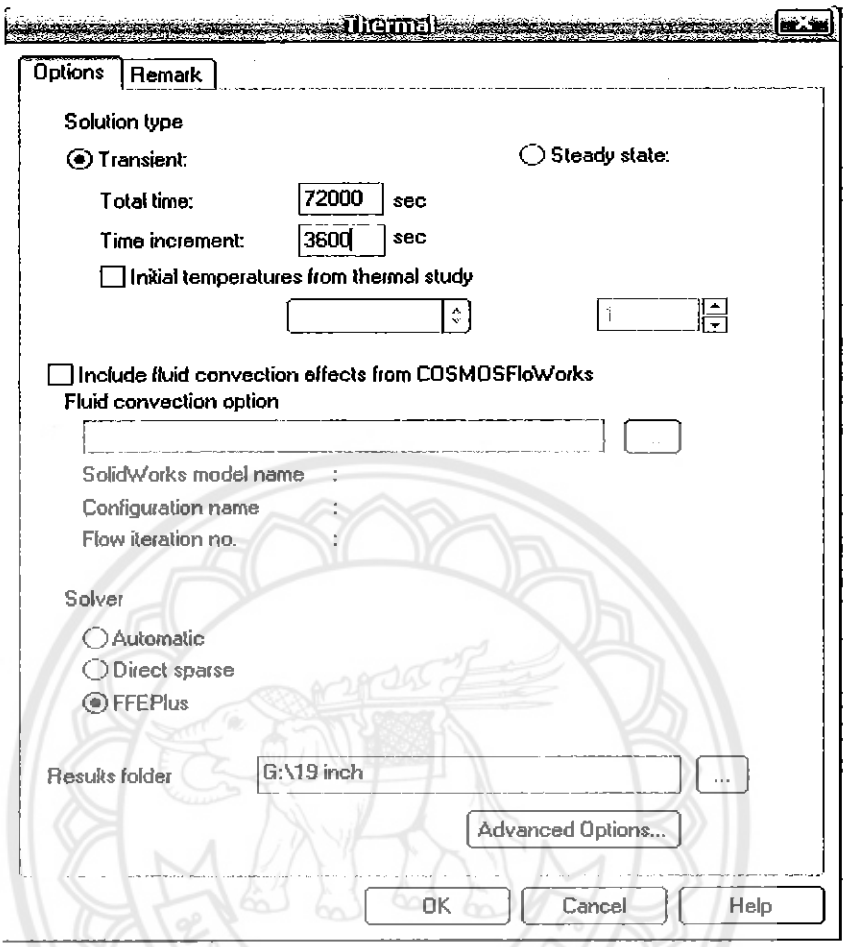
18.1.1 คลิกขวาที่ไอคอนชิ้นงานในใบรายการของ Cosmosworks และเลือก Study



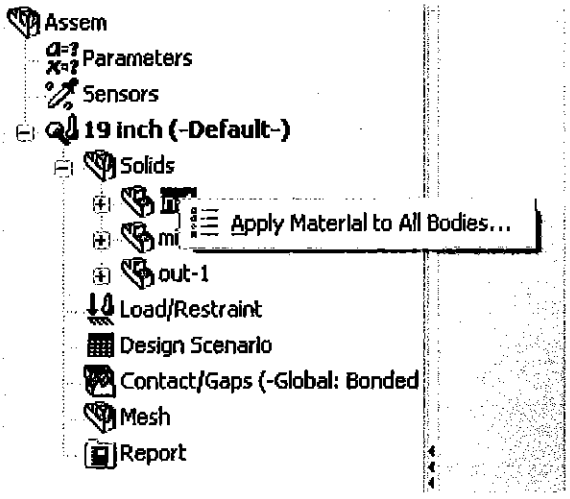
18.1.2 กรอบ Name กำหนดชื่อชิ้นงานในการศึกษาเป็น 19 inch เพื่อจะทำการวิเคราะห์ เลือกชนิดของเอลิเมนต์ (Mesh Type) เลือกเป็น Solid Mesh และรูปแบบการวิเคราะห์ที่ กรอบ Type เลือกเป็น Thermal



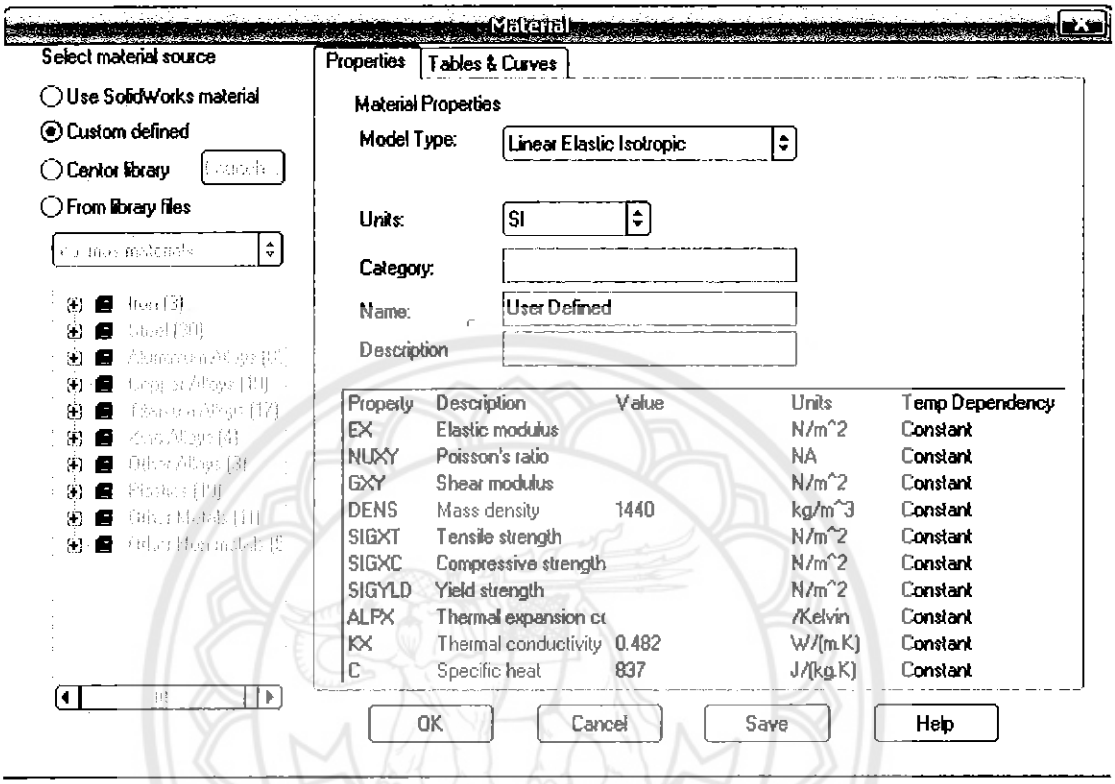
18.1.3 คลิกขวาที่คำสั่ง 19 inch (-Default-) แล้วคลิกซ้ายเลือก จะปรากฏหน้าต่าง Thermal แล้วคลิกเลือก Transient เลือก Total time เท่ากับ 72000 sec และเลือก Time increment เท่ากับ 3600 sec แล้วคลิก OK



18.1.4 คลิกตรงเครื่องหมายบวก หน้าคำสั่ง Solids จะปรากฏชิ้นงานทั้ง 3 ส่วนขึ้นมา แล้วคลิกขวาตรงชิ้นงาน in แล้วคลิกซ้าย ตรงคำสั่ง Apply Material to All Bodies ที่แสดงขึ้นนี้

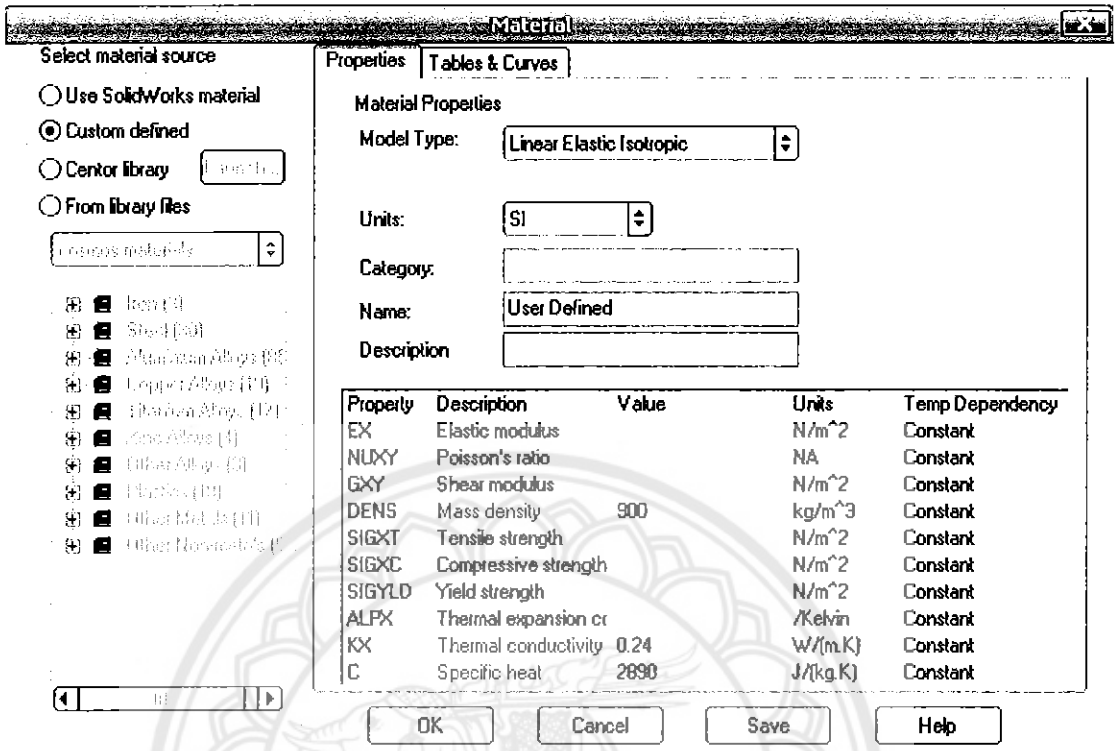


18.1.5 จะปรากฏตาราง Material ที่กรอบ Select material source เลือกตัวเลือก Custom defined ใส่ค่าคุณสมบัติตามรูปด้านล่างนี้ แล้วคลิก OK

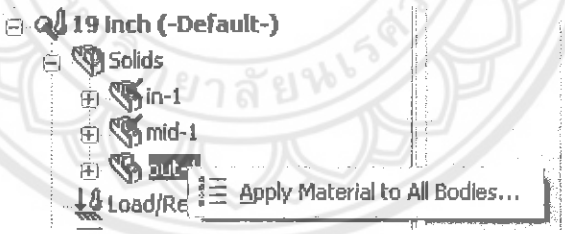


18.1.6 คลิกขวาตรงชิ้นงาน mid แล้วคลิกซ้าย ตรงคำสั่ง Apply Material to All Bodies ที่แสดงขึ้นนี้

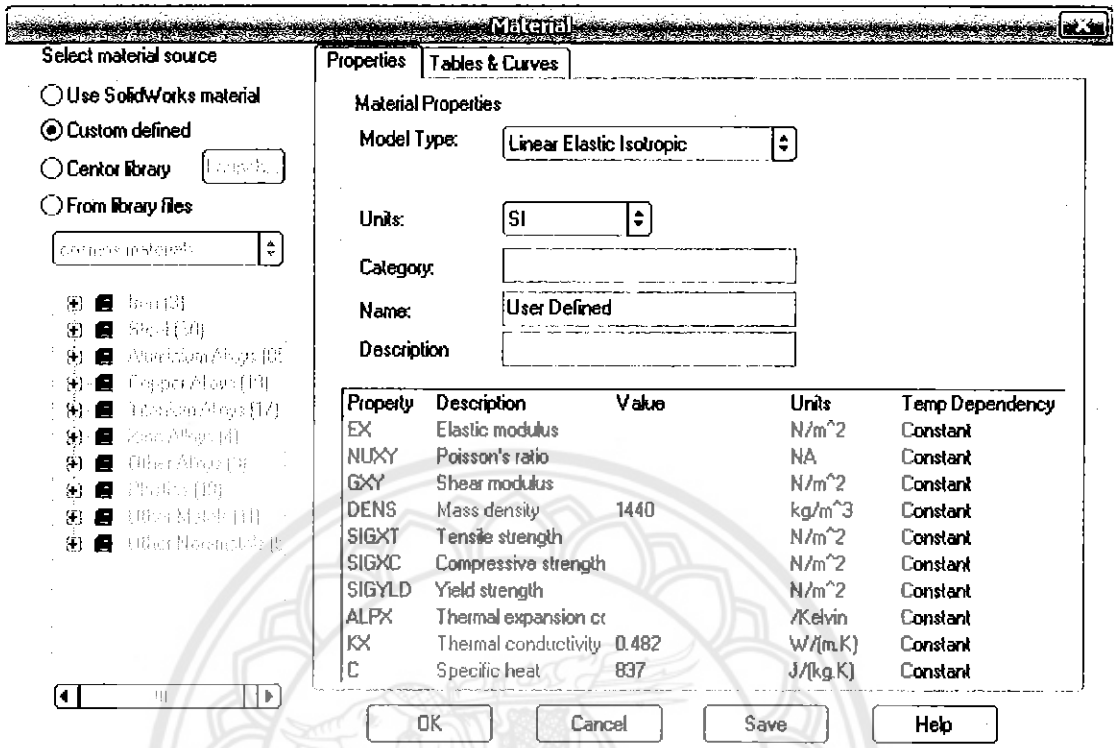
18.1.7 จะปรากฏตาราง Material ที่กรอบ Select material source เลือกตัวเลือก Custom defined ใส่ค่าคุณสมบัติตามรูปด้านล่างนี้ แล้วคลิก OK



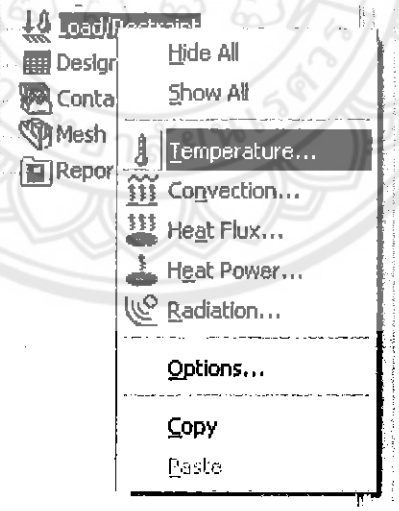
18.1.8 คลิกขวาตรงชิ้นงาน out แล้วคลิกซ้าย ตรงคำสั่ง Apply Material to All Bodies ที่แสดงขึ้นนี้



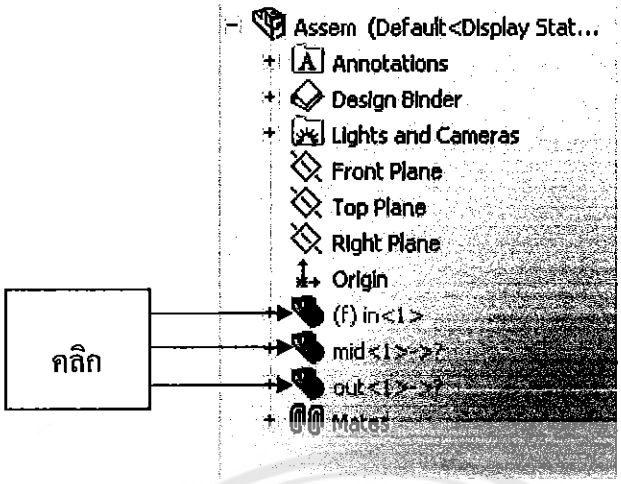
18.1.9 จะปรากฏตาราง Material ที่กรอบ Select material source เลือกตัวเลือก Custom defined ใส่ค่าคุณสมบัติตามรูปด้านล่างนี้ แล้วคลิก OK



18.1.10 คลิกขวาที่ Load/Restraint คลิกเลือก Temperature ดังรูป

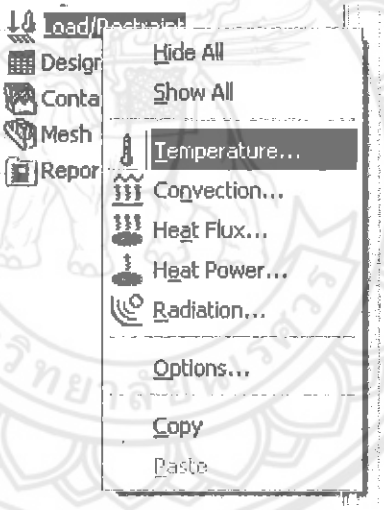


18.1.11 ที่กรอบ Type คลิกเลือก Initial temperature ที่ช่อง คลิกเครื่องหมาย (+) หน้า เลือกชิ้นงาน in, mid และ out ดังรูป

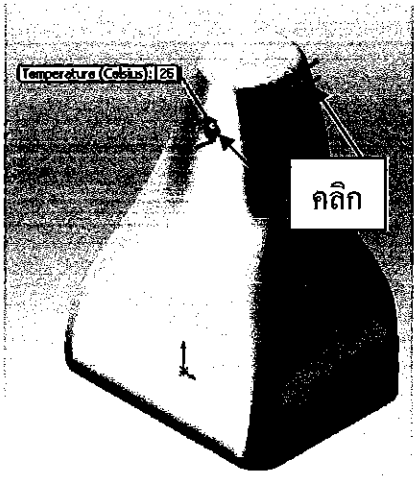


18.1.12 ที่กรอบ Temperature ใส่ค่าเป็น 25 $^{\circ}$C คลิก

18.1.13 คลิกขวาที่ Load/Restraint คลิกเลือก Temperature ดังรูป



18.1.14 ที่กรอบ Type คลิกเลือก Temperatureที่ช่อง คลิกเลือกพื้นผิวดังรูป

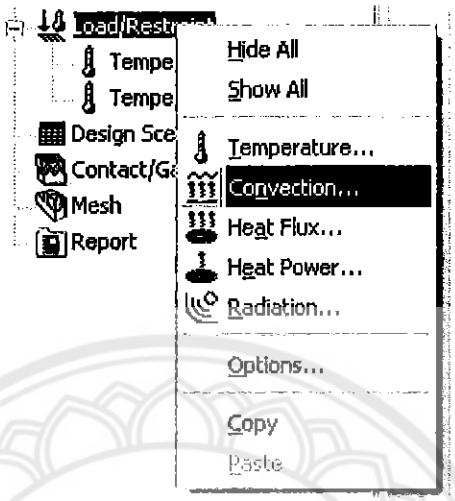


18.1.15 ที่กรอบ Temperature ใส่ค่าเป็น 25 °C →คลิกเครื่องหมายถูกหน้า Variation with time →คลิก Edit →ใส่ค่าดังนี้

Points	X	Y	Points	X	Y
1	0	1	28	61200	30.7736
2	12000	25	29	63000	30.7392
3	15600	25.445	30	64800	29.2244
4	17640	25.13672	31	66600	28.1272
5	19200	24.8268	32	68400	26.8908
6	21000	24.53	33	70200	25.0968
7	22800	24.95124	34	71400	24.9988
8	24600	25.20212	35	72000	24.224
9	26400	25.84092			
10	28200	27.52832			
11	30000	27.42396			
12	31800	27.00592			
13	34200	27.9716			
14	36000	29.576			
15	37800	29.716			
16	39600	28.2756			
17	41400	27.156			
18	43200	26.8016			
19	45000	27.9796			
20	46800	29.9084			
21	48600	29.272			
22	50400	29.402			
23	52200	31.5972			
24	54000	30.9844			
25	55800	30.3992			
26	57600	29.1372			
27	59400	30.174			

18.1.16 คลิก OK

18.1.17 คลิกขวาที่ Load/Restraint คลิกเลือก Convection ดังรูป



18.1.18 ที่กรอบ Selected entities คลิกเลือกพื้นผิวด้านนอกทั้งหมด

18.1.19 ที่กรอบ Units เลือกเป็น SI →ที่กรอบ Convection Coefficient ใส่ค่าเป็น 25 W/(m^2.K) →ที่กรอบ Bulk Ambient Temperature ใส่ค่าเป็น 298.15 Kelvin

18.1.20 คลิก Edit ใส่ค่าดังนี้

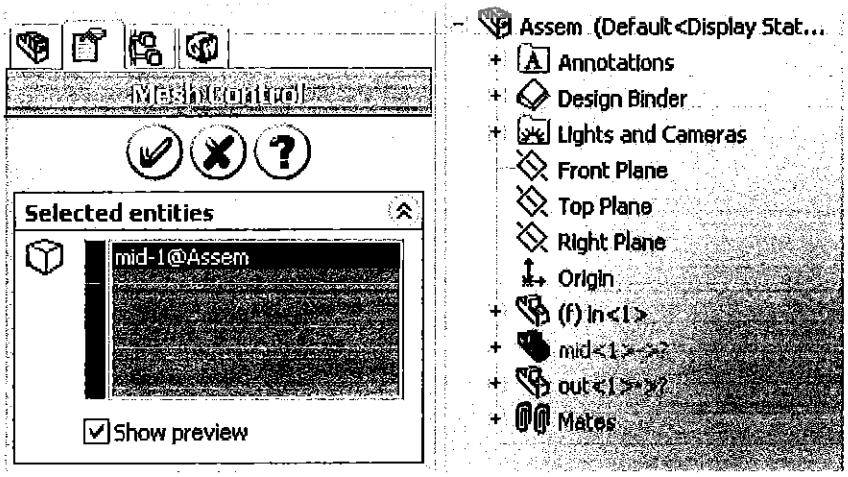
Points	X	Y	Points	X	Y
1	0	1	15	37800	3.3426128
2	12000	2.9923864	16	39600	3.2029851
3	15600	2.8998323	17	41400	3.2245849
4	17640	2.8861278	18	43200	3.4029851
5	19200	2.7769881	19	45000	3.2583263
6	21000	2.7522187	20	46800	3.2896193
7	22800	2.8113835	21	48600	3.1272178
8	24600	2.8740768	22	50400	3.2581922
9	26400	3.2436089	23	52200	3.3983565
10	28200	3.0451082	24	54000	3.4848231
11	30000	3.030005	25	55800	3.1939628
12	31800	3.0006574	26	57600	3.0637599
13	34200	3.0189502	27	59400	3.350696
14	36000	3.3500252	28	61200	3.2786852

Points	X	Y
29	63000	3.2180781
30	64800	3.080597
31	66600	2.965353
32	68400	2.8453128
33	70200	2.8979037
34	71400	2.9960758
35	72000	2.6032199

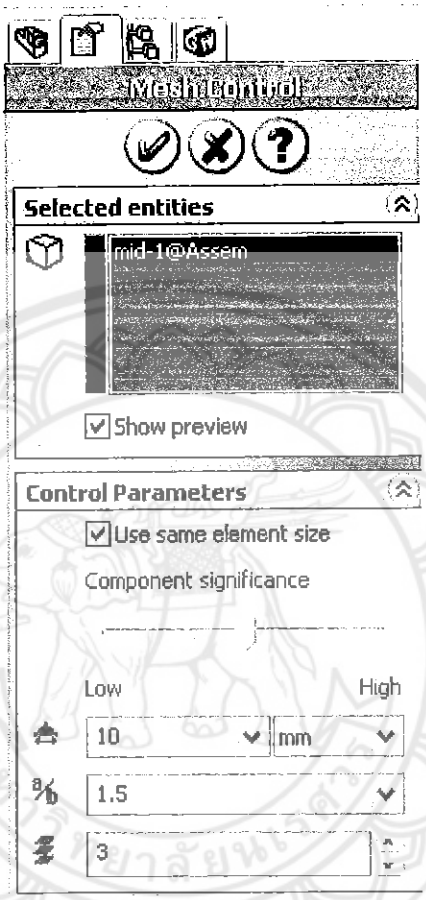
18.1.21 คลิก OK

18.1.22 การแบ่งและกำหนดขนาดเอลิเมนต์ โดยการคลิกขวาที่โฟลเดอร์ Mesh โปรแกรมจะแสดงรายรายเมนูย่อย คลิกเลือก Apply Mesh Control...

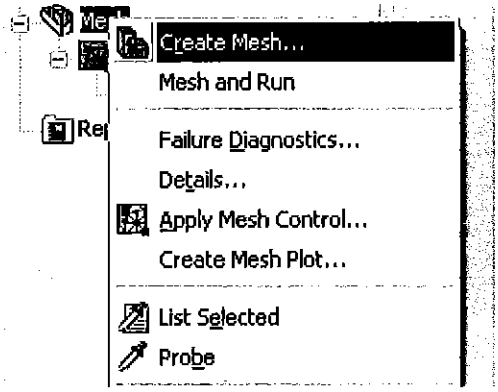
18.1.23 ที่กรอบ Selected entities คลิกเลือก mid ดังรูป



18.1.24 ที่กรอบ Control Parameters คลิกเครื่องหมายถูกหน้า Use same element size ที่ช่อง ใส่ค่าเท่ากับ 10 mm คลิก



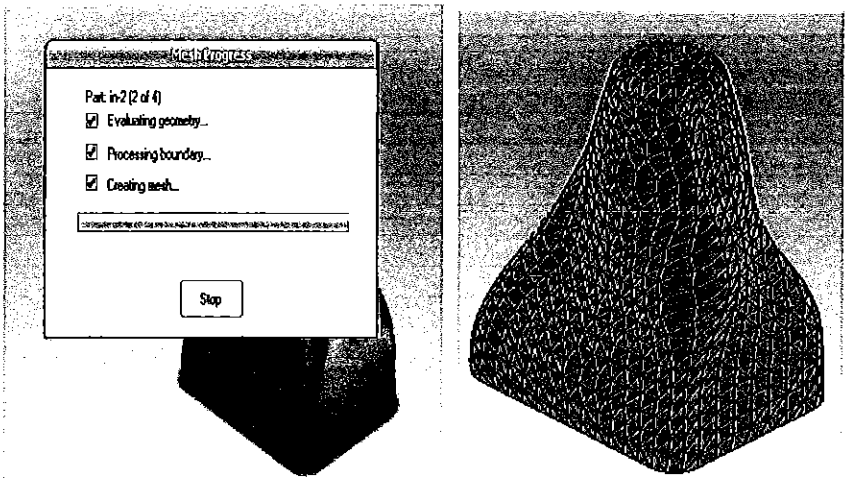
18.1.25 การแบ่งและกำหนดขนาดเอลิเมนต์ โดยการคลิกขวาที่โฟลเดอร์ Mesh โปรแกรมจะแสดงรายรายเมนูย่อย คลิกเลือก Create Mesh

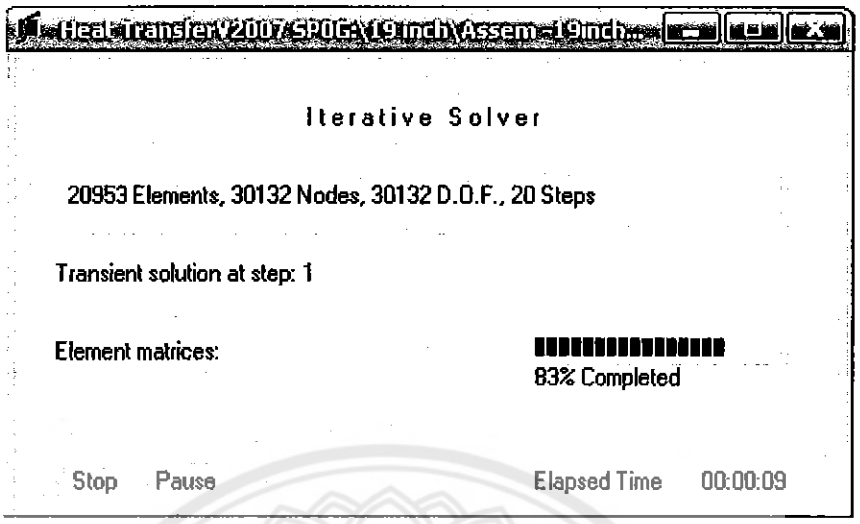


18.1.26 เมื่อคลิกเลือกคำสั่ง Create Mesh เพื่อเปิดกรอบหน้าต่าง Mesh แล้วกำหนดขนาดของ Mesh เท่ากับ 30 mm แล้วคลิกเลือกเครื่องหมายถูกหน้าช่อง Run analysis after meshing และ Automatic transition ดังรูป

18.2 Processing

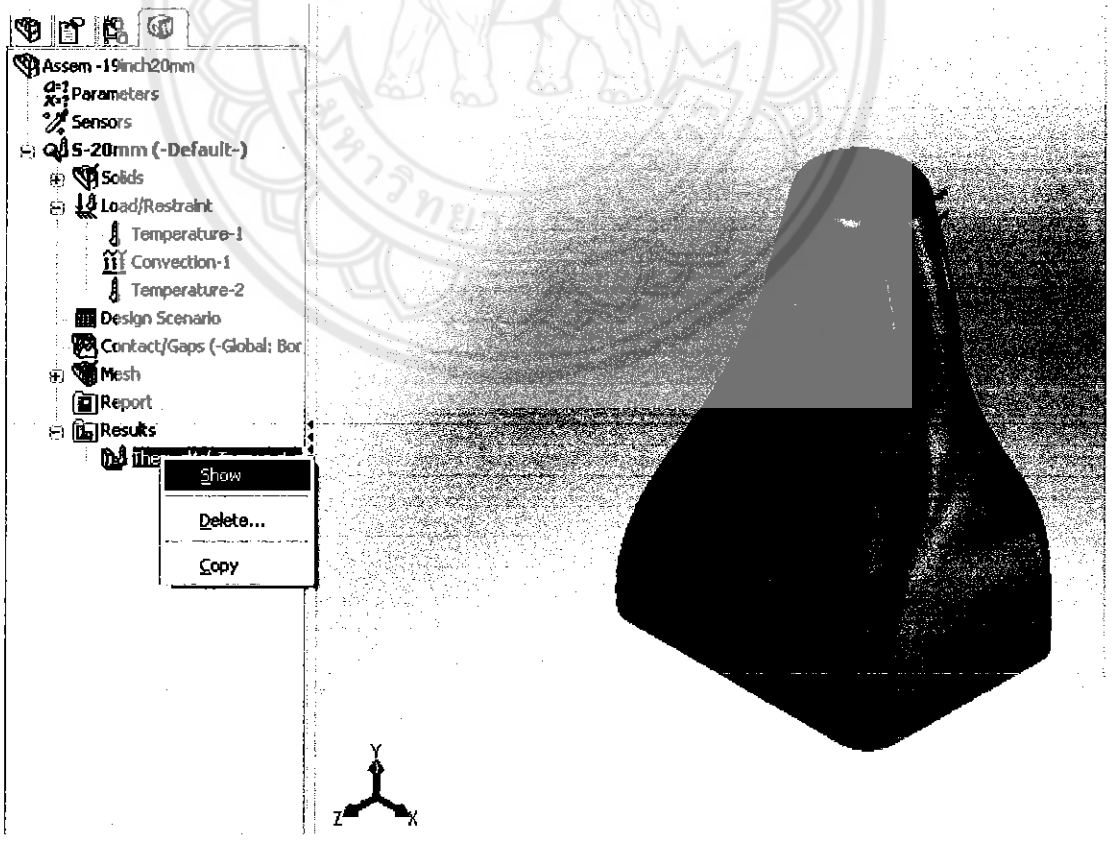
คลิก โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ผลต่อไป และจะทำการแบ่งเอลิเมนต์ ดังรูปด้านล่างนี้



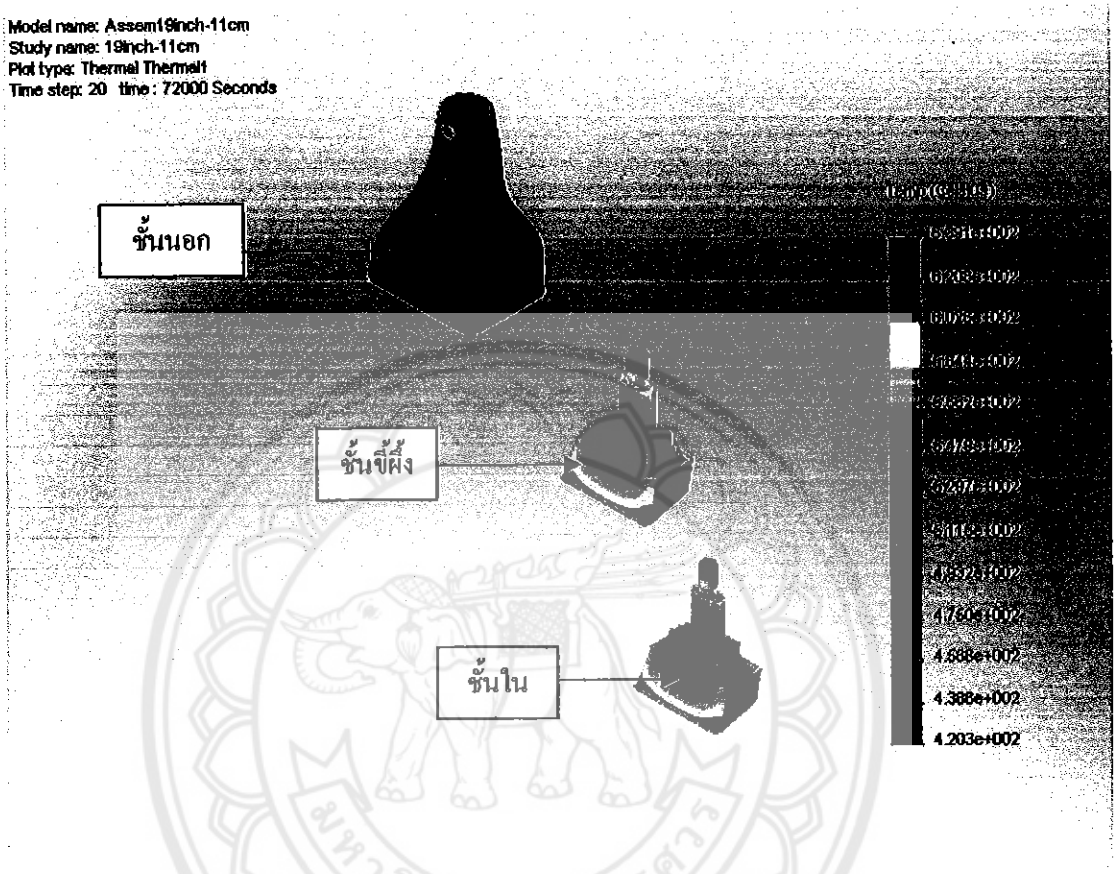


18.3 Post-Processing

18.3.1 หลังจากที่ Run เสร็จแล้ว คลิกเครื่องหมาย + ที่หน้าResults คลิกขวาที่ Thermal 1 (-Temperature-) จะปรากฏคำสั่งแถบคำสั่ง Show → คลิก Show



18.3.2 โปรแกรมจะทำการแสดงผลค่าการกระจายความร้อนภายในแบบหล่อพระพุทธรูป



ภาคผนวก ค

อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

ตาราง ค. อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับ เครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

ชั่วโมงในการเผา	T ภายในเตา(° C)	T ในแบบ(° C)	T ผิวแบบ(° C)
ก่อนเผา	25.00	25.00	25.00
3 hr 20 min	619.00	25.00	625.00
4 hr 20 min	519.40	69.02	636.12
4 hr 53 min	587.32	83.51	628.42
5 hr 20 min	554.78	90.50	620.67
5 hr 50 min	547.39	95.75	613.25
6 hr 20 min	565.03	97.28	623.78
6 hr 50 min	583.73	97.55	630.05
7 hr 20 min	693.90	98.02	646.02
7 hr 50 min	634.72	98.09	688.21
8 hr 20 min	630.22	97.74	685.60
8 hr 50 min	621.47	97.57	675.15
9 hr 20 min	613.10	97.86	681.61
9 hr 25 min	616.18	97.92	689.19
9 hr 30 min	626.95	98.01	699.29
9 hr 35 min	627.74	97.95	703.96
9 hr 40 min	632.62	97.98	711.76
9 hr 45 min	631.66	98.02	706.54
9 hr 50 min	679.20	98.26	710.04
9 hr 55 min	723.15	98.70	727.62
10 hr	725.66	99.47	739.40
10 hr 5 min	728.99	99.30	753.79
10 hr 10 min	711.80	99.28	747.87
10 hr 15 min	712.11	100.18	745.35
10 hr 20 min	703.63	106.11	737.32
10 hr 25 min	724.59	107.47	734.54

ตาราง ค. (ต่อ) อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

ชั่วโมงในการเผา	T ภายในเตา (°C)	T ในแบบ (°C)	T ผิวแบบ (°C)
10 hr 30 min	723.45	110.27	742.90
10 hr 35 min	720.71	111.98	741.12
10 hr 40 min	717.20	112.34	736.71
10 hr 45 min	710.31	99.49	744.53
10 hr 50 min	704.69	99.97	737.38
10 hr 55 min	683.38	100.24	735.54
11 hr	681.82	127.93	706.89
11 hr 5 min	727.54	159.73	707.54
11 hr 10 min	709.22	170.07	699.13
11 hr 15 min	695.42	171.01	686.28
11 hr 20 min	708.31	173.06	686.61
11 hr 25 min	704.91	172.58	685.67
11 hr 30 min	688.26	171.76	678.90
11 hr 35 min	667.54	171.34	669.14
11 hr 40 min	707.99	169.98	670.75
11 hr 45 min	715.08	170.51	671.06
11 hr 50 min	737.77	171.04	672.70
11 hr 55 min	730.14	171.71	672.33
12 hr	741.45	171.39	670.04
12 hr 5 min	734.97	168.21	667.75
12 hr 10 min	728.65	167.34	661.07
12 hr 15 min	721.15	98.82	714.35
12 hr 20 min	715.94	98.79	708.45
12 hr 25 min	701.89	98.80	704.43
12 hr 30 min	698.32	98.81	699.49
12 hr 35 min	712.34	98.73	702.22

ตาราง ค. (ต่อ) อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

ชั่วโมงในการเผา	T ภายในเตา (°C)	T ในแบบ (°C)	T ผิวแบบ (°C)
12 hr 40 min	692.61	98.82	702.18
12 hr 45 min	688.61	98.90	716.75
12 hr 50 min	681.45	98.81	722.58
12 hr 55 min	708.37	98.91	738.05
13 hr	707.65	99.03	747.71
13 hr 5 min	690.02	98.91	747.43
13 hr 10 min	677.45	98.90	735.41
13 hr 15 min	665.23	98.97	732.84
13 hr 20 min	669.23	98.81	729.21
13 hr 25 min	673.11	98.97	733.17
13 hr 30 min	659.23	98.82	731.80
13 hr 35 min	646.73	98.87	728.44
13 hr 40 min	641.18	98.85	722.31
13 hr 45 min	639.24	98.76	719.04
13 hr 50 min	682.39	98.77	692.31
13 hr 55 min	718.71	98.75	698.46
14 min	698.28	99.24	735.05
14 hr 5 min	703.01	100.38	766.11
14 hr 10 min	714.10	103.15	779.21
14 hr 15 min	718.90	107.94	784.77
14 hr 20 min	722.76	110.53	790.40
14 hr 25 min	717.30	114.05	794.09
14 hr 30 min	740.07	121.04	789.93
14 hr 35 min	696.16	119.32	794.24
14 hr 40 min	779.61	117.56	777.63
14 hr 45 min	795.48	117.84	780.19

ตาราง ค. (ต่อ) อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

ชั่วโมงในการเผา	T ภายในเตา (°C)	T ในแบบ (°C)	T ผิวแบบ (°C)
14 hr 50 min	799.21	117.90	779.84
14 hr 55 min	787.99	118.03	779.98
15 hr	765.85	117.95	774.61
15 hr 5 min	734.36	118.10	775.95
15 hr 10 min	738.79	118.45	773.34
15 hr 15 min	722.17	118.74	769.36
15 hr 20 min	702.56	119.42	766.53
15 hr 25 min	689.14	120.30	765.39
15 hr 30 min	679.13	121.55	759.98
15 hr 35 min	676.71	123.76	753.68
15 hr 40 min	668.88	126.62	749.21
15 hr 45 min	664.42	130.09	741.83
15 hr 50 min	655.30	134.25	740.84
15 hr 55 min	650.86	139.36	736.17
16 hr	640.31	144.80	728.43
16 hr 5 min	634.30	150.43	724.89
16 hr 10 min	670.11	156.51	714.95
16 hr 15 min	657.35	162.93	726.88
16 hr 20 min	648.94	169.44	736.40
16 hr 25 min	744.59	176.32	742.37
16 hr 30 min	725.86	184.04	754.35
16 hr 35 min	729.61	192.14	770.80
16 hr 40 min	702.91	201.53	777.29
16 hr 45 min	694.22	211.77	778.17
16 hr 50 min	690.62	221.61	776.85
16 hr 55 min	698.94	230.95	767.67

ตาราง ค. (ต่อ) อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

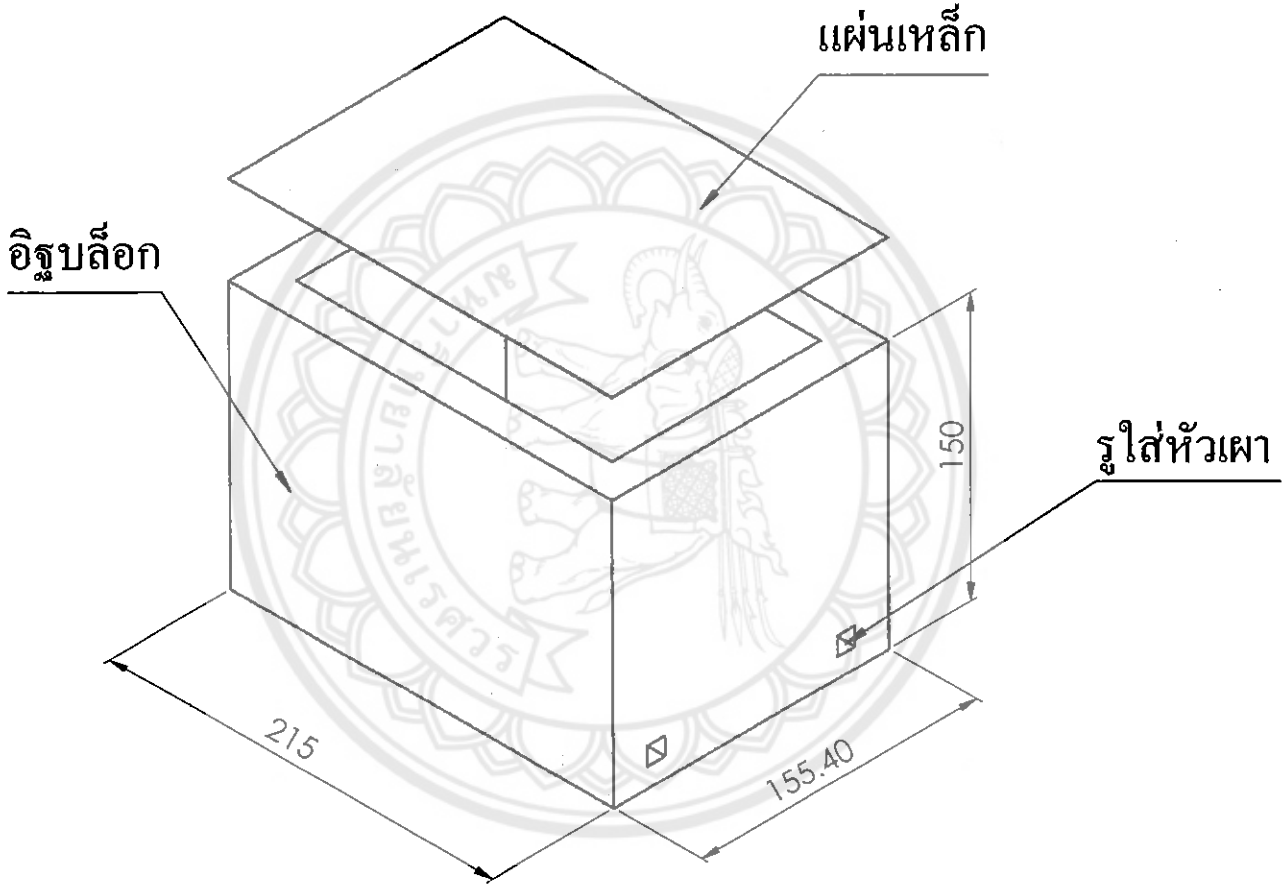
ชั่วโมงในการเผา	T ภายในเตา (°C)	T ในแบบ (°C)	T ผิวแบบ (°C)
17 hr	704.39	241.92	769.34
17 hr 5 min	706.79	253.22	769.57
17 hr 10 min	706.04	264.68	773.23
17 hr 15 min	700.47	275.89	774.92
17 hr 20 min	693.71	282.54	773.44
17 hr 25 min	691.36	291.03	773.18
17 hr 30 min	686.32	298.08	768.48
17 hr 35 min	678.63	304.96	771.78
17 hr 40 min	673.19	311.25	760.95
17 hr 45 min	670.16	317.67	762.31
17 hr 50 min	659.65	323.61	746.71
17 hr 55 min	652.47	329.32	738.26
18 hr	645.33	334.88	730.61
18 hr 5 min	639.99	340.05	726.15
18 hr 10 min	634.55	344.96	723.54
18 hr 15 min	627.95	349.71	717.56
18 hr 20 min	622.31	354.31	713.95
18 hr 25 min	615.08	358.55	706.47
18 hr 30 min	610.97	362.75	703.18
18 hr 35 min	603.90	366.85	700.47
18 hr 40 min	597.78	370.79	699.48
18 hr 45 min	594.60	374.62	698.63
18 hr 50 min	589.11	378.43	685.26
18 hr 55 min	585.25	382.22	680.58
19 hr	575.18	385.88	672.27
19 hr 5 min	571.22	389.40	665.27

ตาราง ค. (ต่อ) อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยการใช้สาย Thermo Couple Type K ต่อเข้ากับเครื่อง Data Logger วัดอุณหภูมิที่ได้จริงในขณะทำการเผาแบบหล่อพระพุทธรูป

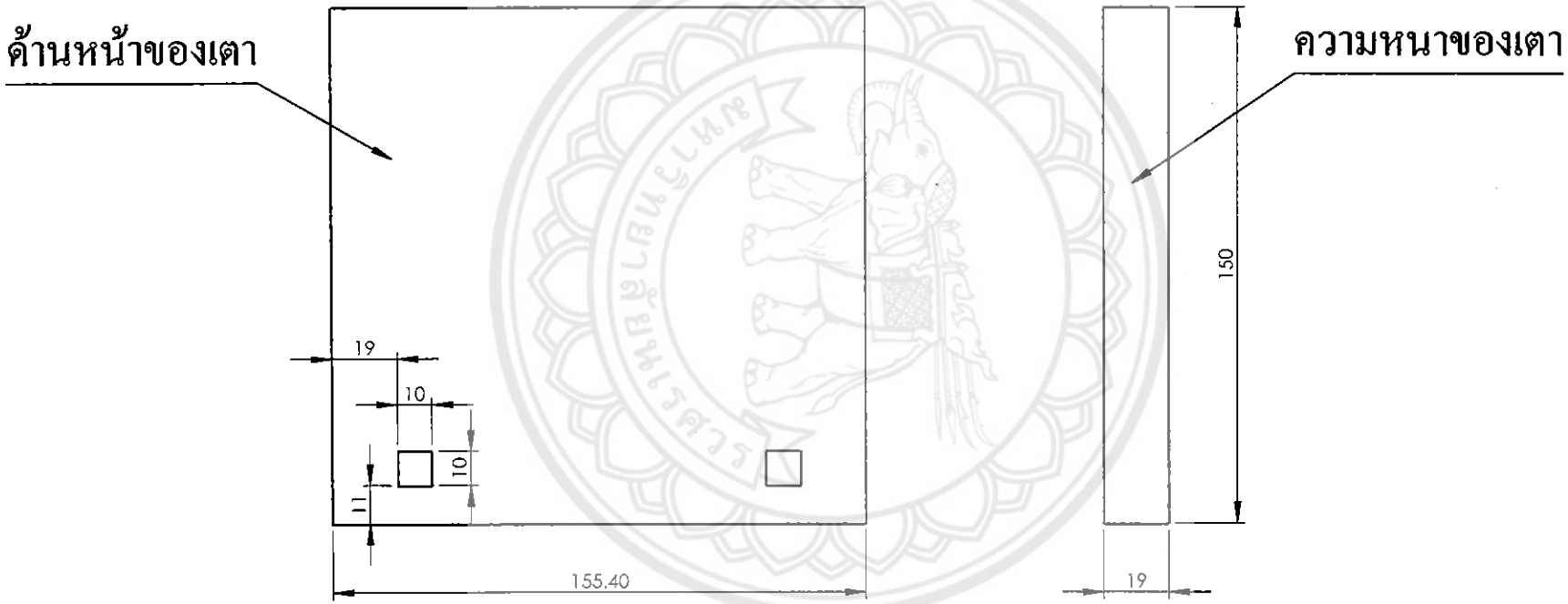
ชั่วโมงในการเผา	T ภายในเตา (°C)	T ในแบบ (°C)	T ผิวแบบ (°C)
19 hr 10 min	567.76	393.13	665.60
19 hr 15 min	577.24	396.53	667.60
19 hr 20 min	573.68	399.92	670.80
19 hr 25 min	617.38	403.18	650.21
19 hr 30 min	590.86	406.46	627.42
19 hr 35 min	587.42	409.69	608.78
19 hr 40 min	615.03	412.80	610.75
19 hr 45 min	626.85	415.88	625.89
19 hr 50 min	620.13	419.04	624.97
19 hr 55 min	600.31	419.32	613.58
20 hr	503.00	419.80	605.60

ภาคผนวก ง

รายละเอียดของเตาเผา



NARESUAN UNIVERSITY		
Faculty of Engineering	Mechanical Engineering	
เตาเผา	Scale 1:30	No.00
All dimensions are in centimeter		1/2



NARESUAN UNIVERSITY		
Faculty of Engineering	Mechanical Engineering	
ด้านหน้าของเตา	Scale 1:20	No.00
All dimensions are in centimeter		2/2

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

นายนิพล ผาคำ

1. ประวัติส่วนตัว

เกิดวันที่ 22 มีนาคม 2529

ที่อยู่ 33 หมู่ 7 ต.ระหาน อ. บึงสามัคคี จ.กำแพงเพชร 62210

E-mail Mechanical-king@hotmail.com โทรศัพท์ 084-236-2129

2. ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนระหานวิทยา อ. บึงสามัคคี จ.กำแพงเพชร

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนระหานวิทยา อ. บึงสามัคคี จ.กำแพงเพชร

นายวิศรุต ศิริสาน

1. ประวัติส่วนตัว

เกิดวันที่ 1 ธันวาคม 2529

ที่อยู่ 151 หมู่ 4 ต.ซับน้อย อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์ 67180

E-mail S.wisarut@hotmail.com โทรศัพท์ 087-211-9868

2. ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนวังพิกุลพิทยาคม อ.บึงสามพัน จ.เพชรบูรณ์

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวังพิกุลพิทยาคม อ.บึงสามพัน จ.เพชรบูรณ์