

การออกแบบหัวเตาแก๊สโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

AN OPTIMUM GAS DISTRIBUTOR BY FINITE ELEMENT METHOD

นายจรินทร์ แววัป
ว่าที่ร.ต.พงษ์ศักดิ์ หมื่นยา

โครงการวิศวกรรมศาสตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. ๒๕๔๓

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

โดย

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

การออกแบบหัวเตาแก๊สโดยไฟไนต์เอลิเมนต์

นายจรินทร์

แวววัป

ว่าที่ร.ด.พงษ์ศักดิ์

หมื่นยา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์มนัส

แปงใส

อาจารย์ภาควิชา

ศรีธรรมริน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการวิศวกรรม
ศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ กองสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์มนัส แปงใส)

กรรมการ

(อาจารย์ประชาสันติ ไตรยสุทธิ)

กรรมการ

(อาจารย์ภาควิชา ศรีธรรมริน)

การออกแบบหัวเตาแก๊สโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปีการศึกษา 2543

โดย

นายจรินทร์ แววัป

ว่าที่ร.ต.พงษ์ศักดิ์ หมื่นยา

อาจารย์ที่ปรึกษา

มนัส แป้งใส

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ภาคภูมิ ศรีมรินทร์

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตนี้ กล่าวถึงการวิเคราะห์หาขนาดของหัวเตาแก๊สที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับช่วงความหนาแน่นระหว่าง 2-10 มม. มีจำนวนรูที่แตกต่างกันและทำจากวัสดุชนิดต่างๆกัน ได้แก่ เหล็กหล่อ, เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม โดยพิจารณาผลของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้น จากอุณหภูมิของเปลวไฟจากการใช้งานจริง

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม MSC/NASTRAN for Window แล้วนั้นพบว่าหัวเตาแก๊สที่ทำมาจากเหล็กหล่อ ซึ่งมีขนาดความหนา 6 มม. มีจำนวนรูและการจัดวางเหมือนกับหัวเตาแก๊สมาตรฐานที่ใช้ในท้องตลาด นั้นมีความเหมาะสมสูงสุด เนื่องจากมีความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิเหมาะสมกับขนาดความหนาใช้งาน

AN OPTIMUM GAS DISTRIBUTOR BY FINITE ELEMENT METHOD

Academic Year 2000

By

Mr. Jarin Waewwub

Sub. LT. Pongsak Muenya

Project Report Advisor

Mr. Manat Paengsai

Project Report Co-Advisor

Mr. Parkpoom Sriomrui

ABSTRACT

This project is sizing an optimum gas distributor, that are thickness of 2-10 mm., many holes arrangement are material such as cast iron , stainless steel and Aluminum by compare on thermal stress.

Analyses by MSC /NASTRAN for Window which is a finite element program. The gas distributor that is thickness of 6 mm., cast iron material and has the hole same typical is an optimum. Because of less thermal stress and material.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ อาจารย์มนัส แป้งใส และอาจารย์ภาคภูมิ ศรีมรินทร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบ แก้ไขจนทำให้โครงการวิศวกรรมศาสตร์ฉบับนี้สำเร็จ ได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบพระคุณ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาค วิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้ จนบรรลุผล ไปได้ด้วยดี

อนึ่ง หากหนังสือโครงการวิศวกรรมศาสตร์เล่มนี้ มีคุณค่าและเกิดประโยชน์อยู่ บ้าง ขอมอบคุณความดีนี้ แด่ บิดา มารดา ผู้บังเกิดเกล้าที่ให้การอบรมสั่งสอนแก่ลูก ส่วน ข้อบกพร่องผู้เขียนจะรับผิดชอบเพียงผู้เดียว

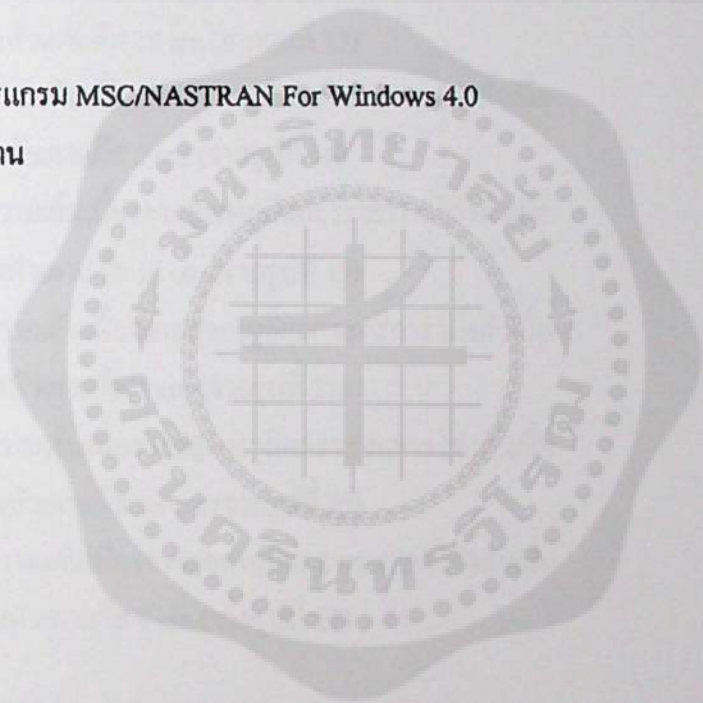
คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	๗
บทที่	
1. บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
ขอบเขตของโครงการ	1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการ	2
2. ทฤษฎี	3
การนำความร้อน	3
การพาความร้อน	7
การแผ่รังสีความร้อน	8
ความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	10
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	11
3. การคำนวณและการออกแบบ	17
ตัวอย่างการคำนวณโดยวิธี Finite Element	17
ข้อกำหนดในการออกแบบ	25
4. ผลการทดสอบ	26
5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	56
ผลการวิเคราะห์กราฟ	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ	57
ระยะการโก่งตัว	57
ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก การใช้โปรแกรม MSC/NASTRAN For Windows 4.0	60
ประวัติผู้จัดทำโครงการ	113



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. ผลการวัดอุณหภูมิ	27
2. ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเตาแก๊ส 18 cm (จากรูปที่ 13)	30
3. ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเตาแก๊ส 9 cm (จากรูปที่ 16)	34
4. ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเตาแก๊ส 18 cm (จากรูปที่ 19)	38
5. ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเตาแก๊ส 9 cm (จากรูปที่ 22)	42
6. ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเตาแก๊ส 18 cm (จากรูปที่ 25)	46
7. ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเตาแก๊ส 9 cm (จากรูปที่ 28)	50

ตารางภาคผนวกที่

1. คุณสมบัติทางกลของวัสดุ	110
2. สมบัติทางความร้อนของโลหะ (ของแข็ง)	112

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1. เส้นความลาดชันของอุณหภูมิ	3
2. อุณหภูมิของไหล A เคลื่อนที่ไปยังของไหล B	4
3. แสดงการกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหล ขณะเกิดการพาความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน	7
4. แสดงการพาความร้อนในชั้นผิวความร้อนและชั้นขีดผิวความเร็ว	8
5. แสดงการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ	9
6. แสดงการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ	12
7. แสดงเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ	13
8. ลักษณะขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการหาค่า Thermal Stress	16
9. แผ่นโลหะภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	17
10. แสดงจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิ	26
11. ตัวอย่างหัวเตาแก๊สที่นำมาวิเคราะห์	27
12. กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ จุดวัดอุณหภูมิ	28
13. ลักษณะการจัดวางรูปของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm (จำนวนรูปตามท้องตลาด)	29
14. กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 1	31
15. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 1	32
16. ลักษณะการจัดวางรูปของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm (จำนวนรูปตามท้องตลาด)	33
17. กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 2	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
18. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 2	36
19. ลักษณะการจัดวางรูของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm (จำนวนรูเพิ่มขึ้น)	37
20. กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 3	39
21. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 3	40
22. ลักษณะการจัดวางรูของหัวเตาแก๊สเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm (จำนวนรูเพิ่มขึ้น)	41
23. กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 4	43
24. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 4	44
25. ลักษณะการจัดวางรูของหัวเตาแก๊สเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm (ลดจำนวนรู)	45
26. กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 5	47
27. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 5	48
28. ลักษณะการจัดวางรูของหัวเตาแก๊สเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm (ลดจำนวนรู)	49
29. กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 6	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
30. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 6	52
31. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาโดยวัสดุเหล็กหล่อ	53
32. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาโดยวัสดุอะลูมิเนียม	54
33. กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาโดยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม	55

รูปภาคผนวก

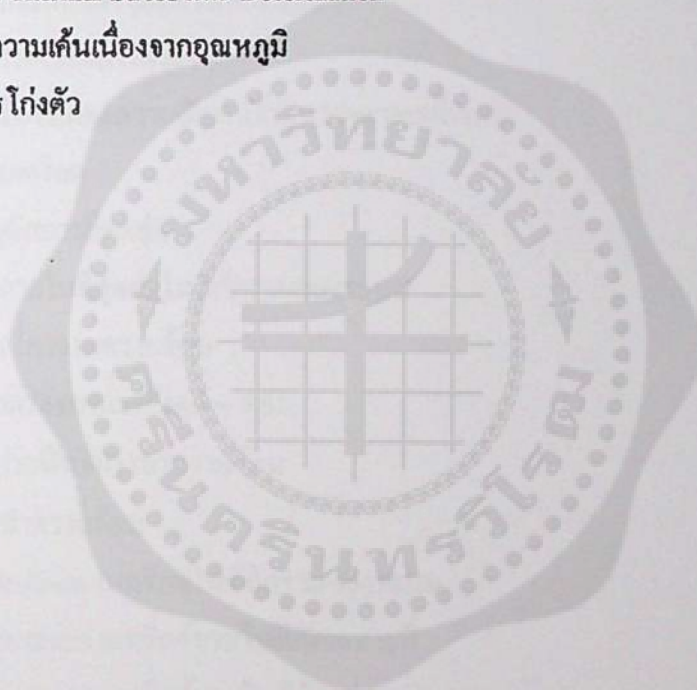
1. แสดงเมื่อเปิด New Model	61
2. แสดงการใส่ค่ารัศมีวงกลม	62
3. แสดงเมื่อใส่ค่ารัศมีของจำนวนรูทั้งหมด	75
4. แสดงการลบสเกลที่หน้าจอลูก	76
5. แสดงเมื่อลบสเกลออกแล้ว	76
6. แสดงการกำหนด Boundary Surface ทุกตัวโดยอัตโนมัติ	77
7. แสดงเมื่อใส่ค่า Boundary Surface เสร็จแล้ว	77
8. แสดงการเลือกวัสดุที่อยู่ใน โปรแกรม	78
9. แสดงค่าคุณสมบัติวัสดุ Stainless Steel cgs	79
10. แสดงการกำหนดให้ Model มีคุณสมบัติเป็นของแข็ง	80
11. แสดงการตั้งชื่อเรื่องเมื่อกำหนด Model เป็นของแข็ง	80
12. แสดงการกำหนดขนาด Default Mesh Size	81
13. แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ที่เส้นโค้งที่ 1	81
14. แสดงการใส่ค่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เส้นโค้งที่ 1	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปภาคผนวก	หน้า
15. แสดงการกำหนดค่าเอลิเมนต์ตามที่กำหนดในรูปภาคผนวกที่ 14	83
16. แสดงการนำคุณสมบัติที่หัวเรื่อง Dummy Planar Elements มาทำการแพร่กระจายเอลิเมนต์	84
17. แสดงผลเมื่อโปรแกรมทำการแบ่งเอลิเมนต์เสร็จเรียบร้อยแล้ว	84
18. แสดงการนำค่าคุณสมบัติจากหัวเรื่อง Solid Elements มาทำการเพิ่มความหนา ของ Model	85
19. แสดงการกำหนดความหนาของ Model โดยจะเพิ่มความหนา	86
20. แสดงรูปแบบที่จะแสดงผลออกทางหน้าจอ	86
21. แสดงการเลือกรูปแบบของปัญหาในการใส่ค่า Load	87
22. แสดงการกำหนดอุณหภูมิรอบ ๆ Model	88
23. แสดงการกำหนดอุณหภูมิเส้นโค้งที่ 1	89
24. แสดงการกำหนดอุณหภูมิเส้นโค้งเสร็จสิ้นแล้ว	91
25. แสดงการกำหนดเงื่อนไขก่อนทำการประมวลผล	92
26. แสดงการปิดโหลดต่าง ๆ	93
27. แสดงการเลือก Contour เพื่อแสดงผลลัพธ์ส่งออกไปยังหน้าจอ	94
28. แสดงการเลือกผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิสู่หน้าจอ	95
29. แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ	96
30. แสดงรูปแบบปัญหาเพื่อกำหนดค่าโหลดใหม่	97
31. แสดงการกำหนดรูปแบบของโหลดเพื่อนำมาวิเคราะห์	98
32. แสดงค่าที่จะต้องการเลือกผลลัพธ์ที่ประมวลผลแล้ว	98
33. แสดงการตั้งชื่อรูปแบบปัญหากำหนดเงื่อนไขให้กับ Model ต่อไป	99
34. แสดงโหนดที่จะกำหนดให้มีการอยู่กับที่	99
35. แสดงเงื่อนไขที่จะให้มีการอยู่กับที่	100
36. แสดงการวิเคราะห์ Thermal Stress	101
37. แสดงการปิดจุดที่อยู่กับที่	102

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปภาคผนวก	
38. แสดงการตั้งชื่อเรื่องที่หน้าจอแสดงผล	103
39. แสดงการกำหนดมาตราส่วนของรูปในการแสดงผล	104
40. แสดงการกำหนดให้มีระยะการโค้งตัว	105
41. แสดงผลลัพธ์ของ Thermal Stress และ Deformation	106
42. แสดงผลการเกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ	107
43. แสดงผลระยะการโค้งตัว	109



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด, พื้นที่	m^2
[B], $\overline{[B]}$	เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัดของแต่ละจุดต่อในพิกัด x, y และพิกัด r, z หรือพิกัดรวม $\bar{x}, \bar{y}$ ตามลำดับ	-
$\bar{d}$	การกระจัดของจุดต่อในพิกัดรวม	m
[d]	เมทริกซ์ของการกระจัด	-
[D]	เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	-
E	มอดูลัสการยืดหยุ่น	N/m^2
f_i	แรงภายในที่จุดต่อในพิกัดรวมของระบบ	N
f_r	แรงเนื่องจากความร้อน	N
g	ความเร่งของแรงดึงดูด = 9.81	N/s^2
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
k	การนำความร้อน	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
k	ค่า Stiffness เมทริกซ์ในพิกัดรวมของระบบ	N/m
[K]	ค่า Stiffness เมทริกซ์รวมในพิกัดเฉพาะที่	N/m
$\overline{[K]}$	ค่า Stiffness เมทริกซ์รวมในพิกัดรวมของระบบ	N/m
L	ความยาว, มิติ	m
q	ปริมาณความร้อน	W/m^2
t, T	อุณหภูมิการถ่ายเทความร้อน	$^\circ C$
t	ความหนา	m
T	อุณหภูมิ	$^\circ C$
T_∞	อุณหภูมิของบรรยากาศ	$^\circ C$
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{w}_i$	การกระจัดที่จุดต่อ i ในพิกัดเฉพาะที่ตามแนวแกน x, y, z ตามลำดับ	m

คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
u_i, v_i, w_i	การกระจัดที่จุดต่อ i ในพิกัดรวมของระบบตามแนวแกน x, y, z ตามลำดับ	mm
x_i, y_i, z_i	พิกัดที่จุดต่อ	-
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	พิกัดของแกนเฉพาะที่	-
α	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่อหน่วยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	mm/mm/°C
$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$	ตัวแปรในเทอมของฟังก์ชันรูปร่าง	°(องศา)
δ	การกระจัด, การยืดตัว/หดตัว	mm
ε	สภาพการเปลี่ยนรูปร่าง	-
ε_T	ความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	mm/mm
ν	Poisson's Ratio	-
ρ	ความหนาแน่นของมวล	kg/m ³
σ	ความเค้น	N/m ²
τ	ความเค้นเฉือน	N/m ²
θ	มุมระหว่างแกนหรือพิกัด	°(องศา)
$[]$	เมทริกซ์สี่เหลี่ยม	-
$[]$	เมทริกซ์แถว	-
$\{\}$	เมทริกซ์สมมาตร	-
$[]^{-1}$	เมทริกซ์ผกผัน	-
$[]^T, \{\}^T$	เมทริกซ์สลับเปลี่ยน	-
$ $	ตัวกำหนด (Determinant), ค่าสมบูรณ์	-

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันทรัพยากรธรรมชาติมีจำนวนน้อยลง แต่ปริมาณการใช้ยังเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อประชากรมีมากการประกอบอาหารเพื่อการดำรงชีวิตก็มากตามไปด้วยส่วนใหญ่พลังงานที่ใช้ในการประกอบอาหารในครัวเรือนจะใช้พลังงานงานความร้อนจากแก๊สเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการประหยัดเชื้อเพลิงในการหุงต้ม โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สหุงต้ม ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเตาแก๊สที่ให้เปลวแก๊สออกที่หัวเตา ซึ่งปกติการใช้งานหัวเตาแก๊ส โดยทั่วไปเวลาใช้แก๊สจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ เนื่องจากความร้อนของเตาแก๊สแพร่กระจายออกสู่ด้านข้าง จึงทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ แต่ถ้าเราออกแบบให้มีการแพร่กระจายของเปลวไฟให้เหมาะสมที่สุด พื้นที่การถ่ายเทความร้อนก็มากขึ้น ทั้งนี้ในการออกแบบในโครงการดังกล่าวจะพิจารณาใช้โปรแกรม MSC/NASTRAN For Windows มาช่วยในการออกแบบลักษณะต่าง ๆ เช่น รูปร่างของรูที่เปลวไฟนั้นออกจากหัวเตา อาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยม หรืออื่นๆ รวมถึงการเลือกวัสดุเพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับหัวเตาแก๊ส
2. เพื่อออกแบบหาแนวการจัดวางรูของหัวเตาแก๊สที่ให้ผลความดันเนื่องจากอุณหภูมิต่ำสุด

ขอบเขตของโครงการ

1. เลือกจำนวนรูเท่ากับหัวเตาแก๊สจริง, เพิ่มจำนวนรูและลดรูเว้นรู
2. เลือกใช้ความหนาของหัวเตาแก๊สตั้งแต่ 2-10 mm

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการ

1. สามารถประยุกต์ใช้งานโปรแกรม MSC/NASTRAN For Windows กับชิ้นงานจริง
2. ก่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการกระจายตัวของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Stress)
3. ลดต้นทุนในการผลิต
4. สามารถช่วยให้ได้ห้วเตาแก๊สที่มีความแข็งแรงเหมาะสม



บทที่ 2

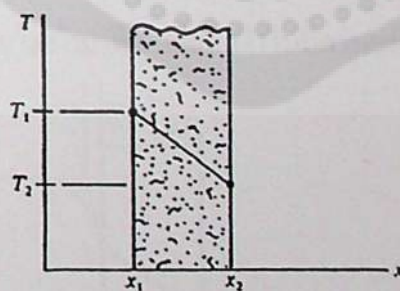
ทฤษฎี

การนำความร้อน (CONDUCTION)

ค่าความลาดชันของอุณหภูมิ ที่เกิดขึ้นในวัสดุ ซึ่งมีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) จะนำมาคำนวณหาอัตราการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นในตัวกลางได้ด้วยสมการของฟูเรียร์ (Fourier's Law) ดังนี้

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.1)$$

เมื่อ $\partial T / \partial n$ คือ ค่าความลาดชันของอุณหภูมิ ซึ่งเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่ A ค่าการนำความร้อน k คือค่าคงที่ ที่ได้จากการทดลองสำหรับวัสดุตัวกลาง (Medium) นั้น ๆ ซึ่งอาจจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ และความดัน



รูปที่ 1 เส้นความลาดชันของอุณหภูมิ

เครื่องหมายลบ ในสมการที่ (2.1) ซึ่งก็คือ กฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) โดยพิจารณาตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ : การถ่ายเทพลังงานความร้อน เป็นผลมาจากการที่ความลาดชันเชิงความร้อนนั้นจะต้องพิจารณาจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

กฎการระบายความร้อนของนิวตัน (Newton's law of cooling)

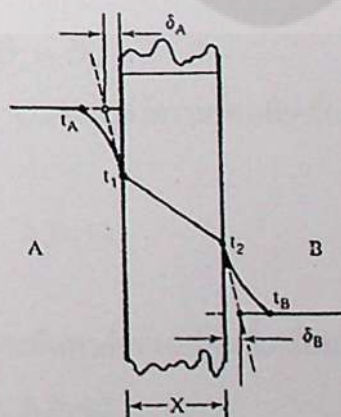
ในการหาค่าการเคลื่อนที่ของความร้อนซึ่งเคลื่อนที่ผ่านของไหลแล้วผ่านผนังซึ่งเป็นของแข็งและผ่านไปยังของไหลอีกครั้งหนึ่ง การที่จะรู้ว่าการเคลื่อนที่จากผนังซึ่งเป็นของแข็งไปสู่ของเหลวได้อย่างไร กรณีเช่นนี้ในกฎการระบายความร้อนของนิวตันหาได้ โดยใช้สูตรที่มีปริมาณความร้อนเคลื่อนที่ผ่านของแข็งที่มีพื้นที่หน้าตัด A อุณหภูมิ t_w ไปยังของเหลวที่มีอุณหภูมิ t ได้ดังนี้

$$Q = hA(t_w - t) \quad (2.3)$$

เมื่อ h คือสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient)

สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน h มีหน่วย $W/m^2 \cdot ^\circ C$ มีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและความเร็วของการไหล ปกติค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนหาได้จากการทดลอง

สมการที่ (2.3) ไม่ได้คิดรวมถึงการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีของพื้นที่หน้าตัด แต่ถ้าคิดก็ได้โดยการใช้วิธีคิดแบบการแผ่รังสีความร้อน แต่โดยทั่วไปแล้วความร้อนที่สูญเสียเพราะการแผ่รังสีจะไม่นำมาคิด โดยถือว่าไม่มีการแผ่รังสีจากพื้นที่หน้าตัดของผนัง



รูปที่ 2 อุณหภูมิของไหล A เคลื่อนที่ไปยังของไหล B

พิจารณาจากรูปที่ 2 พบว่าปริมาณความร้อนเคลื่อนที่ผ่านของไหล A ไปยังของไหล B โดยผ่านผนังของแข็งที่มีความหนา X ค่าการนำความร้อน k การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของความร้อนเป็น t_A, t_1, t_2 และ t_B ตามลำดับ ส่วนของไหล A มีความหนาของฟิล์มเป็น δ_A และของไหล B มีความหนาของฟิล์มเป็น δ_B

$$\text{ถ้าให้ } \frac{Q}{A} = q$$

ความร้อนที่มีอุณหภูมิ t_A เคลื่อนที่จากของไหล A ซึ่งมีฟิล์มหนา δ_A ค่าการนำความร้อน k_A ไปยังผนังซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิว t_1 คือ

$$q = \frac{k_A}{\delta_A} (t_A - t_1) \quad (2.4)$$

ความร้อนเคลื่อนที่จากผนังอีกด้านหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิว t_2 ไปยังของไหลที่มีความหนาแผ่นฟิล์ม δ_B ค่าการนำความร้อน k_B ซึ่งมีอุณหภูมิ t_B คือ

$$q = \frac{k_B}{\delta_B} (t_2 - t_B) \quad (2.5)$$

ความหนาของฟิล์มของของไหลที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เท่ากัน

$$\text{ดังนั้น } \delta_A = \delta_B$$

จากสมการที่ (2.3) หาค่าความร้อนที่เคลื่อนที่จากของไหล A ไปยังผนังได้ตามสมการ

$$q = h_A(t_A - t_1) \quad (2.6)$$

ในทำนองเดียวกันหาค่าความร้อนที่เคลื่อนที่จากผนังไปยังของไหล B ได้คือ

$$q = h_B(t_2 - t_B) \quad (2.7)$$

จะเห็นว่าสมการ (2.4) เท่ากับสมการ (2.6) คือ

$$\frac{k_A}{\delta_A} (t_A - t_1) = h_A (t_A - t_1)$$

$$\text{หรือ } h_A = \frac{k_A}{\delta_A} \quad (2.8)$$

และจากสมการ (2.5) เท่ากับสมการ (2.7) นั่นคือ

$$\frac{k_B}{\delta_{AB}} (t_2 - t_B) = h_B (t_A - t_B)$$

$$\text{หรือ } h_B = \frac{k_B}{\delta_B} \quad (2.9)$$

ความร้อนที่เคลื่อนที่จากผิวด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งคือ

$$q = \frac{k}{X} (t_1 - t_2)$$

ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอจากของไหลชนิดหนึ่งผ่านผนังไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง จะมีค่าของระดับของอุณหภูมิต่าง ๆ กันดังนี้คือ t_A , t_1 , t_2 และ t_B ซึ่งอุณหภูมิเหล่านี้จะมีค่าไม่เท่ากัน แต่จะเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ และปริมาณความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านนั้นมีค่าคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า

$$q = h_A (t_A - t_1) = \frac{k}{X} (t_1 - t_2) = h_B (t_2 - t_B)$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{q}{h_A} = (t_A - t_1) \quad \frac{q \cdot X}{k} = (t_1 - t_2); \quad \frac{q}{h_B} = (t_2 - t_B) \quad (2.10)$$

รวมสมการ (2.10) เข้าด้วยกัน ; $(t_A - t_B) = q(1/h_A + X/k + 1/h_B)$

$$\text{หรือ } q = \frac{(t_A - t_B)}{(1/h_A + X/k + 1/h_B)} \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการที่ (2.3) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Q = UA(t_A - t_B) \quad (2.12)$$

$$q = U(t_A - t_B) \quad (2.13)$$

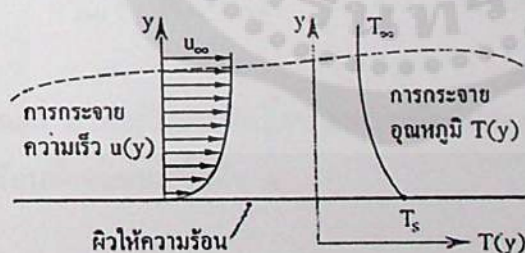
สมการ (2.11) เท่ากับสมการ (2.13) ดังนั้นจะได้ว่า

$$1/U = (1/h_A + X/k + 1/h_B) \quad (2.14)$$

U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของความร้อนทั้งหมด (Overall Heat Transfer Coefficient) มีหน่วยเช่นเดียวกับค่า h คือ $W/m^2 \cdot ^\circ C$

การพาความร้อน

การพาความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล ผลการเคลื่อนไหวของของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น (h , $W/m^2 \cdot ^\circ C$) พลังงานความร้อนถูกโอนถ่ายเป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลและผลจากการเคลื่อนไหวไปทั้งปริมาตรของของไหล

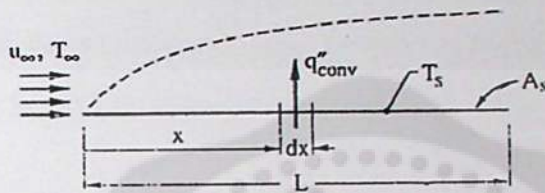


รูปที่ 3 แสดงการกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหล ขณะเกิดการพาความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน

การพาความร้อนจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

- การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวของของไหลเป็นผลของแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อันเกิดจากมีผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ

- การพาความร้อนโดยบังคับ (Forced Convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวของของไหลที่เป็นผลมาจากแรงกระทำจากภายนอก เช่น เครื่องสูบ เครื่องเป่าลม (Blower) ฯลฯ



รูปที่ 4 แสดงการพาความร้อนในชั้นขี้นผิวความร้อนและชั้นขี้นผิวความเร็ว

พิจารณาการพาความร้อนจากผิวของแข็งพื้นที่ A_s อุณหภูมิ T_s ขณะของไหลไหลผ่านด้วยความเร็ว U_∞ และอุณหภูมิ T_∞ คงที่ พลักซ์ความร้อนเฉพาะที่คำนวณเป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling)

$$q''_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty) \quad \text{หน่วยเป็น } \text{W/m}^2 \quad (2.15)$$

โดยที่ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ดังนั้นจะคำนวณอัตราการพาความร้อนทั้งหมดบนพื้นผิว A_s

การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนจากผิวดังกล่าวหนึ่งไปสู่อีกผิวดังกล่าวหนึ่ง ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งถ่ายในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) หรือในรูปของโฟตอนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง การแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถเกิดในสุญญากาศได้

พลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวดังกล่าว คำนวณจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q''_{\text{rad}} = \sigma T_s^4 \quad \text{หน่วยเป็น } \text{W/m}^2 \quad (2.16)$$

โดยที่

T_s คืออุณหภูมิผิวแผ่รังสีในหน่วยองศาสัมบูรณ์ ($^{\circ}\text{C}$)

σ คือค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ และมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^4$

สมการ (2.16) ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiator) หรือวัตถุดำ (Black Body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (Real Surface) ฟลักซ์แผ่รังสีจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้จะขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี ϵ (Emissivity) ของพื้นผิวนั้นด้วย ฟลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจาก

$$q''_{\text{rad}} = \epsilon \sigma T_s^4 \quad \text{หน่วยเป็น } \text{W/m}^2 \quad (2.17)$$



รูปที่ 5 แสดงการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

พิจารณาการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิว A อุณหภูมิ T_s มีสภาพเปล่งรังสี ϵ กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ T_{sur} อัตราการแผ่รังสีสุทธิบนพื้นผิว A คือ

$$q''_{\text{net}} = \frac{Q_{\text{rad, net}}}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (2.18)$$

รูปแบบสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณการแผ่รังสีจะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Q_{\text{rad, net}} = h_r A (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (2.19)$$

โดยที่ h_r คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีหน่วยเป็น $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{\text{sur}}) (T_s^2 + T_{\text{sur}}^2) \quad (2.20)$$

ในรูปที่ 5 ถ้าหากระหว่างพื้นผิว A กับสิ่งแวดล้อมเป็นก๊าซ จะมีการพาความร้อนเกิดร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนด้วย ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสุทธิออกจากพื้นผิว A คำนวณจาก

$$\begin{aligned} Q_{\text{tot}} &= Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad, net}} \quad \text{หน่วยเป็น W} \\ &= hA(T_s - T_{\infty}) + \epsilon A \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \end{aligned} \quad (2.21)$$

ความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Stresses)

วัตถุทุกชนิดจะขยายตัวหรือหดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยจะขยายตัวเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและจะหดตัวลงเมื่อลดอุณหภูมิลง ถ้าวัตถุขยายตัวหรือหดตัวได้อย่างอิสระก็จะไม่เกิดความเค้นขึ้น แต่ถ้าวัตถุไม่อาจขยายตัวหรือหดตัวได้อย่างอิสระก็จะเกิดความเค้นขึ้นภายในวัตถุนั้น ซึ่งเรียกว่าความเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สมมุติวัตถุอันหนึ่งมีความยาว L ปลายทั้งสองข้างถูกยึดแน่นเคลื่อนที่ไม่ได้ ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ไป Δt ส่วนที่เปลี่ยนไปนี้จะเป็น δ ซึ่งจะได้ว่า

$$\delta = L \propto \Delta t \quad (2.22)$$

เมื่อ $\propto$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับวัสดุแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น $/^{\circ}\text{C}$

$$\text{แต่} \quad \epsilon_T = \frac{\delta}{L}$$

$$\epsilon_T = \frac{L \propto \Delta t}{L}$$

$$\epsilon_T = \propto \Delta t$$

ดังนั้น ความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

$$\epsilon_T = \propto \Delta t \quad (2.23)$$

และ

$$\epsilon_T = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = E \epsilon_T$$

$$= E \propto \Delta t$$

ดังนั้น ความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

$$\sigma = \propto \Delta t E \quad (2.24)$$

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่าง ๆ กันตามตำแหน่งต่าง ๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาใน

ทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Elements) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมในรูปที่ 6

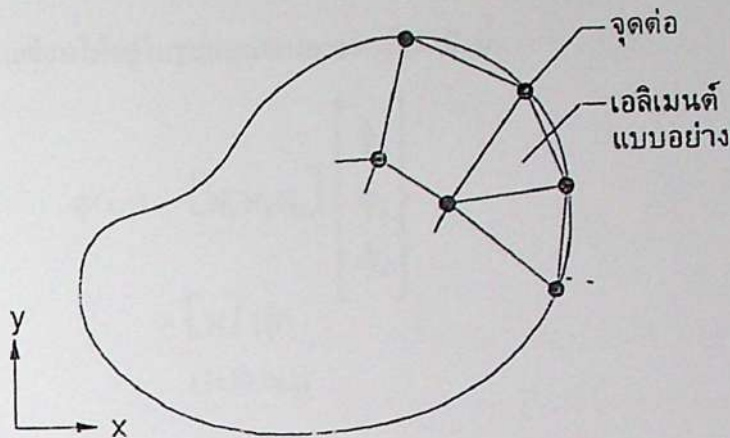
วิธีการดังกล่าวข้างต้นเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้น ๆ ซึ่งมีความหมายว่า หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น นอกจากนั้นความแม่นยำของผลเฉลยยังขึ้นอยู่กับสมมติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation Functions) ที่ใช้กับแต่ละเอลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมุติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง (Linear Distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของเอลิเมนต์

ขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

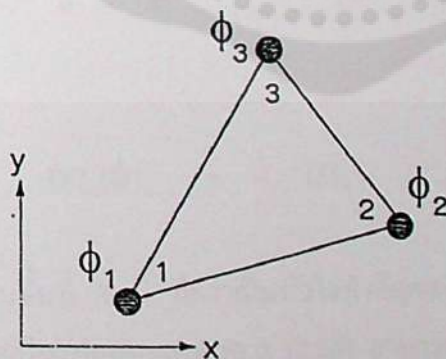
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem)



รูปที่ 6 แสดงการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (เอลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 6) เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูป 7 โดยที่จุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการขยับหรือหดตัว (Displacement) หากเราทำปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของไหล หากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น



รูปที่ 7 แสดงเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

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

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\phi(x,y) &= [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N] \{\phi\} \\ &\quad (1 \times 3)(3 \times 1)\end{aligned}\tag{2.25}$$

โดย $[N]$ คือเมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือเวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในที่นี้ สัญลักษณ์ $[]$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวอน (Row Matrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวตั้ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 7 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e\tag{2.26}$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e\tag{2.27}$$

ขั้นตอนขั้นที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (2.26) สามารถทำได้โดย

- ก. วิธีการโดยตรง (Direct Approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (Variational Approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

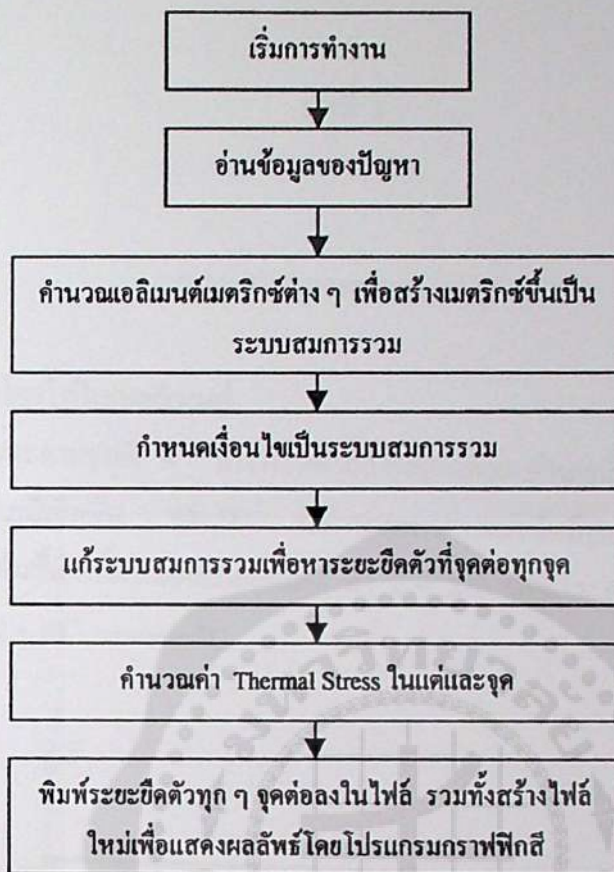
$$\sum(\text{Element Equations}) \Leftrightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.28)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง หรือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ หากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วยังของเหลวหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างเราสามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

ลักษณะการทำงานของโปรแกรมการหา Thermal Stress

- เริ่มต้นการทำงานโดยการอ่านข้อมูลของปัญหา เช่น จำนวนจุดต่อตำแหน่งของจุดต่อต่าง ๆ จำนวนเอลิเมนต์คุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะ ฯลฯ
- คำนวณเอลิเมนต์เมตริกซ์ต่าง ๆ ของทุก ๆ เอลิเมนต์ และส่งผ่านเอลิเมนต์เมตริกซ์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้นี้ไปสร้างเมตริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม
- กำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงในระบบสมการรวม เช่น กำหนดอุณหภูมิ ณ จุดต่อบางจุดตามที่ระบุมาให้
- แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าของตัว ณ จุดต่อทุก ๆ จุด
- คำนวณค่า Thermal Stress ที่จุดต่อต่าง ๆ
- พิมพ์คำตอบของระยะยึดตัวและค่า Thermal Stress ที่จุดต่อทุก ๆ จุด ลงในไฟล์ที่ต้องการรวมทั้งสร้างทั้งไฟล์ใหม่ที่บรรจุข้อมูลทุกอย่างเพื่อใช้กับโปรแกรมกราฟฟิกในการแสดงผลลัพธ์โดยตรงบนจอเครื่องคอมพิวเตอร์



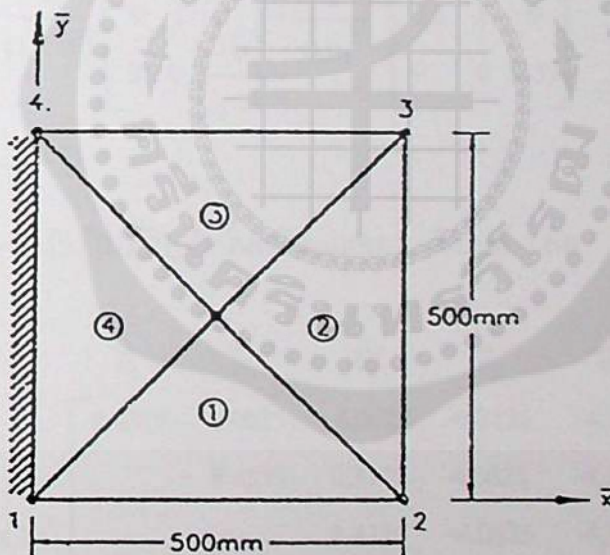
รูปที่ 8 ลักษณะขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการหาค่า Thermal Stress

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

ตัวอย่างการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์

โจทย์ แผ่นโลหะตามรูปที่ 9 ประกอบด้วยสี่เอลิเมนต์ย่อยด้านหนึ่งของแผ่นโลหะยึดแน่น ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50°C จงคำนวณหาการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์และหาความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์ ถ้า $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.30$, $t = 5 \text{ mm}$ และ $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ mm/mm }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 9 แผ่นโลหะภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

วิธีทำ หาค่าสทิงเฟนสเมทริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ 1 $x_1 = 0, y_1 = 0, x_2 = 0.5, y_2 = 0, x_3 = 0.25, y_3 = 0.25$ ดังนั้น

$$\beta_1 = y_2 - y_3 = -0.25 \quad \beta_2 = y_3 - y_1 = 0.25 \quad \beta_3 = y_1 - y_2 = 0$$

$$\gamma_1 = x_3 - x_2 = -0.25 \quad \gamma_2 = x_1 - x_3 = -0.25 \quad \gamma_3 = x_2 - x_1 = 0.5$$

$$\begin{aligned} [\bar{B}] &= \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & \beta_2 & 0 & \beta_3 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 & \gamma_2 & 0 & \gamma_3 \\ \gamma_1 & \beta_1 & \gamma_2 & \beta_2 & \gamma_3 & \beta_3 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{0.125} \begin{bmatrix} -0.25 & 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.25 & 0 & -0.25 & 0 & 0.5 \\ -0.25 & -0.25 & -0.25 & 0.25 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ในกรณีของความเค้นระนาบเมทริกซ์ $[D]$ คือ

$$D = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} = \frac{210 \times 10^9}{0.91} \begin{bmatrix} 1 & 0.3 & 0 \\ 0.3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 \end{bmatrix}$$

เพราะว่าสทiffเนส $[\bar{k}] = tA[\bar{B}]^T[D][\bar{B}]$ ดังนั้นสทiffเนสของเอลิเมนต์ 1 คือ

$$[\bar{k}]_1 = 4.615 \times 10^7 \begin{bmatrix} \bar{u}_1 & \bar{v}_1 & \bar{u}_2 & \bar{v}_2 & \bar{u}_3 & \bar{v}_3 \\ 8.4375 & 4.0625 & -4.0625 & -0.3125 & -4.375 & -3.75 \\ & 8.4375 & 0.3125 & 4.0625 & -4.375 & -12.5 \\ & & 8.4375 & -4.0625 & -4.375 & 3.75 \\ & & & 8.4375 & 4.375 & -12.5 \\ & & & & 8.75 & 0 \\ & & & & & 25 \end{bmatrix}$$

เอลิเมนต์ 2, $x_2 = 0.5$, $y_2 = 0$, $x_3 = 0.5$, $x_3 = 0.25$, $y_3 = 0.25$ และ

$$\begin{aligned} \beta_2 &= 0.05 & \beta_3 &= 0.25 & \beta_3 &= -0.5 \\ \gamma_2 &= -0.25 & \gamma_3 &= 0.25 & \gamma_3 &= 0 \end{aligned}$$

stiffness of element 2 is

$$[k]_2 = 4.615 \times 10^7 \begin{bmatrix} \bar{u}_2 & \bar{v}_2 & \bar{u}_3 & \bar{v}_3 & \bar{u}_5 & \bar{v}_5 \\ 8.4375 & -4.0625 & 4.0625 & -0.3125 & -12.5 & 4.375 \\ & 8.4375 & 0.3125 & -4.0625 & 3.75 & -4.375 \\ & & 8.437 & 4.0625 & -12.5 & -4.375 \\ & & & 8.4375 & -3.75 & -4.375 \\ & & & & 25 & 0 \\ & & & & & 8.75 \end{bmatrix}$$

element 3 in the same way the stiffness of element 3 is

$$[k]_3 = 4.615 \times 10^7 \begin{bmatrix} \bar{u}_3 & \bar{v}_3 & \bar{u}_4 & \bar{v}_4 & \bar{u}_5 & \bar{v}_5 \\ 8.437 & 4.0625 & -4.0625 & -0.3125 & -4.375 & -3.75 \\ & 8.4375 & 0.3125 & 4.0625 & -4.375 & -12.5 \\ & & 8.4375 & -4.0625 & -4.375 & 3.75 \\ & & & 8.4375 & 4.375 & -12.5 \\ & & & & 8.75 & 0 \\ & & & & & 25 \end{bmatrix}$$

element 4 stiffness of element 4 is

$$[k]_4 = 4.615 \times 10^7 \begin{bmatrix} \bar{u}_4 & \bar{v}_4 & \bar{u}_1 & \bar{v}_1 & \bar{u}_5 & \bar{v}_5 \\ 8.4375 & -4.0625 & 4.0625 & -0.3125 & -12.5 & -4.375 \\ & 8.4375 & 0.3125 & -4.0625 & 3.75 & -4.375 \\ & & 8.4375 & 4.0625 & -12.5 & -4.375 \\ & & & 8.431 & -3.75 & -4.375 \\ & & & & 25 & 0 \\ & & & & & 8.75 \end{bmatrix}$$

รวม stiffness ของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน เราจะได้รับ stiffness ของระบบรวมคือ

$$\bar{[k]} = 4.615 \times 10^7 \begin{bmatrix} \bar{u}_1 & \bar{v}_1 & \bar{u}_2 & \bar{v}_2 & \bar{u}_3 & \bar{v}_3 & \bar{u}_4 & \bar{v}_4 & \bar{u}_5 & \bar{v}_5 \\ 16.874 & 8.125 & -4.0625 & -0.3125 & 0 & 0 & 4.0625 & 0.3125 & -16.875 & -8.125 \\ & 16.874 & 0.3125 & 4.0625 & 0 & 0 & -0.3125 & -4.0625 & -8.125 & -16.875 \\ & & 16.874 & -8.125 & 4.0625 & -0.3125 & 0 & 0 & -16.875 & 8.125 \\ & & & 16.875 & 0.3125 & -4.0625 & 0 & 0 & 8.125 & -16.875 \\ & & & & 16.875 & 8.125 & -4.0625 & -0.3125 & -16.875 & -8.125 \\ & & & & & 16.875 & 0.3125 & 4.0625 & -8.125 & -16.875 \\ & & & & & & 16.875 & -8.125 & -16.875 & 8.125 \\ & & & & & & & 16.875 & 8.125 & -16.875 \\ & & & & & & & & 67.5 & 0 \\ & & & & & & & & & 67.5 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์ของแรงเนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ 1

$$\{f_T\} = \frac{\alpha E t T}{2(1-\nu)} \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \gamma_1 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{Bmatrix} = \frac{(12 \times 10^{-6})(210 \times 10^9)(0.005\text{m})(50)}{2(1-0.3)} = \begin{Bmatrix} -0.25 \\ -0.25 \\ 0.25 \\ -0.25 \\ 0 \\ 0.5 \end{Bmatrix}$$

$$= 450,000 \begin{Bmatrix} -0.25 \\ -0.25 \\ 0.25 \\ -0.25 \\ 0 \\ 0.5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{T1x} \\ F_{T1y} \\ F_{T2x} \\ F_{T2y} \\ F_{T3x} \\ F_{T3y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -112,500 \\ -112,500 \\ 112,500 \\ -112,500 \\ 0 \\ 225,000 \end{Bmatrix} \text{ N}$$

เอลิเมนต์ 2

$$\{f_T\} = 450,000 \begin{Bmatrix} 0.25 \\ -0.25 \\ 0.25 \\ 0.25 \\ -0.5 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{T2x} \\ F_{T2y} \\ F_{T3x} \\ F_{T3y} \\ F_{T5x} \\ F_{T5y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 112,500 \\ -112,500 \\ 112,500 \\ 112,500 \\ -225,000 \\ 0.5 \end{Bmatrix} N$$

เอลิเมนต์ 3

$$\{f_T\} = 450,000 \begin{Bmatrix} 0.25 \\ 0.25 \\ -0.25 \\ 0.25 \\ 0 \\ -0.5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{T3x} \\ F_{T3y} \\ F_{T4x} \\ F_{T4y} \\ F_{T5x} \\ F_{T5y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 112,500 \\ 112,500 \\ -112,500 \\ 112,500 \\ 0 \\ -225,000 \end{Bmatrix} N$$

เอลิเมนต์ 4

$$\{f_T\} = 450,000 \begin{Bmatrix} -0.25 \\ 0.25 \\ -0.25 \\ -0.25 \\ 0.5 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{T4x} \\ F_{T4y} \\ F_{T1x} \\ F_{T1y} \\ F_{T5x} \\ F_{T5y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -112,500 \\ 112,500 \\ -112,500 \\ -112,500 \\ 225,000 \\ 0 \end{Bmatrix} N$$

ดังนั้นเมทริกซ์ของแรงในระบบรวมคือ

$$\begin{Bmatrix} F_{T1x} \\ F_{T1y} \\ F_{T2x} \\ F_{T2y} \\ F_{T3x} \\ F_{T3y} \\ F_{T4x} \\ F_{T4y} \\ F_{T5x} \\ F_{T5y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -225,000 \\ -225,000 \\ 225,000 \\ -225,000 \\ 225,000 \\ 225,000 \\ -225,000 \\ 225,000 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot N$$

เนื่องจากเงื่อนไขขอบ $\bar{u}_1 = \bar{v}_1 = \bar{u}_4 = \bar{v}_4 = 0$, ดังนั้นสมการของระบบจะลดขนาดคือ

$$\begin{Bmatrix} f_{T2x} = 225 \\ f_{T2y} = -225 \\ f_{T3x} = 225 \\ f_{T3y} = 225 \\ f_{T5x} = 0 \\ f_{T5y} = 0 \end{Bmatrix} = 46150 \begin{bmatrix} \bar{u}_2 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{v}_3 \\ \bar{u}_5 \\ \bar{v}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_2 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{v}_3 \\ \bar{u}_5 \\ \bar{v}_5 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} 16.874 & -8.125 & 4.0625 & -0.3125 & -16.875 & 8.125 \\ -8.125 & 16.875 & 0.3125 & -4.0625 & 8.125 & -16.875 \\ 4.0625 & 0.3125 & 16.875 & 8.125 & -16.875 & -8.125 \\ -0.3125 & -4.0625 & 8.125 & 16.875 & -8.125 & -16.875 \\ -16.875 & 8.125 & -16.875 & -8.125 & 67.5 & 0 \\ 8.125 & -16.875 & -8.125 & -16.875 & 0 & 67.5 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นการกระจัดที่แต่ละจุดของเอลิเมนต์คือ

$$\begin{Bmatrix} \bar{u}_2 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{v}_3 \\ \bar{u}_5 \\ \bar{v}_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 3.327 \times 10^{-4} \\ -1.911 \times 10^{-4} \\ 3.327 \times 10^{-4} \\ 1.911 \times 10^{-4} \\ 2.123 \times 10^{-4} \\ 6.654 \times 10^{-4} \end{Bmatrix}$$

เนื่องจากความเค้นในแต่ละเอลิเมนต์หาได้จาก $\{\sigma\} = [D][B]\{\bar{d}\} - [D]\{\epsilon_T\}$

เอลิเมนต์ 1

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & \beta_2 & 0 & \beta_3 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 & \gamma_2 & 0 & \gamma_3 \\ \gamma_1 & \beta_1 & \gamma_2 & \beta_2 & \gamma_3 & \beta_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{v}_3 \end{Bmatrix}$$

$$- \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{210 \times 10^9}{0.91} \begin{bmatrix} 1 & 0.3 & 0 \\ 0.3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 \end{bmatrix}$$

$$\times \frac{1}{0.125} \begin{bmatrix} -0.25 & 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.25 & 0 & -0.25 & 0 & 0.5 \\ -0.25 & -0.25 & -0.25 & 0.25 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.327 \times 10^{-4} \\ 3.327 \times 10^{-4} \\ 3.327 \times 10^{-4} \\ 3.327 \times 10^{-4} \end{Bmatrix}$$

$$- \frac{210 \times 10^9}{0.91} \begin{bmatrix} 1 & 0.3 & 0 \\ 0.3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3.5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (12 \times 10^{-6})(50) \\ (12 \times 10^{-6})(50) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

หรือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.800 \times 10^8 \\ 1.800 \times 10^8 \\ -1.600 \times 10^7 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1.8 \times 10^8 \\ 1.8 \times 10^8 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -4.57 \times 10^7 \\ -1.60 \times 10^7 \end{Bmatrix} \text{ Pa}$$

ในการทำนองเดียวกัน ความเค้นในเอลิเมนต์ 2, 3 และ 4 คือ

เอลิเมนต์ 2

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.640 \times 10^8 \\ 2.097 \times 10^8 \\ -2150 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1.8 \times 10^8 \\ 1.8 \times 10^8 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1.6 \times 10^7 \\ 2.973 \times 10^7 \\ -2150 \end{Bmatrix} \text{ Pa}$$

เอลิเมนต์ 3

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.800 \times 10^8 \\ 1.342 \times 10^8 \\ 1.600 \times 10^7 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1.8 \times 10^8 \\ 1.8 \times 10^8 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -4.57 \times 10^7 \\ -1.60 \times 10^7 \end{Bmatrix} \text{ Pa}$$

เอลิเมนต์ 4

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.960 \times 10^8 \\ 5.880 \times 10^8 \\ 2150 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1.8 \times 10^8 \\ 1.8 \times 10^8 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.6 \times 10^7 \\ -1.212 \times 10^8 \\ 2150 \end{Bmatrix} \text{ Pa}$$

ข้อกำหนดในการออกแบบ

1. พิจารณาการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากความร้อนในรูปของการโก่งตัว
2. พิจารณาวัตถุที่จะนำมาใช้ต้องมีความคงทน ประกอบด้วย เหล็กหล่อ, เหล็กกล้าไร้สนิม, อะลูมิเนียม
3. พิจารณาถึงการสร้างอุปกรณ์จริงมีความเป็นไปได้หรือไม่
4. พิจารณาราคาของวัสดุที่นำมาใช้



บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

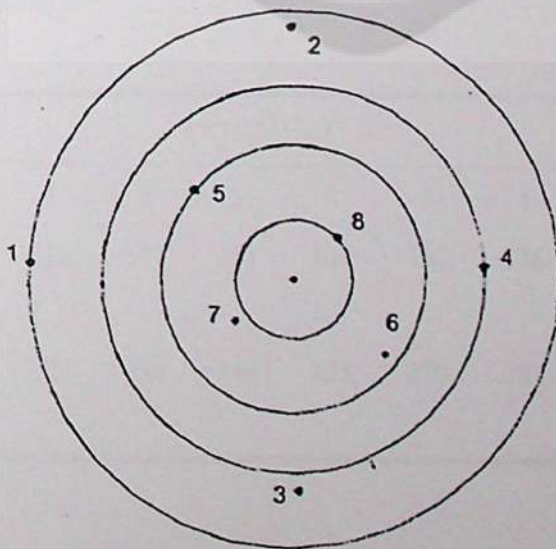
บทนี้จะกล่าวถึง ผลการวัดอุณหภูมิจริงของหัวเตาแก๊สแบบที่ใช้งานทั่วไปตามท้องตลาดและนำไปเป็นข้อมูลสำหรับโปรแกรมเพื่อคำนวณหา ขนาด , รูปร่าง ที่ก่อให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสม

อุปกรณ์การทดลอง ประกอบด้วย

1. เทอร์โมคัพเพิล ชนิด K วัดอุณหภูมิ $^{\circ}\text{C} \pm 5$
2. หน้าจออ่านผลอุณหภูมิ
3. หัวเตาแก๊ส

ขั้นตอนการทดลอง

1. ยึดเทอร์โมคัพเพิล ไว้ที่จุดต่าง ๆ ดังรูปที่ 10
2. ปรับอัตราการไหลของแก๊สสูงสุด
3. บันทึกผลอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิคงที่
4. เมื่อมีการะลงบนหัวเตาแก๊สแล้ว ย้อนกลับ ไปทำตามขั้นตอน 2 และ 3



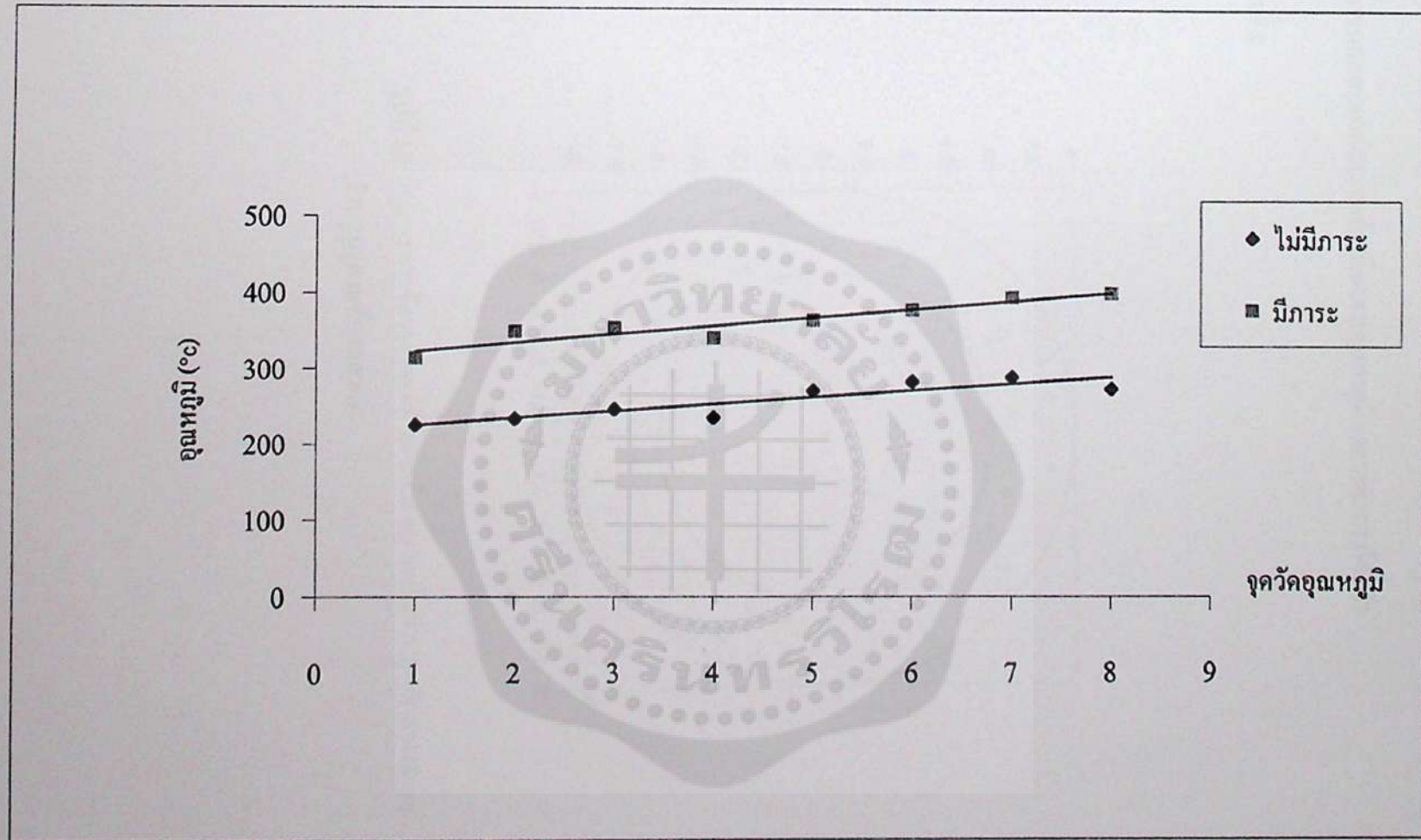
รูปที่ 10 แสดงจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 11 ตัวอย่างหัวเตาแก๊สที่นำมาวิเคราะห์

ตารางที่ 1 ผลการวัดอุณหภูมิ

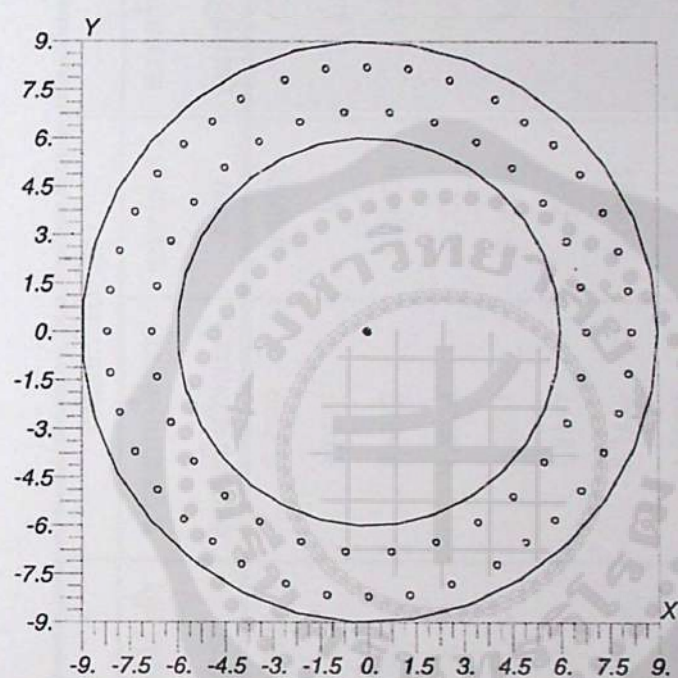
	อุณหภูมิ (°C)							
จุดวัด	1	2	3	4	5	6	7	8
กรณีมีภาระบนหัวเตาแก๊ส	313	347	352	339	362	376	392	368
กรณีไม่มีภาระบนหัวเตาแก๊ส	226	234	246	235	270	282	288	273



รูปที่ 12 กราฟแสดงอุณหภูมิ ณ จุดวัดอุณหภูมิ

ผลการทดสอบหาค่าความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ และระยะการโก่งตัว

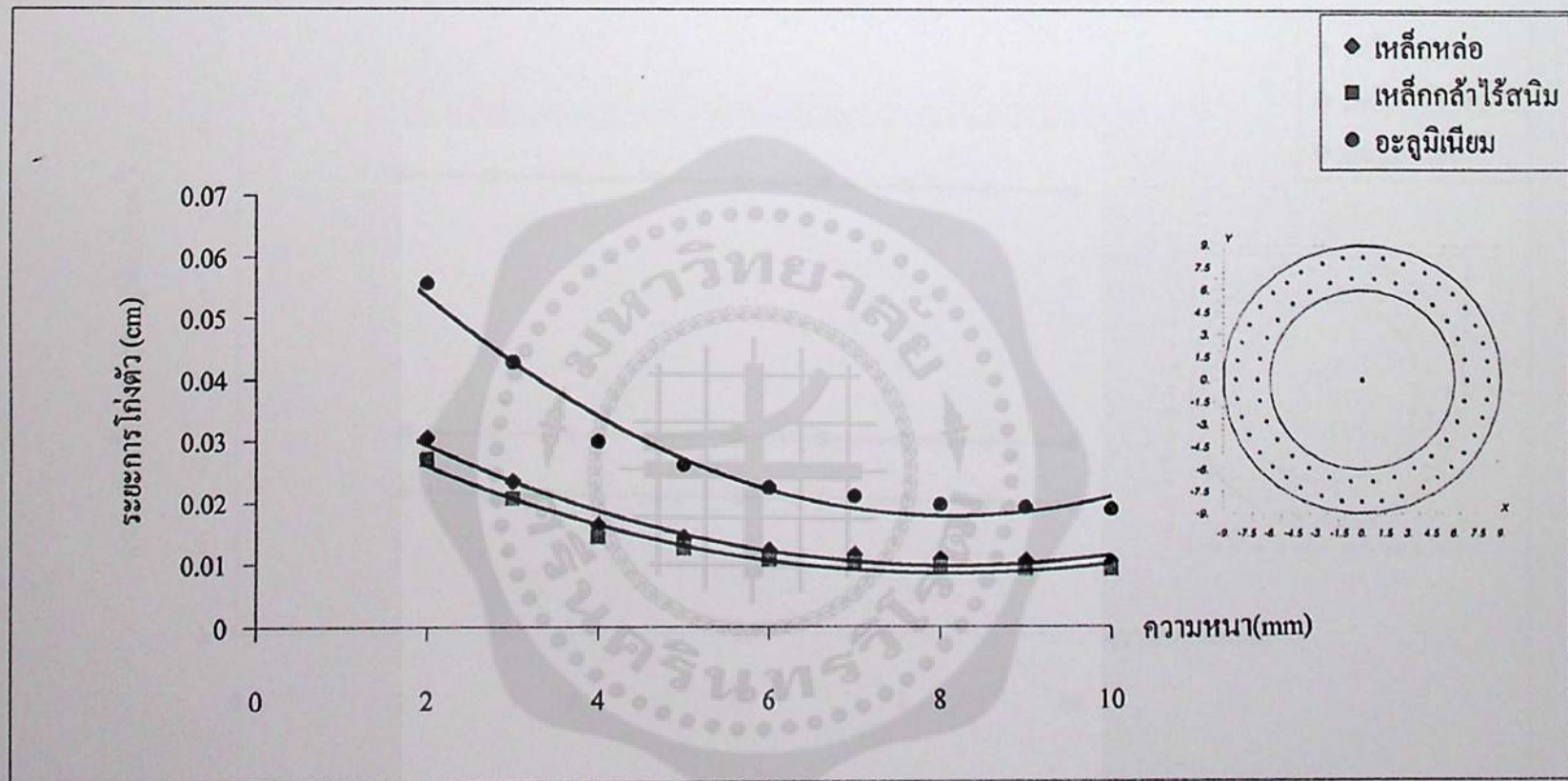
แบบที่ 1



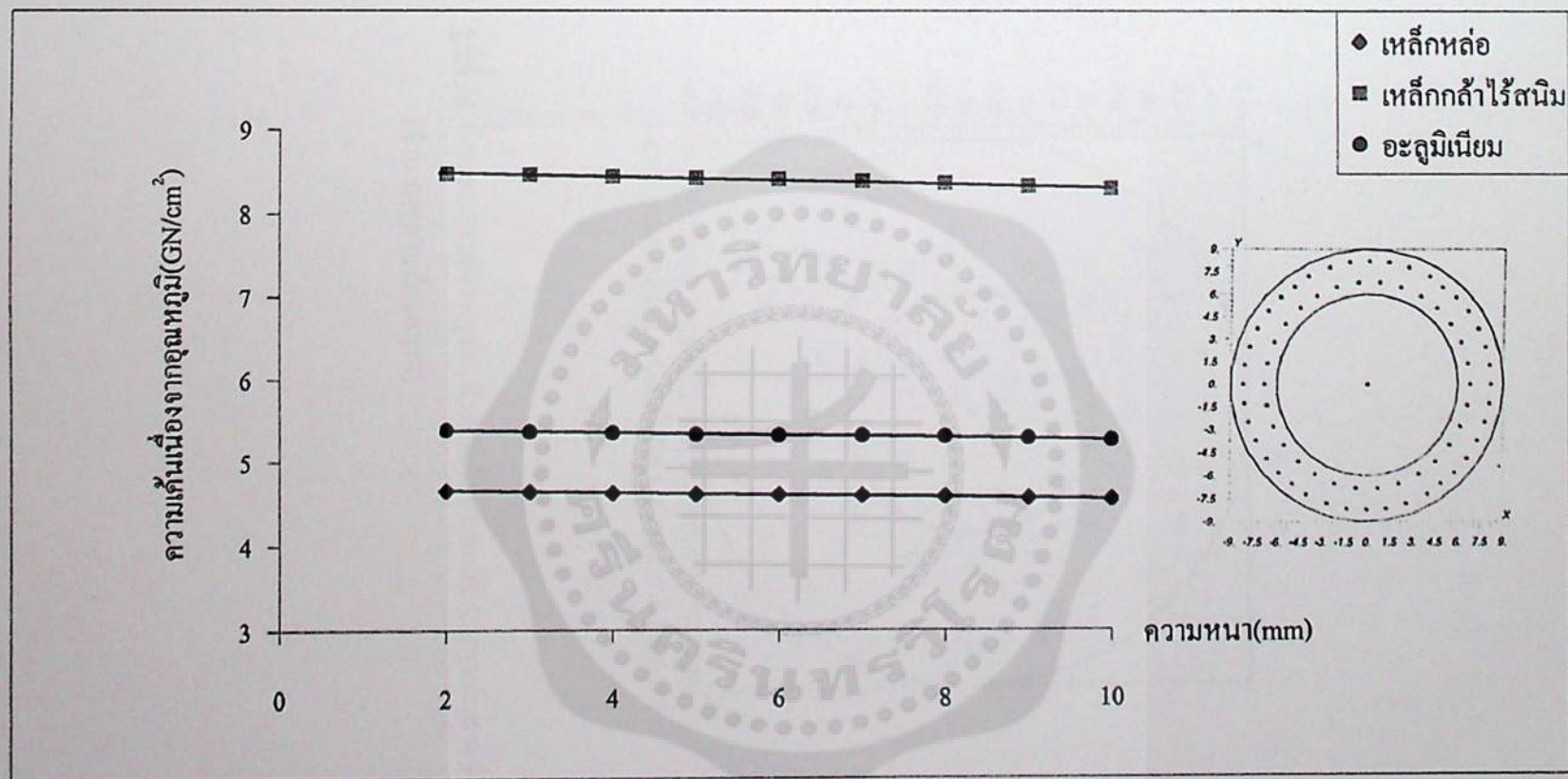
รูปที่ 13 ลักษณะการจัดวางรูของหัวเตาแก๊ส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm
(จำนวนรูตามท้องตลาด)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการโก่งตัวเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวเตาแก๊ส 18 cm (จากรูปที่ 13)

ความหนา (mm)		เหล็กหล่อ		เหล็กกล้าไร้สนิม		อะลูมิเนียม	
		ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)
2	Max	4.6600	0.0306	8.4799	0.02705	5.3843	0.05565
	Min	1.2230	0	1.9111	0	1.5076	0
4	Max	4.6340	0.01641	8.4312	0.01439	5.3418	0.02984
	Min	1.2040	0	1.8824	0	1.4827	0
6	Max	4.6120	0.01229	8.3934	0.01074	5.3173	0.0224
	Min	1.2080	0	1.8847	0	1.5011	0
8	Max	4.5890	0.01076	8.3456	0.00939	5.2976	0.01957
	Min	1.2230	0	1.9002	0	1.5011	0
10	Max	4.5560	0.01028	8.2838	0.00909	5.2560	0.0188
	Min	1.2410	0	1.9229	0	1.5204	0

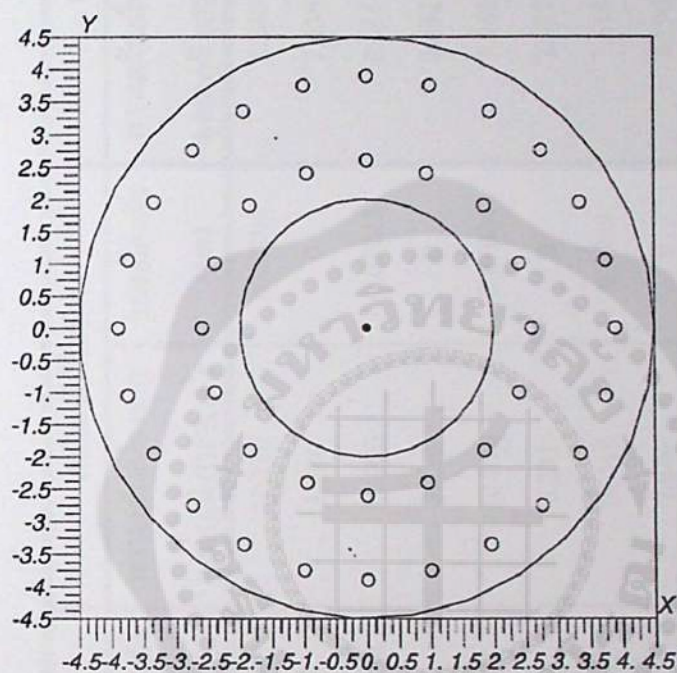


รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโก่งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊ส
แบบที่ 1



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนา
ของหัวเตาแก๊สแบบที่ 1

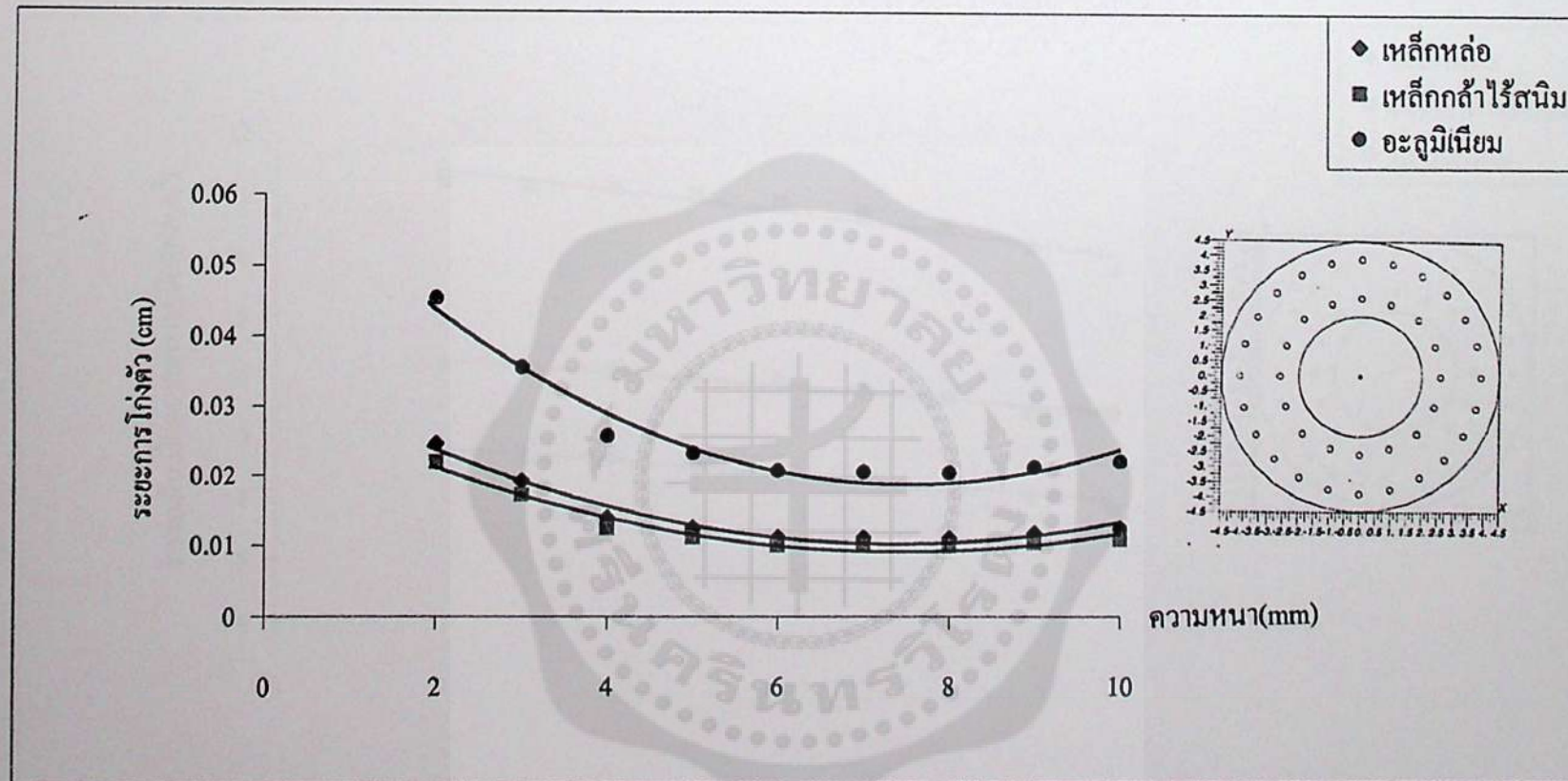
แบบที่ 2



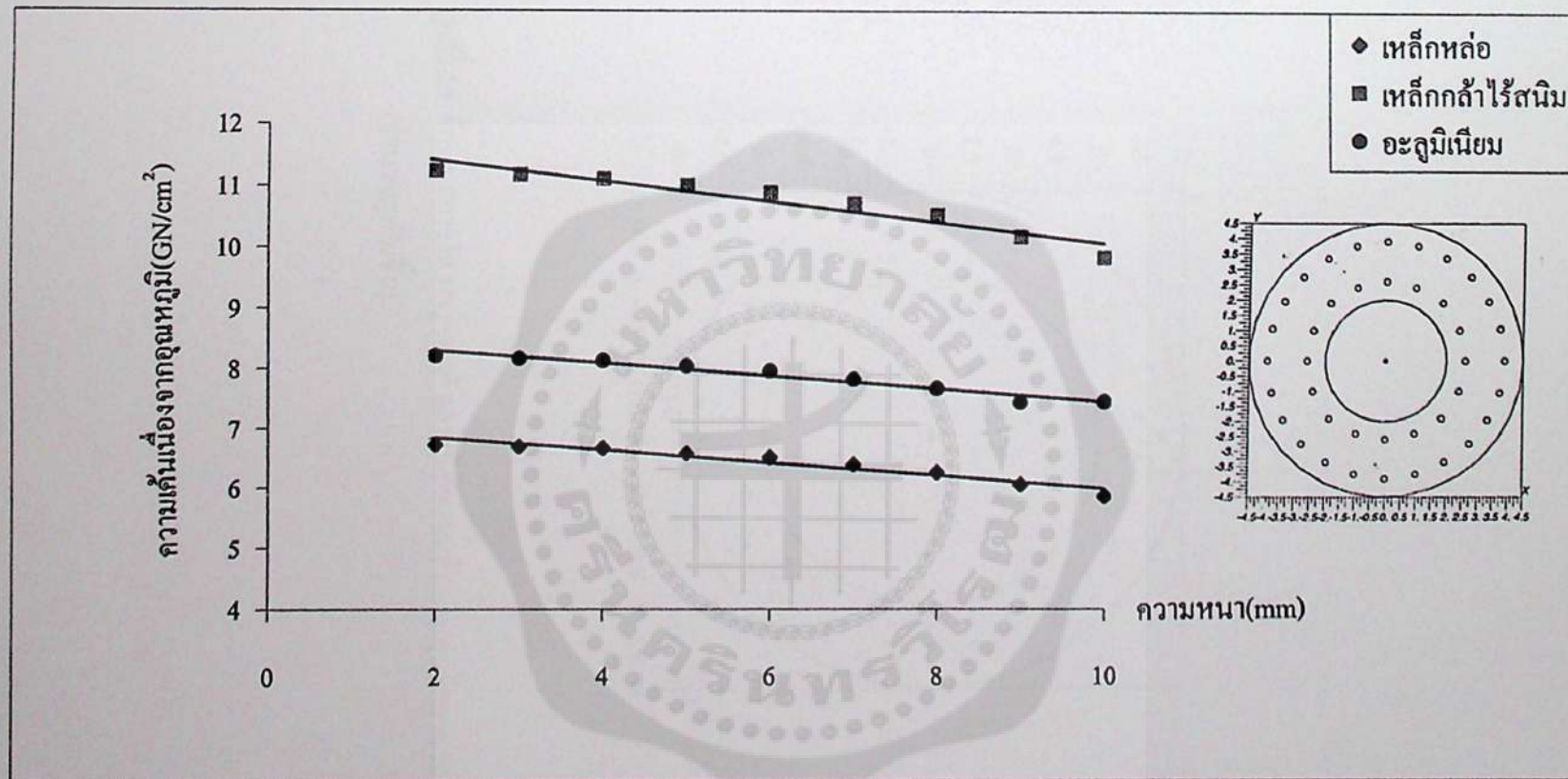
รูปที่ 16 ลักษณะการจัดวางรูของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm
(จำนวนรูตามท้องตลาด)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวเตาแก๊ส 9 cm (จากรูปที่ 16)

ความหนา (mm)		เหล็กหล่อ		เหล็กกล้าไร้สนิม		อะลูมิเนียม	
		ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)
2	Max	6.727	0.0247	11.230	0.02204	8.203	0.0454
	Min	1.884	0	3.236	0	2.436	0
4	Max	6.65	0.013928	11.100	0.01245	8.111	0.02569
	Min	1.884	0	3.236	0	2.432	0
6	Max	6.509	0.01123	10.870	0.01004	7.948	0.02074
	Min	1.886	0	3.231	0	2.427	0
8	Max	6.254	0.01109	10.510	0.0099	7.656	0.02042
	Min	1.614	0	2.849	0	2.190	0
10	Max	5.857	0.01253	9.817	0.01093	7.205	0.02208
	Min	1.34	0	2.416	0	1.887	0

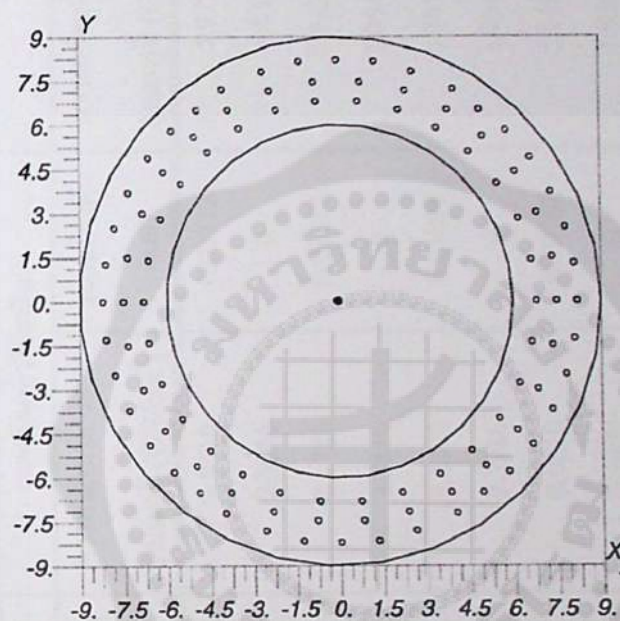


รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโก่งตัวกับความหนาของหัวเดาแก๊ส
แบบที่ 2



รูปที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของ
หัวเตาแก๊สแบบที่ 2

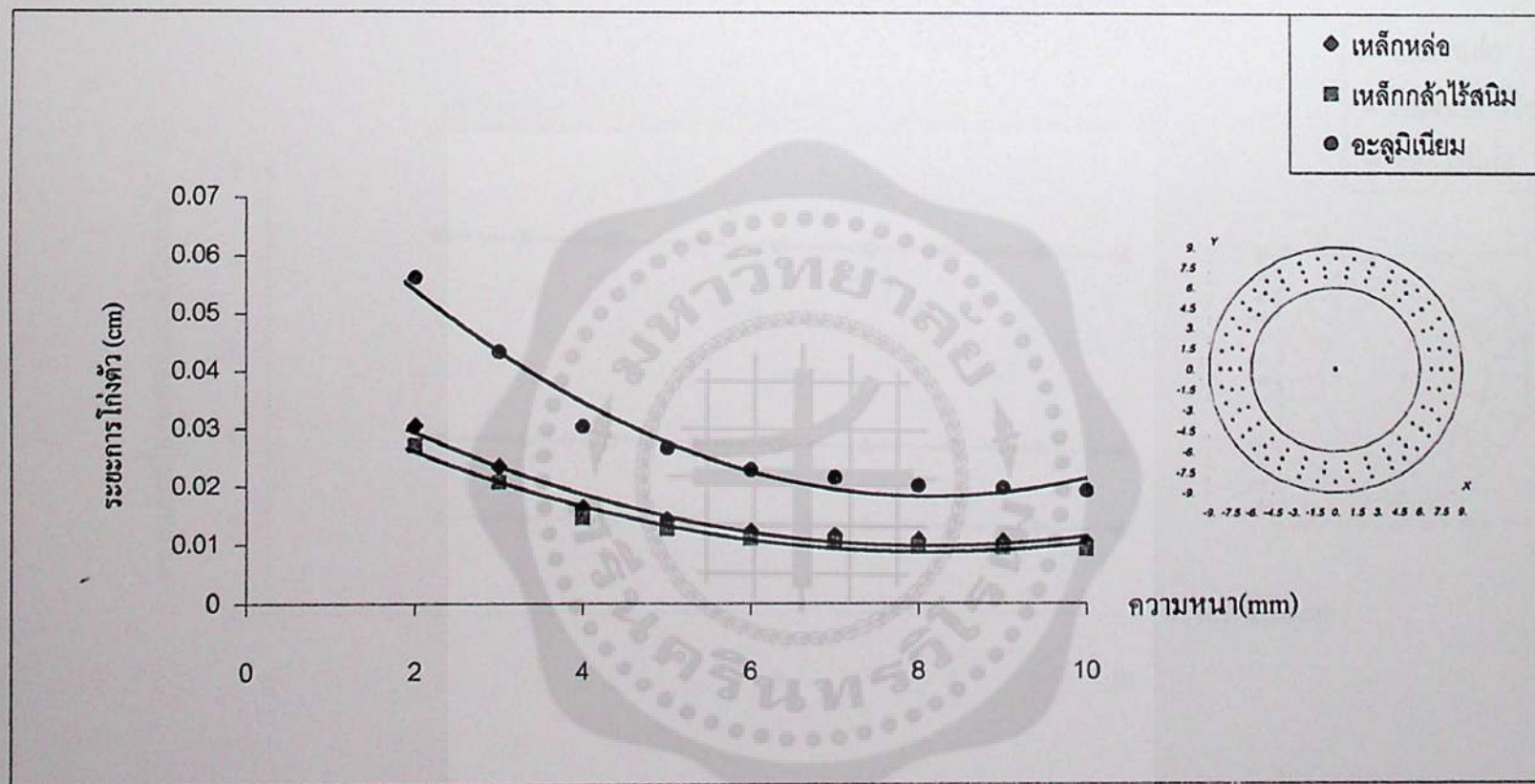
แบบที่ 3



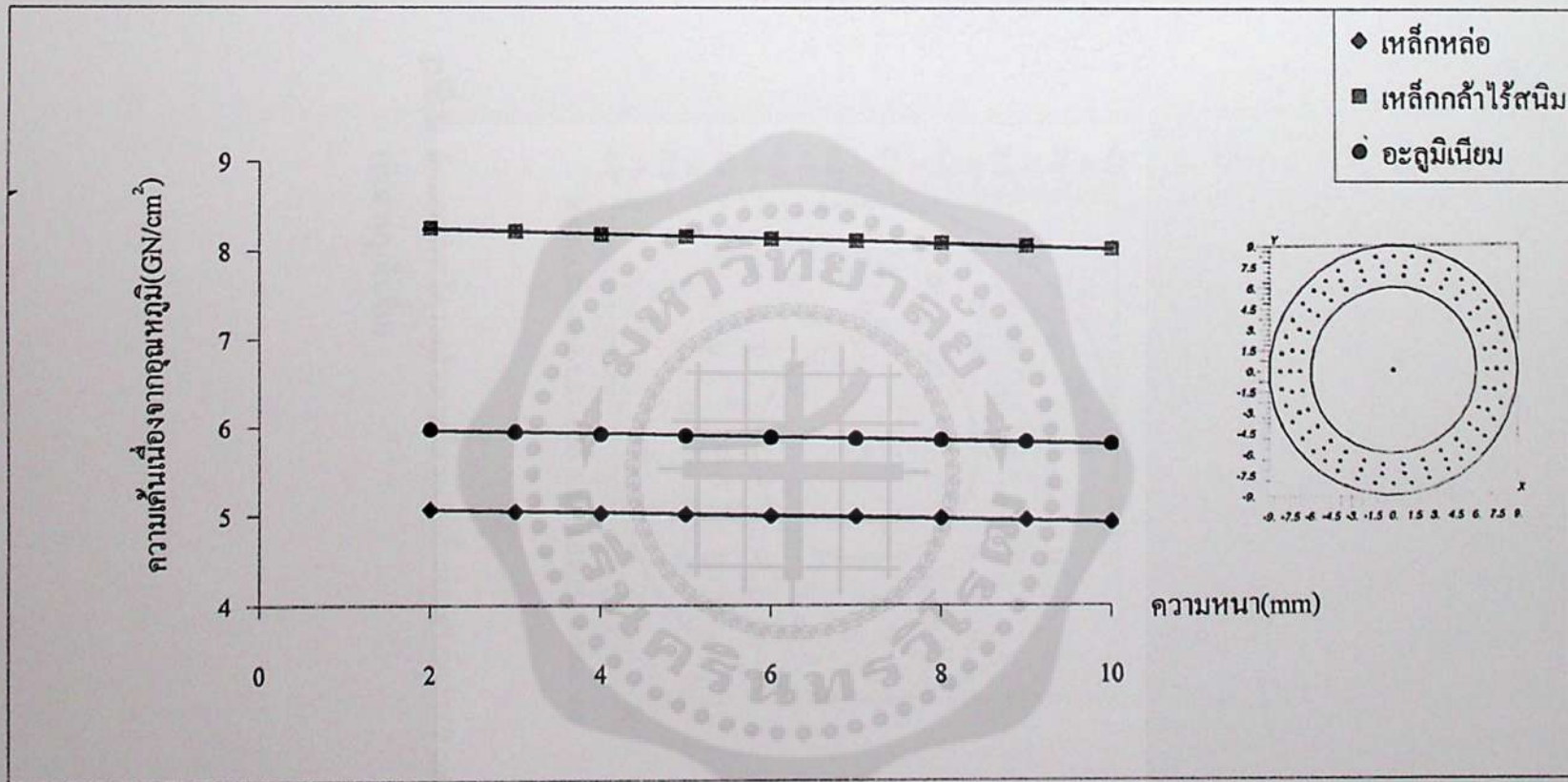
รูปที่ 19 ลักษณะการจัดวางรูปของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm
(จำนวนรูเพิ่มขึ้น)

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการโก่งตัวเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวเตาแก๊ส 18 cm (จากรูปที่ 19)

ความหนา (mm)		เหล็กหล่อ		เหล็กกล้าไร้สนิม		อะลูมิเนียม	
		ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)
2	Max	5.0733	0.030602	8.2510	0.02712	5.972	0.05624
	Min	1.3640	0	2.3810	0	1.858	0
4	Max	5.0280	0.01641	8.1720	0.01458	5.9134	0.030327
	Min	1.3668	0	2.3810	0	1.8549	0
6	Max	5.0010	0.01229	8.1270	0.01098	5.8818	0.022935
	Min	1.3740	0	2.3910	0	1.8616	0
8	Max	4.9720	0.01076	8.0810	0.00962	5.8458	0.020159
	Min	1.3850	0	2.4080	0	1.8706	0
10	Max	4.9310	0.01028	8.0166	0.00921	5.8034	0.019292
	Min	1.3990	0	2.4290	0	1.8727	0

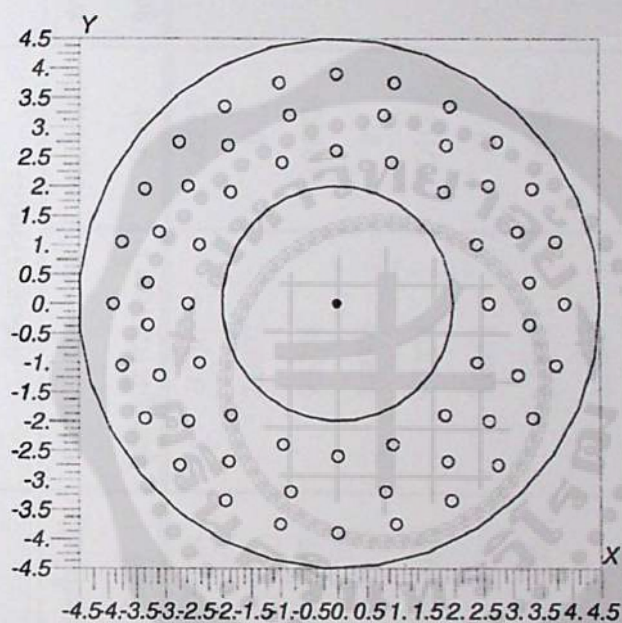


รูปที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโก่งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊ส
แบบที่ 3



รูปที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากจุดหมุนกับความหนาของ
หัวเตาแก๊สแบบที่ 3

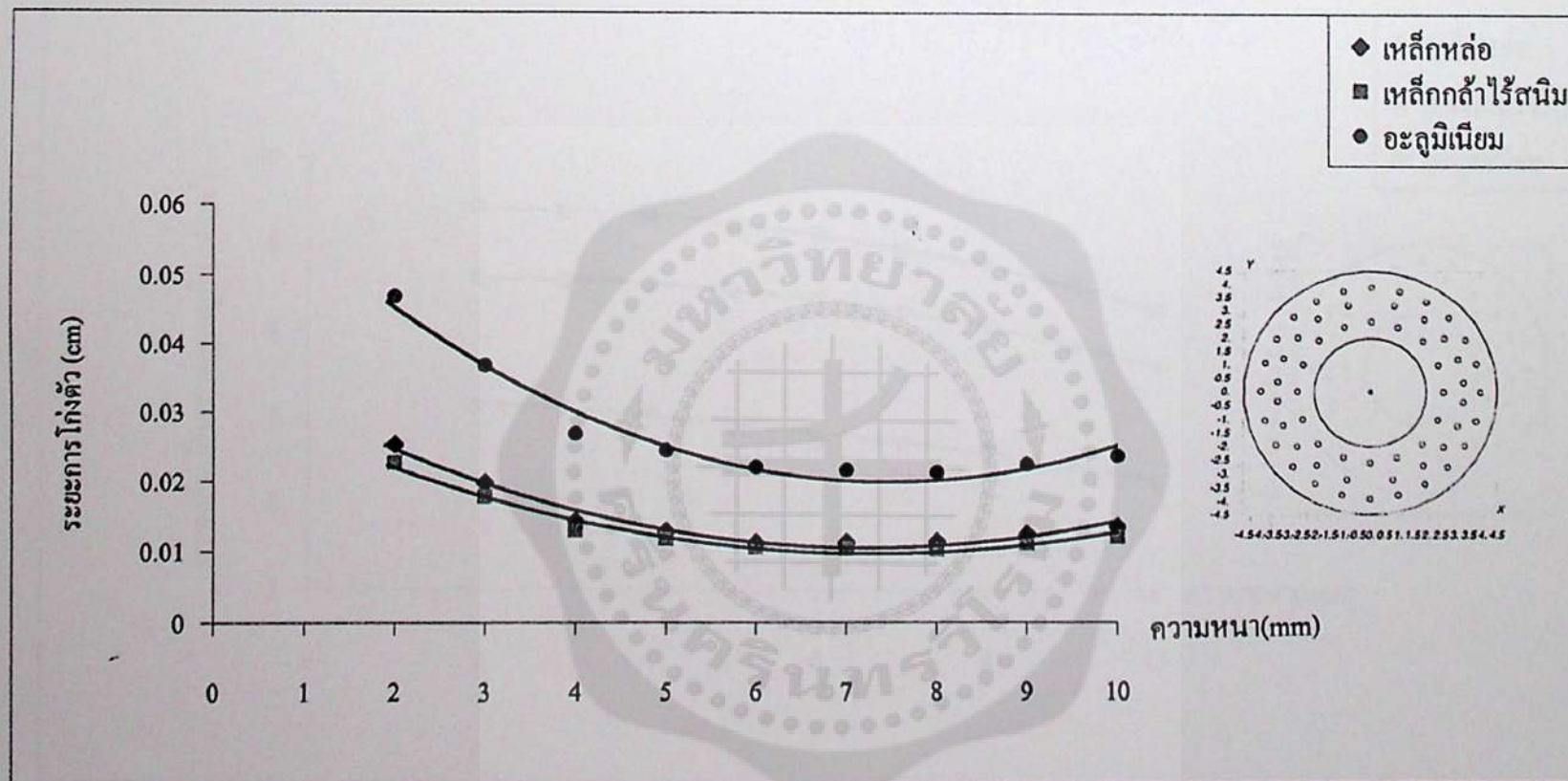
แบบที่ 4



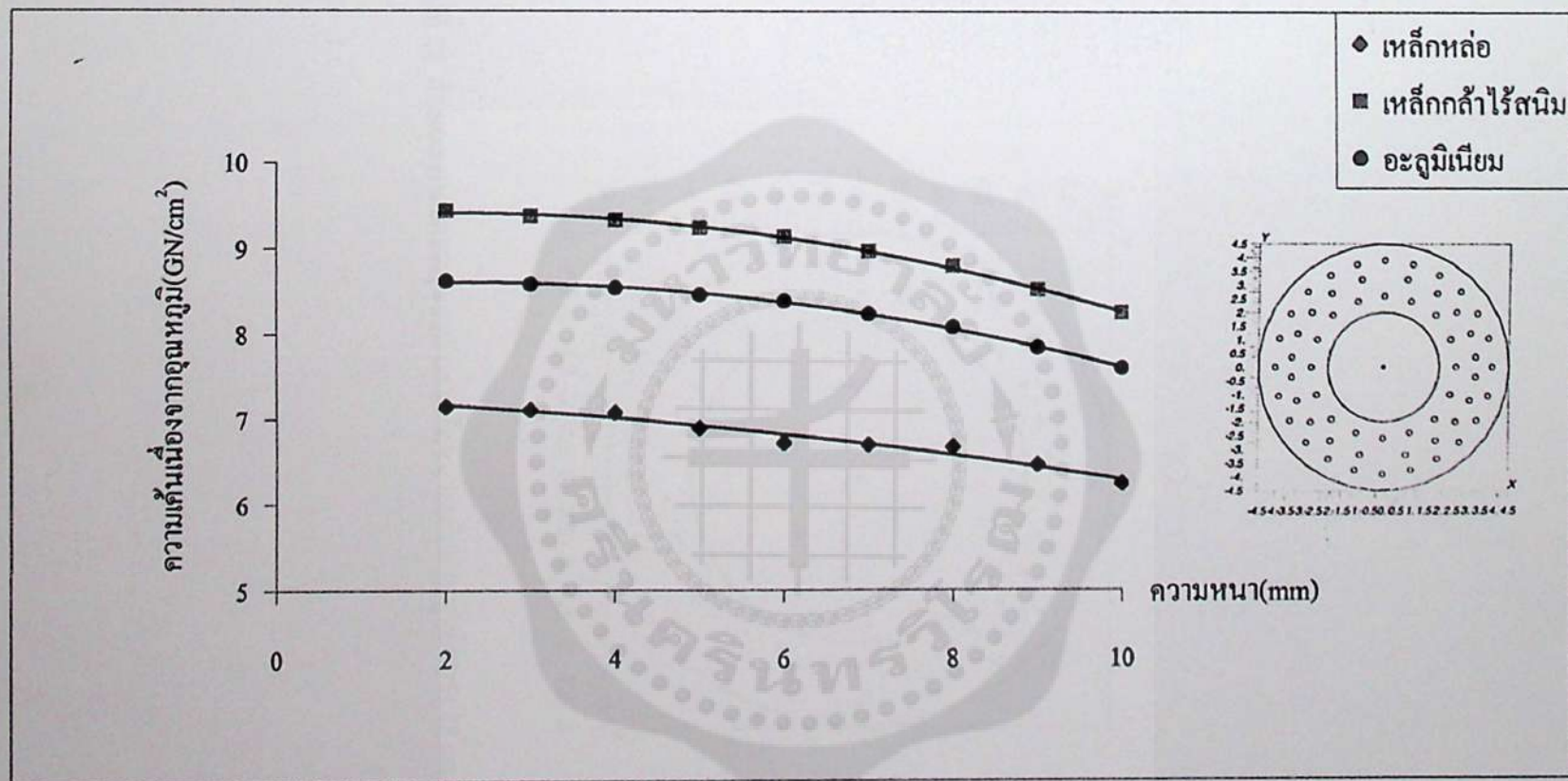
รูปที่ 22 ลักษณะการจัดวางหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm
(จำนวนรูเพิ่มขึ้น)

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวเตาแก๊ส 9 cm (จากรูปที่ 22)

ความหนา (mm)		เหล็กหล่อ		เหล็กกล้าไร้สนิม		อะลูมิเนียม	
		ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm^2)	ระยะโก่งตัว (cm)
2	Max	7.1469	0.02538	9.435	0.0227	8.6238	0.04689
	Min	1.8521	0	2.9807	0	2.4577	0
4	Max	7.0716	0.01447	9.3248	0.01301	8.5346	0.02691
	Min	1.8433	0	3.0006	0	2.4145	0
6	Max	6.7111	0.01123	9.1324	0.01064	8.3717	0.02204
	Min	1.7814	0	3.0268	0	2.4165	0
8	Max	6.6668	0.01135	8.7841	0.01025	8.0709	0.02125
	Min	1.6659	0	2.8807	0	2.2615	0
10	Max	6.2398	0.01356	8.2383	0.0121	7.5909	0.02368
	Min	4.1317	0	2.4705	0	1.9590	0

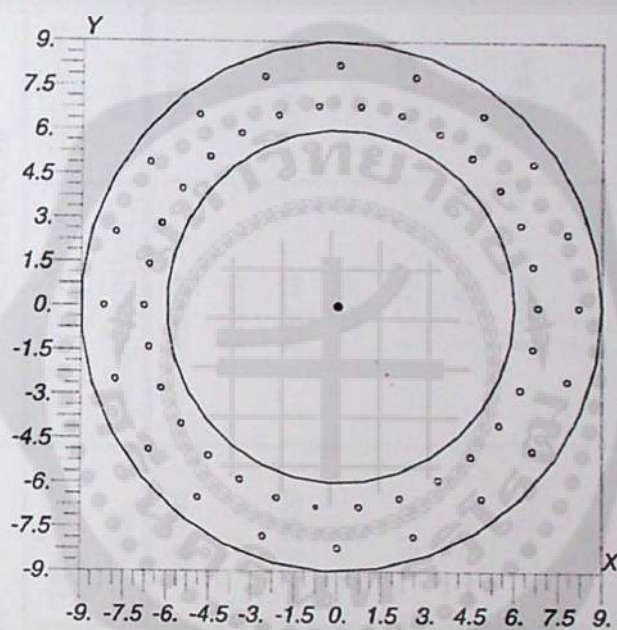


รูปที่ 23 กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโก่งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊ส
แบบที่ 4



รูปที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของ
หัวเตาแก๊สแบบที่ 4

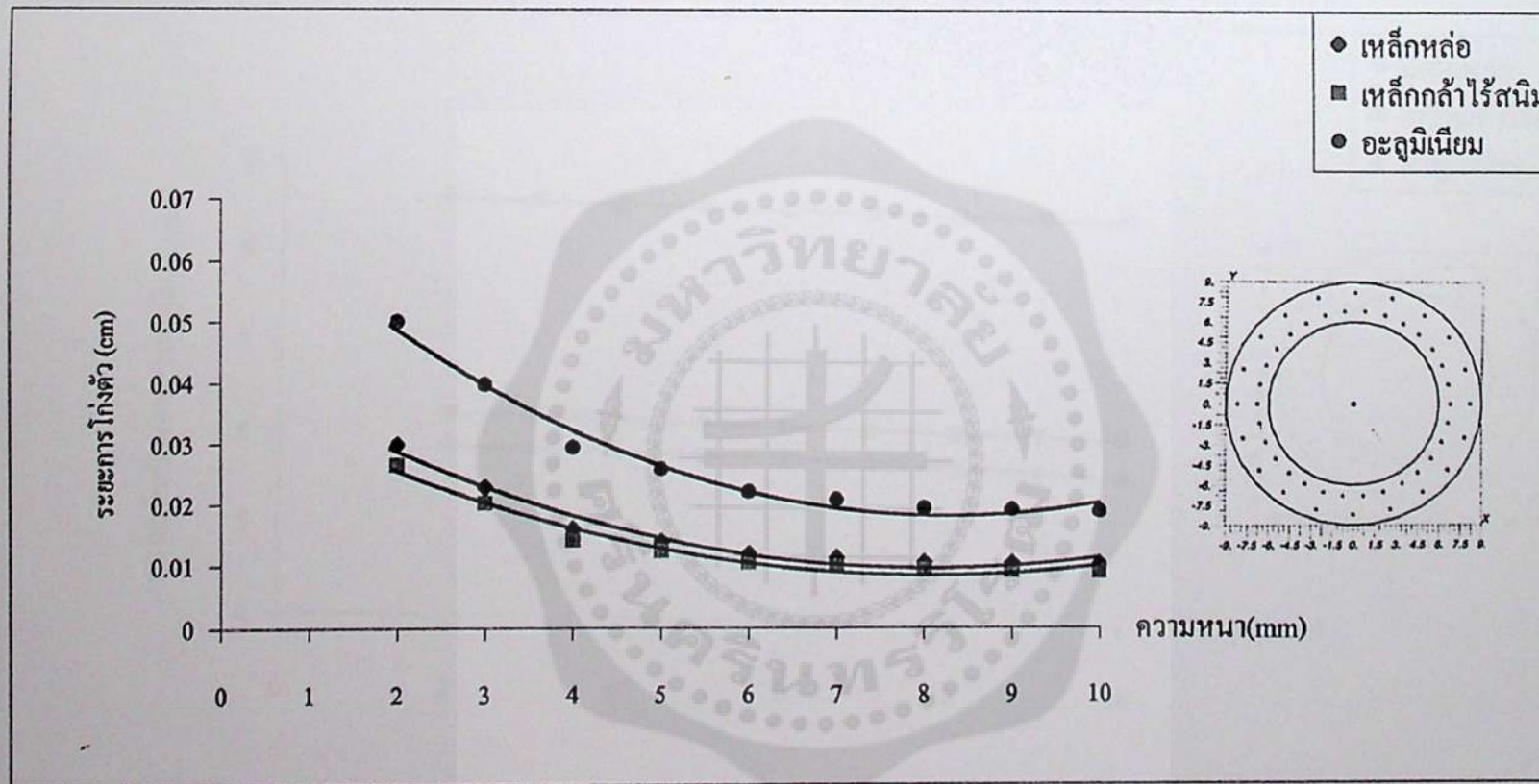
แบบที่ 5



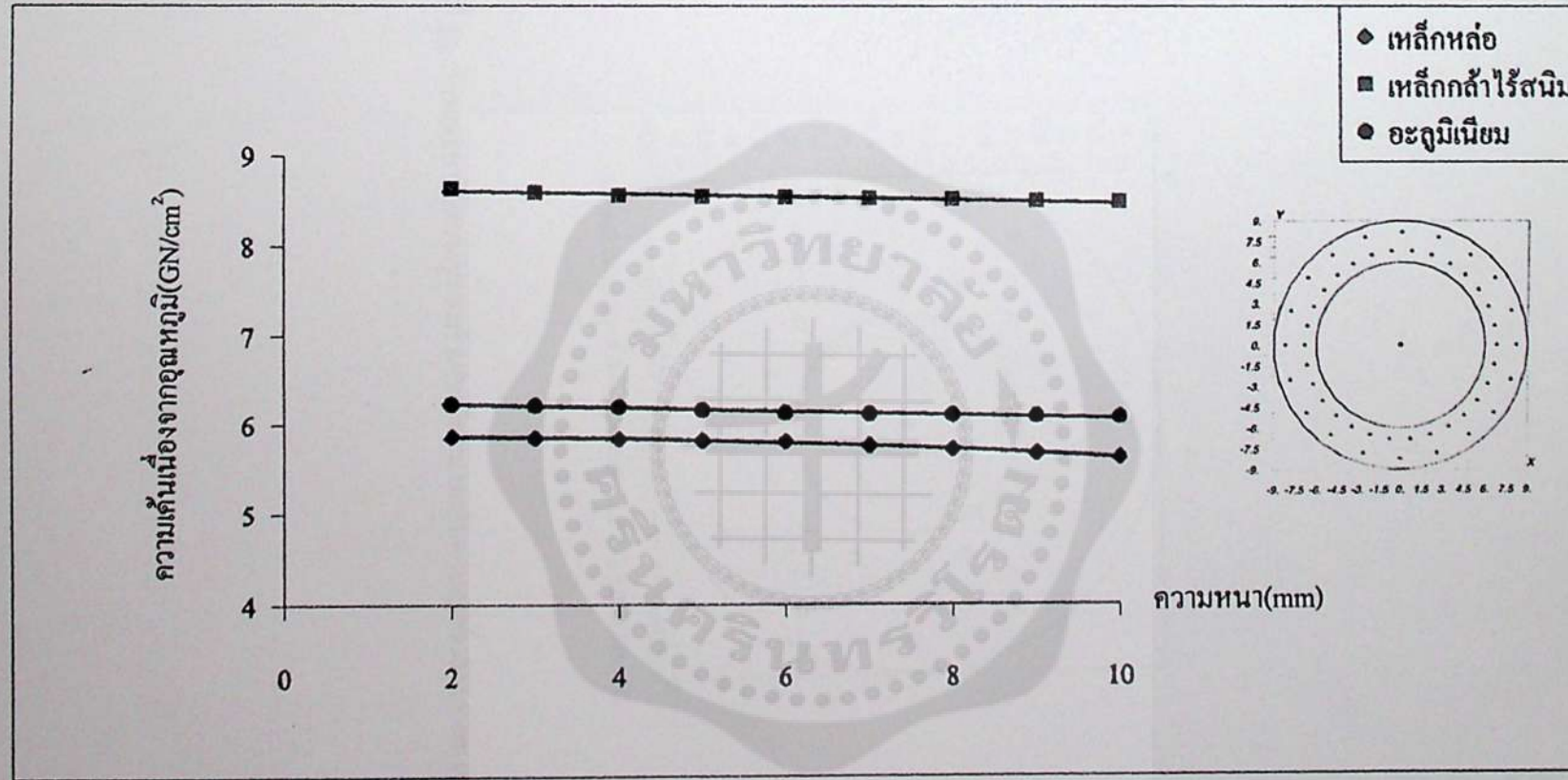
รูปที่ 25 ลักษณะการจัดวางรูปของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm (ลดจำนวนรู)

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการ โกงตัวเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวเตาแก๊ส 18 cm (จากรูปที่ 25)

ความหนา (mm)		เหล็กหล่อ		เหล็กกล้าไร้สนิม		อะลูมิเนียม	
		ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)
2	Max	5.8676	0.03008	8.6343	0.02661	6.2313	0.05018
	Min	1.4319	0	2.2540	0	1.7474	0
4	Max	5.8327	0.01609	8.5536	0.01425	6.1962	0.02961
	Min	1.4273	0	2.2333	0	1.7318	0
6	Max	5.8048	0.01207	8.5312	0.0107	6.1269	0.02225
	Min	1.8858	0	2.2405	0	1.7358	0
8	Max	5.6755	0.01058	8.5109	0.00936	6.1014	0.01949
	Min	1.3853	0	2.2590	0	1.7475	0
10	Max	5.6325	0.01034	8.4805	0.00911	6.0794	0.01898
	Min	1.3997	0	2.2826	0	1.7625	0

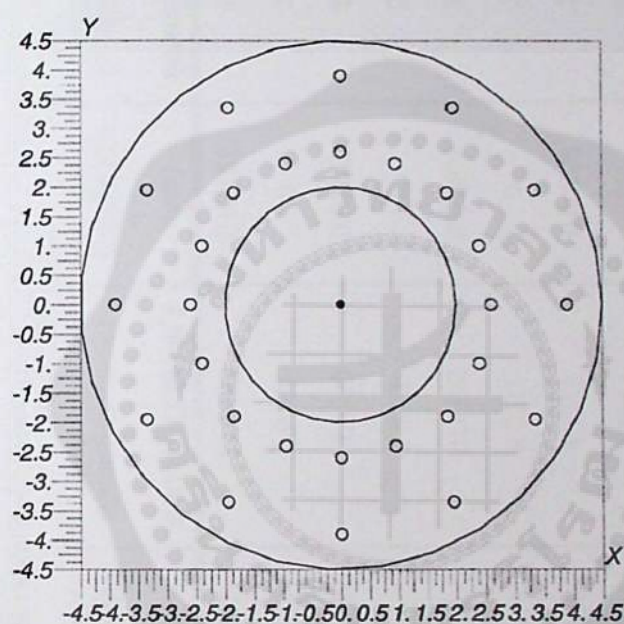


รูปที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊ส
แบบที่ 5



รูปที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของ
หัวเตาแก๊สแบบที่ 5

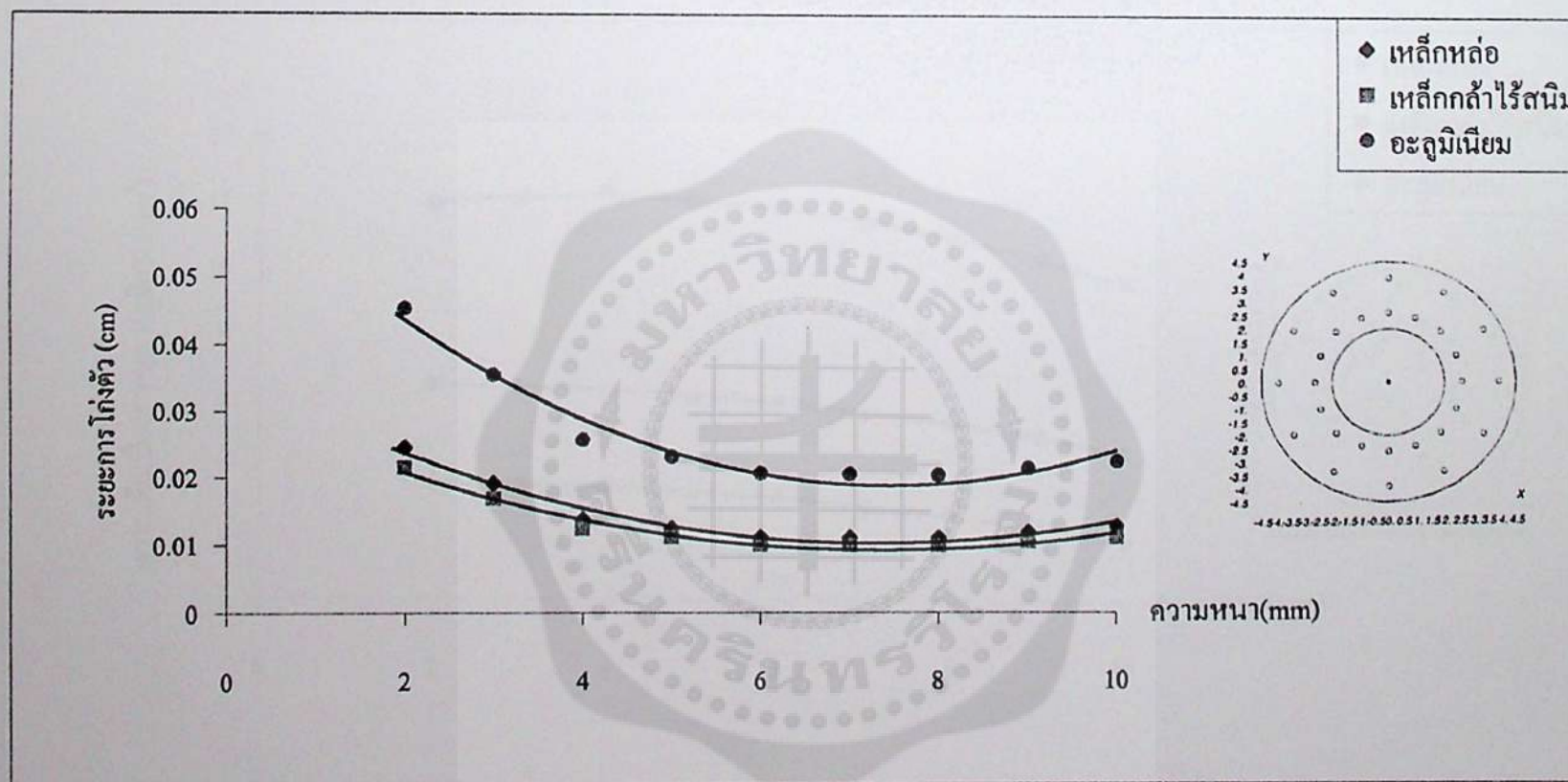
แบบที่ 6



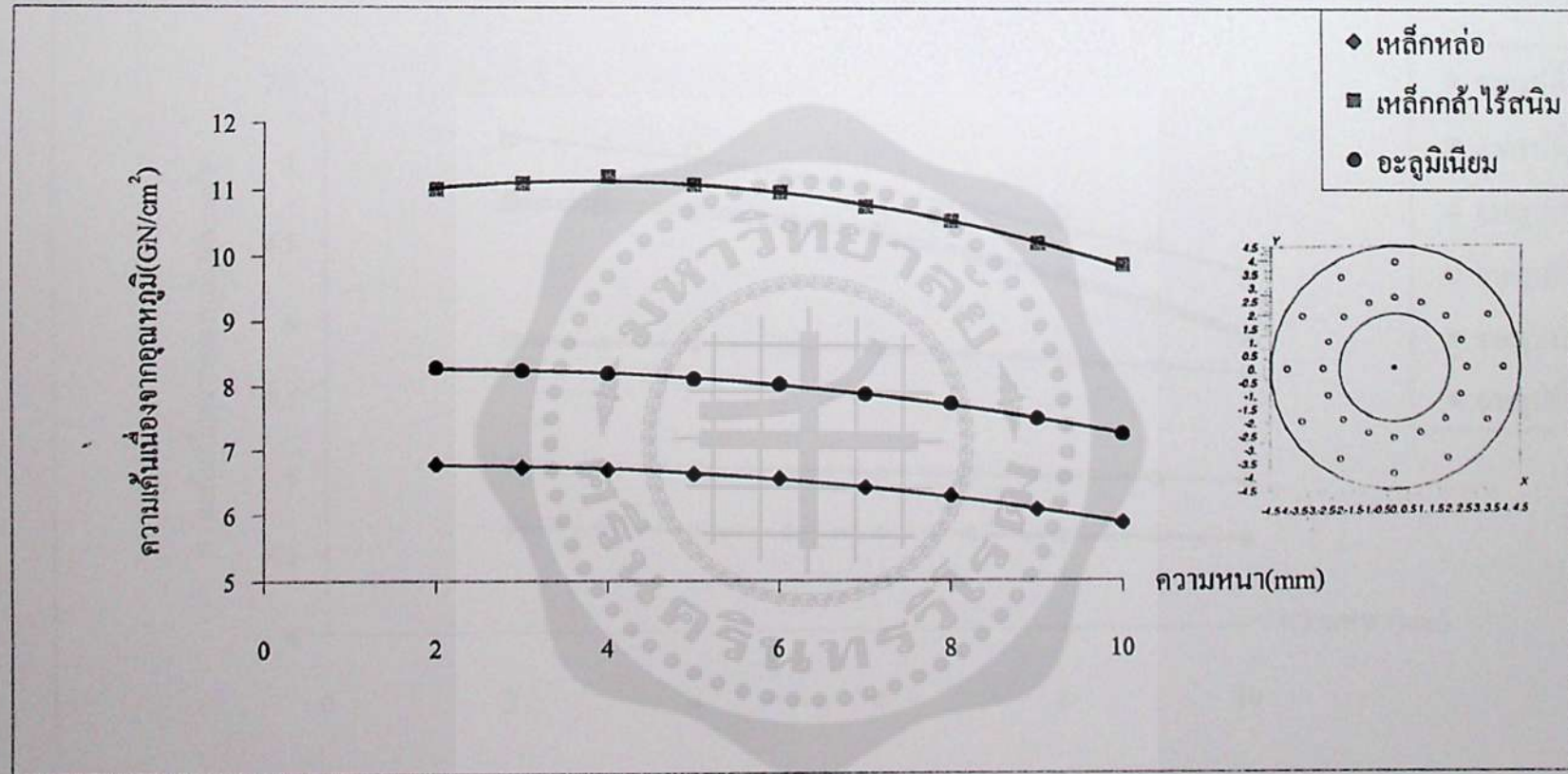
รูปที่ 28 ลักษณะการจัดวางรูปของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm (ลดจำนวนรู)

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิและระยะการโก่งตัวเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวเตาแก๊ส 9 cm (จากรูปที่28)

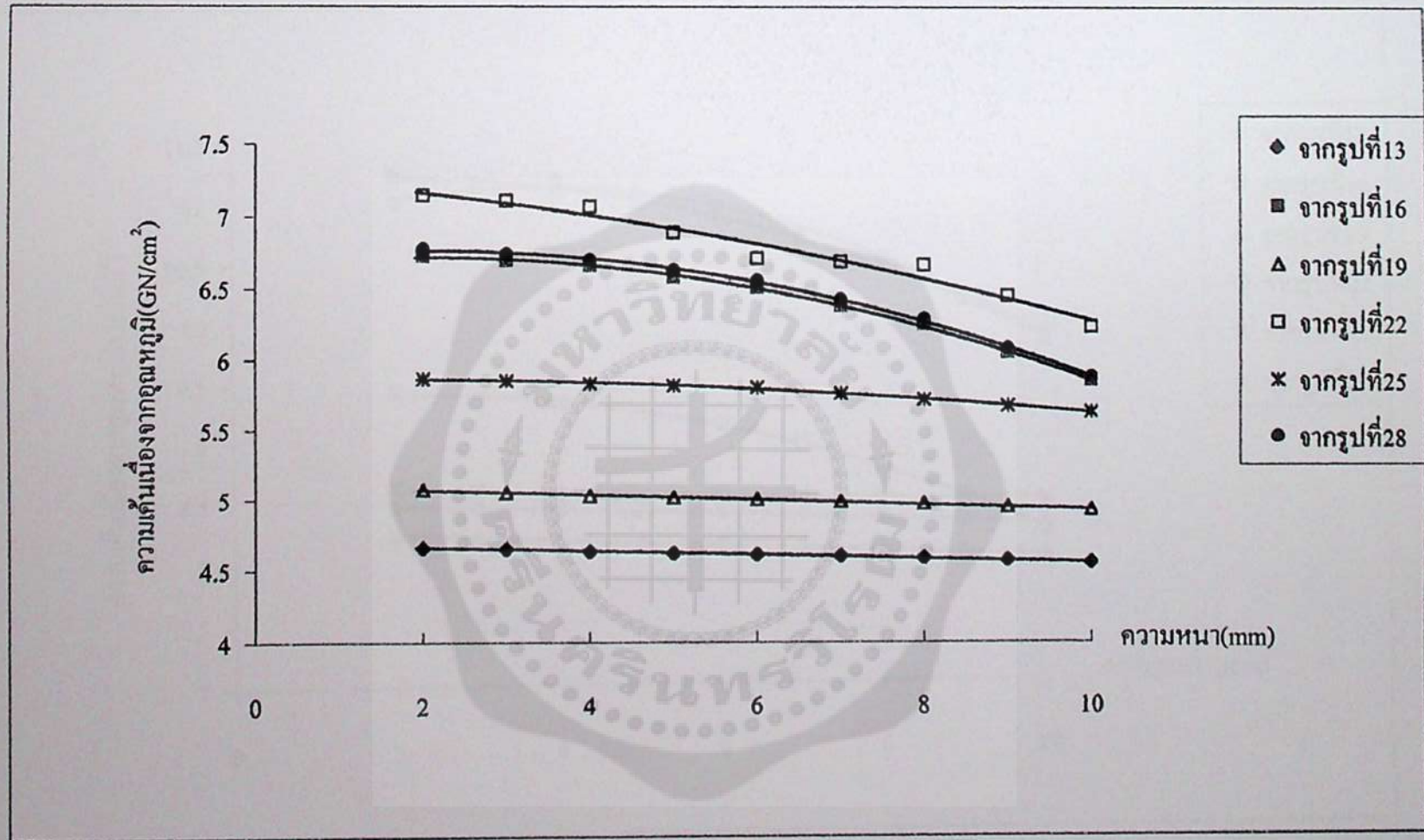
ความหนา (mm)		เหล็กหล่อ		เหล็กกล้าไร้สนิม		อะลูมิเนียม	
		ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)	ความเค้นเนื่องจาก อุณหภูมิ (GN/cm ²)	ระยะโก่งตัว (cm)
2	Max	6.7790	0.02462	11.0090	0.02151	8.2807	0.04534
	Min	1.7320	0	2.9208	0	2.2802	0
4	Max	6.7020	0.01389	11.1930	0.01242	8.1877	0.02564
	Min	1.7660	0	3.5220	0	2.3129	0
6	Max	6.5580	0.0112	10.9590	0.01002	8.0216	0.0207
	Min	1.8170	0	8.0711	0	2.3630	0
8	Max	6.2930	0.01106	8.1212	0.00988	7.7194	0.02042
	Min	1.5510	0	8.1714	0	2.1461	0
10	Max	5.8840	0.01279	8.2215	0.01114	7.2523	0.0225
	Min	1.2750	0	8.2716	0	1.8558	0



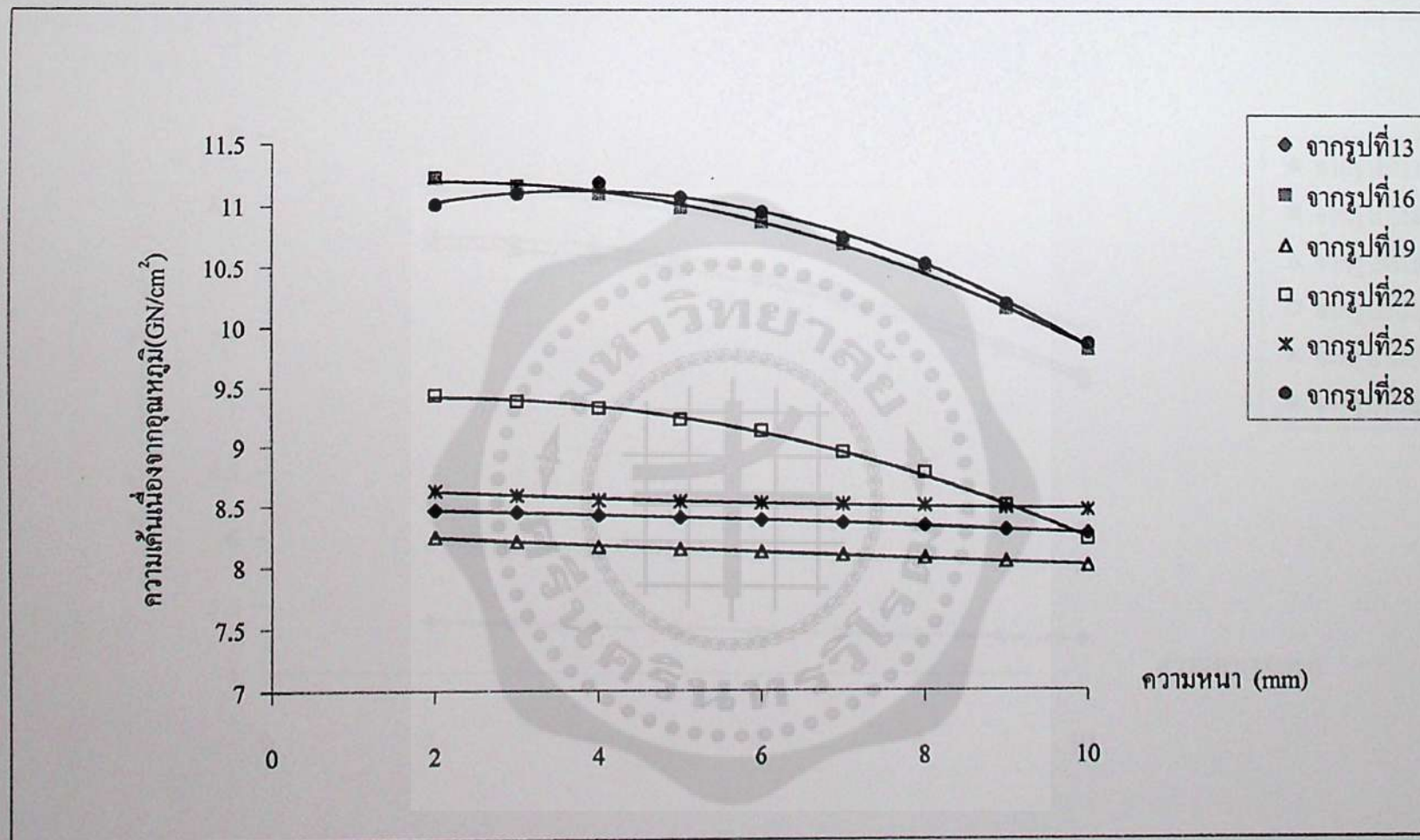
รูปที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ของระยะการโค้งตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สแบบที่ 6



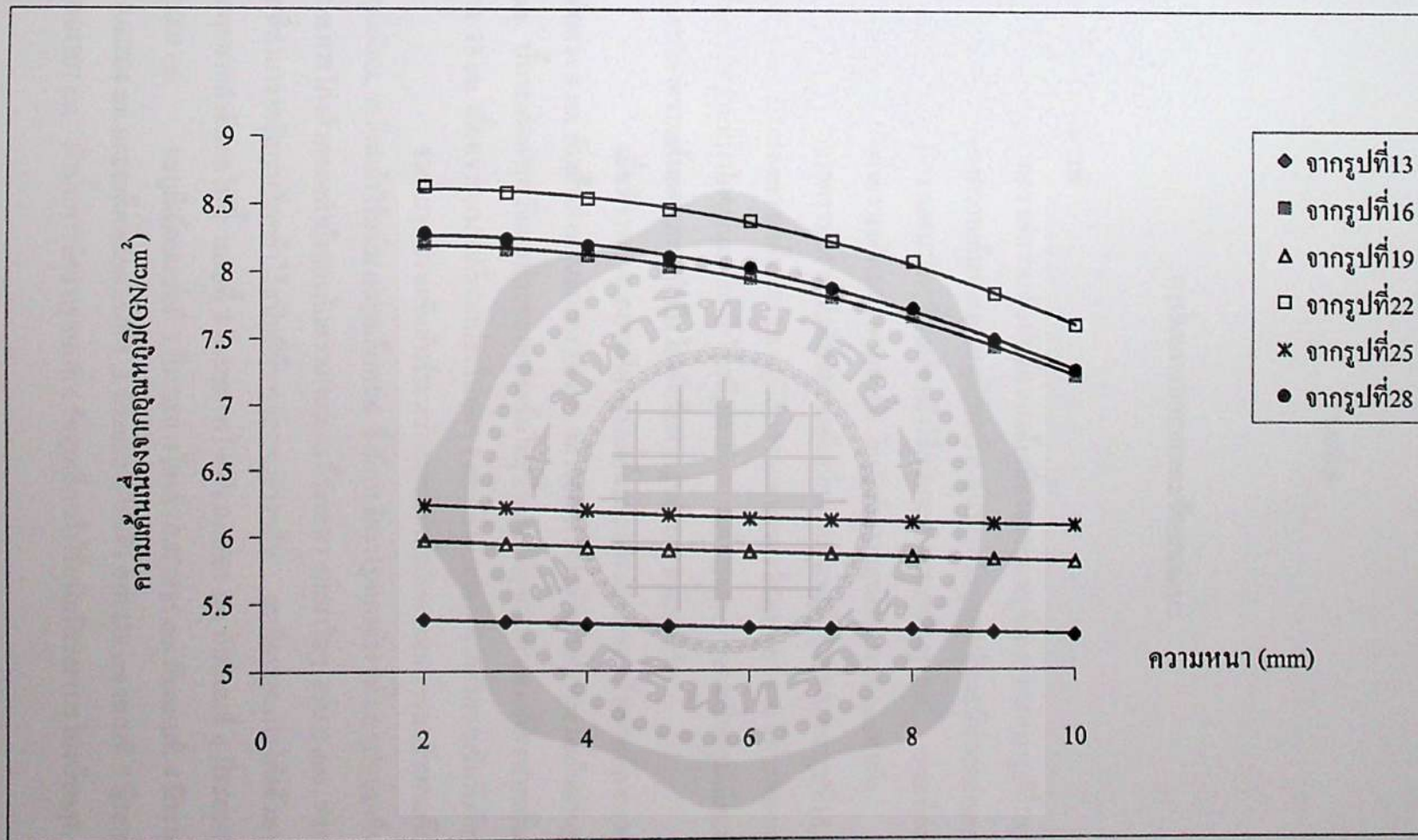
รูปที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ของความดันเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาของ
หัวเตาแก๊สแบบที่ 6



รูปที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาโดยวัสดุเหล็กหล่อ



รูปที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาโดย
วัสดุอะลูมิเนียม



รูปที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนาโดยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

ผลการวิเคราะห์กราฟ

จากกราฟความสัมพันธ์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนารูปที่ 15, 21 และ 27 พบว่าอัตราส่วนของความเค้นจากอุณหภูมิกับความหนาของวัสดุทุกชนิดจะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้น หรือความชันและที่ความหนาใดๆ นั้นเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดความเค้นสูงสุด ขณะที่อะลูมิเนียม และเหล็กหล่อจะมีค่าความเค้นลดลงตามลำดับ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm เท่ากัน

จากกราฟความสัมพันธ์ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนารูปที่ 18, 24 และ 30 พบว่าอัตราส่วนของความเค้นจากอุณหภูมิกับความหนาของวัสดุทุกชนิดจะมีค่าลดลงแบบกำลังสองและที่ความหนาใดๆ นั้นเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดความเค้นสูงสุด ขณะที่อะลูมิเนียมและเหล็กหล่อจะมีค่าความเค้นลดลงตามลำดับ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm เท่ากัน

เมื่อพิจารณาจากกราฟหาความเค้นและความหนาของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm กับเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm แล้วจะเห็นได้ว่าหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm นั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในรูปอุณหภูมิสูงกว่าหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm เมื่อความหนาเปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 1 mm ซึ่งสังเกตได้จากค่าความชันที่เกิดขึ้น

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะ โกงตัวกับความหนาของหัวเตาแก๊สที่ทำจาก อะลูมิเนียม, เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กหล่อ ซึ่งมีการจัดวางรูปแบบต่างๆ ทั้ง 6 รูปแบบเห็นได้ว่าจะมีระยะการโก่งตัวลดลงกำลังสองกับความหนาและที่ระยะความหนาใดๆ เช่น 6 mm พบว่า หัวเตาแก๊สที่ทำมาจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการจัดวางรูต่างๆ กัน จะเกิดระยะการโก่งตัวมากที่สุดและน้อยสุดตามลำดับต่อไปนี้ แบบที่ 3 มีระยะการโก่งตัว 0.01098 cm กับแบบที่ 6 มีระยะการโก่งตัว 0.01002 cm อะลูมิเนียมแบบที่ 3 มีระยะการโก่งตัว 0.022935 cm กับแบบที่ 4 มีระยะการโก่งตัว 0.02204 cm และเหล็กหล่อแบบที่ 1, 3 มีระยะการโก่งตัว 0.01229 cm แบบที่ 5 มีระยะการโก่งตัว 0.01207 cm ดังนั้นการจัดวางรูปแบบที่ 6 วัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมมีระยะการโก่งน้อยสุด

สรุปผลการทดสอบ

ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ

ผลจากการใช้โปรแกรม MSC /NASTRAN For Windows 4.0 คำนวณหาความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิของหัวเตาแก๊สที่ทำจาก เหล็กหล่อ, เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm และ 9 cm มีจำนวนรูกับความหนาที่แตกต่างกันพบว่าเหล็กหล่อมีความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิน้อยที่สุด อะลูมิเนียมมีค่ารองลงมาและเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีค่าความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิมากที่สุดที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากวัสดุสามชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน โดยเหล็กหล่อจะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (Thermal Coefficient) น้อย จึงทำให้ได้ผลของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิน้อยและเมื่อนำค่าความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิกับการจัดวางรูแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกับพบว่ารูปแบบการจัดวางรูของหัวเตาแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm (รูปที่ 13) หนา 6 mm มีความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิต่ำสุด

ผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าหัวเตาแก๊สที่มีจำนวนรูเท่ากับหัวแก๊สจริงทำจากเหล็กหล่อขนาดความหนา 6 mm จะให้ค่าความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิต่ำที่สุด โดยถ้าความหนาเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมินั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองวัสดุโดยเปล่าประโยชน์ และถ้าความหนาตกลงค่าความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิจะสูงมาก ซึ่งไม่เหมาะสมนำมาใช้งาน

ระยะการโก่งตัว (Deformation)

ระยะการโก่งตัวของวัสดุทั้งสามชนิด คือเหล็กหล่อ, เหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 cm และ 9 cm โดยมีจำนวนรูและความหนาไม่เท่ากันพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมีระยะการโก่งตัวน้อย เหล็กหล่อมีค่ารองลงมาตามลำดับและอะลูมิเนียมจะมีระยะการโก่งตัวมากที่สุด เนื่องจากอะลูมิเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงสุดในบรรดาวัสดุที่ทดสอบ จึงทำให้ได้ผลของระยะการโก่งตัวของหัวเตาแก๊สมาก

จากผลการวิเคราะห์ในรูปของความเค้นและระยะโก่งตัวทำให้เราสามารถตัดสินใจเลือกวัสดุที่ใช้ทำหัวเตาแก๊สที่ทำมาจาก เหล็กหล่อ เนื่องจากมีค่าการโก่งตัวใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้สนิม แต่เกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิน้อยที่ความหนา 6 mm ของทุก ๆ แบบ

จำนวนรูของหัวเตาแก๊สนั้นจากการวิเคราะห์เมื่อเพิ่มจำนวนรูจะพบว่ามีผลต่อการไหลของแก๊ส ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองแก๊สมาก แต่ในรูปของการถ่ายเทความร้อนแล้วจะทำให้มีผลของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิน้อย เมื่อลดจำนวนรูลงจะมีผลของการไหลของแก๊ส ซึ่งจะทำให้มีการลดปริมาณของแก๊สลง แต่ในเรื่องของความร้อนจะทำให้มีผลของความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ

มาก เหล็กหล่อที่ความหนา 6 mm และจำนวนรูเท่ากับคั่นแบบเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการ ออกแบบทำหัวเตาแก๊ส

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ควรมี ความเร็วในการประมวลผลสูงเพราะจะทำให้ข้อมูลที่แม่นยำยิ่งขึ้น
2. หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ต้องมีความจุมาก เนื่องจากในการประมวลผลในแต่ละครั้งจะ ต้องใช้เนื้อที่หน่วยความจำมาก
3. ในการเลือกค่าคุณสมบัติของวัสดุควรจะมีหน่วยที่เหมือนกันขนาดของชิ้นงานที่ทำการ วิเคราะห์ เพื่อที่ได้ผลคำนวณที่ถูกต้อง
4. ขั้นตอนของการกำหนดเอลิเมนต์และ โหนด ถ้ากำหนดละเอียดมากเกินไปโปรแกรมก็ไม่สามารถจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ได้ เนื่องจากขนาดของเอลิเมนต์น้อยเกินไป
5. ถ้าเพิ่มจำนวนรูมาก ๆ แล้ว ควรจะลดจำนวนจุดแบ่งเอลิเมนต์ให้น้อยลงต่ำสุดควรจะเป็น 4 จุด เพราะมากกว่านี้แล้วจำนวนรูมากโปรแกรมไม่สามารถแบ่งเอลิเมนต์ได้
6. ควรจะนำผลการไหลของเปลวไฟมาร่วมพิจารณาในรูปแบบการวิเคราะห์ CFD ต่อไป ซึ่งจะให้ ผลที่แม่นยำมากขึ้น

บรรณานุกรม

1. รศ.ดร.เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพมหานคร : บริษัทพิมพ์ดี. 2542
2. ประเสริฐ เทียนนิมิตร. ทฤษฎีและการคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์ กรุงเทพมหานคร : หจก. เอช-เอน การพิมพ์, 2533.
3. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537
4. ร.ศ.มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อน กรุงเทพมหานคร : บริษัทพิมพ์ดี. 2541
5. สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์. กลศาสตร์ของแข็ง กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2536
6. The Macneal - Schwendler corporation : Manual of Msc/NASTRAN for Windows Quick start guide : Printed in U.S.A. First Printing February, 1995
7. OZISIK, M.N., Heat Transfer : A Basic Approach, McGraw-Hill Book Company, NewYork, 2 nd ed., 1991

ขั้นตอนในการใช้โปรแกรม

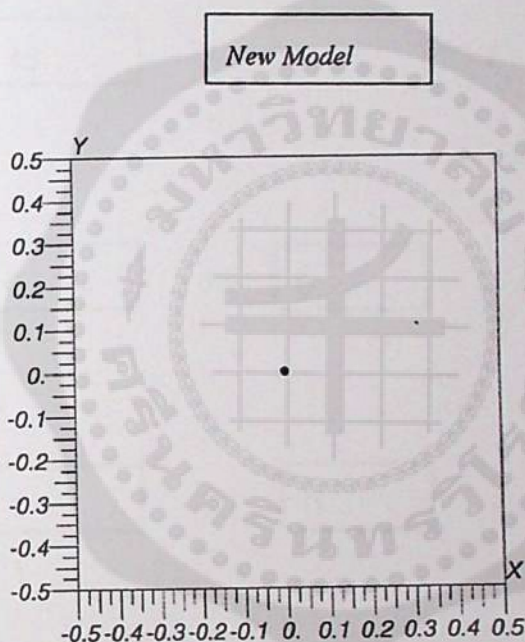
ตัวอย่าง การใช้โปรแกรมคำนวณหาความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิของหัวเตาแก๊ส จากรูปที่ 16

1. เปิดเครื่องไปที่ MSC/NASTRAN FOR WINDOWS 4.0 และเข้าไปในไฟล์ที่ New Model
เมื่อเปิดเครื่องให้คลิกที่ MSC/NASTRAN 2 ครั้ง จากนั้นเปิด Model File แล้ว

เลือก

New Model

Open Model File :



รูปภาพผนวกที่ 1 แสดงเพื่อเปิด New Model

2. กำหนดขนาดของวงกลม โดยเข้าไปที่ Geometry

Geometry / Curve-Circle / Radius

Locate-Enter Location at Center of Circle

X : Y : Z :

OK

Locate - Enter Location at Center of Circle

X: Y: Z:

ID: Sys: Parameters... Methods ^

Preview OK Cancel

รูปภาคผนวกที่ 2 แสดงการใส่ค่ารัศมีวงกลม

Locate-Enter Location On Circle

X : Y : Z :

OK

X : Y : Z :

OK

X : Y : Z :

OK

X : Y : Z :

OK

X : Y : Z :

OK

X : Y : Z :

$X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$

$X :$

2.5

 $Y :$

1

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-2.4

 $Y :$

1

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-2.5

 $Y :$

1

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-2.4

 $Y :$

1

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-2.5

 $Y :$

-1

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-2.4

 $Y :$

-1

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-2.5

 $Y :$

-1

 $Z :$

0

$X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$

$X : -1.85$ $Y : -1.9$ $Z : 0$

OK

 $X : -1.95$ $Y : -1.9$ $Z : 0$

OK

 $X : 1.85$ $Y : -1.9$ $Z : 0$

OK

 $X : 1.95$ $Y : -1.9$ $Z : 0$

OK

 $X : 0.95$ $Y : 2.4$ $Z : 0$

OK

 $X : 1.05$ $Y : 2.4$ $Z : 0$

OK

 $X : -0.95$ $Y : 2.4$ $Z : 0$

$X : -1.05$ $Y : 2.4$ $Z : 0$ $X : -0.95$ $Y : -2.4$ $Z : 0$ $X : -1.05$ $Y : -2.4$ $Z : 0$ $X : 0.95$ $Y : -2.4$ $Z : 0$ $X : 1.05$ $Y : -2.0$ $Z : 0$ $X : 3.9$ $Y : 0$ $Z : 0$

$X :$

4

 $Y :$

0

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-3.9

 $Y :$

0

 $Z :$

0

OK

 $X :$

-4

 $Y :$

0

 $Z :$

0

OK

 $X :$

0

 $Y :$

-3.9

 $Z :$

0

OK

 $X :$

0.1

 $Y :$

-3.9

 $Z :$

0

OK

 $X :$

0

 $Y :$

3.9

 $Z :$

0

OK

 $X :$

0.1

 $Y :$

3.9

 $Z :$

0

$X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$

X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :

$X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$

$X : -2.75$ $Y : -2.75$ $Z : 0$

OK

 $X : -2.85$ $Y : -2.75$ $Z : 0$

OK

 $X : 2.75$ $Y : -2.75$ $Z : 0$

OK

 $X : 2.85$ $Y : -2.75$ $Z : 0$

OK

 $X : 1.95$ $Y : 3.35$ $Z : 0$

OK

 $X : 2.05$ $Y : 3.35$ $Z : 0$

OK

 $X : -1.95$ $Y : 3.35$ $Z : 0$

$X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$ $X :$ $Y :$ $Z :$

X : Y : Z :

X : Y : Z :

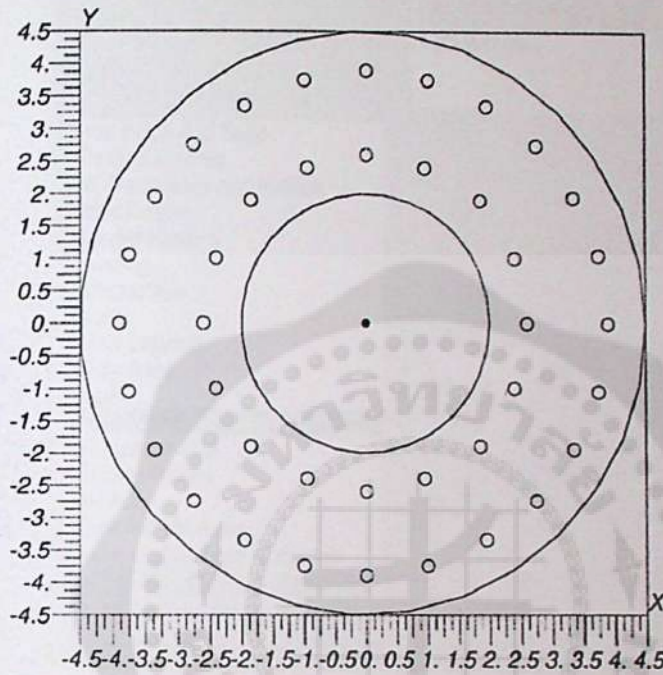
X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :

X : Y : Z :



รูปภาคผนวกที่ 3 แสดงเมื่อใส่ค่ารัศมีของจำนวนรูทั้งหมด

3. ลบเส้น บอกขนาดในแกน X และแกน Y โดยเข้าไปที่ View / Options...

Category:

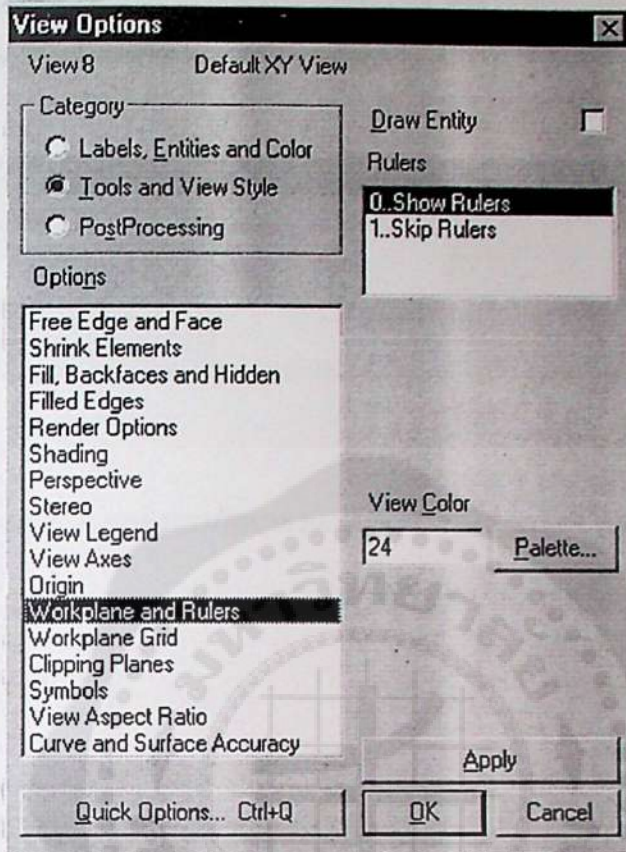
1 Tools and View Style

Options:

Workplane and Rulers

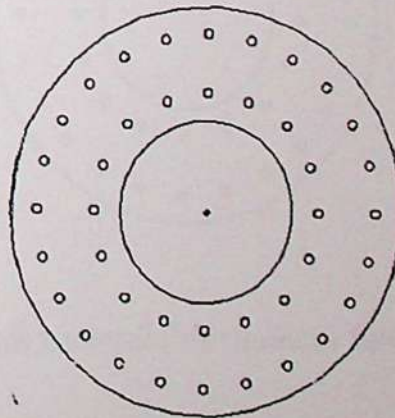
Draw Entit

☐



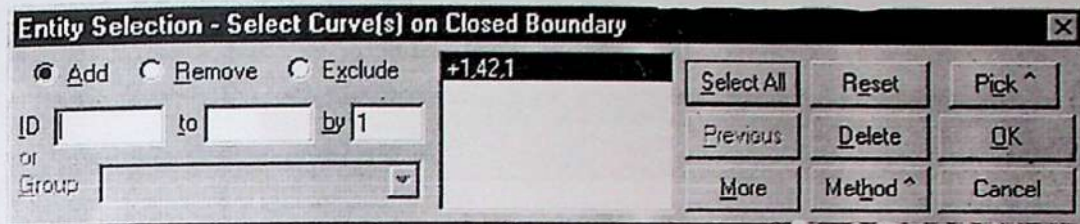
รูปภาคผนวกที่ 4 แสดงการลบสเกลที่หน้าจอออก

OK

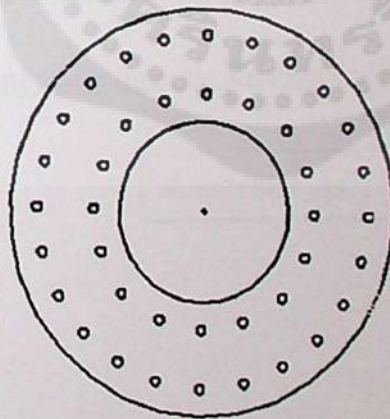
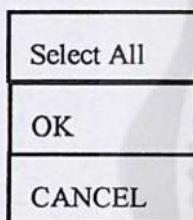


รูปภาคผนวกที่ 5 แสดงเมื่อลบสเกลออกแล้ว

4. เลือกขอบเขต (Boundaries) ของตาข่ายว่าจะอยู่ตรงไหน โดยเข้าไปที่
Geometry / Boundary Surface...



รูปภาคผนวกที่ 6 แสดงการกำหนด Boundary Surface ทุกกรณี โดยอัตโนมัติ

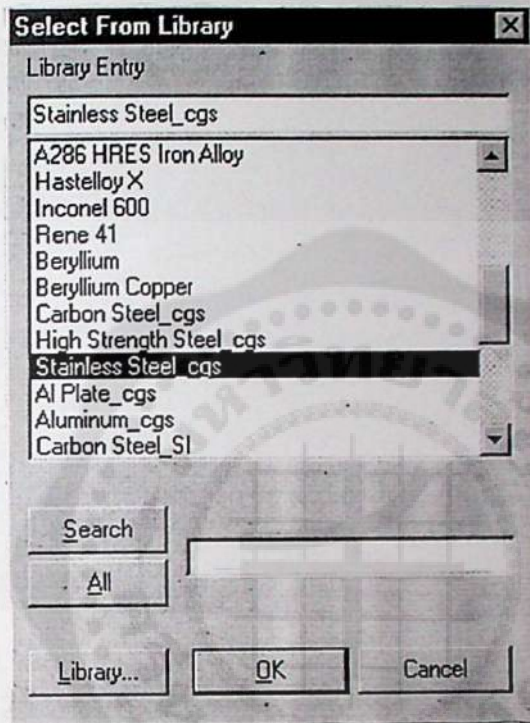


รูปภาคผนวกที่ 7 แสดงเมื่อใส่ค่า Boundary Surface เสร็จแล้ว

5. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่จะใช้ทำ โดยเข้าไปที่

Model / Material...

Load



รูปภาคผนวกที่ 8 แสดงการเลือกวัสดุที่อยู่ในโปรแกรม

Library Entry:

Stainless Steel_cgs

OK
OK
CANCEL

6. กำหนดเอลิเมนต์ คุณสมบัติของวัสดุ โดยเข้าไปที่

Model / Property...

Title:

Dummy Planar Element

Material:

1...Stainless Steel cgs

Thicknesses, Tavg or T1:

0.1

Define Isotropic Material			
ID	1	Title	Stainless Steel_cgs
Color	104	Palette...	
Layer	1	Type...	
Stiffness		Limit Stress	
Youngs Modulus, E	1.965E+12	Tension	9.9974E+9
Shear Modulus, G	7.7221E+11	Compression	9.58371E+9
Poisson's Ratio, nu	0.27	Shear	6.55002E+9
Thermal		Mass Density	7.835032
Expansion Coeff, a	1.116E-5	Damping, 2C/Co	0.
Conductivity, k	0.151	Reference Temp	21.
Specific Heat, Cp	0.	Load...	Save...
Functions >>		Copy...	
Nonlinear >>		OK	Cancel

รูปภาคผนวกที่ 9 แสดงค่าคุณสมบัติวัสดุ Stainless Steel cgs

OK

CANCEL

7. กำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติเป็นของแข็ง โดยเข้าไปที่

Model / Property...

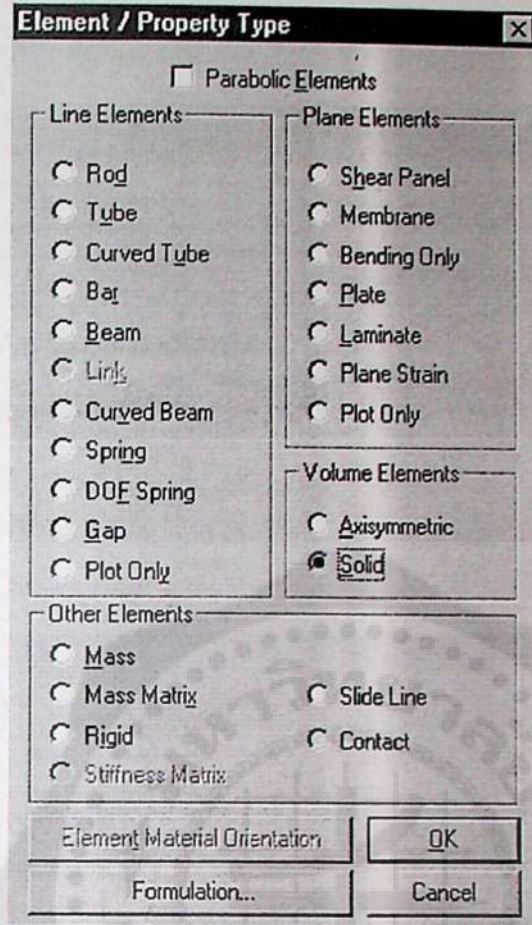
ID:

2

Elem / Property Type...

Volume Elements:

1...Solid



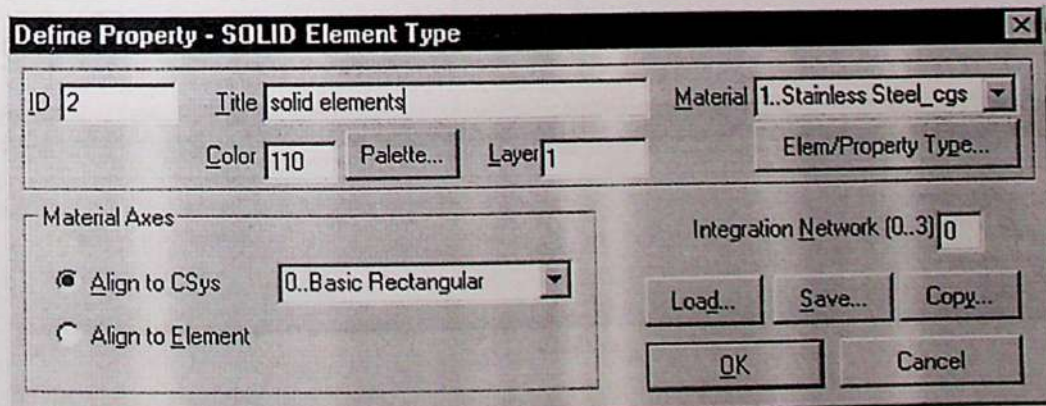
รูปภาคผนวกที่ 10 แสดงการกำหนดให้ Model มีคุณสมบัติเป็นของแข็ง

ID:

2

Title:

Solid Elements



รูปภาคผนวกที่ 11 แสดงการตั้งชื่อเรื่องเมื่อกำหนด Model เป็นของแข็ง

OK
CANCEL

8. กระจายเอลิเมนต์ ลงใน Model โดยเข้าไปที่
Mesh / Mesh Control / Default Size...

Size:

0.75

รูปภาพผนวกที่ 12 แสดงการกำหนดขนาด Default Mesh Size

OK

ขั้นต่อไปกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ลงบนพื้นขอบเขต โดยเข้าไปที่

Mesh / Mesh Control / Size Along Curve...

ID:

1

รูปภาพผนวกที่ 13 แสดงการกำหนดเอลิเมนต์ที่เส้นโค้งที่ 1

OK

Mesh Size along Curve...

120

Number Of Elements:

Mesh Size Along Curves

Mesh Size

☒ Number of Elements: 120

☐ Element Size:

☒ Min Elem on Lines: 1

☒ Min Elem on Closed Edges: 12

☒ Min Elem on Other Edges: 2

Node Spacing

☒ Equal ☐ Parametric

☐ Biased ☐ Length

☐ Geometric Bias

Bias Factor: 1.0

☒ Small Elements at Start

☐ Small Elements at End

☐ Small Elements at Center

☐ Small Elements at Both Ends

Reset OK Cancel

รูปภาคผนวกที่ 14 แสดงการใส่ค่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เส้นโค้งที่ 1

OK

ID:

2

OK

Mesh Size along Curve...

70

Number Of Elements:

OK

ID:

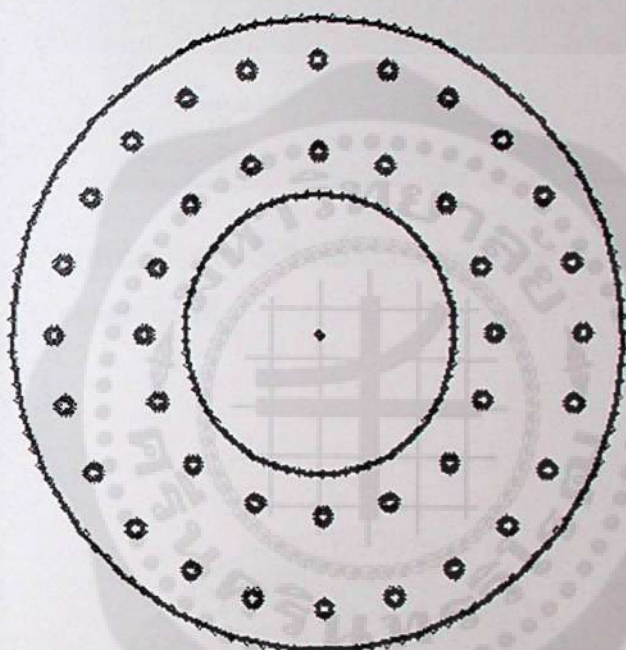
3

To:

42

Mesh Size along Curve...

Number of Elements:



รูปภาคผนวกที่ 15 แสดงการกำหนดค่าเอลิเมนต์ตามที่กำหนดในรูปภาคผนวกที่ 14
ขั้นตอนต่อไปกำหนดElement ของ Model โดยเข้าไปที่

Mesh / Geometry / Surface

Property:

Automesh Surfaces [X]

Node and Element Options

Node ID CSys Node Param... Elem Param...

Elem ID Property New Prop...

Mesh Control

Min Elements Between Boundaries

Max Element Aspect Ratio :1

☒ Quick-Cut boundaries with more than nodes.

Element Shape

☐ All Triangles

☒ Quads (when all internal angles are within degrees of 90 degrees)

Mesh Smoothing

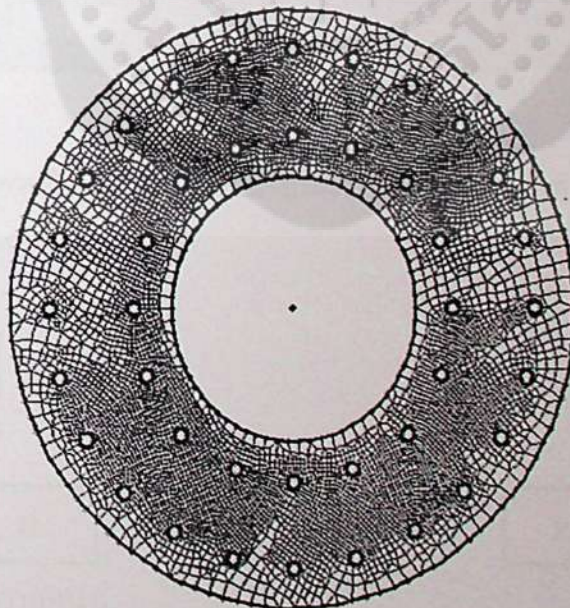
☒ Laplacian Max Iterations

☐ Centroidal Smooth To

OK Cancel

รูปภาคผนวกที่ 16 แสดงการนำคุณสมบัติที่หัวเรื่อง Dummy Planar Elements มาทำการแพร่กระจายเอลิเมนต์

OK



รูปภาคผนวกที่ 17 แสดงผลเมื่อโปรแกรมทำการแบ่งเอลิเมนต์เสร็จเรียบร้อยแล้ว

9. กำหนดขนาดความหนาของวัสดุ โดยเข้าไปที่

Mesh / Extrude / Element

Select All
OK

Options / Property :

2...Solid Element

Elements along length:

1



Deletes Original Elements

Generation Options		
Parameters ☐ Use Current Settings ☒ Match Original Entities	Method ☒ Vector ☐ Normals ☐ Normals with Thickness Correction	Advanced >> New Property...
Options Property: 2..solid elements Elements along Length: 1		☒ Delete Original Elements OK Cancel

รูปภาคผนวกที่ 18 แสดงการนำค่าคุณสมบัติจากหัวเรื่อง Solid Elements มาทำการเพิ่มความหนา ของ Model

OK

Base

X : 0

Y : 0

Z : 0.2

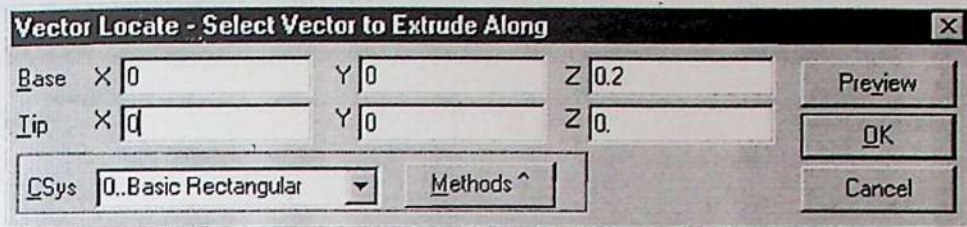
(แล้วแต่จะกำหนดขนาดความหนา)

Tip

X : 0

Y : 0

Z : 0



รูปภาคผนวกที่ 19 แสดงการกำหนดความหนาของ Model โดยเพิ่มความหนา

OK
YES

หมายเหตุ : ค่า Z เป็นความหนาของชิ้นงาน

10. เปลี่ยนชื่อเรื่องข้อมูลที่ออกมาแสดงบนจอภาพ โดยเข้าไปที่

View / Windows...

Title:

Plate Heat Transfer



รูปภาคผนวกที่ 20 แสดงรูปแบบที่จะแสดงผลออกทางหน้าจอ

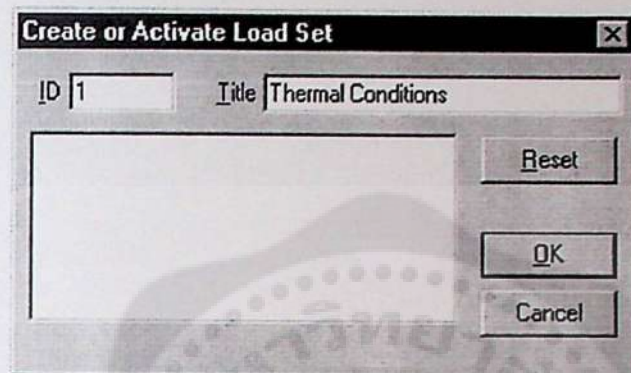
OK
CANCEL

11. กำหนดภาวะอุณหภูมิภายนอกให้กับ Model โดยเข้าไปที่

Model / Load / Body...

Title:

Thermal Conditions



รูปภาคผนวกที่ 21 แสดงการเลือกรูปแบบของปัญหาในการใส่ค่า Load

OK

กำหนดอุณหภูมิภายนอก



Active Thermal

Thermal / Default Temperature: T:

31

Create Body Loads

Load Set 1 Thermal Condions

☐ Active

Acceleration

Translation/Gravity (length/time/time) X 0 Y 0 Z 0

Rotation (radians/time/time) Ax 0 Ay 0 Az 0

☐ Active

Velocity

Rotation (rev/time) Wx 0 Wy 0 Wz 0

Origin

Center of Rotations X 0 Y 0 Z 0

☒ Active

Thermal

Default Temperature T 31

OK Cancel

รูปภาคผนวกที่ 22 แสดงการกำหนดอุณหภูมิรอบ ๆ Model

OK

12. กำหนดอุณหภูมิให้กับ Model โดยเข้าไปที่

Model / Load / Nodal...

Method^

กำหนดอุณหภูมิตาม Curves ต่าง ๆ

ID:

On Curve

1

OK

(Highlight)

Temperature

Temperature

270

Create Loads on Nodes

Load Set 1 Thermal Conditions

Color 10 Palette... Layer 1 Coord Sys 0: Basic Rectangular

Force
Moment
Displacement
Enforced Rotation
Velocity
Rotational Velocity
Acceleration
Rotational Acceleration

Temperature

Heat Flux
Heat Generation

Direction

☒ Magnitude Only
☐ Vector
☐ Along Curve
☐ Normal to Plane
☐ Normal to Surface

Specify...

Method

☒ Constant
☐ Variable

Advanced...

Load

Value	Function Dependence
Temperature 270	0: None

OK Cancel

รูปภาคผนวกที่ 23 แสดงการกำหนดอุณหภูมิเส้นโค้งที่ 1

OK

Method^

On Curve

2

ID:

OK

*(Highlight)**Temperature*

Temperature

273

OK

Method^

On Curve

ID:

3

To:

18

OK

*(Highlight)**Temperature*

Temperature

288

OK

Method^

On Curve

ID:

19

To:

42

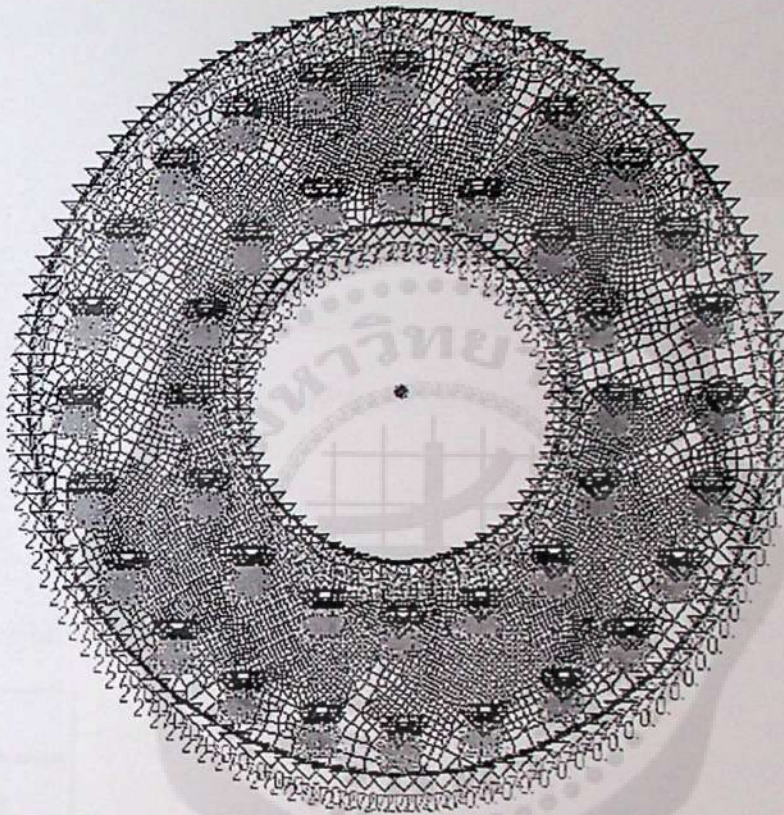
OK

*(Highlight)**Temperature*

Temperature

282

OK
CANCEL



รูปภาคผนวกที่ 24 แสดงการกำหนดอุณหภูมิเส้นโค้งเสร็จสิ้นแล้ว

13. ทำการวิเคราะห์ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิบน Model โดยกำหนดให้มีสถานะเป็น Steady State

File / Analyze...

Analysis Type:



Loads / Constraints:

20...Steady State Heat

1...Thermal Condition



Run Analysis

NASTRAN Analysis Control

Analysis Conditions		Additional Info	
Analysis Type	20..Steady-State Heat Trans	Number of Time Steps	10
☒ Loads / Constraints	1..Thermal Conditons	Initial Time Increment	1
☐ Constraint Equations		Output Step Interval	1
☐ Initial Conditions	1..Thermal Conditons	☒ Run Analysis	
		☐ Iterative Solver	Restarts...
Output Requests		Estimated Disk Space : 366 MBytes	
Output Types	0..Standard	Advanced...	OK
For Group	0..Entire Model		Cancel

รูปภาคผนวกที่ 25 แสดงการกำหนดเงื่อนไขก่อนทำการประมวลผล

OK

Save The Model.

YES

Continue

14. ทำการลบ Load-Thermal และ Nodes ออกจากหน้าจอ

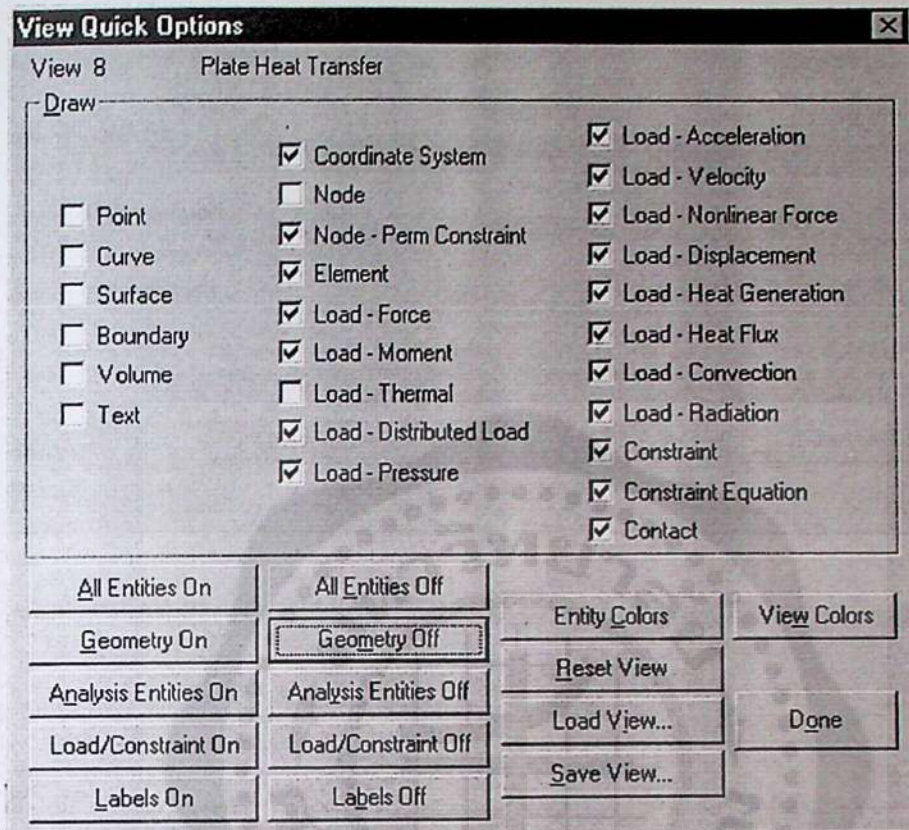
View / Options...

Quick Options

Geometry Off

☐ Node

☐ Load-Thermal



รูปภาคผนวกที่ 26 แสดงการปิดโหลดต่างๆ

Done
OK

15. นำผลที่เครื่องวิเคราะห์ได้ มาแสดงผลที่หน้าจอ

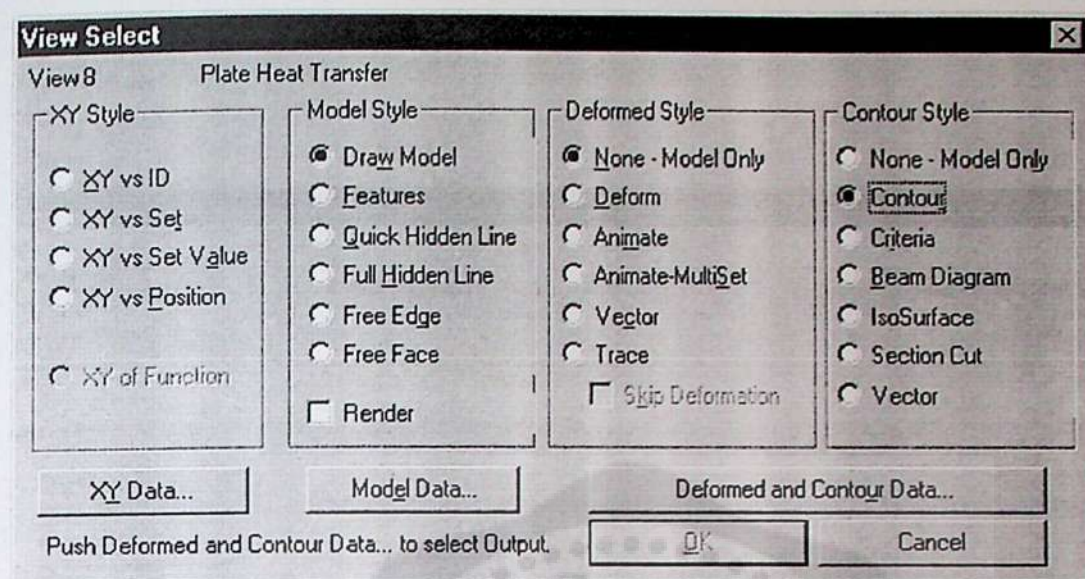
View / Select...

Deformed Style:

1 Non-Model Only

Contour Style:

1 Contour



รูปภาคผนวกที่ 27 แสดงการเลือก Contour เพื่อแสดงผลลัพธ์ส่งออกไปยังหน้าจอ

Deformed and Contour Data...

Output Set:

1...Case 1 Time 1

Out Put Vectors / Contour:

31... Temperature

Select PostProcessing Data [X]

View 8 Plate Heat Transfer

Data Selection

Category [0..Any Output ▼]

Type [0..Value or Magnitude ▼]

☐ Data at Corners

Section Cut Options

☐ Cut Model Define Section...

☐ Contour Sections

Number [] Spacing []

Output Set

	Program	Analysis Type	Set Value
[1..Case 1 Time 1. ▼]	MSC/NASTRAN	SS Heat	1.

Output Vectors

	Type	ID	Value
Deformation		Maximum	
		Minimum	
Contour			
[31..Temperature ▼]	Node	Maximum 201	288.
		Minimum 1	270.

Final Output Set

[]

Output Set Increment [1]

Trace Locations...

Contour Options...

Contour Vectors...

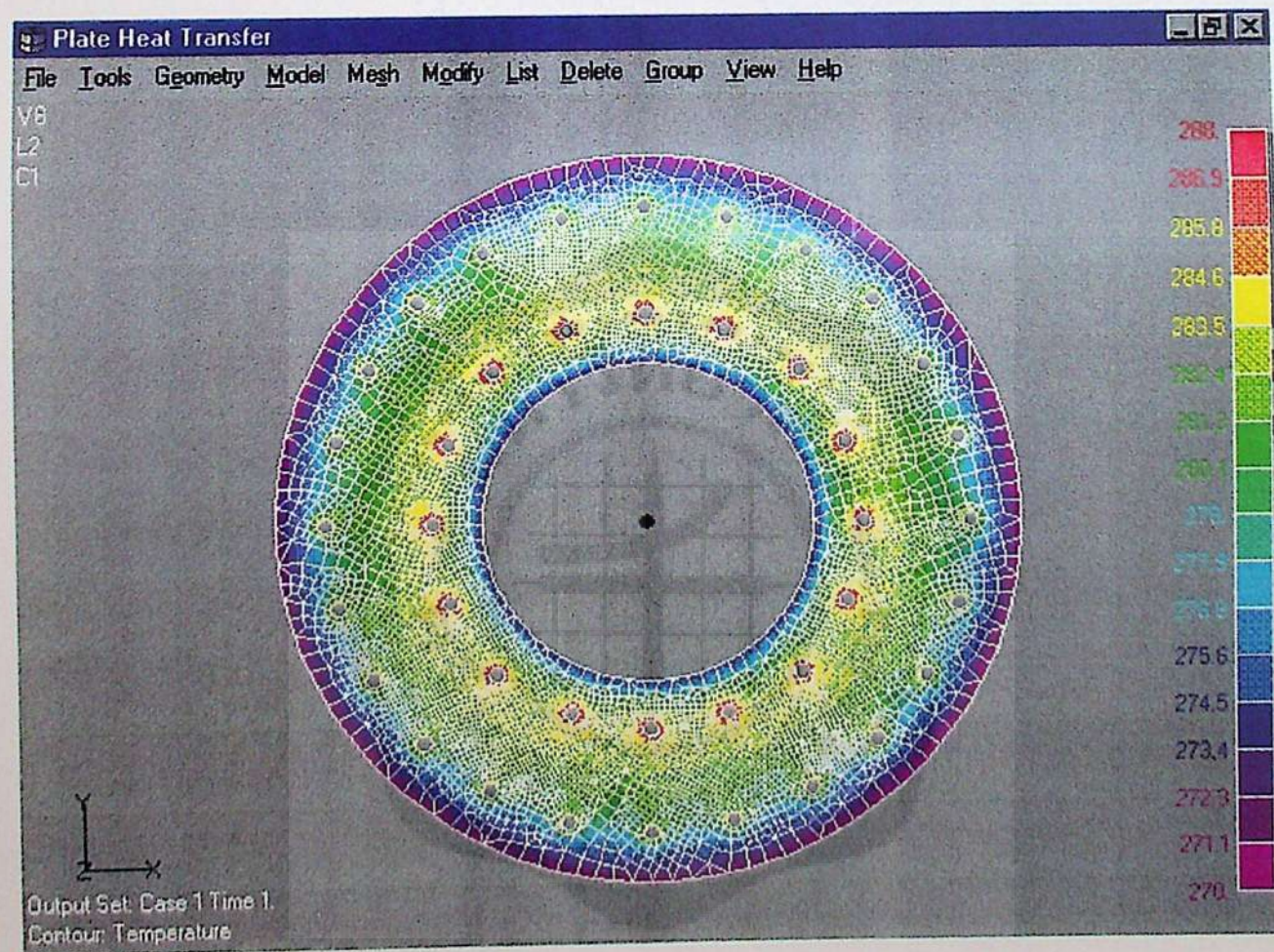
Freebody Display...

OK

Cancel

รูปภาคผนวกที่ 28 แสดงการเลือกผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่หน้าจอ

OK
OK



รูปภาคผนวกที่ 29 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ

16. พิมพ์หัวเรื่องโหลดใหม่

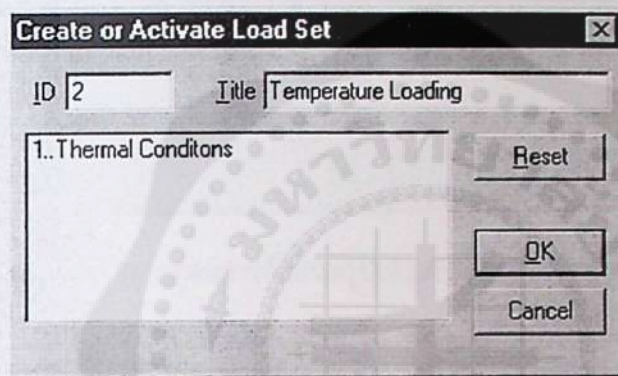
Model / Load / Set...

ID:

2

Title:

Temperature Loading



รูปภาคผนวกที่ 30 แสดงรูปแบบปัญหาเพื่อกำหนดค่าโหลดใหม่

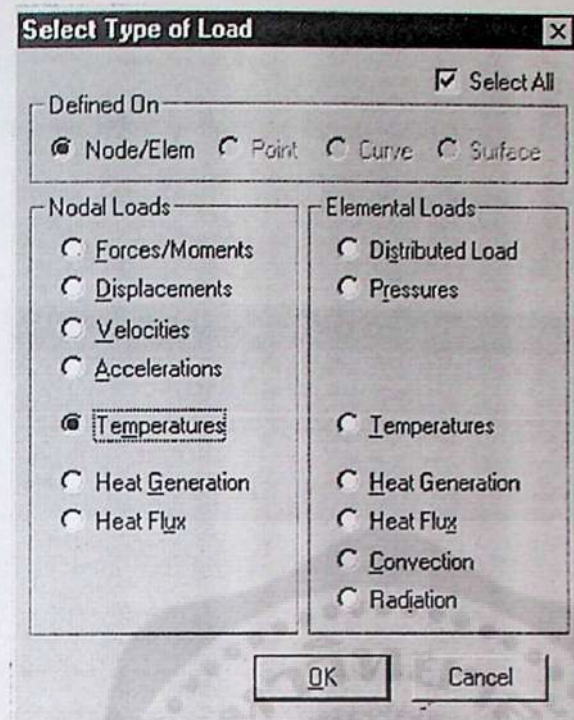
OK

17. นำผลที่วิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ มาคำนวณหา Thermal Stress

Model / Load / From Output...

Nodal Load:

1 Temperatures



รูปภาคผนวกที่ 31 แสดงการกำหนดรูปแบบของโหลดเพื่อนำมาวิเคราะห์

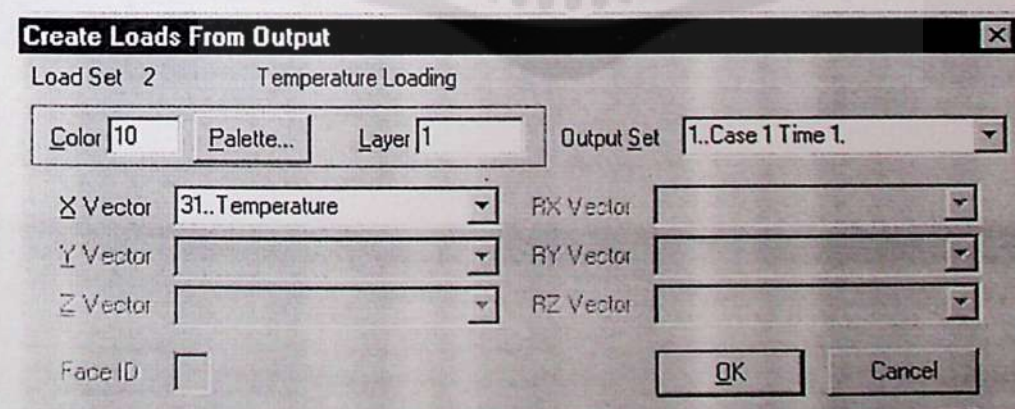
OK

Output Set:

1... Case 1 Time 1

X Vector:

31... Temperature



รูปภาคผนวกที่ 32 แสดงค่าที่จะต้องการเลือกผลลัพธ์ที่ประมวลผลแล้ว

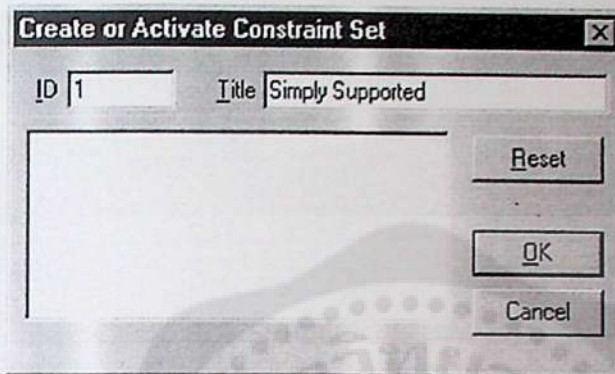
OK

18. ตั้งชื่อหัวเรื่องสถานะขอบเขตเงื่อนไขต่าง ๆ

Model / Constraint / Set...

Title:

Simply Supported



รูปภาคผนวกที่ 33 แสดงการตั้งชื่อรูปแบบปัญหาเพื่อกำหนดเงื่อนไขให้กับ Model ต่อไป

OK

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดเงื่อนไขตามโหนดต่าง ๆ

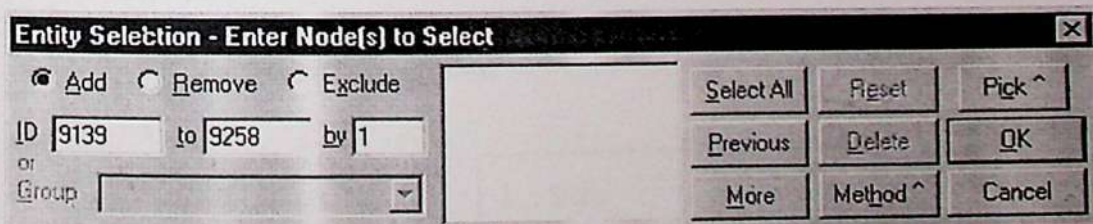
Model / Constraint / Nodal...

ID:

9139

To:

9258



รูปภาคผนวกที่ 34 แสดงโหนดที่จะกำหนดให้มีการอยู่กับที่

OK
Pinned

Create Nodal Constraints/DOF

Constraint Set 1 Simply Supported

Color 120 Palette... Layer 1 Coord Sys 0..Basic Rectangular

DOF

☒ TX	☒ TY	☒ TZ	Fixed	Pinned	☒ X Symmetry	☒ X AntiSym	OK
☐ RX	☐ RY	☐ RZ	Free	No Rotation	☐ Y Symmetry	☐ Y AntiSym	
						☐ Z Symmetry	

Cancel

รูปภาคผนวกที่ 35 แสดงเงื่อนไขที่จะให้มีการอยู่กับที่

OK

ID:

9269

To:

9338

OK
Pinned
OK
CENCEL

19. ทำการวิเคราะห์ผลของ Thermal Stress

File / Analyze...

Analysis Type:

1... Static

2... Temperature Loading



Load:



Constraints:

1... Simply Supported

Output Types:

2... Displacements and Stresses



Run Analysis

NASTRAN Analysis Control

Analysis Conditions Analysis Type: 1..Static ☒ Loads: 2..Temperature Loading ☒ Constraints: 1..Simply Supported ☐ Initial Conditions:		Additional Info Number of Time Steps: 10 Initial Time Increment: 1 Output Step Interval: 1 ☒ Run Analysis ☐ Iterative Solver: Restarts...	
Output Requests Output Types: 2..Displacements and Stress For Group: 0..Entire Model		Estimated Disk Space: 366 MBytes Advanced... OK Loads... Cancel	

รูปภาคผนวกที่ 36 แสดงการวิเคราะห์ Thermal Stress

OK

Save the Model

Yes

Continue

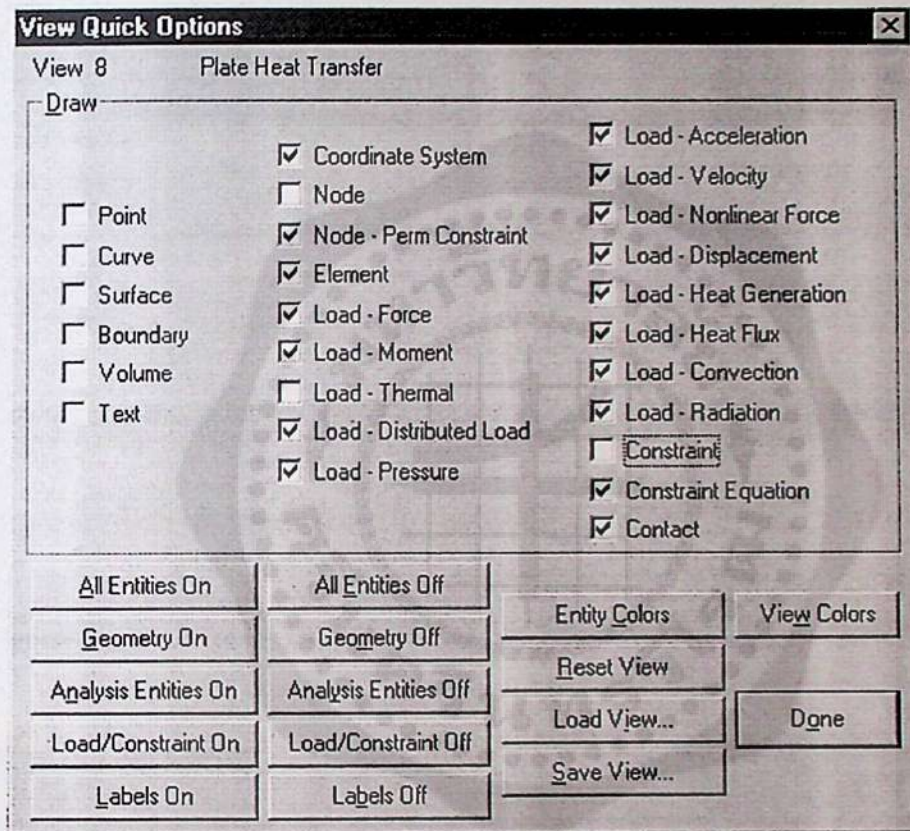
20. ทำการลบ Nodal, Load-Thermal และ Constraint

View / Options...

Quick Options

Geometry Off

- ☐ Nodal
- ☐ Load Thermal
- ☐ Constraint



รูปภาคผนวกที่ 37 แสดงการปิดจุดที่อยู่กับที่

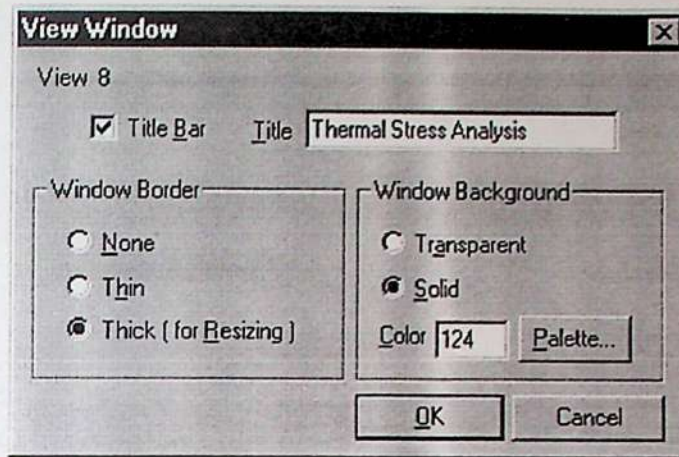
Done
OK

21. เปลี่ยนชื่อเรื่องหน้าต่างคอมพิวเตอร์เป็น Thermal Stress Analysis

View / Windows...

Title:

Thermal Stress Analysis



รูปภาคผนวกที่ 38 แสดงการตั้งชื่อเรื่องที่หน้าจอแสดงผล

OK

22. กำหนดมาตราส่วนของ Deformation

View / Options...

Category:

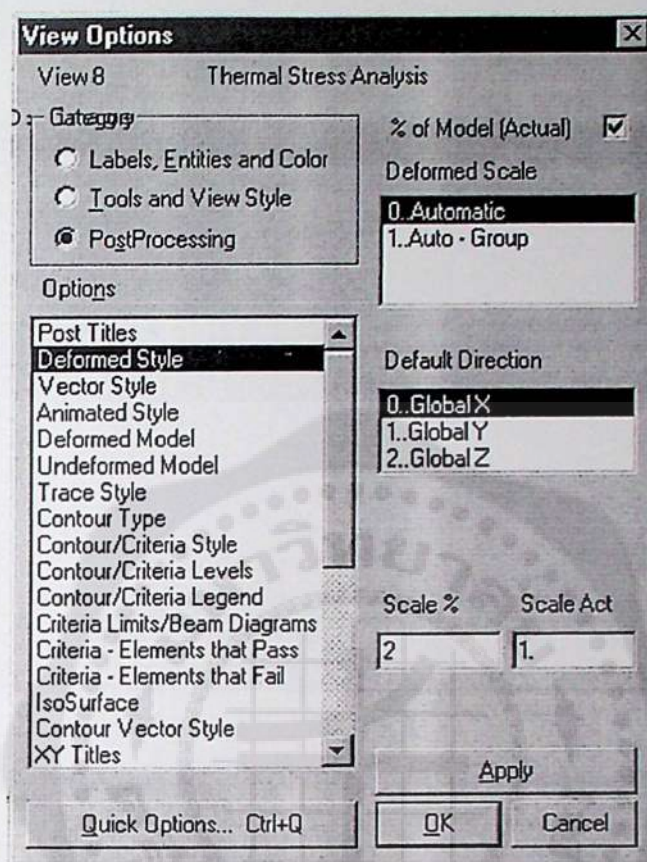
Post Processing

Options:

Deformed Style

Scale %:

2



รูปภาคผนวกที่ 39 แสดงการกำหนดมาตราส่วนของรูปในการแสดงผล

OK

23. นำผลจากการวิเคราะห์มาแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์

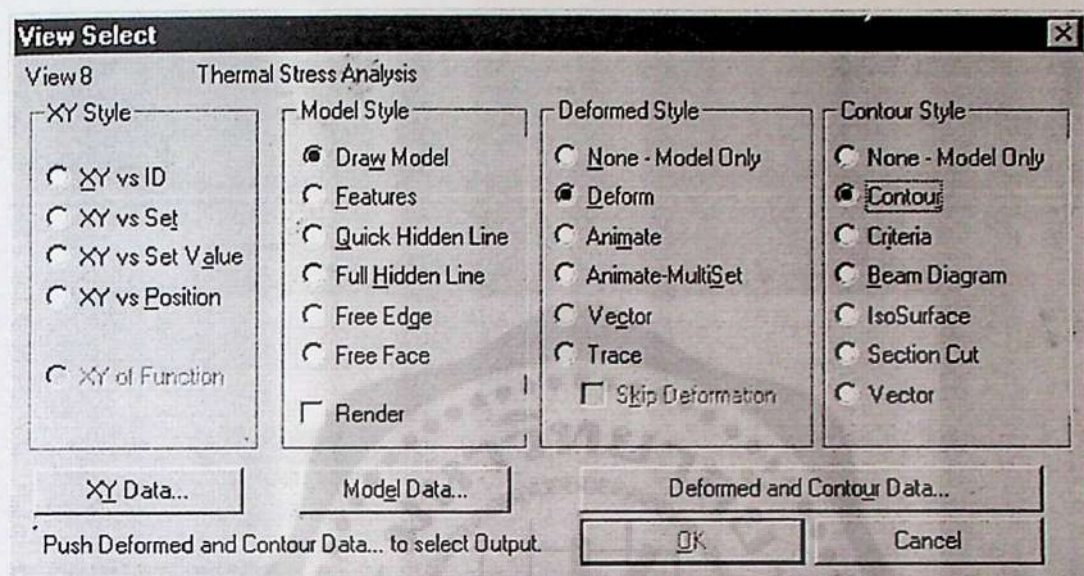
View / Select...

Deformed Style:

1 Deform

Contour Style:

1 Contour



รูปภาคผนวกที่ 40 แสดงการกำหนดให้มีระยะการโก่งตัว

Deformed and Contour Data...

Output Set:

2... MSC / NASTRAN Case 1

OK

Output Vectors / Deformation:

1... Total Translation

Output Vectors / Contour:

60031... Solid Von Miss Stress

Select PostProcessing Data [X]

View 8 Thermal Stress Analysis

Data Selection

Category [0..Any Output] [v]
 Type [0..Value or Magnitude] [v]
☐ Data at Corners

Section Cut Options

☐ Cut Model [Define Section...]
☐ Contour Sections
 Number [] Spacing []

Output Set

	Program	Analysis Type	Set Value
[2..MSC/NASTRAN Case 1] [v]	MSC/NASTRAN	Static	0.

Output Vectors

Deformation	Type		ID	Value
[1..Total Translation] [v]	Node	Maximum	1780	0.0220359
		Minimum	9139	0.
Contour				
[60031..Solid Von Mises Stress] [v]	Element	Maximum	17797	1.1226E+10
		Minimum	12750	3.23625E+9

Final Output Set

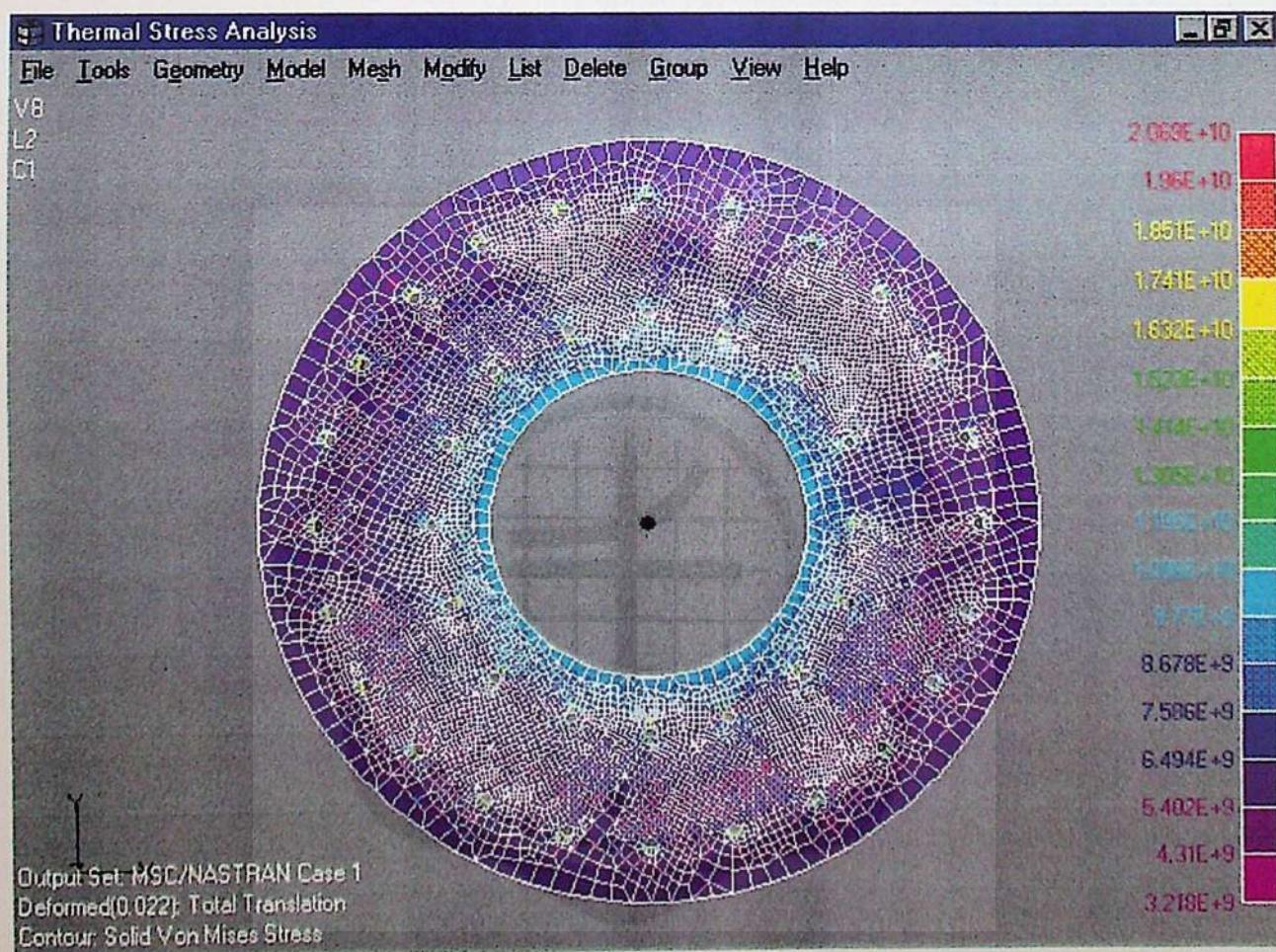
[] [v]
 Output Set Increment [1]

Trace Locations... Contour Options...
 Contour Vectors... [OK]
 Freebody Display... Cancel

รูปภาคผนวกที่ 41 แสดงผลลัพธ์ของ Thermal Stress และ Deformation

OK

OK



รูปภาคผนวกที่ 42 แสดงผลการเกิดความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ

Save

View / Windows...

Title:

Displacement Analysis

OK

View / Select...

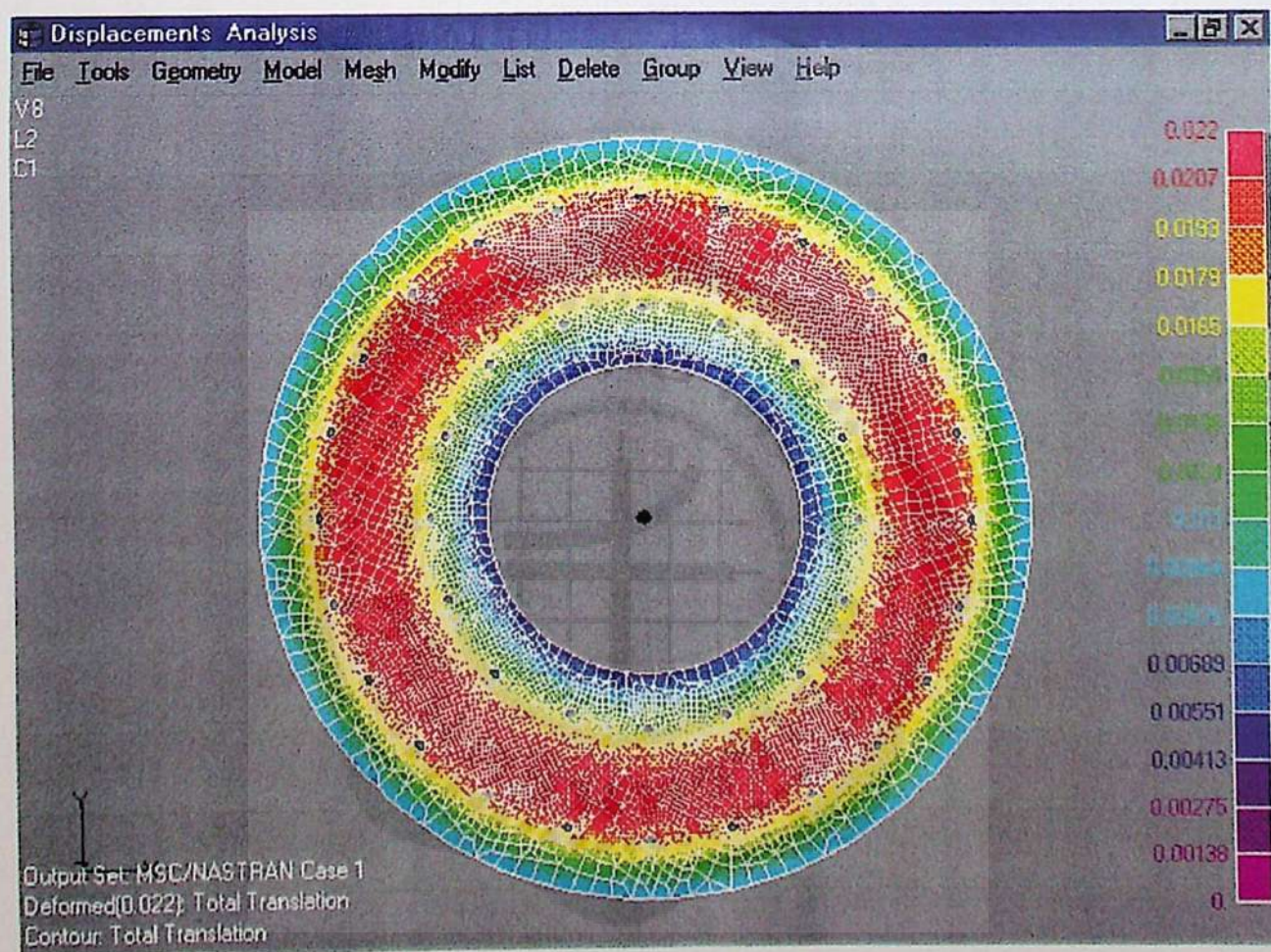
Deformed and Contour Data...

Output Vectors / Contour :

1...Total Translation

OK

OK



รูปภาคผนวกที่ 43 แสดงผลระยะการโก่งตัว

ตารางภาคผนวกที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

Material	Density	Yield Stress	Ultimate Stress	Poisson's Ratio	Young's Modulus	Percent Elongation at Rupture	Thermal Coefficient
	10^3 kg/m^3	MPa	MPa		GPa		$(10^{-6}) / ^\circ \text{C}$
Steel							
Structural, ASTM A36	7.85	250	400	0.29	200	30	11.7
AISI-C 1030, normalized	7.85	340	530	0.29	200	30	11.7
AISI-C 1040, normalized	7.85	390	590	0.29	200	28	11.7
AISI-C 1080, normalized	7.85	520	1010	0.29	200	11	11.7
AISI-3140, normalized	7.85	620	900	0.29	200	19	11.7
AISI-4340, normalized	7.8	860	1310	0.29	200	12	11.7
AISI 301 Stainless, Annealed	7.92	280	760	0.27	193	60	17.3
AISI 301 Stainless, half hard	7.92	760	1030	0.27	193	15	17.3
Cast Iron							
Gray, Class 30 (tension)	7.21		210	0.20	103	nil	12.1
Gray, Class 30 (compression)	7.21		510	0.20	103	nil	12.1
Gray, Class 40 (tension)	7.21		410	0.20	138	nil	12.1
Gray, Class 40 (compression)	7.21		990	0.20	138	nil	12.1
Aluminum Alloys							
1100-H12	2.71	103	110	0.33	70.0	25	23.5
2024 T4	2.77	320	470	0.33	74.5	19	22.5
7075 T6	2.77	500	570	0.33	72.0	11	22.5

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

Material	Density	Yield Stress	Ultimate Stress	Poisson's Ratio	Young's Modulus	Percent Elongation at Rupture	Thermal Coefficient
	10^3 kg/m^3	MPa	MPa		GPa		$(10^{-6}) / ^\circ\text{C}$
Copper Alloys							
Yellow Brass, annealed	8.43	117	340	0.35	105	60	20.0
Yellow Brass, half hard	8.43	340	420	0.35	105	23	20.0
Commercial Bronze, annealed	8.84	90	270	0.35	110	45	18.0
Commercial Bronze, half hard	8.84	280	330	0.35	110	25	18.0
Titanium							
Alloy Ti-Al-V	4.54	890	930	0.33	114	12	9.5
Timber							
Douglas Fir	0.45		51		12.5		
Yellow Pine (compression)	0.54		57		13.8		
White Oak (compression)	0.59		47		11.0		
Concrete							
Medium Strength (comp.)	2.32		28	0.15	25.0		9.9

ตารางภาคผนวกที่ 2 สมบัติทางความร้อนของโลหะ (ของแข็ง)

ชนิดของโลหะ	สมบัติที่ 300 K			
	P (kg/m ³)	Cp (J/kg.K)	k (W/m.K)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)
อะลูมิเนียมบริสุทธิ์	2702	903	237	97.1
โครเมียม	7160	449	93.7	29.1
ทองแดงบริสุทธิ์	8933	385	401	117
ตะกั่ว	11340	129	35.3	24.1
เหล็กบริสุทธิ์	7870	447	80.2	23.1
เหล็กกล้า C = 0.5%	7833	465	54	14.7
C = 1.0%	7801	473	43	11.7
C = 1.5%	7753	486	36	9.7
เหล็กหล่อ	7272	420	52	1.702
เหล็กผสมโครเมียมต่ำ				
Cr = 0.65%	7822	444	37.7	10.9
Cr = 1.0%	7858	442	42.3	12.2
Cr = 1.02%	7836	443	48.9	14.1
เหล็กผสมซิลิคอน				
0.1% < Si < 0.6%	7817	446	51.9	14.9
เหล็กกล้าไร้สนิม				
AISI 302	8055	480	15.1	3.91
AISI 304	7900	477	14.9	3.95
AISI 316	8238	468	13.4	3.48
AISI 347	7978	480	14.2	3.71
เงิน	10500	235	429	174
แพลทินัมบริสุทธิ์	21450	133	71.6	25.1
ดีบุก	7310	227	66.6	40.1
สังกะสี	7140	389	116	41.8

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ

นายจรินทร์ แว่ววับ

ประวัติ

เกิดวันที่ 7 กันยายน 2519

ที่อยู่ 37/1 หมู่ที่ 7 ตำบลบางเขน อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
11000

ประวัติการศึกษา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ โรงเรียนช่างฝีมือปทุมวิภา
สาขาช่างยนต์

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคคอนเมือง
สาขาช่างยนต์

ชื่อ

ว่าที่ร.ต.พงษ์ศักดิ์ หมั่นยา

ประวัติ

เกิดวันที่ 18 พฤศจิกายน 2520

ที่อยู่ 19/2 หมู่ที่ 1 ตำบลแม่พลู อำเภอทับแล จังหวัดอุตรดิตถ์
53130

ประวัติการศึกษา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคอุตรดิตถ์ สาขาช่างยนต์

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคอุตรดิตถ์

สาขาช่างยนต์