

การวิเคราะห์การเสียบรูปและความเค้นบนใบพัดกังหันไอน้ำ



นางสาวจักษณี วิรุฬห์ศรี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-035-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEFORMATION AND STRESS ANALYSIS OF A STEAM TURBINE BLADE



Miss. Juksanee Virulsri

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering**

Graduated School

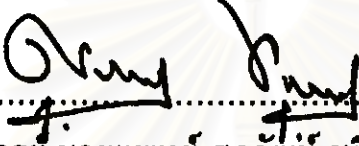
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

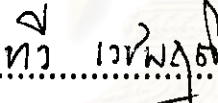
ISBN 974-638-035-4

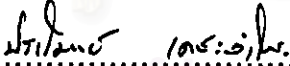
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การเสีรूपและความเค้นบนใบพัดกังหันไอน้ำ
โดย นางสาวจักษณี วิรุพห์ศรี
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

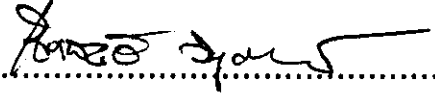

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤดี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์)

จักษณ์ วิรุฬห์ศรี : การวิเคราะห์การเสียรูปและความเค้นบนใบพัดกังหันไอน้ำ
(Deformation and Stress Analysis of a Steam Turbine Blade)
อ.ที่ปรึกษา: ศ.ดร. ปราโมทย์ เศรษฐอำไพ, 153 หน้า. ISBN 974-638-035-4

วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงการประติษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาของแข็งอย่างเป็นขั้นเป็นตอน โดยเริ่มจากการวิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นวงแหวนบางที่มีการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมีซึ่งเป็นปัญหาในหนึ่งมิติ และปัญหาในสองมิติของการวิเคราะห์การเสียรูปและความเค้นของปัญหาของแข็งที่มีความสมมาตรรอบแกน ไปจนถึงการวิเคราะห์การเสียรูปและความเค้นของปัญหาของแข็งในสามมิติที่มีเป้าหมายหลักในการนำไปประยุกต์ใช้กับใบพัดกังหันไอน้ำรูปทรงตันทั่วไป ที่ทำงานภายใต้ความดัน อุณหภูมิ และแรงเหวี่ยงรอบตัวเองสูง

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาในหนึ่งมิติ สองมิติ และสามมิติดังกล่าวนี้ ได้ประติษฐ์ขึ้นโดยการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตค่างของกาลเลอร์คินกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์แสดงความสมดุลของแต่ละปัญหา ตลอดจนได้ประติษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกันขึ้นรวมทั้งสิ้น สามโปรแกรมที่มีการตรวจสอบความถูกต้องกับปัญหาที่มีรูปร่างอย่างง่าย ซึ่งสามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนยิ่งขึ้น



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา2540.....

ลายมือชื่อนิสิต จักษณ์ วิรุฬห์ศรี.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ปราโมทย์ เศรษฐอำไพ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

##C816084 : MAJOR MECHANICAL ENGINEER

KEY WORD: FINITE ELEMENT / THERMAL STRESS / TURBINE BLADE

JUKSANEE VIRULSRI : DEFORMATION AND STRESS ANALYSIS OF
A STEAM TURBINE BLADE. THESIS ADVISOR : PROF. PRAMOTE
DECHAUMPAI, Ph.D. 153 pp. ISBN 974-638-035-4

This thesis present a finite element method of solid problem step by step. Beginning from deformation analysis of annular flat plate with radial temperature variation which is the one dimensional problem, solving two dimensional problem of thermal stress analysis for axisymmetric problem and analyzing thermal stress of three dimensional solid problem which is purposed for steam turbine blade which have solid model and operating under high pressure, temperature and centrifugal force

Finite element equation corresponding to these one dimensional, two dimensional and three dimensional problems were derived from equilibrium equation of each problem by using Galerkin method of weighted residuals and developing three corresponding finite element program computer which were verified by solving academic problems that have exact solutions before applying to solve more complex problems

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ปีการศึกษา..... 2540.....

ลายมือชื่อนิสิต..... กัญชลี วิรุฬห์ศรี.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ปรมote dechaumpai.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีคุณค่ายิ่งต่อผู้วิจัยในการนำไปประยุกต์ใช้กับ งานวิจัย และการดำเนินชีวิตในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ และ อาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ คุณจักร์กริช พิบูลย์ไพโรจน์ ผู้จัดการแผนกเทคนิคการทดสอบ กองทดสอบเครื่องกล การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ช่วยถ่ายทอดประสบการณ์ และเนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนการศึกษา กร-นิรมล และทุนรัชดาภิเษก รวมทั้งได้รับความช่วยเหลือจากสถาบัน NECTEC ในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง และคุณนพดล อัจฉิมภาพ ที่ได้คำแนะนำในด้านการ ใช้ระบบปฏิบัติการณูนิคซ์ ขอขอบพระคุณพนักงาน และเพื่อนๆที่ศูนย์คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ตลอดจนเพื่อนๆและรุ่นพี่ปริญาโททุกท่าน มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ได้ให้กำลังใจ และให้ความ เข้าใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา ประโยชน์ และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบ เป็นกตัญญูตามบูชาคุณแต่ บิดา-มารดา พี่สาว ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

จักร์กษณ์ วิรุฬห์ศรี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และความเป็นมาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานทางวิทยานิพนธ์	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์ความเค้นในของแข็ง	5
เนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Stress)	
2.1 สมการเชิงอนุพันธ์ของของแข็งในสามมิติ	5
2.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)	10
2.3 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	11

บทที่ 3 การวิเคราะห์การเสีรูปของแผ่นวงแหวนบาง	13
ที่มีการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมี	
3.1 สมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้น	13
3.2 เงื่อนไขขอบเขต	14
3.3 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์	15
3.4 ลักษณะและรายละเอียดของโปรแกรม	23
3.5 รายละเอียดของโปรแกรม	24
3.6 ลักษณะข้อมูลที่โปรแกรม DISEXACT และ DISLNEAR ต้องการ	24
3.7 ตัวอย่าง	26
บทที่ 4 การวิเคราะห์การเสีรูปและความเค้น	36
สำหรับปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกน	
4.1 สมการเชิงอนุพันธ์	36
4.2 เงื่อนไขขอบเขต	37
4.3 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์	38
4.4 ลักษณะและรายละเอียดของโปรแกรม	44
4.5 รายละเอียดของโปรแกรม	46
4.6 ลักษณะข้อมูลที่โปรแกรมต้องการ	46
4.7 ตัวอย่างและการนำไปประยุกต์ใช้	51
บทที่ 5 การวิเคราะห์การเสีรูปและความเค้นของใบพัดกังหันไอน้ำ	64
5.1 สมการเชิงอนุพันธ์	64
5.2 เงื่อนไขขอบเขต	64

5.3	สมการไฟไนต์เอลิเมนต์	65
5.4	ลักษณะและรายละเอียดของโปรแกรม	73
5.5	รายละเอียดของโปรแกรม	75
5.6	ลักษณะข้อมูลที่โปรแกรมต้องการ	75
5.7	ตัวอย่างและการนำไปประยุกต์ใช้	81
บทที่ 6	บทสรุป ปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ	100
6.1	บทสรุป	100
6.2	ปัญหาที่พบในขณะทำวิทยานิพนธ์	101
6.3	ข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง		104
ภาคผนวก		106
ภาคผนวก ก.	รายละเอียดของโปรแกรม DISEXACT	107
	รายละเอียดของโปรแกรม DISLNEAR	112
ภาคผนวก ข.	รายละเอียดของโปรแกรม AXISSYM	117
	รายละเอียดของโปรแกรม TRANAXIS	131
ภาคผนวก ค.	รายละเอียดของโปรแกรม SOLID3D	133
	รายละเอียดของโปรแกรม TRAN3D	149
ประวัติผู้วิจัย		153

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสมดุลของแฉิ่งในสามมิติ	5
รูปที่ 2.2 ความสมดุลของเอลิเมนต์เล็ก ๆ ปริมาตร dV ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน	6
รูปที่ 2.3 ความสมดุลของเอลิเมนต์เล็ก ๆ ปริมาตร dV ในระบบพิกัดทรงกระบอก	8
รูปที่ 3.1 แผ่นวงแหวนบางที่มีการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมี	13
รูปที่ 3.2 การจัดแบ่งเอลิเมนต์ของแผ่นวงแหวนบางที่มีการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมี	15
รูปที่ 3.3 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์และการกระจายของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชัน $T = a + b \ln(r)$	16
รูปที่ 3.4 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์และการกระจายของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันเส้นตรง	20
รูปที่ 3.5 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DISEXACT และ DISLNEAR	24
รูปที่ 3.6 การจัดแบ่งเอลิเมนต์ และลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์ของโปรแกรม DISEXACT	28
รูปที่ 3.7 ข้อมูลในไฟล์ชื่อ DISK1.DAT	28
รูปที่ 3.8 ลักษณะผลลัพธ์ในไฟล์ EXACT1.OUT	29
รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวรัศมีระหว่างผลเฉลยแน่นอนตรงกับผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม DISEXACT เมื่อมีการจัดแบ่งแนวรัศมีออกเป็น 7 เอลิเมนต์ และ 8 จุดต่อ	30
รูปที่ 3.10 ข้อมูลในไฟล์ชื่อ DISK2.DAT	30
รูปที่ 3.11 ลักษณะผลลัพธ์ในไฟล์ EXACT2.OUT	31

รูปที่ 3.12	การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวรัศมีระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม DISEXACT เมื่อมีการจัดแบ่งแนวรัศมีออกเป็น 1 เอลิเมนต์ และ 2 จุดต่อ	31
รูปที่ 3.13	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ และลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์ของโปรแกรม DISLINEAR	32
รูปที่ 3.14	ลักษณะผลลัพธ์ในไฟล์ LINEAR1.OUT	33
รูปที่ 3.15	การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวรัศมีระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม DISNEAR เมื่อมีการจัดแบ่งแนวรัศมีออกเป็น 7 เอลิเมนต์ และ 8 จุดต่อ	33
รูปที่ 3.16	ลักษณะผลลัพธ์ในไฟล์ LINEAR2.OUT	34
รูปที่ 3.17	การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวรัศมีระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม DISNEAR เมื่อมีการจัดแบ่งแนวรัศมีออกเป็น 1 เอลิเมนต์ และ 2 จุดต่อ	34
รูปที่ 4.1	ตัวอย่างปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกนในระบบพิกัดทรงกระบอก	36
รูปที่ 4.2	รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกน	37
รูปที่ 4.3	แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ AXISSYM	45
รูปที่ 4.4	รูปแบบของไฟล์ข้อมูลตัวอย่างที่โปรแกรม AXISSYM ต้องการ	50
รูปที่ 4.5	รูปแบบของไฟล์ผลลัพธ์ตัวอย่างที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม AXISSYM	51
รูปที่ 4.6	รูปแบบของไฟล์ผลลัพธ์ตัวอย่างที่ได้จากโปรแกรมแปลงข้อมูล TRANAXIS และอยู่ในรูปแบบที่โปรแกรม NASTRAN ต้องการ	51
รูปที่ 4.7	แผ่นกลมตันบางภายใต้แรงเหวี่ยงรอบตัวเองด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่ ω rad/s	52
รูปที่ 4.8	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ของแผ่นกลมตันบางในรูปที่ 4.4	53
รูปที่ 4.9	การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวรัศมี ระหว่างผลเฉลยแม่นยำ และผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของปัญหาของแผ่นกลมตันบางภายใต้แรงเหวี่ยงรอบตัวเองด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่	54

รูปที่ 4.10	การเปรียบเทียบความเค้นในแนวสัมผัส ระหว่างผลเฉลยแม่นยำ และผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของปัญหาของแผ่นกลมตันบางภายใต้แรงเหวี่ยงรอบตัวเองด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่	55
รูปที่ 4.11	การเปรียบเทียบความเค้นในแนวรัศมี ระหว่างผลเฉลยแม่นยำ และผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของปัญหาของแผ่นกลมตันบางภายใต้แรงเหวี่ยงรอบตัวเองด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่	55
รูปที่ 4.12	แผ่นวงแหวนบางภายใต้ความดันภายใน p_i และความดันภายนอก p_o	56
รูปที่ 4.13	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ของแผ่นวงแหวนบางในรูปที่ 4.12	57
รูปที่ 4.14	การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวรัศมีระหว่างผลเฉลยแม่นยำ และผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของปัญหาของแผ่นวงแหวนบางภายใต้ความดันภายใน p_i และความดันภายนอก p_o	58
รูปที่ 4.15	การเปรียบเทียบความเค้นในแนวสัมผัสระหว่างผลเฉลยแม่นยำ และผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของปัญหาของแผ่นวงแหวนบางภายใต้ความดันภายใน p_i และความดันภายนอก p_o	58
รูปที่ 4.16	การเปรียบเทียบความเค้นในแนวรัศมีระหว่างผลเฉลยแม่นยำ และผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของปัญหาของแผ่นวงแหวนบางภายใต้ความดันภายใน p_i และความดันภายนอก p_o	59
รูปที่ 4.17	แบบจำลองของ Turbine Casing ซึ่งรับแรงเหวี่ยงรอบตัวเองด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่ภายใต้ความดันภายใน p_i และความดันภายนอก p_o และอุณหภูมิ	59
รูปที่ 4.18	วิธีการคำนวณ [Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 1977] ของปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกน	61
รูปที่ 4.19	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ของ Turbine Casing ในรูปที่ 4.17	62
รูปที่ 4.20	ลักษณะการกระจายของความเค้นแบบ Von Mises, MN/m ² และการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นบน Turbine Casing ในรูปที่ 4.17	63
รูปที่ 5.1	รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาของแข็งยึดหยุ่นได้ในสามมิติ	65

รูปที่ 5.2	ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า ซึ่งใช้ในปัญหาของแข็งยึดหยุ่นได้ในสามมิติ	65
รูปที่ 5.3	แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SOLID3D	74
รูปที่ 5.4	ไฟล์ข้อมูลตัวอย่างที่โปรแกรม SOLID3D ต้องการ	79
รูปที่ 5.5	ไฟล์ผลลัพธ์ตัวอย่างที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม SOLID3D	80
รูปที่ 5.6	ไฟล์แสดงผลลัพธ์ตัวอย่างจากการคำนวณด้วยโปรแกรม TRAN3D และอยู่ในรูปแบบที่โปรแกรม NASTRAN ต้องการนำไปแสดงผลกราฟฟิก	81
รูปที่ 5.7	ก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีอุณหภูมิเท่ากันทั้งก้อน	82
รูปที่ 5.8	ใบพัดกังหันไอน้ำ	83
รูปที่ 5.9	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ของใบพัดกังหันไอน้ำในรูปที่ 5.4	84
รูปที่ 5.10	ใบพัดกังหันไอน้ำภายใต้ความดัน p กระทำตั้งฉากกับผิวด้านหน้าของใบพัด	84
รูปที่ 5.11	ลักษณะการกระจายของความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนใบพัดกังหันไอน้ำ ภายใต้ความดัน (จากรูปที่ 5.10)	85
รูปที่ 5.12	ใบพัดกังหันไอน้ำ ภายใต้แรงเหวี่ยงรอบตัวเองด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่	86
รูปที่ 5.13	ลักษณะการกระจายความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนใบพัดกังหันไอน้ำ ภายใต้แรงเหวี่ยงรอบตัวเองด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.12	86
รูปที่ 5.14	ใบพัดกังหันไอน้ำ ภายใต้อุณหภูมิซึ่งแปรผันตามแกน x	87
รูปที่ 5.15	ลักษณะการกระจายความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนใบพัดกังหันไอน้ำ ภายใต้อุณหภูมิซึ่งแปรผันตามแกน x ดังแสดงในรูปที่ 5.14	88
รูปที่ 5.16	ลักษณะการกระจายของความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนใบพัดกังหันไอน้ำ เมื่อทำงานภายใต้สภาวะร่วมกันระหว่างความดันคงที่ รูปที่ 5.10 อัตราเร็วเชิงมุมคงที่ รูปที่ 5.12 และ อุณหภูมิซึ่งแปรผันตามแกน x รูปที่ 5.14	89

รูปที่ 5.17	ใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์	90
รูปที่ 5.18	การจัดแบ่งเอลิเมนต์ของใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ในรูปที่ 5.17	91
รูปที่ 5.19	ใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ภายใต้ความดันตั้งฉากกับผิวหน้า ซึ่งแปรผันตามแกน z	91
รูปที่ 5.20	ลักษณะการกระจายของความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ภายใต้ความดัน แบบแปรผันตามแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.19	92
รูปที่ 5.21	ใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ภายใต้ความเร็วเชิงมุมคงที่ รอบแกน z	93
รูปที่ 5.22	ลักษณะการกระจายของความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ภายใต้ความเร็วเชิงมุมคงที่ รอบแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.21	93
รูปที่ 5.23	ใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ภายใต้อุณหภูมิซึ่งแปรผันตามแกน x และแกน z	94
รูปที่ 5.24	ลักษณะการกระจายของความเค้นในแนวแกน x , MN/m^2 และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ภายใต้อุณหภูมิ ซึ่งแปรผันตามแกน x และแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.23	95
รูปที่ 5.25	ลักษณะการกระจายของความเค้นในแนวแกน y , MN/m^2 และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ภายใต้อุณหภูมิ ซึ่งแปรผันตามแกน x และแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.23	95
รูปที่ 5.26	ลักษณะการกระจายของความเค้นในแนวแกน z , MN/m^2 และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ภายใต้อุณหภูมิ ซึ่งแปรผันตามแกน x และแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.23	96
รูปที่ 5.27	ลักษณะการกระจายของความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ภายใต้อุณหภูมิ ซึ่งแปรผันตามแกน x และแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.23	96
รูปที่ 5.28	ลักษณะการกระจายของความเค้นแบบ Von Mises, MN/m^2 และ การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ เมื่อทำงานภายใต้สภาวะ ร่วมกันระหว่างความดันคงที่ รูปที่ 5.19 อัตราเร็วเชิงมุมคงที่ รูปที่ 5.21 และอุณหภูมิซึ่งแปรผันตามแกน x และแกน z รูปที่ 5.23	98

คำอธิบายสัญลักษณ์

f	แรงวัตถุ
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
\hat{n}	เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิว
p	ความดัน
r	ระยะในแนวรัศมี
$u(r)$	ระยะเคลื่อนตัวในแนวรัศมี
$u(x)$	ระยะเคลื่อนตัวในแนวแกน x
v	ระยะเคลื่อนตัวในแนวแกน y
w	ระยะเคลื่อนตัวในแนวแกน z
x	ระยะในแนวแกน x
y	ระยะในแนวแกน y
z	ระยะในแนวแกน z
A	พื้นที่
$[B]$	เมตริกซ์ของความเครียดกับการเคลื่อนตัว
$[C]$	เมตริกซ์ของความเค้นกับความเครียด
E	ค่าคงที่ของความยืดหยุ่น
N_i	ฟังก์ชันการประมาณภายในสำหรับการเคลื่อนตัว
$[N]$	เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ สำหรับการเคลื่อนตัว
R	ค่าเศษตกค้างในระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของ กัลเลอร์คิน
\bar{T}	เวกเตอร์ของความเค้นที่ผิว

T	อุณหภูมิ
T_0	อุณหภูมิที่วัสดุั้นไม่มีความเค้น
V	ปริมาตร
Ω	ขอบเขตของปริมาตร
Γ	ขอบเขตของพื้นผิว
ρ	ความหนาแน่นของวัสดุ
θ	มุมในระบบพิกัดทรงกระบอก
v	อัตราส่วนปัวส์ซอง
α	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
ω	อัตราเร็วเชิงมุมรอบแกน z
σ	ความเค้นในแนวตั้งฉาก
τ	ความเค้นเฉือน
ϵ	ความเครียดในแนวตั้งฉาก
γ	ความเครียดเฉือน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย