

การวิเคราะห์ความเค้นในผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านความร้อน



นาย วิโรจน์ แซ่ลิ่ม

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พศ. 2538

ISBN 974-632-608-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I1684 35 38

Thermal Stress Analysis of Heated Products



Mr. Wiroj Sae-Lim

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduated School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-608-2



หัวข้อวิทยานิพนธ์      การวิเคราะห์ความเค้นในผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านความร้อน  
โดย                              นาย วิโรจน์ แซ่ลิ่ม  
ภาควิชา                         วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา            รองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ฤงสุวรรณ )

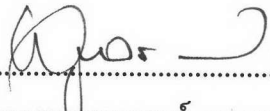
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ )



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ )



..... กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ พูลพร แสงบางปลา )

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

วีโรจน์ แซ่ลิม : การวิเคราะห์ความเค้นในผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านความร้อน (Thermal Stress Analysis of Heated Products) (อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ปราโมทย์ เคะชะอำไพ,  
101 หน้า. ISBN 974-632-608-2

ผลงานในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบไปด้วยการศึกษาโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เริ่มนำเข้ามาจำหน่ายและเริ่มใช้กันในมหาวิทยาลัย อังครที่ทำงานทางด้านการวิจัย รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมที่พยายามออกแบบชิ้นงานด้วยตนเอง โปรแกรมคอมพิวเตอร์เหล่านี้มีราคาสูงมากและเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ไม่สามารถดัดแปลงแก้ไขเพื่อนำมาใช้ในงานที่จำเพาะหรือเพื่อนำมาทำการศึกษาถึงเนื้อหาภายในได้อย่างแท้จริง

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผลงานหลักในวิทยานิพนธ์นี้จึงประกอบด้วย การประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์รวมทั้งสิ้น 2 โปรแกรม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและปัญหาการยึดหรือหดตัว รวมทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โปรแกรมทั้งสองนี้สามารถวิเคราะห์ปัญหาใน 3 มิติ ของผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อน การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมได้กระทำเป็นขั้นตอนโดยเริ่มจากการใช้โปรแกรมในการแก้ปัญหาที่ง่ายซึ่งรู้ผลเฉลยแน่นอนตรง ไปจนถึงปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ต่างๆซึ่งจะถูกจำลองลักษณะเงื่อนไขต่างๆของปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย

ลำดับขั้นตอนของทฤษฎี ขั้นตอนในการประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมทั้งการนำโปรแกรมไปใช้ในการวิเคราะห์ จะเป็นแนวทางเริ่มต้นนำไปสู่การออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งจะช่วยในการส่งเสริมพัฒนา การศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับนิสิตรุ่นใหม่ต่อไป



ศูนย์วิศวกรรมทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา ..... 2538

ลายมือชื่อนิสิต ..... วีโรจน์ แซ่ลิม  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ปราโมทย์ เคะชะอำไพ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....



## C516159 : MAJOR MECHANICAL ENGINEER

KEY WORD: FINITE ELEMENT / HEAT TRANSFER / THERMO ELASTIC

WIROJ SAE LIM : THERMAL STRESS ANALYSIS OF HEATED PRODUCTS. THESIS

ADVISOR ; ASSO. PROF. PRAMOTE DECHAUMPAI, Ph.D. 101 pp.

ISBN 974-632-608-2

The result of this thesis consists of the study production-type finite element softwares that have currently been used in universities, research organizations and industries. These computer softwares are normally at very high cost and could not be modified for some specific works or some special studies.

From these reasons, the main work of this thesis is to develop two finite element computer programs for analyzing heat transfer and thermo elastic problems. These programs can be used to analyze three dimensional complex geometry problems. The programs have been checked and verified by using academic problems that have exact solutions before applying to solve for solutions of more complex problems.

