สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของพลาสติกในช่วงเวลาการหล่อเย็นจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

MATHEMATICAL MODELING AND PROGRAMMING FOR TEMPERATURE DISTRIBUTION ANALYSIS OF THE PLASTICS COOLING DURING INJECTION PROCESS

T119481

นางสาวณุบล คุ้มพงษ์
MS. NUBOL KHUMPONG
นางสาวพัชรินทร์พร พิกุลศรี
MS. PATCHARINPORN PIKUNSRI
นางสาวโสมสุรีย์ กระแสร์
MS. SOMSUREE KRASA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 119481
วัน,เดือน,ปี - 8 S.A. 2554

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATHEMATICAL MODELING AND PROGRAMMING FOR TEMPERATURE DISTRIBUTION ANALYSIS OF THE PLASTICS DURING COOLING INJECTION PROCESS

MS. NUBOL KHUMPONG

MS. PATCHARINPORN PIKUNSRI

MS. SOMSUREE KRASA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของพลาสติกในช่วงเวลาการหล่อเย็นจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

MATHEMATICAL MODELING AND PROGRAMMING FOR TEMPERATURE DISTRIBUTION ANALYSIS OF THE PLASTICS COOLING DURING INJECTION PROCESS

นักศึกษา

นางสาวฉุบล คุ้มพงษ์	รหัสประจำตัว	50010523
นางสาวพัชรินทร์พร พิกุลศรี	รหัสประจำตัว	50011080
นางสาวโสมสุรีย์ กระแสร์	รหัสประจำตัว	50011799

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(ดร.วิภู ศรีสืบสาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของพลาสติกในช่วงเวลาการหล่อเย็นจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด
นักศึกษา	นางสาวณุบล คุ้มพงษ์ นางสาวพัชรินทร์พร พิกุลศรี นางสาวโสมสุรีย์ กระแสร์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.วิภู ศรีสืบสาย

บทคัดย่อ

โครงงานปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นงานพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในสภาวะไม่อยู่ตัวในการคำนวณ สำหรับการวิเคราะห์ได้ใช้หลักการจากวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างแบบกาเลอร์คิน โดยใช้รูปทรงสามเหลี่ยม 2 มิติในการแก้ปัญหา และได้กำหนดให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมทรงตัน สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละพิกัดตำแหน่งของแต่ละเอลิเมนต์ โดยมีข้อกำหนดให้ชิ้นงานสี่เหลี่ยมทรงตัน ได้รับความร้อน 1 ด้าน และอีก 3 ด้านสัมผัสอากาศ ซึ่งโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นจะแสดงผลออกมาเป็นภาพกราฟฟิกแสดงระดับสีของอุณหภูมิในระดับต่าง ๆ ตามช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยผลการคำนวณของโปรแกรมที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับโปรแกรมสำเร็จรูปเมื่อได้นำมาเปรียบเทียบกัน และเมื่อแบ่งจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นผลที่ได้จะมีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	MATHEMATICAL MODELING AND PROGRAMMING FOR TEMPERATURE DISTRIBUTION ANALYSIS OF THE PLASTICS COOLING DURING INJECTION PROCESS
Student	Ms. Nubol Khumpong Ms. Patcharinpon Pikunsri Ms. Somsuree Krasa
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2010
Thesis Advisor	Dr. Wipoo Sriseubsai

ABSTRACT

This thesis presented a study on mathematical modeling for analyzing injection molding part by finite element method. The temperature distribution in molded part, calculated under unsteady state condition. The weighted residual fraction intellectual property was used with triangle finite element method to calculate heat transfer with 2-D midplane. Triangle elements were generated by open source. The limitation of this model was only calculating heat transfer for solid rectangular part when one side was heated and other ones were in ambient conditions. This model was developed on MATLAB for presenting the temperature distribution in each elements at various times. This program was created to show off a color graphic display of temperature in different levels according to the changing times. The results of program were acceptable when compared with Easy Software. And the results showed that high amount of elements give high precise calculation but take more time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดพลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ดร.วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ กลุ่มวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ แนวคิด คำแนะนำ ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และความเอาใจใส่ในทุกๆด้านตลอดเวลาที่ผ่านมา

รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ แนวคิด คำแนะนำ ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆและความเอาใจใส่ในทุกๆด้านตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

นายกร การุณ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือทุกๆด้านในการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่ต้นจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

น.ส.ณุบล คุ้มพงษ์
น.ส.พัชรินทร์พร พิกุลศรี
น.ส.โสมสุรีย์ กระแสร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูป ..... ซ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์ 2

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ 2

1.4 ข้อกำหนดของปริญญานิพนธ์ 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก 3

2.1.1 การแบ่งประเภทของพลาสติก 3

2.1.2 เทอร์โมพลาสติก 3

2.1.3 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก 4

2.1.4 การขึ้นรูปด้วยการหล่อ 5

2.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ 5

2.3 ความสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ 6

2.4 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 7

2.4.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์ 7

2.4.2 การเลือกฟังก์ชันการกระจัด 8

2.4.3 การหาสทิฟเนสเมตริกซ์และการสร้างสมการของเอลิเมนต์ 10

2.4.4 การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบ 11

2.4.5 หาการกระจัดของระบบ 11

2.4.6 การคำนวณหาค่า ณ จุดต่าง ๆ 12

2.4.7 การตีความผลลัพธ์ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการถ่ายเทความในสภาวะทั่วๆไปที่ไม่อยู่ตัว..... 12
2.5.1 การประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างโดยวิธีบับโนฟ - กาเลอร์คิน..... 13
2.5.2 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต..... 16
2.6 ปัญหาเชิงเส้นในสถานะชั่วครู่..... 19
2.7 ระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์..... 22
2.7.1 การกำจัดไปข้างหน้า..... 22
2.7.2 การแทนค่าย้อนกลับ..... 22
2.8 ความรู้พื้นฐานที่จำเป็น..... 26
2.9 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์..... 26
2.10 ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 28
2.11 ข้อควรระวังของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 29

บทที่ 3 การออกแบบและการดำเนินงาน

3.1 การวางแผนขั้นตอนการดำเนินงาน..... 30
3.2 การออกแบบโปรแกรม..... 31
3.2.1 ส่วนรับข้อมูล..... 31
3.2.2 ส่วนประมวลผล..... 31
3.2.3 ส่วนแสดงผล..... 31
3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม..... 32

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 การวิเคราะห์หาค่าการกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงาน..... 38
จากโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME
4.2 ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME..... 45

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน..... 46
5.2 แนวทางพัฒนาและปรับปรุง..... 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

หนังสืออ้างอิง..... 48
ภาคผนวก ก.....ผก 1
ภาคผนวก ข.....ผข 1
ภาคผนวก ค.....ผค 1
ภาคผนวก ง.....ผง 1
ภาคผนวก จ.....ผจ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 วิธีการคำนวณแบบต่างๆ..... 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการหล่อแบบฉีด 5
รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์หาผลเฉลยด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ 6
รูปที่ 2.3 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ 8
รูปที่ 2.4 เอลิเมนต์แบบอย่าง 9
รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนในเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 14
รูปที่ 2.6 สมดุลของการถ่ายเทความร้อนเมื่อกำหนดปริมาณความร้อนไหลเข้า 16
รูปที่ 2.7 สมดุลของกการถ่ายเทความร้อน เมื่อเกิดการพาความร้อน 17
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดต่อใด ๆ กับเวลา 20
รูปที่ 2.9 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระดูก 27
รูปที่ 2.10 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการยุบตัวของรถยนต์ในขณะเกิดการชน 27
รูปที่ 2.11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเครื่องบินรบ 28
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม 32
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการคำนวณ 38
รูปที่ 4.2 หน้าจอโปรแกรม MATLAB ขณะพิมพ์ชื่อโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME 39
รูปที่ 4.3 หน้าต่างโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME 40
รูปที่ 4.4 การชื่อไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์ลงในส่วน IMPORT FILE 40
รูปที่ 4.5 กล่องข้อความเพื่อสอบถามข้อมูลในการแสดงการแบ่งเอลิเมนต์ 41
รูปที่ 4.6 ผลการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh Plot) 41
รูปที่ 4.7 ค่าพิกัด (X,Y) ของแต่ละจุดต่อ (Node) 42
รูปที่ 4.8 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลค่าต่าง ๆ ของชิ้นงาน 42
รูปที่ 4.9 หน้าจอสำหรับกดปุ่ม Calculate 43
รูปที่ 4.10 หน้าต่างแสดงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนชิ้นงานด้วยระดับแถบสีเป็นภาพเคลื่อนไหว ในแต่ละช่วงเวลา 43
รูปที่ 4.11 หน้าต่างแสดงค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และ ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ ในแต่ละช่วงเวลา 44
รูปที่ 4.12 หน้าจอสำหรับกดปุ่ม Stop 44
รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับโปรแกรมสำเร็จรูป 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของโครงงาน วัตถุประสงค์ของโครงงาน ขอบเขตของโครงงาน ข้อกำหนดของโครงงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันพลาสติกนับว่าเป็นวัสดุที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก ดังนั้นในภาคอุตสาหกรรมการผลิตจึงมีการนำพลาสติกเข้ามาแปรรูปเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี ทั้งนี้เพราะพลาสติกมีจุดเด่นที่สามารถผลิตชิ้นงานในลักษณะที่เป็นชิ้นงานสำเร็จพร้อมใช้งาน และยังสามารถให้สีได้ตามต้องการ นอกจากนี้พลาสติกยังเป็นวัสดุสร้างที่มีคุณค่าควบคู่ไปกับเหล็กและไม้ อีกทั้งพลาสติกยังมีความยืดหยุ่นได้ดีต่อการขึ้นรูปโดยสามารถสร้าง ดัด แปลง และแปรรูปได้ง่าย จึงเป็นผลให้รูปแบบการผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความหลากหลายมากขึ้น ดังนั้นในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติกจึงมีความสำคัญและจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สำหรับการออกแบบและผลิตชิ้นงานพลาสติกนั้น โดยส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการฉีดพลาสติกหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ ซึ่งในการออกแบบชิ้นงานพลาสติกจะต้องมีการวิเคราะห์ ตรวจสอบโครงสร้างและความเสียหายต่าง ๆ วิเคราะห์รูปแบบของผลิตภัณฑ์ คุณภาพ ฟังก์ชันการทำงาน รวมไปถึงความปลอดภัยในการใช้งานที่ต้องเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยในการวิเคราะห์ดังกล่าวจำเป็นต้องทดสอบกับตัวต้นแบบก่อนที่จะทำการผลิตออกมาเป็นชิ้นงานจริง ซึ่งอาจทำให้มีต้นทุนสูง และเกิดความล่าช้าในกระบวนการการออกแบบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และหากผลิตภัณฑ์ต้นแบบนั้นไม่ผ่านมาตรฐานในการทดสอบในเรื่องใดเรื่องหนึ่งก็ตาม จะส่งผลให้ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทำการออกแบบ และสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบขึ้นมาใหม่อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นความสามารถในการแก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ จึงมีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริมปรับปรุงกระบวนการวิเคราะห์ให้ดีและง่ายขึ้น ปรากฏการณ์การส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นรอบตัวจึงสามารถอธิบายได้โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่างๆ ที่สร้างขึ้นมาเป็น “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายอุณหภูมิของพลาสติกที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงเวลาการหล่อเย็นด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์” โดยเลือกที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาของพลาสติกใน 2 มิติ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงเกินความจำเป็น ความล่าช้าในกระบวนการผลิต และปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อการผลิตชิ้นงาน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีให้เกิดขึ้นกับชิ้นงานอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิของพลาสติกในช่วงเวลาการหล่อเย็นที่เวลาต่าง ๆ จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด
2. เพื่อทดสอบและจำลองลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ของชิ้นงานพลาสติกในช่วงเวลาการหล่อเย็นจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก
3. เพื่อเป็นพื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. พลาสติกที่ทำการศึกษาเป็นพลาสติกชนิด เทอร์โมพลาสติก
2. ใช้ระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆของพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติก
3. ชนิดของโครงร่างตาข่ายที่ใช้เป็นแบบ Midplane และใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยม 2 มิติ
4. โครงสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประกอบด้วย
   - หน่วยประมวลผล สำหรับรับค่าพิกัดต่าง ๆ จากโปรแกรม Mesh Lab และการคำนวณลักษณะการกระจายอุณหภูมิของพลาสติก
   - หน่วยแสดงผล สำหรับแสดงระดับอุณหภูมิออกมาเป็นแถบสีต่าง ๆ ในรูปแบบ 2 มิติ
5. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการพัฒนา
6. ทำการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมทดสอบชิ้นงานที่ได้สร้างขึ้น กับโปรแกรมทดสอบชิ้นงานสำเร็จรูปที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

1.4 ข้อกำหนดของปริญญานิพนธ์

1. กำหนดให้การกระจายอุณหภูมิของพลาสติกในช่วงเวลาการหล่อเย็นอยู่ในสภาวะไม่คงตัว
2. กำหนดให้พลาสติกหลอมเหลวไม่สามารถผลิตความร้อนได้เอง
3. กำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความหนาแน่นของมวล และอุณหภูมิบริเวณขอบเป็นค่าคงที่
4. กำหนดให้ชิ้นงานเป็นชิ้นงานสมมาตร รูปร่างทรงตัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติกได้
2. สามารถลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบชิ้นงานได้
3. เพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบผลิตภัณฑ์ประเภทพลาสติกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติก ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดเกี่ยวกับการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงาน โดยมีรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.1 พลาสติกและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก [1]

2.1.1 การแบ่งประเภทของพลาสติก

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก และ เทอร์โมเซตติงพลาสติก

2.1.2 เทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมากจึงสามารถหลอมเหลวได้ หรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ตัวอย่าง พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ ชนิดของพลาสติกใน ตระกูลเทอร์โมพลาสติก ได้แก่

1. โพลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) เป็นพลาสติกที่มีไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แต่อากาศผ่านเข้าออกได้ มีลักษณะขุ่นและทนความร้อนได้พอสมควร เป็นพลาสติกที่นำมาใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ ถัง ถุง ขวด แท่นรองรับสินค้า เป็นต้น
2. โพลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แข็งกว่าโพลิเอทิลีน สามารถทนต่อสารไขมันและความร้อนสูงได้ ใช้ทำแผ่นพลาสติ ถุงพลาสติกบรรจุอาหารที่ทนความร้อน หลอดดูดพลาสติก เป็นต้น
3. โพลิสไตรีน (Polystyrene: PS) มีลักษณะโปร่งใส เปราะ ทนต่อกรดและด่าง ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร ใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น
4. SAN (styrene-acrylonitrile) เป็นพลาสติกที่มีลักษณะโปร่งใส ใช้ผลิตชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น
5. ABS (acrylonitrile butadiene styrene) สมบัติคล้ายโพลิสไตรีน แต่สามรถทนสารเคมีได้ดีกว่า เหนียวกว่า โปร่งแสง ใช้ผลิตถ้วย ถาด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. โพลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride: PVC) ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร แต่ป้องกันไขมันได้ดี มีลักษณะใส ใช้ทำขวดบรรจุน้ำมันและไขมันปรุงอาหาร ขวดบรรจุเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ เบียร์ ใช้ทำแผ่นพลาสติก ห่อเนยแข็ง ทำแผ่นแลมิเนตชั้นในของถุงพลาสติก
7. ไนลอน (Nylon) เป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก คงทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ทำแผ่นแลมิเนตสำหรับทำถุงพลาสติกบรรจุอาหารแบบสุญญากาศ
8. โพลิเอทิลีน เทอร์ฟะธาเลต (Terylene: polyethylene terephthalate) คุณสมบัติมีความเหนียวมากโปร่งใส ราคาแพง ใช้ทำแผ่นฟิล์มบางๆ บรรจุอาหาร
9. โพลิคาร์บอเนต (Polycarbonate: PC) มีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรงยืดและแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรดแต่ไม่ทนด่าง เป็นรอยหรือคราบอาหาร จับยาก ใช้ทำถ้วย จาน ชาม ขวดนมเด็ก และขวดบรรจุอาหารเด็ก เป็นต้น

2.1.3 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติก

โดยทั่วไปแล้วการผลิตของพลาสติกแต่ละประเภทจะมีหลักการของขั้นตอนใหญ่อยู่ทั้งสิ้น 4 ขั้นตอนคือ

1. การเลือกชนิดของพลาสติก และสารเสริมแต่ง
2. การผสมส่วนผสมให้เข้ากันได้ดี
3. การขึ้นรูปชิ้นงาน
4. การประกอบ และตกแต่งชิ้นงาน

ขั้นตอนที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำแม่พิมพ์และการเลือกใช้เครื่องจักรในกระบวนการผลิตก็คือการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตเป็นหลักอยู่ 3 ขั้นตอน คือ

1. การทำให้พลาสติกอ่อนตัวลง หรือหลอมโดยใช้ความร้อน
2. การทำให้พลาสติกยืดตัว หรือทำให้เหลวไหลไปได้
3. การทำให้พลาสติกเย็นตัวลง

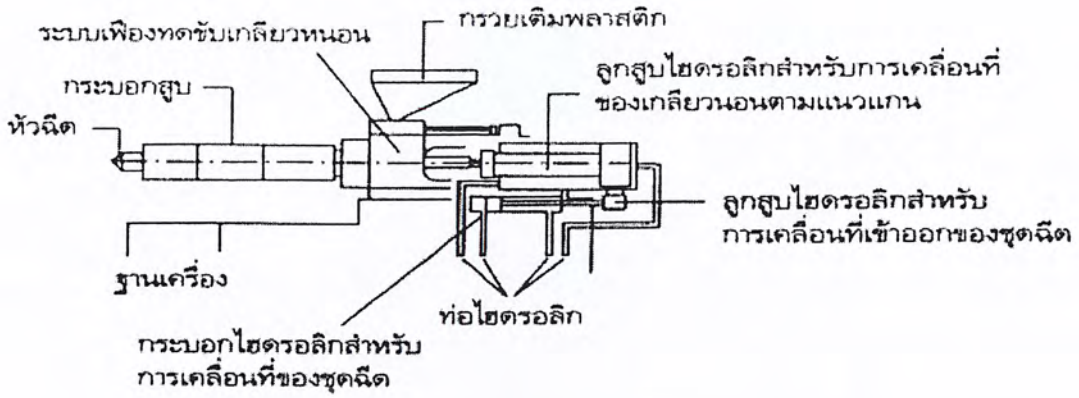
2.1.4 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการหล่อ (Moulding)

1. แบบฉีด (Injection moulding)
2. แบบอัด (Compression moulding)

2.1.4.1 <u>กรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานแบบฉีด (Injection moulding)</u>

การฉีดพลาสติกคือ การนำเอาเม็ดพลาสติกป้อนเข้าไปในช่องกรวยเติมพลาสติก เพื่อเข้ากระบวนการฉีดซึ่งเม็ดพลาสติกดังกล่าวจะหลอมละลายอยู่ภายในกระบอกอัด ด้วยความร้อนจากส่วนให้ความร้อน (Heater) รอบๆ กระบอกอัด ร่วมกับการอัดตัวของเม็ดพลาสติกด้วยเกลียวของสกรูอัดภายในกระบอกฉีด พลาสติกจะเกิดการหลอมละลายและจะถูกอัดส่งผ่านหัวฉีดอย่างรวดเร็ว เพื่อไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ฉีดจนเต็มและปล่อยให้เย็นตัวลง หลังจากนั้นจึงเปิดแม่พิมพ์ และนำชิ้นงานออกดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานแบบฉีด (Injection moulding) [1]

2.1.4.2 ข้อดีของกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection moulding)

1. เหมาะสมกับกำลังการผลิตจำนวนมาก เพราะระยะเวลาในการฉีดน้อยทำงานได้รวดเร็ว
2. แม่พิมพ์และเครื่องจักรมีความละเอียดและซับซ้อน ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานผนังบางได้ละเอียดแน่นอน และมีความประณีตได้ดี
3. สามารถควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ได้ดี
4. วัสดุมีการสูญเสียน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์อัด
5. ไม่ต้องมีการตกแต่งชิ้นงานหลังการฉีดมาก

2.1.4.3 ข้อบกพร่องของกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection moulding)

1. มีความเครียดตกค้างหลงเหลือจากการฉีดมาก
2. ราคาเครื่องจักรและแม่พิมพ์

2.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

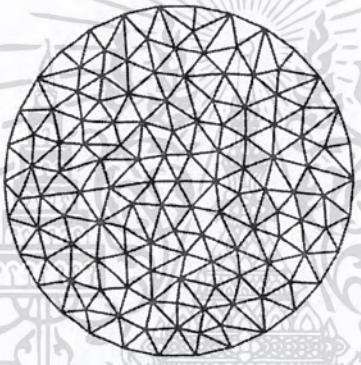
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง ทั้งในสภาพยืดหยุ่น (elastic) หรือในสภาพยืดตัว (plastic) ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน, การไหลของของไหล, การถ่ายเทมวล เป็นต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราสามารถจะหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบได้ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใด ๆ ของชิ้นส่วน โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นตรง (exact solution) แต่สำหรับโครงสร้างจำนวนมากมีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่าง ๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอและบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดไปอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้ เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นตรงได้จากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ทั่ว ๆไปได้

สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ขึ้นมาได้โดยไม่ยากเลย หากแต่ว่าผลเฉลยแม่นตรง (exact solution) ที่ต้องการและจำเป็นต้องทำการหาออกมาโดยวิธีการวิเคราะห์ (analytical method) นั้นทำได้ยากลำบากมากหรืออาจจะหาไม่ได้เลยก็ได้ เหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ขึ้น วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate methods) นั้นมีหลายวิธีการ วิธีการที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมา คือ วิธีการผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) ซึ่งไม่สามารถจะจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมได้โดยเที่ยงตรง จึงก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ที่นิยมเรียกกันด้วยคำย่อว่า FEM ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถนำมาใช้กับการแก้ปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างต่าง ๆ ได้โดยการเริ่มต้นจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลาย ๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์หาผลเฉลยด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

2.3 ความสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

สำหรับการแก้ปัญหาใด ๆ นั้น ในแต่ละปัญหาจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขต ค่าผลเฉลยแม่นตรง(exact solution) ที่ได้มาของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่าง ๆ กันตามตำแหน่งต่าง ๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวได้ว่าค่าผลเฉลยแม่นตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า ดังนั้นแทนที่จะทำการหาค่าแม่นตรงที่ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมาย ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำไม่ได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่า มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้(finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์(element) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน

วิธีการดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง(satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้น ๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น นอกจากนั้น ความแม่นยำของผลเฉลย ยังขึ้นอยู่กับการสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน(interpolation functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง(linear distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด(magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ(nodes) ของเอลิเมนต์ ตัวอย่างเช่น หากค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่อยู่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะได้ค่าแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2.4 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

ตามที่กล่าวมาแล้ว สามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้าง เช่น การกระจัด, ความเค้น - ความเครียด และใช้วิเคราะห์ปัญหาของการถ่ายเทความร้อน การไหลของของเหลว เป็นต้น

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถหามาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธี คือ วิธีแรง หรือ วิธียืดหยุ่น (force or flexibility method) และ วิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนส (displacement or stiffness method) วิธีแรกสามารถจะหาแรงภายใน และแรงปฏิกิริยาโดยอาศัยสมการสมดุลของแรงและสมการเงื่อนไขการกระจัด (compatibility equation)

ส่วนวิธีที่สองจะสามารถหาการกระจัดที่สมมติขึ้น โดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อหรือที่ขอบบริเวณที่สัมผัสกันไม่ว่าก่อนและหลังโหลดกระทำ ยังคงมีความต่อเนื่องเหมือนเดิม ดังนั้น สมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ แต่ละค่าของการกระจัดก็สามารถจะหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการกระจัด

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น นิยมใช้วิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนสหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถจะหาสมการสมดุลและหาผลเฉลยได้สะดวกกว่า รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวก็นิยมใช้วิธีการกระจัดด้วย

หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือ จะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ ดังเช่นรูปที่ 2.2 ซึ่งเรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (displacement function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะต้องโยงกันด้วยจุดต่อ (node) หรือเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน และโดยอาศัยคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน ซึ่งสามารถจะหาการกระจัด, ความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่าง ๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน

ขั้นตอนต่าง ๆ ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วน รวมทั้งปัญหาที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและความร้อน (thermal problem) และปัญหาการไหล (fluid problem) ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ด้วยกัน 7 ขั้นตอน ดังนี้

2.4.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ของขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่จะหาผลลัพธ์ ซึ่งต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิม คือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์(finite element model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู หรือตรงบริเวณที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

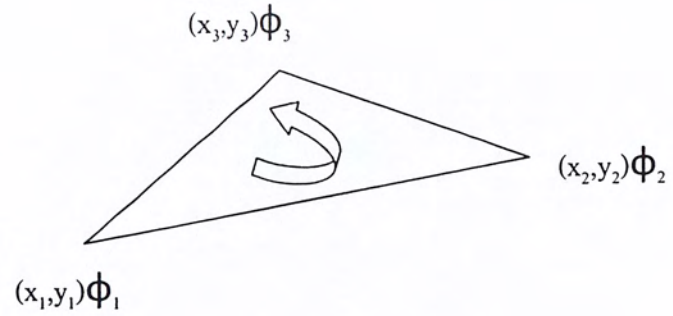
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างฉับพลัน ก็จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินความจำเป็นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูงและอาจจะทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการคำนวณไม่เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์นั้น จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้าง การกระทำของโหลด หรือลักษณะการไหล รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการ คืออาจจะเลือกใช้เอลิเมนต์มิติเดียว, สองมิติ, สามมิติ หรือเอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร(axisymmetric element) ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง(Elasticity problem) ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและความร้อน(Thermal problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล(Fluid problem) ดังรูปที่ 2.3 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

รูปที่ 2.3 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ [2]

2.4.2 การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

จะต้องเลือกฟังก์ชันการกระจัดภายในเอลิเมนต์(element interpolation functions) ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กัน คือ พอลินอเมียลฟังก์ชัน ซึ่งอาจจะเป็นพอลินอเมียลกำลังหนึ่ง, กำลังสอง, หรือกำลังสาม ส่วนฟังก์ชันที่เป็นอนุกรมทางเรขาคณิตก็สามารถเลือกใช้ได้แต่ไม่เป็นที่นิยม มิติของฟังก์ชันการกระจัดที่จุดต่อจะเขียนอยู่ในเทอมของพิกัดของระนาบ เช่น ระนาบ x-y เป็นต้น ฟังก์ชันการกระจัดที่จะเลือกใช้จะต้องทำให้ผลเฉลยที่ความต่อเนื่องทั้งภายในเอลิเมนต์และแบบจำลองของระบบรวม ซึ่งการเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์(element interpolation functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (เอลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 4) เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่จุดต่อนี้นั้นเป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า(nodal unknowns) ซึ่งคือ $\emptyset_1, \emptyset_2$ และ $\emptyset_3$ ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ จะเป็นค่าของอุณหภูมิในกรณีปัญหาการถ่ายเทความร้อน ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 เอลิเมนต์แบบอย่าง [2]

$$\emptyset(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \tag{2.1}$$

เมื่อ $\alpha_i, \mathrm{i} = 1,2,3$ เป็นค่าคงตัวที่สามารถหาค่าได้จากเงื่อนไขที่จุดต่อทั้ง 3

จุดต่อที่ 1 : $\emptyset(x_1,y_1) = \emptyset_1 = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1$

จุดต่อที่ 2 : $\emptyset(x_2,y_2) = \emptyset_2 = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2$

จุดต่อที่ 3 : $\emptyset(x_3,y_3) = \emptyset_3 = \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3$

แทนค่าต่าง ๆ กลับลงในสมการที่ (2.1) แล้วทำการจัดพจน์ต่าง ๆ ใหม่ จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยสำหรับเอลิเมนต์ที่อยู่ในรูป ดังนี้

$$\emptyset(\mathrm{x},\mathrm{y}) = N_1(x,y)\emptyset_1 + N_2(x,y)\emptyset_2 + N_3(x,y)\emptyset_3 \tag{2.2}$$

โดย $N_i(x,y), i = 1,2,$ และ 3 คือฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์

สมการที่ 2.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\emptyset(x,y) = \lfloor N_1 \quad N_2 \quad N_3 \rfloor \begin{Bmatrix} \emptyset_1 \\ \emptyset_2 \\ \emptyset_3 \end{Bmatrix}$$

$$= \underbrace{\lfloor N \rfloor}_{1\times3} \underbrace{\{\emptyset\}}_{3\times1} \tag{2.3}$$

โดย $\lfloor N \rfloor$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

(element interpolation matrix)

$\{\emptyset\}$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ของตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น

เมื่อ

$$N_i(x,y) = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y) \quad ; i = 1,2,3 \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $$A = \frac{1}{2}[x_2(y_3 - y_1) + x_1(y_2 - y_3) + x_3(y_1 - y_2)] \quad (2.5)$$

A = พื้นที่ของเอลิเมนต์

โดยที่ค่าต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$a_1 = x_2y_3 - x_3y_2 \qquad a_2 = x_3y_1 - x_1y_3 \qquad a_3 = x_1y_2 - x_2y_1$$

$$b_1 = y_2 - y_3 \qquad b_2 = y_3 - y_1 \qquad b_3 = y_1 - y_2$$

$$c_1 = x_3 - x_2 \qquad c_2 = x_1 - x_3 \qquad c_3 = x_2 - x_1$$

2.4.3 การหาสทิฟเนสเมตริกซ์และการสร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equation)

ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะอยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \kappa_{11} & \kappa_{12} & \kappa_{13} \\ \kappa_{21} & \kappa_{22} & \kappa_{23} \\ \kappa_{31} & \kappa_{32} & \kappa_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.6)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[\kappa]_e\{\phi\}_e = \{q\}_e \quad (2.7)$$

ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการหาสทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์และสมการของแรงของแต่ละเอลิเมนต์นั้น สามารถหาได้หลายวิธีเช่น

2.4.3.1 <u>วิธีสมดุลโดยตรง (direct equilibrium method)</u>

วิธีสมดุลโดยตรงนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สามารถหาสทิฟเนสเมตริกซ์และสมการของแรงในเทอมการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ ส่วนมากจะใช้หาสทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว เช่น เอลิเมนต์สปริง, ท่อนโลหะ, เพลา, และคาน เป็นต้น

2.4.3.2 <u>วิธีงานหรือพลังงาน (work or energy method)</u>

โดยอาศัยหลักของงานสมมติ (*principle of virtual work*), หลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (*principle of minimum potential energy*) และทฤษฎีของแคสติกเลียโน (*Castigliano's theorem*) ก็สามารถจะหาสมการของเอลิเมนต์และหาสทิฟเนสของเอลิเมนต์สองและสามมิติได้สะดวก สำหรับวิธีของงานสมมตินั้นสามารถจะใช้หาสทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุทุกชนิดและวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดและทฤษฎีแคสติกเลียโน ใช้หาสทิฟเนสเมตริกซ์ของแต่ละ เอลิเมนต์ของวัสดุเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามทั้งสามหลักการ สามารถหาสทิฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นได้เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.3 วิธีเวทเรซิดิว (method of weighted residuals)

วิธีเวทเรซิดิวที่นิยมกันมากก็คือ วิธีกาเลอร์คิน (*Galerkin's method*) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการหาสมการของเอลิเมนต์ และให้ผลเช่นเดียวกับวิธีพลังงาน ส่วนมากมักจะนิยมใช้ในกรณีที่วิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดใช้ได้ไม่สะดวก เช่น ปัญหาการไหลของของเหลว การถ่ายเทความร้อน กรเคลื่อนมวล (*mass transport*) เป็นต้น

จากหลักการจะอาศัยวิธีใดวิธีหนึ่งจากสามวิธีตามที่กล่าวมาแล้ว จะได้รับสมการสมดุลแรงในเทอมของสทิฟเนสเมตริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์สมการดังกล่าว สามารถจะเขียนได้ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \kappa_{11} & \cdots & \kappa_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \kappa_{n1} & \cdots & \kappa_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix}$$

$$[\kappa]_e\{\phi\}_e = \{q\}_e$$

โดยที่ $[\kappa]_e$ คือ สทิฟเนสของเอลิเมนต์

$\{\phi\}_e$ คือ การกระจัดของจุดต่อที่ยังไม่ทราบค่า

$\{q\}_e$ คือ เมตริกซ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่กระทำที่จุดต่อ

n คือ จำนวนของระดับความเสรีของเอลิเมนต์

2.4.4 การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบ

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จาก การรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ ในขั้นตอนที่ 4 เข้าด้วยกัน ด้วยวิธีซ้อนทับ (superposition method) หรือเรียกว่าวิธีสทิฟเนสโดยตรง (direct stiffness method) โดยอาศัยหลักของการสมดุลที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และการต่อเนื่อง (continuity) ของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างที่ได้รับ ก่อให้เกิดระบบสมการที่พร้อมกันขึ้น(system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum(element\ equation) = [\kappa]_{sys}\{\phi\}_{sys} = \{q\}_{sys} \qquad (2.8)$$

โดยที่ $[\kappa]_{sys}$ คือ สทิฟเนสเมตริกซ์รวมของระบบเอลิเมนต์

$\{\phi\}_{sys}$ คือ เมตริกซ์รวมของการกระจัดของระบบซึ่งอาจจะทราบค่าบางค่า

$\{q\}_{sys}$ คือ เมตริกซ์รวมของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่กระทำที่จุดต่อ

n คือ จำนวนของระดับความเสรีของเอลิเมนต์

2.4.5 หาการกระจัดของระบบ

สำหรับการประยุกต์เงื่อนไขขอบ(boundary conditions) ทำเพื่อแก้สมการนั้น ๆ และหาค่า $\{\phi\}_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ(nodal unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง หรือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ หากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจจะเป็นค่าของความเร็วของของเหลวหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบ หรือเงื่อนไขบังคับลงในสมการแล้ว สามารถจะหาค่าการกระจัด $\emptyset_1, \emptyset_2, \ldots . \emptyset_n$ ได้โดยการแก้สมการพีชคณิตพร้อม ๆ กันคือ

$$\begin{bmatrix} \kappa_{11} & \cdots & \kappa_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \kappa_{n1} & \cdots & \kappa_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix}$$

โดยที่ $\{\phi\}_{sys}$ คือการกระจัดของจุดต่อที่ยังไม่ทราบค่า เราสามารถหาค่าได้โดยอาจจะใช้วิธีของเกาส์ (gauss's elimination method) หรือวิธีสมมติ(iteration method) หรือการกระจัด $\{\phi\}$ อาจจะหาได้จากการคูณสมการด้วย $[\kappa]^{-1}$ ตลอด ($[\kappa]$จะต้องไม่ใช่เมตริกซ์เอกฐาน)

2.4.6 การคำนวณหาค่า ณ จุดต่าง ๆ

เมื่อทำการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่บริเวณจุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (*displacement*) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด และความเค้นได้ หรือเมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ความหนืดของของไหลก็สามารถคำนวณหาค่าปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

2.4.7 การตีความผลลัพธ์

จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมานั้น ก็จะสามารถทราบได้ว่าที่จุดต่อใดของเอลิเมนต์ หรือบริเวณใดของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการกระจัดสูง หรือบริเวณใดที่มีความเค้นสูง และเราสามารถจะลดขนาดของการกระจัด หรือความเค้นนั้นได้อย่างไร ทั้งนี้จะต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะหรือมิติของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้นหรืออาจจะต้องเลือกใช้วัสดุชนิดอื่นที่เหมาะสมกว่า

2.5 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการถ่ายเทความในสภาวะทั่ว ๆ ไปที่ไม่อยู่ตัว[2]

สมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนและการพาความร้อนภายใต้สภาวะทั่ว ๆ ไปที่ไม่อยู่ตัว โดยที่พลาสติกไม่สามารถผลิตความร้อนได้เอง มีดังนี้

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) - Q = 0 \qquad (2.9)$$

โดยที่

q_x และ q_y คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat Flow rate) ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

Q คือ อัตราปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง (Internal Heat Generation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ρ คือ ความหนาแน่นมวล (Mass Density)

C คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของพลาสติกนั้น ๆ

T คือ อุณหภูมิ (Temperature) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา

t คือ เวลา (Time)

2.5.1 การประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างโดยวิธีบับโนฟ - กาเลอร์คิน (Bubnov - Galerkin)

ถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างโดยวิธีกาเลอร์คินทำโดยการคูณฟังก์ชันเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชั่นน้ำหนัก (weighting function) W จากนั้นทำการอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนแล้วกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_A \mathrm{w_i}(R)dA = 0 \tag{2.10}$$

ดังนั้นขั้นตอนต่อมาสำหรับการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง โดยเริ่มต้นจากการคูณเศษตกค้าง ซึ่งก็คือสมการเชิงอนุพันธ์นั้นด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก W_i โดยเมื่อใช้วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างด้วยวิธีการของบับโนฟ - กาเลอร์คิน (Bubnov - Galerkin) จะใช้ฟังก์ชันการกระจาย N_i ภายในเอลิเมนต์แทนฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก จะได้ดังนี้

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i d\Omega = 0 \quad ; \ \mathrm{i} = 1, 2, \ldots \mathrm{r} \tag{2.11}$$

ทำการกระจายได้ ดังนี้

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) N_i d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega = 0 \tag{2.12}$$

จากทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's Theorem) สำหรับปัญหา 2 มิติ ดังนี้

$$\int_{\Omega^{(e)}} U\left(\nabla \cdot \vec{V}\right) d\Omega = \int_{\Gamma^{(e)}} U(\vec{V} \cdot \hat{n}) d\Gamma - \int_{\Omega^{(e)}} (\nabla U \cdot \vec{V}) d\Omega \tag{2.13}$$

และ $$\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j}$$

ดังนั้น ตามสมการที่ (2.12) จะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ออกมา ดังนี้

$$U = N_i$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j}$$

$$\vec{V} = q_x \hat{i} + q_y \hat{j} = \vec{q}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนพจน์แรกในสมการที่ (2.12) ได้ใหม่ ดังนี้

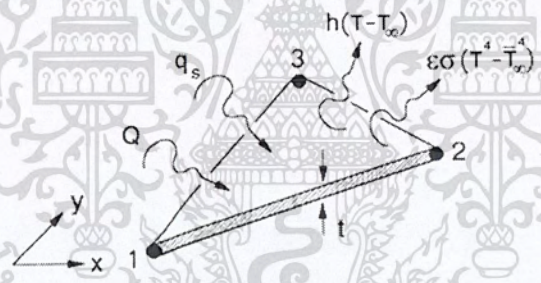
$$\int_{\Omega^{(e)}}\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)N_i\,d\Omega = \int_{\Gamma^{(e)}}(\bar{q}\cdot\hat{n})N_i\,d\Gamma - \int_{\Omega^e}\left(q_x\frac{\partial N}{\partial x}+q_y\frac{\partial N}{\partial y}\right)d\Omega \tag{2.14}$$

$$= \int_{\Gamma^{(e)}}(\bar{q}\cdot\hat{n})N_i\,d\Gamma - \int_{\Omega^e}\left[\frac{\partial N_i}{\partial x}\quad\frac{\partial N_i}{\partial y}\right]\begin{Bmatrix}q_x\\q_y\end{Bmatrix}d\Omega$$

เพราะฉะนั้น จะสามารถเขียนสมการที่ (2.12) ใหม่ได้ ดังนี้

$$\int_{\Gamma^{(e)}}(\bar{q}\cdot\hat{n})N_i\,d\Gamma - \int_{\Omega^{(e)}}\left[\frac{\partial N_i}{\partial x}\quad\frac{\partial N_i}{\partial y}\right]\begin{Bmatrix}q_x\\q_y\end{Bmatrix}d\Omega + \int_{\Omega^{(e)}}\rho c\frac{\partial T}{\partial t}N_i\,d\Omega = 0 \tag{2.15}$$

สำหรับการกระจายของอุณหภูมิในเอลิเมนต์ ดังรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการกระจายภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) และค่าอุณหภูมิที่จุดต่อ(nodal temperature) ต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนในเอลิเมนต์สามเหลี่ยม [2]

$$T(x,y,t) = \underbrace{\lfloor N(x,y)\rfloor}_{(1\times 2)}\underbrace{\{T(t)\}}_{(2\times 1)} \tag{2.16}$$

โดยที่

$\lfloor N\rfloor$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

$\{T\}$ คือ อุณหภูมิที่จุดต่อซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา t

ในกรณีปัญหาของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิตินั้น จะสามารถแสดงความชันของการกระจายอุณหภูมิในทิศทางต่าง ๆ ได้ในรูปแบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_r}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_r}{\partial y} \end{bmatrix}}_{\substack{[\mathbf{B}(x,y)] \\ (2\times r)}} \underbrace{\{T(t)\}}_{(r\times 1)} \tag{2.17}$$

จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law) อัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความชันของการกระจายอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์โดยทั่วไปได้ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -\underbrace{\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}}_{[K]} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} \tag{2.18}$$

โดยที่ [K] เรียกว่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งในกรณีทั่วไปหากวัตถุนั้นมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในทุก ๆ ทิศทาง(isotropic material) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้จะลดรูปลงอยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$[K] = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.17) และ (2.18) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -[K][B(x,y)]\{T(t)\} \tag{2.19}$$

จากนั้นแทนอัตราการถ่ายเทความร้อนในสมการที่ (2.19) ลงในพจน์ที่สองของสมการที่ (2.15) แล้วจึงเขียนสมการดังกล่าวใหม่ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ ท้ายที่สุดจะสามารถเขียนสมการการนำความร้อนภายใต้สถานะทั่ว ๆ ไปที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัวในรูปแบบของเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$\int_{\Gamma^{(e)}} (\bar{q}\cdot\hat{n}) N_i \, d\Gamma + \int_{\Omega^{(e)}} [B]^T [k][B] \, d\Omega \{T\} + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i \, d\Omega = 0 \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต

จากการกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงานนี้ จะมีความซับซ้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตตลอดขอบนอกของแผ่นโลหะนั้น ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวที่จะทำการพิจารณามีลักษณะดังต่อไปนี้

2.5.2.1 มีอุณหภูมิดังที่กำหนดตลอดขอบ S_1

$$T(x,y) = T_1(x,y) \tag{2.21}$$

2.5.2.2 มีปริมาณความร้อนดังที่กำหนดไหลเข้าตลอดขอบ S_2

จากกฎของฟูริเยร์(Fourier's Law) มีการกำหนดปริมาณฟลักซ์ (q_s) ที่ไหลเข้าสู่ขอบ โดยกำหนดปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้น

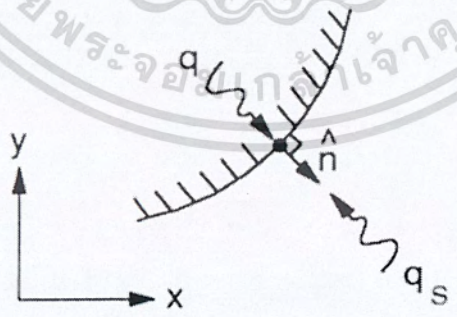
$$q = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y \tag{2.22}$$

ซึ่ง n_x และ n_y เป็นทิศทางโคไซน์ของเวกเตอร์หน่วย $\hat{n}$ ที่ตั้งฉากกับขอบนั้น

$$\hat{n} = n_x \hat{\imath} + n_y \hat{\jmath} \tag{2.23}$$

โดยที่ $\hat{\imath}$ และ $\hat{\jmath}$ เป็นเวกเตอร์หน่วยในทิศแกน x และ y หากเรากำหนดปริมาณความร้อน q_s ที่ไหลเข้าขอบให้มีเครื่องหมายเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 2.6 ดังนั้น

$$q_s = -q = k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y \tag{2.24}$$



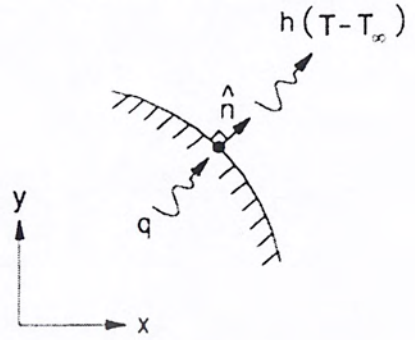
รูปที่ 2.6 สมดุลของการถ่ายเทความร้อนเมื่อกำหนดปริมาณความร้อนไหลเข้า [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.5.2.3 มีการพาความร้อนออกตลอดขอบ S_3

ลักษณะสมดุลของการถ่ายเทความร้อน เมื่อเกิดการพาความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สมดุลของการถ่ายเทความร้อน เมื่อเกิดการพาความร้อน [2]

จากรูปที่ 2.7 จะได้

$$q = h(T - T_\infty)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

T คือ อุณหภูมิที่ขอบ ณ ตำแหน่งที่พิจารณานั้น

T_α คือ อุณหภูมิที่อากาศรอบนอก

เมื่อแทนค่า q จะได้

$$q_s = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y = h(T - T_\infty) \tag{2.25}$$

พจน์แรกในสมการที่ (2.20) นี้ แทนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวของเอลิเมนต์นั้น ๆ หากเอลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ภายในวัตถุ ปริมาณความร้อนจะถ่ายเทจากเอลิเมนต์หนึ่งไปยังเอลิเมนต์ที่อยู่ถัดไปด้วยการนำ และหากเอลิเมนต์นั้นอยู่ที่ผิวนอกของวัตถุ ปริมาณความร้อนจะเกิดการถ่ายเทแบบการพา ดังนั้นหากนำข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์เอลิเมนต์ที่บริเวณพื้นผิวมาทำการคำนวณด้วย ซึ่งจะได้สมการใหม่ที่มีเงื่อนไขขอบเขตมาร่วมในการคำนวณด้วย ดังสมการต่อไปนี้

$$\int_{\Omega^{(e)}} [B]^T [k][B] d\Omega \{T\} + \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega = -\int_{s_1} (\bar{q} \cdot \hat{n}) N_i d\Gamma + \int_{s_2} q_s N_i d\Gamma \tag{2.26}$$

$$- \int_{s_3} h(T_s - T_e) N_i d\Gamma - \int_{s_4} \left(\sigma \in T_s^4 - \alpha q_r\right) N_i d\Gamma$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

119481

จากสมการที่ (2.26) จะได้สมการที่ครอบคลุมรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนในลักษณะต่างๆ กัน ซึ่งจะก่อให้เกิดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (2.27)

$$[C]\{\dot{T}(t)\}+[[k_c]+[k_h(t)]]\{T(t)\}=\{Q_q(t)\}+\{Q_h(t)\} \tag{2.27}$$

จากสมการที่ (2.18) และ (2.21) จะเห็นได้ว่าทั้งเมตริกซ์ $\lfloor N \rfloor$ และ $\lfloor B \rfloor$ ของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมอยู่ในรูปแบบที่ง่ายทำให้เราสามารถคำนวณเอลิเมนต์เมตริกซ์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$[C]=\frac{\rho cAt}{12}\begin{bmatrix}2&1&1\\1&2&1\\1&1&2\end{bmatrix} \tag{2.28}$$

$$[k_c]=\frac{kt}{4A}\begin{bmatrix}b_1b_1+c_1c_1 & b_1b_2+c_1c_2 & b_1b_3+c_1c_3\\ & b_2b_2+c_2c_2 & b_2b_3+c_2c_3\\ sys & & b_3b_3+c_3c_3\end{bmatrix} \tag{2.29}$$

$$[k_h]=\frac{hA}{12}\begin{bmatrix}2&1&1\\1&2&1\\1&1&2\end{bmatrix} \tag{2.30}$$

$$\{Q_q\}=\frac{q_sA}{3}\begin{Bmatrix}1\\1\\1\end{Bmatrix} \tag{2.31}$$

$$\{Q_h\}=\frac{hT_eA}{3}\begin{Bmatrix}1\\1\\1\end{Bmatrix} \tag{2.32}$$

โดยที่

$[k_c]$ คือ เมตริกซ์การนำความร้อน (Conduction matrix)

$[k_h]$ คือ เมตริกซ์การพาความร้อน (Convection matrix)

$\{Q_h\}$ คือ โหลดเวกเตอร์การพาความร้อน (Convection load vector)

$\{Q_q\}$ คือ โหลดเวกเตอร์ความร้อนที่กำหนด

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

k คือ ความสามารถในการนำความร้อน

ρ คือ ความหนาแน่นมวล (Mass Density)

C คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของพลาสติกนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

t คือ ความหนาของเอลิเมนต์(ความหนาของชิ้นงาน)

T_c คือ อุณหภูมิรอบนอกที่กำหนด

q_s คือ ปริมาณความร้อนที่ตกกระทบบนพื้นที่หนึ่ง ๆ

นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นที่ A ของเอลิเมนต์แล้วอาจจะมีการถ่ายเทความร้อนในทำนองเดียวกันแต่ตลอดขอบใดขอบหนึ่งของเอลิเมนต์ซึ่งมีความหนาเท่ากับ t ซึ่งเมื่อเราทำการพิจารณาขอบของเอลิเมนต์ด้านใด แถวและหลักในเมตริกซ์ด้านนั้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เช่น เมื่อพิจารณาด้านที่ 3 ของเอลิเมนต์จะมีการคำนวณ ดังสมการต่อไปนี้

โดยที่ $[k_h]$ คือ เมตริกซ์การพาความร้อนตลอดขอบใดขอบหนึ่ง

$$[k_h] = \frac{htl}{6}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

และ $\{Q_h\}$ คือ โหลดเวกเตอร์การพาความร้อนตลอดขอบใดขอบหนึ่ง

$$\{Q_h\} = \frac{hT_e tl}{2}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.34}$$

ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มลงในสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับเอลิเมนต์นั้นๆ

2.6 ปัญหาเชิงเส้นในสถานะชั่วครู่ [3]

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วครู่ (linear transient heat transfer problem) เป็นปัญหาอีกรูปแบบหนึ่งโดยอุณหภูมิที่จุดต่อจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาซึ่งขั้นตอนของการคำนวณนั้นสามารถทำได้โดยไม่ยากลำบากนัก อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอาจมีสาเหตุมาจากเงื่อนไขขอบเขต เช่น โหลดปริมาณความร้อนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป ถ้าสามารถมองปัญหาเช่นนี้ในภาพรวม การแก้ปัญหาเพื่อหาอุณหภูมิที่เวลาต่างๆกันซึ่งเป็นผลลัพธ์ของปัญหาภายใต้สถานะชั่วครู่นั้นก็เปรียบเสมือนการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ของอุณหภูมิของปัญหานั้นภายใต้สถานะอยู่ตัวมาเรียงประกอบกันขึ้น ดังนั้น ในการแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วครู่ จึงจำเป็นต้องทำการแก้ระบบสมการรวมหลายๆครั้งแทนที่จะต้องแก้ระบบสมการรวมเพียงครั้งเดียวดังที่เคยทำสำหรับปัญหาภายใต้สถานะอยู่ตัว

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไป สำหรับปัญหาเชิงเส้นภายใต้สถานะอยู่ตัวคือ

$$[c]\{\dot{T}\} + [[K_c] + [K_h]]\{T\} = \{Q_c\} + \{Q_q\} + \{Q_h\} \tag{2.35}$$

โดยเมตริกซ์จัตุรัสต่างๆทางด้านซ้ายของสมการ นั้นคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและโหลดเวกเตอร์ทั้งสามเวกเตอร์ท้ายทางด้านขวาของสมการ นั้นอาจขึ้นอยู่กับเวลา นั่นคือ อัตราการผลิตความร้อนได้เอง Q, ปริมาณความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนที่ตกกระทบ q_sและอุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการพาความร้อน T_∞, อาจเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้ เพื่อให้ง่ายแก่การทำความเข้าใจจะทำการเขียนสมการ โดยย่อดังนี้

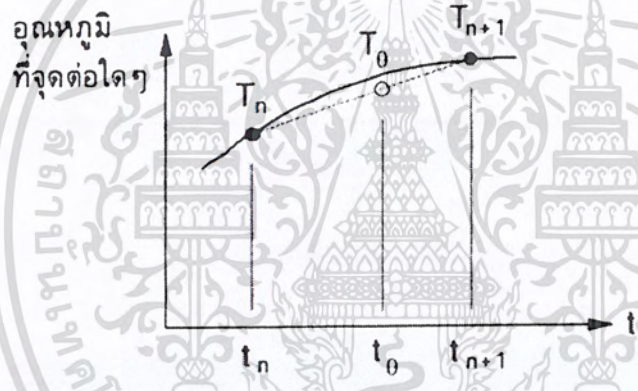
$$[c]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \tag{2.36}$$

โดย

$$[K] = [K_c] + [K_h]$$

$$\{Q\} = \{Q_c\} + \{Q_q\} + \{Q_h\}$$

วิธีการแก้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป คือวิธีของความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (recurrence relation) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.8 กล่าวคือที่เวลา t_n เรารู้ค่าอุณหภูมิ T_n และเราจะใช้ช่วงเวลา (time step) Δt เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิ T_{n+1}ที่เวลา t_{n+1}



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดต่อใด ๆ กับเวลา [2]

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าที่เวลา t_θ ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาΔt ดังกล่าวสามารถเขียนสมการขึ้นมาได้

$$t_\theta = t_n + \theta\Delta t$$

โดย $0 \le \theta \le 1$ ในช่วงเวลาดังกล่าวความชันของอุณหภูมิโดยประมาณ คือ

$$\dot{T}_\theta \cong \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t} \tag{2.37}$$

และอุณหภูมิโดยประมาณที่เวลา t_θ คือ

$$T_\theta \cong (1-\theta)T_n + \theta T_{n+1} \tag{2.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้หลักการดังแสดงในสมการที่ (2.37) และ (2.38) นี้เพื่อการคำนวณหาผลลัพธ์ของอุณหภูมิในสถานะชั่วครู่จากสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (2.36) โดยเริ่มจากการเขียนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวที่เวลา t_θ ดังนี้

$$[c]\{\dot{T}\}_\theta + [K]\{T\}_\theta = \{Q\}_\theta \tag{2.39}$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.37) เวกเตอร์ของความชันของอุณหภูมิที่จุดต่อต่าง ๆ คือ

$$\{\dot{T}\}_\theta \cong \frac{\{T\}_{n+1}-\{T\}_n}{\Delta t} \tag{2.40}$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.38) เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆคือ

$$\{\dot{T}\}_\theta \cong (1-\theta)\{T\}_n + \theta\{T\}_{n+1} \tag{2.41}$$

ยิ่งไปกว่านั้น หากโหลดเวกเตอร์ทางด้านขวามือของสมการที่ (2.36) นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โหลดเวกเตอร์ดังกล่าวที่เวลา t_θ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันคือ

$$\{Q\} \cong (1-\theta)\{Q\}_n + \theta\{Q\}_{n+1} \tag{2.42}$$

แทนสมการที่ (2.38 – 2.40) ลงในสมการ (2.37) แล้วจัดพจน์โดยให้เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่ไม่รู้ค่าอยู่ทางซ้ายของสมการจะได้

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[c] + \theta[K]\right)\{T\}_{n+1} = \left(\frac{1}{\Delta t}[c] - (1-\theta)[K]\right)\{T\}_n + (1-\theta)\{Q\}_n + \theta\{Q\}_{n+1} \tag{2.43}$$

นั่นคือ ได้ทำการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง มาให้อยู่ในรูปแบบระบบสมการธรรมดา (2.41) ซึ่งสามารถทำการแก้ได้โดยตรง ลักษณะของผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ระบบสมการ (2.43) นี้จะขึ้นอยู่กับค่า θ ที่เลือกใช้ และมีชื่อเรียกดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วิธีการคำนวณแบบต่างๆ

วิธีการที่	ค่า θ	ชื่อเรียก
1	0	ออยเลอร์ (*Euler*)
2	1/2	แครงก์-นิโคลสัน(*Crank-Nicolson*)
3	2/3	กาเลอร์คิน*(Galerkin)*
4	1	ผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง(*Backward difference*)

การเลือกช่วงเวลา (time step) Δt นั้นมีผลเป็นอย่างมากต่อการคำนวณ การใช้ช่วงเวลา Δt ที่ต่ำมากเกินไปถึงแม้จะได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ แต่ก็จะเสียเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการทำการคำนวณมาก ซึ่งต้องคำนึงเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะปัญหาในทางปฏิบัติที่รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจุดต่อที่มีจำนวนมาก ในทางตรงกันข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เวลา Δt ที่สูงมากเกินไป จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงและยิ่งไปกว่านั้นอาจจะพบว่าผลลัพธ์ของอุณหภูมินั้นมีลักษณะขึ้นลงโดยสั่น(oscillation) เป็นรูปฟันปลาที่แปรผันตามเวลา หรือในบางครั้งอาจจะพบว่าผลลัพธ์นั้นลู่ออก(diverge) จากผลลัพธ์ที่ควรจะเป็นการใช้ค่า θ ที่ต่างๆกันมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป

ซึ่งในที่นี้ได้เลือกวิธีการของ กาเลอร์คิน*(Galerkin)* ซึ่งเป็นวิธีการที่ 3 ซึ่งมีค่า $\theta = \frac{2}{3}$

เมื่อ $\theta = \frac{2}{3}$ ผลลัพธ์อาจจะมีลักษณะสั่นเป็นฟันปลากับเวลาหากใช้ช่วงเวลาΔtในการคำนวณสูงเกินไป ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถใช้ช่วงΔt ได้สูง แต่ในขณะเดียวกันความแม่นยำของผลลัพธ์ลดลง

ดังนั้นจะได้รูปสมการที่สมบูรณ์ซึ่งใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์ต่าง ๆ ในสภาวะไม่อยู่ตัวของปัญหาเชิงเส้น ดังสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[c] + \frac{2}{3}[K]\right)\{T\}_{n+1} = \left(\frac{1}{\Delta t}[c] - \frac{1}{3}[K]\right)\{T\}_n + \{Q\} \qquad (2.42)$$

2.7 ระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ [4]

ระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) จัดได้ว่าเป็นระเบียบวิธีการแก้ระบบสมการที่ได้รับความนิยมมากระเบียบวิธีการหนึ่ง เป็นระเบียบวิธีที่โดยปกติจะใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ที่ใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์โดยทั่วไป ระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ในภาพรวม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

2.7.1 การกำจัดไปข้างหน้า (forward elimination)

หากเรามีระบบสมการที่ประกอบด้วย 3 สมการที่ประกอบด้วย 3 สมการย่อยดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} \qquad (2.45)$$

การกำจัดไปข้างหน้าจะเปลี่ยนระบบสมการ (2.44) ให้อยู่ในรูปแบบซึ่งเมตริกซ์จัตุรัสทางด้านซ้ายของสมการ จะเป็นเมตริกซ์ที่ประกอบด้วยค่าศูนย์ตลอดแถบล่างซ้ายของเมตริกซ์นั้น ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} \qquad (2.46)$$

โดยเครื่องหมายที่เป็นดรรชนีบนสัมประสิทธิ์แสดงถึงสัมประสิทธิ์นั้นเป็นค่าใหม่ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปจากสัมประสิทธิ์เดิมในสมการ (2.45)

2.7.2 การแทนค่าย้อนกลับ (back substitution)

เมื่อจัดระบบสมการให้อยู่ในรูปแบบของสมการ (2.45) แล้วคำนวณหาค่า x_i ทีละสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} \\ 0 & 0 & a''_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b'_2 \\ b''_3 \end{Bmatrix} \quad (2.47)$$

$$x_3 = \frac{b''_3}{a''_{33}}$$

$$x_2 = \frac{(b''_2 - a''_{23}x_3)}{a''_{22}}$$

$$x_3 = \frac{(b_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3)}{a_{11}} \quad (2.48)$$

ระเบียบวิธีเป็นขั้นตอนที่สามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยสะดวก ขั้นตอนนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นมาตรฐานสำหรับการแก้สมการโดยทั่วไปที่ประกอบด้วย n สมการย่อยได้ดังต่อไปนี้

หากเราพิจารณาระบบสมการที่ประกอบด้วย n สมการย่อยในรูปแบบดังนี้

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \cdots \ldots \ldots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2.48a)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \cdots \ldots \ldots + a_{2n}x_n = b_2 \quad (2.48b)$$

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \cdots \ldots \ldots + a_{3n}x_n = b_3 \quad (2.48c)$$

. . . . . .
. . . . . .
. . . . . .

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \cdots \ldots \ldots + a_{nn}x_n = b_n \quad (2.48n)$$

การกำจัดไปข้างหน้า เริ่มต้นจากการกำจัดไปข้างหน้า โดยเริ่มจากการหาสมการแรกนี้ด้วยสัมประสิทธิ์ของ x_1

$$x_1 + \frac{a_{12}}{a_{11}}x_2 + \frac{a_{13}}{a_{11}}x_3 + \cdots \ldots \ldots + \frac{a_{1n}}{a_{11}}x_n = \frac{b_1}{a_{11}} \quad (2.49)$$

จากนั้นจึงคูณสมการที่ได้สัมประสิทธิ์ของ x_1 ของสมการ (2.47(b))

$$a_{21}x_1 + a_{21}\frac{a_{12}}{a_{11}}x_2 + a_{21}\frac{a_{13}}{a_{11}}x_3 + \cdots \ldots \ldots + a_{21}\frac{a_{1n}}{a_{11}}x_n = a_{21}\frac{b_1}{a_{11}} \quad (2.50)$$

แล้วจึงนำสมการที่ได้นี้ไปลบออกจากสมการ 2.49 (b) เดิมจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\underbrace{\left[a_{22}-a_{21}\frac{a_{12}}{a_{11}}\right]}_{a'_{22}}x_2+\underbrace{\left[a_{23}-a_{21}\frac{a_{13}}{a_{11}}\right]}_{a'_{23}}x_3+\cdots\ldots\ldots+\underbrace{\left[a_{2n}-a_{21}\frac{a_{1n}}{a_{11}}\right]}_{a'_{2n}}x_n$$

$$=\underbrace{b_2-a_{21}\frac{b_1}{a_{11}}}_{b'_2}$$

หรือเขียนได้ว่า

$$a'_{22}x_2+a'_{23}x_3+\cdots\ldots\ldots+a'_{2n}x_n=b'_2 \qquad (2.51)$$

แล้วทำเช่นเดียวกันนี้กับสมการ 2.48 (c)ไปจนถึงสมการ 2.48 (n) ทำให้ระบบสมการดั้งเดิม (2.48) เปลี่ยนมาอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$a_{11}x_1+a_{12}x_2+a_{13}x_3+\ldots+a_{1n}x_n=b_1 \qquad (2.52a)$$

$$a'_{22}x_2+a'_{23}x_3+\ldots+a'_{2n}x_n=b'_2 \qquad (2.52b)$$

$$a'_{32}x_2+a'_{33}x_3+\ldots+a'_{3n}x_n=b'_3 \qquad (2.52c)$$

. . . .
. . . .
. . . .

$$a'_{n2}x_2+a'_{n3}x_3+\ldots+a'_{nn}x_n=b'_n \qquad (2.52n)$$

จะเห็นได้ว่าจากวิธีการกำจัดไปข้างหน้าหนึ่งรอบแรกทุกๆค่าในแนวแถวตั้งแรกของระบบสมการ (2.51) ยกเว้นในสมการแรกนั้นต่างมีค่าเท่ากับศูนย์

ทำการกำจัดไปข้างหน้าซ้ำอีกรอบที่สอง แต่จะเริ่มสมการ 2.52 (b) ซึ่งเป็นสมการที่สองโดยหารสมการนี้ตลอดด้วย a'_{32}ของ x_2จากสมการ 2.52 (c) แล้วเอาผลลัพธ์ที่ได้ไปลบออกจากสมการ 2.52 (c) จะได้สมการ 2.52 (c) ใหม่ที่ไม่ประกอบพจน์ x_1 และ x_2 จากนั้นก็ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนถึงสมการ 2.52 (n) สุดท้ายกระบวนการดังกล่าวทำให้ระบบสมการ (2.51) เปลี่ยนมาอยู่ในรูปแบบใหม่ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2.53a)$$

$$a'_{22}x_2 + a'_{23}x_3 + \ldots + a'_{2n}x_n = b'_2 \quad (2.53b)$$

$$a''_{33}x_3 + \ldots + a''_{3n}x_n = b''_3 \quad (2.53c)$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$a''_{n3}x_3 + \ldots + a''_{nn}x_n = b''_n \quad (2.53n)$$

จากนั้นทำการกำจัดซ้ำอีกเป็นรอบที่สาม สี่ ห้า เรื่อยไป จนถึงรอบที่ *n-1* ซึ่งจะก่อซึ่งจะก่อให้เกิดระบบสมการในรูปแบบที่พร้อมที่จะทำการแทนค่าย้อนกลับเพื่อหาผลลัพธ์ดังนี้

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2.54a)$$

$$a'_{22}x_2 + a'_{23}x_3 + \ldots + a'_{2n}x_n = b'_2 \quad (2.54b)$$

$$a''_{33}x_3 + \ldots + a''_{3n}x_n = b''_3 \quad (2.54c)$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$a_{nn}^{(n-1)}x_n = b_{nn}^{(n-1)} \quad (2.54n)$$

โดยจำนวนขีดเครื่องหมายของดรรชนีหรือค่าในวงเล็บของดรรชนีบนแสดงจำนวนรอบข้อจำกัดไปข้างหน้า

สำหรับการแทนค่าย้อนกลับ จากระบบสมการ (2.46) ค่า x_n สามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการสุดท้าย 2.54 (n) นั่นคือ

$$x_n = \frac{b_n^{(n-1)}}{a_{nn}^{(n-1)}} \quad (2.55a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากนั้นสามารถหาค่า $x_{(n-1)}, x_{(n-1)}, \ldots, x_2, x_1$ โดยการแทนค่าย้อนกลับไปทีละสมการโดยใช้ความสัมพันธ์คือ

$$x_n = \frac{b_i^{(i-1)} - \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij}^{(i-1)} x_j}{a_{ii}^{(i-1)}} \qquad (2.55b)$$

โดยดรรชนีล่าง i แทนสมการอันดับที่ในระบบสมการ (2.54)

2.8 ความรู้พื้นฐานที่จำเป็น [2]

การศึกษาการวิเคราะห์หรือการออกแบบโครงสร้างและชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านต่าง ๆ หลายด้านจึงจะเข้าใจถึงหลักการและวิธีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เป็นอย่างดี อาทิเช่น จะต้องมีความรู้ของเมตริกซ์ รู้เทคนิคต่าง ๆ ที่จะใช้ในการแก้สมการพีชคณิตพร้อม ๆ กันหลายสมการ รู้เทคนิคการหาค่าเมตริกซ์ผกผัน เป็นต้น และต้องรู้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าโดยประมาณ จะต้องมีพื้นความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อน และวิธีเวทเรซิดิว เป็นต้น

2.9 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

เนื่องจากรูปแบบของชิ้นงานต่าง ๆ ในทางวิศวกรรมโดยปกติจะมีความซับซ้อน วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยที่สามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ทั้งที่เป็นโครงสร้าง และที่ไม่ใช่โครงสร้างได้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างจะประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเค้น ซึ่งรวมทั้งการวิเคราะห์โครงข้อหมุน, โครงข้อแข็ง, ความเข้มของความเค้นตรงบริเวณที่เป็นรู เป็นรอยบาก หรือตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่าง นอกจากนี้ยังใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การโก่งของเสา การล้าตัว และการสั่นสะเทือนของระบบโครงสร้าง ระบบเครื่องจักรกลด้วย

ส่วนใหญ่ที่ไม่ใช่โครงสร้างนั้น เช่น การถ่ายเทความร้อน, การไหลของของเหลว รวมทั้งการซึมผ่านวัสดุพรุน และการต่างศักย์ของแม่เหล็กไฟฟ้า ก็สามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นยังนิยมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านชีวะวิศวกรรม เช่น วิเคราะห์การทำงานของหัวใจ, ตา, ข้อต่อต่าง ๆ ของร่างกาย เป็นต้น

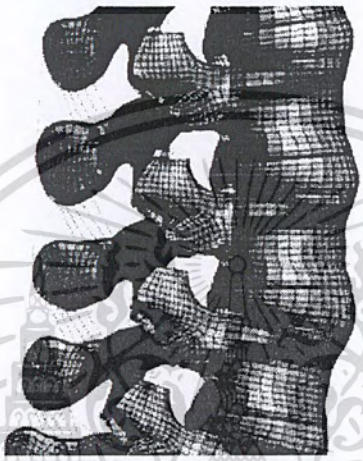
สำหรับภาพรวมและประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานชนิดต่าง ๆ กันได้หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้น ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กันไปกับวิวัฒนาการทางคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวก และในขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการทดลองดังที่เคยปฏิบัติกันมา ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างต่าง ๆ ที่วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานในหลาย ๆ แบบได้

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในสมัยแรก ๆ เริ่มปรากฏให้เห็นในงานทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (*solid mechanics*) และโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในงานทางด้านนี้สามารถทำความเข้าใจได้โดยไม่ยากนัก วิวัฒนาการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทางด้านของแข็งนี้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

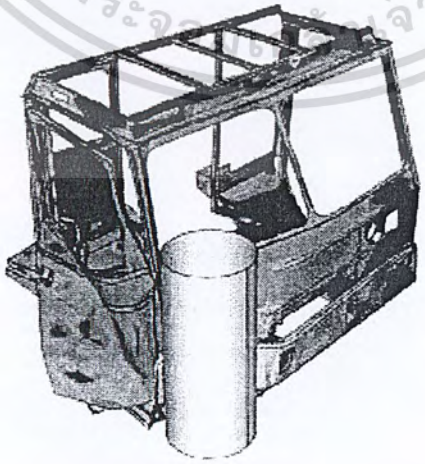
ปัจจุบันสามารถนำไปใช้กับการออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน เช่น เพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ เพื่อการคำนวณหาความยืดหยุ่น ความเครียด และความเค้นที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของเพลาข้อเหวี่ยงนั้น

เนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ขยายกว้างออกไปในงานที่นอกเหนือไปจากงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ในงานทางด้านการแพทย์ เป็นต้น รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้หาการกระจายของความเค้นในกระดูก นอกเหนือจากนั้นวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ยังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการแพทย์ในรูปแบบอื่น ๆ อาทิเช่น การคำนวณหาลักษณะการไหลของเลือดในเส้นเลือดเป็นต้น



รูปที่ 2.9 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระดูก [2]

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการศึกษาและออกแบบยานพาหนะเพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้นรวมทั้งเพื่อความปลอดภัยที่สูงที่สุด และในขณะเดียวกันยังช่วยในการลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการยุบตัวของรถยนต์ในขณะเกิดการชน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อีกแขนงหนึ่ง ซึ่งช่วยในการออกแบบยานพาหนะก็คือ การคำนวณลักษณะของอากาศที่ไหลผ่านยานพาหนะนั้น ตัวอย่างเช่น การออกแบบยานพาหนะที่จะก่อให้เกิดแรงต้านทานจากอากาศที่ต่ำที่สุด และยังมีอีกแขนงที่เป็นที่น่าสนใจและได้เริ่มนำมาใช้กันเป็นจำนวนมากในปัจจุบัน คือ การคำนวณหาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนเครื่องยนต์ อุณหภูมิที่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงมากตามตำแหน่งต่าง ๆ บนเครื่องยนต์ จะก่อให้เกิดความเค้นที่สูงขึ้นตามมา

กระบวนการคำนวณความเค้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์ เป็นการรวมสมการทางด้านการยืดหยุ่นของของแข็ง และการถ่ายเทความร้อนภายในของแข็งนั้นเข้าด้วยกัน หลักการดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องบินรบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งต้องทำการบินด้วยความเร็วสูงอันจะก่อให้เกิดผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างของไหลของอากาศกับโครงสร้างของเครื่องบิน ในขณะที่บินด้วยความเร็วสูง การไหลของอากาศก่อให้เกิดความกดดันสูงบนปีกของเครื่องบินทำให้ปีกเกิดการเสียรูปไปจากรูปร่างเดิม

รูปที่ 2.11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเครื่องบินรบ [2]

ในปัจจุบันการพัฒนาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ยังคงรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปประยุกต์กับงานในแขนงต่าง ๆ กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้งานในหลาย ๆ แขนง โดยเฉพาะแขนงต่าง ๆ ที่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน อาทิเช่น ในการออกแบบเครื่องยนต์ของเครื่องบินสมัยใหม่ที่บินเร็วกว่าเสียงเกินสิบเท่าขึ้นไป วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาสภาวะอากาศที่เกิดขึ้นหน้าเครื่องยนต์ ความร้อนบนเครื่องยนต์อันเกิดจากการเสียดสีกับอากาศ อุณหภูมิของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป การเสียรูปและความเค้นของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นตามมา รวมทั้งผลกระทบซึ่งกันและกัน เช่น การเสียรูปไปจากรูปเดิมของเครื่องยนต์หลังจากที่เครื่องยนต์มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลย้อนกลับไปทำให้สภาวะการแปรปรวนของอากาศเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เป็นต้น

2.10 ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

ในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สามารถที่จะทำการวิเคราะห์กับปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเทียบกับวิธีธรรมดามีดังนี้ คือ

1. สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีและสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสภาพต่าง ๆ เช่นโหลดที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง
3. ใช้วิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มีความยุ่งยาก
4. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา ไม่ว่าเงื่อนไข, เงื่อนไขขอบ, และจุดรองรับ จะอยู่ในลักษณะใด ๆ
5. สามารถจะเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งให้มีขนาดใหญ่หือเล็กก็ได้ตามความจำเป็น
6. ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือระบบสามารถจะเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้สะดวก และยังประหยัดเวลาค่าใช้จ่ายด้วย
7. ในระบบการออกแบบและการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสมัยใหม่ (CAD) และ (CAM) มักจะนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ก่อน ก่อนที่จะผลิตชิ้นส่วนจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและมีความถูกต้องแม่นยำสูง
8. ในกรณีของวัสดุประเภทยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) หรือการยืดหยุ่นของวัสดุอยู่ในช่วงพลาสติกก็ยังสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์สิ่งที่ต้องการได้สะดวก เช่น ใช้วิเคราะห์การล้าตัว และ creep ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เป็นต้น

2.11 ข้อควรระวังของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

ผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับสามประการหลัก คือ ประการแรก การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด ประการที่สอง การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และประการสุดท้าย คือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อย ๆ ของเครื่องคอมพิวเตอร์

การกำหนดหรือแบ่งเอลิเมนต์ย่อย ๆ ให้สอดคล้องกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงานได้มากเท่าไร ก็ยิ่งจะทำให้ผลเฉลยถูกต้องแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น เช่นถ้าต้องการวิเคราะห์ความเค้นในแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมที่มีรูตรง ที่บริเวณรูควรจะมีขนาดเล็กมาก ๆ เพื่อที่จะสามารถแทนส่วนโค้งของรูปให้ได้มากที่สุด นอกจากนี้อาจจะเลือกใช้เอลิเมนต์ที่สามารถแทนส่วนเว้าส่วนโค้งของรูหรือเลือกเอลิเมนต์ที่สามารถแทนการกระจัดในเชิงเส้นโค้งได้

ส่วนความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และวิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขนั้น จะขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ การใช้ความแม่นยำระดับสอง (double precision) และขนาดของ bandwidth ที่เล็กที่สุดจะสามารถช่วยลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวได้ และถ้าเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีมาตรฐานระดับสูง ความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนจากการเลือกใช้ชนิด และขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาตรฐานทั่วไป เช่น ANSYS ข้อมูลที่จะต้องให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ก็คือ ตำแหน่งหรือพิกัดของจุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ คุณสมบัติทางกลของวัสดุของแต่ละเอลิเมนต์ ลักษณะของโหลดที่กระทำ ลักษณะของเงื่อนไขขอบหรือเงื่อนไขบังคับ และต้องระบุชนิดของการวิเคราะห์ด้วย เช่นความร้อนบนระนาบ หรือความเครียดระนาบ เป็นต้น เครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้ข้อมูลเหล่านั้นคำนวณสิ่งต่าง ๆ ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวางแผนขั้นตอนการดำเนินงาน การออกแบบโปรแกรม และแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของโปรแกรม โดยมีรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1 การวางแผนขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ นั้น สามารถจำแนกออกได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้
    1) กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก
    2) หลักการทั่วไปเกี่ยวกับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์
    3) ขั้นตอนในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์
    4) ทฤษฎีบทต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์
    5) การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่อยู่ตัวของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ
2. ทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาทฤษฎีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่อยู่ตัวของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ โดยใช้วิธีการการถ่วงน้ำหนักแบบกาเลอร์คิน
3. ทดสอบการแก้ปัญหาจากตัวอย่างการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่อยู่ตัว โดยใช้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากการศึกษาหลักการในเบื้องต้น
4. ตรวจสอบความถูกต้องของค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้กับตัวอย่างที่อ้างอิงจากหนังสือ
5. ทำการวิเคราะห์ ประเมินผล พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขสมการที่สร้างขึ้นให้มีความถูกต้องสมบูรณ์
6. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB
7. วางโครงสร้าง และออกแบบขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์
8. ดำเนินการสร้างโปรแกรมในส่วนต่าง ๆ ดังนี้
    1) ทำการสร้างโปรแกรมในส่วนการรับข้อมูล
    2) ทำการสร้างโปรแกรมในส่วนการรับข้อมูลพิกัดต่าง ๆ ของแต่ละเอลิเมนต์เข้าสู่โปรแกรม
    3) ทำการสร้างโปรแกรมในส่วนการคำนวณของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติ
    4) ทำการสร้างโปรแกรมในส่วนการรับค่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ เพื่อนำไปประมวลผลสำหรับคำนวณหาระดับอุณหภูมิในแต่ละเอลิเมนต์
    5) ทำการเขียนโปรแกรมในส่วนแสดงผล โดยมีการแสดงผลเป็นภาพกราฟฟิกที่แสดงระดับอุณหภูมิออกมาเป็นแถบสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำการวิเคราะห์ ประเมินผล และแก้ไขปรับปรุงโปรแกรมที่สร้างขึ้นให้มีความถูกต้องสมบูรณ์
10. จัดทำรูปเล่มรายงาน และผลงานนำเสนอ

3.2 การออกแบบโปรแกรม

สำหรับโปรแกรมที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ทั้งหมด 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

3.2.1 ส่วนรับข้อมูล(Input Data) สำหรับส่วนการรับข้อมูลของโปรแกรมจะมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1. พิกัดของตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานที่ทำการศึกษา
2. ค่าความหนาแน่นของมวล
3. ค่าความร้อนจำเพาะของพลาสติก
4. ความสามารถในการนำความร้อน
5. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน
6. อุณหภูมิตลอดขอบ
7. อุณหภูมิที่กำหนด

3.2.2 ส่วนประมวลผล

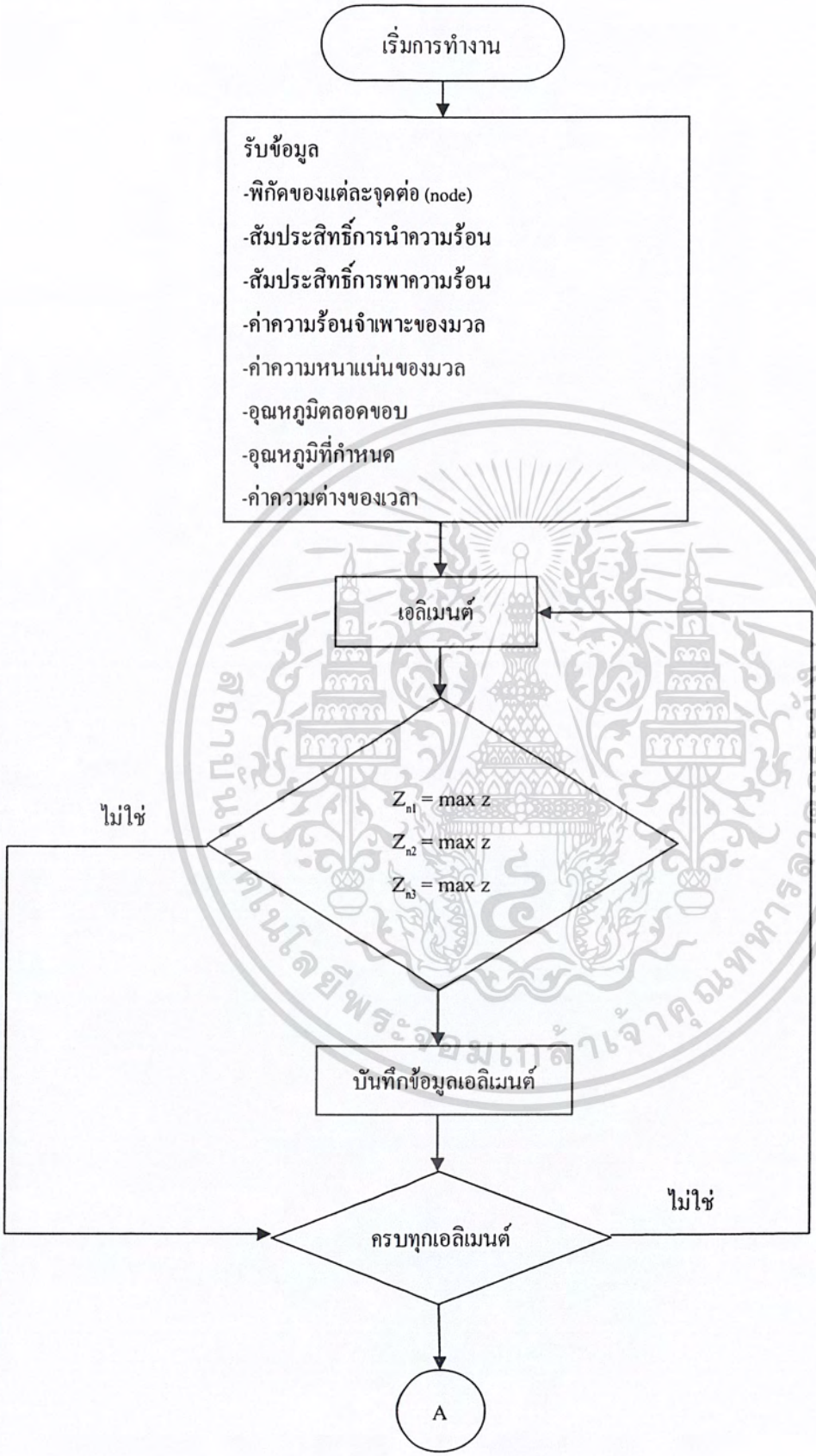
โปรแกรมจะนำค่าข้อมูลที่ได้รับจากผู้ใช้ในส่วนรับข้อมูล(Input Data) มาทำการประมวลผล เพื่อแสดงค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.3 ส่วนแสดงผล(Output Data) สำหรับส่วนแสดงผลของโปรแกรมประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์
2. กราฟฟิกแสดงแถบสีตามระดับอุณหภูมิที่ได้กำหนดขึ้น

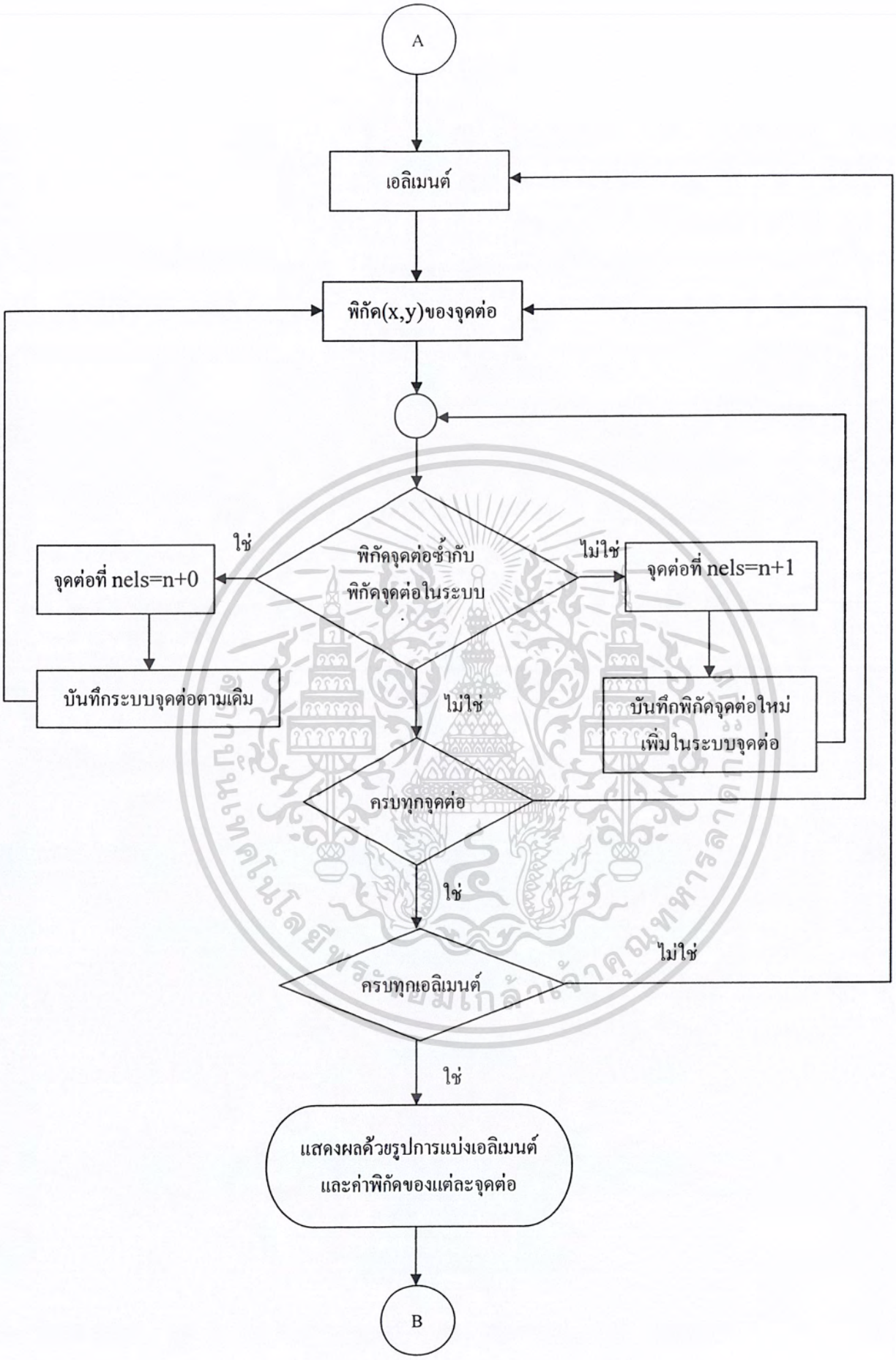
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



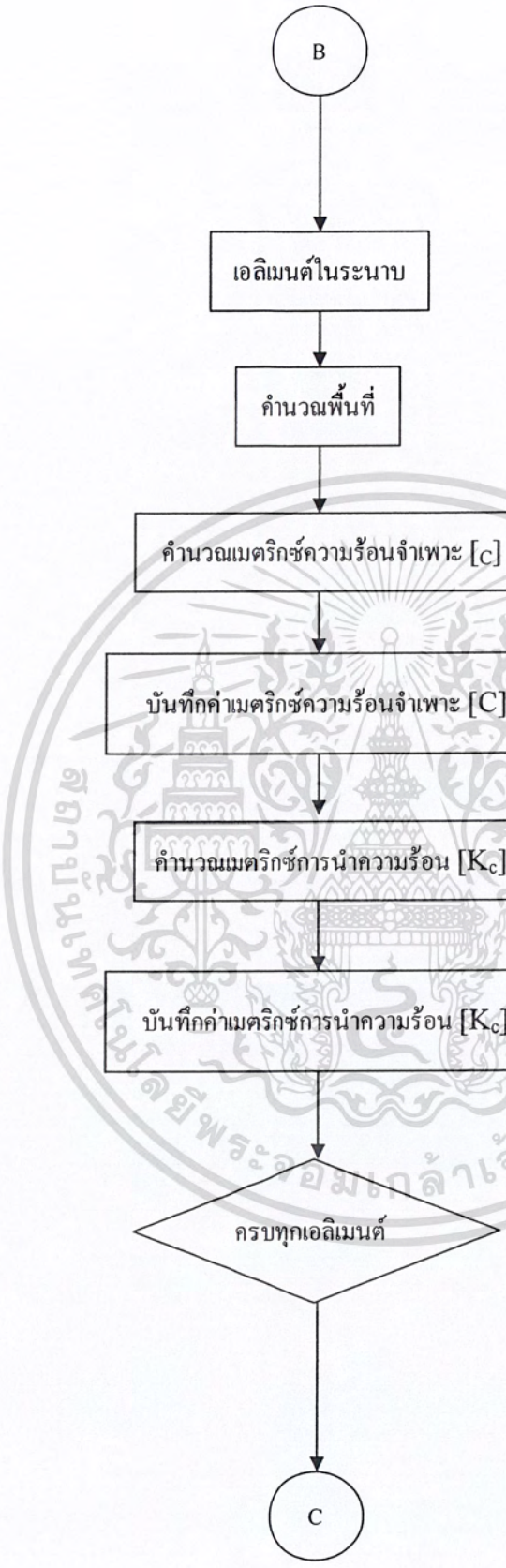
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



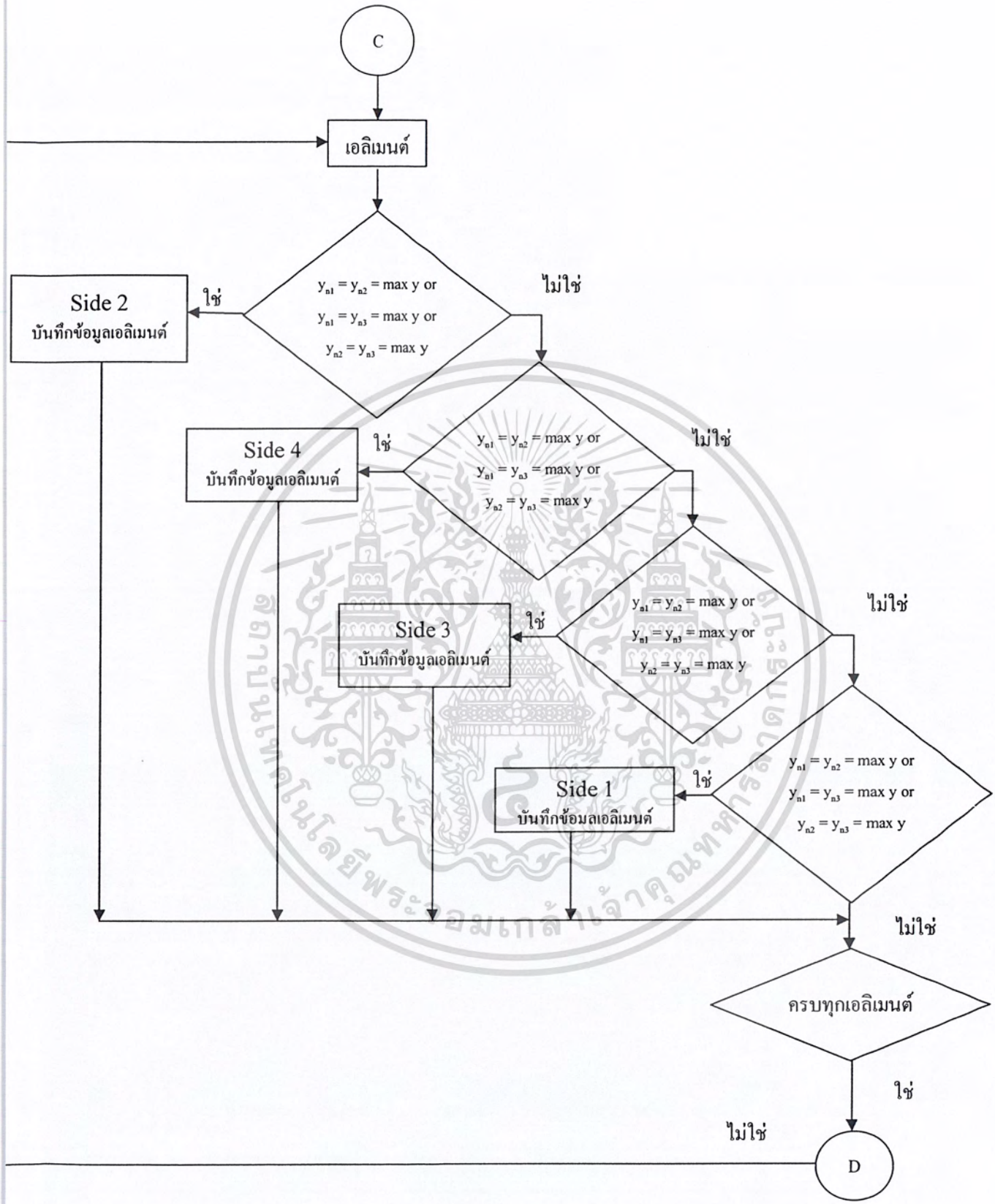
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



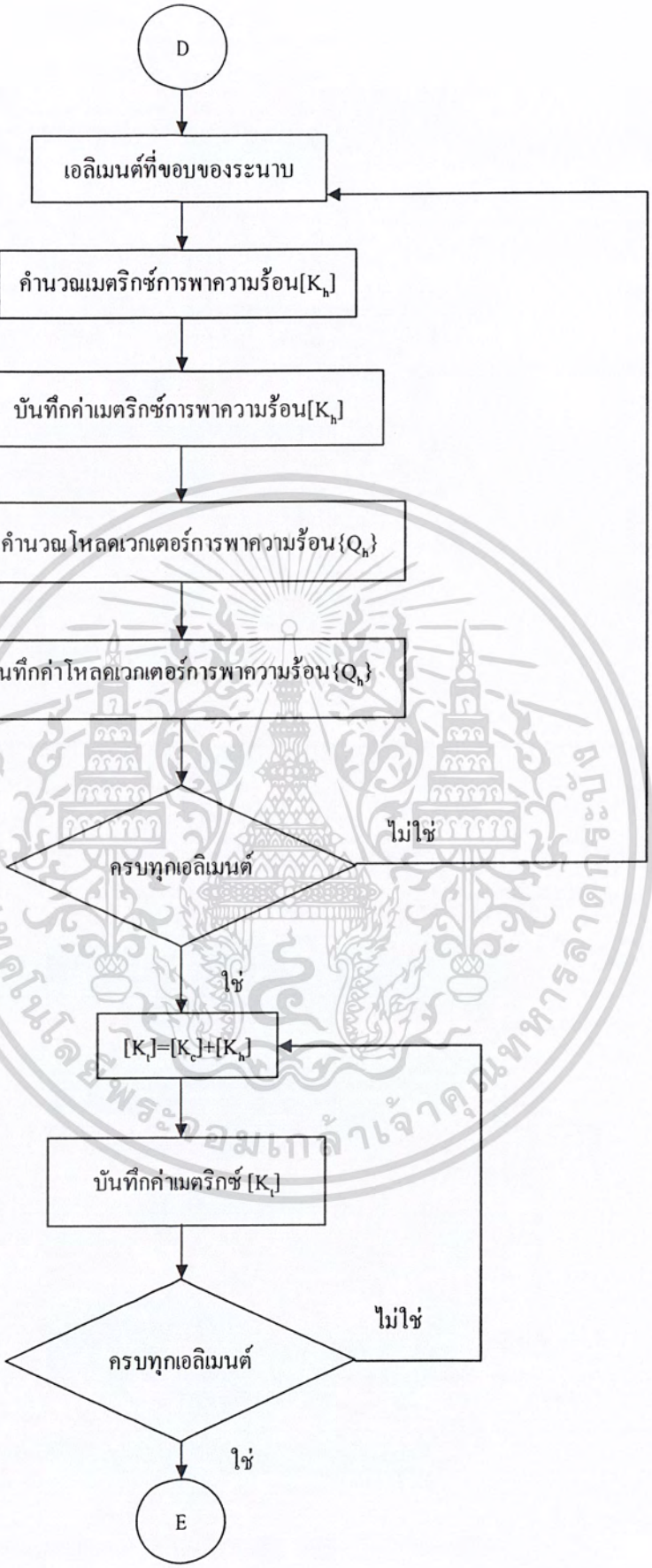
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



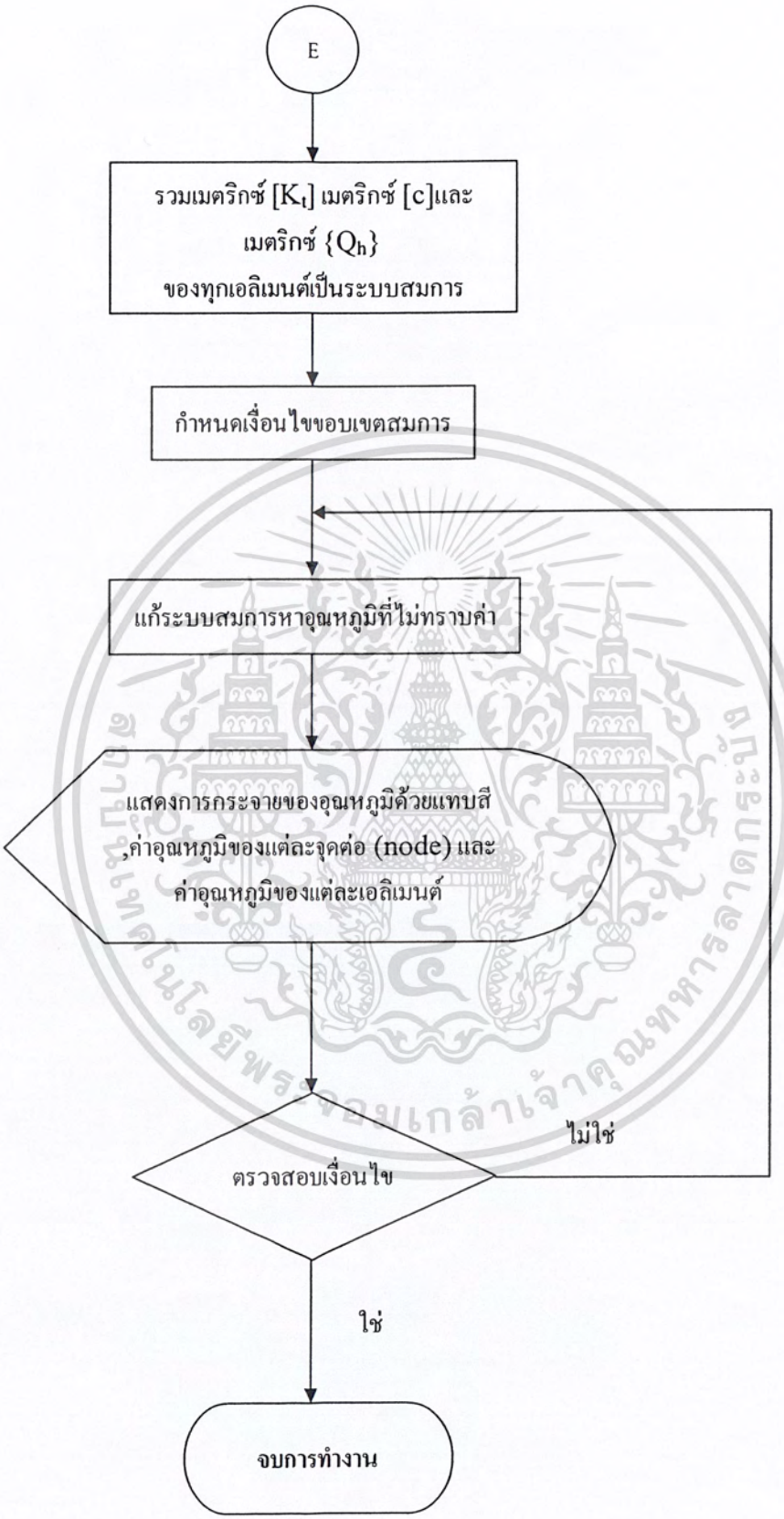
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม (ต่อ)

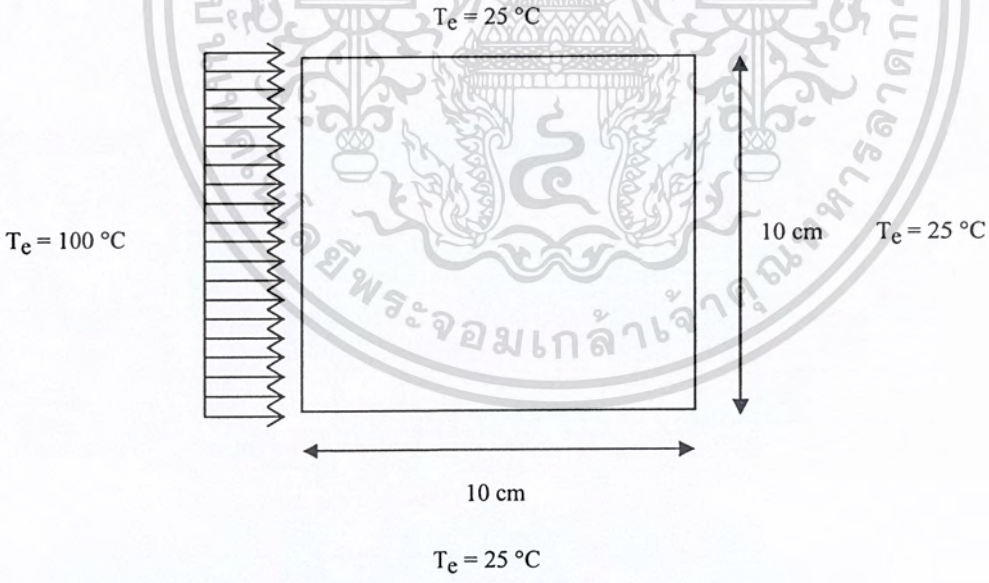
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าการกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงานจากโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME ที่ได้สร้างขึ้น และทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมFEM HEAT TRANSFER TIME โดยมีรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์หาค่าการกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงานจากโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME

<u>ตัวอย่าง</u> ชิ้นงานพลาสติกรูปสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(k) = 0.18 W/m°C , ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน(h) = 10 W/m²°C ค่าความหนาแน่นมวล(ρ) = 0.97453 kg/m^3 , ความร้อนจำเพาะ (c) =2400J/kg-K และกำหนดให้ความหนาของชิ้นงานเป็น 1 เซนติเมตร อุณหภูมิห้องที่สภาวะทั่วไป 25 °C และอุณหภูมิที่ขอบกำหนดให้มีค่าเป็น 100 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการคำนวณ

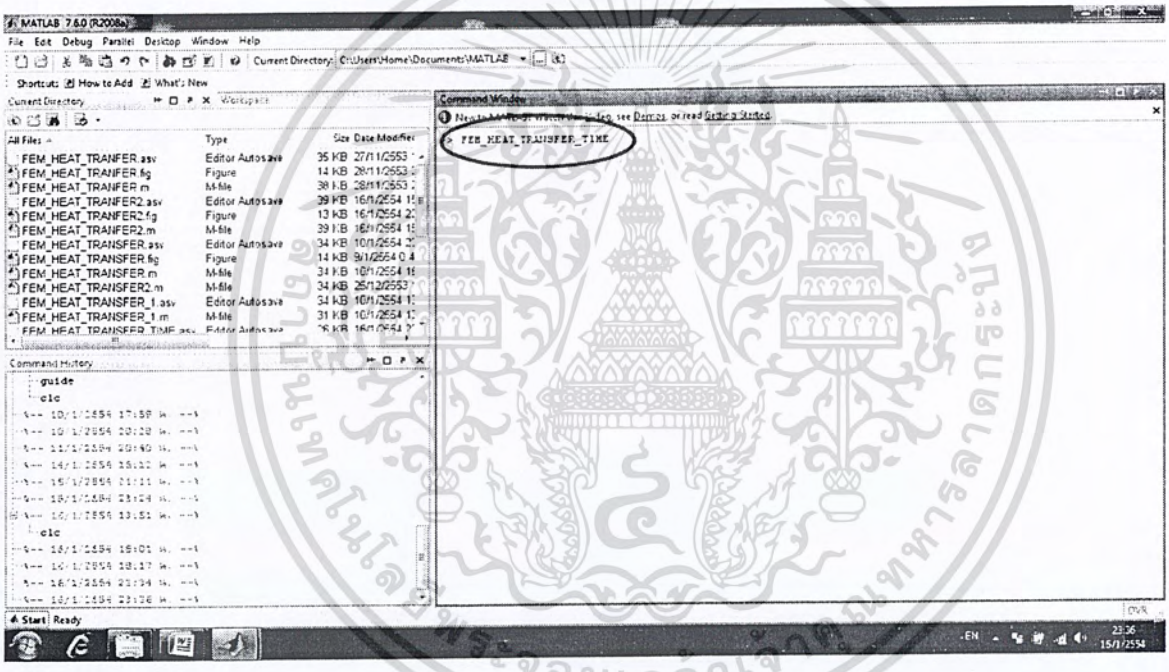
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาต์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การเตรียมไฟล์ชิ้นงานสำหรับใช้ในโปรแกรม มีขั้นตอน ดังนี้

1. สร้างแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติจากโปรแกรมทางด้าน CAD Software จากนั้นทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .stl
2. นำไฟล์ .stl ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำการแบ่งเป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมด้วยโปรแกรม MeshLab และบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .dxf
3. ทำการแปลงนามสกุลไฟล์ จาก .dxf เป็น .xls ด้วยโปรแกรม MS Excel และเลือกบันทึกไฟล์ไว้ที่ Directory ของโปรแกรม MATLAB (C:\Users\Home\Documents\MATLAB)

4.1.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟล์ชิ้นงานด้วยโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME

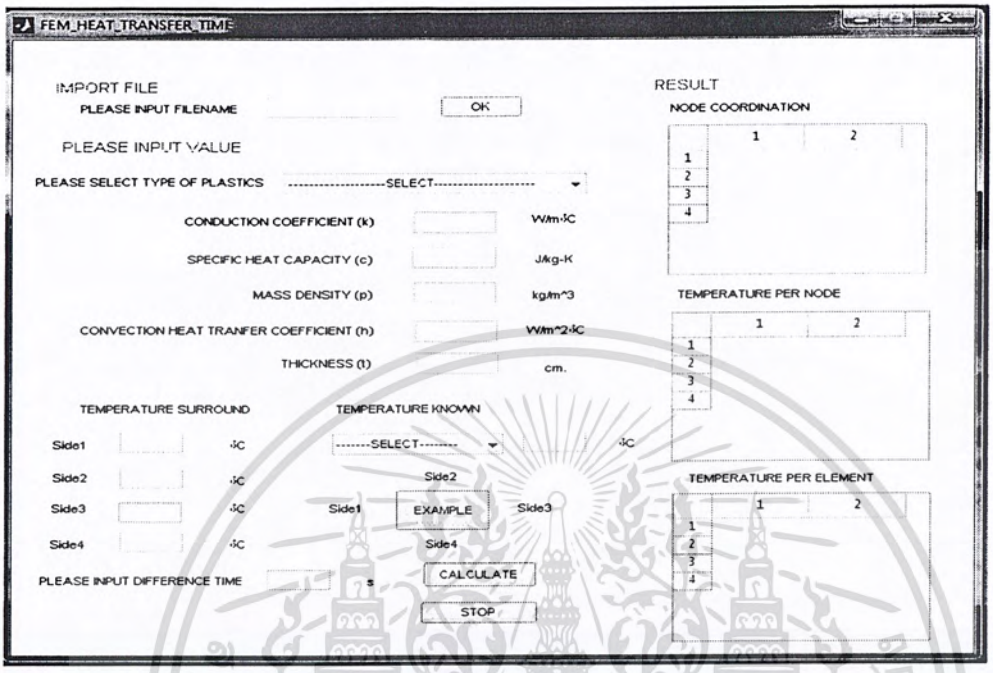
1. ทำการเปิดโปรแกรม MATLAB พิมพ์ชื่อโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME ลงในส่วนของ Command Window ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นกด Enter เพื่อเข้าสู่โปรแกรม FEM HEAT TRANSFER _TIME



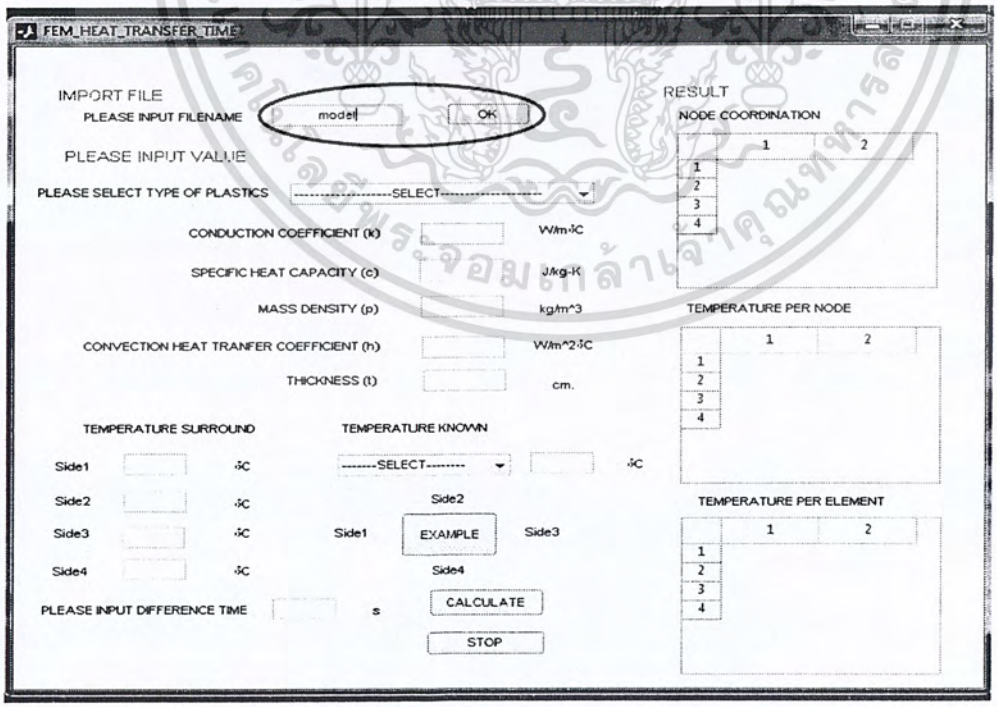
รูปที่ 4.2 หน้าจอของโปรแกรม MATLAB ขณะพิมพ์ชื่อโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากนั้น หน้าต่างโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME จะปรากฏขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ให้ทำการพิมพ์ชื่อไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์ลงในส่วน IMPORT FILE แล้วกดปุ่ม OK ดังแสดงในรูปที่ 4.4



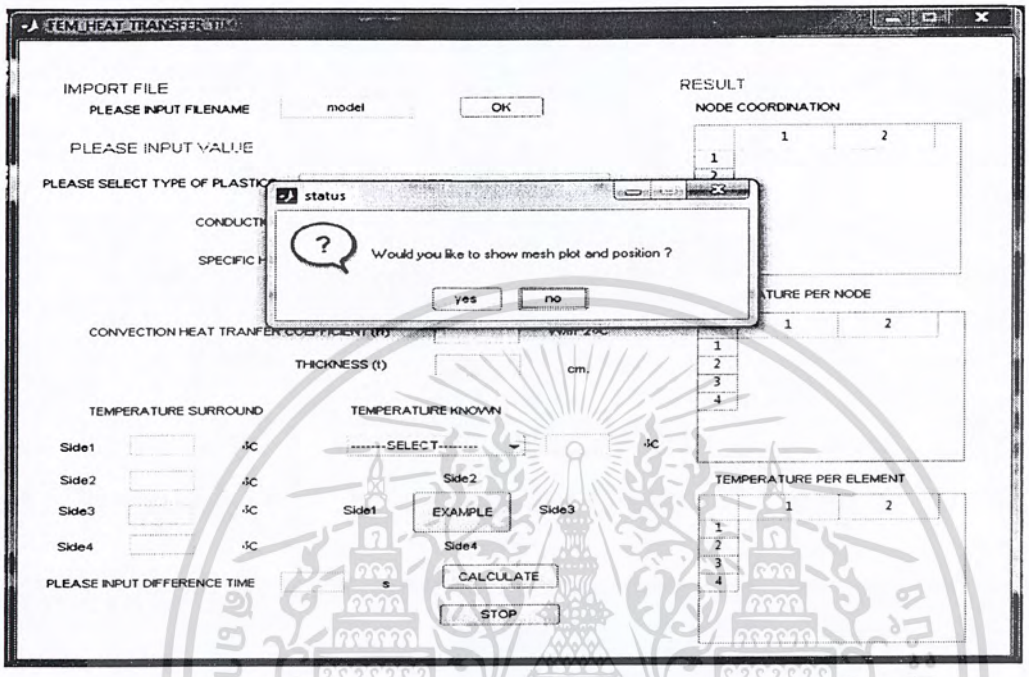
รูปที่ 4.3 หน้าต่างโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME



รูปที่ 4.4 การกำหนดชื่อไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์ลงในส่วน IMPORT FILE

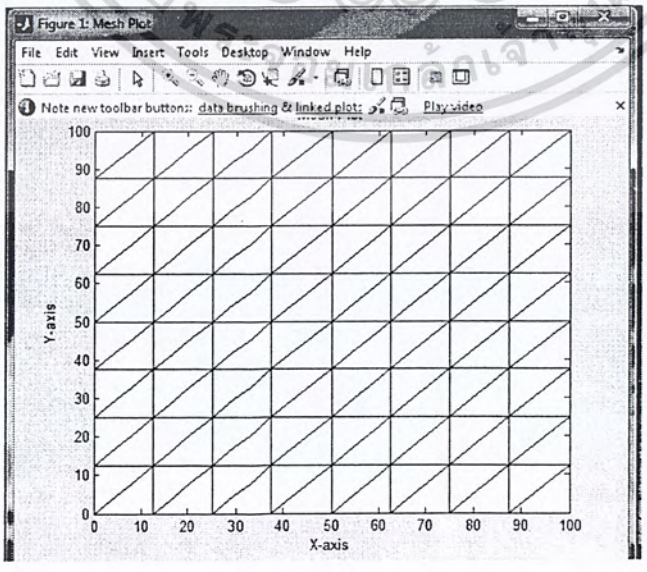
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรมจะแสดงกล่องข้อความเพื่อสอบถามผู้ใช้ ถึงความต้องการให้โปรแกรมแสดงรูปกราฟฟิกการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานหรือไม่ ถ้าต้องการรูปกราฟฟิกการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานกดปุ่ม yes ไม่ต้องการกดปุ่ม no ดังรูปที่ 4.5



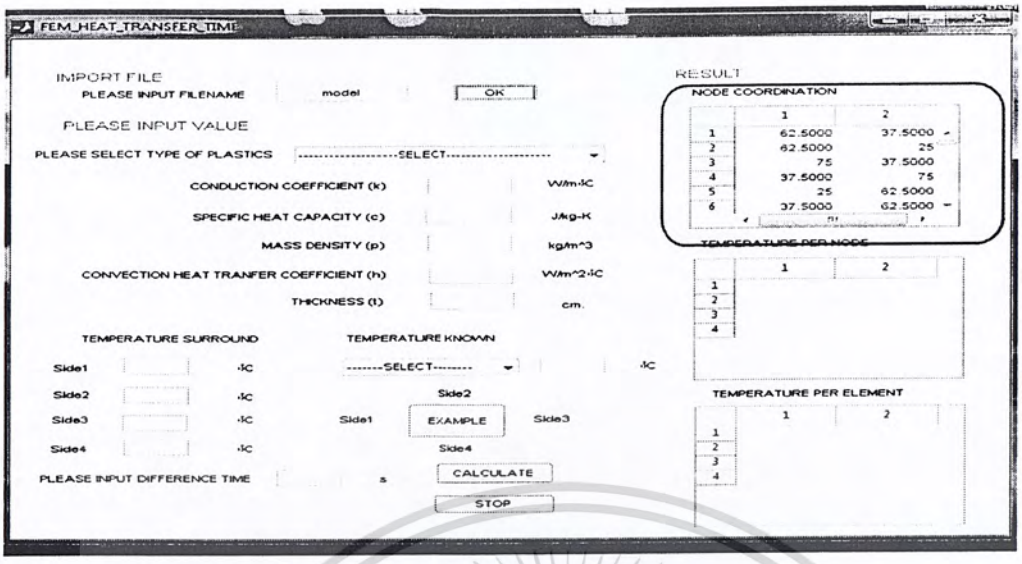
รูปที่ 4.5 กล่องข้อความเพื่อสอบถามข้อมูลในการแสดงการแบ่งเอลิเมนต์

4. เมื่อกดปุ่ม yes ในกล่องข้อความจากรูปที่ 4.5 จะขึ้นหน้าจอแสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh Plot) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และแสดงค่าพิกัด (X,Y) ของแต่ละจุดต่อ (Node) จะปรากฏขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7



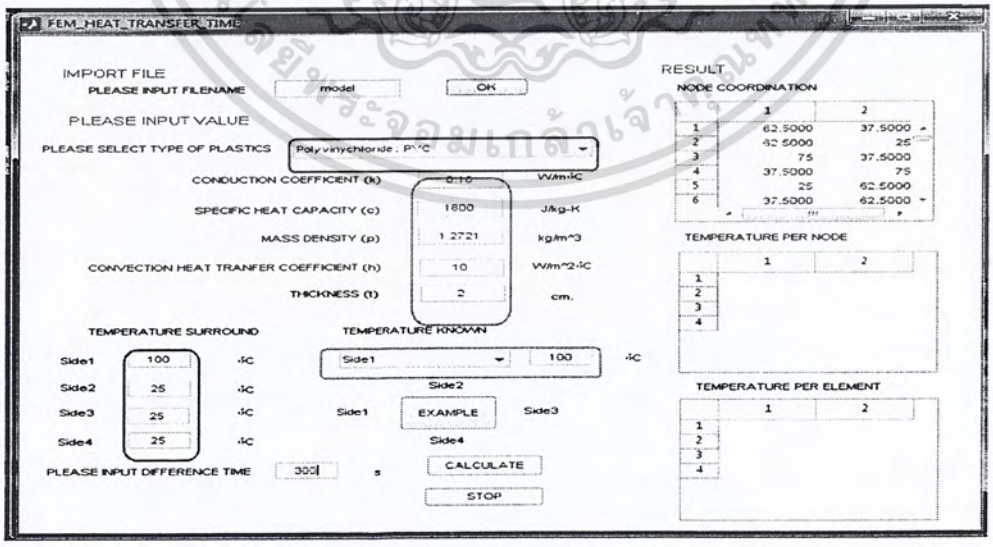
รูปที่ 4.6 ผลการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh Plot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



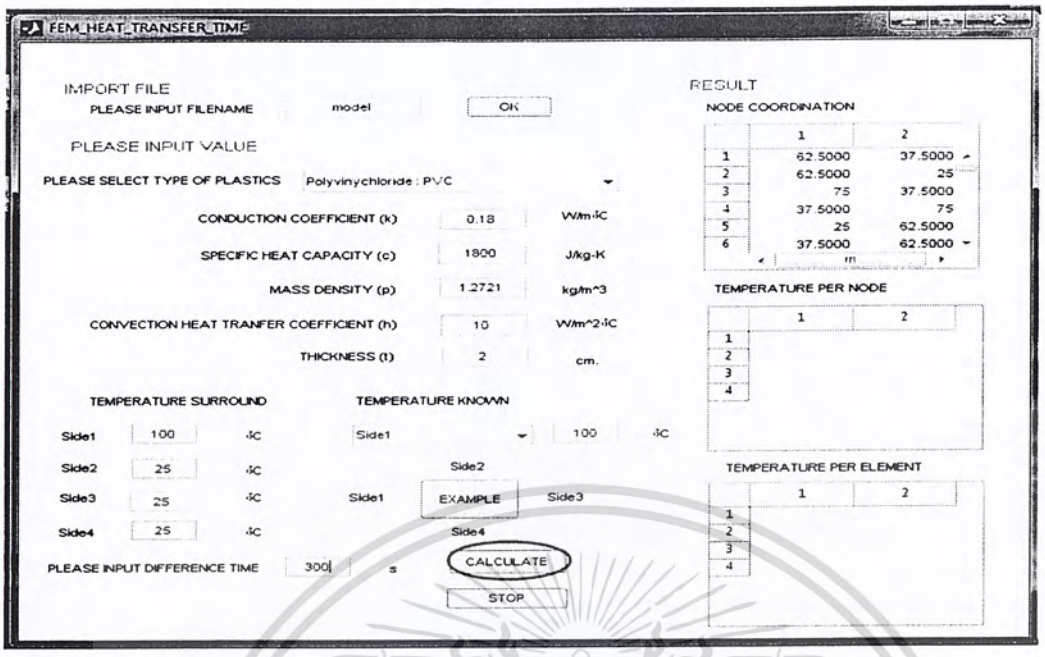
รูปที่ 4.7 ค่าพิกัด (X,Y) ของแต่ละจุดต่อ (Node)

5. ทำการป้อนข้อมูลที่ต้องการทราบค่า ในส่วนรับข้อมูลของโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะรับข้อมูลชนิดของพลาสติกเฉพาะพลาสติกประเภท Thermosetting Plastics เท่านั้น โดยเมื่อเลือกชนิดของพลาสติกแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k),ค่าความร้อนจำเพาะ(c) และค่าความหนาแน่นของมวล(ρ)ขึ้นมาจะปรากฏขึ้นมา จากนั้นให้ทำการป้อนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) , ค่าความหนาของชิ้นงาน(t) อุณหภูมิตลอดขอบของชิ้นงาน หลังจากนั้นเลือกด้านที่ทราบค่าอุณหภูมิ พร้อมทั้งใส่ค่าอุณหภูมิและใส่ช่วงความถี่ของระยะเวลาที่ต้องการในการแสดงผล เมื่อป้อนข้อมูลต่างๆเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการกดปุ่ม Calculate ดังแสดงในรูปที่ 4.9



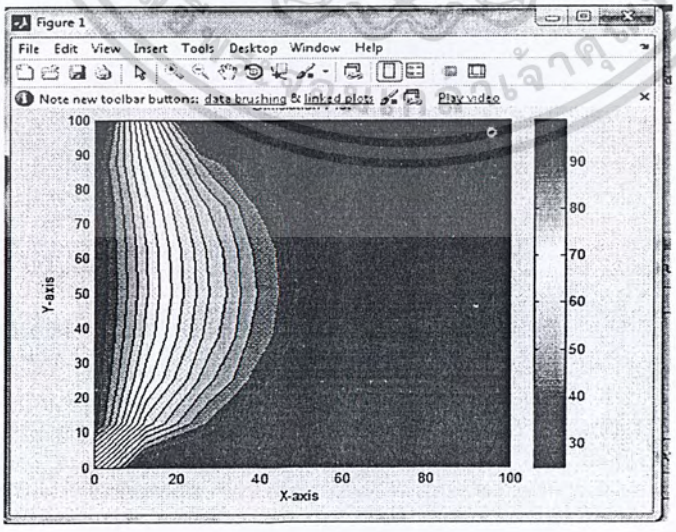
รูปที่ 4.8 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลค่าต่าง ๆ ของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



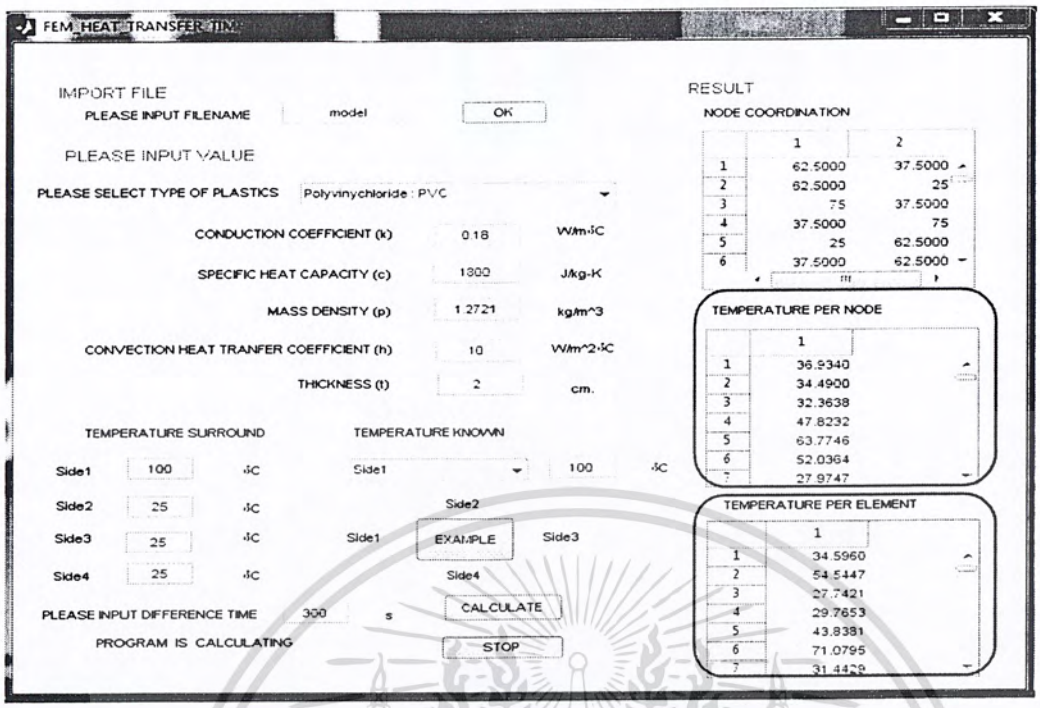
รูปที่ 4.9 หน้าจอสำหรับกดปุ่ม Calculate

6. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างแสดงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนชิ้นงานด้วยระดับของแถบสีต่าง ๆเป็นภาพเคลื่อนไหว ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และแสดงค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ในแต่ละช่วงเวลาลงในตาราง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อชิ้นงานมีการกระจายอุณหภูมิตามช่วงเวลาที่เราต้องการเรากดปุ่ม Stop เพื่อหยุดการคำนวณค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ และจะแสดงค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ในช่วงเวลาที่เราต้องการ พร้อมทั้งแสดงภาพแถบสีที่ช่วงเวลาที่เราต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

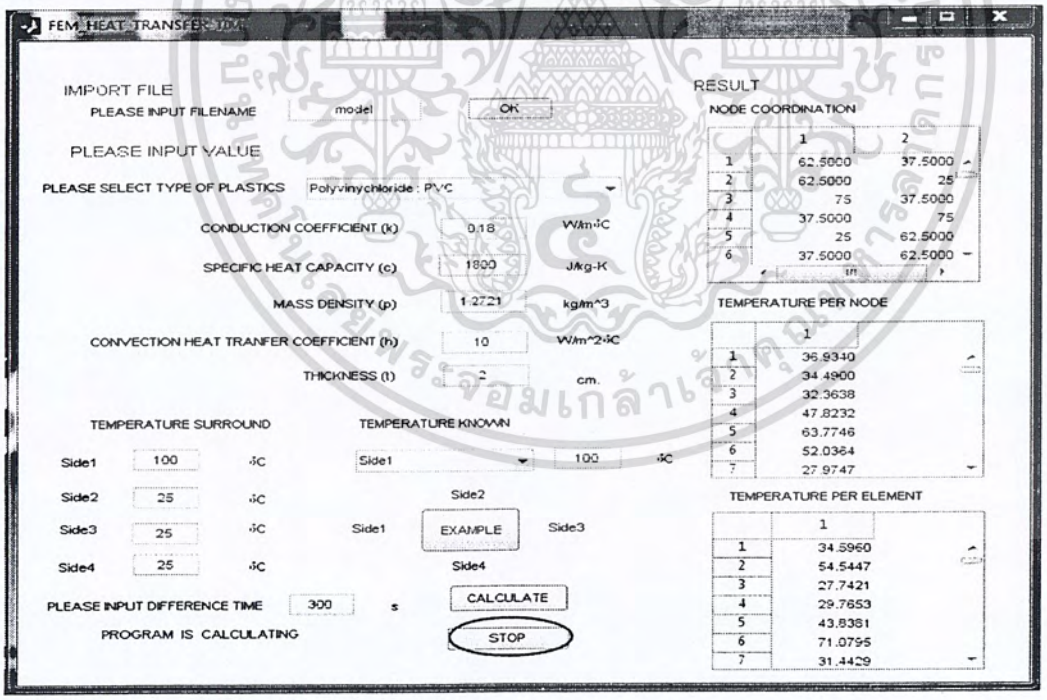


รูปที่ 4.10 หน้าต่างแสดงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนชิ้นงานด้วยระดับแถบสีเป็นภาพเคลื่อนไหวในแต่ละช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 หน้าต่างแสดงค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และ ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ในแต่ละช่วงเวลา

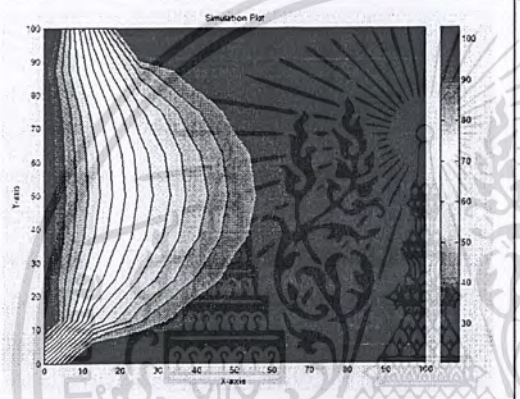
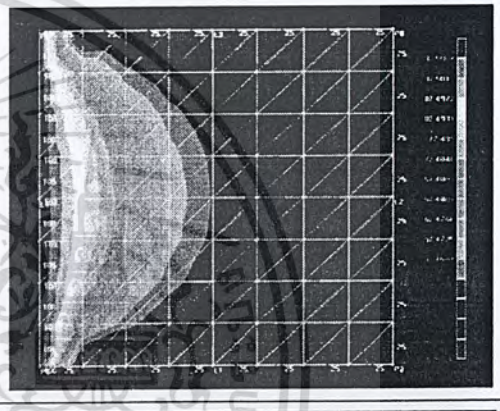
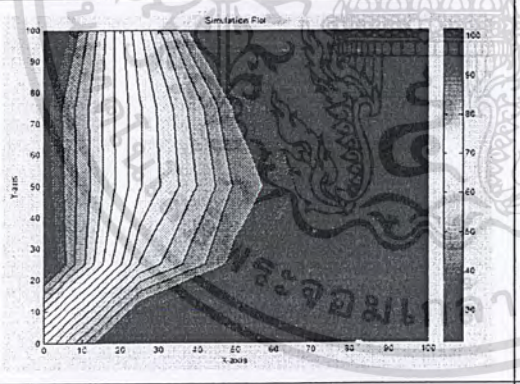
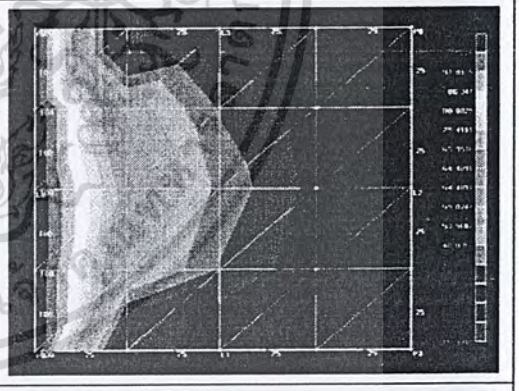
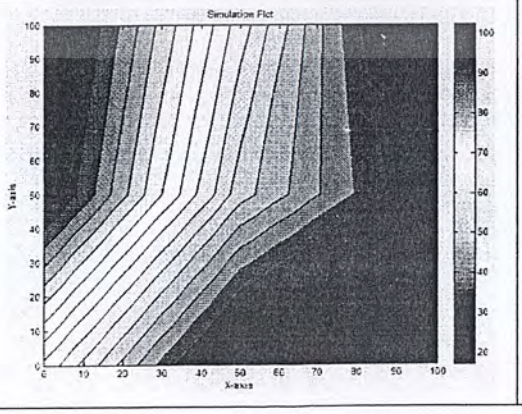
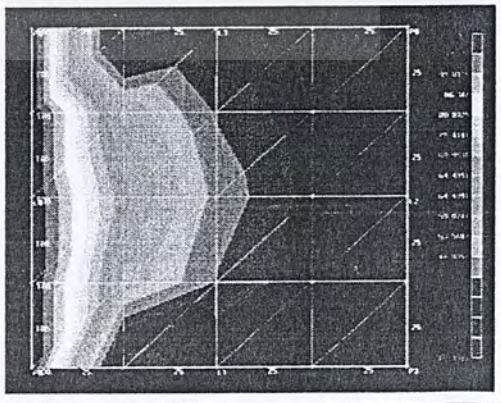


รูปที่ 4.12 หน้าจอสำหรับกดปุ่ม Stop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME

เมื่อทำการตรวจสอบความแม่นยำในการคำนวณและการแสดงผลด้วยโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME โดยเปรียบเทียบผลจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน ปรากฏว่าโปรแกรมที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับโปรแกรมสำเร็จรูป เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูป(FEM_HEAT_TRANSFER) และเปรียบเทียบการแสดงผลจากภาพกราฟฟิกโดยโปรแกรม EASY Software [2], พบว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FEM_HEAT_TRANSFER_TIME มีความถูกต้อง โดยเฉพาะเมื่อแบ่งเอลิเมนต์มากขึ้นเรื่อยๆ ผลที่ได้จะมีความแม่นยำมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13

จำนวนเอลิเมนต์	FEM_HEAT_TRANSFER_TIME	Easy Software
128		
32		
8		

รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับโปรแกรมสำเร็จรูป

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึง การสรุปผลการดำเนินงาน และแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไข จากการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดพลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดพลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสภาวะไม่อยู่ตัวนี้คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถช่วยประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบชิ้นงานจริง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปปรับปรุงและประยุกต์ใช้ได้ในแวดวงอุตสาหกรรม โดยโปรแกรมจะทำการรับข้อมูลพิกัดของตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงาน รับชนิดของพลาสติก แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, ค่าความร้อนจำเพาะ, ค่าความหนาแน่นของมวล และรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, อุณหภูมิที่ด้านต่างๆ, ความหนาของชิ้นงาน และระยะห่างของเวลาที่ต้องการแสดงผล จากนั้นได้นำข้อมูลทั้งหมดไปคำนวณตามทฤษฎีวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลลัพธ์จะอยู่ในรูปของค่าระดับอุณหภูมิของแต่ละ node และแต่ละเอลิเมนต์เมื่อการกระจายอุณหภูมิมีค่าที่คงที่และรูปกราฟฟิกสีเคลื่อนไหวแสดงระดับอุณหภูมิของชิ้นงาน

เมื่อทำการตรวจสอบความแม่นยำในการคำนวณและแสดงผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FEM_HEAT_TRANSFER_TIME โดยเทียบกับการคำนวณและแสดงผลโดยโปรแกรมสำเร็จรูป พบว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FEM_HEAT_TRANSFER_TIME มีความถูกต้อง แม่นยำตรงตามทฤษฎี และมีความน่าเชื่อถือโดยเฉพาะเมื่อแบ่งเอลิเมนต์มากขึ้นเรื่อยๆ ผลที่ได้จะมีความแม่นยำขึ้น อีกทั้งข้อดีของโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME ที่สร้างขึ้นนี้มีข้อได้เปรียบในด้านเวลาที่โปรแกรมได้ทำการวิเคราะห์ นั่นคือผู้ใช้จะสามารถวิเคราะห์ลักษณะการกระจายอุณหภูมิได้ตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดกระบวนการ ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในปัจจุบันนั้นไม่ได้แสดงผลการวิเคราะห์ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ แต่จะแสดงผลเพียงแค่ในสภาวะอยู่ตัวที่จุดใดจุดหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตามโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดจากสมมติฐานต่างๆที่กำหนดไว้ จึงยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ได้แก่ พลาสติกที่วิเคราะห์ได้เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก, ชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมสมมาตรทรงตัน, ทราบค่าอุณหภูมิที่กำหนดให้ได้หนึ่งด้าน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 แนวทางพัฒนาและปรับปรุง

1. ปรับปรุงโปรแกรมให้สามารถรับรูปชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบมากยิ่งขึ้น
2. โปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME นี้สามารถคำนวณหาค่าระดับความร้อนภายในแม่แบบในสภาวะไม่อยู่ตัวได้เฉพาะชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมสมมาตรเท่านั้น ควรที่จะพัฒนาให้สามารถคำนวณหาคุณสมบัติการไหลของพลาสติกในงานฉีดพลาสติก เช่น ความหนืด เป็นต้น ได้ด้วย
3. ส่วนของการแสดงผลรูปกราฟฟิก ควรเพิ่มเติมความสวยงามให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น
4. ปรับปรุงให้โปรแกรมสามารถรับรูปชิ้นงานแล้วแบ่งเอลิเมนต์ได้เอง
5. ควรเพิ่มเติมความสวยงาม ความสะดวกในการใช้งานของโปรแกรม ให้สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้นเช่น การเลือกภาษาที่ใช้
6. ปรับปรุงให้โปรแกรมสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องมีโปรแกรม Matlab อยู่ก่อน ซึ่งอาจจะพัฒนาโดยการเขียนโดยใช้โปรแกรมอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

[1] บรรเลง ศรนิล. "เทคโนโลยีพลาสติก". พิมพ์ครั้งที่ 12. สำนักพิมพ์ประชาชน, 2540.

[2] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. "ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม". พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

[3] Kenneth H Huebner. "The Finite Element method for Engineers".Third Edition. Awiley-Interscience Publication, 1942.

[4] จารินี บุญนำ. "ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมสำหรับหาระดับความเค้นของชิ้นงาน". ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

[5] เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล. "การคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์". **วารสารวิศวกรรมอุตสาหการ**. 9 : 96 (สิงหาคม 2545) หน้า 79-81.

[6] พัชรา นิลมูล, พิมพ์ศิริ ทาแก้ง และ ภาสิตา ถูกจิต. "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การไหลของการฉีดพลาสติก". ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.

[7] ภาศิษฐ์ ชูสุวรรณ. "การพัฒนาโปรแกรมสำหรับตรวจสอบการออกแบบระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก". วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

[8] ยุทธนา โฆษิตสกุล และ วุฒิพงษ์ รังสีสินติวานนท์. "เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปพลาสติกสำหรับชิ้นงานหนา". สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี, 2550.

[9] วิษรสรรค์ โชคชัยวิวัฒน์. "การศึกษาการเกิดรอยเชื่อมประสานและรอยยุบในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด". วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

[10] ยุทธนา พลอยฉาย, สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด และ พงษ์เจต พรหมวงศ์. "การจำลองการถ่ายเทความร้อนในการไหลที่ปั่นป่วนในช่องขนานที่ติดครีบ". **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. 13 : 1 (มกราคม-มีนาคม 2546) หน้า 26-35.

[11] สุรศิษฐ์ โรจนนันท์. "อิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันฉีดย้ำ และช่วงเวลาที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงานฉีดพลาสติกบริเวณรอยต่อเชื่อม". **วารสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย**. ครั้งที่ 23 (4-7 พฤศจิกายน 2552).

[12] ชานนท์ มะลิกุล. "การถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนภายในช่องแผ่นขนานที่มีครีบ-ร่อง". วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

[13] ธีชวัน ศรีสุวรรณ. "การประมาณค่าอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลในท่อโดยการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสีย". วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2542.

[14] ภาสกร เวสสะโกศล. "การประยุกต์อิลิเมนท์สี่เหลี่ยมสำหรับการไหลของความร้อนและของไหล". วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] วิศิษฐ์ ชัยเทิดเกียรติ, อิทธิพล หัตถพร และ อุทัย รื่นญาติ. "การแก้ปัญหา Air Trap ในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีดโดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์". ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

[16] อกนิษฐ์ สอนตระกูล. "การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการหดตัวและการบิดงอของพลาสติกในแม่พิมพ์พลาสติกแบบฉีด". วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

[17] สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช. "การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลไม่คงตัวความเร็วสูงแบบอัดตัวได้และไร้ความหนืดในสองมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์". วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[18] อุเทน คณะวาปี. "การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก โดยการใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์". วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนครเหนือ, 2549.

[19] ธนู ฉุยฉาย. "โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ขั้นที่ 1". งานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระนครเหนือ.

[20] V.V. Kuznetsov, และ S.V. Levyakov. "Geometrically nonlinear shell finite element based on the geometry of a planar curve". **Finite Elements in Analysis and Design**. 44(2008):450 – 461.

[21] M. Abo-Elkhier. "Elasto-plastic finite element modelling of strip cold rolling using Eulerian fixed mesh technique". **Finite Elements in Analysis and Design**. 27(1997):323-334.

[22] V. Nassehi, and M.Parvazinia. "A multiscale finite element space–time discretization method for transient transport phenomena using bubble functions". **Finite Elements in Analysis and Design**. 45(2009):315-323.

[23] J.L.M. Fernandes, J.M.C. Rodrigues, and P.A.F. Martins. "Combined finite element–boundary element thermo-mechanical analysis of metal forming processes". **Journal of Materials Processing Technology** 87(1999):247–257.

[24] S.H. Kang, and Y.T. Im. "Thermo-elasto-plastic finite element analysis of quenching process of carbon steel". **Journal of Materials Processing Technology** 192–193 (2007):381–390.

[25] Beth A. Todd, and Haiyang Wang. "A VISUAL BASIC PROGRAM TO PRE-PROCESS MRI DATA FOR FINITE ELEMENT MODELING". **PII** : s0010-4825(96)00026-1.

[26] C.R. Chen, and H.S. Ramaswamy. "Visual Basics computer simulation package for thermal process calculations". **Chemical Engineering and Processing** 46(2007):603–613.

[27] Richard H. MacNeal. "Perspective on finite elements for shell analysis". **Finite Elements in Analysis and Design** 30(1998):175-186.

[28] Zonc-Ching Lin, and Chi-Chih Shen. "A rolling process two-dimensional finite element model analysis". **Finite Elements in Analysis and Design** 26(1997):143-160.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์

FEM HEAT TRANSFER TIME

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการใช้งานโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME

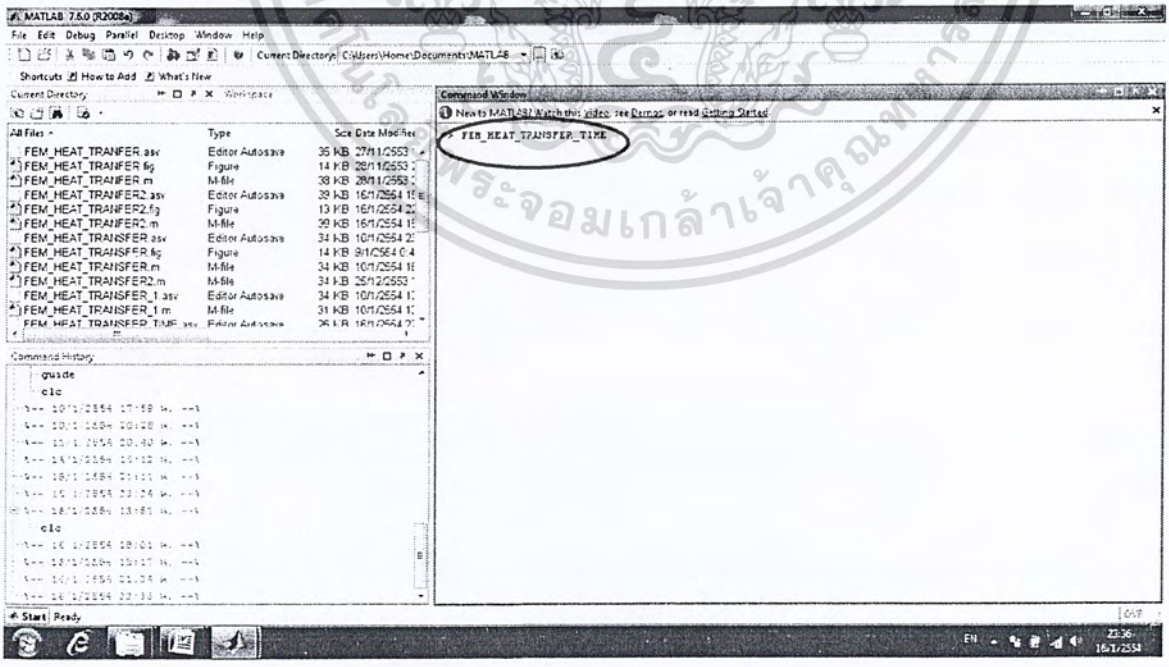
1. วิธีการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FEM HEAT TRANSFER TIME แบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1.1 ขั้นตอนการเตรียมไฟล์อินพุท

1. สร้างแบบจำลองชิ้นงานสามมิติจากโปรแกรมทางด้าน CAD Software จากนั้นทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .stl
2. นำไฟล์ .stl ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำการแบ่งเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมด้วยโปรแกรม MeshLab และบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .dxf
3. ทำการแปลงนามสกุลไฟล์ จาก .dxf เป็น .xls ด้วยโปรแกรม MS Excel และเลือกบันทึกไฟล์ไว้ที่ Directory ของโปรแกรม MATLAB (C:\Users\Home\Documents\MATLAB)

1.2 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER

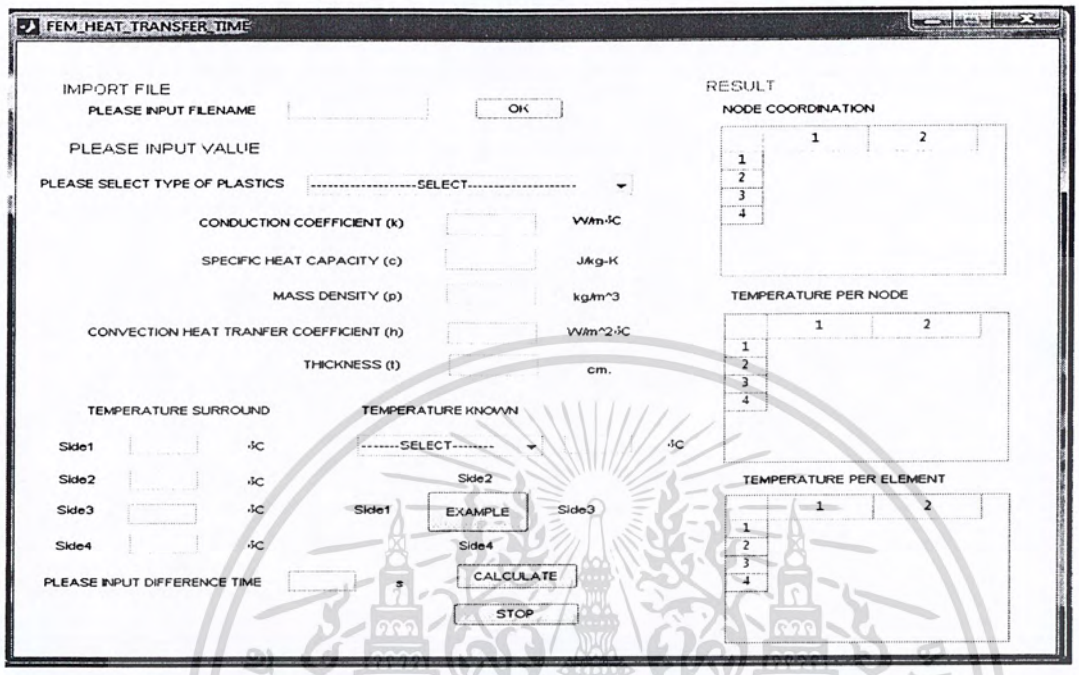
1. เปิดโปรแกรม MATLAB พิมพ์ชื่อโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME ลงในส่วนของ Command Window จากนั้นกด Enter เพื่อเข้าสู่โปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME



รูปที่ ผก 1 การเรียกใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์

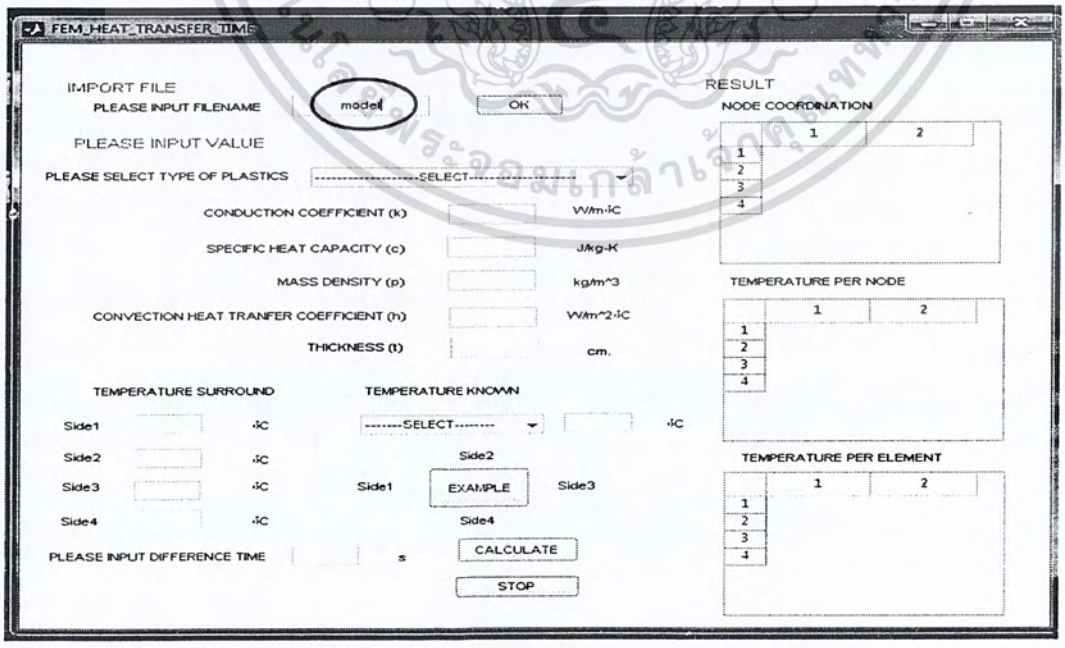
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปรากฏหน้าต่างโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME



รูปที่ ผก 2 หน้าต่างโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME

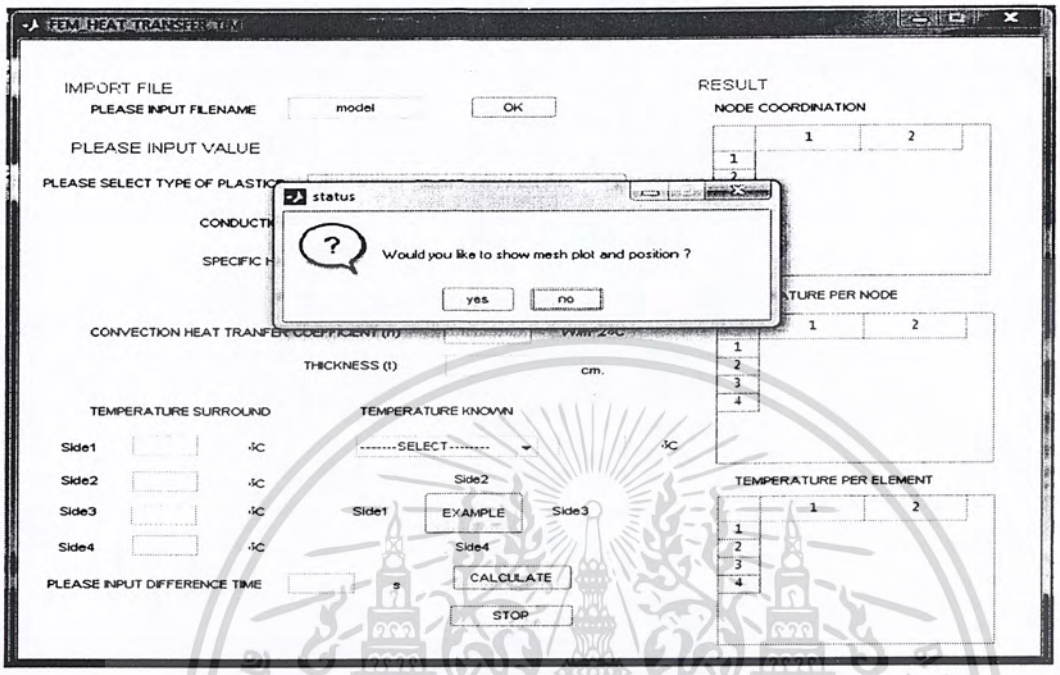
3. พิมพ์ชื่อไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์ลงในส่วน IMPORT FILE แล้วกดปุ่ม OK



รูปที่ ผก 3 การพิมพ์ชื่อไฟล์ชิ้นงานในส่วน IMPORT FILE

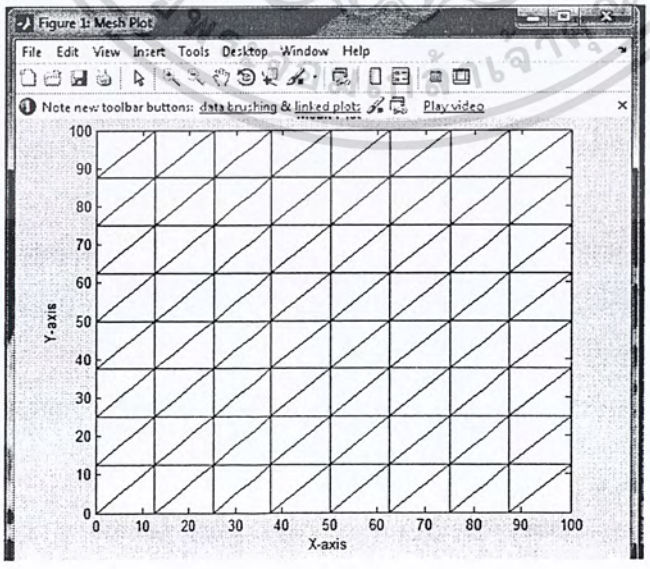
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โปรแกรมจะแสดงกล่องข้อความเพื่อสอบถามผู้ใช้ ถึงความต้องการให้โปรแกรมแสดงรูปกราฟฟิกการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานหรือไม่ ถ้าต้องการรูปกราฟฟิกการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานกดปุ่ม yes ไม่ต้องการกดปุ่ม no



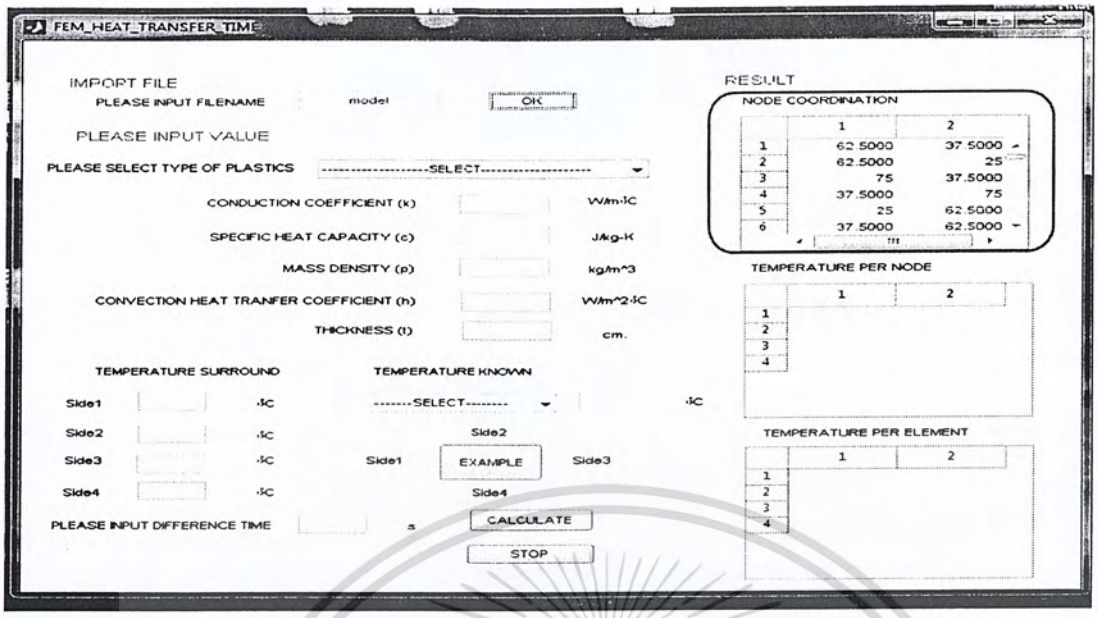
รูปที่ ผก 4 กล่องข้อความเพื่อสอบถามผู้ใช้ว่าต้องการให้โปรแกรมแสดงรูปกราฟฟิกการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานหรือไม่

5. เมื่อกดปุ่ม yes ปรากฏหน้าจอแสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh Plot) ดังรูปที่ ผก 5 และแสดงค่าพิกัด (X,Y) ของแต่ละจุดต่อ (Node) ดังรูปที่ ผก 6



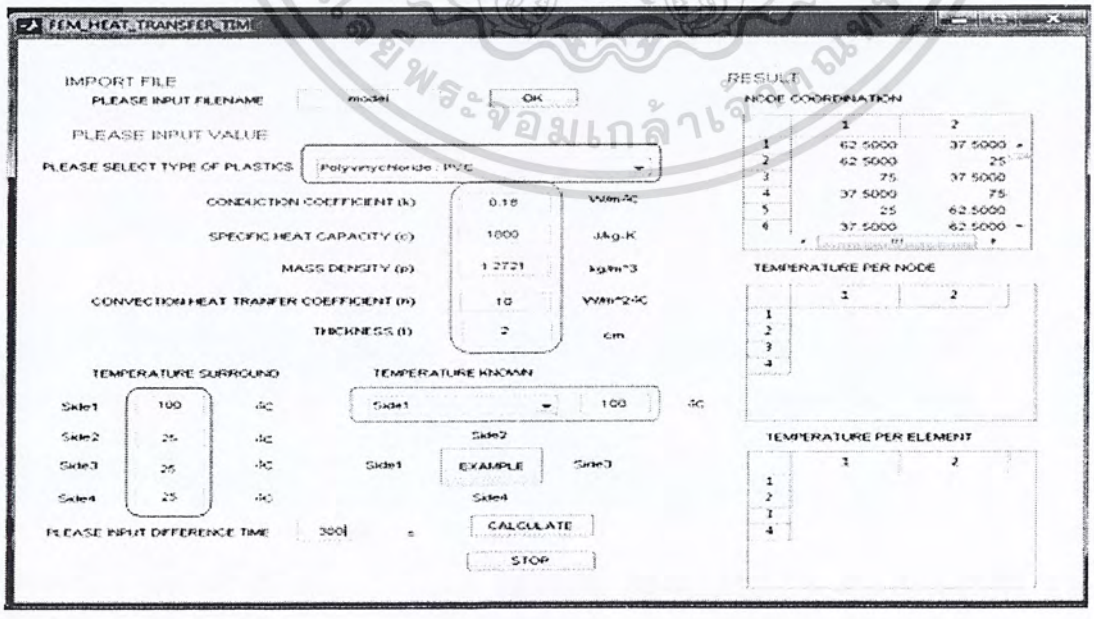
รูปที่ ผก 5 หน้าต่างแสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh Plot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก 6 หน้าจอแสดงค่าพิกัด (X,Y) ของแต่ละจุดต่อ (Node)

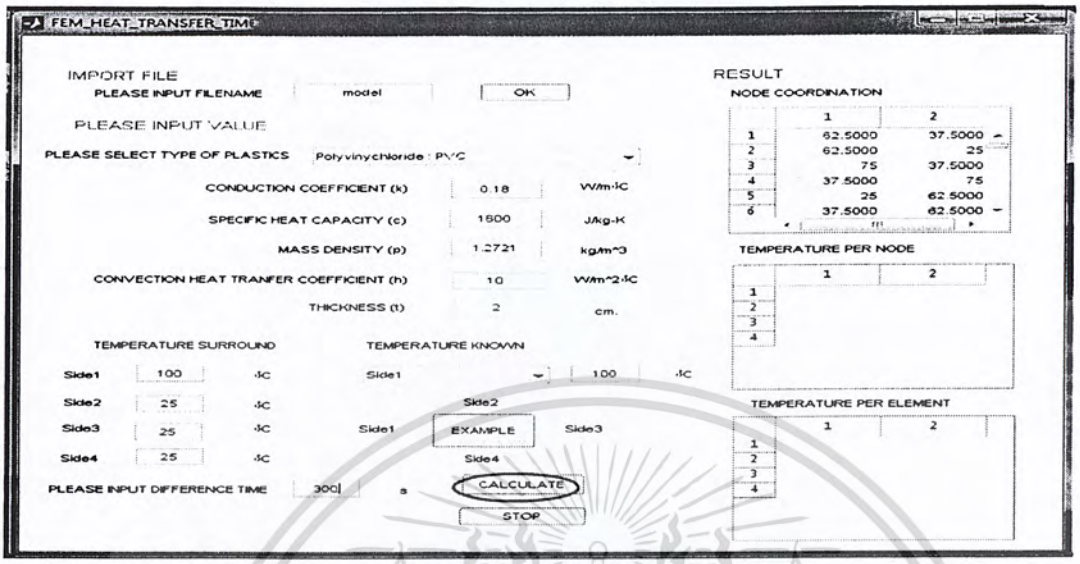
6. ป้อนอินพุทในส่วนรับข้อมูลของโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h), สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k), อุณหภูมิตลอดขอบของชิ้นงาน จากนั้นเลือกด้านที่ทราบค่าอุณหภูมิ พร้อมทั้งใส่ค่าอุณหภูมิชนิดของพลาสติกในพลาสติกแบบ Thermosetting Plastics โดยเลือกชนิด แล้วจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k),ค่าความร้อนจำเพาะ(c),ค่าความหนาแน่นของมวล(ρ) ขึ้นมา รับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) , ค่าความหนาของชิ้นงาน(t) อุณหภูมิตลอดขอบของชิ้นงาน จากนั้นเลือกด้านที่ทราบค่าอุณหภูมิ พร้อมทั้งใส่ค่าอุณหภูมิและใส่ช่วงเวลาที่ต้องการแสดง



รูปที่ ผก 7 หน้าต่างสำหรับการป้อนค่าต่าง ๆ ในส่วนรับข้อมูล

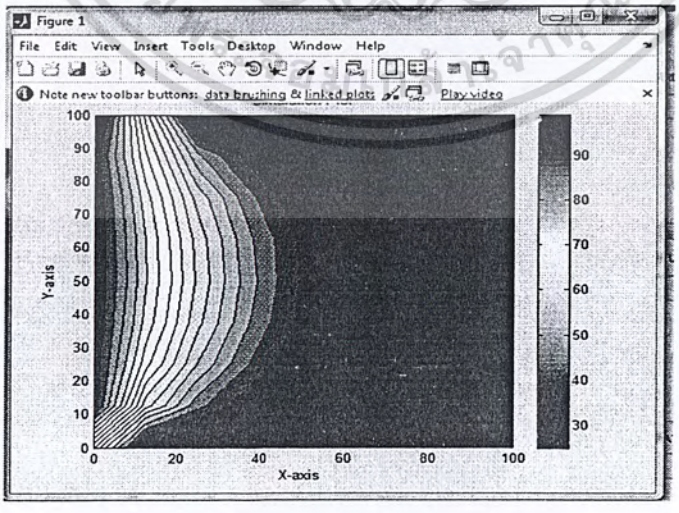
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กดปุ่ม Calculate



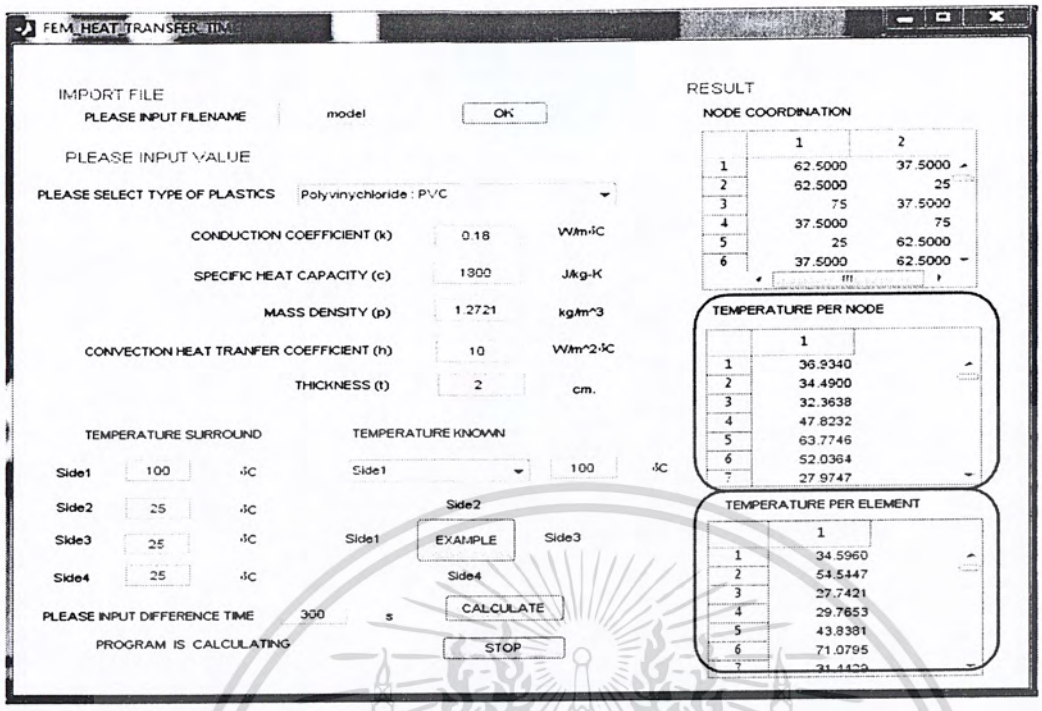
รูปที่ ผก 8 การกดปุ่ม Calculate

8. โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างแสดงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนชิ้นงานด้วยระดับของแถบสีต่าง ๆเป็นภาพเคลื่อนไหว ดังรูปที่ ผก 9 และแสดงค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และค่าอุณหภูมิของแต่ละ เอลิเมนต์ในแต่ละช่วงเวลาลงในตาราง ในรูปที่ ผก 10 เมื่อชิ้นงานมีการกระจายอุณหภูมิตามช่วงเวลาที่เราต้องการเรากดปุ่ม Stop เพื่อหยุดการคำนวณค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ และจะแสดงค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ในช่วงเวลาที่เราต้องการ พร้อมทั้งแสดงภาพแถบสีที่ช่วงเวลาที่เราต้องการ ในรูปที่ ผก 11

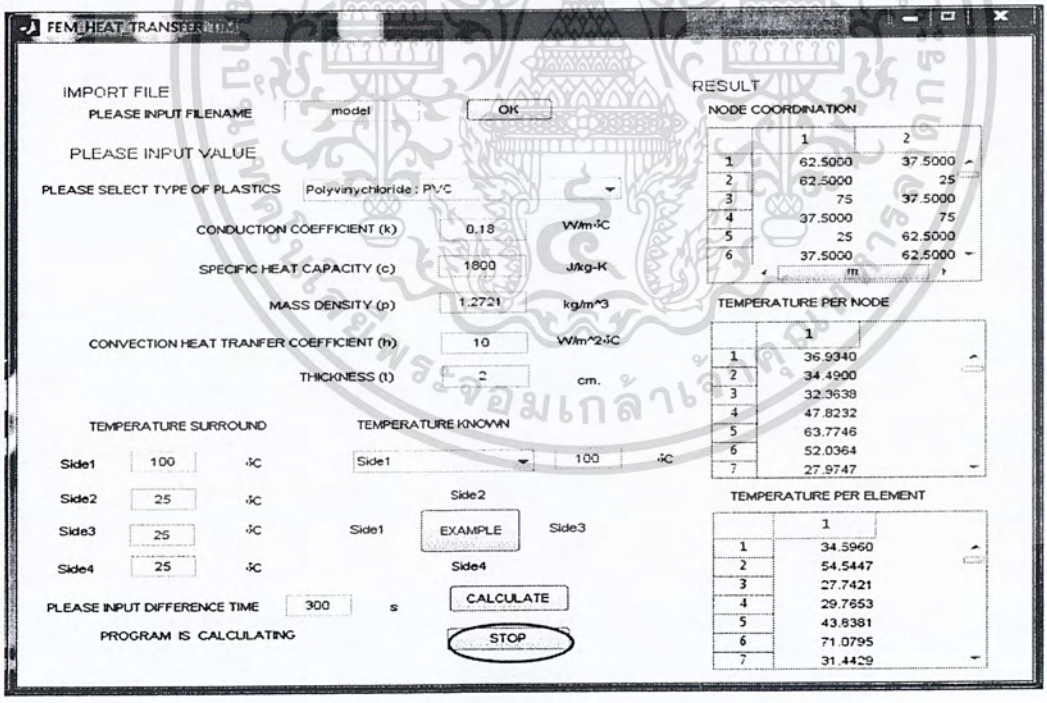


รูปที่ ผก 9 หน้าต่างแสดงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนชิ้นงานด้วยระดับแถบสีเป็นภาพเคลื่อนไหวในช่วงแต่ละเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก 10 หน้าจอค่าอุณหภูมิของแต่ละจุดต่อ (Node) และ ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ ผก 11 หน้าจอสำหรับกดปุ่ม Stop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FEM HEAT TRANSFER TIME

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข 1 พิกัด x-y ของแต่ละเอลิเมนต์ที่แต่ละจุด(node) เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Node Coordinate					
Node	**X**	**Y**	**Node**	**X**	**Y**
1	62.5000	37.5000	**21**	62.5000	75
2	62.5000	25	**22**	25	87.5000
3	75	37.5000	**23**	12.5000	87.5000
4	37.5000	75	**24**	12.5000	75
5	25	62.5000	**25**	87.5000	50
6	37.5000	62.5000	**26**	87.5000	37.5000
7	87.5000	25	**27**	62.5000	50
8	75	12.5000	**28**	50	37.5000
9	87.5000	12.5000	**29**	50	12.5000
10	87.5000	75	**30**	62.5000	12.5000
11	75	62.5000	**31**	50	62.5000
12	87.5000	62.5000	**32**	37.5000	50
13	37.5000	25	**33**	50	87.5000
14	25	12.5000	**34**	37.5000	87.5000
15	37.5000	12.5000	**35**	12.5000	62.5000
16	25	37.5000	**36**	12.5000	50
17	12.5000	37.5000	**37**	100	12.5000
18	12.5000	25	**38**	87.5000	0
19	75	87.5000	**39**	100	37.5000
20	62.5000	87.5000	**40**	62.5000	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข 1 (ต่อ) พิกัด x-y ของแต่ละเอลิเมนต์ที่แต่ละจุด(node) เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Node Coordinate					
Node	**X**	**Y**	**Node**	**X**	**Y**
41	100	62.5000	**61**	25	75
42	100	87.5000	**62**	25	50
43	87.5000	87.5000	**63**	100	25
44	62.5000	62.5000	**64**	75	0
45	37.5000	0	**65**	100	75
46	37.5000	37.5000	**66**	75	75
47	12.5000	12.5000	**67**	25	25
48	12.5000	0	**68**	25	0
49	0	12.5000	**69**	0	25
50	0	37.5000	**70**	75	100
51	87.5000	100	**71**	25	100
52	62.5000	100	**72**	0	75
53	0	62.5000	**73**	100	50
54	37.5000	100	**74**	50	50
55	12.5000	100	**75**	50	0
56	0	87.5000	**76**	50	100
57	75	50	**77**	0	50
58	50	25	**78**	100	0
59	75	25	**79**	100	100
60	50	75	**80**	0	0
			81	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-2 ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ที่แต่ละจุด node เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per node	
Node	**Temperature C**
1	36.6245
2	34.0963
3	32.0024
4	47.3293
5	64.1635
6	51.9718
7	27.6193
8	28.0737
9	26.4766
10	27.657
11	32.0651
12	28.4004
13	46.4493
14	45.8847
15	37.7957
16	63.3718
17	79.2041
18	73.7666
19	28.1456
20	30.3343
21	34.2996
22	47.3319
23	70.959
24	77.2457
25	28.6467
26	28.3748
27	37.5353
28	42.8641
29	33.1675

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-2 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ที่แต่ละจุด node เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per node	
Node	**Temperature C**
30	30.1684
31	43.1231
32	53.2713
33	33.514
34	38.7612
35	80.239
36	80.8965
37	25.1086
38	25.1047
39	25.2309
40	25.336
41	25.2328
42	25.1108
43	26.5052
44	36.7558
45	25.6815
46	51.4891
47	61.1127
48	21.7935
49	103.0061
50	98.7816
51	25.1075
52	25.3779
53	98.6501
54	26.8697
55	62.8007
56	96.4575
57	32.5624
58	39.1443

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-2 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ที่แต่ละจุด node เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per node	
Node	**Temperature C**
59	30.4479
60	39.5665
61	59.0176
62	65.4258
63	25.1779
64	25.202
65	25.1806
66	30.5418
67	57.3681
68	27.2621
69	97.3817
70	25.2012
71	20.5899
72	98.7673
73	25.2492
74	44.1985
75	25.5615
76	25.394
77	98.717
78	24.9623
79	24.9614
80	62.5355
81	107.2066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-3 ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per element	
Element	**Temperature C**
1	34.2411
2	54.4882
3	27.3899
4	29.3742
5	43.3766
6	72.1142
7	30.9265
8	65.1789
9	29.6747
10	39.008
11	32.4774
12	49.4554
13	39.8682
14	75.0997
15	25.5633
16	27.075
17	27.8594
18	27.4266
19	26.4244
20	35.4521
21	32.2149
22	46.9342
23	42.9303
24	79.2951
25	56.0441
26	86.294
27	38.0595
28	26.5861
29	29.7421

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-3 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per element	
Element	**Temperature C**
30	85.3783
31	37.6543
32	76.7391
33	33.7298
34	36.6217
35	32.1822
36	46.2892
37	56.8368
38	60.5204
39	26.4246
40	28.7137
41	26.5841
42	27.0794
43	30.088
44	31.0093
45	41.1298
46	49.9007
47	36.9808
48	64.8355
49	69.3339
50	83.4508
51	30.9957
52	27.8937
53	34.7335
54	61.1984
55	46.2936
56	82.324
57	27.4236
58	31.0705
59	30.2751
60	35.5741

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-3 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per element	
Element	**Temperature C**
61	41.5326
62	39.5443
63	31.5709
64	35.4693
65	29.6324
66	46.8643
67	44.8872
68	56.8896
69	40.1366
70	32.5564
71	48.3694
72	70.1619
73	67.8067
74	86.6175
75	25.0585
76	25.5877
77	25.5944
78	26.0094
79	26.285
80	28.814
81	26.2039
82	29.5633
83	27.022
84	26.3762
85	26.2713
86	29.8698
87	25.9828
88	25.5258
89	28.2347
90	34.0543
91	33.1209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-3 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per element	
Element	**Temperature C**
92	39.4965
93	28.1368
94	36.7025
95	30.2464
96	42.8192
97	46.1839
98	51.7688
99	31.6467
100	54.7885
101	48.4805
102	75.5514
103	64.0825
104	91.3848
105	57.4097
106	49.653
107	60.6896
108	91.7891
109	75.1755
110	92.7984
111	41.3591
112	33.8657
113	38.9964
114	28.3976
115	25.5247
116	26.1514
117	34.4716
118	26.9711
119	28.0953
120	92.5354
121	72.1674
122	91.5544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข-3 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

Temperature per element	
Element	**Temperature C**
123	48.3703
124	30.3416
125	31.5971
126	88.7279
127	51.4498
128	88.8216

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค-1 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

FEM_HEAT_TRANSFER_TIME		FEM_HEAT_TRANSFER		% ERROR
Element	Temperature C	Element	Temperature C	
1	34.2411	1	33.938	0.893099181
2	54.4882	2	54.4348	0.09809901
3	27.3899	3	27.1801	0.771888256
4	29.3742	4	29.1532	0.758064295
5	43.3766	5	42.4899	2.086848875
6	72.1142	6	71.8693	0.340757458
7	30.9265	7	30.6626	0.860657609
8	65.1789	8	65.4482	0.411470445
9	29.6747	9	29.4297	0.832492346
10	39.008	10	38.7168	0.752128275
11	32.4774	11	32.0604	1.300669985
12	49.4554	12	49.3042	0.306667586
13	39.8682	13	39.5493	0.806335384
14	75.0997	14	75.5788	0.633907921
15	25.5633	15	25.4348	0.50521333
16	27.075	16	26.8509	0.834608896
17	27.8594	17	27.5053	1.287388249
18	27.4266	18	27.1959	0.848289632
19	26.4244	19	26.2697	0.588891384
20	35.4521	20	35.2058	0.699600634
21	32.2149	21	31.0053	3.901268493
22	46.9342	22	46.5221	0.885815559
23	42.9303	23	35.2674	21.72799809
24	79.2951	24	76.2435	4.002439552
25	56.0441	25	55.8462	0.354366098
26	86.294	26	86.9643	0.770776054
27	38.0595	27	37.8162	0.643375061
28	26.5861	28	26.4253	0.608507756
29	29.7421	29	29.4225	1.086243521

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค-1 (ต่อ) การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

FEM_HEAT_TRANSFER_TIME		FEM_HEAT_TRANSFER		% ERROR
Element	Temperature C	Element	Temperature C	
30	85.3783	30	86.328	1.10010657
31	37.6543	31	37.4525	0.538815833
32	76.7391	32	79.15	3.045988629
33	33.7298	33	33.4605	0.804829575
34	36.6217	34	36.2563	1.007824847
35	32.1822	35	31.8888	0.920072251
36	46.2892	36	46.0895	0.433287408
37	56.8368	37	56.7683	0.120665935
38	60.5204	38	60.5702	0.082218649
39	26.4246	39	26.2396	0.705041235
40	28.7137	40	28.4709	0.852800579
41	26.5841	41	26.3875	0.745049739
42	27.0794	42	26.8787	0.746687898
43	30.088	43	29.8642	0.749392249
44	31.0093	44	30.7717	0.772138036
45	41.1298	45	40.4272	1.737938813
46	49.9007	46	49.1502	1.526952078
47	36.9808	47	37.3111	0.885259346
48	64.8355	48	64.3065	0.822622907
49	69.3339	49	69.389	0.079407399
50	83.4508	50	84.1307	0.808147323
51	30.9957	51	30.7509	0.796074261
52	27.8937	52	27.6353	0.935035987
53	34.7335	53	34.4489	0.826151198
54	61.1984	54	60.9719	0.371482601
55	46.2936	55	44.2345	4.654963886
56	82.324	56	83.4433	1.341389902
57	27.4236	57	27.1846	0.879174238
58	31.0705	58	30.8208	0.81016716

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค-1 (ต่อ) การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

FEM_HEAT_TRANSFER_TIME		FEM_HEAT_TRANSFER		% ERROR
Element	Temperature C	Element	Temperature C	
59	30.2751	59	30.0202	0.849094943
60	35.5741	60	35.307	0.756507208
61	41.5326	61	41.2632	0.652881987
62	39.5443	62	39.1886	0.907661922
63	31.5709	63	31.2363	1.07118961
64	35.4693	64	35.0311	1.250888496
65	29.6324	65	29.2723	1.230173235
66	46.8643	66	46.6699	0.416542568
67	44.8872	67	44.6817	0.459919833
68	56.8896	68	56.8475	0.074057786
69	40.1366	69	39.8061	0.830274757
70	32.5564	70	31.9273	1.970414034
71	48.3694	71	48.1663	0.42166411
72	70.1619	72	70.4391	0.393531434
73	67.8067	73	68.0434	0.347866215
74	86.6175	74	87.4765	0.981978017
75	25.0585	75	24.9992	0.237207591
76	25.5877	76	25.4376	0.59007139
77	25.5944	77	25.4442	0.590311348
78	26.0094	78	25.8053	0.790922795
79	26.285	79	26.05	0.902111324
80	28.814	80	28.576	0.832866741
81	26.2039	81	25.9211	1.091003082
82	29.5633	82	29.2626	1.027591533
83	27.022	83	26.691	1.240118392
84	26.3762	84	26.1394	0.905912148
85	26.2713	85	26.0609	0.807339731
86	29.8698	86	29.6322	0.801830441
87	25.9828	87	25.8216	0.624283546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค-1 (ต่อ) การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

FEM_HEAT_TRANSFER_TIME		FEM_HEAT_TRANSFER		% ERROR
Element	Temperature C	Element	Temperature C	
88	25.5258	88	25.4486	0.30335657
89	28.2347	89	28.0377	0.702625394
90	34.0543	90	33.8067	0.732399199
91	33.1209	91	32.8818	0.727149974
92	39.4965	92	39.2524	0.621872803
93	28.1368	93	27.2168	3.38026513
94	36.7025	94	36.0316	1.861976709
95	30.2464	95	30.2221	0.080404737
96	42.8192	96	42.3591	1.086189272
97	46.1839	97	45.898	0.622902959
98	51.7688	98	51.2504	1.0115043
99	31.6467	99	26.783	18.15965351
100	54.7885	100	52.4557	4.447181145
101	48.4805	101	53.6396	9.618080672
102	75.5514	102	85.2518	11.37852808
103	64.0825	103	61.8196	3.660489553
104	91.3848	104	90.9917	0.432017426
105	57.4097	105	57.0428	0.643201245
106	49.653	106	49.4298	0.45154947
107	60.6896	107	60.6297	0.098796464
108	91.7891	108	93.1389	1.449233349
109	75.1755	109	75.4758	0.397875875
110	92.7984	110	93.8254	1.094586327
111	41.3591	111	41.1274	0.563371378
112	33.8657	112	33.6172	0.739204931
113	38.9964	113	38.7363	0.671463201
114	28.3976	114	28.1891	0.739647594
115	25.5247	115	25.4529	0.282089664
116	26.1514	116	25.9599	0.737676185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค-1 (ต่อ) การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ เมื่อแบ่งเป็น 128 เอลิเมนต์

FEM_HEAT_TRANSFER_TIME		FEM_HEAT_TRANSFER		% ERROR
Element	Temperature C	Element	Temperature C	
117	34.4716	117	34.111	1.057136994
118	26.9711	118	26.7332	0.889904688
119	28.0953	119	27.4956	2.181076245
120	92.5354	120	93.6511	1.191336781
121	72.1674	121	72.618	0.620507312
122	91.5544	122	92.6769	1.211197181
123	48.3703	123	47.7953	1.203047162
124	30.3416	124	30.2015	0.463884244
125	31.5971	125	29.4154	7.416863276
126	88.7279	126	90.7664	2.245875126
127	51.4498	127	50.6132	1.652928485
128	88.8216	128	88.3836	0.495567051
				%error = 1.4771749

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

FEM HEAT TRANSFER TIME

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของโปรแกรม FEM HEAT TRANSFER TIME

1. รายละเอียดของโปรแกรม FEM_HEAT_TRANSFER_TIME

```
function varargout = FEM_HEAT_TRANSFER_TIME(varargin)
% FEM_HEAT_TRANSFER_TIME M-file for FEM_HEAT_TRANSFER_TIME.fig
%      FEM_HEAT_TRANSFER_TIME, by itself, creates a new
FEM_HEAT_TRANSFER_TIME or raises the existing
%      singleton*.
%
%      H = FEM_HEAT_TRANSFER_TIME returns the handle to a new
FEM_HEAT_TRANSFER_TIME or the handle to
%      the existing singleton*.
%
%      FEM_HEAT_TRANSFER_TIME('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...)
calls the local
%      function named CALLBACK in FEM_HEAT_TRANSFER_TIME.M with the
given input arguments.
%
%      FEM_HEAT_TRANSFER_TIME('Property','Value',...) creates a new
FEM_HEAT_TRANSFER_TIME or raises the
%      existing singleton*.  Starting from the left, property value
pairs are
%      applied to the GUI before FEM_HEAT_TRANSFER_TIME_OpeningFcn gets
called.  An
%      unrecognized property name or invalid value makes property
application
%      stop.  All inputs are passed to FEM_HEAT_TRANSFER_TIME_OpeningFcn
via varargin.
%
%      *See GUI Options on GUIDE's Tools menu.  Choose "GUI allows only
one
%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help
FEM_HEAT_TRANSFER_TIME

% Last Modified by GUIDE v2.5 16-Jan-2011 22:46:22

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                   'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                   'gui_OpeningFcn', @FEM_HEAT_TRANSFER_TIME_OpeningFcn,
...
                   'gui_OutputFcn',  @FEM_HEAT_TRANSFER_TIME_OutputFcn,
...
                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                   'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT


% --- Executes just before FEM_HEAT_TRANSFER_TIME is made visible.
function FEM_HEAT_TRANSFER_TIME_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to FEM_HEAT_TRANSFER_TIME (see
VARARGIN)

% Choose default command line output for FEM_HEAT_TRANSFER_TIME
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes FEM_HEAT_TRANSFER_TIME wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);


% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = FEM_HEAT_TRANSFER_TIME_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;



function filen_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to filen (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
filen=get(hObject,'string');
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of filen as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of filen as
a double
handles.filen=filen;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function filen_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to filen (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in ok.
function ok_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ok (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
ans=questdlg('Would you like to show mesh plot and position
?','status','yes','no','no');
if strcmp(ans,'no')
    clc,clear(handle.filen)
else
filen = handles.filen;
filename=filen;
data = xlsread(filename);
s=size(data);
s=(s(1,1)-7)/28;
nel=s;
nnel=3;
%------------------------โหลดข้อมูลจาก Excel ทั้งหมด 768 elements-----------------
ii=0;                   %ii คือแถวของexcel
for i=1:nel             %nel = 768 elements
    ii=ii+10;
    for j=1:nnel
        ii=ii;
        coor(i,j,1)=data(ii,1);
        ii=ii+2;                    % บวกเพิ่มอีก 2 แถว
        coor(i,j,2)=data(ii,1);
        ii=ii+2;
        coor(i,j,3)=data(ii,1);
        ii=ii+2;
    end
end
%-----------------------------หาค่าสูงสุดของ x,y,z ----------------------------
----
maxx=0;
maxy=0;
maxz=0;
for i=1:nel
    for j=1:nnel
        if maxx<coor(i,j,1)
            maxx=coor(i,j,1);
        else
            maxx=maxx;
        end
        if maxy<coor(i,j,2)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            maxy=coor(i,j,2);
        else
            maxy=maxy;
        end
        if maxz<coor(i,j,3)
            maxz=coor(i,j,3);
        else
            maxz=maxz;
        end
    end
end
%--------------หาค่าต่ำสุดของ x,y,z-----------------------------------
minx=0;
miny=0;
minz=0;
for i=1:nel
    for j=1:nnel
        if minx>coor(i,j,1)
            minx=coor(i,j,1);
        else
            minx=minx;
        end
        if miny>coor(i,j,2)
            miny=coor(i,j,2);
        else
            miny=miny;
        end
        if minz>coor(i,j,3)
            minz=coor(i,j,3);
        else
            minz=minz;
        end
    end
end
%----------------------------mplane-----------------------------
iel=1;
for i=1:nel
    if coor(i,1,3)==maxz && coor(i,2,3)==maxz && coor(i,3,3)==maxz
        for j=1:3
            coorkc(iel,j,1)=coor(i,j,1);
            coorkc(iel,j,2)=coor(i,j,2);
            coorkc(iel,j,3)=coor(i,j,3);
        end
        iel=iel+1;
    else
        for k=1:3
            coor(i,k,1)=0;
            coor(i,k,2)=0;
            coor(i,k,3)=0;
        end
    end
end
%-------------------Element to node-------------------------
nel=nel/6;
node(1,1)=coorkc(1,1,1);
node(1,2)=coorkc(1,1,2);
n=1;
for i=1:nel
    for j=1:3
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        a=0;
        for k=1:n
            if coorkc(i,j,1)~= node(k,1) || coorkc(i,j,2)~= node(k,2)
                a=a+0;
            else
                a=a+1;
                element(i,j)=k;
            end
        end
        if a == 0
            n=n+1;
            element(i,j)=n;
            node(n,1)=coorkc(i,j,1);
            node(n,2)=coorkc(i,j,2);
        end
    end
end
s=size(node);
nels=s(1,1);
%----------------find boundary x-------------------------
boun=zeros(nel,1);
for i=1:nel
    if (coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,2,2)==maxy)||(coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,3,2)==maxy)||(coorkc(i,2,2)==maxy &&
coorkc(i,3,2)==maxy)||(coorkc(i,1,2)==miny &&
coorkc(i,2,2)==miny)||(coorkc(i,1,2)==miny &&
coorkc(i,3,2)==miny)||(coorkc(i,2,2)==miny && coorkc(i,3,2)==miny)
        for j=1:3
            coorkcvx(i,j,1)=coorkc(i,j,1);
            coorkcvx(i,j,2)=coorkc(i,j,2);
            coorkcvx(i,j,3)=coorkc(i,j,3);
        end
        if (coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,2,2)==maxy)||(coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,3,2)==maxy)||(coorkc(i,2,2)==maxy && coorkc(i,3,2)==maxy)
            boun(i,1)=2;
        else
            boun(i,1)=4;
        end
    else
        for k=1:3
            coorkcvx(i,k,1)=0;
            coorkcvx(i,k,2)=0;
            coorkcvx(i,k,3)=0;
        end
    end
end
%----------------------Cal length (x) -------------------------------
lengthx=0;
for i=1:nel
    if coorkcvx(i,1,2)==coorkcvx(i,2,2)
        lengthx(i)=abs(coorkcvx(i,1,1)-coorkcvx(i,2,1));
        scvx(i)=3;
    elseif coorkcvx(i,1,2)==coorkcvx(i,3,2)
            lengthx(i)=abs(coorkcvx(i,1,1)-coorkcvx(i,3,1));
            scvx(i)=2;
    else
        lengthx(i)=abs(coorkcvx(i,2,1)-coorkcvx(i,3,1));
        scvx(i)=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    end
end
%------------------------find boundary (y)-----------------------------
for i=1:nel
    if (coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,2,1)==maxx)||(coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,3,1)==maxx)||(coorkc(i,2,1)==maxx &&
coorkc(i,3,1)==maxx)||(coorkc(i,1,1)==minx &&
coorkc(i,2,1)==minx)||(coorkc(i,1,1)==minx &&
coorkc(i,3,1)==minx)||(coorkc(i,2,1)==minx && coorkc(i,3,1)==minx)
        for j=1:3
            coorkcvy(i,j,1)=coorkc(i,j,1);
            coorkcvy(i,j,2)=coorkc(i,j,2);
            coorkcvy(i,j,3)=coorkc(i,j,3);
        end
        if (coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,2,1)==maxx)||(coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,3,1)==maxx)||(coorkc(i,2,1)==maxx && coorkc(i,3,1)==maxx)
            boun(i,1)=3;
        else
            boun(i,1)=1;
        end
    else
        for k=1:3
            coorkcvy(i,k,1)=0;
            coorkcvy(i,k,2)=0;
            coorkcvy(i,k,3)=0;
        end
    end
end
%--------------------Cal length y-----------------------------------------
lengthy=0;
for i=1:nel
    if coorkcvy(i,1,1)==coorkcvy(i,2,1)
        lengthy(i)=abs(coorkcvy(i,1,2)-coorkcvy(i,2,2));
        scvy(i)=3;
    elseif coorkcvy(i,1,1)==coorkcvy(i,3,1)
        lengthy(i)=abs(coorkcvy(i,1,2)-coorkcvy(i,3,2));
        scvy(i)=2;
    else
       lengthy(i)=abs(coorkcvy(i,2,2)-coorkcvy(i,3,2));
       scvy(i)=1;
    end
end

%----------------------Show Mesh Plot---------------------------------
f = figure('Name','Mesh Plot');
% axes(handles.axes1)
for i=1:nel
    x(1,1)=node(element(i,1),1);
    y(1,1)=node(element(i,1),2);
    x(2,1)=node(element(i,2),1);
    y(2,1)=node(element(i,2),2);
    x(3,1)=node(element(i,3),1);
    y(3,1)=node(element(i,3),2);
    TRI = delaunay(x,y);
    triplot(TRI,x,y,'black')
    hold on;
end
%-----------------------Show Status-------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
title('Mesh Plot');
xlabel('X-axis');
ylabel('Y-axis');
set(handles.uitable1,'data',node);
%msgbox{'COMPLETED DOWNLOAD, NEXT PLEASE INPUT DATA FOR CALCULATE
WARNING! PLEASE ENTER ALL DATA BEFORE CALCULATE','STATUS');
end


% --- Executes on selection change in selector.
function selector_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to selector (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns selector contents as
cell array
%        contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
selector
v=get(handles.selector,'Value');
switch v
    case 1
        set(handles.H,'string','0');
        set(handles.K,'string','0');
        set(handles.C,'string','0');
        set(handles.P,'string','0');
    case 2
        set(handles.K,'string','0.18');
        set(handles.C,'string','2400');
        set(handles.P,'string','0.97453');
    case 3
        set(handles.K,'string','0.321');
        set(handles.C,'string','2236.6');
        set(handles.P,'string','1.2829');
    case 4
        set(handles.K,'string','0.24');
        set(handles.C,'string','1900');
        set(handles.P,'string','1.10155');
    case 5
        set(handles.K,'string','0.17');
        set(handles.C,'string','9662.2');
        set(handles.P,'string','0.71245');
    case 6
        set(handles.K,'string','0.21');
        set(handles.C,'string','2323.8');
        set(handles.P,'string','0.77455');
    case 7
        set(handles.K,'string','0.158');
        set(handles.C,'string','9662.2');
        set(handles.P,'string','0.95417');
    case 8
        set(handles.K,'string','0.18');
        set(handles.C,'string','1800');
        set(handles.P,'string','1.2721');
    case 9
        set(handles.K,'string','4');
        set(handles.C,'string','4');
        set(handles.P,'string','4');
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    otherwise
        set(handles.K,'string','0.158');
        set(handles.C,'string','2323.6');
        set(handles.P,'string','0.95417');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function selector_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to selector (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function K_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to K (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
K=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of K as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of K as a
double
handles.K = K;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function K_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to K (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function C_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to C (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
C=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of C as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of C as a
double
handles.C = C;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function C_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to C (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function P_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to P (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
P=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of P as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of P as a
double
handles.P = P;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function P_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to P (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function H_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to H (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
H=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of H as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of H as a
double
handles.H = H;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function H_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% hObject    handle to H (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function t_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to t (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
t=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of t as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of t as a
double
handles.t = t;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function t_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to t (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function TS1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
TS1=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TS1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TS1 as a
double
handles.TS1 = TS1;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TS1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function TS2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
TS2=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TS2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TS2 as a
double
handles.TS2 = TS2;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TS2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function TS3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
TS3=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TS3 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TS3 as a
double
handles.TS3 = TS3;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TS3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function TS4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
TS4=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TS4 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TS4 as a
double
handles.TS4 = TS4;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TS4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TS4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



% --- Executes on selection change in selectorside.
function selectorside_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to selectorside (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns selectorside contents
as cell array
%        contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
selectorside
pop=get(handles.selectorside,'Value');
if pop == 2
tempside=1;
handles.tempside = tempside;
guidata(hObject, handles);
elseif pop == 3
    tempside=2;
handles.tempside = tempside;
guidata(hObject, handles);
elseif pop == 4
    tempside=3;
handles.tempside = tempside;
guidata(hObject, handles);
elseif pop==5
    tempside=4;
```

เอกสารนี้จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
handles.tempside = tempside;
guidata(hObject, handles);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function selectorside_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to selectorside (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end



function TK_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TK (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
TK=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TK as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TK as a
double
handles.TK = TK;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TK_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TK (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)



function Time_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Time (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
Time=str2double(get(hObject,'String'));
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Time as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Time as a
double
handles.Time = Time;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Time_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Time (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in Calculate.
function Calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Calculate (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
stop_webcam = 0;
assignin('base','stop_webcam',stop_webcam);
clc
text=('PROGRAM  IS  CALCULATING');
set(handles.status,'string',text);
H     =     handles.H;
K     =     handles.K;
C     =     handles.C;
P     =     handles.P;
t     =     handles.t;
TS1   =     handles.TS1;
TS2   =     handles.TS2;
TS3   =     handles.TS3;
TS4   =     handles.TS4;
TK    =     handles.TK;
Time  =     handles.Time;
filen =     handles.filen;
tempside=handles.tempside;
%Call M.File to Calculate!
filen = handles.filen;
filename=filen;
data = xlsread(filename);
s=size(data);
s=(s(1,1)-7)/28;
nel=s;
nnel=3;
%--------load data ---------------------------------
ii=0;
for i=1:nel
    ii=ii+10;
    for j=1:nnel
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ii=ii;
            coor(i,j,1)=data(ii,1);
            ii=ii+2;
            coor(i,j,2)=data(ii,1);
            ii=ii+2;
            coor(i,j,3)=data(ii,1);
            ii=ii+2;
    end
end
%---find max (x,y,z) for plane ------------------------------------
maxx=0; maxy=0;  maxz=0;
for i=1:nel
    for j=1:nnel
        if maxx<coor(i,j,1)
            maxx=coor(i,j,1);
        else
            maxx=maxx;
        end
        if maxy<coor(i,j,2)
           maxy=coor(i,j,2);
        else
           maxy=maxy;
        end
        if maxz<coor(i,j,3)
           maxz=coor(i,j,3);
        else
           maxz=maxz;
        end
    end
end
%------- find min (x,y,z) ------------------------------
minx=0;
miny=0;
minz=0;
for i=1:nel
    for j=1:nnel
        if minx>coor(i,j,1)
            minx=coor(i,j,1);
        else
            minx=minx;
        end
        if miny>coor(i,j,2)
           miny=coor(i,j,2);
        else
           miny=miny;
        end
        if minz>coor(i,j,3)
           minz=coor(i,j,3);
        else
           minz=minz;
        end
    end
end
%-------find plne --------------------------------
iel=1;
for i=1:nel
        if coor(i,1,3)==maxz && coor(i,2,3)==maxz && coor(i,3,3)==maxz
            for j=1:3
            coorkc(iel,j,1)=coor(i,j,1);
            coorkc(iel,j,2)=coor(i,j,2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            coorkc(iel,j,3)=coor(i,j,3);
            end
            iel=iel+1;
        else
            for k=1:3
            coor(i,k,1)=0;
            coor(i,k,2)=0;
            coor(i,k,3)=0;
            end
        end
end
%--- Element to node ---------------------------------------------------
------
nel=nel/6;
node(1,1)=coorkc(1,1,1);
node(1,2)=coorkc(1,1,2);
n=1;
for i=1:nel
for j=1:3
    a=0;
    for k=1:n
    if coorkc(i,j,1)~= node(k,1) || coorkc(i,j,2)~= node(k,2)
       a=a+0;
    else
        a=a+1;
        element(i,j)=k;
    end
    end
    if  a == 0
        n=n+1;
        element(i,j)=n;
        node(n,1)=coorkc(i,j,1);
        node(n,2)=coorkc(i,j,2);
      end
end
end
s=size(node);
nels=s(1,1);
%--------find boundary x-----------------------------
boun=zeros(nel,1);
for i=1:nel
       if (coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,2,2)==maxy)||(coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,3,2)==maxy)||(coorkc(i,2,2)==maxy &&
coorkc(i,3,2)==maxy)||(coorkc(i,1,2)==miny &&
coorkc(i,2,2)==miny)||(coorkc(i,1,2)==miny &&
coorkc(i,3,2)==miny)||(coorkc(i,2,2)==miny && coorkc(i,3,2)==miny)
            for j=1:3
            coorkcvx(i,j,1)=coorkc(i,j,1);
            coorkcvx(i,j,2)=coorkc(i,j,2);
            coorkcvx(i,j,3)=coorkc(i,j,3);
            end
            if (coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,2,2)==maxy)||(coorkc(i,1,2)==maxy &&
coorkc(i,3,2)==maxy)||(coorkc(i,2,2)==maxy && coorkc(i,3,2)==maxy)
                boun(i,1)=2;
            else
                boun(i,1)=4;
            end
       else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            for k=1:3
            coorkcvx(i,k,1)=0;
            coorkcvx(i,k,2)=0;
            coorkcvx(i,k,3)=0;
            end
        end
end
%-----Cal lengh (x) --------------------------------
lengthx=0;
for i=1:nel
         if coorkcvx(i,1,2)==coorkcvx(i,2,2);
         lengthx(i)=abs(coorkcvx(i,1,1)-coorkcvx(i,2,1));
         scvx(i)=3;
        elseif coorkcvx(i,1,2)==coorkcvx(i,3,2);
         lengthx(i)=abs(coorkcvx(i,1,1)-coorkcvx(i,3,1));
         scvx(i)=2;
         else
        lengthx(i)=abs(coorkcvx(i,2,1)-coorkcvx(i,3,1));
         scvx(i)=1;
         end
end
%----------find boundary (y)-----------------------------
for i=1:nel
        if (coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,2,1)==maxx)||(coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,3,1)==maxx)||(coorkc(i,2,1)==maxx &&
coorkc(i,3,1)==minx)||(coorkc(i,1,1)==minx &&
coorkc(i,2,1)==minx)||(coorkc(i,1,1)==minx &&
coorkc(i,3,1)==minx)||(coorkc(i,2,1)==minx && coorkc(i,3,1)==minx)
            for j=1:3
            coorkcvy(i,j,1)=coorkc(i,j,1);
            coorkcvy(i,j,2)=coorkc(i,j,2);
            coorkcvy(i,j,3)=coorkc(i,j,3);
            end
            if (coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,2,1)==maxx)||(coorkc(i,1,1)==maxx &&
coorkc(i,3,1)==maxx)||(coorkc(i,2,1)==maxx && coorkc(i,3,1)==maxx)
                boun(i,1)=3;
            else
                boun(i,1)=1;
            end
        else
            for k=1:3
            coorkcvy(i,k,1)=0;
            coorkcvy(i,k,2)=0;
            coorkcvy(i,k,3)=0;
            end
        end
end
%-----------cal lengh y ----------------------------
lengthy=0;
for i=1:nel
         if coorkcvy(i,1,1)==coorkcvy(i,2,1);
         lengthy(i)=abs(coorkcvy(i,1,2)-coorkcvy(i,2,2));
         scvy(i)=3;
        elseif coorkcvy(i,1,1)==coorkcvy(i,3,1);
         lengthy(i)=abs(coorkcvy(i,1,2)-coorkcvy(i,3,2));
         scvy(i)=2;
         else
        lengthy(i)=abs(coorkcvy(i,2,2)-coorkcvy(i,3,2));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        scvy(i)=1;
        end
end
%-----------cal Area ----------------------------
for ii=1:nel
        x1=coorkc(ii,1,1);
        y1=coorkc(ii,1,2);
        x2=coorkc(ii,2,1);
        y2=coorkc(ii,2,2);
        x3=coorkc(ii,3,1);
        y3=coorkc(ii,3,2);
        a1=(x2*y3)-(x3*y2);
        b1=y2-y3;
        c1=x3-x2;
        a2=(x3*y1)-(x1*y3);
    b2=y3-y1;
    c2=x1-x3;
    a3=(x1*y2)-(x2*y1);
    b3=y1-y2;
    c3=x2-x1;
    d=(b1*b1)+(c1*c1);
    e=(b1*b2)+(c1*c2);
    f=(b1*b3)+(c1*c3);
    g=(b2*b1)+(c2*c1);
    h=(b2*b2)+(c2*c2);
    i=(b2*b3)+(c2*c3);
    j=(b3*b1)+(c3*c1);
    k=(b3*b2)+(c3*c2);
    l=(b3*b3)+(c3*c3);
    m(:,:,ii)=[d e f;g h i;j k l];
   A=abs(0.5*(x2*(y3-y1)+x1*(y2-y3)+x3*(y1-y2)));
end
%---------------cal [C] -----------------------------
C_h=(P*C*A*t)/12.*[2 1 1;1 2 1;1 1 2];
% ------------------Cal[Kc]----------------------
Kc=(K*t)/(4*A).*m;
%------Cal QCV & Kcv ---------------------------------
for iel=1:nel
    if boun(iel,1)==1
        T=TS1;
    elseif boun(iel,1)==2
        T=TS2;
    elseif boun(iel,1)==3
        T=TS3;
    elseif boun(iel,1)==4
        T=TS4;
    else
        T=0;
    end
%-------------------------------------------------
    bfqcv=ones(3,1);
    side=scvx(iel);
    bfqcv(side)=0;
    length=lengthx(iel);
    Qcvx(:,:,iel)=(H*T*t*length*0.5).*bfqcv;
%------------Kcvx-------------------------
    bfkcv=[2 1 1; 1 2 1; 1 1 2];
    bfkcv(side,:)=0;
    bfkcv(:,side)=0;
    Kcvx(:,:,iel)=((H*t*length)/6).*bfkcv;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%----------Qcvy ---------------------------------
    bfqcv=ones(3,1);
    side=scvy(iel);
    bfqcv(side)=0;
    length=lengthy(iel);
    Qcvy(:,:,iel)=(H*T*t*length*0.5).*bfqcv;
%------------Kcvy-----------------------------
    bfkcv=[2 1 1; 1 2 1; 1 1 2];
    bfkcv(side,:)=0;
    bfkcv(:,side)=0;
    Kcvy(:,:,iel)=((H*t*length)/6).*bfkcv;
end
    Qcv=Qcvx+ Qcvy;
    Kcv=Kcvx+ Kcvy;
      kk1= 2/3*(Kc+Kcv);
       kk2=-1/3*(Kc+Kcv);

    for ii=1:nel

    Kt1(:,:,ii)=kk1(:,:,ii)+(C_h/Time);
    Kt2(:,:,ii)=kk2(:,:,ii)+(C_h/Time);

    end
%     Kt1
%     pause
%     81 x 81

system1=zeros(nels,nels);
for i=1:nel
    for j=1:3
        for k=1:3
system1(element(i,j),element(i,k),i)=Kt1(j,k,i);
        end
    end
end

systemkt1=zeros(nels,nels);
for i=1:nel
systemkt1=systemkt1+system1(:,:,i);
end
%=====================================
system2=zeros(nels,nels);
for i=1:nel
    for j=1:3
        for k=1:3
system2(element(i,j),element(i,k),i)=Kt2(j,k,i);
        end
    end
end

systemkt2=zeros(nels,nels);
for i=1:nel
systemkt2=systemkt2+system2(:,:,i);
end

%------------Assembly Matrix---------------------------------- /////
% system=zeros(nels,nels);
% for i=1:nel
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%      for j=1:3
%          for k=1:3
% system(element(i,j),element(i,k),i)=Kt(j,k,i);
% system(element(i,j),element(i,k),i)=Kt(j,k,i);
% system(element(i,j),element(i,k),i)=Kt(j,k,i);
%
% % system(element(i,j),element(i,k),i)=Kt(j,k,i);
%          end
%      end
% end
%
% systemkt=zeros(nels,nels);
% for i=1:nel
% systemkt=systemkt+system(:,:,i);
% end

% Tn=100*ones(81,1);

%------------identify temp node ------------------------------------
alnotem=0;
tempnode=zeros(nels,1);

if tempside==1

    for i=1:nels

        if node(i,1)==0
        tempnode(i,1)=TK;
        alnotem=alnotem+1;
        elseif node(i,1)==maxx
          tempnode(i,1)=TS3;
        alnotem=alnotem+1;
        elseif node(i,2)==maxy
          tempnode(i,1)=TS2;
        alnotem=alnotem+1;
        elseif node(i,2)==miny
          tempnode(i,1)=TS4;
        alnotem=alnotem+1;
        else
        tempnode(i,1)=TS2;
        alnotem=alnotem+1;
        end

    end

 elseif tempside==2
    for i=1:nels
    if node(i,2)==maxy
        tempnode(i,1)=TK;
        alnotem=alnotem+1;
        else
        tempnode(i,1)=0;
    end
    end
elseif tempside==3
    for i=1:nels
    if node(i,1)==maxx
        tempnode(i,1)=TK;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        alnotem=alnotem+1;
        else
        tempnode(i,1)=0;
    end
    end
else
    for i=1:nels
    if node(i,2)==0
        tempnode(i,1)=TK;
        alnotem=alnotem+1;
        else
        tempnode(i,1)=0;
    end
    end

end

Tn=tempnode;
% Tn=tempnode;
%==================================
%============Loop==================
%==================================
while stop_webcam==0


system=zeros(nels,1);
for i=1:nel
    for j=1:3
        system(element(i,j),1,i)=Qcv(j,1,i);
    end
end
systemqc=zeros(nels,1);
for i=1:nel
systemqc=systemqc+system(:,:,i);   %Qcv grobal
end

% answer=inv(systemkt)*(systemqc);  %==========

% ========create grobal Qcv=====================
 grobalQcv=zeros(nels,1);
 for ii=1:nel
     dq=Qcv(:,:,ii);
     ele=element(ii,:);
    for jj=1:3
        grobalQcv(ele(jj))=grobalQcv(ele(jj))+dq(jj);
    end
 end
% [ grobalQcv,systemqc]

 %========end create grobal Qcv====================

answer=inv(systemkt1)*(systemkt2*Tn+grobalQcv);
% answer=inv(systemkt1)*(systemkt2*Tn+systemqc)

Tn=answer;

%-------------------------------------------------
temp_ele=zeros(nel,1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for i=1:nel
temp_ele(i,1)=(answer(element(i,1),1)+answer(element(i,2),1)+answer(elem
ent(i,3),1))/3;
end

nelss=nels^0.5;
addy=zeros(nelss,nelss);
length=maxy/(nelss-1);
for i=1:nelss
addy(i,:)=maxy-(i-1)*length;
end

nelss=nels^0.5;
length=maxx/(nelss-1);
addx=zeros(nelss,nelss);
for i=1:nelss
addx(:,i)=minx+(i-1)*length;
end

nelss=nels^0.5;
addz=zeros(nelss,nelss);
for i=1:nelss
    for j=1:nelss
    for ii=1:nels
    if addx(i,j)==node(ii,1)&& addy(i,j)==node(ii,2)
        addz(i,j)=answer(ii,1);
    end
    end
    end
end


%-----------Show Simulation Plot ---------------------------
% f = figure('Name','Simulation Plot');
figure(1)
% axes(handles.axes1)
% pcolor(addx,addy,addz)
contourf(addx,addy,addz,20)
% contour(addx,addy,addz,20)
colorbar('location','eastoutside')
title('Simulation Plot');
xlabel('X-axis');
ylabel('Y-axis');
%-----------Show Status ---------------------------

set(handles.uitable2,'data',Tn);
set(handles.uitable3,'data',temp_ele);
stop_webcam = evalin('base', 'stop_webcam');
% pause
end
text=('COMPLETED  CALCULATE');
set(handles.status,'string',text);

% size(answer(:,1))
% set(handles.tablenode,'data',answer(:,1));

% --- Executes on button press in stop.
function stop_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% hObject    handle to stop (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
stop_webcam = 1;
assignin('base','stop_webcam',stop_webcam);
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรมการดำเนินงาน	มิ.ย.				ก.ค.				ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.				ม.ค.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ศึกษา และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→																				
2. สร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์			→	→	→	→	→	→																								
3. ทดสอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนพร้อมกับแก้สมการหาคำตอบ							→	→	→	→	→	→																				
4. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB									→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→												
5. วางโครงสร้าง พร้อมออกแบบขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม									→	→	→	→																				
6. ดำเนินการสร้างโปรแกรม											→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→				
7. วิเคราะห์ ประเมินผล และแก้ไขปรับปรุง																									→	→	→	→				
8. จัดทำรูปเล่มรายงาน และงานนำเสนอ																									→	→	→	→	→	→	→	→

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผจ 2