Theoretical procedure that starts from differential equations, derivation of finite element equations and the development of computer programs have been described in detail. These procedures can be used as guidelines in the study of finite element formulation as well as in the development of new research works in this field for new students.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา..... 2538

ลายมือชื่อนิสิต..... อธิวัฒน์ แซ่ลิ้ม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ปรมโตะ เดชาumpai

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความร่วมมืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร. ปราโมทย์ เดชะ  
อำไพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจน  
ข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยมาโดยตลอด รศ.ดร. มานิจ ทองประเสริฐ  
ประธานกรรมการ รวมทั้ง รศ. พูลพร แสงบางปลา กรรมการ และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้  
บางส่วนได้รับมาจากทุนการศึกษาไปอึ้ง คอมเมอร์เชียล รวมทั้งความช่วยเหลือจาก คุณ วัชระ  
จารึก คุณ ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์ และพนักงานทุกท่านของศูนย์คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรม  
ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชายทั้งสอง ที่ได้ให้การ  
สนับสนุนและกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ฅ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญภาพ .....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฉ
บทที่ 1    บทนำ .....	1
ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ .....	1
วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	1
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ .....	2
ประโยชน์ที่ได้รับ .....	2
บทที่ 2    ทฤษฎี .....	4
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	4
การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขึ้นกับเวลา .....	6
1 สมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้น .....	6
2 สมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	8
3 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์ .....	10
ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ .....	13
1 สมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้น .....	13
2 สมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	14
3 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์ .....	18



	หน้า
บทที่ 3	
ลักษณะและรายละเอียดของโปรแกรม .....	21
โปรแกรมการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขึ้นกับเวลา (HEAT3D) .....	21
1 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม HEAT3D .....	21
2 รายละเอียดของโปรแกรม HEAT3D .....	22
3 ลักษณะข้อมูลที่โปรแกรม HEAT3D ต้องการและให้ผลลัพธ์.....	22
4 ตัวอย่าง .....	25
โปรแกรมความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (STRES3D) .....	29
1 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม STRES3D .....	29
2 รายละเอียดของโปรแกรม STRES3D .....	31
3 ลักษณะข้อมูลที่โปรแกรม STRES3D ต้องการและให้ผลลัพธ์.....	31
4 ตัวอย่าง .....	33
บทที่ 4	
ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลสำหรับโปรแกรม HEAT3D, STRES3D จาก I-DEAS .....	39
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม I-DEAS, HEAT3D และ STRES3D .....	39
รายละเอียดของโปรแกรมแปลงข้อมูล.....	40
1 รายละเอียดของโปรแกรมแปลงข้อมูลสำหรับโปรแกรม HEAT3D (CNFH) .....	40
2 รายละเอียดของโปรแกรมแปลงข้อมูลสำหรับโปรแกรม STRES3D (CNFS) .....	40
บทที่ 5	
ผลการใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์กับปัญหาต่างๆ .....	41
สำหรับโปรแกรม HEAT3D .....	42
1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นกับเวลาของแผ่นสี่เหลี่ยมยาวที่มีการให้ความร้อนจากภายนอก .....	42
2 การกระจายอุณหภูมิขึ้นกับเวลาของแผ่นสี่เหลี่ยมยาวที่สามารถผลิตความร้อนได้เอง .....	43
3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งสี่เหลี่ยมอย่างง่าย .....	45
4 การกระจายอุณหภูมิของแผ่นอลูมิเนียมรูปร่างซับซ้อน .....	47
5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีการพาความร้อนเกิดขึ้น .....	49
6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นโลหะมีอุณหภูมิคงที่ทั้งสองด้าน ..	51



	หน้า
7 การกระจายอุณหภูมิของแบบจำลองครีประบายความร้อน รูปร่างซับซ้อน.....	53
8 การกระจายอุณหภูมิของแบบจำลองวาล์วไอเสีย .....	55
9 การกระจายอุณหภูมิของแบบจำลองลูกสูบเครื่องยนต์ .....	57
สำหรับโปรแกรม STRES3D .....	60
1 ระยะแอนของแท่งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ยาวที่มีแรงกดบน ปลายด้านหนึ่ง .....	60
2 การขยายตัวและความเค้นของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มี อุณหภูมิสม่ำเสมอ .....	61
3 การขยายตัวและความเค้นของแผ่นอลูมิเนียมอย่างง่าย .....	64
4 ความเค้นของฉนวนหุ้มท่อไอน้ำร้อน .....	65
5 การหดตัวของแบบจำลองคันสตาร์ทรถมอเตอร์ไซด์ .....	68
6 การหดตัวของแบบจำลองล้อแมกซ์อลูมิเนียม .....	70
7 การเสียรูปทรงและความเค้นของแบบจำลองล้อแมกซ์อลูมิเนียม รูปร่างซับซ้อน .....	72
8 การขยายตัวและความเค้นของแบบจำลองลูกสูบ .....	76
 บทที่ 6	
สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	78
สรุปผลการวิจัย .....	78
ข้อจำกัดและปัญหาที่พบจากการวิจัย .....	79
ข้อเสนอแนะ .....	80
 รายการอ้างอิง .....	82
 ภาคผนวก .....	84
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของโปรแกรม HEAT3D .....	85
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของโปรแกรม STRES3D .....	90
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของโปรแกรม CNFH .....	96
ภาคผนวก ง. รายละเอียดของโปรแกรม CNFS .....	99
 ประวัติผู้วิจัย .....	101

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า	10
รูปที่ 2.2	แสดงตำแหน่งด้านทั้งสี่ของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า	12
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขึ้นกับ เวลา HEAT3D	22
รูปที่ 3.2	แสดงขนาดของก้อนอลูมิเนียม	25
รูปที่ 3.3	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์แบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า	26
รูปที่ 3.4	กราฟอุณหภูมิที่ผิว ณ เวลาต่างๆ	29
รูปที่ 3.5	แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ STRES3D	31
รูปที่ 3.6	แสดงรูปทรงและแรงดึงของแท่งเหล็กยาวตรง	34
รูปที่ 3.7	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 41 จุดต่อ 88 เอลิเมนต์	36
รูปที่ 4.1	แสดงขั้นตอนการทำงานโดยอาศัยโปรแกรม I-DEAS, HEAT3D และ STRES3D	39
รูปที่ 5.1	แสดงรูปร่างของชิ้นส่วนแผ่นสี่เหลี่ยม	42
รูปที่ 5.2	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 546 จุดต่อ 2219 เอลิเมนต์	42
รูปที่ 5.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆกับระยะทาง	43
รูปที่ 5.4	แสดงขนาดชิ้นส่วนแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีความร้อนผลิตได้เอง	43
รูปที่ 5.5	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 278 จุดต่อ และ 1046 เอลิเมนต์	44
รูปที่ 5.6	แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ	45
รูปที่ 5.7	ขนาดและเงื่อนไขขอบเขตของแท่งสี่เหลี่ยม	46
รูปที่ 5.8	ลักษณะการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 51 จุดต่อ และ 95 เอลิเมนต์	46
รูปที่ 5.9	แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ ตำแหน่งตรงกลาง ( $x=L/2$ )	47
รูปที่ 5.10	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับอัตราส่วนระยะทางที่สภาวะสมดุล ทางความร้อน	47
รูปที่ 5.11	แสดงลักษณะโครงสร้างของแผ่นโลหะ	48

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.12	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ขนาด 519 จุดต่อ และ 1431 เอลิเมนต์	48
รูปที่ 5.13	แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่สภาวะสมดุลทางความร้อน	49
รูปที่ 5.14	แสดงรูปร่างของแผ่นโลหะ	49
รูปที่ 5.15	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ขนาด 125 จุดต่อ และ 309 เอลิเมนต์	50
รูปที่ 5.16	แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลจากโปรแกรม HEAT3D	51
รูปที่ 5.17	แสดงรูปร่างและเงื่อนไขต่าง ๆ บนแผ่นโลหะ	51
รูปที่ 5.18	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 50 จุดต่อ และ 91 เอลิเมนต์	52
รูปที่ 5.19	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 454 จุดต่อ และ 1140 เอลิเมนต์	52
รูปที่ 5.20	แสดงอุณหภูมิจากโปรแกรม HEAT3D กับผลเฉลยแม่นยำ	53
รูปที่ 5.21	แสดงรูปร่างและเงื่อนไขต่าง ๆ ของครีประบายความร้อน	54
รูปที่ 5.22	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ของครีประบายความร้อนขนาด 664 จุดต่อ 2017 เอลิเมนต์	54
รูปที่ 5.23	แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่สภาวะสมดุลทางความร้อน	55
รูปที่ 5.24	แสดงลักษณะของวาล์วเครื่องยนต์	56
รูปที่ 5.25	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 1025 จุดต่อ 3752 เอลิเมนต์	56
รูปที่ 5.26	แสดงการกระจายอุณหภูมิของวาล์ว	57
รูปที่ 5.27	แสดงขนาดและลักษณะการถ่ายเทความร้อนของลูกสูบ	58
รูปที่ 5.28	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 945 จุดต่อ และ 3066 เอลิเมนต์	58
รูปที่ 5.29	แสดงการกระจายอุณหภูมิของลูกสูบที่สภาวะสมดุลทางความร้อน	59
รูปที่ 5.30	แสดงขนาดของแท่งสี่เหลี่ยม	60
รูปที่ 5.31	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ขนาด 170 จุดต่อ 502 เอลิเมนต์	61
รูปที่ 5.32	แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลจากโปรแกรม STRES3D	61
รูปที่ 5.33	ขนาดของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์	62
รูปที่ 5.34	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 25 จุดต่อ 45 เอลิเมนต์	62
รูปที่ 5.35	ขนาดและลักษณะการกระจายอุณหภูมิเชิงเส้นของแผ่นอลูมิเนียม	64
รูปที่ 5.36	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 75 จุดต่อ 177 เอลิเมนต์	64
รูปที่ 5.37	แสดงลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นบนแผ่นที่เปลี่ยนรูปทรงไป	65
รูปที่ 5.38	ขนาดและการกระจายอุณหภูมิของฉนวนท่อน้ำร้อน	65



รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.39	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 1100 จุดต่อ 4600 เอลิเมนต์	67
รูปที่ 5.40	แสดงการเปรียบเทียบความเค้นจากผลเฉลยแม่นยำตรงกับโปรแกรม STRES3D	67
รูปที่ 5.41	แสดงขนาดของคั่นสตาร์ทรถมอเตอร์ไซด์	68
รูปที่ 5.42	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 1177 จุดต่อ 4252 เอลิเมนต์	69
รูปที่ 5.43	แสดงการหัดตัวของคั่นสตาร์ท	69
รูปที่ 5.44	การจำลองรูปร่างของล้อแมกซ์อย่างง่าย	70
รูปที่ 5.45	แสดงการจัดแบ่งเอลิเมนต์ 940 จุดต่อ 3038 เอลิเมนต์	71
รูปที่ 5.46	แสดงการหัดตัวของล้อแมกซ์	71
รูปที่ 5.47	แสดงรูปร่างและแนวแรงของล้อแมกซ์รูปแบบที่ 1	72
รูปที่ 5.48	แสดงรูปร่างและแนวแรงของล้อแมกซ์รูปแบบที่ 2	73
รูปที่ 5.49	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ 2850 จุดต่อ 9303 เอลิเมนต์ ของล้อแมกซ์รูปแบบที่ 1	73
รูปที่ 5.50	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ 2850 จุดต่อ 9303 เอลิเมนต์ ของล้อแมกซ์รูปแบบที่ 2	74
รูปที่ 5.51	แสดงลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นของล้อแมกซ์รูปแบบที่ 1	75
รูปที่ 5.52	แสดงลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นของล้อแมกซ์รูปแบบที่ 2	75
รูปที่ 5.53	แสดงรูปร่างของลูกสูบเครื่องยนต์	76
รูปที่ 5.54	แสดงลักษณะความเค้นแบบ Von Mises ของลูกสูบ	77
รูปที่ 6.1	แสดงเอลิเมนต์แบบทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า 10 จุดต่อ	81



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$c$	ความร้อนจำเพาะ
$h$	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน
$k$	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
$n_i$	องค์ประกอบของเวกเตอร์ในแนวตั้งฉากกับผิว
$q_s$	ความร้อนที่เกิดจากภายนอก
$t$	เวลา
$x_i$	ระยะในแนวแกนหลัก
[B]	เมตริกซ์ของค่าความเครียดกับค่าการเคลื่อนที่
[D]	เมตริกซ์ความแข็งของวัสดุ
E	ค่าคงที่ของการยืดหยุ่น
MWR	วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residual)
N	ฟังก์ชันการประมาณ
Q	ความร้อนที่ผลิตได้เอง
T	อุณหภูมิ
$T_\infty$	อุณหภูมิเฉลี่ยภายนอก, อุณหภูมิอากาศ
$T_n$	อุณหภูมิในช่วงเวลา $n$
$T_{n+1}$	อุณหภูมิในช่วงเวลา $n+1$
U	พลังงานความเครียด
V	พลังงานศักย์เนื่องจากแรงกระทำ
$\alpha$	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
$\delta$	ค่าการเคลื่อนที่
$\Delta t$	ช่วงของเวลา
$\epsilon$	ค่าความเครียด
$\epsilon_0$	ความเครียดขั้นต้น
$\theta$	ค่าคงที่ซึ่งอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1
$\lambda$ และ $G$	ค่าคงที่ Lamé
$\nu$	อัตราส่วนปัวส์ซอง
$\pi$	พลังงานศักย์รวม

ป  
๘

ความหนาแน่นเชิงมวล  
ความเค้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย