

การวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดบนกลไกจักรกลด้วย Pro/MECHANICA

นางสาว ไศรภา แฉงการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-533-153-8

**ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN IN MECHANISMS OF MACHINERY USING  
Pro/MECHANICA**

**Miss Sorada Khaengkarn**

**A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2002  
ISBN 974-533-153-8**

การวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดบนกลไกจักรกลด้วย Pro/MECHANICA  
ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN IN MECHANISMS OF MACHINERY USING  
Pro/MECHANICA

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

ประธานกรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร. วรพจน์ จำพิศ)

กรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)

กรรมการ

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย จันทร์สาโร)

กรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....

(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร. วรพจน์ จำพิศ)

คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

โทรศูณห์แจ้งการ : การวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดบนกลไกจักรกลด้วย

Pro/MECHANICA (ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN IN MECHANISMS OF

MACHINERY USING Pro/MECHANICA) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิ

ประศาสน์, จำนวน 206 หน้า. ISBN 974-533-153-8

เนื่องจาก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ทำการวิจัยเพื่อค้นคว้าและพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบใหม่ แบบการจัดเป็นบวก (Positive Displacement Engines) กำลังงานที่เกิดจากการสันดาปจะถูกส่งให้แผ่นรับแรง ซึ่งจะส่งกำลังให้แขนส่งกำลัง (Connecting rod) ที่เป็นกลไกส่งกำลังไปยังเพลาขับอีกต่อหนึ่ง ชิ้นส่วนกลไกที่มีความสำคัญในเครื่องยนต์ทั้งสองชิ้นนี้ จะต้องรับภาระกรรมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่อาจจะเกิดการวิบัติก่อนกลไกอื่นๆ ในเครื่องยนต์ ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะหาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในแผ่นรับแรงและแขนส่งกำลัง เมื่อมีภาระกรรมที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิง โดยจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์อีลิเมนต์ ในการหาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบนกลไกทั้งสอง คือ Pro/MECHANICA และใช้โปรแกรม Pro/ENGINEER ในการสร้างแบบจำลองสามมิติของกลไกทั้งสองชิ้น โดยผลการวิเคราะห์ของกลไกทั้งสองชิ้นพบว่า ทั้งแผ่นรับแรงและแขนส่งกำลังมีค่าความเค้นสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุอย่างมาก และชิ้นส่วนกลไกทั้งสองเกิดความเสียหายเนื่องจากภาระกรรมที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ภาระกรรมของกลไกทั้งสองได้กำหนดขึ้นจากสภาพการณ์ที่เลวร้ายที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งเกิดขึ้นน้อยมากในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา\_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา\_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม\_\_\_\_\_

SORADA KHAENGKARN : ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN IN  
MECHANISMS OF MACHINERY USING Pro/MECHANICA THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF KONTORN CHAMNIPRASART, Ph. D., 206 PP., ISBN 974-533-153-8

The School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, is now carrying out research to develop a new internal combustion engine. This engine is a positive displacement engine. The power received from the combustion will be delivered to a plate and then transmitted to a connecting rod, a mechanism passing the motion and power to a drive shaft. Both mechanisms play important roles in the engine and have to carry a time varying loads from the combustion gas. Therefore, there is a high possibility that these mechanisms will fail before other mechanisms in the engine. The purpose of this thesis is to analyze stress and strain occurring in the plate and connecting rod under the specific load from combustion gas by utilizing a commercial finite element program called Pro/MECHANICA. In addition, a Pro/ENGINEER program is employed to simulate the 3-dimension model of these mechanisms. The result indicates that the stress acting on both mechanisms exceeds the maximum allowable stress of model. This shows that both mechanisms will fail under a specific load. However, the specific load constitutes the worst possible condition, and occurs only rarely in the internal combustion engine.

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล ดังต่อไปนี้ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดี ทั้งด้านวิชาการ และด้านอื่นๆ ซึ่งเป็นผลให้การดำเนินงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อาทิเช่น

- รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และหัวหน้าโครงการพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบใหม่
- รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก. ดร. วรพนธ์ จำพิศ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย จันทรสโร อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- คุณพรสวรรค์ ทองใบ และคุณนพดล ลัทธิกุล ผู้ช่วยวิจัยโครงการพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบใหม่
- คุณศรัทธา โพธิสว่าง วิศวกรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา และคุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาผู้ให้การอบรมเลี้ยงดู รวมทั้งให้กำลังใจและส่งเสริมด้านการศึกษาเป็นอย่างดียิ่งเสมอมา

โสทรฎา แข็งการ

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.3 วิธีการที่ใช้ในการออกแบบกลไกของเครื่องจักรกล.....	3
1.4 ความเป็นมาของการใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบ.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>2. วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 วิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนและโครงสร้างโดยทั่วไป.....	7
2.2 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนและโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	8
2.2.1 ความเป็นมาของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	8
2.3 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนกลไกจักรกลด้วย Pro/MECHANICA.....	12
2.4 วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์บนPro/MECHANICA Structure .....	15
2.5 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
<b>3. การออกแบบและวิเคราะห์แผ่นรับแรง</b>	
3.1 โครงสร้างและขนาดเบื้องต้นของแผ่นรับแรง.....	21
3.2 ข้อกำหนดในการออกแบบแผ่นรับแรง.....	22

## สารบัญญ (ต่อ)

หน้า

3.3	ภาระกรรมที่แผ่นรับแรงได้รับ.....	23
3.3.1	การคำนวณหาแรงดันที่กระทำกับแผ่นรับแรง.....	26
3.3.2	การคำนวณหาอุณหภูมิที่กระทำกับแผ่นรับแรง.....	34
3.4	การวิเคราะห์แผ่นรับแรงด้วย Pro/MECHANICA Structure.....	35
3.4.1	ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงแบบภาระกรรมเป็นแรงดัน.....	36
3.4.2	ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงแบบภาระกรรมเป็นอุณหภูมิ.....	48
3.4.3	ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงแบบภาระกรรมเป็นแรงดันและอุณหภูมิ.....	69
3.5	การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรง.....	81
3.5.1	การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงเมื่อภาระกรรมเป็นแรงดัน.....	81
3.5.2	การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงเมื่อภาระกรรมเป็นอุณหภูมิ.....	82
3.5.3	การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงเมื่อภาระกรรมเป็นแรงดันและ อุณหภูมิ.....	83
4.	การออกแบบและวิเคราะห์แขนส่งกำลัง	
4.1	โครงสร้างและขนาดเบื้องต้นของแขนส่งกำลัง.....	85
4.2	ข้อกำหนดในการออกแบบแขนส่งกำลัง.....	88
4.3	ภาระกรรมที่แขนส่งกำลังได้รับ.....	89
4.3.1	การวิเคราะห์คินิเมติกส์ของกลไกแขนส่งกำลัง.....	89
4.3.2	การวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของแขนส่งกำลัง.....	85
4.3.3	การวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์และไดนามิกส์ของกลไกแขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Motion.....	102
4.4	ความเป็นมาของการใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบ.....	106
4.4.1	กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%.....	107
4.4.2	กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%.....	111
4.4.3	กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%.....	115
4.5	การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง.....	124



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	127
5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรง.....	127
5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง.....	128
5.2 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงาน.....	129
5.2.1 ปัญหาเนื่องจากการใช้โปรแกรม.....	129
5.2.2 ปัญหาเนื่องมาจากแหล่งข้อมูลของโปรแกรม.....	130
รายการอ้างอิง.....	131
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ทฤษฎี การคำนวณที่เกี่ยวข้องและ Script file โปรแกรม MATLAB.....	134
ภาคผนวก ข ข้อมูลวัสดุที่เลือกใช้.....	140
ภาคผนวก ค ตารางผลการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์จาก Pro/MECHANICA.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	206

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	36
3.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	40
3.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	44
3.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	51
3.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	58
3.6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	65
3.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	69
3.8 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	73
3.9 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	77
4.1 ผลการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์ของชุดกลไกส่งกำลัง.....	94
4.2 ผลจากการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง กรณีที่ 1.....	107
4.3 ผลจากการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง กรณีที่ 2.....	111
4.4 ผลจากการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง กรณีที่ 3.....	115
ข.1 ตารางคุณสมบัติทางกลของ SKD11.....	142
ข.2 ตารางเทียบคุณสมบัติทางกลกับค่าความแข็งของวัสดุ.....	144
ค.1 ผลการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์ของกลไกชิ้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion.....	146
ค.2 ผลการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์ของกลไกชิ้นที่ 4 ด้วย Pro/MECHANICA Motion.....	147
ค.3 ผลการวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของกลไกชิ้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%.....	148
ค.4 ผลการวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของกลไกชิ้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70%.....	149
ค.5 ผลการวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของกลไกชิ้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50%.....	150

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.6 แนวโน้มของความเค้นเมื่อเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลังที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%.....	151
ค.7 แนวโน้มของความเค้นเมื่อเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลังที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%.....	152
ค.8 แนวโน้มของความเค้นเมื่อเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลังที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%.....	153

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์แบบต่างๆ.....	9
2.2 อีลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสี่จุดต่อ โดยมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ ณ ตำแหน่ง ที่จุดต่อ.....	10
2.3 ขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA.....	14
3.1 แบบโครงร่างเบื้องต้นของแผ่นรับแรง.....	22
3.2 แสดงผิวที่ทำกรกำหนดการขีดของแผ่นรับแรง.....	23
3.3 แสดงพื้นที่รับแรงกระทำของแผ่นรับแรง.....	24
3.4 ลักษณะของแรงดันที่กระทำกับแผ่นรับแรง.....	25
3.5 ผิวของแผ่นรับแรงที่รับภาระกรรมทางความร้อน.....	26
3.6 P-v diagram ของวัฏจักรอากาศมาตรฐานออกโต.....	27
3.7 T-s diagram ของวัฏจักรอากาศมาตรฐานออกโต.....	27
3.8 อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยสู่ผนังห้องเผาไหม้เทียบต่อความเร็วรอบของ เครื่องยนต์ SI.....	35
3.9 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	37
3.10 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	37
3.11 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	38
3.12 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	38
3.13 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	39

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงการกระจายตัวของการจذبบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	39
3.15 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	41
3.16 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	41
3.17 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	42
3.18 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	42
3.19 แสดงการกระจายตัวของการจذبบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	43
3.20 แสดงการกระจายตัวของการจذبบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	43
3.21 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	45
3.22 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	45
3.23 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	46
3.24 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	46
3.25 แสดงการกระจายตัวของการจذبบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	47
3.26 แสดงการกระจายตัวของการจذبบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	47
3.27 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	48
3.28 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	49
3.29 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 100\%$ (ด้านหน้า).....	49
3.30 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 100\%$ (ด้านบน).....	50
3.31 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 100\%$ (สามมิติ).....	50
3.32 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	52
3.33 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	52

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.34 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	53
3.35 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	53
3.36 แสดงการกระจายตัวของการจັดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	54
3.37 แสดงการกระจายตัวของการจັดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	54
3.38 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	55
3.39 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	56
3.40 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 70\%$ (ด้านหน้า) .....	56
3.41 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 70\%$ (ด้านบน) .....	57
3.42 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 70\%$ (สามมิติ) .....	57
3.43 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	59
3.44 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	59
3.45 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	60
3.46 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	60
3.47 แสดงการกระจายตัวของการจັดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	61
3.48 แสดงการกระจายตัวของการจັดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	61
3.49 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	62
3.50 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	63
3.51 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 50\%$ (ด้านหน้า) .....	63
3.52 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 50\%$ (ด้านบน) .....	64
3.53 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่ $\eta_c = 50\%$ (สามมิติ) .....	64

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.54 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	66
3.55 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	66
3.56 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	67
3.57 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	67
3.58 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	68
3.59 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	68
3.60 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	70
3.61 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	70
3.62 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	71
3.63 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	71
3.64 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	72
3.65 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	72
3.66 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	74
3.67 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	74
3.68 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	75
3.69 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	75
3.70 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	76
3.71 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	76
3.72 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	78
3.73 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	78

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.74 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	79
3.75 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	79
3.76 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	80
3.77 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	80
4.1 ไดอะแกรมคินิเมติกส์ ของชุดการกลไกแบบการเคลื่อนที่ของแขนส่งกำลัง.....	85
4.2 แสดงลักษณะของชิ้นส่วนกลไก ชั้นที่ 2 หรือข้อเหวี่ยง (Crank).....	86
4.3 แสดงลักษณะชิ้นส่วนกลไก ชั้นที่ 3 หรือแขนส่งกำลัง (Connecting rod).....	87
4.4 แสดงลักษณะชิ้นส่วนกลไก ชั้นที่ 4 หรือ Rocker.....	87
4.5 แสดงภาพประกอบของชุดกลไกแขนส่งกำลัง.....	88
4.6 แสดงไดอะแกรมของชุดกลไกสำหรับการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์.....	90
4.7 ภาพประกอบของกลไกในตำแหน่งที่มีแรงกระทำที่แขนส่งกำลังสูงสุด.....	96
4.8 รูปแสดงลักษณะการสมดุล (Free-body diagram) ของชิ้นส่วนต่างๆ.....	96
4.9 ความเร็วเชิงมุมของกลไกชั้นที่ 3 ที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	102
4.10 ความเร่งเชิงมุมของกลไกชั้นที่ 3 ที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	103
4.11 ความเร็วเชิงมุมของกลไกชั้นที่ 4 ที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	103
4.12 ความเร่งเชิงมุมของกลไกชั้นที่ 4 ที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	104
4.13 ขนาดของแรงกระทำที่รัฐวมสติกของกลไกชั้นที่ 3 ที่ $\eta_c = 100\%$ .....	104
4.14 ขนาดของแรงกระทำที่รัฐวมสติกของกลไกชั้นที่ 3 ที่ $\eta_c = 70\%$ .....	105
4.15 ขนาดของแรงกระทำที่รัฐวมสติกของกลไกชั้นที่ 3 ที่ $\eta_c = 50\%$ .....	105
4.16 แบบจำลองแขนส่งกำลังสำหรับการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure.....	106



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 กำหนดเงื่อนไขข้อกำหนดที่รูสวมสลักของแขนส่งกำลัง.....	106
4.18 แรงกระทำบนแขนส่งกำลัง.....	106
4.19 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแขนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 1.....	108
4.20 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแขนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 1.....	108
4.21 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแขนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 1.....	109
4.22 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแขนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 1.....	109
4.23 แสดงการกระจายตัวของการจัดของแบบจำลองแขนส่งกำลัง แบบ Fringe plot กรณีที่ 1.....	110
4.24 แสดงการกระจายตัวของการจัดของแบบจำลองแขนส่งกำลัง แบบ Contour plot กรณีที่ 1.....	110
4.25 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแขนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 2.....	112
4.26 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแขนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 2.....	112
4.27 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแขนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 2.....	113

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 2.....	113
4.29 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 2.....	114
4.30 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลัง แบบ Fringe plot กรณีที่ 2.....	114
4.31 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลัง แบบ Contour plot กรณีที่ 2.....	116
4.32 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 3.....	116
4.33 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 3.....	117
4.34 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 3.....	117
4.35 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 3.....	118
4.36 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลัง แบบ Fringe plot กรณีที่ 3.....	118
4.37 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลัง แบบ Contour plot กรณีที่ 3.....	119

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ตัวแปรขนาดของแขนส่งกำลังที่นำมาพิจารณา.....	120
4.39 แสดงแนวโน้ม้มของความเค้นของ von Mises เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 1.....	120
4.40 แสดงแนวโน้ม้มของความเครียดหลักสูงสุด เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 1.....	121
4.41 แสดงแนวโน้ม้มของการจัด เมื่อความหนาของแบบจำลองแขนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 1.....	121
4.42 แสดงแนวโน้ม้มของความเค้นของ von Mises เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 2.....	122
4.43 แสดงแนวโน้ม้มของความเครียดหลักสูงสุด เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 2.....	122
4.44 แสดงแนวโน้ม้มของการจัด เมื่อความหนาของแบบจำลองแขนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 2.....	123
4.45 แสดงแนวโน้ม้มของความเค้นของ von Mises เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 3.....	123
4.46 แสดงแนวโน้ม้มของความเครียดหลักสูงสุด เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 3.....	124
4.47 แสดงแนวโน้ม้มของการจัด เมื่อความหนาของแบบจำลองแขนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 3.....	123
ก.1 รูปประกอบการคำนวณหาความยาวของConnecting rod .....	136

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

### สัญลักษณ์

a	=	ความยาวของแผ่นรับแรง, m
A	=	พื้นที่รับแรงกระทำของแผ่นรับแรง, m <sup>2</sup>
AF	=	Air-fuel ratio
b	=	ความกว้างของแผ่นรับแรง, m
C	=	ค่าคงที่
C <sub>p</sub>	=	Constant pressure specific heat, kJ/kg.K
C <sub>v</sub>	=	Constant volume specific heat, kJ/kg.K
E	=	โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Young's Modulus)
F	=	เมทริกซ์ของภาระกรรมที่จุดต่อ (Vector of nodal loads)
N	=	ฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์
k	=	Isentropic index
k <sub>c</sub>	=	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity), W/m.K
K	=	อีลิเมนต์เมทริกซ์ (Element matrix) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหา
m	=	มวล, kg
P	=	ความดัน (Pressure), Pa
Q	=	ปริมาณความร้อน (Heat), J
q	=	ปริมาณความร้อนจำเพาะ (Specific heat), J/kg
R	=	Gas Constant, kJ/kg.K
r <sub>c</sub>	=	Compression ratio
T	=	อุณหภูมิ (Temperature), K
V	=	ปริมาตร (Volume), m <sup>3</sup>
v	=	ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume), m <sup>3</sup> /kg
V <sub>c</sub>	=	Clearance volume, m <sup>3</sup>
V <sub>d</sub>	=	Displacement volume, m <sup>3</sup>
w	=	ปริมาณงานจำเพาะ (Specific work), J/kg

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$x$	=	พิกัดแกน $x$ ของระบบแกน Cartesian
$y$	=	พิกัดแกน $y$ ของระบบแกน Cartesian
$z$	=	พิกัดแกน $z$ ของระบบแกน Cartesian
$\phi$	=	ตัวไม่ทราบค่า หรือ Nodal unknown ณ ตำแหน่งที่จุดต่อในสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ ขึ้นอยู่กับปัญหาที่กำลังพิจารณา
$\rho$	=	ความหนาแน่น (Density), $\text{kg/m}^3$
$\nu$	=	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)
$\alpha$	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal expansion), $1/\text{K}$
$\sigma_y$	=	ความแข็งแรงเชิงดึง (Tensile strength), Pa
$\eta_c$	=	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
$\eta_{th}$	=	ประสิทธิภาพการเชิงความร้อน
$\theta$	=	มุมการทำงานของแผ่นรับแรง, rad
$\dot{\theta}, \omega$	=	ความเร็วเชิงมุม, rad/s
$\ddot{\theta}, \alpha$	=	ความเร่งเชิงมุม, $\text{rad/s}^2$

### ตัวห้อย

$a$	=	air
$e$	=	element
$f$	=	fuel
$i$	=	ตำแหน่งของตัวไม่ทราบ (Nodal unknown) มีค่าเท่ากับ 1, 2, และ 3
HV	=	Heating value
M	=	mixture
sys	=	system ซึ่งหมายถึงระบบสมการใหญ่

### คำย่อ

BEM	=	Boundary Element Method
CAD	=	Computer Aided Design
CAE	=	Computer Aided Engineering

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CAM	=	Computer Aided Manufacturing
FEM	=	Finite Element Method
GUI	=	Graphical User Interface
MPA	=	Multi-Pass Adaptivity
SAE	=	Society of Automotive Engineers
SPA	=	Single-Pass Adaptivity

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ เป็นที่ยอมรับกันว่ากลไกจักรกลต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องยนต์สันดาปภายในทั้งขนาดเล็กและใหญ่ มีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างมาก ไม่ว่าจะใช้พาหนะแบบใดก็ตาม ทั้งทางบก ทางน้ำ และทางอากาศ นอกจากนี้ ยังเป็นต้นกำลังสำคัญของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมต่างๆ เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้กันเกือบทั้งหมดเป็นเครื่องยนต์ที่ต้องการแหล่งพลังงานจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมประเภทต่างๆ เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานจากเครื่องยนต์ของโลกมีมากขึ้นทุกขณะ แต่ปริมาณน้ำมันสำรองในโลกก็มีปริมาณลดลงเช่นเดียวกัน ทำให้มีแนวความคิดที่จะพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยทำให้มีกำลังเท่าเดิมหรือสูงกว่า แต่ใช้น้ำมันในอัตราที่น้อยลง เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ สามารถที่จะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ เครื่องจักรกังหัน (Turbomachines) และเครื่องยนต์ที่มีการขจัดเป็นบวก (Positive Displacement Machines) สำหรับเครื่องยนต์แบบเครื่องจักรกังหัน โดยส่วนใหญ่จะใช้กับเครื่องยนต์ของอากาศยานและในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องจักรเหล่านี้มักจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์แบบอื่น สำหรับเครื่องยนต์แบบการขจัดเป็นบวกที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องยนต์แบบลูกสูบเกือบทั้งสิ้น และเครื่องยนต์แบบลูกสูบนี้มักจะพบเห็นว่าเป็นเครื่องจักรต้นกำลังสำหรับอุปกรณ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวันแทบทุกประเภท

เครื่องยนต์แบบลูกสูบมีประวัติความเป็นมาที่ยาวนานนับร้อยปี มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์ให้สูงขึ้น เช่น การพัฒนาระบบกลไกต่างๆ ภายในเครื่องยนต์เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น การนำระบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยในการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อให้ทำงานได้แม่นยำมากขึ้นกว่าระบบกลไกที่เคยใช้อยู่ รวมถึงได้มีการพยายามที่จะใช้วัสดุสมัยใหม่เพื่อลดขนาดและน้ำหนักของเครื่องยนต์ลงพร้อมกับเพิ่มความทนทานให้กับเครื่องยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์แบบลูกสูบก็มีข้อจำกัดอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นด้านกลศาสตร์ที่มีชิ้นส่วนต่างๆ ที่เคลื่อนที่อยู่หลายชิ้นทำให้การสึกหรอมีมากและการซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ลูกสูบค่อนข้างที่จะซับซ้อน หรือไม่ว่าจะเป็นด้านการถ่ายเทความร้อนซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานค่อนข้างสูง รวมถึงการสันดาปของเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นภายในที่ไม่สมบูรณ์ในบางขณะของการทำงาน

และกำลังที่ผลิตได้เทียบต่อน้ำหนักของเครื่องยนต์ยังอยู่ในอัตราที่ไม่เป็นที่พอใจของวิศวกรนัก ซึ่งได้พยายามที่จะปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น

ในขณะนี้ทางสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ทำการวิจัยและจัดสร้างเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบการจัดเป็นบวชนิคใหม่ขึ้น โดยเครื่องยนต์นี้จะมีขนาดเล็กกว่าเครื่องยนต์ลูกสูบทั่วไป เมื่อมีปริมาตรห้องเผาไหม้เท่ากัน อีกทั้งน้ำหนักเบาขึ้นและมีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่น้อยกว่าเครื่องยนต์ลูกสูบเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องยนต์นี้ยังอยู่ในขั้นวิจัยพัฒนาและจัดสร้าง อีกทั้งยังอยู่ในขั้นตอนการจดสิทธิบัตรจึงไม่สามารถที่จะเปิดเผยรายละเอียดของเครื่องยนต์นี้ได้ วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิจัยเพื่อออกแบบและวิเคราะห์กลไกจักรกลบางส่วนของเครื่องยนต์ที่กล่าวมานี้

งานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบและวิเคราะห์กลไกที่ทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมคล้ายกับในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยจะให้ความสำคัญกับความสามารถที่จะรับภาระกรรมที่เกิดขึ้นได้ กลไกที่ได้ทำการวิเคราะห์มี 2 ชิ้น คือ “แผ่นรับแรง” (Plate) ซึ่งจำลองให้ทำงานอยู่ในกระบอกสูบของเครื่องยนต์และจะทำหน้าที่คล้ายลูกสูบแต่มีรูปร่างและลักษณะที่ต่างออกไป และกลไกที่ใช้ในการส่งกำลังซึ่งเรียกว่า “แขนส่งกำลัง” (Connecting rod) ทำหน้าที่ส่งกำลังไปยังเพลาหมุน ภาระกรรมที่แผ่นรับแรงได้รับเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันที่เกิดจากการอัดตัวและขยายตัวของก๊าซที่อยู่ในห้องเผาไหม้ และที่เกิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงมากภายในห้องเผาไหม้ สำหรับแขนส่งกำลังนั้นภาระกรรมที่ได้รับจะแตกต่างจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับแผ่นรับแรง เนื่องจากแขนส่งกำลังจะมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับกลไกอื่นๆ แบบ Rocker and Crank แรงกระทำที่ได้รับจะเป็นแรงที่เกิดเนื่องจากแรงดึง (Tension) และแรงอัด (Compression) สลับกันไป

การวิเคราะห์กลไกในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบนกลไกทั้งสอง โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อทดสอบชิ้นส่วนที่ทำการออกแบบแทนการสร้างชิ้นส่วนจริง ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติ และแสดงผลการวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดบนแบบจำลอง

การนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบหรือที่นิยมเรียกว่า Computer Aided Design (CAD) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบของวิศวกรในปัจจุบัน และคอมพิวเตอร์ก็ได้รับการพัฒนาจนมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น สำหรับการนำคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ สังเคราะห์ และทำการคำนวณให้ได้แบบที่เหมาะสมตามที่วิศวกรต้องการนั้น เรียกว่า Computer Aided Engineering (CAE) และการใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการผลิตชิ้นส่วนที่ออกแบบ จะเรียกว่า Computer Aided Manufacturing (CAM) อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้มิได้หมายความว่าคอมพิวเตอร์เป็นผู้ออกแบบชิ้นงาน เพราะผู้ที่คิดวิเคราะห์และตัดสินใจคือวิศวกรผู้ออกแบบ คอมพิวเตอร์เป็น



เพียงเครื่องมือที่วิศวกรใช้ในการคำนวณ และวิเคราะห์ตามวิธีการและสภาพแวดล้อมที่วิศวกรกำหนดเท่านั้น ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและทำให้งานในการออกแบบสะดวกสบายมากขึ้นนั่นเอง

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเค้นและความเครียดบนกลไกจักรกลอันเนื่องมาจากแรงกระทำ 2 ชนิด คือ แรงดันและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้บนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์สองชั้นด้วยกันคือ แผ่นรับแรง และ แขนส่งกำลัง โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ Pro/MECHANICA ทำการวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งแสดงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนกลไกทั้งสอง และใช้โปรแกรม Pro/ENGINEER ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

## 1.3 วิธีการที่ใช้ในการออกแบบกลไกของเครื่องจักรกล

การออกแบบกลไกของเครื่องจักรกลที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ก็จะใช้วิธีการเช่นเดียวกับการออกแบบทางวิศวกรรมโดยทั่วไป และถึงแม้ว่าเครื่องยนต์ที่คณะผู้ทำการวิจัยกำลังดำเนินการสร้างอยู่ในขณะนี้จะประกอบด้วยกลไกที่ยังไม่มีผู้ใดนำมาใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในมาก่อนก็ตาม แต่ขั้นตอนและวิธีการการออกแบบด้านวิศวกรรมโดยทั่วไปก็สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานออกแบบนี้ได้เช่นกัน

ขั้นตอนการออกแบบกลไกจักรกลมีดังนี้

1. *กำหนดวัตถุประสงค์ในการออกแบบ:* สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบกลไกจักรกลสองชั้น คือ แผ่นรับแรง และ แขนส่งกำลัง ให้สามารถทนต่อภาระกรรมที่มากกระทำโดยไม่เกิดการวิบัติและทำงานตามที่กำหนดให้ได้
2. *ตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์:* ในขั้นนี้ผู้ออกแบบจะต้องออกแบบรูปร่างของกลไก เบื้องต้นเสียก่อน และกำหนดว่ามีภาระกรรมชนิดใดเกิดขึ้นกับกลไกดังกล่าวบ้าง วัสดุที่จะใช้ผลิตกลไกเป็นวัสดุชนิดใด พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลเพื่อเลือกวิธีการในการวิเคราะห์ โดยการรวบรวมข้อมูลนั้นจะหาได้จากหนังสือ บทความหรือการทดลองที่เคยทำในอดีตและนำมาเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกวิธีการในการวิเคราะห์ เพื่อให้ทราบผลที่เกิดขึ้นจากภาระกรรม ซึ่งวิธีการในการวิเคราะห์อาจทำได้หลายวิธี การออกแบบกลไกจักรกลในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกวิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์คือ Pro/MECHANICA
3. *วิเคราะห์ชิ้นส่วนที่ออกแบบ:* วิเคราะห์กลไกจักรกลตามวิธีการที่เลือก

4. *สรุปและวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์*: สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ว่าสมเหตุสมผลหรือไม่ หากผลที่ได้ไม่สมเหตุสมผล ต้องวิเคราะห์ต่อว่าเพราะเหตุใด อาจเกิดจากการตั้งสมมุติฐานไม่ดี หรือเกิดข้อผิดพลาดในขั้นตอนการวิเคราะห์ แล้วทำการวิเคราะห์ซ้ำอีกครั้งจนกว่าจะได้กลไกจักรกลที่สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์

การวิเคราะห์ชิ้นส่วนกลไกด้วยวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) เพื่อทำนายพฤติกรรมทางกายภาพ และการเกิดความเค้นและความเครียดบนชิ้นส่วนนั้น หากว่าชิ้นส่วนที่พิจารณามีรูปทรงที่ซับซ้อน และมีองค์ประกอบหลายส่วนเข้ามาเกี่ยวข้องกับการพิจารณา จะทำให้สมการที่ใช้บ่งบอกถึงสภาพความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนนั้นมีความยุ่งยากมากขึ้น และใช้เวลาในการวิเคราะห์มากขึ้นด้วย หรือในหลายครั้งที่ไม่สามารถจะหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากกรณีที่ซับซ้อนมากๆ ได้ เนื่องจากสมการมักจะมีรูปเป็นสมการอนุพันธ์หลายสมการ และการหาผลเฉลยของสมการจำเป็นต้องแก้สมการอนุพันธ์เหล่านั้นไปพร้อมกัน

การนำวิธีการเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้ได้ดีกับชิ้นส่วนที่ไม่มีความซับซ้อนทางกายภาพมากนัก จะช่วยลดปัญหาความยุ่งยากของสมการแต่ยังคงใช้เวลามากเช่นเคย เนื่องจากจะต้องทำการคำนวณซ้ำไปซ้ำมาหลายครั้ง เมื่อนำวิธีการทางคอมพิวเตอร์มาช่วยใน ส่วนที่ต้องมีการคำนวณจึงทำให้ประหยัดเวลามากขึ้น และยิ่งในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ รวมไปถึงการทำ Simulation ขึ้นมากมาย ซึ่งวิศวกรจะใช้โปรแกรมเหล่านั้นเป็นเครื่องมือในการออกแบบและวิเคราะห์ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างต่างๆ และโปรแกรมที่ใช้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โปรแกรมช่วยการออกแบบ (CAD) สำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลอง (model) ทั้งที่เป็น 2 มิติ และ 3 มิติ เช่น Pro/ENGINEER, Solid Work, I-DEAS เป็นต้น และโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะสามารถสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้ แต่เป็นแบบจำลองที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมากนัก เช่น Pro/MECHANICA, MSC/NASTRAN, ANSYS เป็นต้น จะเห็นว่าในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างในปัจจุบันมีความสะดวกมากขึ้น และยังช่วยประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการสร้างแบบจำลองจริงในการทำการทดลองเพื่อทำการทดสอบชิ้นส่วนและโครงสร้างเหล่านั้น

#### 1.4 ความเป็นมาของการใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบ

การออกแบบของวิศวกรในยุคแรกๆ นั้น มีข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์และวิธีการที่จะนำมาใช้เพื่อการคำนวณต่างๆ เป็นอย่างมาก ดังนั้นวิศวกรในยุคอื่นๆ จึงใช้วิธีการประมาณค่าต่างๆ แล้วนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลอง จากนั้นจึงมีการทดสอบแบบจำลองว่าสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์

ประสงค์หรือไม่ ซึ่งจะมีการทดลองและปรับปรุงชิ้นส่วนต่างๆ หลายครั้งก่อนที่จะได้อุปกรณ์ที่เป็นไปตามจุดมุ่งหมาย กระบวนการเหล่านี้สิ้นเปลืองทั้งเวลา กำลังคน และค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก วิศวกรจึงพยายามที่จะหาวิธีการหรืออุปกรณ์ต่างๆ มาช่วยให้กระบวนการของการออกแบบ ตลอดจนการผลิตอุปกรณ์ขั้นสุดท้ายให้ใช้เวลาสั้นลงและใช้งบประมาณที่น้อยลงมาโดยตลอด ซึ่งอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงวิธีดำเนินการของวิศวกรที่เห็นได้ชัดที่สุดตั้งแต่ประวัติศาสตร์มาก็คงจะเป็นคอมพิวเตอร์นั่นเอง

คอมพิวเตอร์เริ่มเข้ามามีบทบาทในการออกแบบของวิศวกรในช่วงปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา ซึ่งในช่วงแรกๆ นั้นคอมพิวเตอร์จะเป็นเครื่องขนาดใหญ่และประสิทธิภาพยังไม่สูงมากนักมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่มากอีกทั้งยังมีข้ออยู่ในวงจำกัด จนกระทั่งปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีขนาดเล็กลง พร้อมกับมีผู้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่อง การพัฒนาในส่วนของโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ ก็ได้รับการพัฒนาทั้งจากสถาบันการศึกษา สถาบันวิจัย และสถาบันเอกชนต่างๆ ทั่วโลก เพื่อให้โปรแกรมมีความสามารถสูงขึ้น ใช้งานได้ง่ายขึ้นและมีความถูกต้องมากขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นได้จากการพัฒนาจากการ โปรแกรมด้วยตัวอักษรเป็นชุดคำสั่ง ซึ่งในยุคแรกๆ โปรแกรมเหล่านี้อาจมีความยาวหลายร้อยหน้ากระดาษ มาเป็นการใช้ Graphical User Interface (GUI) ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมเป็นตัวอักษร ทำให้ผู้ใช้โปรแกรมมีความสะดวกมากขึ้น พร้อมกันนั้นยังได้มีโปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถแสดงภาพเคลื่อนไหว เพื่อให้เห็นสภาพการทำงานของชิ้นส่วนที่ทำการออกแบบ ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้จะช่วยให้วิศวกรทำงานได้ง่ายขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบนั้น นิยมเรียกว่า Computer-Aided Design หรือ CAD นั่นเอง

CAD ถือได้ว่าเป็นการนำระบบ Computer มาช่วยในการสร้าง การปรับปรุงแก้ไข การวิเคราะห์ หรือแม้แต่ช่วยทำให้เกิดความเหมาะสมทางการออกแบบ (Optimization of Design) แต่อย่างไรก็ดี ระบบ CAD ก็ถือว่าเป็นเพียงเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบของผู้ออกแบบหรือวิศวกรมากกว่าจะนำมาใช้แทนผู้ออกแบบหรือวิศวกร

สำหรับการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ หรือ CAD นั้นมีข้อดีหลายประการ เช่น ช่วยปรับปรุงแก้ไขคุณภาพของการออกแบบ ช่วยสร้างฐานข้อมูลในการผลิต และโดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถลดเวลาในการวิเคราะห์ต่างๆ ได้อย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาในลักษณะที่มีการปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่มีการคำนวณที่ยู่ยากซับซ้อนแต่มีกระบวนการที่แน่นอนนั้น สามารถนำมาเขียนเป็นโปรแกรมเพื่อลดความยุ่งยากเหล่านั้นไปได้ ซึ่งเป็นผลให้ความสามารถในการผลิตเพิ่มมากขึ้น

และเป็นผลให้การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์กลายเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการออกแบบของวิศวกรในปัจจุบัน

ในการออกแบบเครื่องจักรกลนั้น มีโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีประสิทธิภาพสูงที่ผลิตขึ้นมาเพื่อผลเชิงการค้ามากมายหลายโปรแกรม เช่น MSC/NASTRAN ABAQUS LS-DYNA ALGOR ADINA ANSYS และ Pro/MECHANICA เป็นต้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ โปรแกรม Pro/ENGINEER สำหรับสร้างแบบจำลองสามมิติของกลไก และ Pro/MECHANICA สำหรับวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่มีความรวดเร็วและใช้ง่าย และ Pro/MECHANICA เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อการออกแบบ โดยเฉพาะซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของการออกแบบว่าเหมาะสมหรือไม่

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นการออกแบบชิ้นส่วนกลไกของเครื่องยนต์แบบใหม่ที่จะสามารถลดข้อจำกัดต่างๆ ของเครื่องยนต์ลูกสูบลงได้ และผลที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้จะสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์แบบใหม่ได้โดยตรง นอกเหนือจากนั้นยังเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์กลไกอื่นๆ ในเครื่องยนต์แบบใหม่นี้ด้วย หากว่ามีความต้องการพัฒนา ปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แบบใหม่นี้ต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่นำโปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้เป็นเครื่องมือ ในการออกแบบ และวิเคราะห์งานด้านวิศวกรรม ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปต่างๆ เริ่มมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน โดยมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่จัดทำออกมาในเชิงพาณิชย์ และโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่หลายโปรแกรมด้วยกัน อาทิเช่น MSC/NASTRAN<sup>1</sup>, ALGOR<sup>2</sup>, ANSYS<sup>3</sup>, Pro/MECHANICA<sup>4</sup> เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้ได้ทำการพัฒนาเรื่อยมาจากโปรแกรมที่ทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูง จนในปัจจุบัน โปรแกรมเหล่านี้สามารถที่จะทำงานอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั่วไปได้ นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงพัฒนารูปแบบและขั้นตอนการทำงาน ของโปรแกรมเพื่อให้ผู้ใช้มีความสะดวกสบายมากขึ้นอีกด้วย สำหรับงานวิจัยในอดีตที่ได้ นำโปรแกรม Pro/MECHANICA มาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบงานด้านต่างๆ นั้น มีค่อนข้างน้อย เนื่องจาก Pro/MECHANICA เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่และมีราคาที่สูงแพง

#### 2.1 วิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนและโครงสร้างโดยทั่วไป

การคำนวณหาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในวัตถุที่เป็นของแข็ง ด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลขมีหลายวิธีด้วยกันเช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และวิธีเบาว์ดาร์เอลิเมนต์ (Boundary Element Method, BEM) เป็นต้น แต่จะเห็นได้ว่าวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถประยุกต์ใช้ได้กับชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีกว่า อีกทั้งยังง่ายต่อการทำความเข้าใจในขั้นตอนของระเบียบวิธี และใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า นอกจากนี้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่มีคุณ

---

<sup>1</sup> MSC/NASTRAN ผลิตโดย MacNeal-Schwendler Corporation

<sup>2</sup> ALGOR ผลิตโดย ALGOR Incorporation

<sup>3</sup> ANSYS ผลิตโดย ANSYS Incorporation

<sup>4</sup> Pro/MECHANICA ผลิตโดย Parametric Technology Corporation

สมบัติของวัสดุอยู่ในช่วง Elasto-plasticity ได้ ในขณะที่เบาว่าคาร์บอนไฟเบอร์จะใช้ได้กับวัสดุที่มีการยืดหยุ่นตัวในย่านยืดหยุ่น (Elastic) เท่านั้น

## 2.2 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนและโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามามีบทบาทสำคัญในการออกแบบ และได้รับการปรับปรุงขึ้นมาเรื่อยๆ เพื่อให้การวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อนมากๆ มีความถูกต้อง (Accuracy) สูงขึ้น ทำให้มีการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงทั้งขั้นตอนการออกแบบและผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ และจากการพัฒนาของไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือในการคำนวณที่มีความสามารถในการคำนวณและเก็บข้อมูลได้มากขึ้นตามไปด้วย

### 2.2.1 ความเป็นมาของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

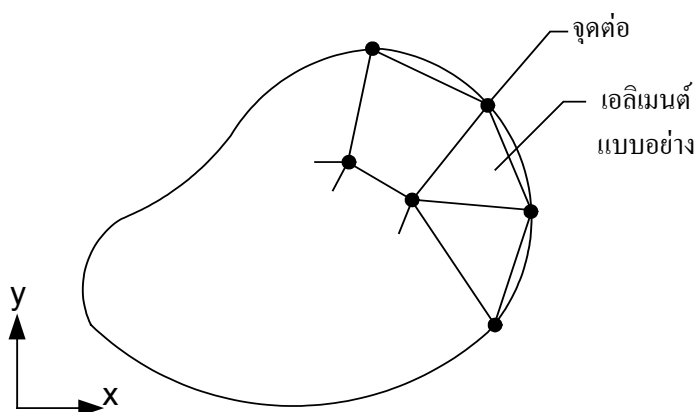
ไฟไนต์เอลิเมนต์มีประโยชน์ในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และฟิสิกส์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการแก้สมการด้วยวิธีนี้มีความสะดวกและใช้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันที่คอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อยๆ งานที่ประยุกต์ใช้โดยส่วนใหญ่จะเป็นงานทางด้านวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบ เช่นการออกแบบอากาศยาน ยานยนต์ โครงสร้างวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เป็นต้น รวมทั้งการแก้ปัญหาทางการส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer) กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) และ กลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) ข้อดีของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์คือ สามารถประยุกต์ใช้กับระบบหรือวัสดุได้ไม่จำกัดรูปแบบ ใช้ได้กับปัญหาที่มีวัสดุหลายชิ้นประกอบกันอยู่หรือปัญหาที่มีค่าของเขตผสมกัน (Mixed Boundary Condition) และสามารถใช้ได้กับปัญหาทั้งที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Steady State) และปัญหาที่ขึ้นกับเวลา (Time Dependent) และปัญหาที่คุณสมบัติของวัสดุไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear material properties)

วิวัฒนาการของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2493 โดยเริ่มจากการใช้เพื่อแก้ปัญหาสำหรับวิศวกร โครงสร้าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการใช้ระเบียบวิธีเพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในคาน (beam) หรือเหล็กท่อน (bar) ในสภาพการตั้งสมมติฐาน 1 มิติ หลังจากนั้นประมาณปี พ.ศ. 2499 ได้มีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้ในการแก้ปัญหา 2 มิติ โดยพัฒนาเป็นวิธี direct stiffness method ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการหา structural stiffness matrix ทั้งหมดของโครงสร้าง และในช่วงเดียวกันนี้เองคอมพิวเตอร์แบบดิจิทัลก็ได้รับการพัฒนาขึ้น เมื่อถึงปี พ.ศ. 2504 ระเบียบวิธีนี้ก็ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้หาค่าความเครียดและการขจัดที่มีค่าน้อย (small strain และ small

displacement) เมื่อมีการพิจารณาแรงกระทำที่เป็นแรงกระทำสถิตย์ ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุในย่านยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic)

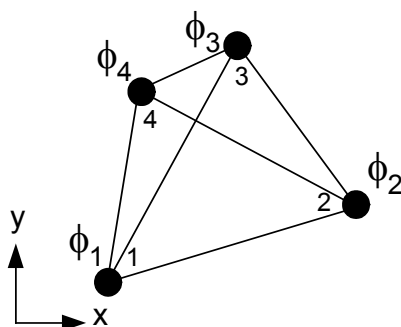
เมื่อคอมพิวเตอร์ได้รับการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ระเบียบวิธีการนี้ก็ได้รับการปรับปรุงพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นตามลำดับ โดยมีการพัฒนาวิธีการ variational formula ขึ้นมา และได้มีการขยายการประยุกต์ใช้จากในส่วนของโครงสร้างไปในส่วนอื่นๆ เช่น ด้านกลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีขั้นตอนการปฏิบัติที่ชัดเจน จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้ เพราะง่ายต่อการทำงาน สำหรับขั้นตอนการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบหลังจากที่มีการกำหนดปัญหาและสร้างแบบจำลองเบื้องต้นแล้ว โดยสรุปจะมีขั้นตอนพื้นฐานอยู่ 6 ขั้นตอนด้วยกันคือ (ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, 2537, บทที่ 1)



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

**ขั้นตอนที่ 1** แบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้น ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาของความยืดหยุ่นของของแข็ง (Elasticity problem) ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid problem)



รูปที่ 2.2 อีลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสี่จุดต่อ โดยมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

**ขั้นตอนที่ 2** เลือกฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ (element interpolation function) เช่น อีลิเมนต์สี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.2 ซึ่งอีลิเมนต์ดังกล่าวจะประกอบด้วย 4 จุดต่อที่มีหมายเลขกำกับ โดยที่จุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า (nodal unknowns) คือ  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  และ  $\phi_4$  และตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการยืดหรือหดตัว (displacement) หากกำลังพิจารณาปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิหากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของไหลเมื่อเป็นปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่ทราบค่าในอีลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 + N_4(x, y)\phi_4 \quad (2.1)$$

โดยที่  $N_i(x, y)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  คือฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ หรือเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \underset{(1 \times 4)}{[N]} \underset{(4 \times 1)}{\{\phi\}} \quad (2.2)$$



โดย  $[N]$  คือเมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในอิเลเมนต์  
 และ  $\{\phi\}$  คือเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อของอิเลเมนต์  
ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการอิเลเมนต์ (element equation) ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูป

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.3)$$

ในขั้นตอนที่ 3 นี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ ซึ่งการสร้างสมการอิเลเมนต์ที่อยู่ในรูปแบบของสมการ (2.3) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (direct approach)
- วิธีการแปรผัน (variational approach)
- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละอิเลเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{element equation}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.4)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ลงในสมการ (2.4) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา  $\{\phi\}_{\text{sys}}$  อันประกอบด้วยตัวแปรไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง หรือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ หากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อทราบค่าการเคลื่อนตัว (displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างเราสามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (strain) และความเค้น (stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ก็สามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อทราบความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

ขั้นตอนเหล่านี้จะใช้เวลาในการคำนวณมาก แม้ว่าจะเป็นปัญหาง่ายๆ ก็ตาม เนื่องจากเป็นการคำนวณแบบซ้ำไปซ้ำมา ซึ่งภายหลังปัญหานี้ได้หมดไปเพราะมีการใช้คอมพิวเตอร์มาเป็นเครื่องคำนวณ และในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งช่วยลดเวลาในการคำนวณและขั้นตอนที่ผู้ใช้ต้องเข้าไปเกี่ยวข้องลงเป็นอย่างมาก เพราะโปรแกรมจะทำการสร้างสมการต่างๆ และทำการจัดแบ่งเอลิเมนต์ให้โดยอัตโนมัติ เมื่อเป็นเช่นนี้งานที่เหลือของวิศวกรหรือผู้ออกแบบจะเป็นการกำหนดปัญหาและแปลความหมายของผลลัพธ์ที่ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ส่วนใหญ่จึงนิยมใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมาช่วย โดยใช้โปรแกรมระบบ Computer-Aided Design (CAD) ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติแล้วส่งให้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการวิเคราะห์ต่อไป

### 2.3 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนกลไกจักรกลด้วย Pro/MECHANICA

โปรแกรม Pro/MECHANICA เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 3 โมดูล สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบในงานทางวิศวกรรม คือ Motion, Structure และ Thermal โดยมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังนี้

**1. Pro/MECHANICA Motion** เป็นโมดูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไก ซึ่งจะมีประโยชน์ในด้านการออกแบบเครื่องจักรกล หรือการออกแบบกลไก (Mechanism design) โดยโมดูลส่วนนี้จะทำให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์หากการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่ง และแรงกระทำที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนเครื่องจักรและกลไกได้ ซึ่งงานวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบใหม่ที่เป็นจุดเริ่มต้นของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็ได้ใช้โมดูลนี้ในการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนหลักที่มีการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ และที่มาของขนาดเบื้องต้นของชิ้นส่วนต่างๆ ที่วิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ก็ได้มาจากการวิเคราะห์กลไกด้วยโมดูลนี้เช่นกัน

**2. Pro/MECHANICA Structure** เป็นโมดูลที่ใช้วิเคราะห์ด้านที่เกี่ยวข้องกับความเค้น ความเครียด และการขจัด โดยการวิเคราะห์ของโมดูลนี้ จะแบ่งย่อยออกได้อีก 3 แบบ คือ

- Linear static stress analysis ใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นภายใต้ภาระกรรมในลักษณะที่เป็นสถิตยศาสตร์และอยู่ได้สมมติฐานว่าวัสดุเป็นวัสดุเชิงเส้น
- Bucking analysis ใช้วิเคราะห์การยุบตัวและศึกษาความเสถียรของโครงสร้าง

- Modal analysis (mode shape และ natural frequency) ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมด ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อศึกษาในด้านการสั่นทางวิศวกรรม

### 3. Pro/MECHANICA Thermal เป็นโมดูลที่ใช้วิเคราะห์ด้านการถ่ายเทความร้อน โดยสามารถวิเคราะห์ได้ในสองลักษณะ คือการวิเคราะห์ในสภาพคงตัว (Steady State Analysis) และในสภาพไม่คงตัว (Transient Analysis)

นอกเหนือจากการวิเคราะห์ด้วยโมดูลต่างๆ แล้ว Pro/MECHANICA ยังมีความสามารถในการเปรียบเทียบการออกแบบที่มีการปรับปรุงรายละเอียดบางส่วนของชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ใช้ศึกษากระบวนการออกแบบ (design study) เพื่อเปรียบเทียบว่าการออกแบบใดเป็นการออกแบบที่เหมาะสมกับการทำงานที่กำหนดมากที่สุด

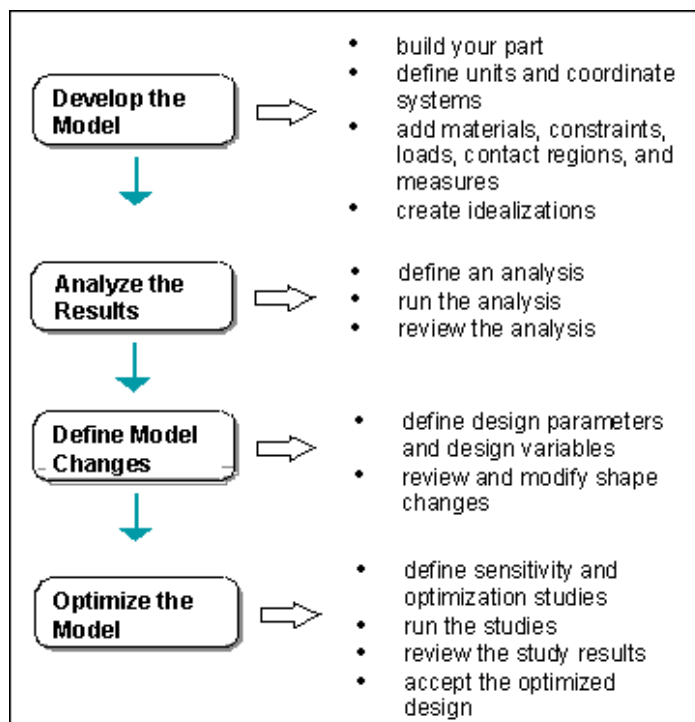
การออกแบบและวิเคราะห์ชิ้นงานที่ตกอยู่ภายใต้ภาระกรรมแบบต่างๆ ในปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์มากมายที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและการวิเคราะห์ โปรแกรม Pro/MECHANICA เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีชื่ออยู่ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นเครื่องมือทางการออกแบบทางวิศวกรรมที่เริ่มเป็นที่นิยมในปัจจุบัน แต่ยังไม่แพร่หลายเนื่องจากราคาแพงและการใช้งานค่อนข้างซับซ้อน อีกทั้งเป็น โปรแกรมที่พัฒนามาจากระบบปฏิบัติการ UNIX ซึ่งผู้ใช้ส่วนใหญ่ที่คุ้นเคยกับระบบปฏิบัติการแบบ WINDOWS จะไม่ค่อยพอใจนักเนื่องจากคำสั่งต่างๆ จะเป็นเมนูหลักและเมนูย่อย โดยผู้ใช้ต้องเข้าไปเลือกตามลำดับคำสั่งเหล่านั้น ซึ่งจะแตกต่างจากระบบปฏิบัติการ WINDOWS ที่มีขั้นตอนในการเรียกใช้คำสั่งต่างๆ ที่สะดวกกว่า

ในการวิเคราะห์แบบจำลองต่างๆ ด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA จะมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ มีดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** การสร้างแบบจำลอง (Develop the model) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไปสามารถใช้โปรแกรม CAD ใดๆ ก็ได้ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Pro/ENGINEER สำหรับการสร้างแบบจำลอง เพื่อความสะดวกในหลายๆ ด้าน และที่สำคัญก็คือ โปรแกรม Pro/ENGINEER และ Pro/MECHANICA นี้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากผู้ผลิตรายเดียวกัน ทำให้มีความสะดวกในการเชื่อมต่อข้อมูล รายละเอียดในขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดรูปร่าง ขนาดของแบบจำลอง กำหนดระบบแกน (Coordinate system) กำหนดชนิดของวัสดุที่ใช้ จากนั้นเป็นการกำหนดลักษณะของสภาพขอบเขต ไม่ว่าจะเป็นการให้ภาระกรรม ข้อกำหนดการจัด และ

ในขั้นตอนนี้ยังสามารถกำหนดได้ว่าจะให้แบบจำลองมีลักษณะทางอุดมคติเป็นอย่างไร เช่น เป็นการวิเคราะห์ความเค้นบนระนาบ (plane stress) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA

**ขั้นตอนที่ 2** การวิเคราะห์ผล (Analyze the results) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดว่าผลที่ต้องการมีอะไรบ้าง เช่น ต้องการทราบค่าความเค้นในสภาพแรงกระทำสถิตย์ หรือการหาค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดต่างๆ ของแบบจำลอง เป็นต้น โดยจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบการวิเคราะห์อย่างง่าย หรือที่ Pro/MECHANICA เรียกว่า Simple analysis ซึ่งแบบจำลอง จะถูกกำหนดว่ามีลักษณะทางอุดมคติเป็น 2 มิติ หรือ 3 มิติ และกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ภาระกรรมและเงื่อนไขข้อกำหนด (Constraint) จากนั้นจะทำการวิเคราะห์แบบจำลอง จากนั้นจะเป็นการประเมินผลที่ได้ของผู้ออกแบบว่าเป็นอย่างไร ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจหรือไม่ หากผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ การวิเคราะห์อาจจะสิ้นสุดที่ขั้นตอนนี้ก็ได้ หากผลที่ได้ไม่เป็นที่ต้องการก็จะทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

**ขั้นตอนที่ 3** การกำหนดตัวแปรของแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลง (Define model changes) โดยใช้การวิเคราะห์ที่เรียกว่า Sensitivity study ที่เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผล

กระทบโดยรวม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ เช่น ขนาด เป็นต้น เมื่อมีการประเมินผลจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2 แล้ว อาจจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดบางส่วนของแบบจำลอง เช่น ความหนา ความยาว ขนาดของรูเจาะ เป็นต้น เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร โดยเลือกพารามิเตอร์หรือตัวแปรขึ้นมา 1 ตัวหรือมากกว่านั้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และศึกษาผลกระทบที่ตามมาในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เหล่านั้น เช่น ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าของพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป หรือตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดว่าเปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างไร เป็นต้น แล้วนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบ

**ขั้นตอนที่ 4** การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลอง หลังจากที่ได้มีการกำหนดว่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรใดจะนำมาพิจารณาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแล้ว ในขั้นตอนนี้ก็จะทำการกำหนดข้อศึกษาว่าจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงในลักษณะใด ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แบบนี้เรียกว่า Design Optimization ซึ่งการวิเคราะห์ในลักษณะนี้มักจะทำเป็นขั้นตอนต่อจากการวิเคราะห์แบบ Sensitivity study เพื่อทำการหาขนาดที่เหมาะสมของแบบจำลอง โดยกำหนดเงื่อนไขเป็นการลดหรือเพิ่มค่าที่สนใจ เช่น มวลของแบบจำลอง เป็นต้น ซึ่งในการวิเคราะห์แบบ Sensitivity study จะทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ตัวใดบ้างที่มีผลกระทบต่อค่าที่สนใจ เช่น มวล ความเค้น และการขจัด เป็นต้น ดังนั้น ในการวิเคราะห์แบบ Design optimization นี้ จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการมาทำการกำหนดเป็น design parameter และผู้ใช้เป็นผู้กำหนดช่วงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามที่ต้องการ จากนั้นโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์จากเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และผลที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์นั้นๆ ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการตัดสินใจเลือกการออกแบบในจุดที่เหมาะสมที่สุด

## 2.4 วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์บน Pro/MECHANICA Structure

วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ

1. **H-type Finite Elements** หรือ Convergence of H-Elements เป็นวิธีการแบบคลาสสิก ซึ่งใช้ mesh refinement หรือการทำให้เอลิเมนต์มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีค่าความถูกต้องสูงขึ้น
2. **P-type Finite Elements** หรือ Convergence of P-Element เป็นวิธีการเพิ่มลำดับชั้นหรือ order ของ Interpolation Polynomials บนแต่ละเอลิเมนต์โดยที่ขนาดของเอลิเมนต์ยังเท่าเดิม

สำหรับ Pro/MECHANICA Structure แล้วนั้น วิธีการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ P-type ซึ่งสำหรับลำดับชั้นสูงสุดของ Interpolation Polynomials จะเท่ากับ 9 โดยโปรแกรมจะแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในผลลัพธ์ของลำดับชั้นที่ต่ำกว่าก่อนและถ้าหากค่าความผิดพลาดมีขนาดมากเกินกว่าที่กำหนด โปรแกรมก็จะทำการเพิ่มลำดับชั้นของพหุนามในเอลิเมนต์ที่มีค่าความผิดพลาดสูงโดยอัตโนมัติ ซึ่งในแต่ละชั้นของการเพิ่มลำดับชั้นจะเรียกว่า pass หากใช้จนถึง 9 ลำดับชั้นแล้วปัญหายังไม่สามารถลู่เข้าหาผลเฉลยได้ โปรแกรมจะทำการแบ่งขนาดของเอลิเมนต์ใหม่ ซึ่งจะทำให้ขนาดของเอลิเมนต์เล็กลงและสามารถใช้ลำดับชั้นต่ำๆ ได้

ข้อดีของการใช้วิธีการ Convergence of P-Element คือ

1. จำนวนเอลิเมนต์น้อยกว่าจะช่วยลดภาระการคำนวณ (computational load) ในขั้นต้นได้
2. เนื่องจาก mesh ชุดเดียวจะถูกใช้ตลอดการวิเคราะห์ และ mesh นี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูปร่างของแบบจำลอง ซึ่งทำให้โปรแกรมสามารถทำ Sensitivity และ Optimization studies ได้ ในระหว่างที่พารามิเตอร์รูปร่างของแบบจำลอง สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยโปรแกรมไม่จำเป็นต้องทำการสร้าง mesh ใหม่ในการคำนวณแต่ละครั้ง ซึ่งเป็นผลให้เวลาในการคำนวณจะสั้นลง

วิธีการหา Convergence of P-Element มีอยู่สามวิธีด้วยกัน คือ

1. **Uniform Polynomial Escalation** การหาผลลัพธ์เริ่มต้นด้วยพหุนามลำดับต่ำขึ้นมา ก่อน โดยทั่วไปลำดับชั้นจะเท่ากับ 1 หรือ 2 และทำซ้ำ โดยเพิ่มลำดับชั้นของพหุนามขึ้นทีละ 1 ทีแต่ละ pass ของการทำงาน ให้กับทุกๆ ขอบใน mesh แล้วจะหยุดเมื่อได้ค่าความแม่นยำเป็นไปตามที่กำหนดไว้ แต่วิธีการนี้ไม่ได้นำมาใช้ในโปรแกรม Pro/MECHANICA เนื่องจากเหตุผลสองประการคือ

ประการแรก ลำดับชั้นของพหุนามเพิ่มขึ้นที่ทุกๆ ขอบในทางเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะมีลำดับชั้นความเป็นอิสระ (Degree of freedom DOF) มากกว่าที่จำเป็นจริงๆ

ประการที่สอง ไม่ว่าจะอย่างไรก็ตาม โปรแกรมยังคงต้องทำการตัดสินใจว่าเมื่อไหร่จะหยุดทำงาน หรือหยุดทำการประมาณค่าความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้รับเมื่อสิ้นสุดการทำงานในแต่ละ pass

2. **Multi-Pass Adaptivity (MPA)** ในการพัฒนาโปรแกรม Pro/MECHANICA ขึ้นมาในตอนแรกนั้นผู้ออกแบบเลือกใช้วิธี MPA แทนการเพิ่มลำดับชั้นของพหุนามทีละหนึ่งทีทุกๆ ขอบในแต่ละ pass ที่ทำการคำนวณนั้น โดย MPA จะระบุว่าพื้นที่ใดในแบบจำลองที่ต้องการค่าความแม่นยำเพิ่ม และควรที่จะเพิ่มลำดับชั้นเท่าใด ซึ่งอาจจะเพิ่มทีละ

หนึ่งหรือสองลำดับชั้นในครั้งเดียวก็ได้ ที่สำคัญโปรแกรมจะเพิ่มลำดับชั้นของพหุนาม เฉพาะในส่วนที่ต้องการความแม่นยำเพิ่มเติมเท่านั้น

การกำหนดว่าขอบใดต้องการเพิ่มลำดับชั้นพหุนามนั้น MPA จะทำการเปรียบเทียบการขจัดและพลังงานความเครียดของอิลิเมนต์ (element strain energy) ที่ pass ล่าสุดที่ทำการคำนวณกับค่าที่ได้จาก pass ก่อนหน้านั้น เมื่อผลลัพธ์ที่ได้เข้าสู่ค่าสุดท้าย ค่าหนึ่ง ซึ่งมีความผิดพลาดที่ยอมรับได้นั้นผู้ใช้สามารถเป็นผู้กำหนดขึ้นมาได้ ซึ่งความผิดพลาดนี้อาจเป็นได้ทั้งในรูปของร้อยละของการขจัด พลังงานความเครียด ความเค้น หรืออื่นๆ

การที่จะใช้ MPA ได้อย่างถูกต้อง อาจต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบ เพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ถูกต้อง เนื่องจาก MPA ใช้เทคนิคในการเพิ่มลำดับชั้นของพหุนาม แทนการปรับขนาดของอิลิเมนต์ (refinement) และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ pass ล่าสุดกับ pass ก่อนหน้านั้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการลู่ออกของผลลัพธ์ได้ ดังนั้น ประสบการณ์ของผู้ออกแบบจึงมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาหากผลลัพธ์ไม่ลู่เข้า อย่างไรก็ดี เมื่อได้รับผลลัพธ์ที่ลู่เข้าสู่คำตอบหนึ่งแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จาก MPA นั้นจะเป็นผลลัพธ์ที่ดี

3. **Single-Pass Adaptivity (SPA)** ไม่นานมานี้ ผู้ผลิตโปรแกรม Pro/MECHANICA ได้ทำการแนะนำและแก้ไขระเบียบขั้นตอนที่เรียกว่า MPA ซึ่งเรียกว่า Single-Pass Adaptivity หรือ SPA ที่ใช้วิธีการที่ถูกต้องมากขึ้นในการประมาณค่าและพิสูจน์ความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยหลักการแล้ว โปรแกรมจะพิจารณาว่าหากมีการเกิด Stress jumps ในพื้นที่ของแบบจำลองก็จะทำให้พื้นที่นั้นมีความถูกต้องของการคำนวณต่ำไปด้วย ซึ่ง Stress jumps ก็คือ ความเค้นที่คำนวณโดยตรงจากอนุพันธ์การขจัด (Displacement derivatives) หรือที่เรียกว่า raw stress ซึ่งจะไม่มีความต่อเนื่องที่ขอบของอิลิเมนต์ และขนาดของการ jump ของ stress ที่จุดที่ไม่ต่อเนื่องจะเป็นตัวประมาณความถูกต้องของ stress ได้ดี

จากการวัด stress jumps เหล่านั้น จะทำให้ได้ค่าประมาณของ Local accuracy ของผลลัพธ์ ซึ่งไม่ได้เทียบกับ pass ก่อนหน้านั้น สำหรับ SPA algorithm จะใช้การวัดค่าเฉลี่ยของ stress jumps รอบๆ แต่ละอิลิเมนต์เป็นตัวกำหนดค่าความผิดพลาดของอิลิเมนต์ ส่วนลำดับชั้นพหุนามของขอบที่อยู่ในอิลิเมนต์นั้นๆ จะเพิ่มขึ้นถ้าความผิดพลาดมีค่ามาก และขอบของอิลิเมนต์ที่มีค่าความผิดพลาดมากกว่าจะมีการเพิ่มลำดับชั้นพหุนาม

นาม ให้สูงกว่าขอบที่มีค่าความผิดพลาดต่ำกว่า ส่วนขอบที่มีค่าความผิดพลาดต่ำอยู่แล้ว ลำดับชั้นพหุนามก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าความถูกต้องที่ได้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นหลังจาก pass แรกของ Adaptivity ดังนั้น วิธีการในการหาผลลัพธ์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย การเริ่มต้นที่ค่าลำดับชั้นพหุนามที่ต่ำ ซึ่งจะมีค่าลำดับชั้นประมาณ 3 เป็นค่ากลางที่ดีที่สุด สู่ระหว่างความถูกต้องของผลลัพธ์กับประสิทธิภาพในการคำนวณ จากนั้นจะเป็น การคำนวณตัวกำหนดค่าความผิดพลาดของอีลิเมนต์จากผลลัพธ์ และทำการปรับปรุง ลำดับชั้นพหุนาม แล้วทำซ้ำตามขั้นตอนเดิม ผลลัพธ์ที่ได้ ณ ที่นี้ถือว่าเป็นผลลัพธ์สุดท้าย และตัวกำหนดค่าความผิดพลาดของอีลิเมนต์จะถูกคำนวณอีกครั้ง เพื่อใช้เป็นตัว บ่งชี้ (global indication) ของความถูกต้องของ stress โดยเฉลี่ยที่ได้ แล้วแสดงให้ผู้ออกแบบได้ทราบ

พารามิเตอร์ที่ทำการกำหนดการเพิ่มของลำดับชั้นบนขอบ มีความสัมพันธ์กับตัว กำหนดค่าความผิดพลาดของอีลิเมนต์สำหรับขอบนั้นๆ ซึ่งจะถูกปรับให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ จาก SPA จะมีค่าความถูกต้องทางวิศวกรรมที่ดี ที่มีค่าใช้จ่ายในการคำนวณน้อยกว่า MPA เหตุที่ค่าใช้จ่ายลดลงก็เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ลำดับชั้นพหุนามที่ขอบของแบบจำลอง ส่วนมากมักจะเท่ากับ 3 ส่วนขอบที่อยู่ในพื้นที่วิกฤติซึ่งจะมีลำดับชั้นสูงกว่านั้นมีอยู่เป็น จำนวนน้อย

ใน Pro/MECHANICA Structure จะใช้วิธีการ Convergence of P-Element 2 วิธีคือ MPA และ SPA โดยจะเพิ่มวิธีการวิเคราะห์แบบ Quick check ซึ่งกำหนดลำดับชั้นพหุนามไว้เท่ากับ 3 และจะไม่มีการเพิ่มลำดับชั้นพหุนาม ซึ่งจะใช้สำหรับตรวจสอบว่าเงื่อนไขข้อกำหนดและภาระ กรรมที่กำหนดให้กับแบบจำลองนั้นถูกต้องเป็นที่ยอมรับของโปรแกรมหรือไม่ ก่อนจะทำการ วิเคราะห์จริงด้วยวิธีการแบบ MPA หรือ SPA

## 2.5 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทความวิจัยที่ทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างต่างๆ ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ ทางไฟไนต์อีลิเมนต์มีอยู่แพร่หลาย แต่สำหรับบทความวิจัยที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA มีอยู่ไม่มากนัก สำหรับเอกสารที่อธิบายถึงวิธีการใช้ Pro/MECHANICA ในการวิเคราะห์และออกแบบโดยส่วนใหญ่ จะอยู่ในรูปของรายงานด้านเทคนิค (Technical report) ซึ่ง สามารถเข้าไปศึกษาและ download ได้จาก website ของบริษัท Parametric Technology Corporation (PTC) ซึ่งจะต้องเป็นผู้ใช้โปรแกรมที่ถูกต้องตามลิขสิทธิ์ของบริษัทเท่านั้น หนังสือ



และคู่มือที่อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์อย่างละเอียดนั้น ได้แก่ Pro/MECHANICA Tutorial Structure ของ R. Toogood (2000), Pro/MECHANICA Structure 2000i<sup>2</sup>: Element and Application ของ Y. Gagnon (2000) และในตัวโปรแกรมเอง Help document ได้อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน ส่วนบทความของ A. Carrio, L. Guidi และ D. Spensraza (2001) ได้อธิบายถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ซึ่งแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ

1. สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมช่วยการออกแบบ (CAD)
2. วิเคราะห์แบบจำลอง (Simple analysis)
3. ปรับปรุงแบบจำลองจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ทั้งการเปลี่ยนแปลงของขนาดและการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติต่างๆ ของแบบจำลอง (Sensitivity analysis)
4. การปรับแบบจำลองที่เหมาะสมให้ตรงตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ (Design optimization)

จากนั้นนำขั้นตอนเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษา Gas Turbines สองชิ้นคือ Rotor Blade และ Turbine Nozzles โดยใช้ Pro/ENGINEER สร้างแบบจำลอง

บทความที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะกรณีศึกษาที่นำ Pro/MECHANICA และโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์อื่นๆ มาทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่างๆ โดยจะแยกออกเป็น ชิ้นส่วนที่มีภาระกรรมเป็นแรงดันและความร้อน และ ชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายกำลัง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบชิ้นส่วนกลไกจักรกลในวิทยานิพนธ์นี้

งานวิจัยของ Anastasios John Hart (2002) ในกรณีศึกษาเกี่ยวกับ Thermal Performance of a Modular Structure for a High-Precision Microscope วิเคราะห์หา Displacement Contour และ Steady-state temperature contour บน Tube model บทความที่นำมาเอา Pro/ENGINEER และ Pro/MECHANICA มาใช้ในการสร้างแบบจำลองและทำการวิเคราะห์โครงสร้างอีกชิ้นหนึ่งเป็นของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล University of Nebraska-Lincoln (2000) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ทำการสร้างรถยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้อ (Four-wheel off-road vehicle) ตามแบบของ SAE (Society of Automotive Engineers) โดยการออกแบบ Independent front suspension และ Swing arm rear suspension ซึ่งจะถูกประกอบเข้ากับ Chassis ที่บรรจุเครื่องยนต์ Brigg and Stratton ขนาด 10 แรงม้า และได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรงและความแข็งเกร็ง (Strength และ Rigidity) ด้วย Pro/MECHANICA โดยสร้างแบบจำลองสามมิติด้วย Pro/ENGINEER ซึ่งกำหนดสถานะแวดล้อมที่เลวร้ายที่สุดให้กับแบบจำลองและเพื่อเป็นการลดเวลาในการคำนวณของโปรแกรม จึงสร้างแบบ

จำลองให้เป็นชิ้นเดียวกัน ซึ่งนอกจากจะช่วยประหยัดเวลาแล้วยังช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับผลที่ได้ด้วย

สำหรับการวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดบนโครงสร้างกระบอกสูบ (Cylinder Structure) ของเครื่องยนต์ Twin-cam 16-valve ของ Shiang-Woei Chyuan (2000) ได้ทำการวิเคราะห์แบบแยกชิ้นและวิเคราะห์แบบประกอบ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์อิลิเมนต์คือ MSC/NASTRAN และใช้โปรแกรม I-DEAS สร้างแบบจำลอง สำหรับโครงสร้างกระบอกสูบที่ทำการวิเคราะห์ แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ Cylinder Head และ Cylinder Block เนื่องจากเครื่องยนต์ 16-valves มีสี่สูบ (Cylinder Block) วางเรียงตัวกัน ในการวิเคราะห์นี้ได้พิจารณา Cylinder Block อันเดียว แล้วกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขข้อกำหนดให้กับแบบจำลองโดยคำนึงถึงผลกระทบระหว่างรอยต่อของแต่ละ block เพื่อให้เกิดความสมจริงและไม่เกิดการประมาณเกินจริงของความเค้นและความเครียด

Tsung-Pin และ Judy M. Vance ได้ทำการวิจัยที่นำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์ MSC/NASTRAN ไปแสดงผลที่ Virtual Environment คือ WorldToolKit และ GL กรณีศึกษาเป็นการวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบน Cantilever beam

### บทที่ 3

#### การออกแบบและวิเคราะห์แผ่นรับแรง

แผ่นรับแรง เป็นชิ้นส่วนที่สมมติให้มีการเคลื่อนที่อยู่ที่ภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ และรับภาระกรรมอันเนื่องมาจากการสั่นดาบของส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งภาระกรรมที่แผ่นรับแรงได้รับจากการสั่นดาบจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ ภาระกรรมที่เกิดจากแรงดัน และภาระกรรมที่เกิดจากอุณหภูมิของการสั่นดาบ ซึ่งภาระกรรมเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะการทำงานของแผ่นรับแรงเหมือนกับที่เกิดขึ้นกับลูกสูบของเครื่องยนต์แบบลูกสูบทั่วไป

แผ่นรับแรงนี้จะทำหน้าที่คล้ายลูกสูบในเครื่องยนต์แบบลูกสูบทั่วไป แต่มีรูปร่างลักษณะที่แตกต่าง รวมไปถึงลักษณะการกระทำของแรงกระทำกับแผ่นรับแรง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในลักษณะของการเคลื่อนที่ของแผ่นรับแรงด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมุติฐานและข้อกำหนดเบื้องต้น เพื่อใช้ในการคำนวณหาภาระกรรมที่มากกระทำกับแผ่นรับแรงนี้ในลักษณะเดียวกันกับเครื่องยนต์แบบลูกสูบทั่วไป ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวอยู่ในหัวข้อถัดไป

#### 3.1 โครงสร้างและขนาดเบื้องต้นของแผ่นรับแรง

แผ่นรับแรงนี้ เมื่อนำไปใช้งานจะต้องนำไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่นในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม ขอบข่ายของวิทยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์เฉพาะในส่วนของแผ่นรับแรงเท่านั้น ชิ้นส่วนอื่นที่นำมาประกอบกับแผ่นรับแรงนี้จะไม่ทำการวิเคราะห์ และพิจารณาว่าชิ้นส่วนอื่นไม่มีการเคลื่อนที่และมีสภาพเป็นวัตถุแข็งเกร็ง

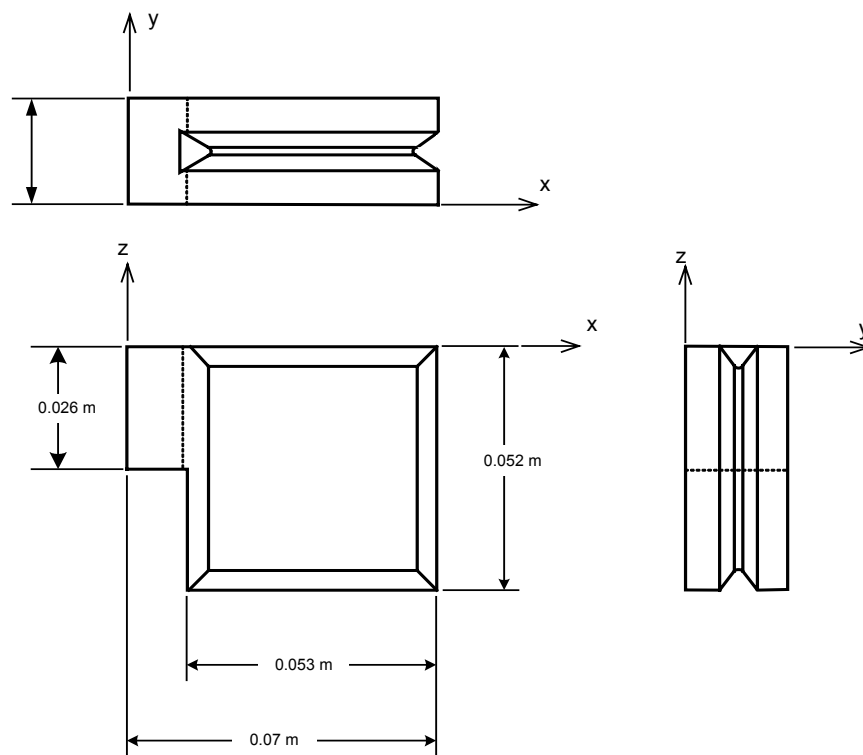
วัสดุที่เลือกใช้ คือ เหล็ก Tool Steel หรือ SKD 11 หรือ D2<sup>1</sup> โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

- ความหนาแน่น (Density),  $\rho$  = 7834.268 kg/m<sup>3</sup>
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) = 7.8
- จุดหลอมเหลว (Melting Point) = 1421.11°C หรือ 1694.11K
- โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Young's Modulus), E = 192.92 GPa
- อัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's Ratio),  $\nu$  = 0.3

<sup>1</sup> ดูรายละเอียดและที่มาของคุณสมบัติเหล่านี้ในภาคผนวก ข

- สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal expansion),  $\alpha$  =  $6.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity),  $k_c$  =  $20 \text{ W/m.K}$
- ความแข็งแรงเชิงดึง (Tensile Strength),  $\sigma_y$  =  $700 \text{ MPa}$

รูปร่างและขนาดของแผ่นรับแรงในการออกแบบเบื้องต้นจะเป็นไปตามรูปที่ 3.1

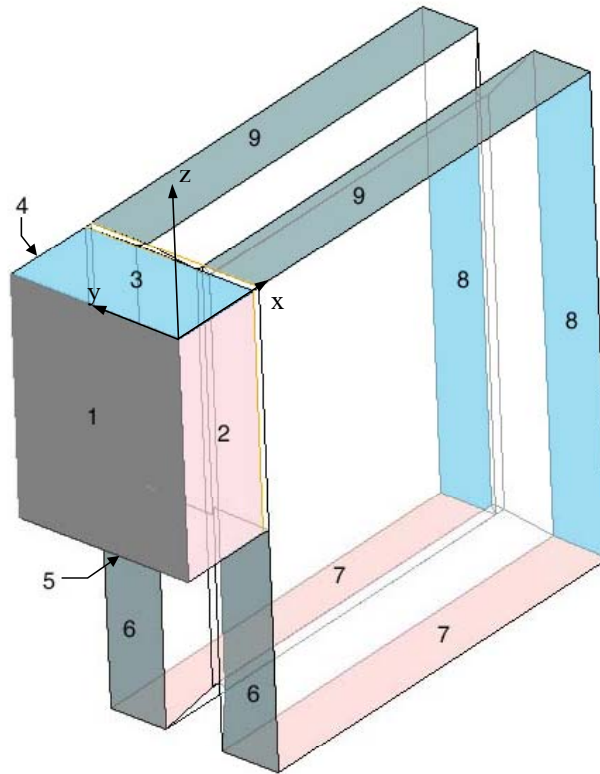


รูปที่ 3.1 แบบ โครงร่างเบื้องต้นของแผ่นรับแรง

### 3.2 ข้อกำหนดในการออกแบบแผ่นรับแรง

เมื่อนำแผ่นรับแรงนี้ไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่นๆ ในเครื่องยนต์แล้ว จะมีพื้นผิวบางส่วนถูกจำกัดการขจัดไว้ สำหรับข้อกำหนดการขจัดของแผ่นรับแรง หากพิจารณาตามรูปที่ 3.2 แล้ว จะกำหนดให้ผิวของแผ่นรับแรงหมายเลข 1, 2, 3, 4 และ 5 ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องไปยึดติดกับชิ้นส่วนอื่น จะกำหนดให้ผิวทั้งหมดไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง สำหรับผิวหมายเลข 7 และ 9 ไม่ได้ยึดติดกับชิ้นส่วนใดเลย แต่จะสามารถขยายตัวในแนวแกน  $z$  ได้มากที่สุดไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร ส่วนผิวหมายเลข 6 และ 8 จะกำหนดการขยายตัวในแนวแกน  $x$  ไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร สาเหตุที่ผิวทั้งสองมี

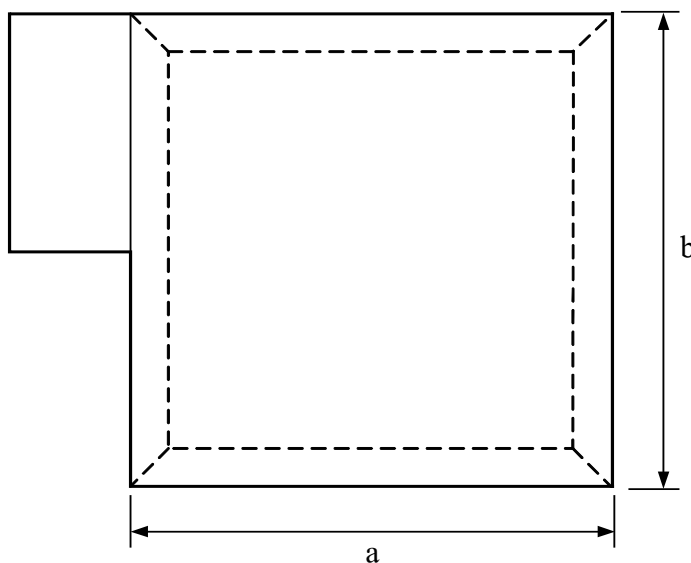
การขจัดเกิดขึ้นไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตรนั้น เพราะผิวทั้งสองห่างจากกระบอกสูบซึ่งเป็นวัตถุแข็งเกร็งเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3. 2 แสดงผิวที่ทำการกำหนดการขจัดของแผ่นรับแรง

### 3.3 ภาระกรรมที่แผ่นรับแรงได้รับ

เนื่องจากการตั้งสมมุติฐานว่า แผ่นรับแรงเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่คล้ายลูกสูบ ดังนั้นสถานะแวดล้อมของแผ่นรับแรง จะถูกจำลองให้มีค่าแรงดันและอุณหภูมิเท่ากับค่าที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ซึ่งทำการคำนวณโดยอ้างอิงจากข้อมูลสถานะแวดล้อมของเครื่องยนต์สันดาปภายในทั่วไป แล้วทำการคำนวณหาแรงดันและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการสันดาปของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศ ตามสภาพที่ควรจะเป็น ซึ่งจากการคำนวณจะได้ว่า ค่าแรงดันสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 11.135 MPa และอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 4121.122 K เมื่อประสิทธิภาพการสันดาปของเชื้อเพลิงเท่ากับ 100% สำหรับรายละเอียดของการคำนวณจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.3 แสดงพื้นที่รับแรงกระทำของแผ่นรับแรง

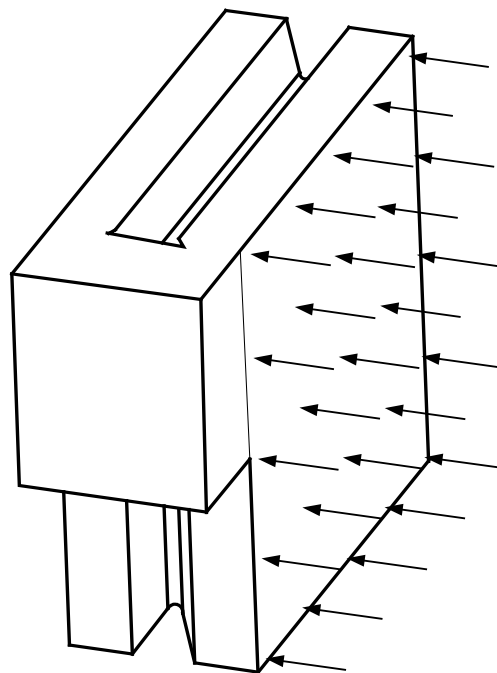
พื้นที่ของแผ่นรับแรงที่รับแรงกระทำ คือ

$$A = a \times b \quad (3.1)$$

ตามที่ได้ตั้งสมมุติฐานว่า แผ่นรับแรงนี้จะได้รับการกระทำสองลักษณะคือ แรงดันและอุณหภูมิ สำหรับรายละเอียดของลักษณะการกระทำที่กำหนดให้กับแผ่นรับแรงทั้งสอง 2 แบบ มีดังนี้คือ

1. การกระทำเนื่องจากแรงดันที่เกิดจากการจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ โดยจำลองให้แรงดันสูงสุดเริ่มกระทำที่ผิวด้านหนึ่งของแผ่นรับแรง ซึ่งจะดันให้แผ่นรับแรงเกิดการเคลื่อนที่รอบแกน โดยแรงดันจะลดลงเป็นส่วนกับมุมของการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น และมีขนาดเป็น 0 เมื่อมุมการเคลื่อนที่มากที่สุดคือ  $73^\circ$  จากแนวระนาบ ลักษณะของแรงดันที่กระทำกับแผ่นรับแรงได้แสดงในรูปที่ 3.4
2. การกระทำเนื่องจากอุณหภูมิ โดยจะทราบการกระทำเนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ได้ โดยการทำการวิเคราะห์แผ่นรับแรงด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA Thermal ซึ่งจะทำการศึกษาเงื่อนไขข้อกำหนดให้กับแผ่นรับแรงนี้ โดยกำหนดให้อุณหภูมิ เริ่ม

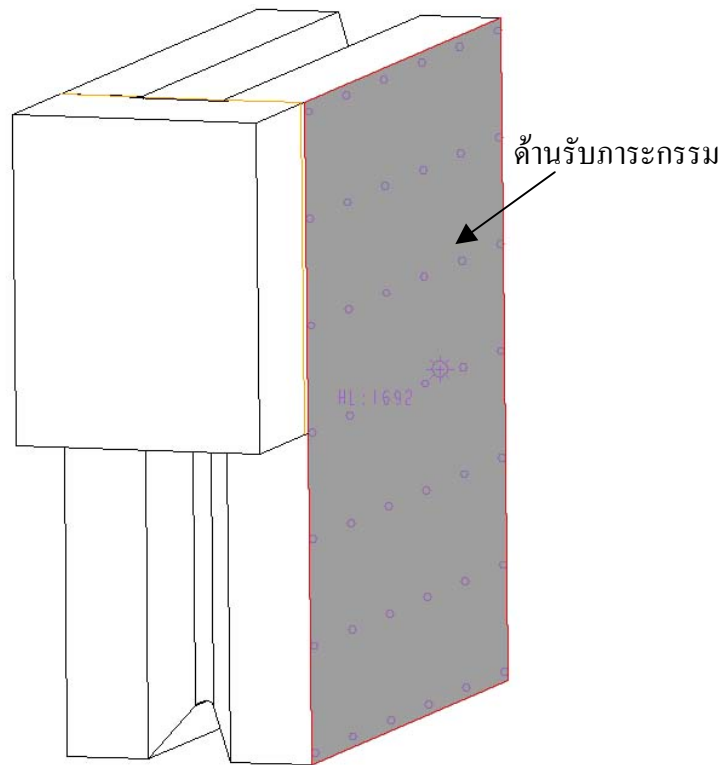
ต้นของแผ่นรับแรง<sup>2</sup> เท่ากับ 700 K สำหรับภาระกรรมของแบบจำลองจะเป็นภาระกรรมแบบความร้อน มีค่าเท่ากับค่าความร้อนที่ได้จากการสันดาป (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1) กำหนดที่ผิวด้านเดียวกับผิวที่รับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3. 4 ลักษณะของแรงดันที่กระทำกับแผ่นรับแรง

ในการวิเคราะห์หาค่าความเค้นและความเครียดของแผ่นรับแรงนี้ จะแบ่งออกเป็นสามส่วน ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการทำการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.4

<sup>2</sup> เพื่อไม่ให้เกิด Thermal stress ที่จะทำให้เกิดความเสียหายกับลูกสูบในเครื่องยนต์ทั่วไปนั้น จะต้องหล่อเย็นลูกสูบให้มีอุณหภูมิไม่เกิน 400°C หรือ 673 K (Heywood, J. B., 1988) เมื่อวัสดุที่เป็น Cast iron สำหรับแผ่นรับแรงนี้ทำด้วยเหล็ก Tool steel ซึ่งแข็งแรงกว่าและทนความร้อนได้สูงกว่า และเนื่องจากเครื่องยนต์นี้มีอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นสูงถึง 4000 K ในช่วงที่เกิดการสันดาป ดังนั้น จึงประมาณให้อุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นรับแรงด้านก่อนเกิดการสันดาปมีอุณหภูมิประมาณ 700 K



รูปที่ 3.5 ผิวของแผ่นรับแรงที่รับภาระกรรมทางความร้อน

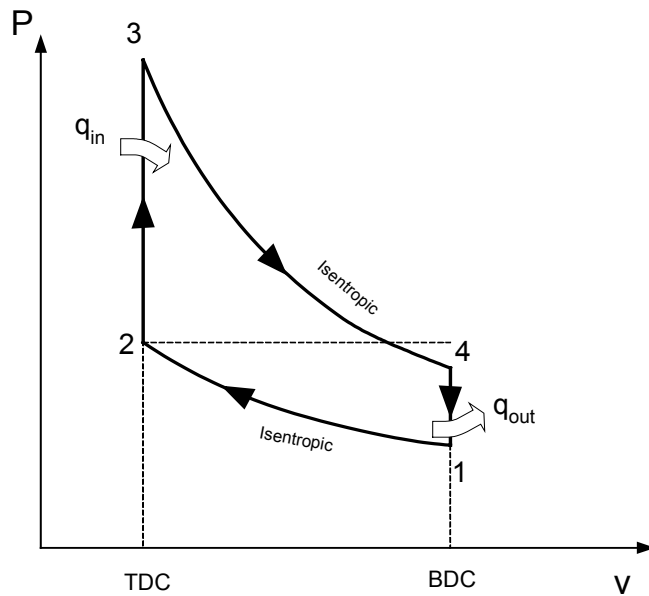
### 3.3.1 การคำนวณหาแรงดันที่กระทำกับแผ่นรับแรง

เนื่องจาก แผ่นรับแรงอยู่ในสภาพแวดล้อมภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายในทั่วไป ดังนั้นภาระกรรมคือ แรงดันและอุณหภูมิที่นำมาใช้ จะได้รับการประมาณค่าจากการคำนวณ วัฏจักรอากาศมาตรฐานออกโต (Air Standard Otto Cycle) ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงการหาค่าความดันและอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

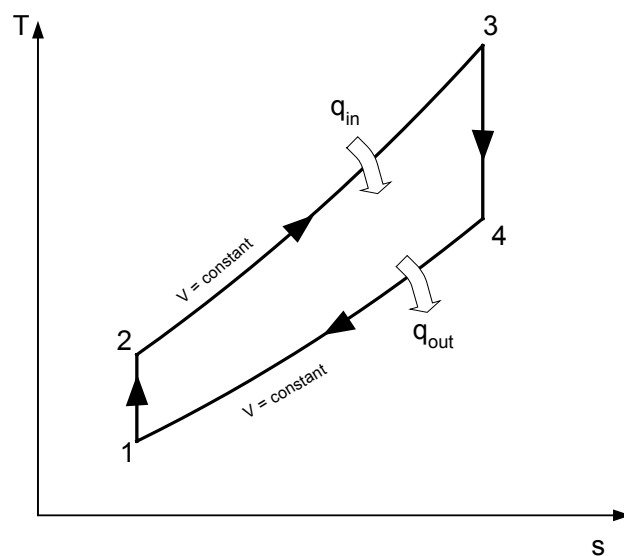
เนื่องจากเครื่องยนต์ที่ทำการพัฒนาขึ้นนี้เป็นเครื่องยนต์การขจัดเป็นบวก มีการทำงานแบบสี่จังหวะ และสันดาปด้วยการจุดระเบิด ดังนั้นลักษณะโดยทั่วไปของการทำงาน จะสามารถประมาณวัฏจักรการทำงานทางทฤษฎีได้ด้วยการวิเคราะห์วัฏจักรออกโตขั้นพื้นฐาน เพื่อที่จะหาข้อมูลเบื้องต้นของแรงดันและอุณหภูมิ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลที่ใช้ในการกำหนดภาระกรรมของแผ่นรับแรงต่อไป พิจารณาวัฏจักรอากาศมาตรฐานออกโต ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7



Air Standard Otto Cycle



รูปที่ 3.6 P-v diagram ของวัฏจักรอากาศมาตรฐานออตโต



รูปที่ 3.7 T-s diagram ของวัฏจักรอากาศมาตรฐานออตโต

จากรูปที่ 3.7 กระบวนการที่ประกอบขึ้นเป็นวัฏจักรมีดังนี้คือ

1 – 2 Isentropic compression

2 – 3 Constant volume heat addition

3 – 4 Isentropic expansion

4 – 1 Constant volume heat rejection

สำหรับข้อกำหนดของเครื่องยนต์ที่ทำการวิจัยนี้มีดังนี้

- Compression ratio,  $r_c$  เท่ากับ 8
- Displacement volume,  $V_d$  เท่ากับ 437.542 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- Clearance volume,  $V_c$  เท่ากับ 62.458 ลูกบาศก์เซนติเมตร

และข้อกำหนดของอากาศมาตรฐานคือ

- Isentropic index  $k = \frac{C_p}{C_v} = 1.35$
- $C_p = 1.108$  kJ/kg.K
- $C_v = 0.821$  kJ/kg.K
- $R = C_p - C_v = 0.287$  kJ/kg.K
- $P_0 = P_1 = 101.325$  kPa
- $T_0 = T_1 = 27^\circ\text{C} = 300$  K

สำหรับมวลของอากาศในวัฏจักรจะคำนวณได้จาก

$$v_1 = \frac{V_1}{m},$$

$$m = \rho V$$

กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการ Isentropic compression ดังนั้นอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 2 หาได้จาก

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 (r_c)^{k-1} \\ &= 300\text{K} \times (8)^{1.35-1} \\ &= 621.1589 \text{ K} \end{aligned}$$

และความดันจะหาได้จาก

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 (r_c)^k \\ &= 101.325 \text{ kPa} \times (8)^{1.35} \\ &= 1,678.3715 \text{ kPa} \end{aligned}$$

หรือ  $P_2 = 1.6784$  MPa

เนื่องจากไม่มีการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอัดตัวอย่างเอนโทรปีก ทำให้หา compression work ได้จาก

$$Q_{1-2} = 0$$

$$\begin{aligned} w_{1-2} &= C_v(T_1 - T_2) \\ &= 0.821 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times (300 - 621.1589) \text{ K} \\ &= -263.67 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

กระบวนการ 2-3 เป็น Constant volume heat addition ดังนั้น

$$V_3 = V_2 = 62.458 \text{ cm}^3$$

และปริมาณความร้อนที่ใช้กับกระบวนการนี้หาได้จาก

$$Q_{2-3} = m_f Q_{\text{HV}} \eta_c \quad (3.2)$$

เมื่อ  $Q_{\text{HV}}$  คือ ค่าความร้อนที่ได้จากการสันดาปของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44.0

MJ/kg (Heywood, J. B., 1988)

กำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 100% นั่นคือ

$$\eta_{\text{combustion}} = 100\%$$

กำหนดให้อัตราส่วนผสมน้ำมันกับอากาศเป็นไปตามทฤษฎี นั่นคือ สำหรับน้ำมันเบนซิน จะได้

$$AF = 14.3$$

$$\frac{m_a}{m_f} = 14.3$$

เมื่อ  $m_a$  คือ มวลของอากาศ

และ  $m_f$  คือ มวลของน้ำมันเชื้อเพลิง

ถ้าให้  $m_m$  เป็นมวลของส่วนผสม มีค่าเท่ากับ  $m_a + m_f$  เราจะได้

$$\frac{m_a}{m_m} = \frac{m_a}{m_a + m_f}$$

หรือ

$$\frac{m_a}{m_m} = \frac{AF}{AF + 1}$$

$$m_a = \left( \frac{AF}{AF + 1} \right) \times m_m$$

และในทำนองเดียวกัน

$$m_f = \left( \frac{1}{AF + 1} \right) \times m_m$$

กำหนดให้ส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันมีพฤติกรรมเหมือนก๊าซอุดมคติ และเนื่องจากพิจารณาระบบปิด ดังนั้นมวลของส่วนผสมจะคงที่ และหาค่าได้จากสมการสถานะของก๊าซอุดมคติ นั่นคือ

$$\begin{aligned} m_m &= P_1 V_1 / RT \\ &= \frac{101.325 \times 10^3 \text{ Pa} \times 500 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{0.287 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times 300 \text{ K}} \\ &= 0.000588 \text{ kg} \end{aligned}$$

จะได้

$$m_a = \left( \frac{14.3}{15.3} \right) \times 0.000588 = 0.0005496 \text{ kg}$$

$$m_f = \left( \frac{1}{15.3} \right) \times 0.000588 = 0.0000384 \text{ kg}$$

แทนค่าที่ได้ลงในสมการ (3.2) จะได้

$$\begin{aligned} Q_{2-3} &= 0.0000384 \text{ kg} \times 44 \times 10^6 \text{ J/kg} \times 1 \\ &= 1689.6 \text{ J} \end{aligned}$$

$$q_{in} = \frac{1689.6 \text{ J}}{0.000588 \text{ kg}} = 2873.4694 \text{ kJ/kg}$$

ซึ่งความร้อนที่ได้จากการสันดาปนี้ จะเป็นความร้อนที่ให้กับระบบ ดังนั้น

$$q_{in} = 2873.4694 \text{ kJ/kg}$$

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ เราจะได้

$$q_{2-3} = C_v (T_3 - T_2)$$

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{q_{2-3}}{C_v} + T_2 \\ &= \frac{2873.4694 \times 10^3 \text{ J}}{0.821 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})} + 621.1589 \text{ K} \end{aligned}$$

ซึ่งทำให้

$$T_3 = T_{\max} = 4121.122 \text{ K}$$

และเนื่องกระบวนการที่ 2-3 เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_3 &= P_2 \left( \frac{T_3}{T_2} \right) = 1.6784 \text{ MPa} \times \left( \frac{4121.122 \text{ K}}{621.1589 \text{ K}} \right) \\ &= 11.135 \text{ MPa} \end{aligned}$$

หรือ  $P_{\max} = 111.35 \text{ bar}$

กระบวนการ 3-4 เป็น Isentropic expansion หรือ power stroke

$$T_4 = T_3 \left( \frac{1}{r_c} \right)^{k-1}$$

$$\begin{aligned}
&= 4121.122 \times \left(\frac{1}{8}\right)^{1.35-1} = 1990.37 \text{ K} \\
P_4 &= P_3 \left(\frac{1}{r_c}\right)^k \\
&= 11.135 \times \left(\frac{1}{8}\right)^{1.35} = 0.67223 \text{ MPa} \\
&= 672.23 \text{ kPa} \\
w_{3-4} &= C_v (T_3 - T_4) \\
&= 0.821 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times (4121.122 - 1990.37) \text{ K} \\
&= 1749.35 \text{ kJ/kg}
\end{aligned}$$

กระบวนการ 4-1 เป็น Constant- volume heat rejection

$$\begin{aligned}
Q_{4-1} &= m_m C_v (T_1 - T_4) \\
&= 0.000588 \text{ kg} \times 0.821 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times (300 - 1990.37) \text{ K} \\
&= -0.81602 \text{ kJ} \\
Q_{\text{out}} &= 816.02 \text{ J} \\
q_{\text{out}} &= 1387.79 \text{ kJ/kg}
\end{aligned}$$

สามารถหาสัมประสิทธิ์เชิงความร้อนของวัฏจักรออตโต  $\eta_{\text{th,otto}}$  หาได้จาก

$$\begin{aligned}
\eta_{\text{th,otto}} &= 1 - [(T_4 - T_1)/(T_3 - T_2)] \\
&= 1 - [(1990.37 - 300) \text{ K} / (4121.122 - 621.15890) \text{ K}] \\
&= 0.517
\end{aligned}$$

หรือ

$$\eta_{\text{th,otto}} = 51.7\%$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแรงดันในกระบอกสูบจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตรของห้องเผาไหม้ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมทำงานของแผ่นรับแรง ดังนั้นในช่วง power stroke จึงจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและปริมาตรห้องเผาไหม้ ซึ่งหาได้จาก กระบวนการ 3-4 ที่เป็นกระบวนการ Isentropic expansion โดยจะได้ความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$Pv^k = \text{constan t} \quad \text{Pa} \cdot \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)^k$$

และ

$$Tv^{k-1} = \text{constan t} \quad \text{K} \cdot \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)^{k-1}$$

จาก

$$P_3 v_3^k = C \quad \text{Pa} \cdot \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)^k$$

แทนค่าความดันและปริมาตรที่ตำแหน่งที่ 3 จะได้ค่าคงที่เป็น

$$C = 11.135 \text{ MPa} \times \left( \frac{62.485 \times 10^{-6}}{0.000588} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \right)^{1.35}$$

$$\text{หรือ} \quad C = 539.918 \times 10^3 \quad \text{Pa} \cdot \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)^{1.35}$$

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความดันและปริมาตรในช่วง 3-4 เป็น

$$P v^k = 539.918 \times 10^3 \quad \text{Pa} \cdot \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)^{1.35}$$

$$P = \frac{539.918 \times 10^3}{v^{1.35}} \quad \text{Pa} \quad (3.3)$$

เนื่องจากต้องการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและมุมการเคลื่อนที่ของแผ่นรับแรง และความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเคลื่อนที่และปริมาตรจะเป็นไปตามสมการ (ที่มาของสมการ อยู่ในภาคผนวก ข)

$$V = \theta \times (R^2 - r^2) \times h - t_b (R - r) \times h \quad (3.4)$$

โดย  $0.2967 \text{ rad} \leq \theta \leq 0.97738 \text{ rad}$

กำหนดให้

$$R = 100 \quad \text{mm}$$

$$r = 40 \quad \text{mm}$$

$$h = 53.3 \quad \text{mm}$$

$$t_b = 22 \quad \text{mm}$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} V(\theta) &= \theta(0.1^2 - 0.04^2) \times 0.0533 - 0.022(0.1 - 0.04) \times 0.0533 \\ \frac{V(\theta)}{m_m} &= \frac{0.00044772\theta}{0.000588} - \frac{0.000070356}{0.000588} \end{aligned}$$

$$= 0.76140 - 0.11965 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

แทนค่า

$$P(\theta) = \frac{539.918 \times 10^3}{(0.76140 - 0.11965)^{1.35}} \text{ Pa} \quad (3.5)$$

ทำนองเดียวกันสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและมุมการทำงานในช่วง Power stroke จะหาได้จาก

$$T v^{k-1} = \text{constant} \quad K \cdot \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)^{k-1}$$

$$T_3 \left( \frac{V_3}{m_m} \right)^{k-1} = 4121.122 \times \left( \frac{62.485 \times 10^{-6}}{0.000588} \right)^{1.35-1}$$

$$= 1880.4203 \quad K \cdot \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)^{0.35}$$

โดยที่ในช่วงการขยายตัวจาก  $V_3$  ไป  $V_4$  ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรจำเพาะกับมุมมุมเป็น

$$\frac{V}{m_m} = 0.76140 - 0.11965 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$T(\theta) = \frac{1880.4203}{(0.76140 - 0.11965)^{0.35}} \text{ K} \quad (3.6)$$

แบบจำลองชิ้นงานหรือแผ่นรับแรงเปรียบได้กับ คานตรง ที่ปลายด้านหนึ่งถูกยึดติดอยู่ แรงดันที่กระทำสม่ำเสมอและคงที่ตลอดทั่วทั้งแผ่น จากสมการ (3.5) และ (3.6) แรงดันมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งมุม  $\theta = 17 \times \frac{\pi}{180}$  rad จะได้แรงดันและอุณหภูมิสูงสุดเป็น

$$P_{\max} = 11.1266 \text{ MPa}$$

$$T_{\max} = 4122.4091 \text{ K}$$

จากสมการ (3.5) และ (3.6) เราสามารถนำเขียนโปรแกรมการคำนวณด้วย MATLAB (รายละเอียดในภาคผนวก ก) โดยทำการเปลี่ยนค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็น 100%, 70% และ 50% ซึ่งจะได้ผลดังนี้

- ผลลัพธ์กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100% ที่ตำแหน่งมุม  $\theta = 17 \times \frac{\pi}{180}$

$$P_{\max} = 11.1266 \text{ MPa}$$

$$T_{\max} = 4122.4091 \quad \text{K}$$

- ผลลัพธ์กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70% ที่ตำแหน่งมุม  $\theta = 17 \times \frac{\pi}{180}$

$$P_{\max} = 8.2914 \quad \text{MPa}$$

$$T_{\max} = 3071.6930 \quad \text{K}$$

- ผลลัพธ์กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50% ที่ตำแหน่งมุม  $\theta = 17 \times \frac{\pi}{180}$

$$P_{\max} = 6.40126 \quad \text{MPa}$$

$$T_{\max} = 2371.6656 \quad \text{K}$$

### 3.3.2 การคำนวณหาอุณหภูมิที่กระทำกับแผ่นรับแรง

สำหรับการคำนวณหาภาระกรรมที่เป็นอุณหภูมินั้นจะใช้ Pro/MECHANICA Thermal หาค่าอุณหภูมิที่กระทำกับแผ่นรับแรง โดยกำหนดเงื่อนไขข้อกำหนดดังในรูปที่ 3.5 และภาระกรรมทางความร้อนที่กำหนดให้จะหาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงหรือ  $Q_{2-3}$  ในสมการที่ (3.2) ในกระบวนการ Constant volume heat addition และเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปยังชิ้นส่วนอื่นภายในห้องเผาไหม้นั้นเทียบได้จากกราฟในรูปที่ 3.8 (Heywood, J. B., 1988, หน้า 702) เป็นค่าเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยไปยังผนังของห้องเผาไหม้ เทียบต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์

จากสมมุติฐานที่ตั้งไว้ในเบื้องต้นว่า ในขณะที่ทำการพิจารณานั้นเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบเท่ากับ 2000 รอบต่อนาที ดังนั้นจากกราฟในรูปที่ 3.8 เปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ในช่วง 20 – 30% สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกให้เปอร์เซ็นต์การถ่ายเทความร้อนไปยังแผ่นรับแรงเท่ากับ 25%

ซึ่งจะทำให้ได้ภาระกรรมทางความร้อนเป็นดังนี้

- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

$$HL = Q_{2-3} \times 0.25 = 1.692\text{kJ} \times 0.25 = 423 \quad \text{J}$$

- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

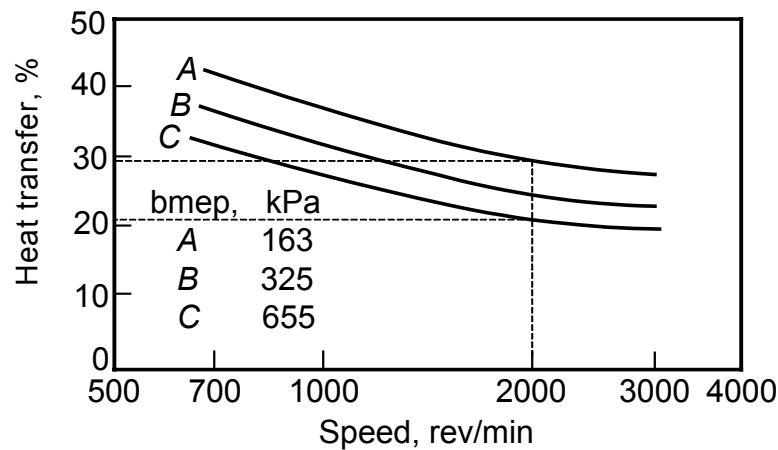
$$HL = Q_{2-3} \times 0.25 = 1.1845\text{kJ} \times 0.25 = 296.125 \quad \text{J}$$

- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

$$HL = Q_{2-3} \times 0.25 = 0.8461\text{kJ} \times 0.25 = 211.525 \quad \text{J}$$

จากนั้นใช้ภาระกรรมทางความร้อนที่ได้นี้ไปหาค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วย Pro/MECHANICA Thermal ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในหัวข้อ 3.4.2





รูปที่ 3.8 อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยสู่ผนังห้องเผาไหม้เทียบกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ SI

### 3.4 การวิเคราะห์แผ่นรับแรงด้วย Pro/MECHANICA Structure

การวิเคราะห์หาความเค้น ความเครียด และการขจัดบนแผ่นรับแรงนั้น จะแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน คือ หนึ่ง วิเคราะห์ผลจากแรงดันด้วย Pro/MECHANICA Structure สอง วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้วย Pro/MECHANICA Thermal โดยกำหนดช่วงเวลาที่ภาระกรรมกระทำต่อแผ่นรับแรงเท่ากับ 1 จังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 2000 rpm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0035 วินาที เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของแผ่นรับแรงเนื่องจากภาระกรรมในช่วงเวลาดังกล่าว จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure อีกครั้ง และสาม ทำการวิเคราะห์โดยใช้ภาระกรรมทั้งสองแบบด้วย Pro/MECHANICA Structure ซึ่งทั้งสามส่วนจะทำการวิเคราะห์แยกเป็น 3 กรณี ที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100% 70% และ 50%<sup>3</sup>

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองของแผ่นรับแรง กำหนดเงื่อนไขข้อบังคับและภาระกรรมแล้ว จึงเริ่มต้นทำการวิเคราะห์แบบจำลอง สำหรับการวิเคราะห์แผ่นรับแรงนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ วิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดจากภาระกรรมของแผ่นรับแรง ดังนั้นจะใช้การวิเคราะห์แบบ Static เพื่อที่จะดูผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อการวิเคราะห์ในขั้นนี้เสร็จสิ้น ผลลัพธ์ที่ได้ จะใช้เป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจในการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงแผ่นรับแรง

<sup>3</sup> โดยในช่วงแรกของการวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองวิเคราะห์เพียงสองกรณีคือ ที่ 100% และ 70% สำหรับในกรณีที่ 3 คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50% นั้น เป็นส่วนที่เพิ่มมาในภายหลัง เนื่องจากเมื่อพิจารณาแล้วว่าที่ประสิทธิภาพ 100% นั้น มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมากหรือแทบจะไม่มีเลย ส่วนที่เลือกประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50% ก็เนื่องจากการดูผลลัพธ์เมื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็นครั้งแรกหนึ่ง

### 3.4.1 ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงแบบภาระกรรมเป็นแรงดัน

การวิเคราะห์แบบ Static ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปข้างล่างต่อไปนี้ เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็น ductile material ซึ่งใช้ von Mises เป็น Failure criteria

#### - กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%

จากการทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure ซึ่งผลของการวิเคราะห์เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% จะให้แรงดันที่กระทำที่ผิวของแผ่นรับแรงตามรูปที่ 3.4 มีค่าเท่ากับ 11.126 MPa ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 100\%$

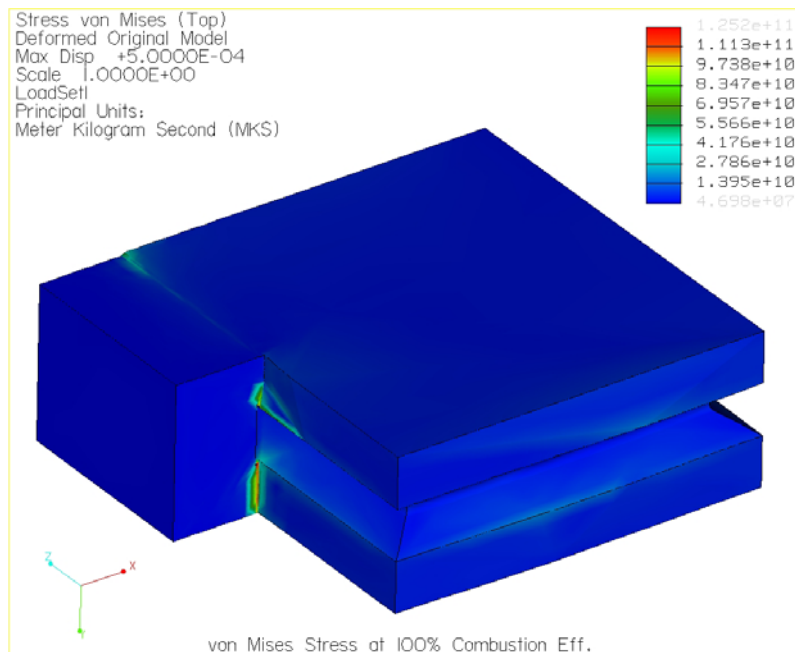
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$2.090447 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$1.066126 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.251862 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.067165 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.446331 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.270100 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$4.305021 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.776152 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$7.000474 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.185847 \times 10^{10}$	Pa
Strain energy	$3.695348 \times 10^{03}$	

จากผลลัพธ์ที่ได้ เราพบว่าความเค้นของ von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.251862 \times 10^{11}$  Pa และการแสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9

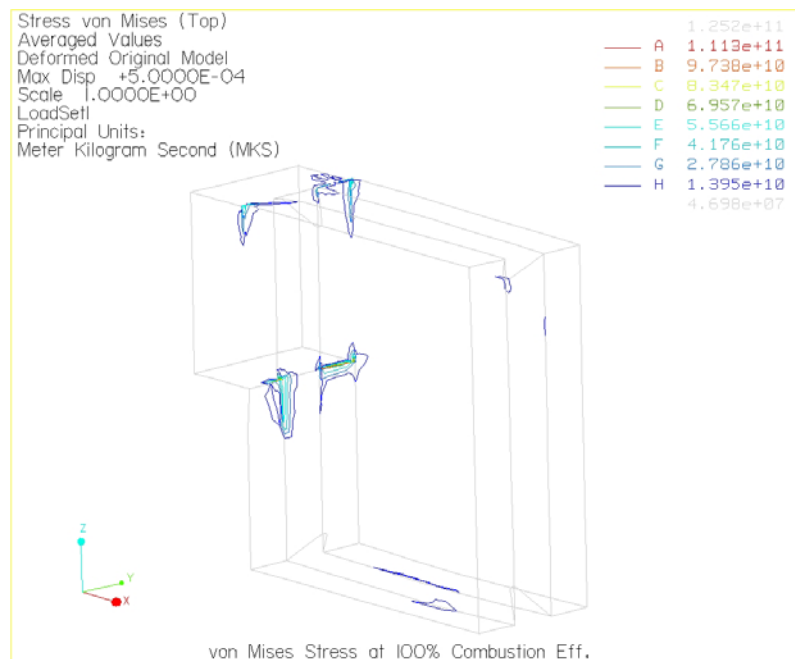
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับขั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 58.95 วินาที

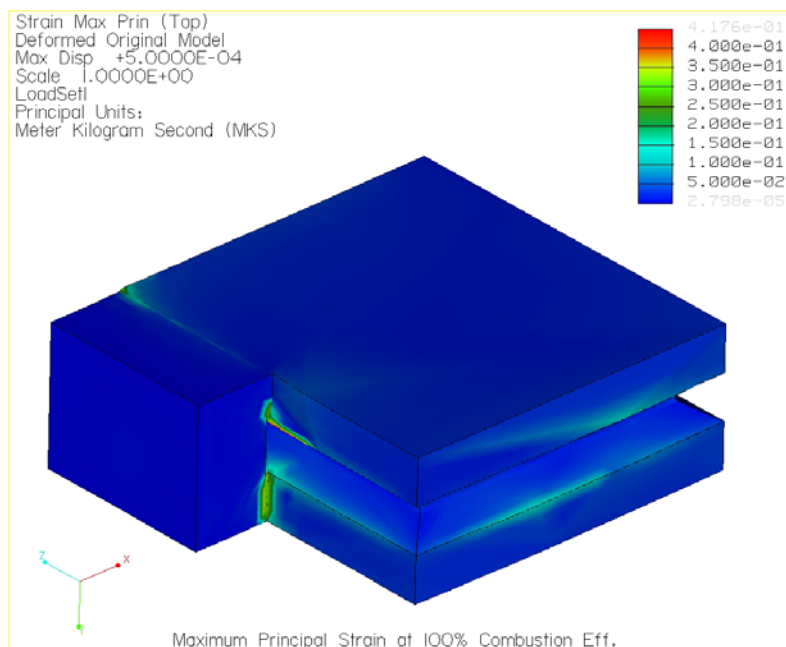


รูปที่ 3.9 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$

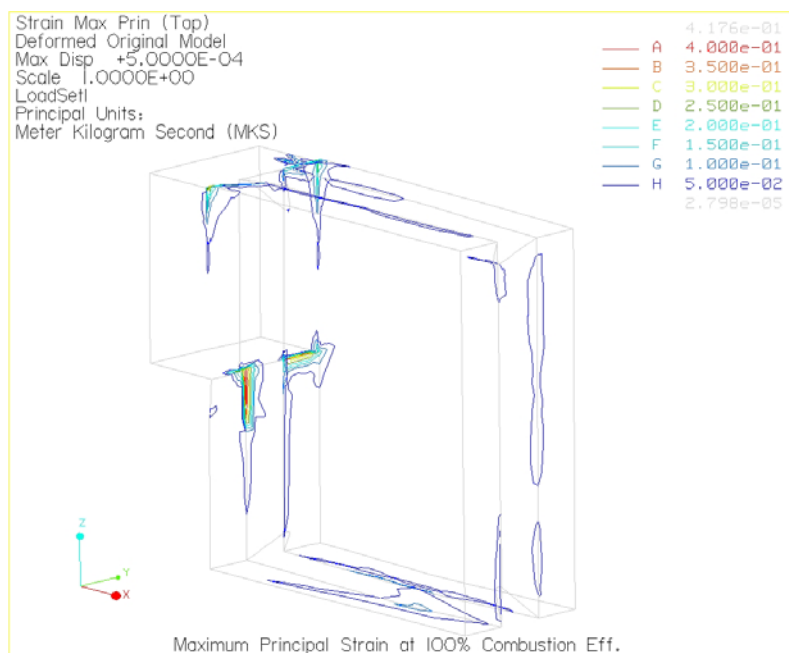


รูปที่ 3.10 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

ความเค้นหลักสูงสุดของแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

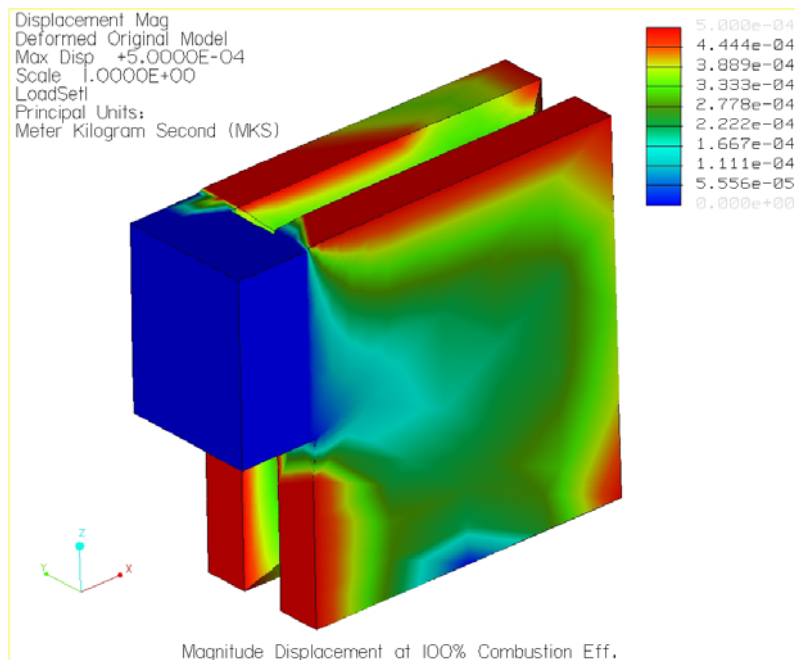


รูปที่ 3.11 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$

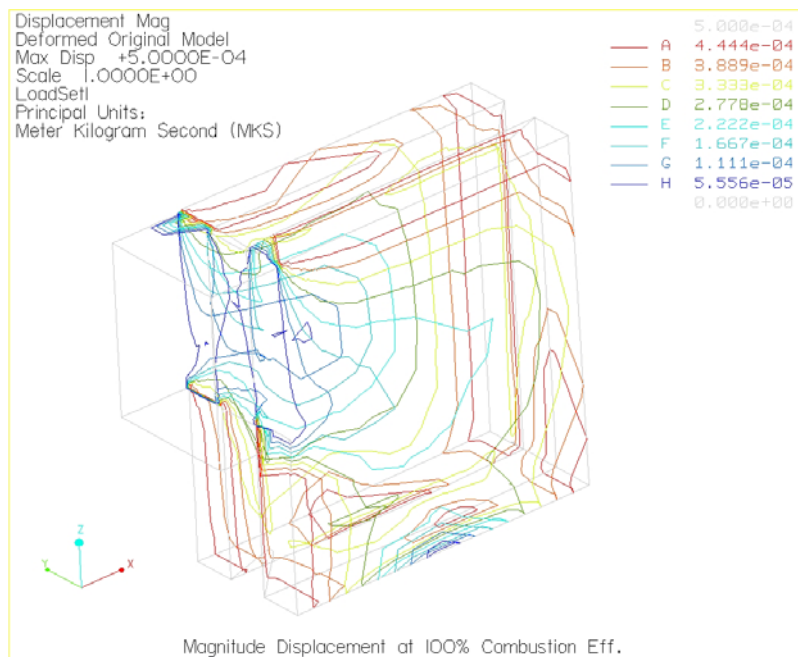


รูปที่ 3.12 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$



รูปที่ 3.14 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70%

จากการทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure ซึ่งผลของการวิเคราะห์เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70% จะให้แรงดันที่กระทำที่ผิวของแผ่นรับแรงตามรูปที่ 3.4 ค่าเท่ากับ 8.2914 MPa ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 70\%$

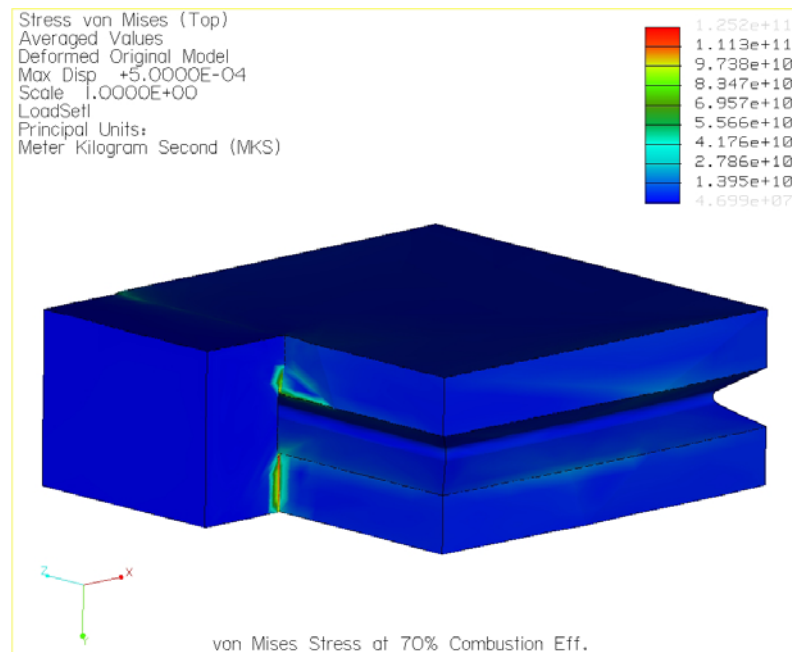
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$2.084860 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$1.066476 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.251849 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.067202 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.445787 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.270005 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$4.306328 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.776031 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$6.999852 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.185896 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$3.695337 \times 10^{03}$	

จากผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่า ความเค้นของ von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.251849 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

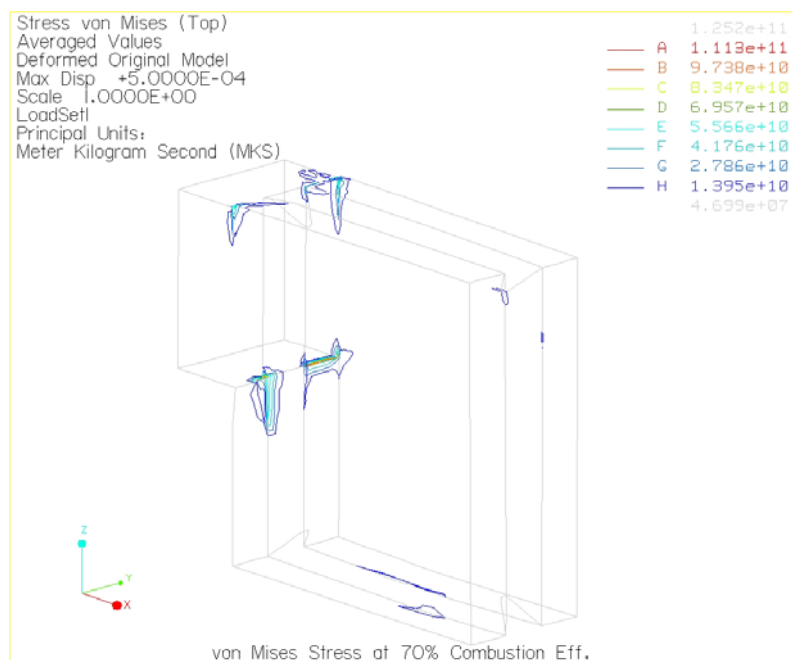
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 56.46 วินาที

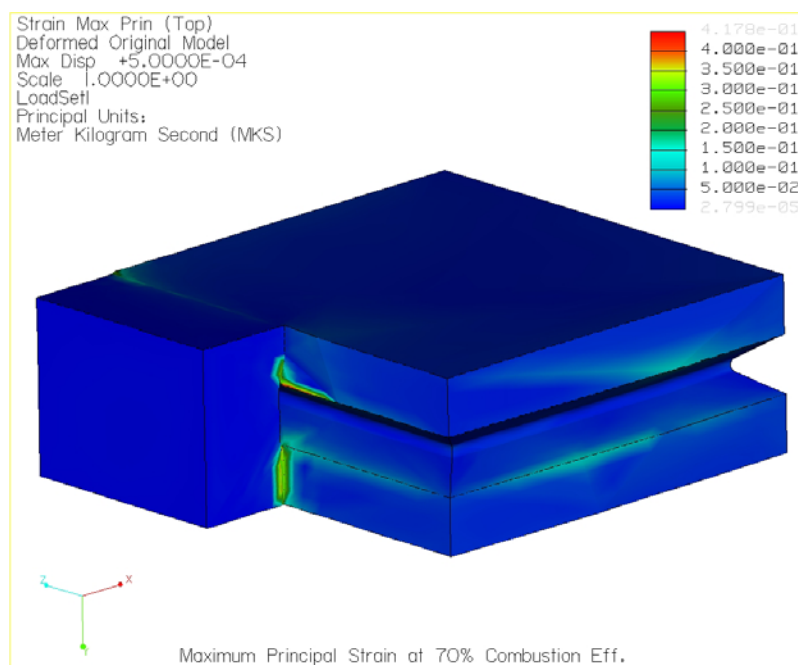


รูปที่ 3.15 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$

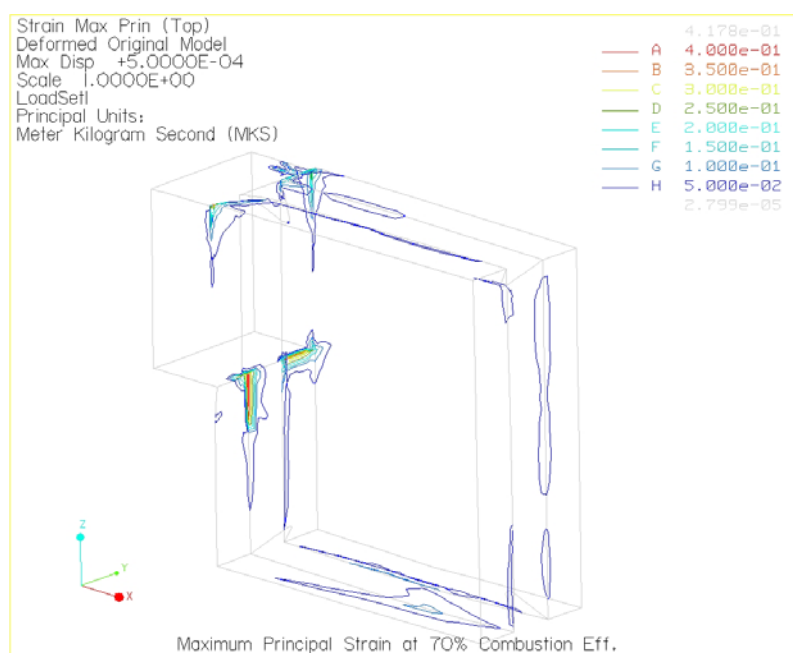


รูปที่ 3.16 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$

ความเค้นหลักสูงสุดของแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้



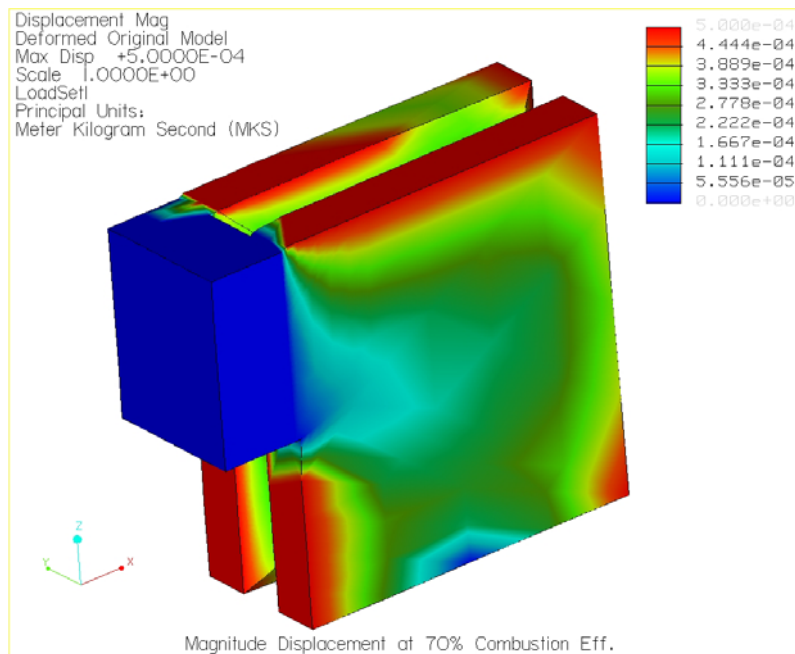
รูปที่ 3. 17 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$



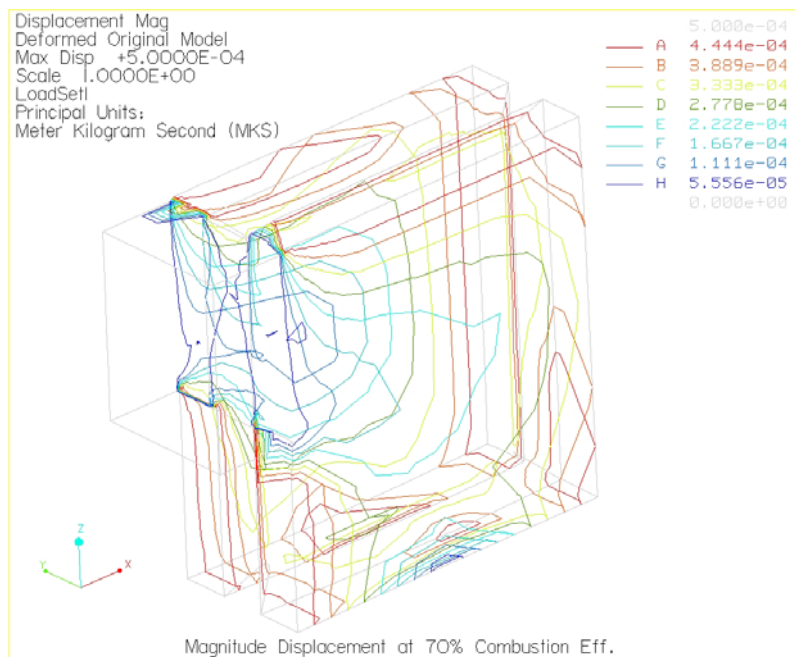
รูปที่ 3. 18 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$



การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.19 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$



รูปที่ 3.20 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$

- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50%

จากการทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure ซึ่งผลของการวิเคราะห์เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50% จะให้แรงดันที่กระทำที่ผิวของแผ่นรับแรงตามรูปที่ 3.4 ค่าเท่ากับ 6.4013 MPa ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 50\%$

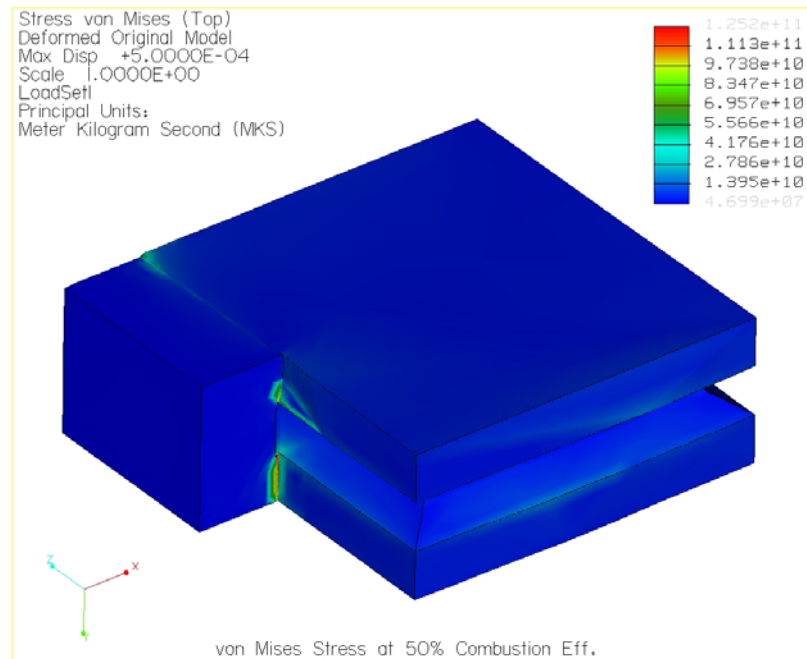
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$2.081135 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$1.066709 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.251841 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.067227 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.445424 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.269942 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$4.307199 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.775951 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$6.999437 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.185929 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$3.695331 \times 10^{03}$	

จากผลลัพธ์ที่ได้ จะพบว่า ความเค้นของ von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.251841 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

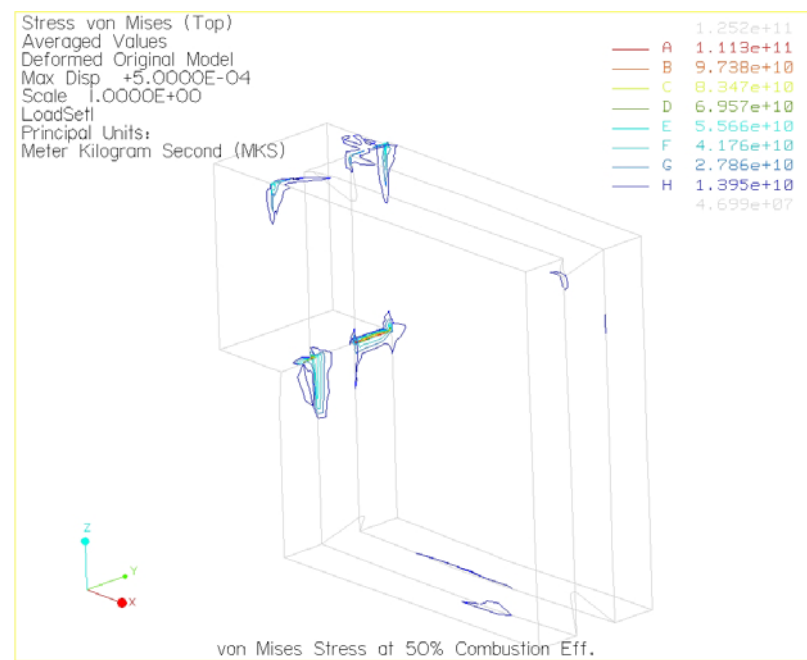
จำนวนอีลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อีลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 57.65 วินาที

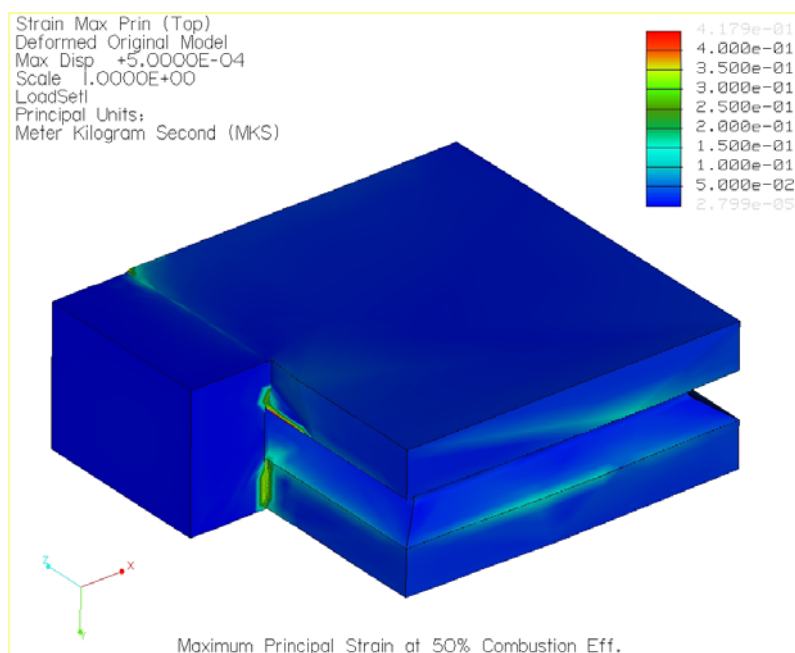


รูปที่ 3. 21 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$

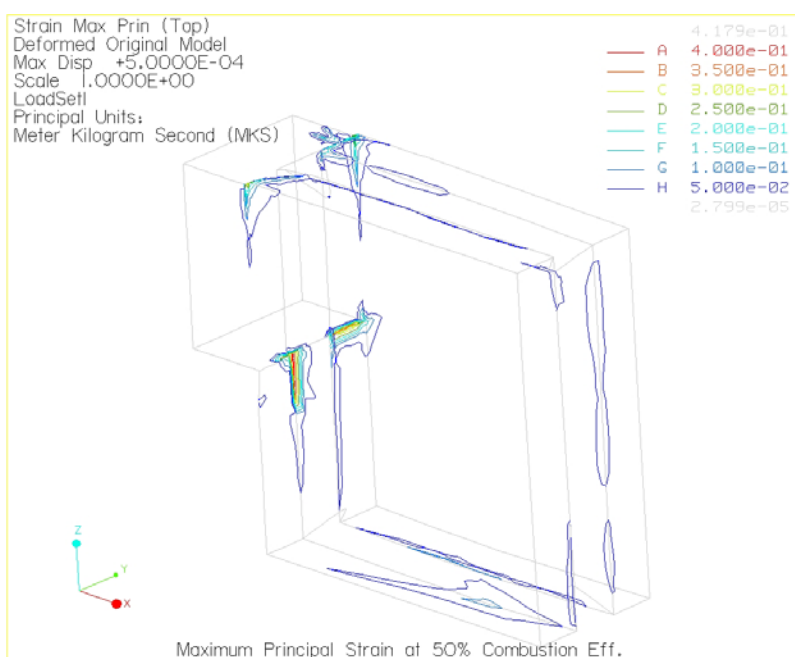


รูปที่ 3. 22 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

ความเค้นหลักสูงสุดของแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

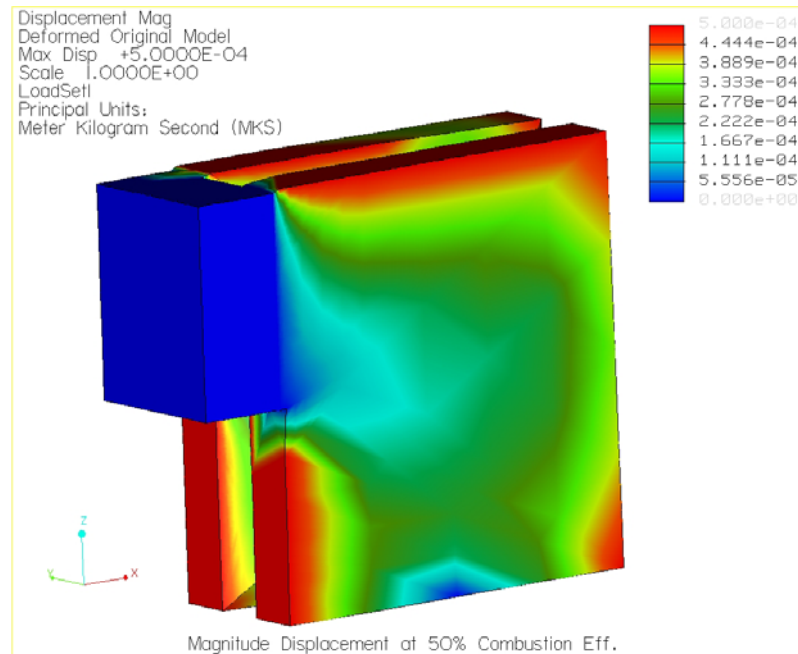


รูปที่ 3. 23 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$

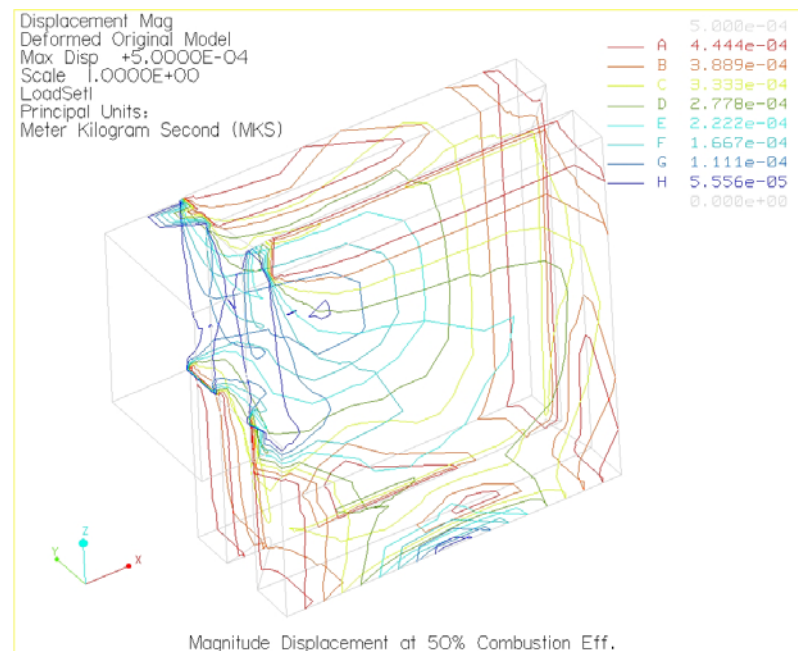


รูปที่ 3. 24 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3. 25 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$



รูปที่ 3. 26 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

### 3.4.2 ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงแบบภาระกรรมเป็นอุณหภูมิ

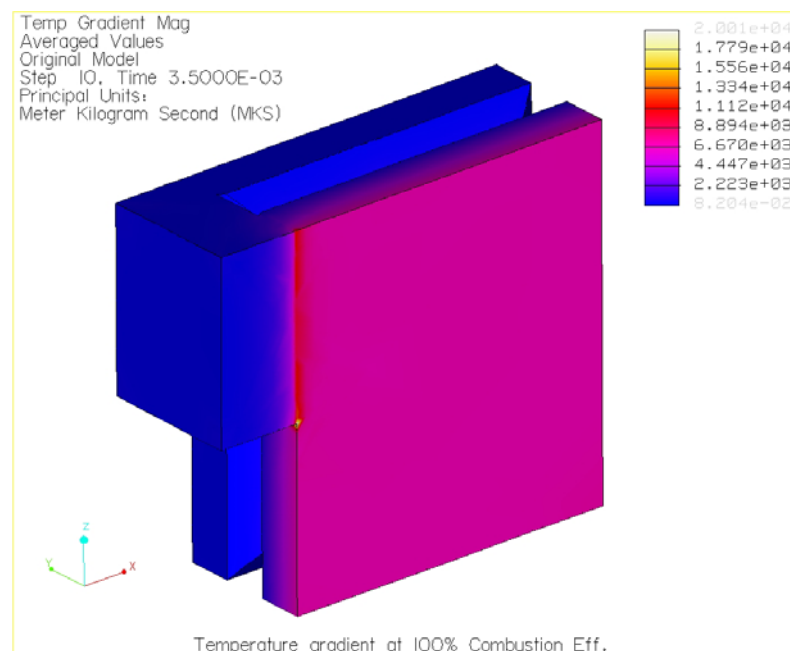
#### - กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%

จากการทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Thermal ซึ่งผลของการวิเคราะห์เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% จะให้ความร้อนที่กระทำที่ผิวของแผ่นรับแรงตามรูปที่ 3.5 ค่าเท่ากับ 423 J ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปข้างล่างดังต่อไปนี้

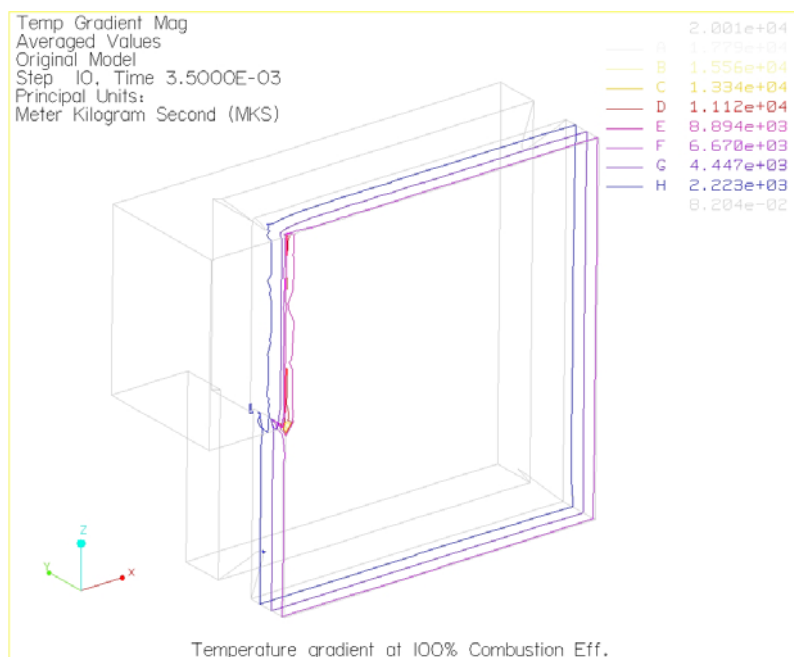
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับขั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 6

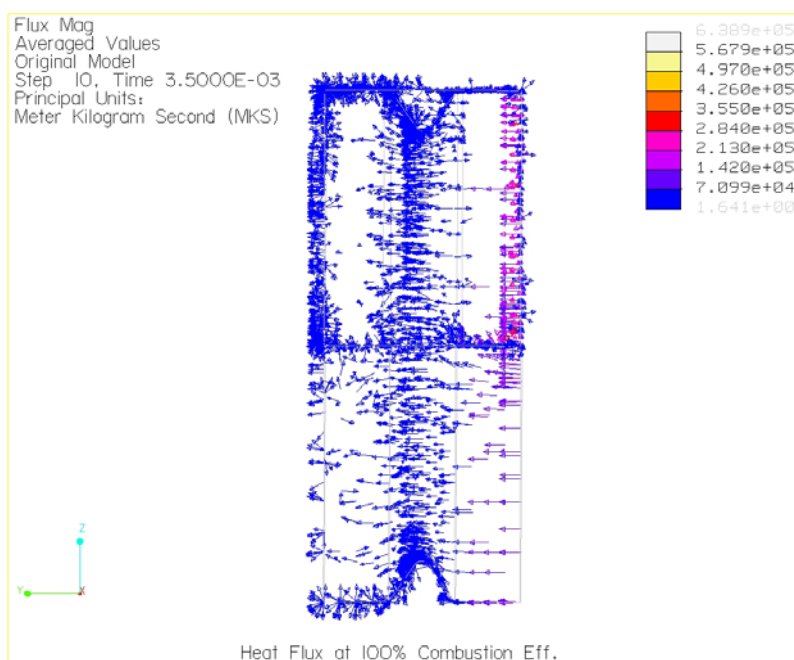
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 380.99 วินาที



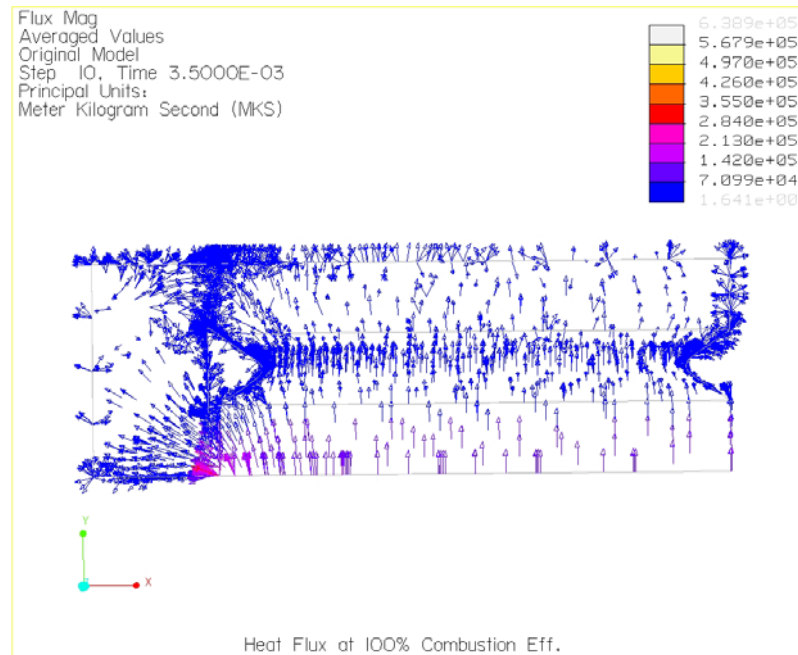
รูปที่ 3. 27 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$



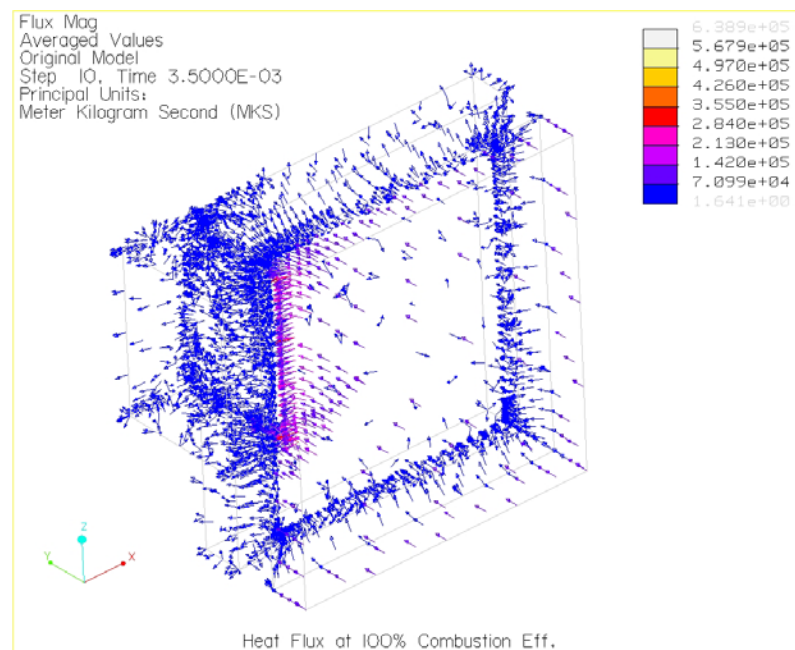
รูปที่ 3. 28 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$



รูปที่ 3. 29 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนพื้นรับแรงที่  $\eta_c = 100\%$  (ด้านหน้า)



รูปที่ 3.30 ภายหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 100\%$  (ด้านบน)



รูปที่ 3.31 ภายหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 100\%$  (สามมิติ)



เมื่อทราบค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามช่วงเวลาที่กำหนด แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure เพื่อหาความเค้น (Thermal stress) และความเครียด (Thermal strain) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 3. 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 100\%$

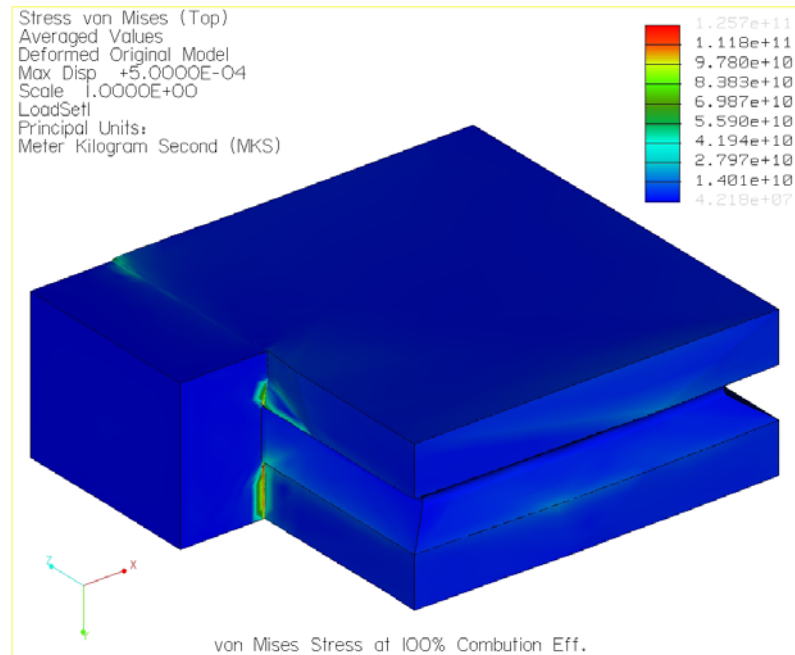
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.001809 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$1.485639 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$8.614538 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.257309 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.080156 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.478202 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.240584 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$3.011012 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.786311 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$6.859977 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.200746 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$2.718810 \times 10^{03}$	

จากผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่า ความเค้นของ von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.257309 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

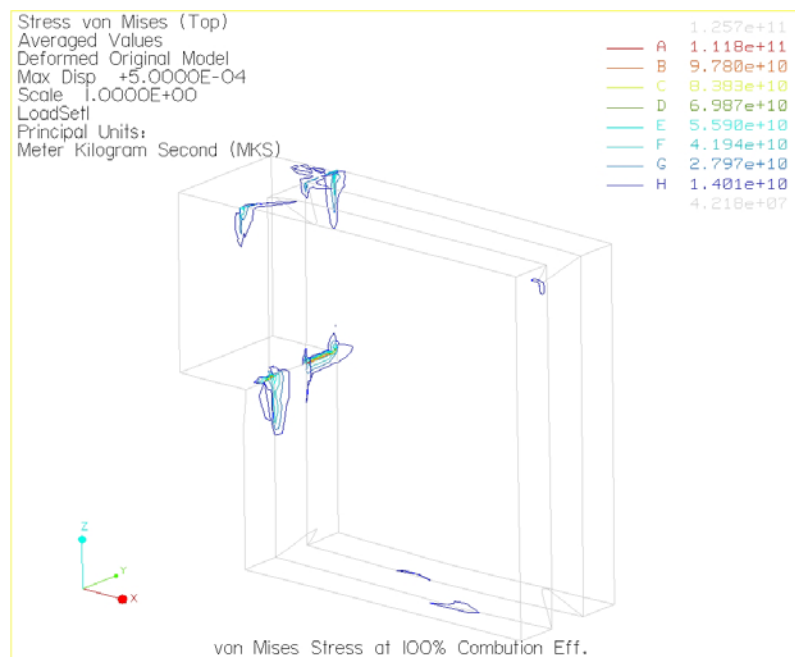
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 77.05 วินาที

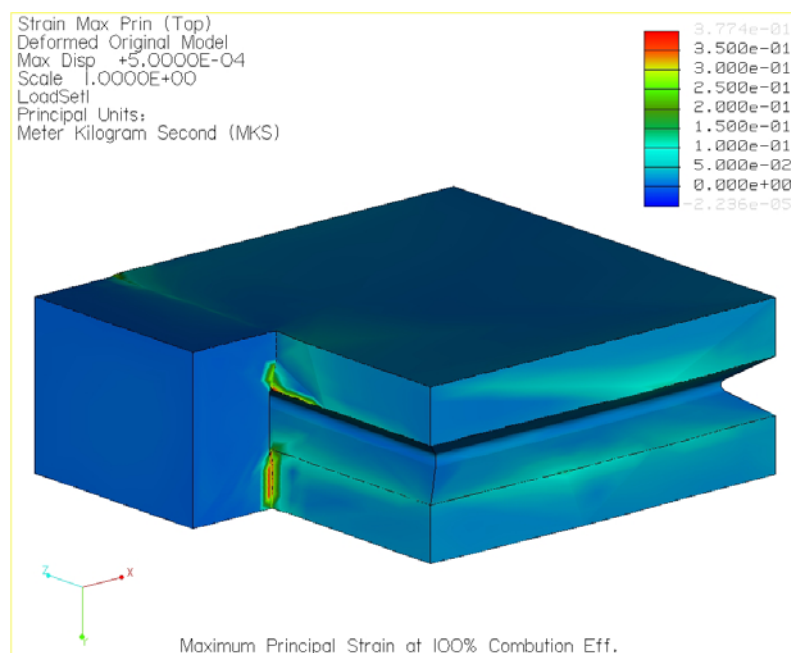


รูปที่ 3.32 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$

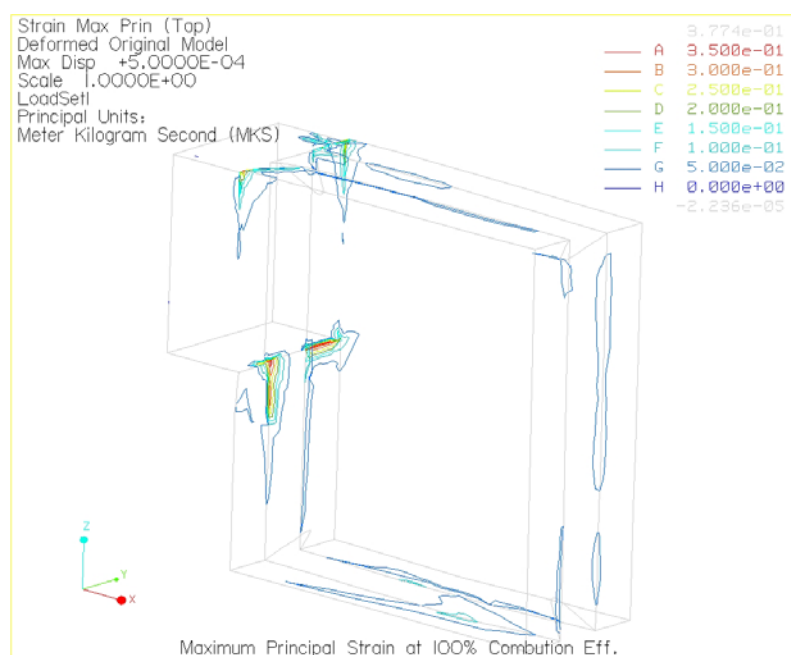


รูปที่ 3.33 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

ความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

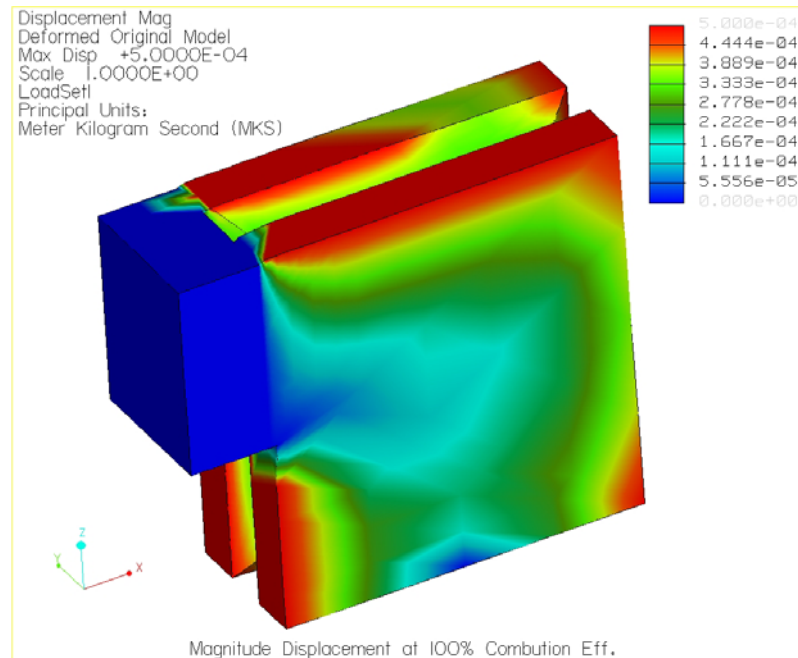


รูปที่ 3.34 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$

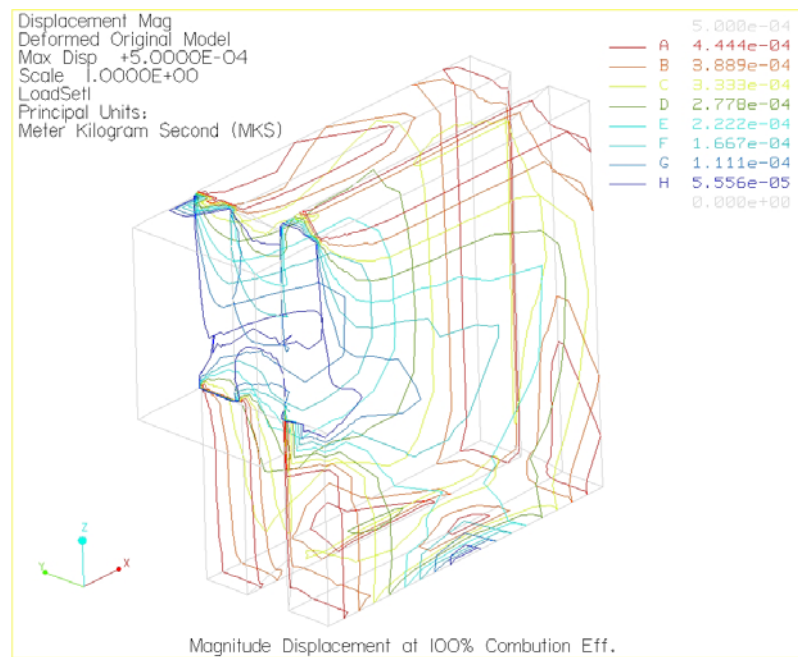


รูปที่ 3.35 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.0000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.36 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$



รูปที่ 3.37 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

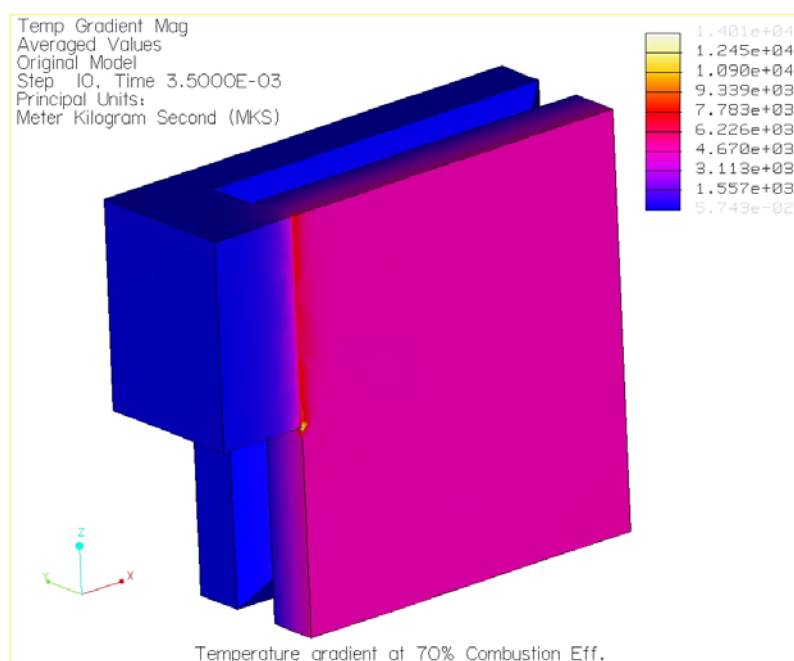
- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70%

จากการทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Thermal ซึ่งผลของการวิเคราะห์ที่เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70% จะให้ความร้อนที่กระทำที่ผิวของแผ่นรับแรงตามรูปที่ 3.5 ค่าเท่ากับ 296.125 J ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปข้างล่างดังต่อไปนี้

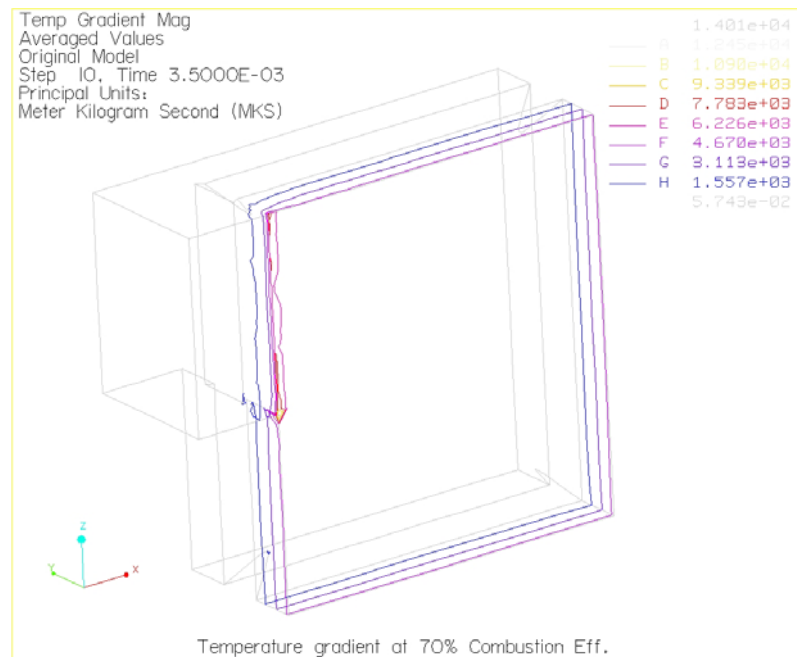
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 6

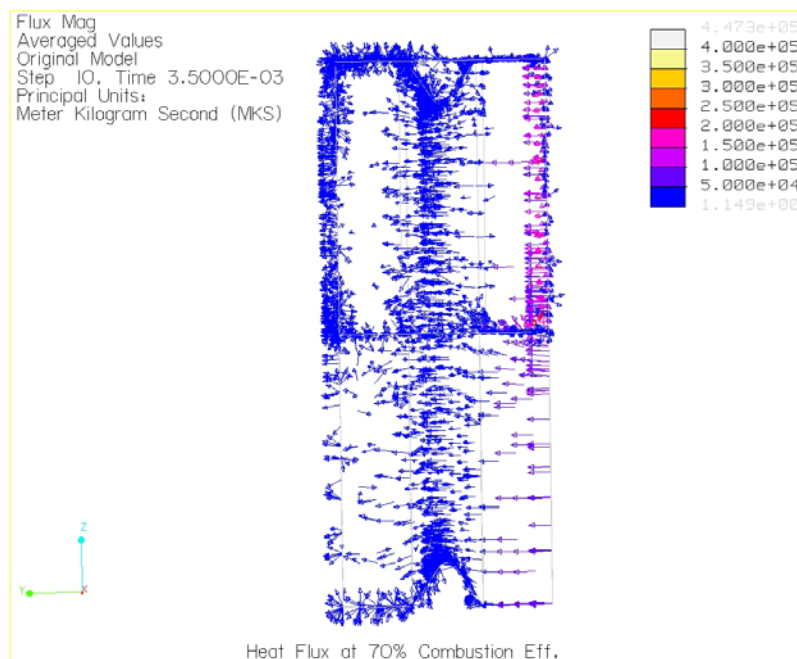
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 409.79 วินาที



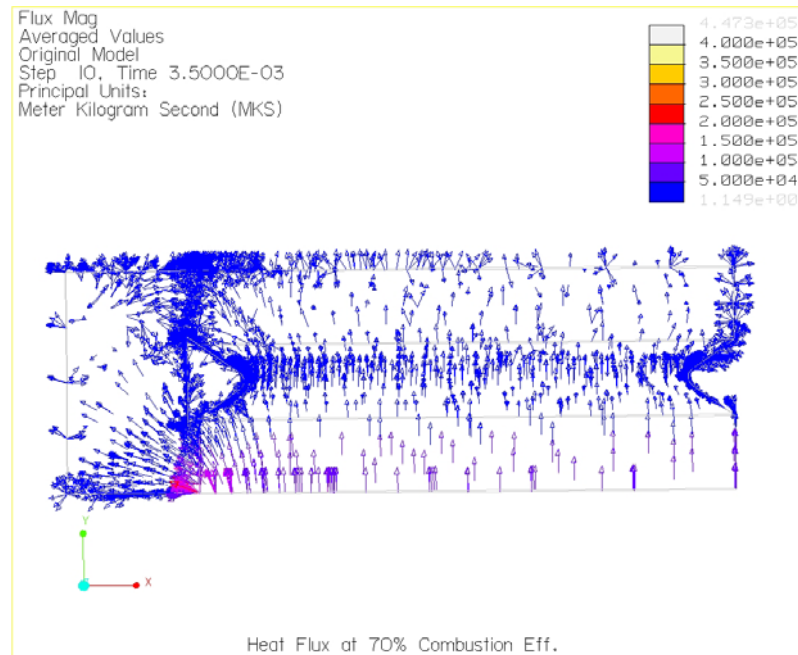
รูปที่ 3.38 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$



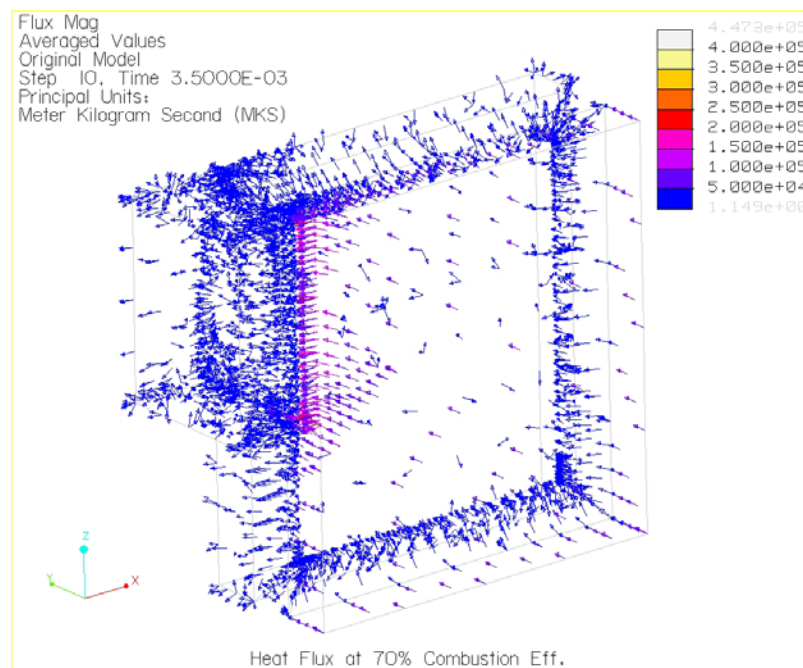
รูปที่ 3. 39 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$



รูปที่ 3. 40 ภาพหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 70\%$  (ด้านหน้า)



รูปที่ 3. 41 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 70\%$  (ด้านบน)



รูปที่ 3. 42 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 70\%$  (สามมิติ)

เมื่อทราบค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามช่วงเวลาที่กำหนด แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure เพื่อหาความเค้น (Thermal stress) และความเครียด (Thermal strain) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 3.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 70\%$

ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$1.489934 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$8.616453 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.257303 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.080172 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.478018 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.240562 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$3.013032 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.786249 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$6.860052 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.200767 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$2.722214 \times 10^{03}$	

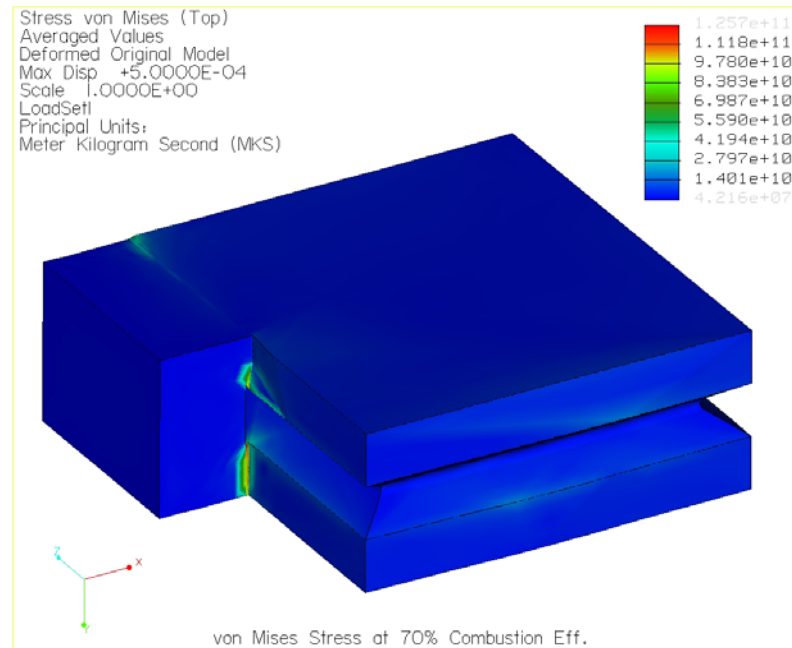
จากผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่า ความเค้นของ von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.257303 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

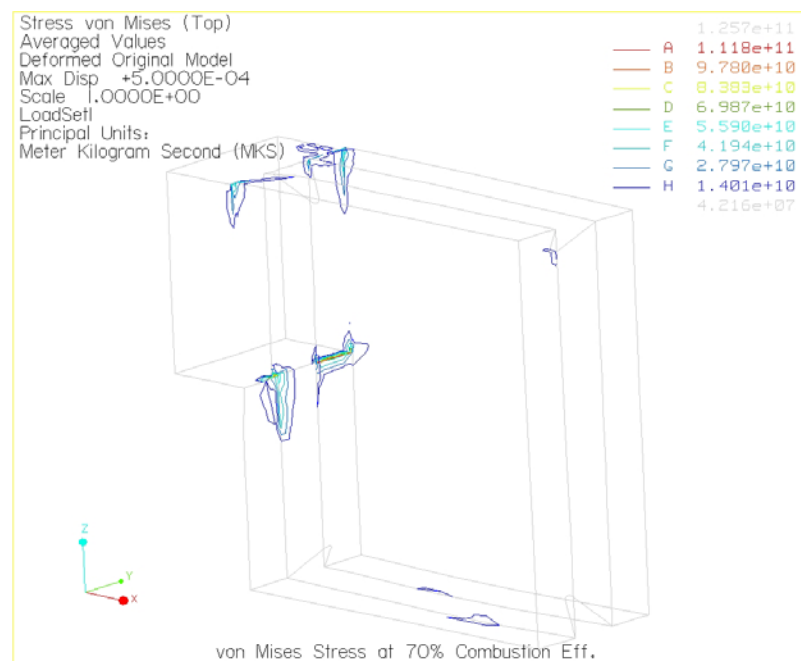
ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 76.62 วินาที



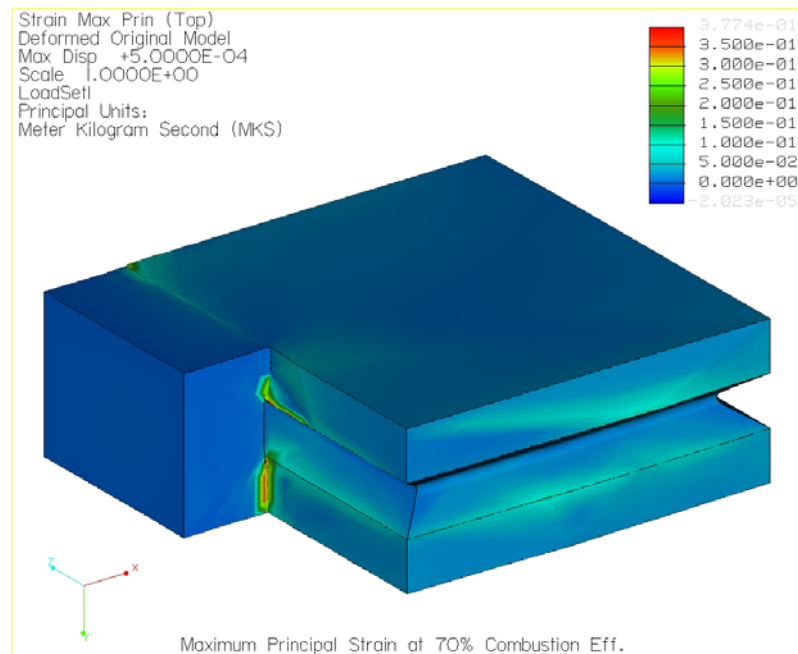


รูปที่ 3. 43 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$

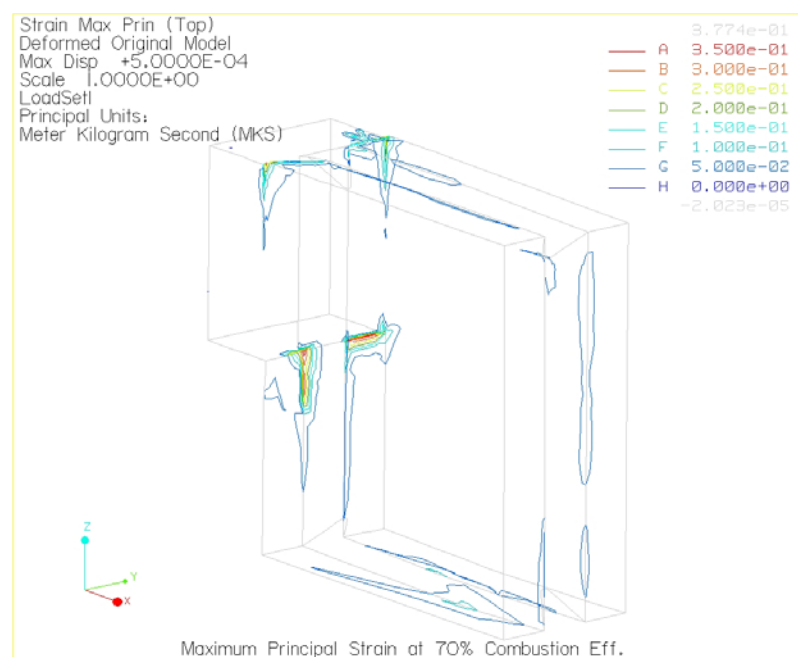


รูปที่ 3. 44 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$

ความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

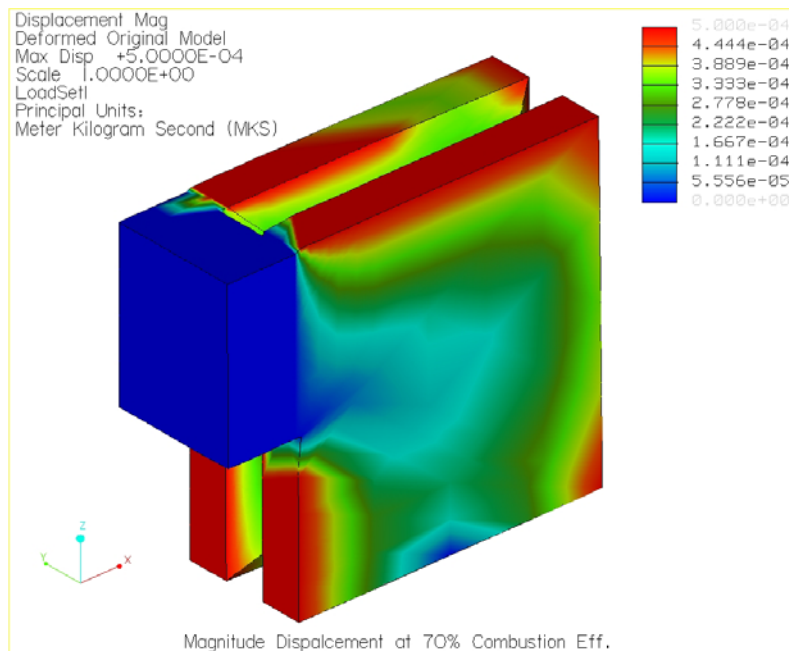


รูปที่ 3.45 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$

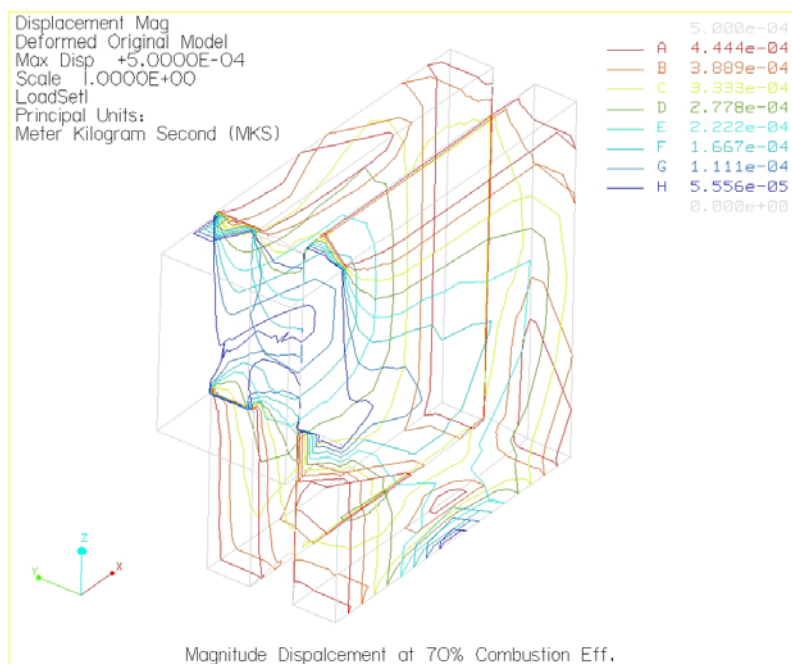


รูปที่ 3.46 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.0000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3. 47 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$



รูปที่ 3. 48 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$

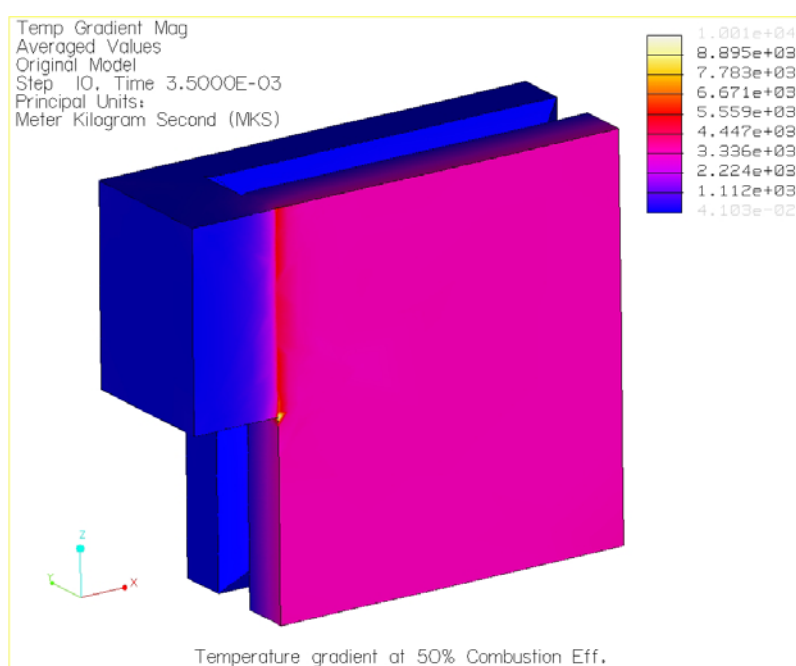
- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50%

จากการทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Thermal ซึ่งผลของการวิเคราะห์เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50% จะให้ความร้อนที่กระทำที่ผิวของแผ่นรับแรงตามรูปที่ 3.5 ค่าเท่ากับ 211.525 J ผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปข้างล่างดังต่อไปนี้

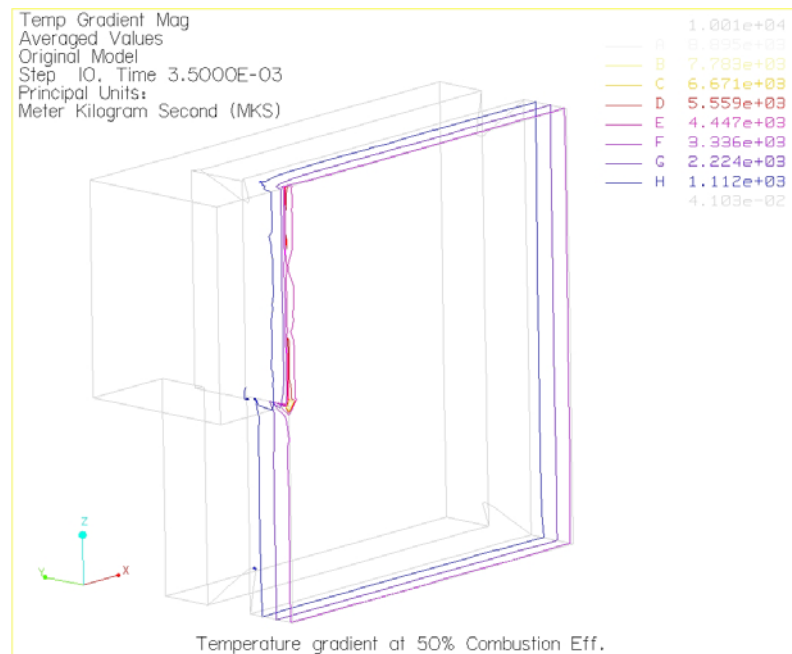
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับขั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 6

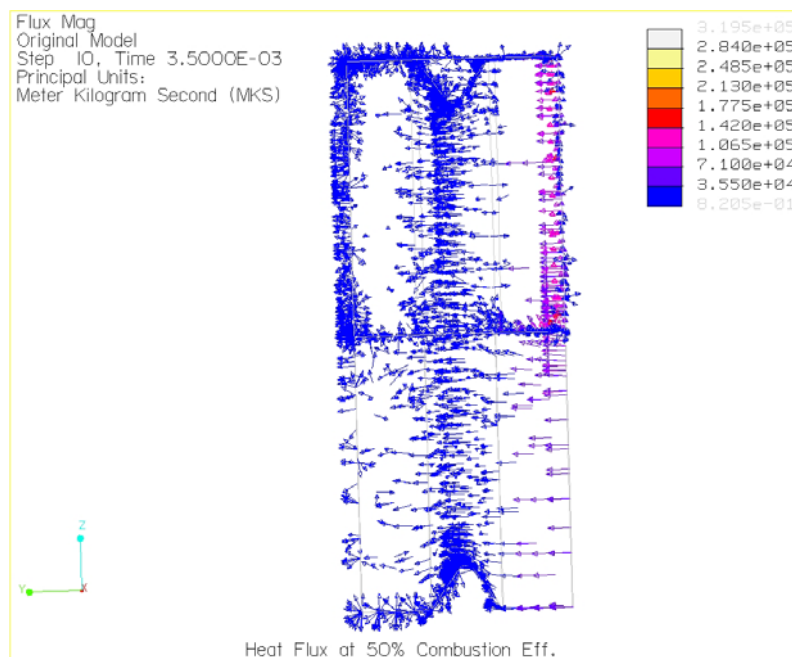
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 399.84 วินาที



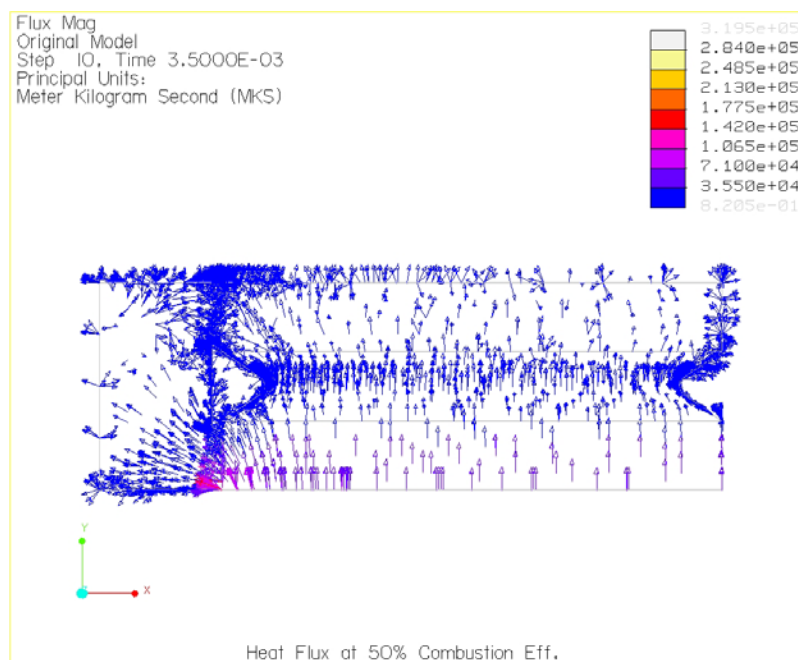
รูปที่ 3. 49 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$



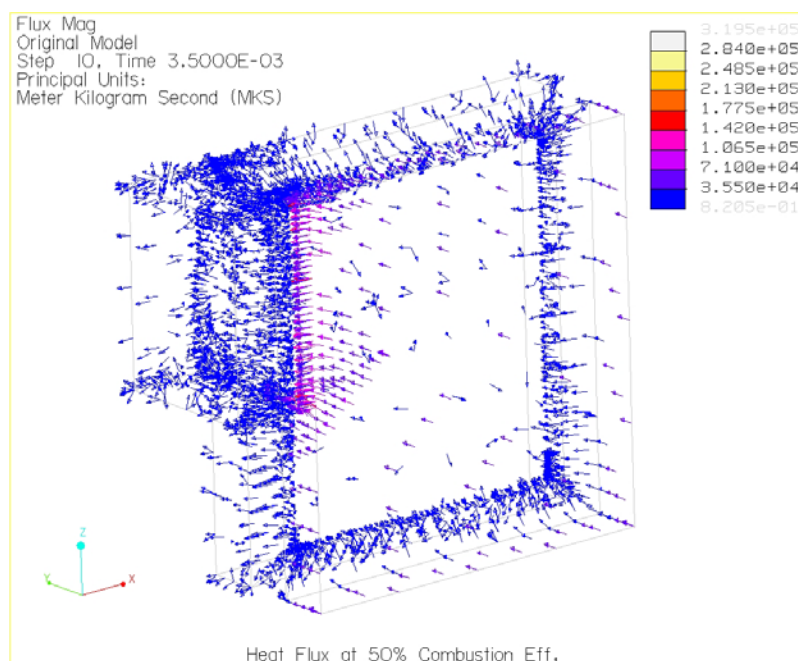
รูปที่ 3. 50 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$



รูปที่ 3. 51 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 50\%$  (ด้านหน้า)



รูปที่ 3. 52 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 50\%$  (ด้านบน)



รูปที่ 3. 53 ภาวะหลังไหลทางความร้อนบนแผ่นรับแรงที่  $\eta_c = 50\%$  (สามมิติ)

เมื่อทราบค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามช่วงเวลาที่กำหนด แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure เพื่อหาความเค้น (Thermal stress) และความเครียด (Thermal strain) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 3. 6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 50\%$

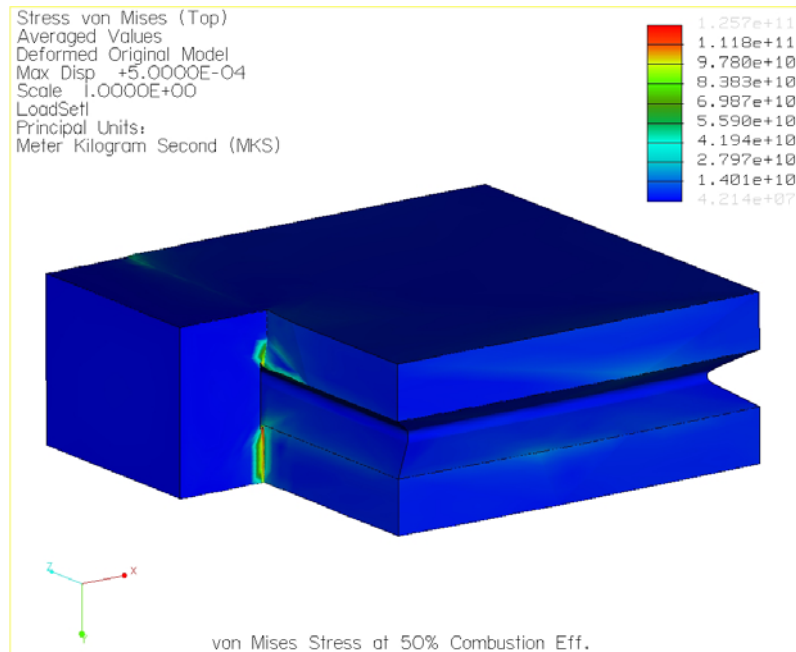
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$1.492798 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$8.617730 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.257299 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.080183 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.477895 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.240547 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$3.014379 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.786207 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$6.860102 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.200781 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$2.724494 \times 10^{03}$	

จากผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่า ความเค้นของ von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.257299 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

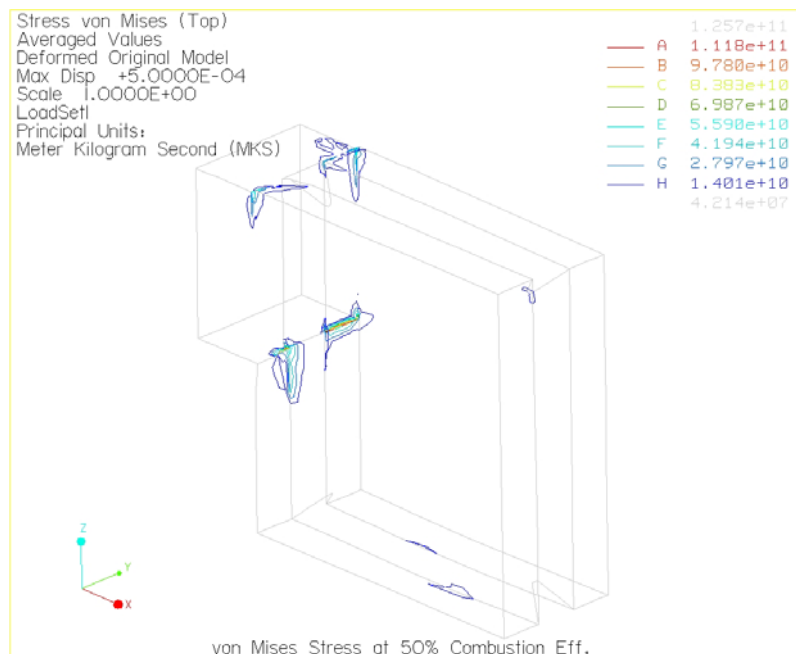
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 76.11 วินาที



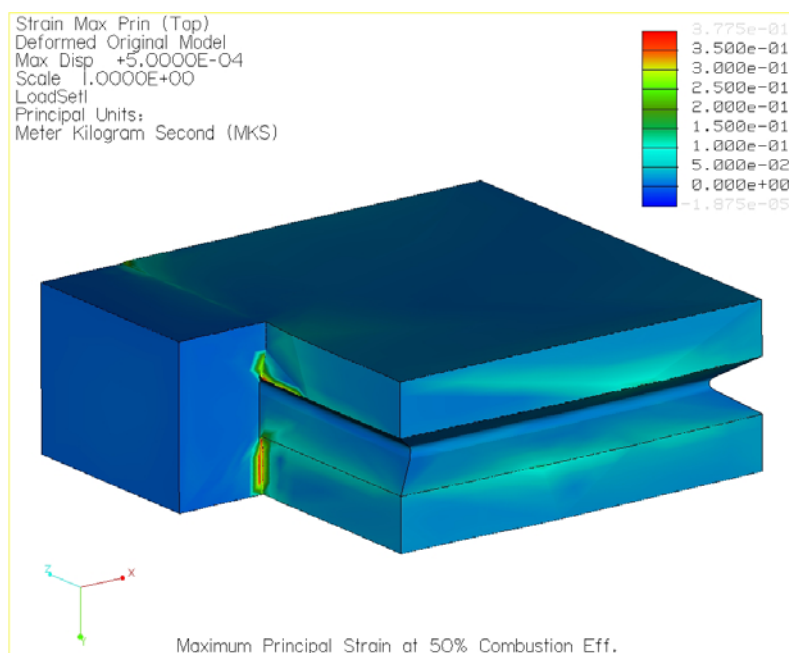
รูปที่ 3.54 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$



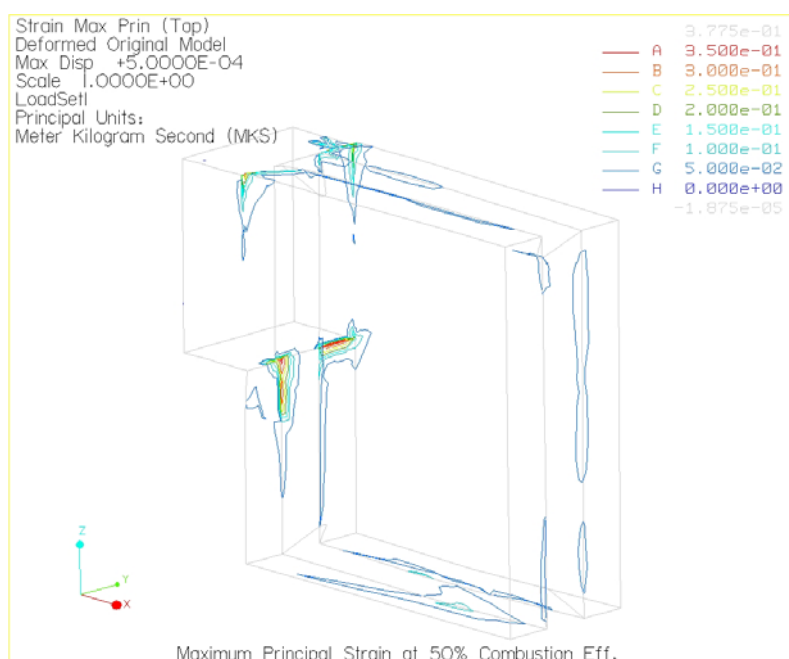
รูปที่ 3.55 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$



ความเครียดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

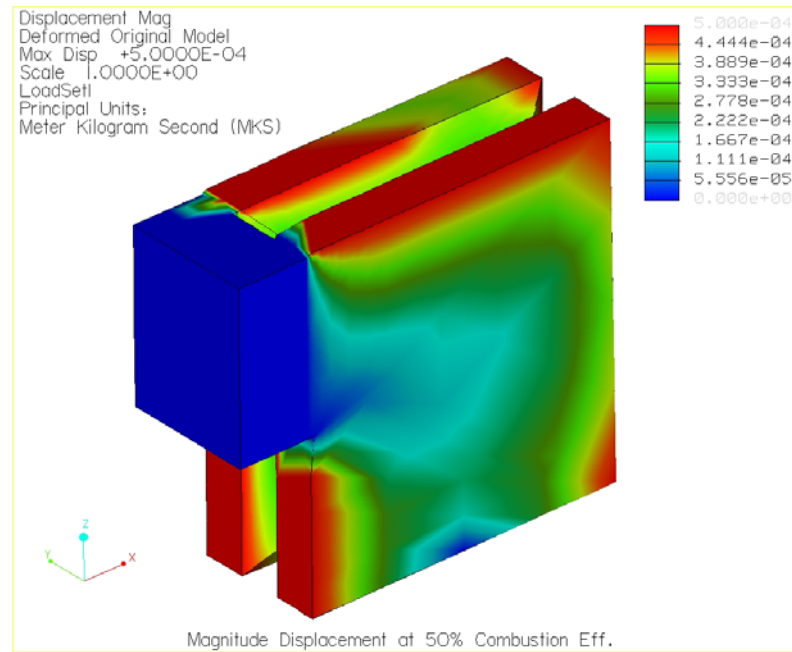


รูปที่ 3. 56 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$

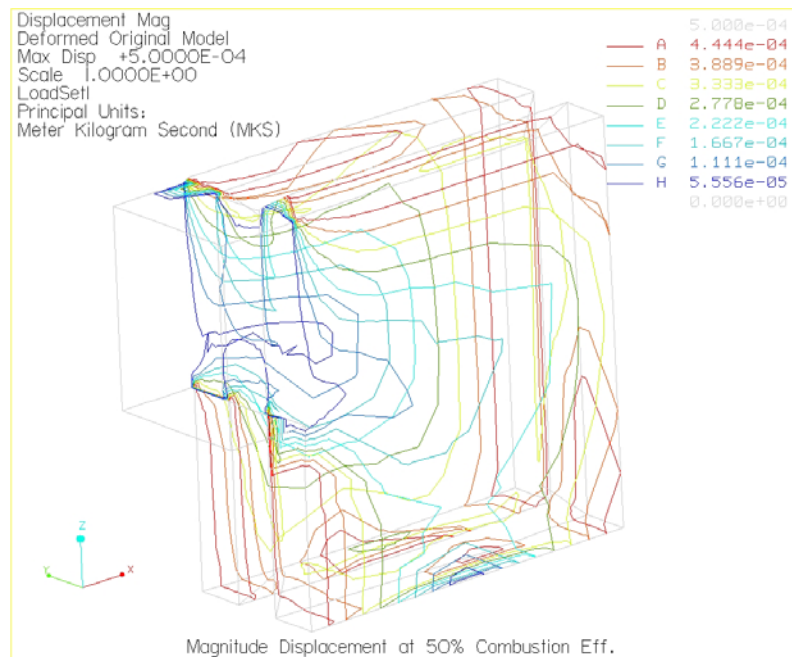


รูปที่ 3. 57 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.0000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3. 58 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$



รูปที่ 3. 59 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

### 3.4.3 ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงแบบภาระกรรมเป็นแรงดันและอุณหภูมิ

#### - กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%

ในการวิเคราะห์นี้จะมีภาระกรรมสองชนิดคือ แรงดันดันและอุณหภูมิ ซึ่งวิธีการกำหนดเงื่อนไขข้อบังคับและภาระกรรมจะเหมือนในหัวข้อที่ 3.4.1 และ 3.4.2 แต่กำหนดแรงดันและอุณหภูมิในคราวเดียวกัน ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3. 7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 100\%$

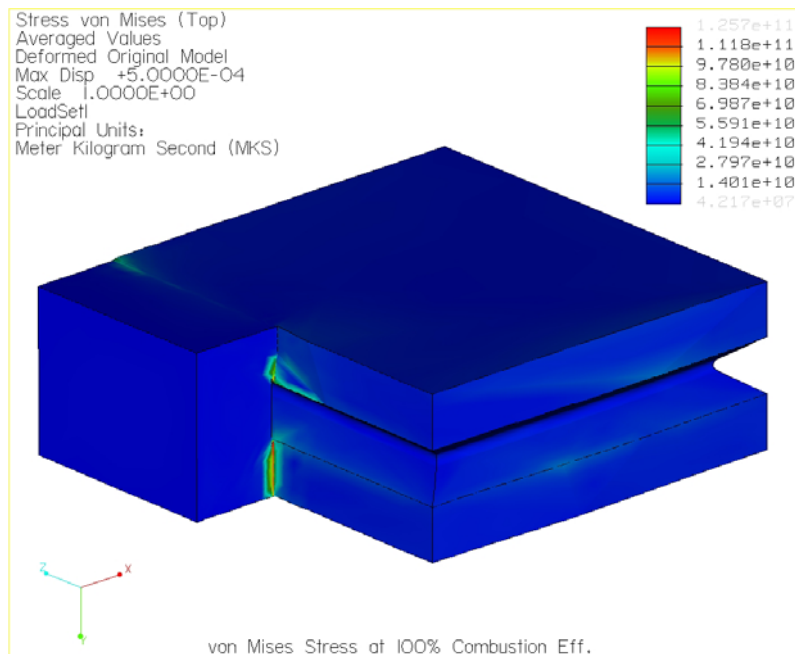
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$1.507528 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$8.607440 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.257354 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.080011 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.480337 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.240955 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$3.012124 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.786784 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$6.859402 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.200553 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$2.718835 \times 10^{03}$	

จากผลลัพธ์ที่ได้ จะพบว่า ความเค้นของ Von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.257354 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

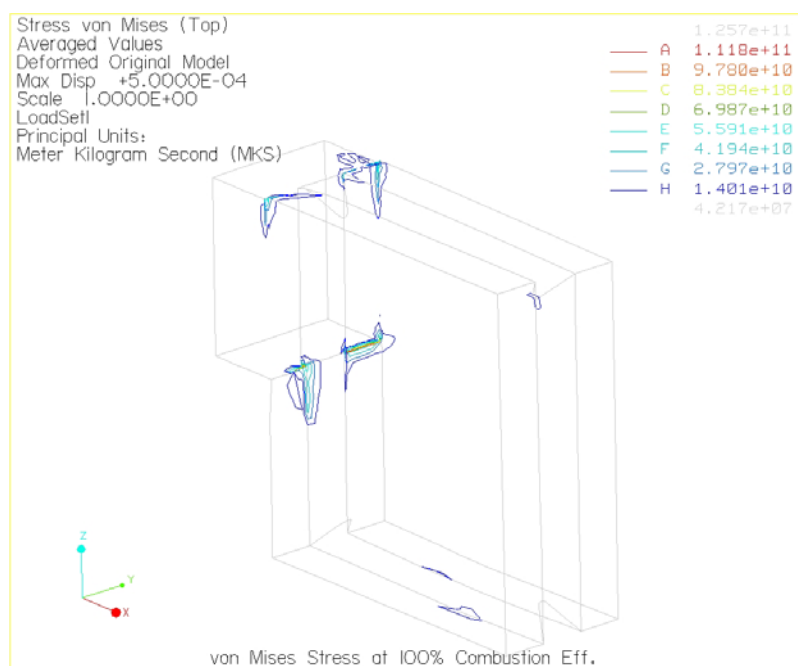
จำนวนอีลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อีลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 76.99 วินาที

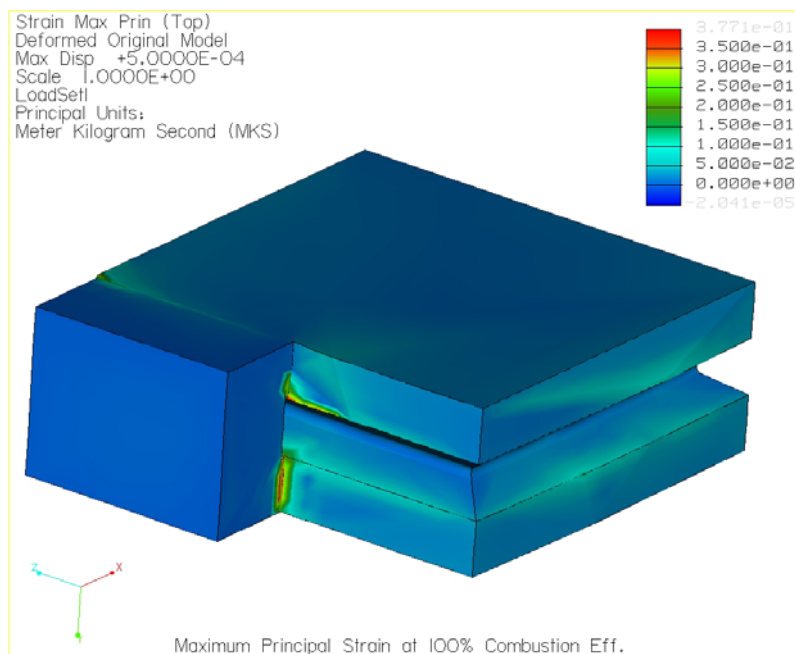


รูปที่ 3. 60 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$

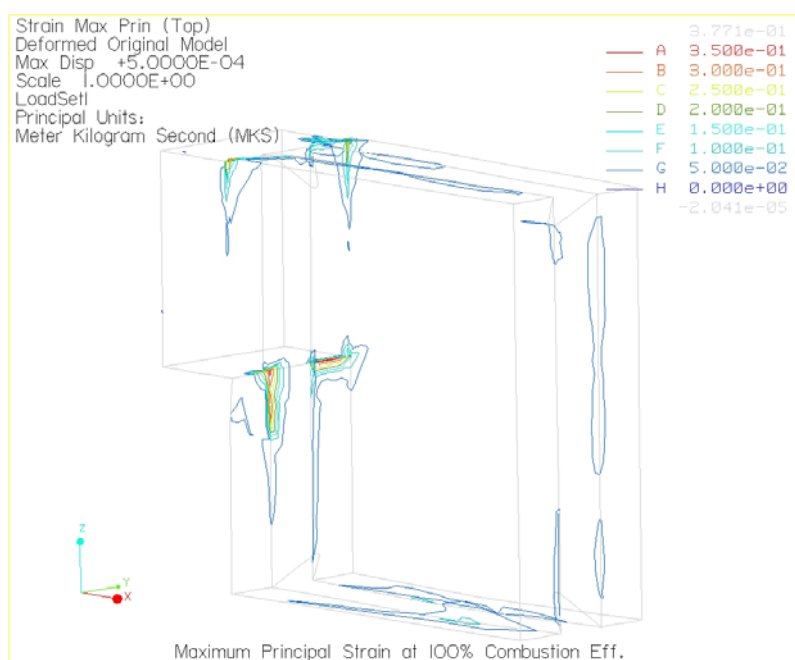


รูปที่ 3. 61 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

ความเค้นหลักสูงสุดของแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

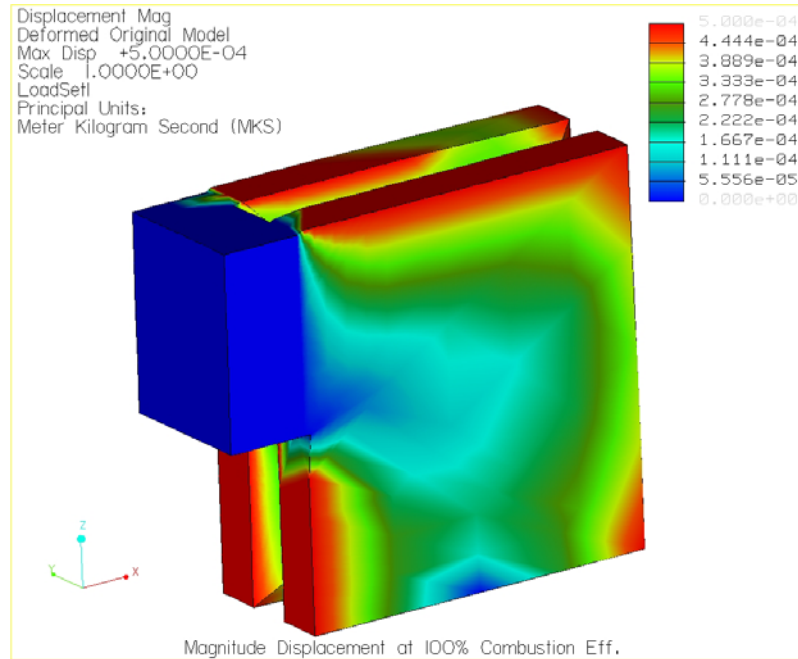


รูปที่ 3. 62 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$

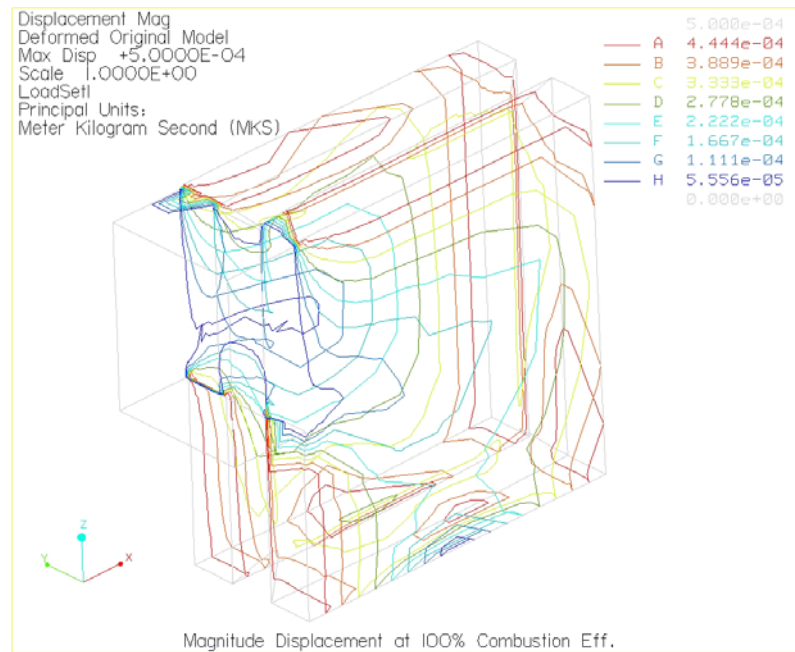


รูปที่ 3. 63 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.0000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3. 64 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 100\%$



รูปที่ 3. 65 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 100\%$

- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70%

กำหนดเงื่อนไขข้อบังคับและภาระกรรมเนื่องจากความดันและอุณหภูมิ เช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3. 8 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 70\%$

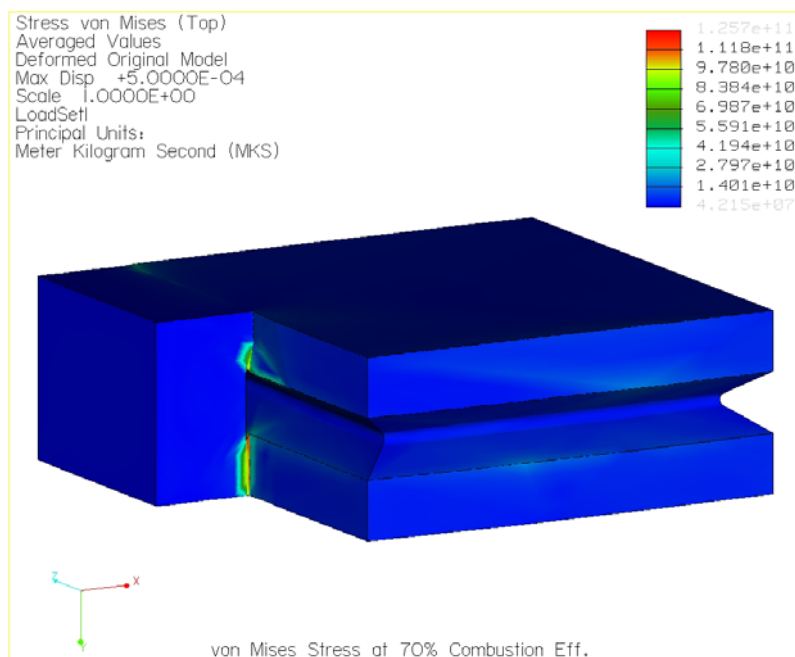
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$1.506245 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$8.611163 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.257337 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.080064 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.479609 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.240838 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$3.013861 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.786600 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$9.536066 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.200623 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$2.722228 \times 10^3$	

จากผลลัพธ์ที่ได้ จะพบว่า ความเค้นของ Von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.212812 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

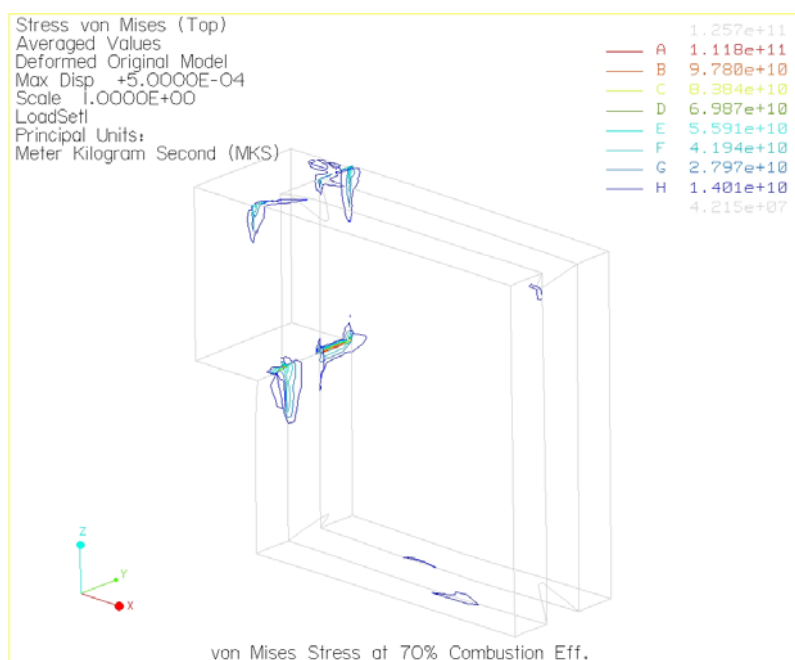
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 76.87 วินาที



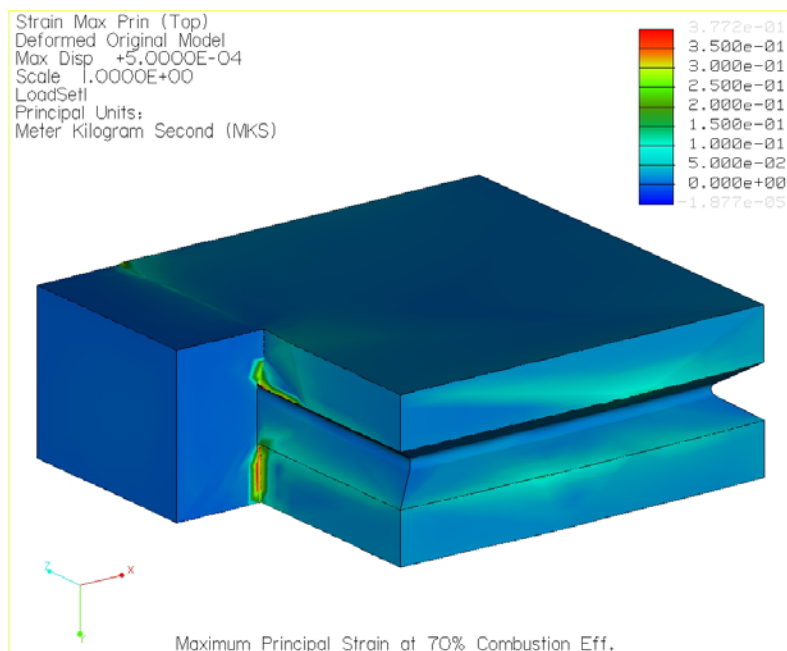
รูปที่ 3. 66 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$



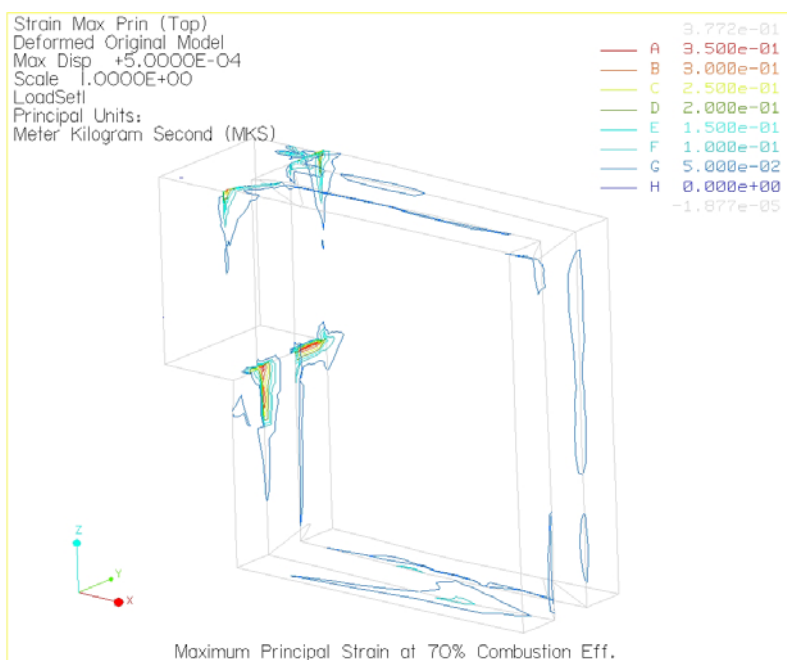
รูปที่ 3. 67 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$



ความความเครียดหลักสูงสุดของแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

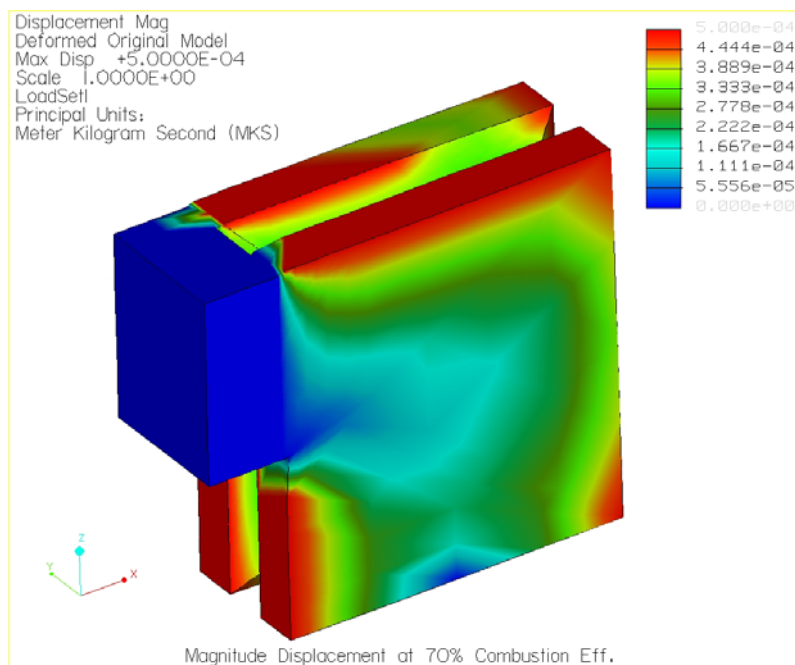


รูปที่ 3. 68 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$

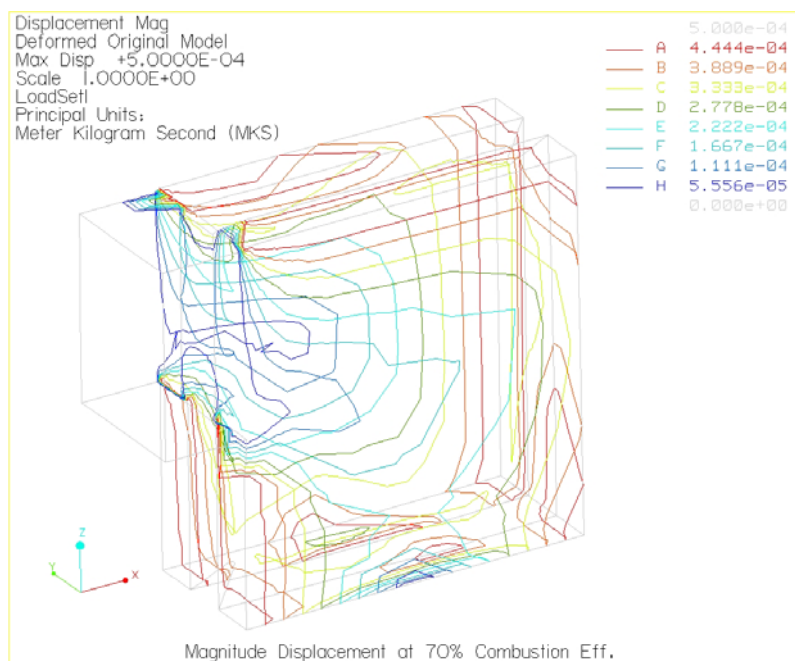


รูปที่ 3. 69 แสดงการกระจายตัวของความเครียดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.0000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3. 70 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 70\%$



รูปที่ 3. 71 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 70\%$

- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50%

กำหนดเงื่อนไขข้อบังคับและภาระกรรมเนื่องจากความดันและอุณหภูมิ เช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA ที่  $\eta_c = 50\%$

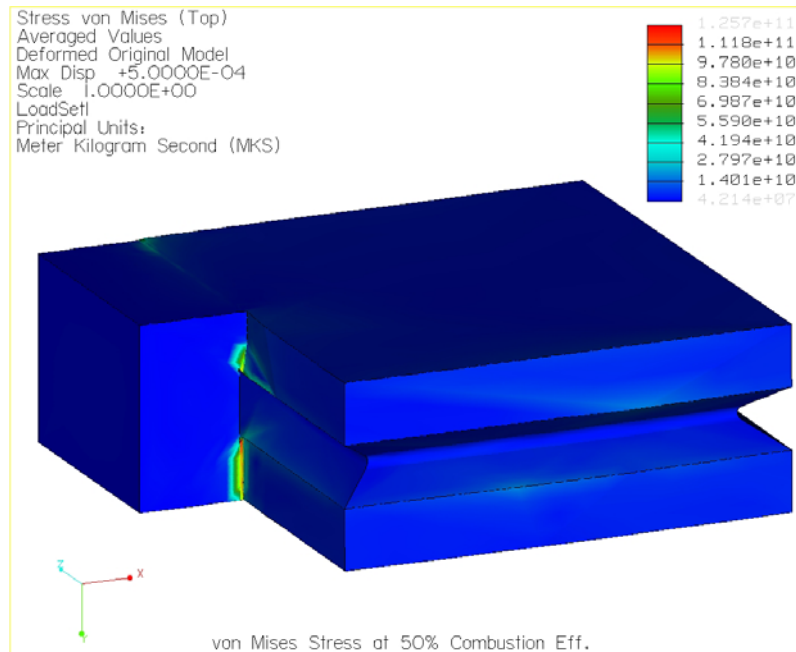
ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$1.505390 \times 10^{-04}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$5.000000 \times 10^{-04}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$8.613646 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.219395 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$-1.080100 \times 10^{11}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$2.479123 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$-5.240760 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$3.015019 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$-1.786478 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$6.859771 \times 10^{10}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-1.200670 \times 10^{11}$	Pa
Strain energy	$2.724503 \times 10^4$	

จากผลลัพธ์ที่ได้ จะพบว่า ความเค้นของ Von Mises ซึ่งค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.219395 \times 10^{11}$  Pa และการกระจายตัวของความเค้นบนแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

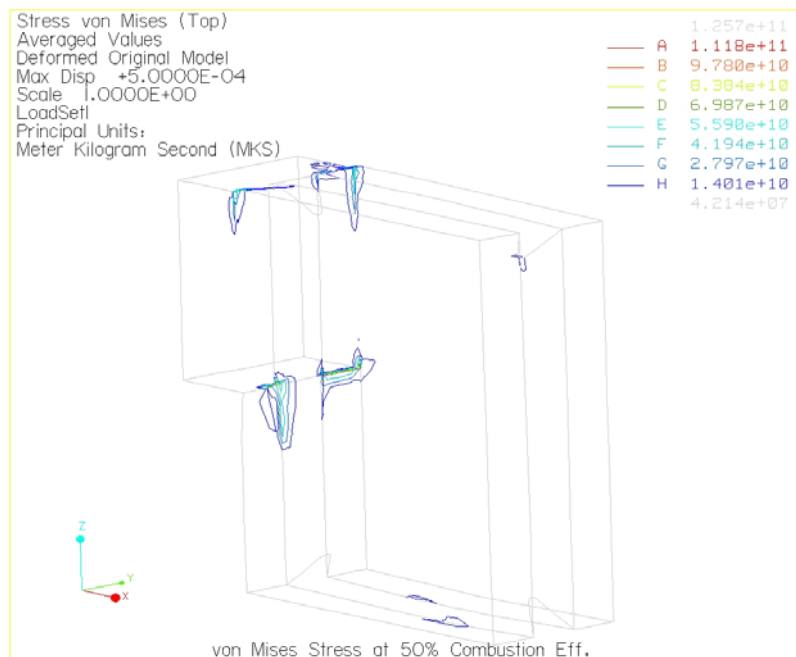
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 509 อิลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 8

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 76.82 วินาที

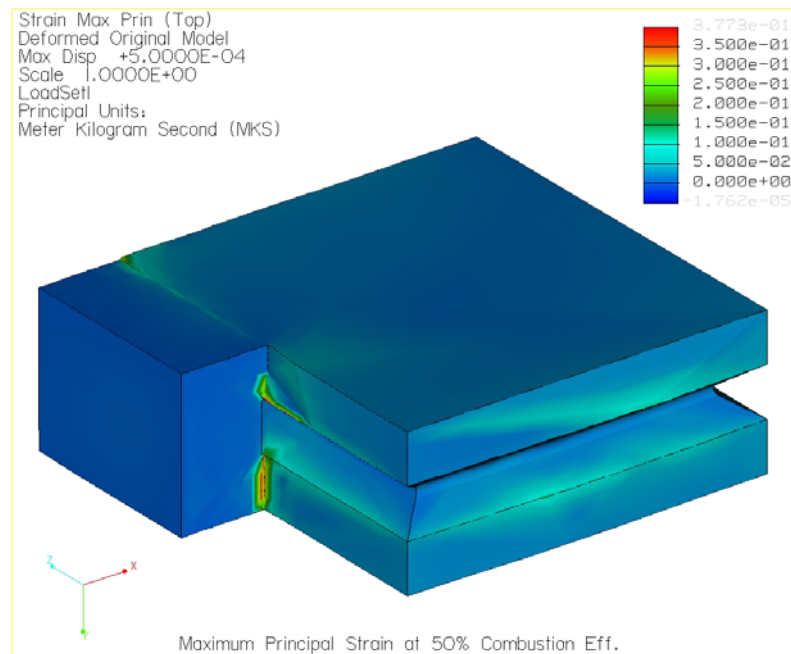


รูปที่ 3. 72 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$

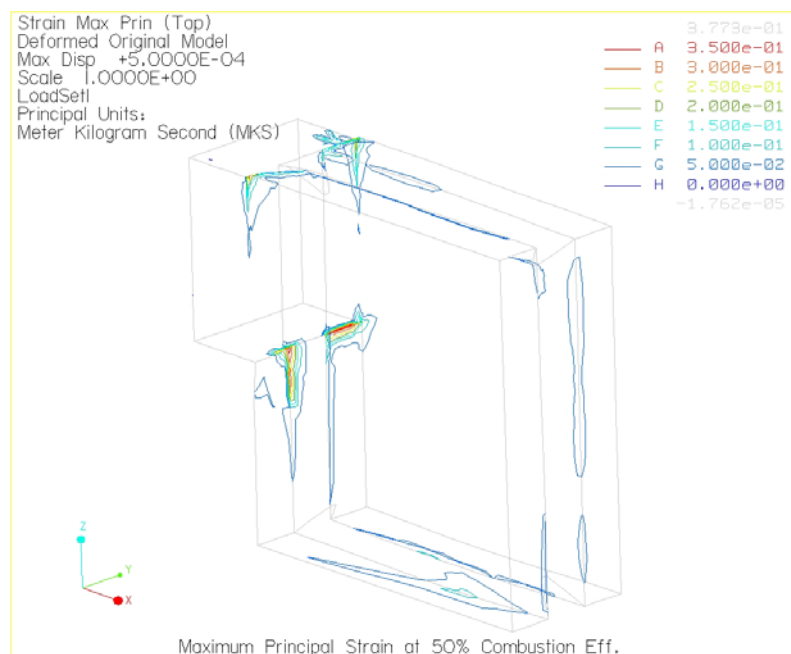


รูปที่ 3. 73 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

ความเค้นหลักสูงสุดของแบบจำลองสามมิติ แบบ Fringe plot และ Contour plot แสดงดังรูปต่อไปนี้

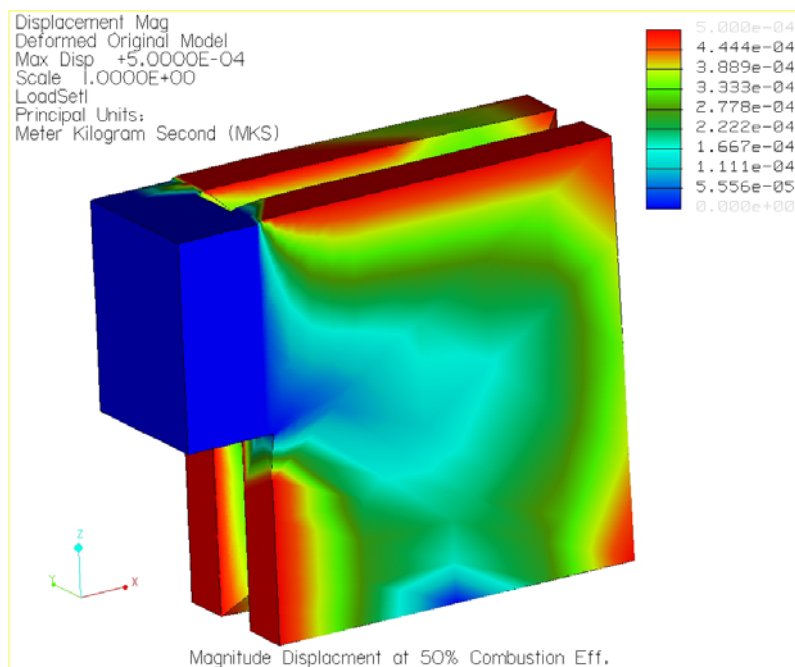


รูปที่ 3. 74 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$

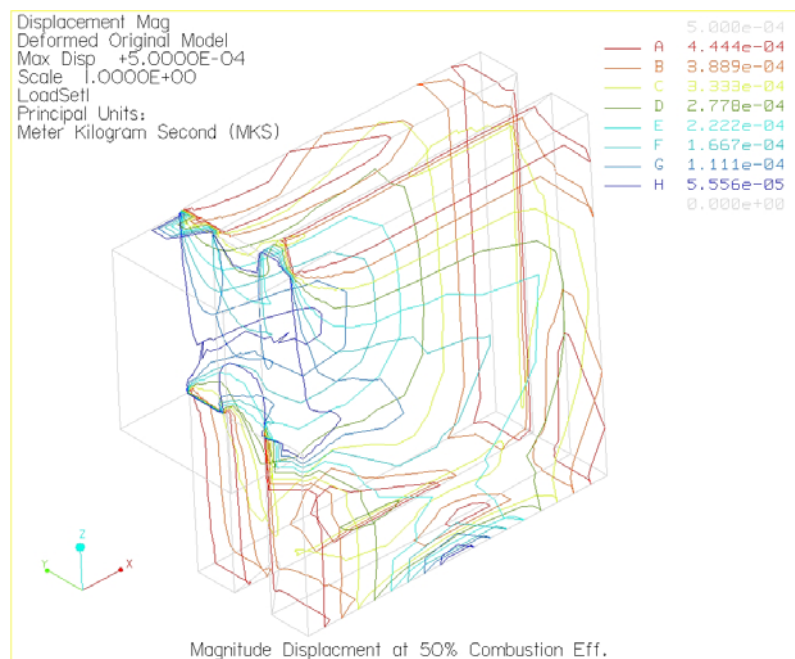


รูปที่ 3. 75 แสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

การขจัดบนแบบจำลองสามมิติ มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.0000 \times 10^{-4}$  m แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.76 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Fringe plot ที่  $\eta_c = 50\%$



รูปที่ 3.77 แสดงการกระจายตัวของการขจัดบนแผ่นรับแรงแบบ Contour plot ที่  $\eta_c = 50\%$

### 3.5 วิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรง

จากฟังก์ชันการครากของบรรทัดฐานการครากของมิต<sup>4</sup>

$$f = \sigma_e^2 - Y^2$$

โดย  $\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$  หรือ ความเค้นของมิต

ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA Structure จะได้ค่าความเค้นของมิต และจากฟังก์ชันการครากในสมการข้างบนนี้ กำหนดไว้ว่าวัสดุจะเกิดการครากเมื่อ  $f = 0$  นั่นคือ

$$\sigma_e^2 = Y^2$$

หรือ

$$\sigma_e = Y$$

เมื่อ  $Y$  คือค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Yield Strength) สำหรับแผ่นรับแรงใช้เหล็ก Tool steel คือ SKD11 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 700 MPa ซึ่งหมายความว่าวัสดุจะเกิดการครากเมื่อความเค้นของมิตมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ

จากข้อมูลข้างต้น สำหรับการวิเคราะห์ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนนั้น จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงเมื่อภาระกรรมเป็นแรงดัน

จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 เป็นการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรงที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% จะพบว่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $1.251862 \times 10^{11}$  Pa หรือ 125.1862 GPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุ (SKD11) ที่มีค่าเท่ากับ 700 MPa อยู่ 178.84 เท่า โดยความเค้นสูงสุดนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีการลดหน้าตัดเป็นบริเวณเล็กๆ ใกล้ร่องสามเหลี่ยมของแผ่นรับแรง และบริเวณด้านบนจากรูปที่ 3.9 นั้นเกิดความเค้นขึ้นเช่นเดียวกัน มีค่าอยู่ประมาณ  $1.395 \times 10^{10}$  Pa ถึง  $8.347 \times 10^{10}$  Pa ซึ่งสูงกว่า Yield Strength ของวัสดุ 19.93 ถึง 119.2 เท่า โดยที่ในบริเวณอื่นๆ ของแผ่นรับแรงแทบไม่มีความเค้นเกิดขึ้นเลย เหตุที่เกิดความเค้นสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุเป็นร้อยเท่า นั้น เนื่องจากว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดนี้เป็นบริเวณเล็กๆ ที่เป็นบริเวณวิกฤติของชิ้นงาน และพฤติกรรมของความเค้นนั้นเมื่อเกิดค่าสูงสุดที่บริเวณวิกฤติแล้ว ความเค้นที่บริเวณอื่นๆ หรือที่อิทธิพลอื่นๆ จะทำการถ่ายเทให้กับอิทธิพลที่วิกฤตินั้น ทำให้เกิดความเค้นเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเค้นที่อิทธิพลรอบๆ แทบจะเป็นศูนย์หรือไม่มีเลย

<sup>4</sup> ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก

สำหรับในกรณีที่ 2 และ 3 คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70% และ 50% ตามลำดับนั้น ผลของความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับกรณีที่ 2 อยู่ในรูปที่ 3.14 และ 3.15 และกรณีที่ 3 อยู่ในรูปที่ 3.20 และ 3.21 นั้น จะพบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดและลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นนั้น เป็นเช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 และขนาดของความเค้นก็แตกต่างกันน้อยมากทั้งสามกรณี ซึ่งต่างกัน 0.001% โดยประมาณ โดยที่เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ความเค้นจะเพิ่มขึ้น

ส่วนสาเหตุที่ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันน้อยมากทั้งสามกรณี เนื่องจากวัสดุอยู่ในช่วงที่เลยจุดคราก (Yield point) มาแล้ว ซึ่งวัสดุไม่สามารถที่จะรับความเค้นได้มากไปกว่านี้แน่นอน

สำหรับความเครียดที่เกิดขึ้นบนแผ่นรับแรงในกรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 นั้นบริเวณที่เกิดความเครียดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4176 นั้น เป็นบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด คือที่บริเวณลดหน้าตัด ไกลร่องสามเหลี่ยมของแผ่นรับแรง และบริเวณด้านบน ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างพื้นผิวที่สามารถขยายตัวได้กับพื้นผิวที่ไม่สามารถขยายตัวได้ และเกิดความเครียดขึ้นบริเวณโดยรอบแผ่นรับแรง สำหรับกรณีที่ 2 มีค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ 0.4178e และในกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.4179

ในกรณีของความเครียดที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ก็สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับความเค้น และเนื่องจากค่าของความเครียดมีความสัมพันธ์กับค่าของความเค้นนั่นเอง

ส่วนการขจัดของแผ่นรับแรงมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.0000 \times 10^{-4}$  m ทั้งสามกรณี ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับบริเวณผิวโดยรอบแผ่นรับแรง และจะพบว่าบริเวณรอบแผ่นรับแรงเกิดการขจัดขึ้นมากที่สุด

### 3.5.2 การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงเมื่อภาวะกรรมเป็นอุณหภูมิ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แผ่นรับแรงเพื่อหาภาวะกรรมทางอุณหภูมิด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA Thermal โดยทำการวิเคราะห์แบบ Transient analysis นั้น ผลที่ได้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ (Temperature gradient) ในกรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100% ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3.26 และ 3.27 กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70% แสดงในรูปที่ 3.37 และ 3.38 และกรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50% แสดงในรูปที่ 3.48 และ 3.49 สำหรับสภาวะการหลังไหลทางความร้อน (Heat flux) กรณีที่ 1 แสดงในรูปที่ 3.28 ถึง 3.30 กรณีที่ 2 แสดงอยู่ในรูปที่ 3.39 ถึง 3.41 และกรณีที่ 3 แสดงอยู่ในรูปที่ 3.50 ถึง 3.52



และเมื่อนำผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง เพื่อหาความเค้นและความเครียดบนแผ่นรับแรง ซึ่งผลที่ได้คือ การกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% จะพบว่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $1.257307 \times 10^{11}$  Pa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า Yield Strength ที่มีค่าเท่ากับ 700 MPa อยู่ 179.615 เท่า โดยบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด คือ ส่วนที่มีการลดหน้าตัดเป็นบริเวณเล็กๆ ไกลร่องสามเหลี่ยมของแผ่นรับแรงและบริเวณด้านบนจากรูปที่ 3.32 ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกันกับการวิเคราะห์ที่มีภาระกรรมเป็นความดันอย่างเดียว ส่วนความเค้นด้านบนและรอบๆแผ่นรับแรงมีค่าอยู่ประมาณ  $1.401 \times 10^{10}$  Pa ถึง  $8.383 \times 10^{10}$  Pa ซึ่งสูงกว่า Yield Strength ของวัสดุ 20 ถึง 119.75 เท่า

สำหรับความเครียดที่เกิดขึ้นบนแผ่นรับแรงดังแสดงในรูปที่ 3.33 และ 3.34 นั้น บริเวณที่เกิดความเครียดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ  $3.774 \times 10^{-1}$  นั้น เป็นบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด คือที่บริเวณลดหน้าตัด ไกลร่องสามเหลี่ยมของแผ่นรับแรง และบริเวณด้านบน ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างพื้นผิวที่สามารถขยายตัวได้กับพื้นผิวที่ไม่สามารถขยายตัวได้ และเกิดความเครียดขึ้นบริเวณ โดยรอบแผ่นรับแรง

ส่วนการขจัดของแผ่นรับแรงมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.000 \times 10^{-4}$  m ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับบริเวณผิวโดยรอบแผ่นรับแรง และจะพบว่าบริเวณรอบแผ่นรับแรงเกิดการขจัดขึ้นมากที่สุด

ในกรณีที่ 2 และ 3 คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70% และ 50 % ตามลำดับนั้น ผลของความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์อยู่ในรูปที่ 3.42 และ 3.43 สำหรับกรณีที่ 2 และรูปที่ 3.53 และ 3.54 นั้น จะพบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดและลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นนั้น เป็นเช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 โดยที่เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ความเค้นจะลดลง ซึ่งมีค่าความแตกต่างของความเค้นประมาณ 0.001%

### 3.5.3 การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรงเมื่อภาระกรรมเป็นแรงดันและอุณหภูมิ

ในกรณีที่ภาระกรรมของแผ่นรับแรงเป็นทั้งแรงดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนั้น การกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรง สำหรับที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% จะพบว่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $1.257354 \times 10^{11}$  Pa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า Yield Strength ที่มีค่าเท่ากับ 700 MPa อยู่ 179.6 เท่า โดยบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด คือ ส่วนที่มีการลดหน้าตัดเป็นบริเวณเล็กๆ ไกลร่องสามเหลี่ยมของแผ่นรับแรงและบริเวณด้านบนจากรูปที่ 3.60 ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกันกับการวิเคราะห์ที่มีภาระกรรมเป็นความดันอย่างเดียว ส่วน

ความเค้นด้านบนและรอบๆแผ่นรับแรงมีค่าอยู่ประมาณ  $1.401 \times 10^{10}$  Pa ถึง  $8.384 \times 10^{10}$  Pa ซึ่งสูงกว่า Yield Strength ของวัสดุ 20 ถึง 119.7 เท่า

สำหรับความเครียดที่เกิดขึ้นบนแผ่นรับแรงดังแสดงในรูปที่ 3.65 และ 3.66 นั้น บริเวณที่เกิดความเครียดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ  $3.771 \times 10^{-1}$  นั้น เป็นบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด คือที่บริเวณลดหน้าตัดใกล้ร่องสามเหลี่ยมของแผ่นรับแรง และบริเวณด้านบน ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างพื้นผิวที่สามารถขยายตัวได้กับพื้นผิวที่ไม่สามารถขยายตัวได้ และเกิดความเครียดขึ้นบริเวณโดยรอบแผ่นรับแรง

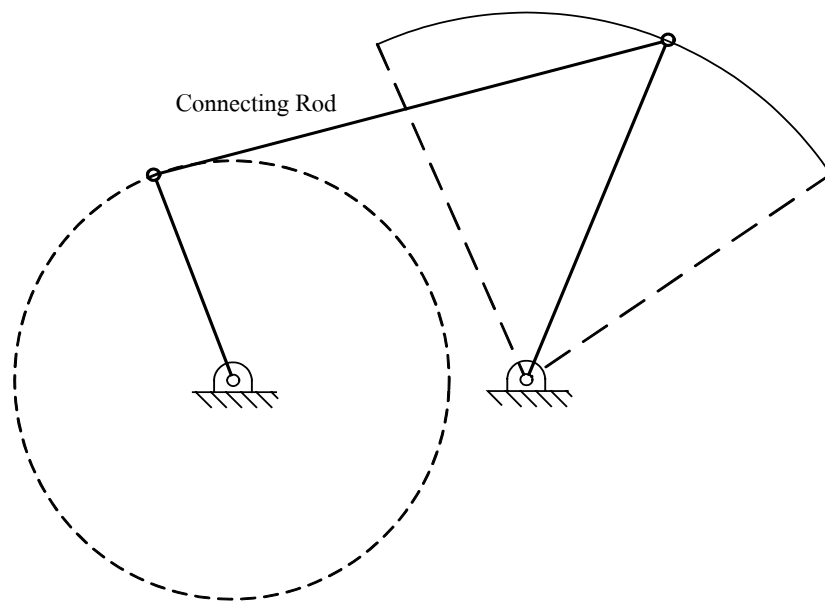
ส่วนการขจัดของแผ่นรับแรงมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $5.000 \times 10^{-4}$  m ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่ทำให้การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับบริเวณผิวโดยรอบแผ่นรับแรง และจะพบว่าบริเวณรอบแผ่นรับแรงเกิดการขจัดขึ้นมากที่สุด

ในกรณีที่ 2 และ 3 คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70% และ 50 % ตามลำดับนั้น ผลของความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์อยู่ในรูปที่ 3.65 และ 3.66 สำหรับกรณีที่ 2 และรูปที่ 3.71 และ 3.72 สำหรับกรณีที่ 3 นั้น จะพบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดและลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นนั้น เป็นเช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 โดยที่เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงความเค้นจะลดลง ซึ่งมีค่าความแตกต่างของความเค้นประมาณ 0.001%

## บทที่ 4

### การออกแบบและวิเคราะห์แขนส่งกำลัง

แขนส่งกำลัง หรือ Connecting Rod เป็นชุดกลไกที่ใช้สำหรับส่งกำลังจากกลไกในห้องเผาไหม้ไปสู่ชุดเพืองทด โดยที่แขนส่งกำลังจะรับภาระกรรมตามแนวแกนเป็นหลัก ซึ่งภาระกรรมจะกระทำที่ปลายทั้งสองของแขนส่งกำลัง จะมีทั้งแรงในแนวแกนและแรงในแนวตั้งฉาก ซึ่งแรงในแนวแกนจะเป็นแรงดึง (Tension) และแรงอัด (Compression) สลับกันไป ส่วนแรงในแนวตั้งฉากจะทำให้เกิด โมเมนต์ดัด (Bending Moment) สำหรับลักษณะการเคลื่อนที่ของชุดกลไกแขนส่งกำลังสามารถจำลองให้มีการเคลื่อนที่ แบบ Crank and Rocker โดยแขนส่งกำลังที่กำลังพิจารณานี้ ทำหน้าที่ส่งกำลังจากตัวขับ (Driver) ไปสู่ชุดกลไกอีกตัวหนึ่งในเครื่องยนต์



รูปที่ 4.1 โคออร์ดิเนตของชุดการกลไกแบบการเคลื่อนที่ของแขนส่งกำลัง

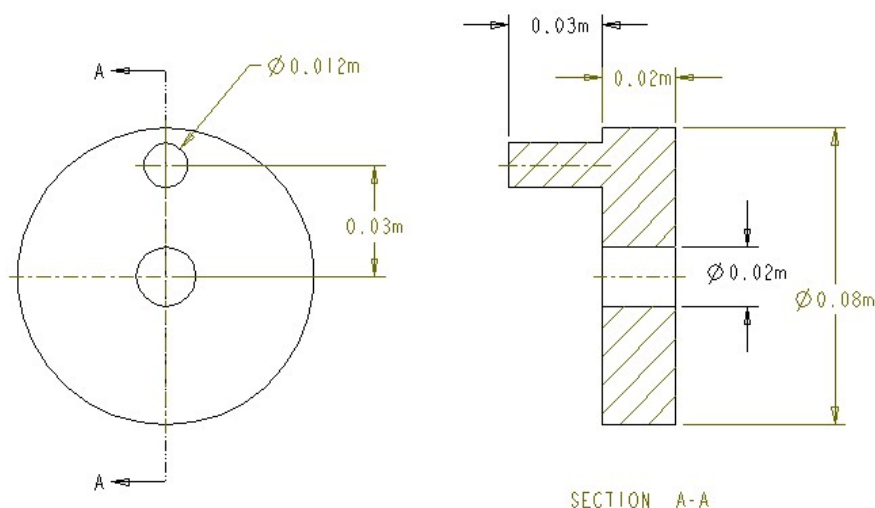
#### 4.1 โครงสร้างและขนาดเบื้องต้นของแขนส่งกำลัง

ในการวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองของชุดกลไกของแขนส่งกำลัง โดยใช้โปรแกรม Pro/ENGINEER จากนั้นจะทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไกและหาแรงกระทำ รวมถึงวิเคราะห์แขนส่งกำลังนี้ด้วย โปรแกรม Pro/MECHANICA

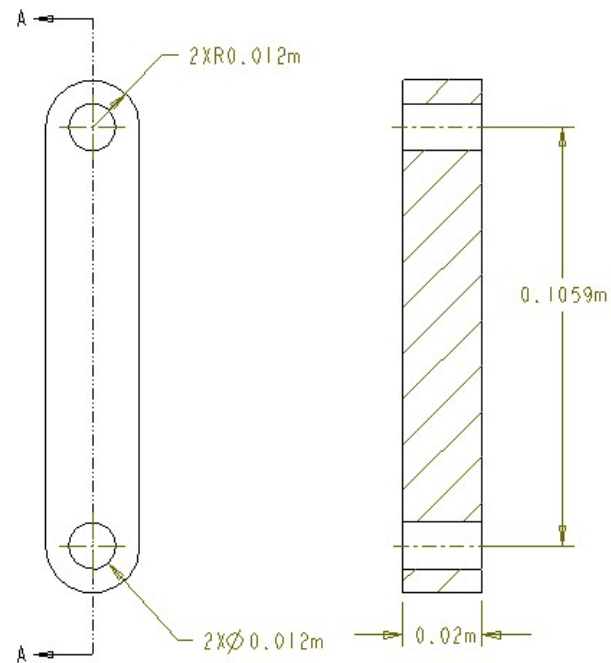
ในขั้นแรกสำหรับการพิจารณาชุดกลไกแขนส่งกำลัง จะทำการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ขึ้นมาตามขนาดที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาไว้ก่อน จากนั้น จะนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบกันเป็นชุดกลไก ในส่วนการหาแรงกระทำทั้งแรงจากภายนอกและแรงอันเนื่องมาจากความเฉื่อยของชิ้นส่วนต่างๆ จะใช้ โปรแกรม Pro/MECHANICA Motion เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่และหาแรงดังกล่าวเหล่านั้น และหลังจากที่ทราบทั้งขนาดและทิศทางของแรงกระทำที่สูงที่สุดแล้ว ก็จะนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในแขนส่งกำลังด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA Structure

จากการสังเคราะห์ที่ได้กระทำมาก่อนหน้านี้แล้วนั้น จะได้ขนาดและรูปลักษณะของชุดประกอบในกลไก ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4

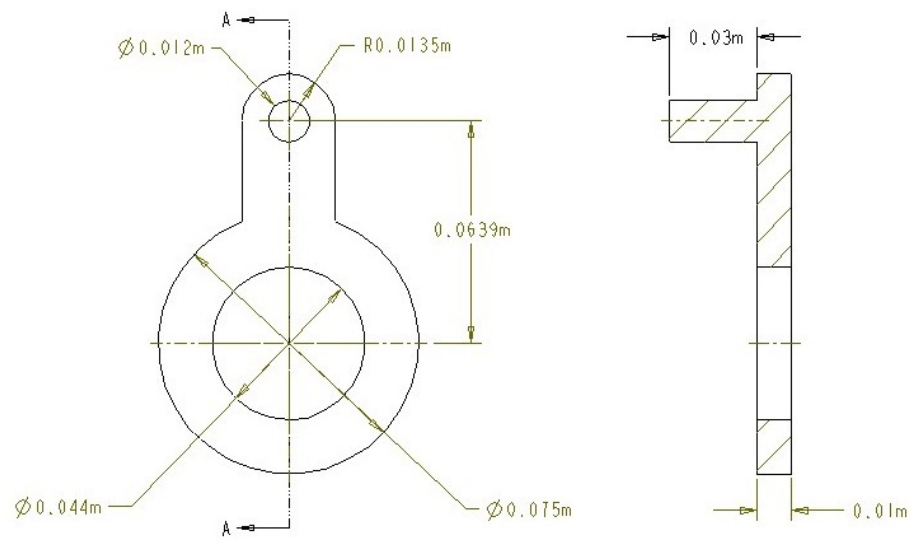
รูปที่ 4.5 แสดงภาพประกอบของชุดกลไกแขนส่งกำลังที่ทำการประกอบโดยโปรแกรม Pro/ENGINEER โดยที่จุดต่อของกลไกชิ้นที่ 2 กับพื้นหรือ Ground link กำหนดให้เป็นจุดต่อแบบ Bearing ส่วนจุดต่ออื่นๆ เป็นแบบสลักยึดหรือ Pin Joint สำหรับการสร้างการเคลื่อนที่ให้กับกลไกเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม Pro/MECHANICA Motion นั้น จะทำการใส่ตัวขับหรือ Driver ให้กับกลไกชิ้นที่ 2 เนื่องจากในการออกแบบกำหนดให้กลไกชิ้นที่ 2 ทำหน้าที่เป็นข้อเหวี่ยง ซึ่งการเคลื่อนที่จะเป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมหมุนไปทิศทางเดียว และหมุนได้ครบรอบ 360 องศา รอบจุดหมุน



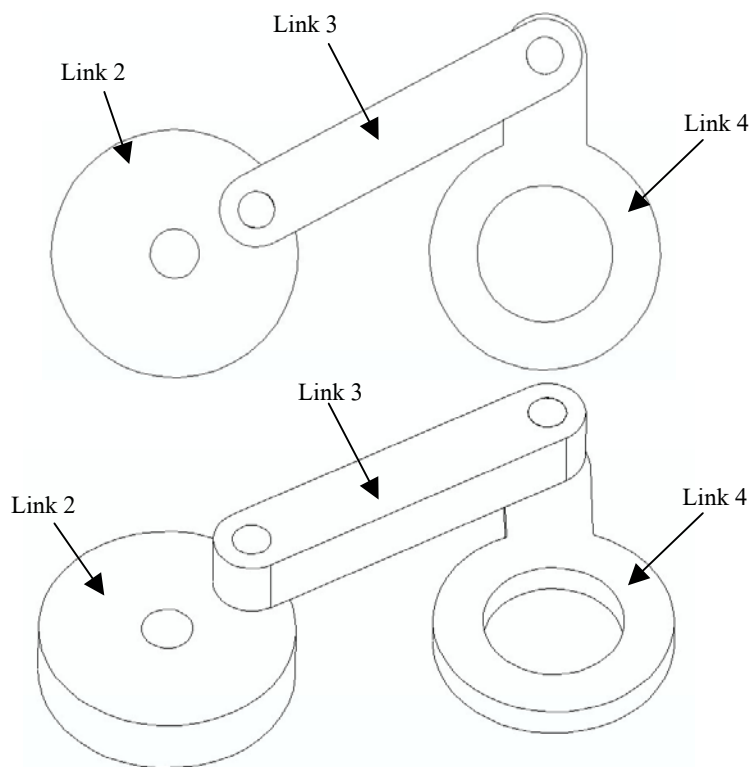
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของชิ้นส่วนกลไก ชิ้นที่ 2 หรือข้อเหวี่ยง (Crank)



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะชิ้นส่วนกลไก ชั้นที่ 3 หรือแกนส่งกำลัง (Connecting rod)



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะชิ้นส่วนกลไก ชั้นที่ 4 หรือ Rocker



รูปที่ 4.5 แสดงภาพประกอบของชุดกลไกแขนส่งกำลัง

สำหรับการวิเคราะห์แขนส่งกำลังนี้ จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Motion เพื่อหาแรงกระทำบนแขนส่งกำลัง และส่วนที่วิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure เพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดบนแขนส่งกำลัง โดยแต่ละส่วนจะแยกเป็น 3 กรณี เช่นเดียวกับในการวิเคราะห์แผ่นรับแรง คือ ที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% 70% และ 50%

#### 4.2 ข้อกำหนดในการออกแบบแขนส่งกำลัง

การเคลื่อนที่ของแขนส่งกำลังเป็นการเคลื่อนที่ในระนาบ (Planar motion) ภาระกรรมที่ได้รับมีเฉพาะแรงดึงและแรงอัดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกลไกเท่านั้น เนื่องจากจุดเชื่อมต่อ (Joint) เป็นแบบสลักยึดหรือ Pin joint

สำหรับภาระกรรมในลักษณะของโมเมนต์บิด จะไม่พิจารณาเนื่องจากการเกิดแรงในแนวตั้งฉากกับแกนของกลไกชิ้นที่ 2 อันเนื่องมาจากแรงเสียดทานนั้นมีค่าน้อยมาก และจะไม่พิจารณาในที่นี้

สำหรับความเร็วรอบของกลไกชั้นที่ 2 หรือข้อเหวี่ยงนั้น เนื่องจากเป็นกลไกส่งกำลังใน เครื่องยนต์และมีอัตราทดสองต่อหนึ่ง ดังนั้นหากเครื่องยนต์มีความเร็วรอบปกติที่ 2000 rpm แล้ว กลไกชั้นที่ 2 จะมีความเร็วรอบเท่ากับ 4000 rpm หรือ

$$\omega_2 = \frac{4000 \times 2\pi}{60} = \frac{400\pi}{3} = 418.879 \text{ rad/s}$$

#### 4.3 ภาระกรรมที่แขนส่งกำลังได้รับ

ก่อนที่จะพิจารณาหาความเค้นที่เกิดขึ้นภายในแขนส่งกำลัง จะต้องพิจารณาหาแรงกระทำ ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับแขนส่งกำลังเสียก่อน ดังนั้นในขั้นแรกจะเป็นการพิจารณาในด้านคินิเมติกส์ของ กลไกต่างๆ ในชุดกลไกส่งกำลังนี้

##### 4.3.1 การวิเคราะห์คินิเมติกส์ของกลไกแขนส่งกำลัง

###### - การวิเคราะห์ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงไดอะแกรมของกลไกแขนส่งกำลัง หมายเลข 2 คือ ข้อเหวี่ยง ซึ่งหมุนครบรอบ สำหรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของชิ้นอื่นๆ จะเปลี่ยนไปตามมุมของข้อ เหวี่ยง สำหรับขนาดของชิ้นต่างๆ ในไดอะแกรมชุดกลไกจะเป็นดังนี้

$$\bar{r}_1 = \overline{AD} = 120 \quad \text{mm}$$

$$\bar{r}_2 = \overline{AB} = 30 \quad \text{mm}$$

$$\bar{r}_3 = \overline{BC} = 105.9 \quad \text{mm}$$

$$\bar{r}_4 = \overline{CD} = 63.9 \quad \text{mm}$$

$$\dot{\theta}_2 = 418.879 \quad \text{rad/s}$$

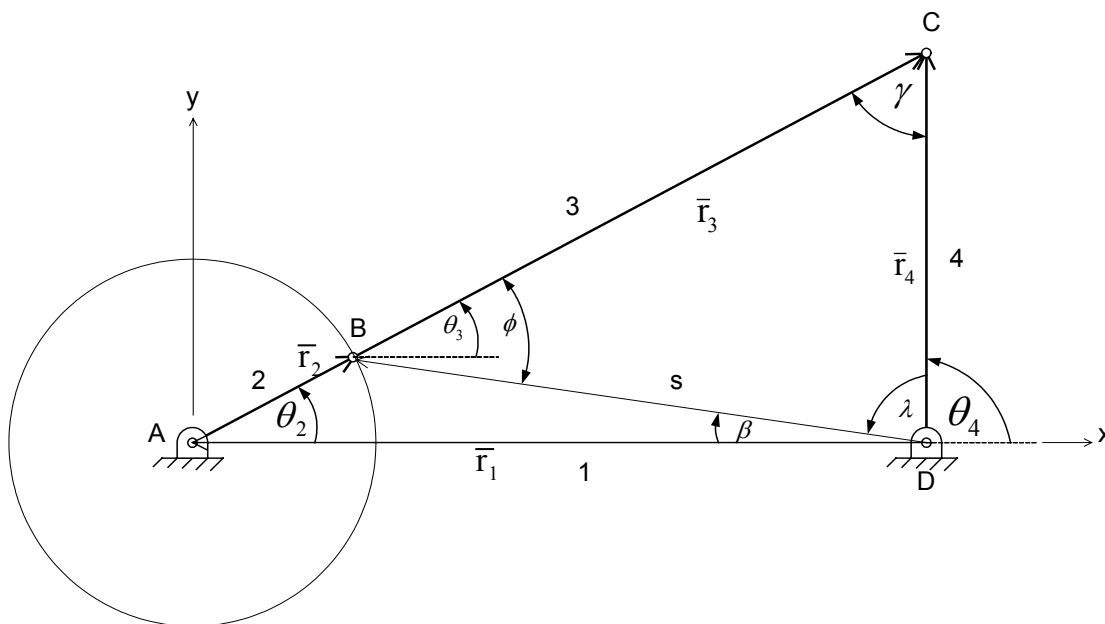
และในการวิเคราะห์เบื้องต้น จะทำให้ข้อเหวี่ยงหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ และกำหนดให้ เท่ากับ 418.879 rad/s ตำแหน่งมุมต่างๆ ของชุดกลไกเป็นไปตามรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 พิจารณา  $\Delta ABD$  จากกฎของโคไซน์ (Cosine law) จะได้

$$s = \left( \overline{AB}^2 + \overline{AD}^2 - 2 \cdot \overline{AB} \cdot \overline{AD} \cdot \cos(\theta_2) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

และ

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{AD}^2 - \overline{AB}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{AD}} \right) \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.6 แสดงไดอะแกรมของชุดกลไกสำหรับการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์

พิจารณา  $\Delta ABD$  จากกฎของโคซายน์ (Cosine law) จะได้

$$s = \left( \overline{AB}^2 + \overline{AD}^2 - 2 \cdot \overline{AB} \cdot \overline{AD} \cdot \cos(\theta_2) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

และ

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{AD}^2 - \overline{AB}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{AD}} \right) \quad (4.4)$$

พิจารณา  $\Delta BCD$  จากกฎของโคซายน์ (Cosine law) จะได้

$$\gamma = \cos^{-1} \left( \frac{\overline{BC}^2 + \overline{CD}^2 - s^2}{2 \cdot \overline{BC} \cdot \overline{CD}} \right) \quad (4.5)$$



$$\lambda = \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{CD}^2 - \overline{BC}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{CD}} \right) \quad (4.6)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{BC}^2 - \overline{CD}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{BC}} \right) \quad (4.7)$$

เนื่องจาก

$$\theta_3 = \phi - \beta \quad (4.8)$$

และ

$$\theta_4 = \pi - \lambda - \beta \quad (4.9)$$

แทนค่าตัวแปรลงใน (4.6) และ (4.7) ตามลำดับจะได้

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{BC}^2 - \overline{CD}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{BC}} \right) - \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{AD}^2 - \overline{AB}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{AD}} \right) \quad (4.10)$$

และ

$$\theta_4 = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{CD}^2 - \overline{BC}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{CD}} \right) - \cos^{-1} \left( \frac{s^2 + \overline{AD}^2 - \overline{AB}^2}{2 \cdot s \cdot \overline{AD}} \right) \quad (4.11)$$

ซึ่งสมการที่ (4.8) และ (4.9) จะเป็นสมการที่ใช้กำหนดตำแหน่งของกลไกชิ้นที่ 3 และ ที่ 4 โดยจะเห็นว่าตำแหน่งของกลไกทั้งสองนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของชิ้นที่ 2 หรือข้อเหวี่ยง

#### - การวิเคราะห์ความเร็ว

พิจารณาจากรูปโครงร่างของกลไกตามรูปที่ 4.6 ใช้วิธี Complex-Algebra ในการหาความเร็วเชิงมุมของ Link ต่างๆ ดังนี้  
จากรูปที่ 4.6 เราจะได้สมการเวกเตอร์ดังนี้

$$\bar{r}_1 + \bar{r}_2 + \bar{r}_3 - \bar{r}_4 = 0 \quad (4.12)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ในรูปของมุมได้ดังนี้

$$\overline{AD} \cdot e^{i\theta_1} + \overline{AB} \cdot e^{i\theta_2} + \overline{BC} \cdot e^{i\theta_3} - \overline{CD} \cdot e^{i\theta_4} = 0 \quad (4.13)$$

เนื่องจากตำแหน่งต่างๆ เป็นฟังก์ชันของเวลา ดังนั้นอนุพันธ์ของสมการ (4.11) เทียบต่อเวลาจะได้

$$i \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \overline{AD} \cdot e^{i\theta_1} + i \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \overline{AB} \cdot e^{i\theta_2} + i \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot e^{i\theta_3} - i \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot e^{i\theta_4} = 0 \quad (4.14)$$

พจน์แรกของสมการ (4.12) เป็นศูนย์เนื่องจากกลไกชิ้นที่ 1 เป็นพื้นจะคงที่ นั่นคือ  $\theta_1$  มีค่าคงที่ จากนั้นใช้ Euler Formula เพื่อเขียนสมการ (4.12) ให้อยู่ในรูป

$$\begin{aligned} i \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) - \dot{\theta}_2 \cdot \overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) + i \cdot \dot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) \\ - \dot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) - i \cdot \dot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) + \dot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) = 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

จากสมการ (4.13) นี้ เป็นสมการเชิงซ้อน ดังนั้นสามารถที่จะแยกส่วนจริง (real part) กับ ส่วนจินตภาพ (imaginary part) ออกเป็นสองสมการได้ดังนี้

ส่วนจริง:

$$\dot{\theta}_2 \cdot \overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) + \dot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) - \dot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) = 0$$

หรือจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) \cdot \dot{\theta}_3 - \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) \cdot \dot{\theta}_4 = -\overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 \quad (4.16)$$

ส่วนจินตภาพ:

$$\dot{\theta}_2 \cdot \overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) + \dot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) - \dot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) = 0$$

หรือจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) \cdot \dot{\theta}_3 - \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) \cdot \dot{\theta}_4 = -\overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 \quad (4.17)$$

สมการที่ (4.14) และ (4.19) เขียนให้อยู่ในรูปแมทริกซ์ได้ดังนี้

$$(4.18) \quad \begin{bmatrix} \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) & -\overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) \\ \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) & -\overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 \\ -\overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) \cdot \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix}$$

ซึ่งสมการที่ (4.16) นี้สามารถที่จะนำไปหาความเร็วเชิงมุม  $\theta_3$  และ  $\theta_4$  ของกลไกชิ้นที่ 3 และ 4 ตามลำดับได้ เพราะค่าอื่นๆ ในสมการที่ (4.16) เป็นค่าที่ทราบมาก่อนหน้านี้แล้ว

- การวิเคราะห์ความเร่ง

ในการหาความเร่งเชิงมุมของกลไกต่างๆ ต่างๆ สามารถหาได้จากการอนุพันธ์ของสมการ (4.11) เทียบต่อเวลา ดังนี้

$$(4.19) \quad \begin{aligned} & i \cdot \ddot{\theta}_2 \cdot \overline{AB} \cdot e^{i\theta_2} - \dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot e^{i\theta_2} + i \cdot \ddot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot e^{i\theta_3} - \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot e^{i\theta_3} \\ & - i \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot e^{i\theta_4} + \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot e^{i\theta_4} = 0 \end{aligned}$$

พจน์แรกเป็นศูนย์เนื่องจากสมมติฐานให้ข้อเหวี่ยงหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ ใช้ Euler formula เขียนสมการ (4.17) ได้ในรูป

$$(4.20) \quad \begin{aligned} & -\dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) - i \cdot \dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) \\ & + i \cdot \ddot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) - \ddot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) - \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) - i \cdot \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) \\ & - i \cdot \ddot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) + \ddot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) + \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) + i \cdot \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) = 0 \end{aligned}$$

จากสมการ (4.18) สามารถเขียนแยกส่วนที่เป็น ส่วนจริง (real part) กับ ส่วนจินตภาพ (imaginary part) ได้ดังนี้

ส่วนจริง:

$$\begin{aligned} & -\dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) - \ddot{\theta}_3 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) - \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) \\ & + \ddot{\theta}_4 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) + \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) = 0 \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) \cdot \ddot{\theta}_3 - \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) \cdot \ddot{\theta}_4 \\ = -\dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) - \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) + \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) \end{aligned} \quad (4.21)$$

ส่วนจินตภาพ:

$$\begin{aligned} -\dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) + \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) - \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) \\ - \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) + \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) = 0 \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) \cdot \ddot{\theta}_3 - \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) \cdot \ddot{\theta}_4 \\ = \dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) + \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) - \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) \end{aligned} \quad (4.22)$$

สมการที่ (4.19) และ (4.20) เขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) & -\overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) \\ \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) & -\overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} -\dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \cos(\theta_2) - \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \cos(\theta_3) + \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \cos(\theta_4) \\ \dot{\theta}_2^2 \cdot \overline{AB} \cdot \sin(\theta_2) + \dot{\theta}_3^2 \cdot \overline{BC} \cdot \sin(\theta_3) - \dot{\theta}_4^2 \cdot \overline{CD} \cdot \sin(\theta_4) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.23)$$

ในการหาค่าตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position,  $\theta$ ), ความเร็วเชิงมุม (Velocity Position,  $\dot{\theta}$ ) และ ความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration,  $\ddot{\theta}$ ) ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ทำการคำนวณ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยกำหนดให้  $\alpha_3$  หมายถึง  $\ddot{\theta}_3$  และ  $\alpha_4$  หมายถึง  $\ddot{\theta}_4$

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์ของชุดกลไกส่งกำลัง

$\theta_2$ (degree)	$\theta_3$ (degree)	$\theta_4$ (degree)	$\omega_2$ (rad/s)	$\omega_3$ (rad/s)	$\omega_4$ (rad/s)	$\alpha_3$ (rad/s <sup>2</sup> )	$\alpha_4$ (rad/s <sup>2</sup> )
-162.00	25.31	145.71	418.88	108.84	29.00	27712.11	-71477.48
-144.00	30.35	145.85	418.88	123.66	-21.46	11096.66	-62525.20
-126.00	35.74	143.97	418.88	124.93	-64.88	-7841.89	-53740.56
-108.00	40.88	140.35	418.88	111.81	-103.05	-27173.82	-48715.89

-90.00	45.14	135.15	418.88	84.13	-138.72	-46666.94	-46659.67
--------	-------	--------	--------	-------	---------	-----------	-----------

ตารางที่ 4.1(ต่อ)

$\theta_2$ (degree)	$\theta_3$ (degree)	$\theta_4$ (degree)	$\omega_2$ (rad/s)	$\omega_3$ (rad/s)	$\omega_4$ (rad/s)	$\alpha_3$ (rad/s <sup>2</sup> )	$\alpha_4$ (rad/s <sup>2</sup> )
-72.00	47.90	128.45	418.88	42.03	-172.83	-65191.62	-43636.15
-54.00	48.58	120.36	418.88	-12.27	-202.06	-77959.79	-32052.27
-36.00	46.78	111.30	418.88	-71.02	-216.12	-75150.49	-1530.08
-18.00	42.63	102.24	418.88	-118.84	-198.66	-48345.60	50827.91
0.00	36.96	94.83	418.88	-139.63	-139.63	-6589.02	103636.22
18.00	31.05	90.67	418.88	-131.31	-51.48	25422.14	124595.64
36.00	25.90	90.42	418.88	-106.91	38.19	36509.24	110129.65
54.00	21.90	93.69	418.88	-79.77	110.02	34673.56	80581.08
72.00	19.00	99.55	418.88	-55.64	159.21	29685.44	51240.91
90.00	17.07	107.08	418.88	-34.85	188.00	26188.27	26195.53
108.00	15.99	115.46	418.88	-15.61	199.25	25638.78	4096.71
126.00	15.74	123.97	418.88	4.43	194.24	28324.51	-17574.16
144.00	16.41	131.91	418.88	27.53	172.65	33559.88	-40061.98
162.00	18.16	138.57	418.88	54.71	134.55	38456.26	-60733.33
180.00	21.14	143.29	418.88	83.78	83.78	37652.30	-72596.88

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของแขนส่งกำลัง

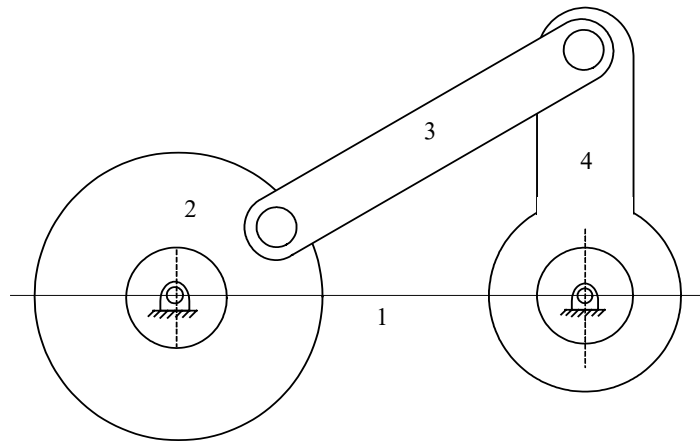
การวิเคราะห์ทางคินเมติกส์จากหัวข้อที่แล้ว นำผลลัพธ์ที่ได้มาหาแรงที่กระทำบนชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ทั้งสามได้ดังนี้

กำหนดให้

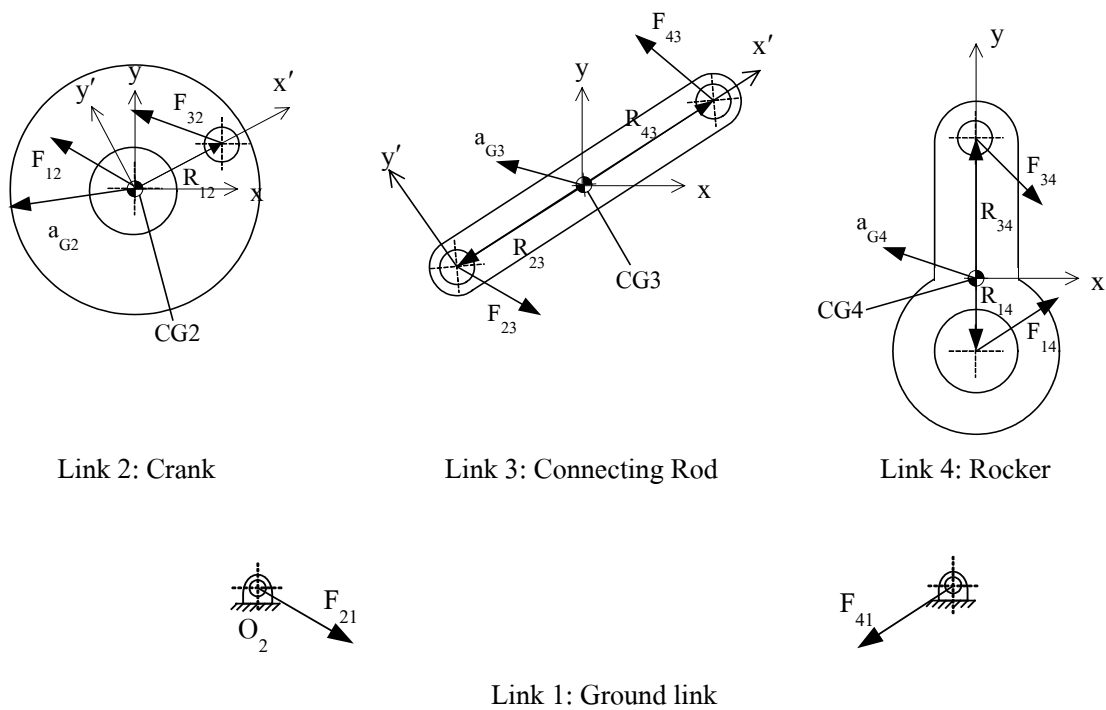
- วัสดุ SCM4 หรือ AISI 4140<sup>1</sup>
- ความหนาแน่น (Density),  $\rho$  = 7750.372 kg/m<sup>3</sup>
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) = 7.83
- โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Young's Modulus), E = 227.526 Gpa
- อัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's Ratio),  $\nu$  = 0.3

<sup>1</sup> ดูรายละเอียดและที่มาของคุณสมบัติเหล่านี้ในภาคผนวก ข

- สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coeff. of Thermal expansion),  $\alpha$  =  $12.56 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- ความแข็งแรงเชิงดึง (Tensile Strength),  $\sigma_y$  = 329 MPa



รูปที่ 4.7 ภาพประกอบของกลไกในตำแหน่งที่มีแรงกระทำที่แขนส่งกำลังสูงสุด



รูปที่ 4.8 รูปแสดงลักษณะการสมดุล (Free-body diagram) ของชิ้นส่วนต่างๆ

จากกฎข้อที่สองของ Newton

$$\Sigma F = ma$$

พิจารณารูปแสดงลักษณะการสมดุลของแรงกระทำบนกลไกชิ้นที่ 2 จะได้ว่า

$$F_{12x} + F_{32x} = m_2 a_{G2x} \quad (4.24)$$

$$F_{12y} + F_{32y} = m_2 a_{G2y} \quad (4.25)$$

$$T_{12} + (R_{12x} F_{12y} - R_{12y} F_{12x}) + (R_{32x} F_{32y} - R_{32y} F_{32x}) = I_{G2} \alpha_2 \quad (4.26)$$

พิจารณารูปแสดงลักษณะการสมดุลของแรงกระทำบนกลไกชิ้นที่ 3 จะได้ว่า

$$F_{43x} - F_{32x} = m_3 a_{G3x} \quad (4.27)$$

$$F_{43y} - F_{32y} = m_3 a_{G3y} \quad (4.28)$$

$$(R_{43x} F_{43y} - R_{43y} F_{43x}) + (R_{23x} F_{32y} - R_{23y} F_{32x}) = I_{G3} \alpha_3 \quad (4.29)$$

พิจารณารูปแสดงลักษณะการสมดุลของแรงกระทำบนกลไกชิ้นที่ 4 จะได้ว่า

$$F_{14x} + F_{43x} = m_4 a_{G4x} \quad (4.30)$$

$$F_{14y} + F_{43y} = m_4 a_{G4y} \quad (4.31)$$

$$(R_{14x}F_{14y} - R_{14y}F_{14x}) + (R_{34x}F_{43y} - R_{43y}F_{43x}) + T_4 = I_{G4}\alpha_4 \quad (4.32)$$

จัดรูปสมการ (4.22) ถึง (4.30) ใหม่ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{12y} & R_{12x} & -R_{32y} & R_{32x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{23y} & -R_{23x} & -R_{43y} & R_{43x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{34y} & -R_{34x} & -R_{14y} & R_{14x} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} F_{12x} \\ F_{12y} \\ F_{32x} \\ F_{32y} \\ F_{43x} \\ F_{43y} \\ F_{14x} \\ F_{14y} \\ T_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m_2 a_{G2x} \\ m_2 a_{G2y} \\ I_{G2} \alpha_2 \\ m_3 a_{G3x} \\ m_3 a_{G3y} \\ I_{G3} \alpha_3 \\ m_4 a_{G4x} \\ m_4 a_{G4y} \\ I_{G4} \alpha_4 - T_4 \end{Bmatrix} \quad (4.33)$$

- การคำนวณหาแรงบิดที่กลไกชิ้นที่ 4

เนื่องจากกลไกชิ้นที่ 4 จะเป็นชิ้นส่วนที่ติดกับแผ่นรับแรงและเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน แต่จะอยู่ภายนอกห้องเผาไหม้ ดังนั้นแผ่นรับแรงได้รับแรงดันที่ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นดังนี้

$$T = F \times \bar{r} \quad (4.34)$$

โดยที่  $F = \frac{P}{A}$

กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%

เนื่องจาก P เป็นฟังก์ชันของ  $\theta$  โดยที่  $\theta$  คือมุมทำงานของกลไกชิ้นที่ 4 ดังนั้น F และ T ต้องเป็นฟังก์ชันของ  $\theta$

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง P และ  $\theta$  (สมการ (3.5) หน้า 34)

$$P(\theta) = \frac{539.603 \times 10^3}{(0.7614\theta - 0.11965)^{1.35}} \quad \text{Pa} \quad (4.35)$$



$$A = 0.053 \times 0.052 = 0.002756 \quad \text{m}^2 \quad (4.36)$$

แทนค่า P และ A ลงในสมการ (4.32)

$$F(\theta) = \frac{539.603 \times 10^3}{0.002756 \times (0.76140 - 0.11965)^{1.35}}$$

$$F(\theta) = \frac{195.792 \times 10^6}{(0.76140 - 0.11965)^{1.35}} \quad \text{N} \quad (4.37)$$

และจะได้แรงบิดที่กลไกชั้นที่ 4 เป็น

$$T(\theta) = \frac{195.792 \times 10^6}{(0.76140 - 0.11965)^{1.35}} \times 0.07225 \quad \text{N-m (CCW)}$$

$$T(\theta) = \frac{14.146 \times 10^6}{(0.76140 - 0.11965)^{1.35}} \quad \text{N-m (CCW)} \quad (4.38)$$

ในกรณีนี้เราคิดที่มุมการทำงานของกลไกชั้นที่ 4 เท่ากับ  $17^{\circ}$  ซึ่งจะได้แรงกระทำและแรงบิดที่กลไกชั้นที่ 4 เป็นดังนี้

$$F = 4037.2360 \quad \text{MN}$$

$$T_{\text{output}} = 291.6903 \quad \text{MN-m}$$

เนื่องแรงบิดที่คำนวณจากแรงกระทำที่นี้เป็นแรงบิดของที่เกิดขึ้นกับกลไกส่งกำลังชุดสมบรูณ์ของเครื่องยนต์ ซึ่งมีกลไกแบบเดียวกันนี้ทั้งหมดสี่ชุด ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกลุ่มกลุ่มละ 2 ชุด โดยกลไกกลุ่มหนึ่งจะรับแรงบิดครึ่งหนึ่งของแรงบิดทั้งหมด แต่เนื่องจากกลไกในแต่ละกลุ่มจะใช้กลไกชั้นที่ 4 ร่วมกัน ดังนั้น จะถือว่ากลไกชั้นที่ 4 ของกลไกส่งกำลัง 1 ชุด รับแรงบิดเป็นครึ่งหนึ่งของแรงบิดทั้งหมด ดังนั้น จะได้แรงบิดของกลไกชั้นที่ 4 เป็น

$$T_{14} = \frac{T_{\text{output}}}{2} = 145.84515 \quad \text{MN-m}$$

กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70%

<sup>2</sup> เนื่องจากการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง P และ  $\theta$  ได้สร้างไดอะแกรมของกลไกแขนส่งกำลังไว้ด้วยกัน โดยใช้แกนอ้างอิงไม่เหมือนกันจึงทำให้ค่าที่มุมการทำงานของกลไกชั้นที่ 4 ที่ทำให้เกิดแรงกระทำสูงสุดไม่ตรงกับการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Motion

สำหรับในกรณีที่ 2 จะทำเช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 1 โดยค่าความดันในกรณีที่ 2 มีค่าเท่ากับ

$$P(\theta) = \frac{539.603 \times 10^3}{(0.7614\theta - 0.11965)^{1.35}} \quad \text{Pa} \quad (4.39)$$

$$A = 0.053 \times 0.052 = 0.002756 \quad \text{m}^2 \quad (4.40)$$

แทนค่า P และ A ลงในสมการ (4.32)

$$F(\theta) = \frac{539.603 \times 10^3}{0.002756 \times (0.7614\theta - 0.11965)^{1.35}}$$

$$F(\theta) = \frac{195.792 \times 10^6}{(0.7614\theta - 0.11965)^{1.35}} \quad \text{N} \quad (4.41)$$

ที่มุมการทำงานของกลไกชิ้นที่ 4 เท่ากับ  $17^\circ$  จะได้แรงกระทำและแรงบิดที่กลไกชิ้นที่ 4 ในกรณีที่ 2 มีค่าดังนี้

$$F = 3008.4932 \quad \text{MN}$$

$$T_{\text{output}} = 217.3636 \quad \text{MN-m}$$

$$T_{14} = \frac{T_{\text{output}}}{2} = 108.6818 \quad \text{MN-m}$$

กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50%

สำหรับในกรณีที่ 3 จะทำเช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 2 และ 1 โดยค่าความดันในกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ

$$P(\theta) = \frac{539.603 \times 10^3}{(0.7614\theta - 0.11965)^{1.35}} \quad \text{Pa} \quad (4.42)$$

$$A = 0.053 \times 0.052 = 0.002756 \quad \text{m}^2 \quad (4.43)$$

แทนค่า P และ A ลงในสมการ (4.32)

$$F(\theta) = \frac{539.603 \times 10^3}{0.002756 \times (0.76140 - 0.11965)^{1.35}}$$

$$F(\theta) = \frac{195.792 \times 10^6}{(0.76140 - 0.11965)^{1.35}} \quad \text{N} \quad (4.44)$$

ที่มุมการทำงานของกลไกชั้นที่ 4 เท่ากับ  $17^\circ$  จะได้แรงกระทำและแรงบิดที่กลไกชั้นที่ 4 ในกรณีที่ 3 มีค่าดังนี้

$$F = 2322.6646 \quad \text{MN}$$

$$T_{\text{output}} = 167.8125 \quad \text{MN-m}$$

$$T_{14} = \frac{T_{\text{output}}}{2} = 83.90625 \quad \text{MN-m}$$

การหามวลและโมเมนต์ความเฉื่อย (Mass Moment of Inertia) รอบจุดศูนย์กลางความหน่วง (Center of Gravity, CG) ของแต่ละกลไกจะใช้ค่าจากโปรแกรม Pro/MECHANICA Motion ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{โมเมนต์ความเฉื่อยของกลไกชั้นที่ 2} &= 6.418798 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ \text{โมเมนต์ความเฉื่อยของกลไกชั้นที่ 3} &= 5.276406 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ \text{โมเมนต์ความเฉื่อยของกลไกชั้นที่ 4} &= 4.584141 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (4.31) แล้วใช้ MATLAB คำนวณหาแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่างๆ โดยเฉพาะชั้นที่ 3 หรือแขนส่งกำลัง แล้วนำไปทำการวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบนแขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Structure โดยแรงกระทำที่คำนวณได้มีค่าดังนี้

- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%

$$\begin{aligned} F_{12} &= 37.2743 \times 10^{24} \quad \text{N} \\ F_{32} &= 37.2743 \times 10^{24} \quad \text{N} \\ F_{43} &= 37.2743 \times 10^{24} \quad \text{N} \\ F_{14} &= 37.2743 \times 10^{24} \quad \text{N} \\ T_{12} &= 987.3424 \times 10^{21} \quad \text{N} \end{aligned}$$

- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70%

$$\begin{aligned} F_{12} &= 27.7764 \times 10^{24} \quad \text{N} \\ F_{32} &= 27.7764 \times 10^{24} \quad \text{N} \end{aligned}$$

$$F43 = 27.7764 \times 10^{24} \quad \text{N}$$

$$F14 = 27.7764 \times 10^{24} \quad \text{N}$$

$$T12 = -735.7548 \times 10^{21} \quad \text{N}$$

- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50%

$$F12 = 21.4444 \times 10^{24} \quad \text{N}$$

$$F32 = 21.4444 \times 10^{24} \quad \text{N}$$

$$F43 = 21.4444 \times 10^{24} \quad \text{N}$$

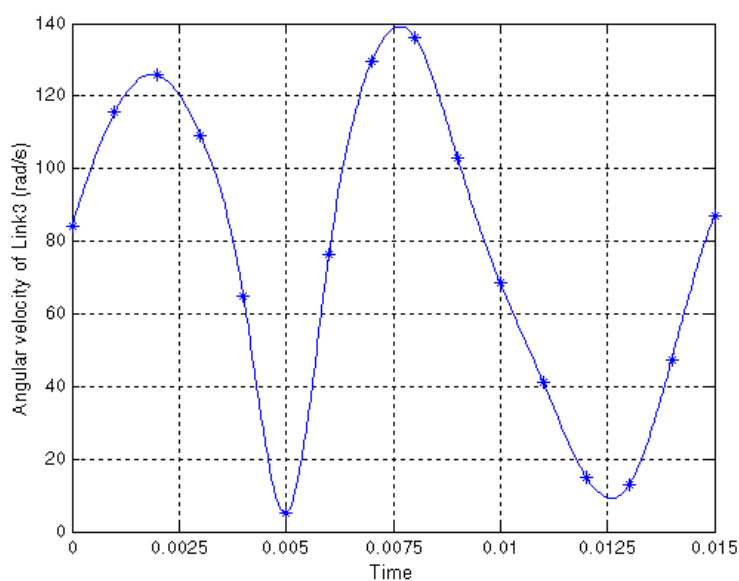
$$F14 = 21.4444 \times 10^{24} \quad \text{N}$$

$$T12 = -568.0298 \times 10^{21} \quad \text{N}$$

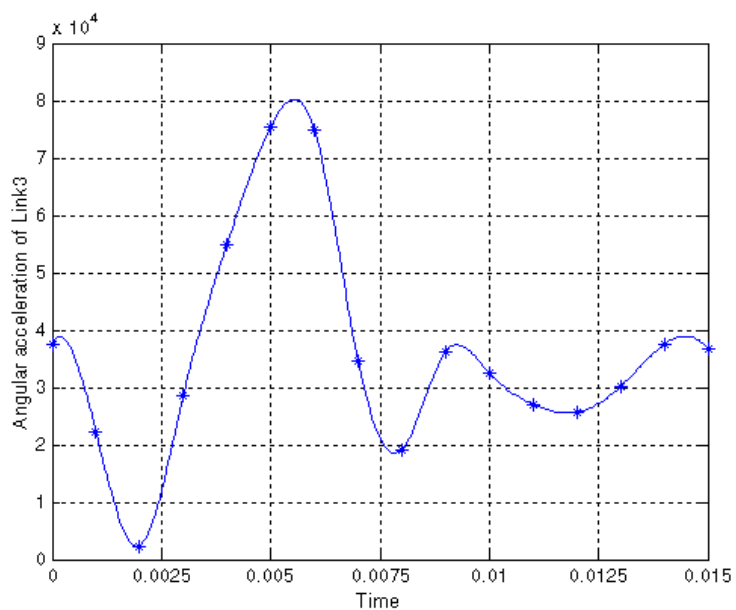
#### 4.3.3 การวิเคราะห์ทางคิเนติกส์และไดนามิกส์ของกลไกแขนส่งกำลังด้วย

##### Pro/MECHANICA Motion

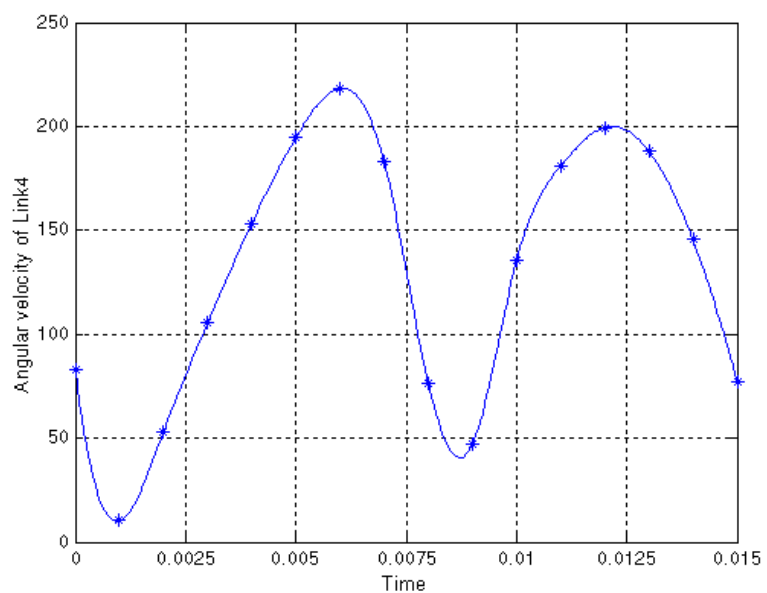
กลไกของแขนส่งกำลังในรูปที่ 4.7 นั้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Motion เพื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของกลไก จะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของกลไกชิ้นที่ 3 มีค่าเท่ากับ  $0.0005276406 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  และโมเมนต์ความเฉื่อยของกลไกชิ้นที่ 4 เท่ากับ  $0.0004584141 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  และความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมในช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 (ตารางผลการวิเคราะห์ห้อยอยู่ในภาคผนวก ค)



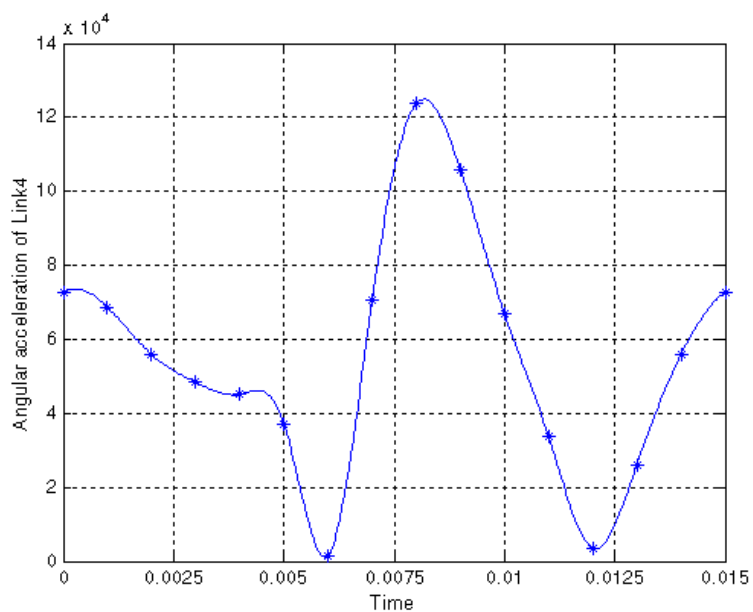
รูปที่ 4.9 ความเร็วเชิงมุมของกลไกชิ้นที่ 3 ที่ช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.10 ความเร่งเชิงมุมของกลไกชิ้นที่ 3 ที่ช่วงเวลาต่างๆ

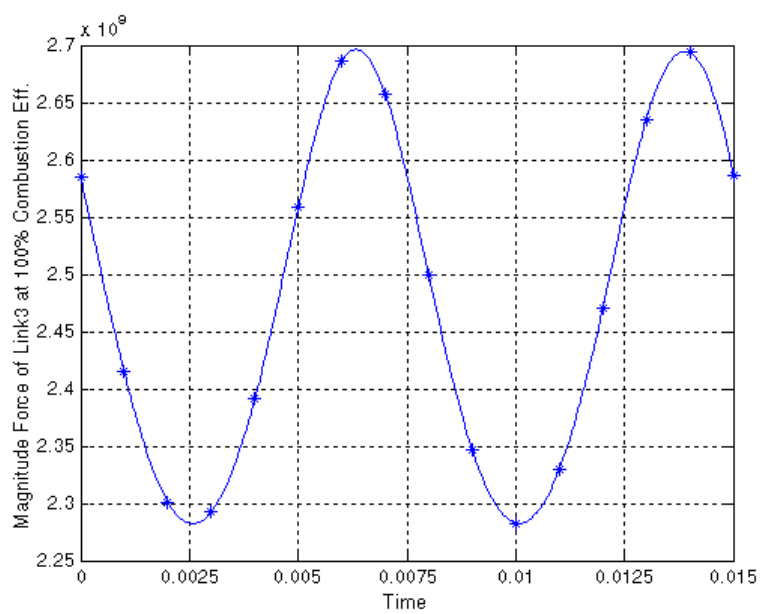


รูปที่ 4.11 ความเร็วเชิงมุมของกลไกชิ้นที่ 4 ที่ช่วงเวลาต่างๆ

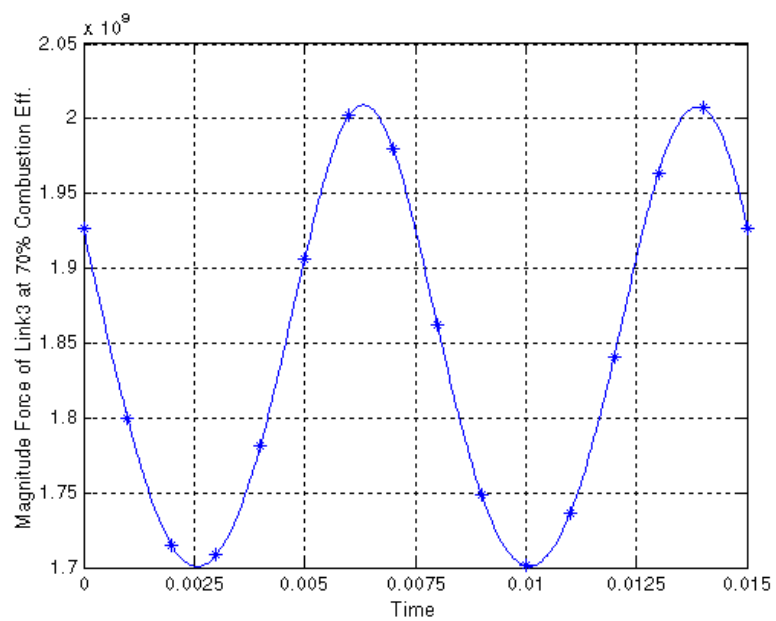


รูปที่ 4.12 ความเร่งเชิงมุมของกลไกชิ้นที่ 4 ที่ช่วงเวลาต่างๆ

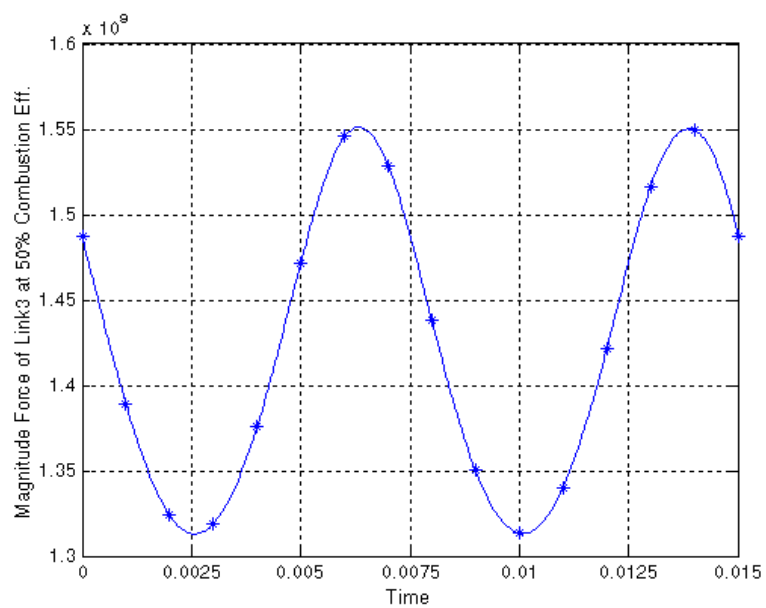
สำหรับผลการวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของแขนส่งกำลังแสดงในรูปข้างล่างดังต่อไปนี้ (ตารางผลการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.13 ขนาดของแรงกระทำที่รัฐวมสลักของกลไกชิ้นที่ 3 ที่  $\eta_c = 100\%$



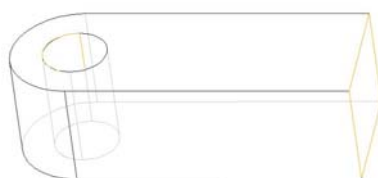
รูปที่ 4. 14 ขนาดของแรงกระทำที่รูสวมสลักของกลไกชิ้นที่ 3 ที่  $\eta_c = 70\%$



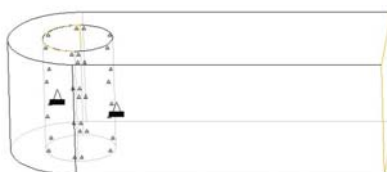
รูปที่ 4. 15 ขนาดของแรงกระทำที่รูสวมสลักของกลไกชิ้นที่ 3 ที่  $\eta_c = 50\%$

#### 4.4 การวิเคราะห์แขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Structure

การวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบนแขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Structure จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขข้อจำกัด (Constrain) และภาระกรรม (Load) ให้กับแขนส่งกำลัง โดยในปัญหานี้แขนส่งกำลังมีรูปร่างสมมาตร ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองของแขนส่งกำลังที่มีรูปร่างเป็นครึ่งหนึ่งของรูปร่างเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และกำหนดเงื่อนไขบังคับที่พื้นที่ผิวในรูสวมสลักให้มีระดับชั้นความอิสระเท่ากับ 0 (DOF = 0) จากรูปที่ 4.17 ประกอบ จากนั้นกำหนดแรงกระทำที่ได้จากการวิเคราะห์กลไกของแขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Motion โดยเลือกแรงที่กระทำที่รูสวมสลักเป็นแบบ Bearing force และเลือกแรงที่กระทำที่พื้นผิวยอดตัดแขนส่งกำลังเป็นแบบ Surface force แบบ Total load at point จะได้ลักษณะของแรงกระทำบนแขนส่งกำลังดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4. 16 แบบจำลองแขนส่งกำลังสำหรับการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA Structure



รูปที่ 4. 17 กำหนดเงื่อนไขข้อจำกัดที่รูสวมสลักของแขนส่งกำลัง



รูปที่ 4. 18 แรงกระทำบนแขนส่งกำลัง



จากนั้นทำการวิเคราะห์แขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Structure โดยเลือกช่วงเวลาที่แรงกระทำมีค่ามากที่สุดคือช่วงเวลาที่ 0.014 ซึ่งตำแหน่งของกลไกขึ้นที่ 2 เท่ากับ  $2\pi$  rad

#### 4.4.1 กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

ผลจากการวิเคราะห์แขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Structure และการแสดงการกระจายตัวของความเค้น ความเครียด และการขจัดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองแขนส่งกำลังนั้น แสดงอยู่ในตารางและรูปด้านล่าง ดังนี้

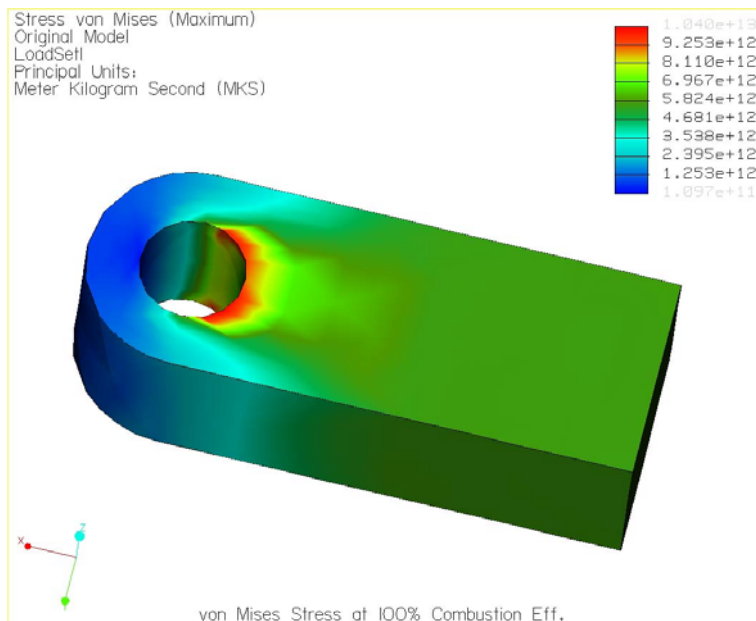
ตารางที่ 4. 2 ผลจากการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง กรณีที่ 1

ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	1.254403	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	-1.248174	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$1.053542 \times 10^{-01}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$-8.719991 \times 10^{-02}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$1.386255 \times 10^{13}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$1.039558 \times 10^{13}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$1.284234 \times 10^{13}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$-4.528622 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$2.959140 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$4.503357 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$1.866664 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$5.146015 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-5.816880 \times 10^{12}$	Pa
Strain energy	$1.677682 \times 10^{12}$	

จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 63 อิลิเมนต์

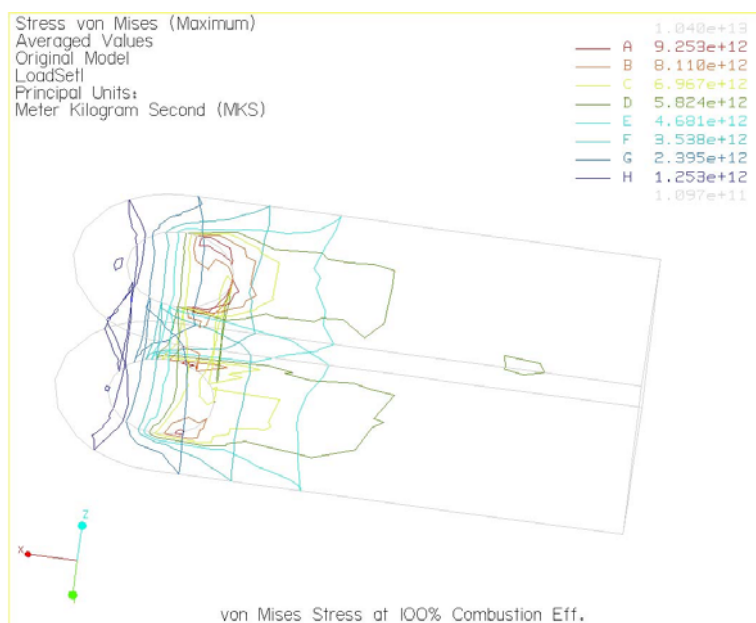
ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 6

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 10.34 วินาที



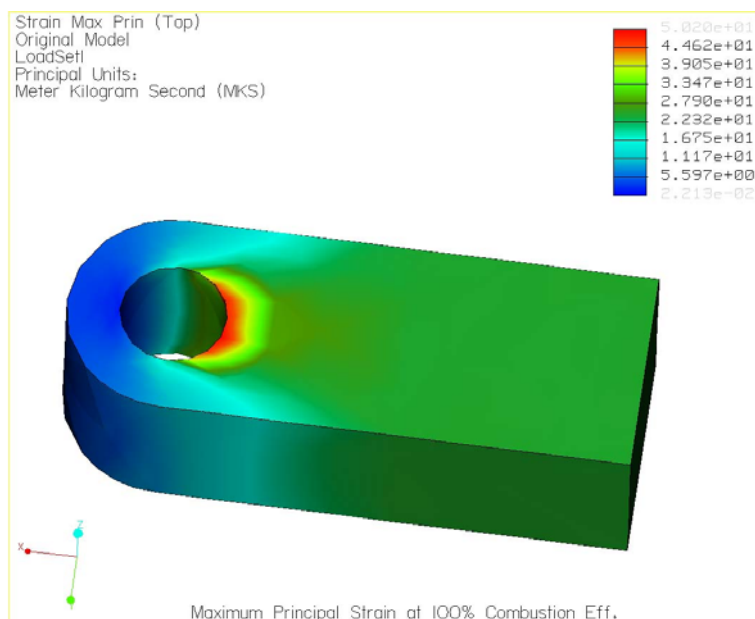
รูปที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Fringe plot กรณีที่ 1



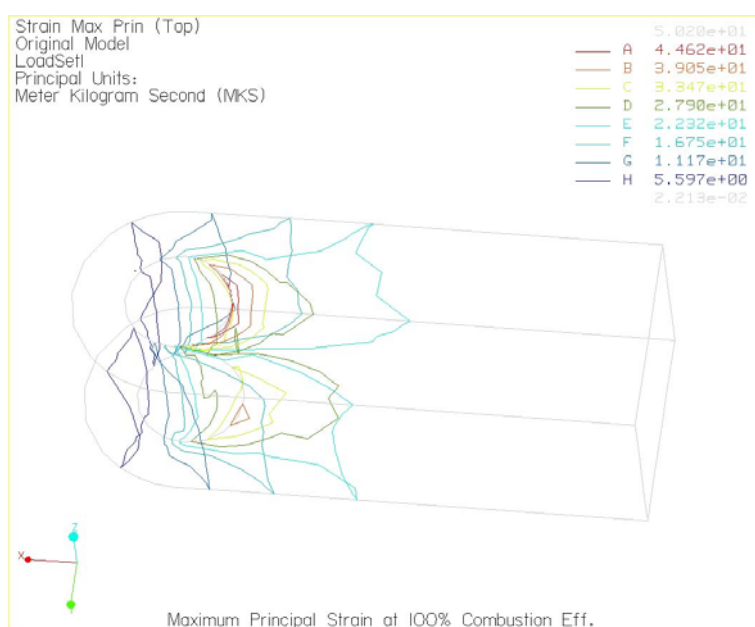
รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Contour plot กรณีที่ 1



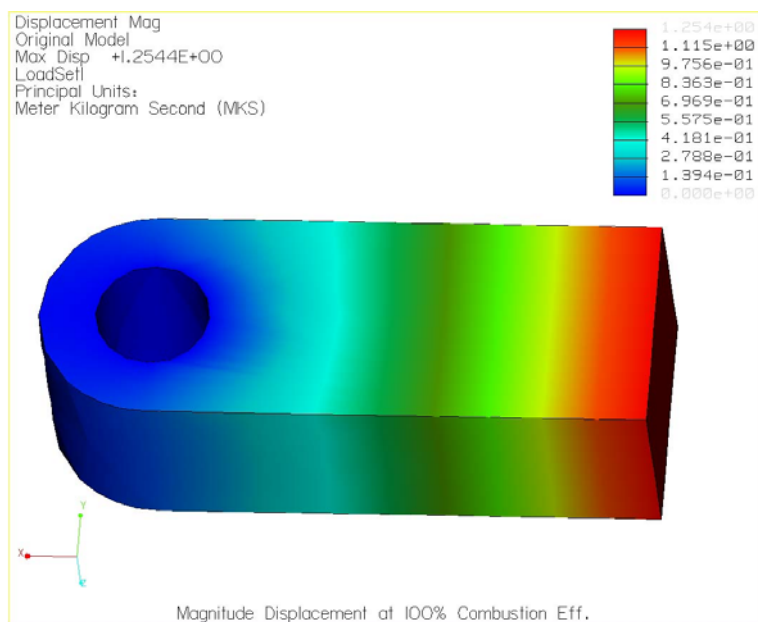
รูปที่ 4. 21 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุด บนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Fringe plot กรณีนีที่ 1

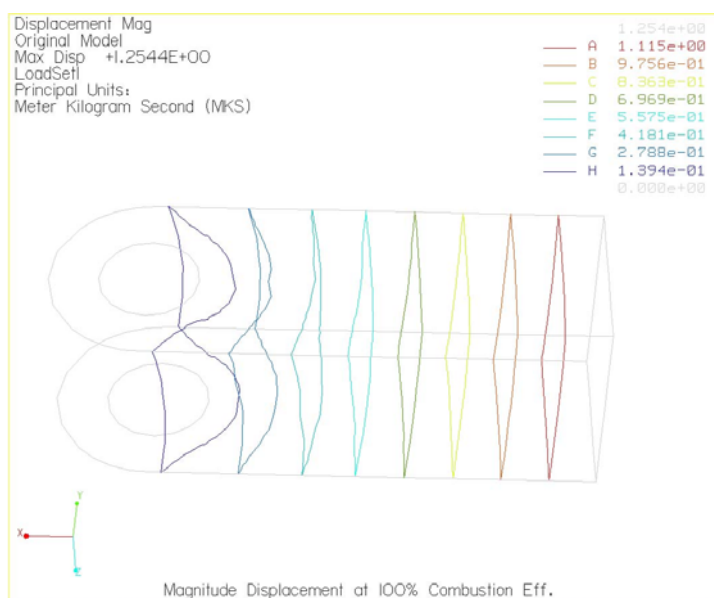


รูปที่ 4. 22 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุด บนแบบจำลองแกนส่งกำลัง แบบ

Contour plot กรณีนีที่ 1



รูปที่ 4. 23 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 1



รูปที่ 4. 24 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 1

#### 4.4.2 กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

ผลจากการวิเคราะห์แขนส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Structure และการแสดงการกระจายตัวของความเค้น ความเครียด และการขจัดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองแขนส่งกำลังนั้น แสดงอยู่ในตารางและรูปด้านล่าง ดังนี้

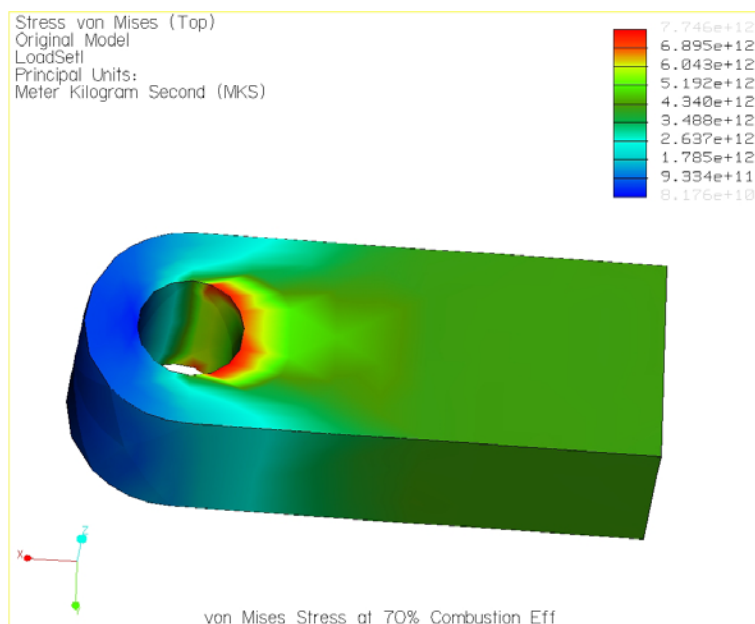
ตารางที่ 4.3 ผลจากการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง กรณีที่ 2

ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$9.347342 \times 10^{-01}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$-9.300929 \times 10^{-01}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$7.850607 \times 10^{-02}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$-6.497813 \times 10^{-02}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$1.032986 \times 10^{13}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$7.746403 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$9.569639 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$-3.374561 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$2.205042 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$3.355734 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$1.390969 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$3.834619 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-4.334523 \times 10^{12}$	Pa
Strain energy	$9.315626 \times 10^{08}$	

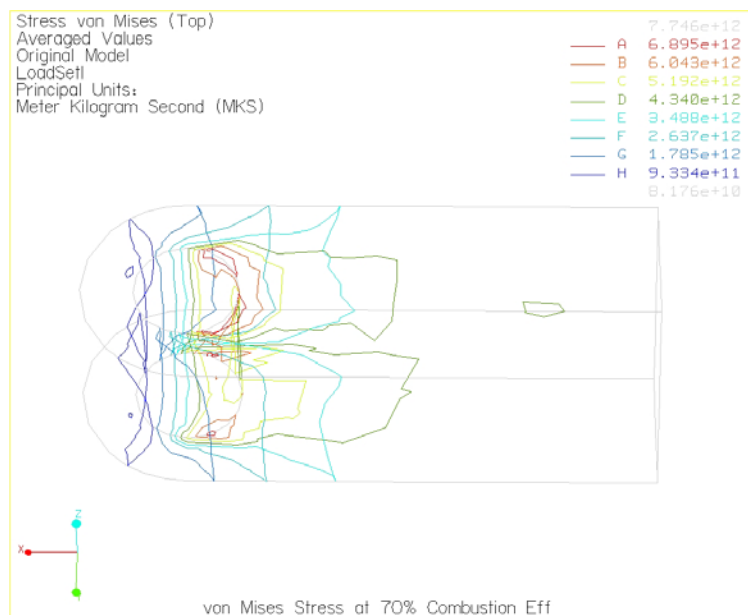
จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 63 อิลิเมนต์

ลำดับชั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 6

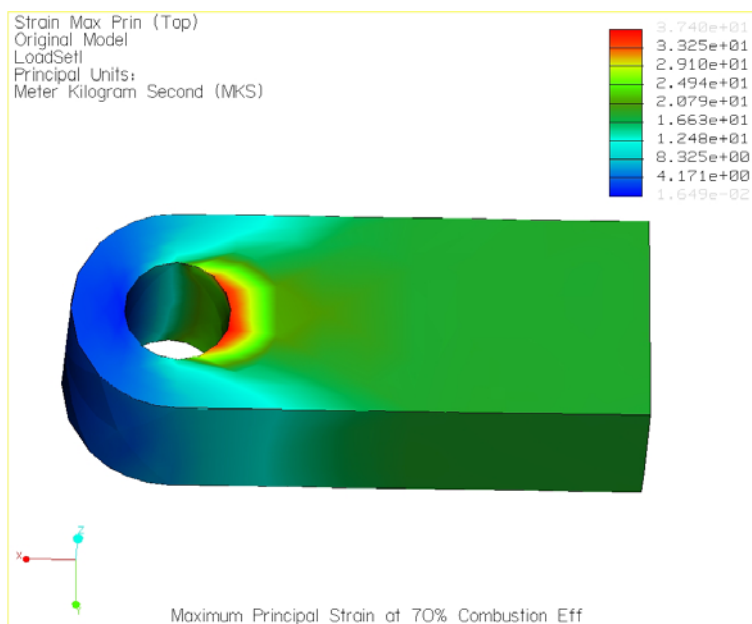
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 10.46 วินาที



รูปที่ 4. 25 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลัง แบบ Fringe plot กรณีสี่ที่ 2

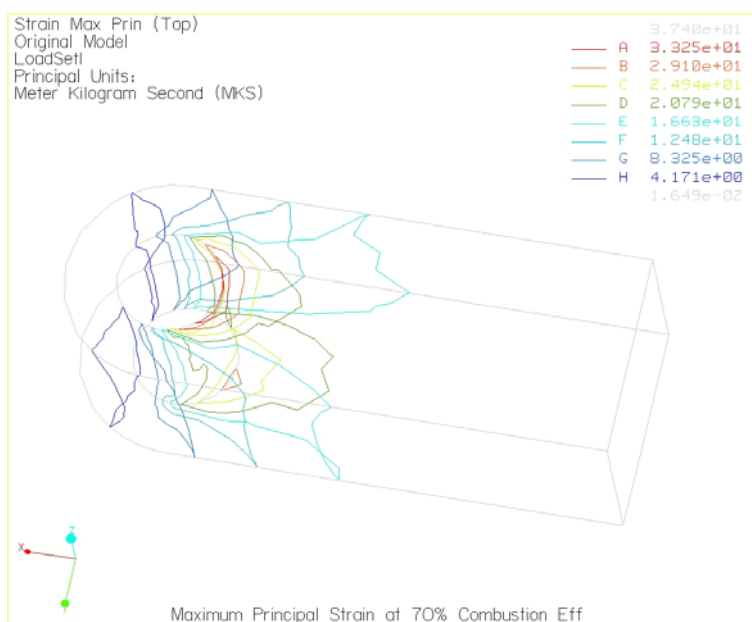


รูปที่ 4. 26 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลัง แบบ Contour plot กรณีสี่ที่ 2



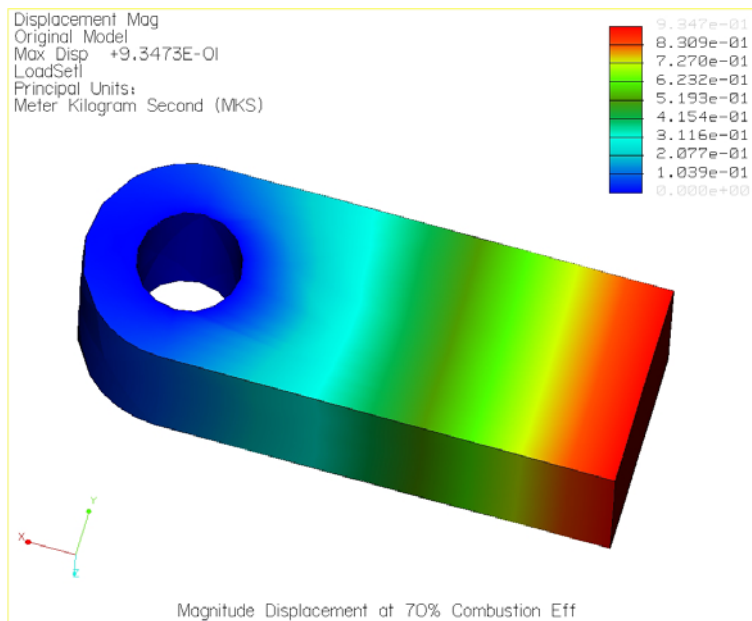
รูปที่ 4. 27 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Fringe plot กรณีสี่ที่ 2

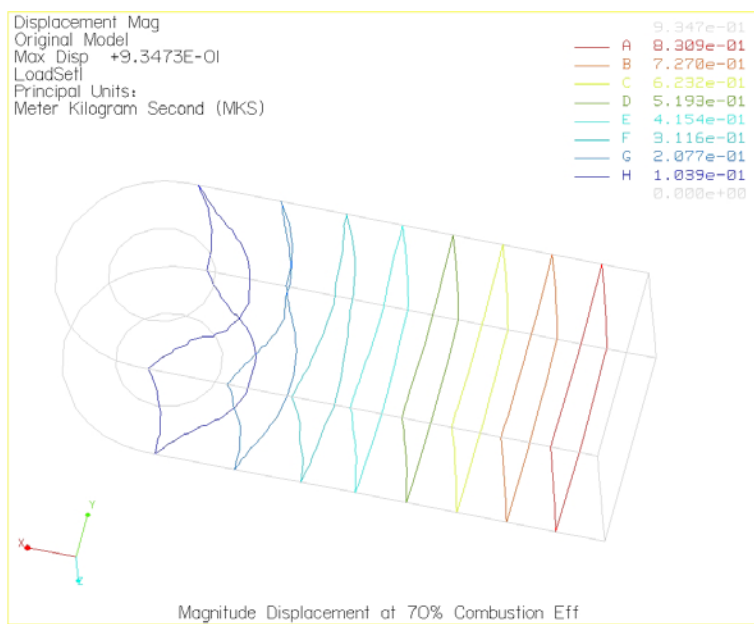


รูปที่ 4. 28 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Contour plot กรณีสี่ที่ 2



รูปที่ 4. 29 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 2



รูปที่ 4. 30 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 2



#### 4.4.3 กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

ผลจากการวิเคราะห์แบบส่งกำลังด้วย Pro/MECHANICA Structure และการแสดงการกระจายตัวของความเค้น ความเครียด และการขจัดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองแบบส่งกำลังนั้น แสดงอยู่ในตารางและรูปด้านล่าง ดังนี้

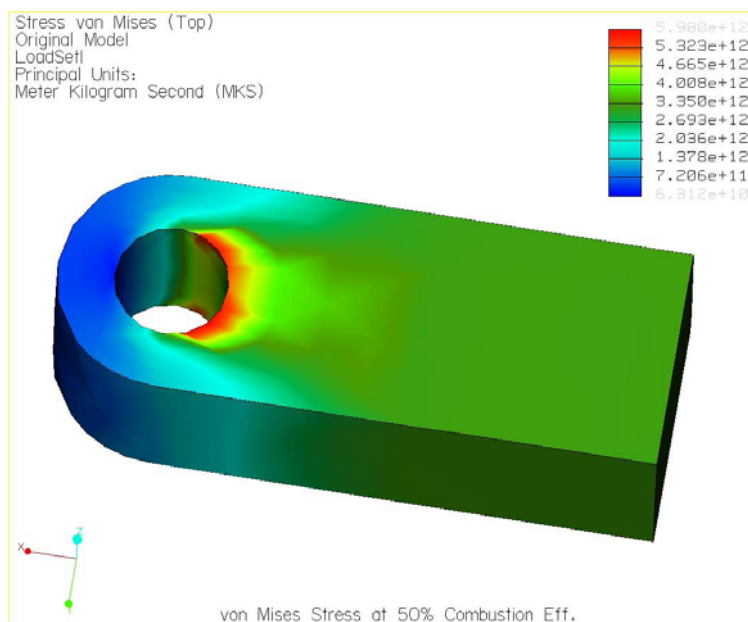
ตารางที่ 4.4 ผลจากการวิเคราะห์แบบส่งกำลัง กรณีที่ 3

ผลการวิเคราะห์	ค่า	หน่วย
ขนาดของการขจัดสูงสุด	$7.216234 \times 10^{-01}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน X	$-7.180404 \times 10^{-01}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Y	$6.060742 \times 10^{-02}$	m
การขจัดสูงสุดในแนวแกน Z	$-5.016371 \times 10^{-02}$	m
ความเค้นหลักสูงสุด	$7.974749 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของ von Mises	$5.980295 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XX	$7.387851 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XY	$-2.605193 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง XZ	$1.702313 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YY	$2.590658 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง YZ	$1.073841 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นสูงสุดของในทิศทาง ZZ	$2.960362 \times 10^{12}$	Pa
ความเค้นหลักต่ำสุด	$-3.346292 \times 10^{12}$	Pa
Strain energy	$5.552099 \times 10^{08}$	

จำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 63 อิลิเมนต์

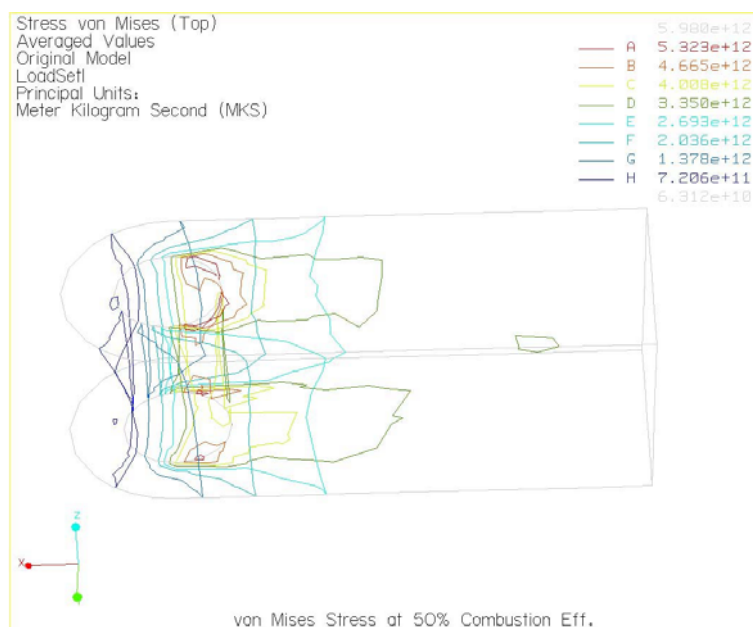
ลำดับขั้นพหุนามสูงสุดเท่ากับ 6

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 10.59 วินาที



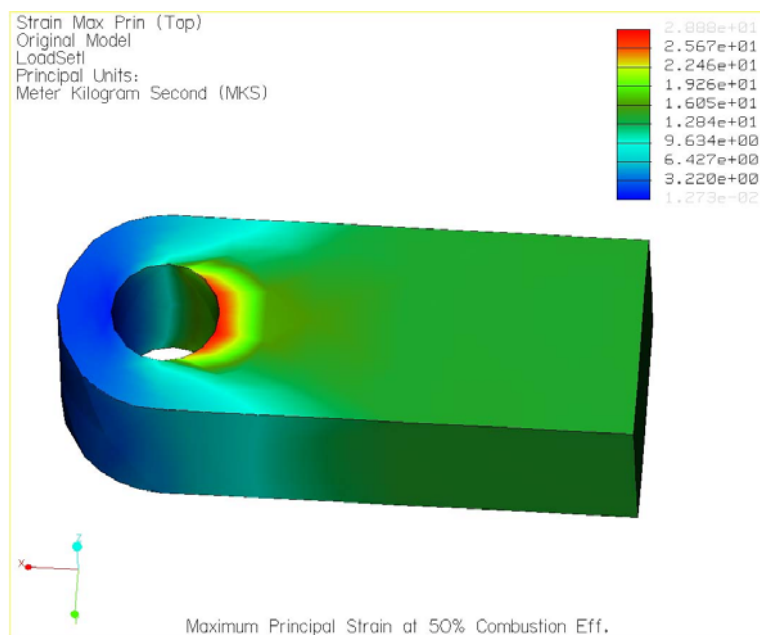
รูปที่ 4.31 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Fringe plot กรณีที่ 3



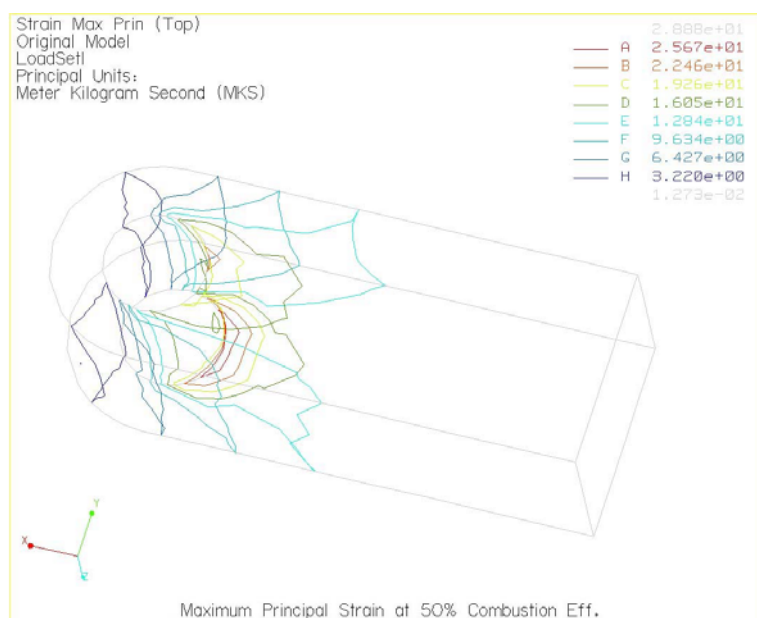
รูปที่ 4.32 แสดงการกระจายตัวของความเค้นของ von Mises บนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Contour plot กรณีที่ 3



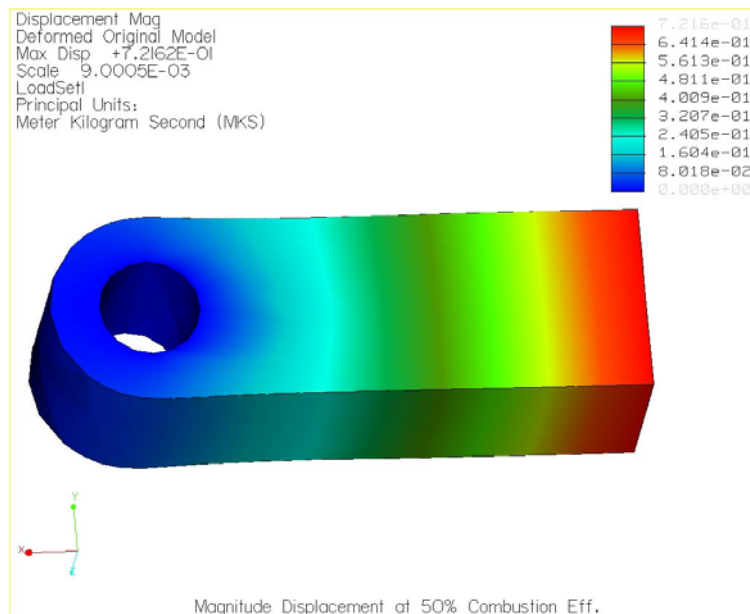
รูปที่ 4.33 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Fringe plot กรณีสี่ที่ 3

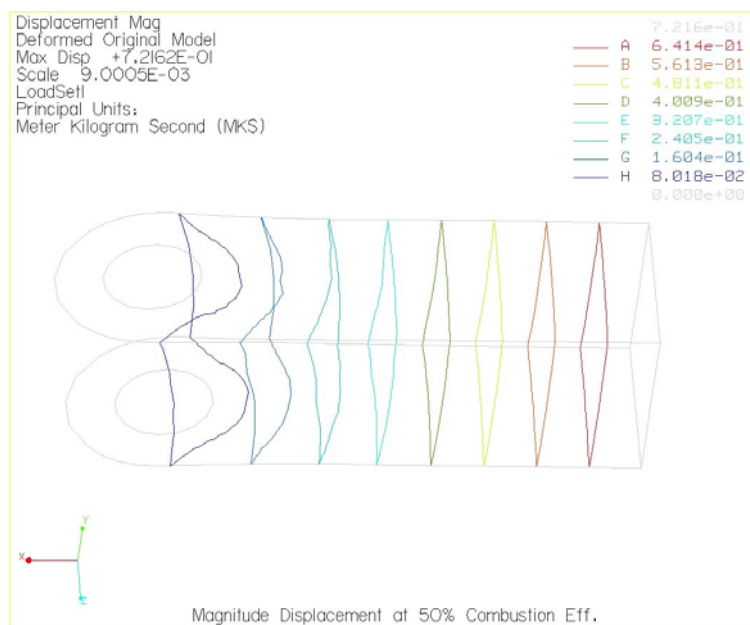


รูปที่ 4.34 แสดงการกระจายตัวของความเครียดหลักสูงสุดบนแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ

Contour plot กรณีสี่ที่ 3



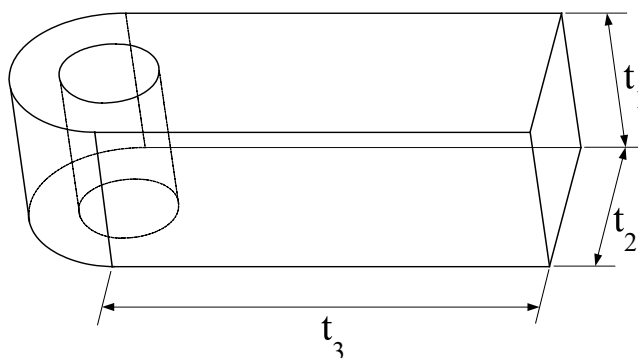
รูปที่ 4.35 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Fringe plot กรณีที่ 3



รูปที่ 4.36 แสดงการกระจายตัวของการขจัดของแบบจำลองแกนส่งกำลังแบบ Contour plot กรณีที่ 3

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น ขนาดของความเค้นมีค่ามากเกินค่าความแข็งแรง (Yield Strength) ของวัสดุซึ่งทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย ซึ่งหมายถึงแขนส่งกำลังไม่สามารถทนภาระกรรมที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบแขนส่งกำลังใหม่อีกครั้ง โดยการพิจารณาตัวแปรที่เป็นขนาดของแขนส่งกำลัง คือ ความหนา ( $t_1$ ) ความกว้าง ( $t_2$ ) และความยาว ( $t_3$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.37

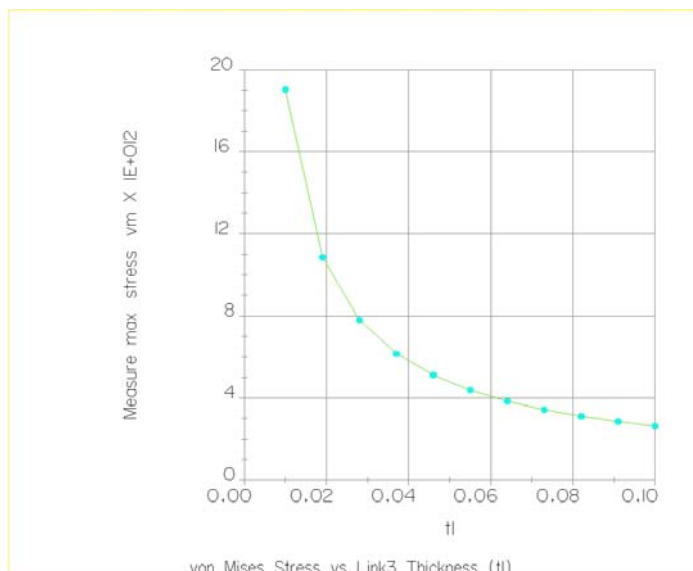
เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของตัวแปรเหล่านั้นกับส่วนประกอบอื่นๆ ของชุดกลไกแล้ว พบว่าจะเพิ่มได้เฉพาะความหนา ( $t_1$ ) ของแขนส่งกำลัง เนื่องจากจะมีผลกระทบต่อชิ้นส่วนอื่นๆ น้อยที่สุด และได้ทำการวิเคราะห์โดยกำหนดวิธีการวิเคราะห์เป็นแบบ Sensitivity study เพื่อดูผลกระทบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของความหนาแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเป็นอย่างไร เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขการออกแบบแขนส่งกำลัง



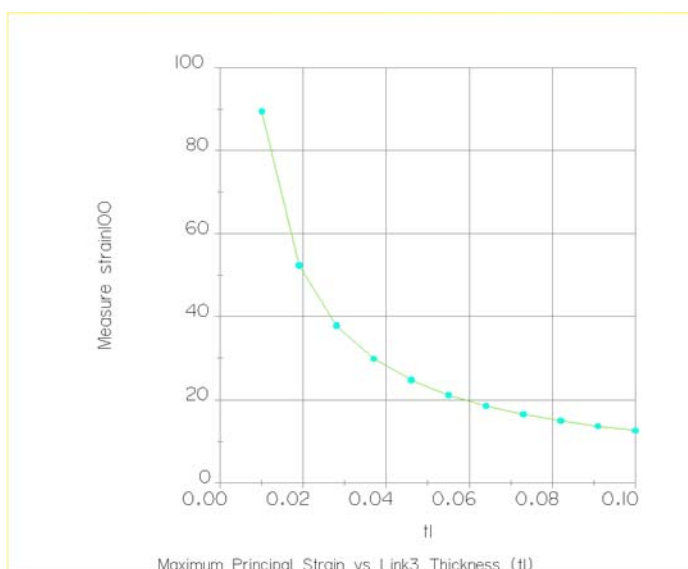
รูปที่ 4. 37 ตัวแปรขนาดของแขนส่งกำลังที่นำมาพิจารณา

จากการทำวิเคราะห์แขนส่งกำลัง แบบ Sensitivity Study โดยกำหนดให้ความหนาเป็นตัวพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 เมตร ถึง 0.10 เมตร ที่มีผลกระทบกับค่าความเค้นของ von Mises ค่าความเครียดหลัก และการขจัดของแขนส่งกำลัง ซึ่งได้ผลดังนี้

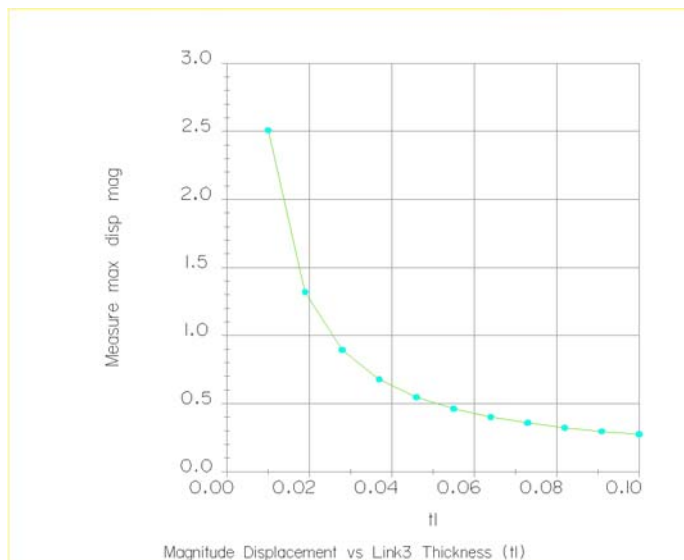
- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%



รูปที่ 4. 38 แสดงแนวโน้มของความเค้นของ von Mises เมื่อความหนาของแบบจำลองแกนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 1

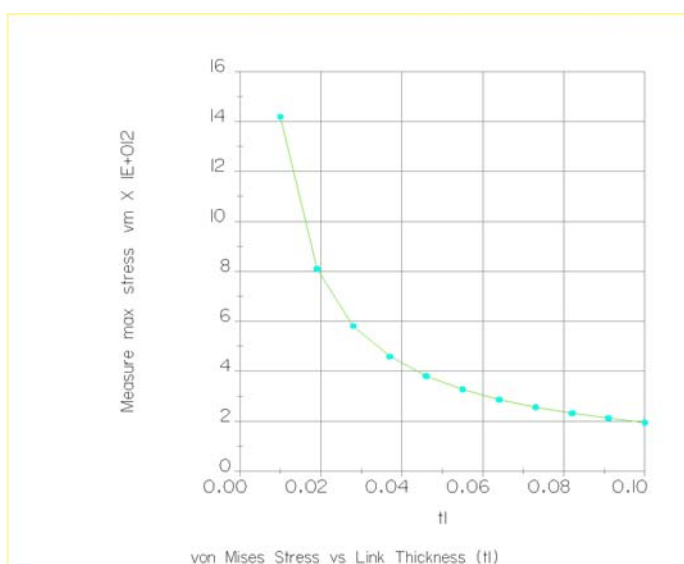


รูปที่ 4. 39 แสดงแนวโน้มของความเครียดหลักสูงสุดเมื่อความหนาของแบบจำลองแกนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 1

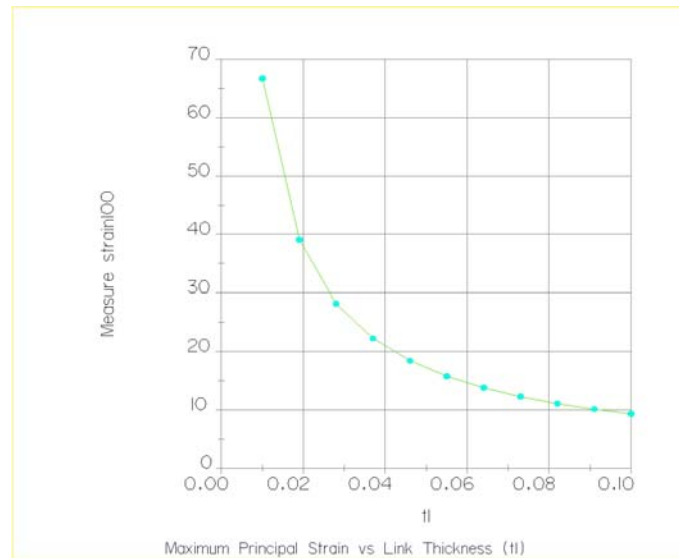


รูปที่ 4. 40 แสดงแนวโน้มของการขจัด เมื่อความหนาของแบบจำลองแกนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 1

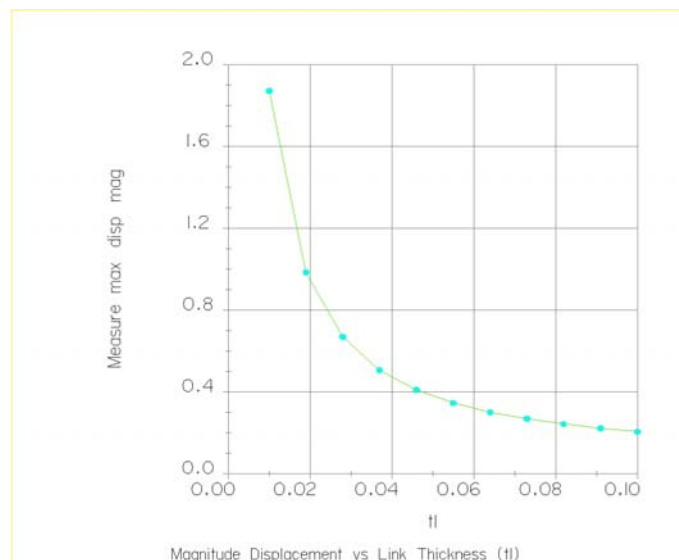
- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%



รูปที่ 4. 41 แสดงแนวโน้มของความเค้นของ von Mises เมื่อความหนาของแบบจำลอง แกนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 2



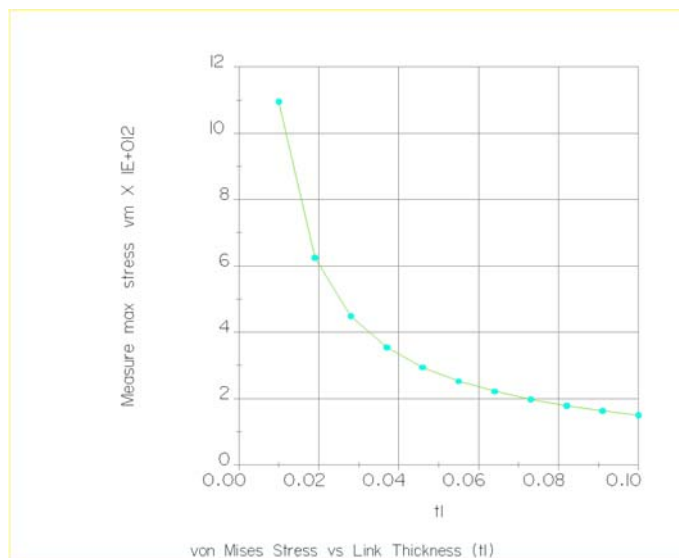
รูปที่ 4. 42 แสดงแนวโน้มของความเครียดหลักสูงสุด เมื่อความหนาของแบบจำลองแขนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 2



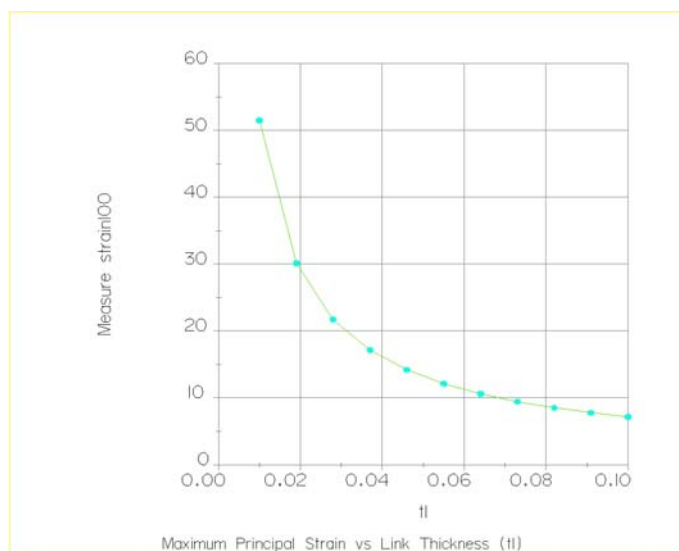
รูปที่ 4. 43 แสดงแนวโน้มของการขจัด เมื่อความหนาของแบบจำลองแขนส่งกำลังเพิ่มขึ้น กรณีที่ 2



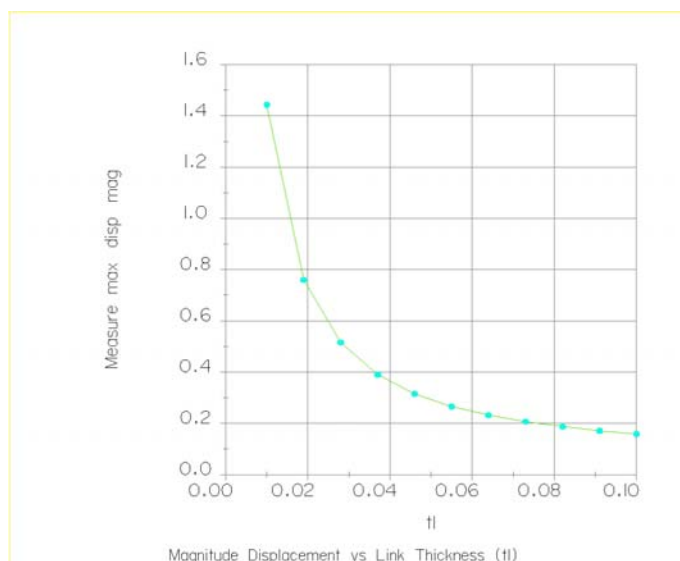
- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%



รูปที่ 4.44 แสดงแนวโน้มของความเค้นของ von Mises เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 3



รูปที่ 4.45 แสดงแนวโน้มของความเครียดหลักสูงสุด เมื่อความหนาของแบบจำลอง แขนส่งกำลัง เพิ่มขึ้น กรณีที่ 3



รูปที่ 4. 46 แสดงแนวโน้มของการขจัดเมื่อความหนาของแบบจำลองแกนส่งกำลังเพิ่มขึ้นกรณีที่ 3

#### 4.5 วิเคราะห์ผลการวิเคราะห์แบบส่งกำลัง

จากฟังก์ชันการครากของบรรทัดฐานการครากของมิต<sup>3</sup>

$$f = \sigma_c^2 - Y^2$$

โดย  $\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$  หรือคือ ความเค้นของมิต

ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pro/MECHANICA Structure จะได้ค่าความเค้นของมิต และจากฟังก์ชันการครากในสมการข้างบนนี้ กำหนดไว้ว่าวัสดุจะเกิดการครากเมื่อ  $f = 0$  นั่นคือ

$$\sigma_c^2 = Y^2$$

หรือ

$$\sigma_c = Y$$

เมื่อ  $Y$  คือค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Yield Strength) สำหรับแผ่นรับแรงใช้เหล็ก SCM4 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 329 MPa ซึ่งหมายความว่าวัสดุจะเกิดการครากเมื่อความเค้นของมิตมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ และจากข้อมูลข้างต้น จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

ความเค้นของแบบจำลองในกรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% มีสูงสุดค่าเท่ากับ  $1.039558 \times 10^{13}$  Pa มีค่าสูงกว่า Yield Strength ของวัสดุ (SCM4) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 329 MPa เท่า

<sup>3</sup> ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก

กับ 31,597 เท่า จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะพบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดคือบริเวณรูสวมสลัก และบริเวณส่วนปลายด้านที่รับแรงกระทำนั้นเกิดความเค้นมีค่าอยู่ระหว่าง  $4.681 \times 10^{12}$  Pa ถึง  $5.824 \times 10^{12}$  Pa มีค่าสูงกว่า Yield Strength ของวัสดุ 14,012 ถึง 17,702 เท่า สำหรับในกรณีที่ 2 และ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70% และ 50% ตามลำดับนั้น เมื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ค่าความเค้นมีค่าลดลงด้วย และเมื่อทำการเปรียบเทียบกรณีที่ 2 และ 3 กับกรณีที่ 1 แล้วสามารถสรุปได้ดังนี้

- กรณีที่ 2 มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $7.746403 \times 10^{12}$  Pa ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ 1 เท่ากับ 25.48%
- กรณีที่ 3 มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ  $5.980295 \times 10^{12}$  Pa ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ 1 เท่ากับ 42.47%
- กรณีที่ 3 มีค่าความเค้นต่ำกว่ากรณีที่ 2 เท่ากับ 22.80%

สำหรับความเครียดที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 50.20 เมื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ความเครียดจะลดลงด้วย โดยในกรณีที่ 2 มีค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ 37.4 และกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 28.88 และบริเวณที่เกิดความเครียดสูงสุดคือบริเวณรูสวมสลัก

การจัดของแบบจำลองแขนส่งกำลัง ส่วนที่เกิดการจัดสูงสุดคือส่วนปลายด้านที่ไม่มีรูสวมสลัก ในกรณีที่ 1 นั้นมีค่าการจัดสูงสุดเท่ากับ 1.2544 m ในกรณีที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.93473 m และกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.72162 m ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก

จากค่าความเค้น ความเครียด และการจัดของแบบจำลองแขนส่งกำลังที่วิเคราะห์ได้นั้น ทำให้สรุปได้ว่า แขนส่งกำลังจะเกิดความเสียหายอย่างแน่นอนเมื่อเครื่องยนต์หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 2,000 rpm

เมื่อแขนส่งกำลังที่ออกแบบมาในขั้นต้นเกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบแขนส่งกำลังใหม่ โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของแขนส่งกำลังกับค่าความเค้น ความเครียด และการจัด ซึ่งเลือกขนาดความหนา ( $t_1$ ) จากรูป 4.37 ประกอบ เป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง จาก 0.01 m ถึง 0.1 m ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.38 ถึง 4.46 พิจารณาที่กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100% นั้น พบว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นค่าความเค้นจะลดลงอย่าง exponential (รูปที่ 4.38) และเป็นเช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 2 และ 3 โดยเมื่อ ค่าความหนามีค่าเท่ากับ 0.1 m จะได้ค่าความเค้นในกรณีที่ 1 เท่ากับ  $2.6201 \times 10^{12}$  Pa ในกรณีที่ 2 เท่ากับ  $1.9524 \times 10^{12}$  Pa และในกรณีที่ 3 เท่ากับ  $1.4996 \times 10^{12}$  Pa ซึ่งยังคงสูงกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุอยู่นั่นเอง

สำหรับความเค้นหลักที่ความหนาเท่ากับ 0.1 m มีค่าเท่ากับ 12.519, 9.3290 และ 7.1651 ในกรณีที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และการขจัดที่ความหนาเท่ากับ 0.1 m มีค่าเท่ากับ 0.27422 m, 0.20434 m และ 0.15793 m

จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ทำให้ทราบแนวโน้มว่า เมื่อขนาดความหนาเพิ่มขึ้นค่าความเค้น ความเครียด และการขจัดจะลดลงอย่าง exponential ซึ่งจากรูปที่ 4.37 ถึง 4.46 นั้น เส้นกราฟกำลังดูเข้าค่าหนึ่งค่า ซึ่งแม้จะทำการเพิ่มความหนาขึ้นไปอีกก็จะไม่ทำให้ค่าความเค้น ความเครียด และการขจัดลดลงมากไปกว่านี้ได้ และการเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลังก็จะเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับกลไกรวมไปถึงเครื่องยนต์อีกด้วย ดังนั้นจึงไม่ทำการวิเคราะห์ต่อสำหรับการเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลัง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดของกลไกจักรกล 2 ชั้น ของเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบใหม่ คือ แผ่นรับแรงและแขนส่งกำลัง ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์แผ่นรับแรง

จากรูปแสดงการกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นรับแรง จะเห็นว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด ส่วนใหญ่จะอยู่ที่บริเวณรอยต่อของแผ่นรับแรงกับคอกของแผ่นรับแรง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการลดหน้าตัด สำหรับการขยายตัวของแผ่นรับแรงได้ถูกกำหนดเงื่อนไขไว้ตามที่กล่าวในข้างต้น และเนื่องจากการจำกัดการเคลื่อนตัวโดยรอบความหนาของแผ่นรับแรง โดยกำหนดระยะที่สามารถยืดตัวได้เพียง 0.0005 mm ให้ใกล้เคียงกับสถานะจริงของแผ่นรับแรง แต่เนื่องจากภาวะกรรมที่ทำให้ทั้งแรงดันและอุณหภูมิจะทำให้แผ่นรับแรงขยายตัวออกมามากกว่านั้น จึงทำให้เกิดความเค้นบริเวณโดยรอบแผ่นรับแรงและเกิดมากที่สุดบริเวณรอยต่อของแผ่นรับแรงนั่นเอง และขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นรับแรง 178.84 เท่า และบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดเป็นบริเวณเล็กๆ แต่อย่างไรก็ดีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทางนั้น ก็ยังคงสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุอยู่นั่นเอง ดังนั้นแผ่นรับแรงจึงไม่อาจทนต่อภาวะกรรมที่เกิดขึ้นได้และเกิดความเสียหายขึ้นในที่สุด และเป็นเช่นเดียวกันนี้กับ สำหรับในกรณีที่ 2 และ 3 นั้น ซึ่งมีค่าความเค้นแตกต่างจากกรณีที่ 1 เพียง 0.001%

การที่ความเค้นมีค่าสูงมากเช่นนี้ อาจเป็นเพราะภาวะกรรมที่กำหนดให้มีค่าสูงมากเกินไปกว่าที่แผ่นรับแรงจะสามารถทนได้ เพราะวัสดุที่เลือกใช้นี้มีค่า Yield Strength สูงมาก และยังเป็นเหล็กที่ทนความร้อนได้สูงคือมีจุดหลอมละลายเท่ากับ 1421.11°C อีกด้วย ส่วนสาเหตุอื่นที่ทำให้ค่าความเค้นมีค่าสูงมาก ก็อาจเป็นเพราะเงื่อนไขข้อกำหนดของแบบจำลองที่จำกัดการเคลื่อนที่ของแผ่นรับแรง แต่เนื่องจากเงื่อนไขข้อกำหนดที่ใส่เข้านี้ต้องการจะให้ความใกล้เคียงกับสภาพการทำงานจริงของแผ่นรับแรงมากที่สุด ดังนั้นจึงไม่อาจจะเปลี่ยนเงื่อนไขข้อกำหนดได้

**ข้อเสนอแนะ** การแก้ไขการออกแบบเพื่อให้แผ่นรับแรงสามารถทนต่อภาระกรรมในลักษณะเช่นนี้ได้ นั้น อาจจะต้องทำการแก้ไขที่วัสดุที่นำมาทำเสียก่อน โดยแก้ไขคุณสมบัติของวัสดุ โดยวิธีการทางโลหะวิทยา หรือการคั่นหาวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงสูงมากกวานี้ เพราะการแก้ไขขนาดและรูปร่างของแผ่นรับแรง จะมีผลกระทบกับส่วนอื่นของเครื่องยนต์ ที่จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากเพิ่มขึ้นไปอีก

### 5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์แขนส่งกำลัง

จากการวิเคราะห์แขนส่งกำลังในแต่ละกรณีของประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้น เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความเค้นบนแขนส่งกำลังแล้ว บริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่บริเวณรูสวมสลักซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ ทำให้แขนส่งกำลังเกิดความเสียหาย และเมื่อทำการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียด และการขจัดของแขนส่งกำลัง เพื่อทำการลดค่าความเค้นที่เกิดจากภาระกรรมบนแขนส่งกำลังลง โดยทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของแขนส่งกำลังแล้วนั้น พบว่า แม้ว่าจะเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลังจนมีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร แล้วก็ตาม ความเค้นก็ยังคงสูงกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุ และจากแนวโน้มของกราฟซึ่งเป็นรูป exponential นั้น แม้ว่าจะเพิ่มความหนาขึ้นอีกก็ไม่ได้ทำให้ความเค้นลดลงต่ำจนถึงค่าที่ต้องการได้ และหากยิ่งเพิ่มความหนาขึ้นไปอีก น้ำหนักของแขนส่งกำลังก็จะเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งจะเกิดภาระกรรมเพิ่มขึ้นกับแขนส่งกำลังที่ต้องรับแรงเฉื่อยของตัวเองอีกด้วย ดังนั้นการเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลังถึงจะช่วยให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงก็จริงแต่ก็ก่อให้เกิดผลเสียด้วย

**ข้อเสนอแนะ** การที่แขนรับแรงเกิดความเสียหาย สาเหตุที่เกิดเนื่องมาจากภาระกรรมที่กำหนดให้ นั้นมีค่ามากเกินไปกว่าที่แขนส่งกำลังจะรับได้ ซึ่งภาระกรรมที่ให้นั้นเกิดจากการคำนวณที่จำลองสถานการณ์ในลักษณะเลวร้ายที่สุดที่จะสามารถเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์นี้ได้ และเนื่องจากเครื่องยนต์ยังไม่ได้ทำการทดลองติดเครื่องจริง จึงไม่อาจทราบได้ว่าสถานการณ์ที่จำลองขึ้นนั้น เป็นจริงมากน้อยเพียงใด และมีเงื่อนไขใดเพิ่มเติมหรือไม่ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นเพียงการประเมินสิ่งที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากสถานการณ์จำลองนี้ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นหรือไม่ก็ได้ แต่ก็ได้ทำการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและวิเคราะห์ในเบื้องต้นของแขนส่งกำลัง ซึ่งเป็นชิ้นส่วนกลไกที่มีบทบาทสำคัญในเครื่องยนต์นี้

## 5.2 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงาน

ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ปัญหาใหญ่ๆ คือ

1. ปัญหาเนื่องจากการใช้โปรแกรม
2. ปัญหาเนื่องมาจากแหล่งข้อมูลของโปรแกรม

### 5.2.1 ปัญหาเนื่องจากการใช้โปรแกรม

โปรแกรมที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์เพื่อทำการวิเคราะห์หลักไกจกักรกคนี้มี 2 โปรแกรมด้วยกัน คือ Pro/ENGINEER เป็นโปรแกรมช่วยการออกแบบ (CAD) และ Pro/MECHANICA เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟในค้อลิเมนต์ ปัญหาที่พบจากการใช้โปรแกรมสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขั้นตอนในการทำการวิเคราะห์ด้วย Pro/MECHANICA เป็นขั้นตอนที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนพอสมควร ยกตัวอย่างเช่น การลำดับขั้นในการเลือกคำสั่ง มีหลายขั้นตอน เป็นต้น
2. การนำเสนอผลการวิเคราะห์ของ Pro/MECHANICA จะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์ทั้งแบบ Fringe plot และ Contour plot ในบทที่ 3 และ 4 เป็นรูปที่ดูค่อนข้างลำบาก และเนื่องจากโปรแกรม Pro/MECHANICA ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีนั้น เป็น Student version ซึ่งโปรแกรม Pro/MECHANICA ต้องทำงานอยู่บน Pro/ENGINEER ซึ่งหากเป็น Professional version โปรแกรม Pro/MECHANICA จะสามารถทำงานแยกต่างหาก ซึ่งจะสามารถนำเสนอการวิเคราะห์โดยแสดงการแบ่งอิลิเมนต์บนรูปของผลการวิเคราะห์ได้ ซึ่ง Student edition ไม่สามารถทำได้

สำหรับปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง คือ Pro/ENGINEER กับ โปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ คือ Pro/MECHANICA เนื่องจากเป็นโปรแกรมในตระกูลเดียวกัน จึงไม่พบปัญหาใดๆ ในการทำงานร่วมกันของโปรแกรมทั้งสอง และแบบจำลองทั้งสองก็ไม่มี ความซับซ้อนด้วย

สำหรับการแบ่งหน้าที่ที่ชัดเจนในแต่ละ โมดูลของ Pro/MECHANICA ผู้วิจัยเห็นว่าเป็นสิ่งดี เนื่องจากทำให้ผู้ใช้แยกแยะการทำงานในแต่ละขั้นตอนได้ชัดเจน และเป็นแนวคิดที่ดี เป็นการใช้ทรัพยากรร่วมกันของแต่ละ โมดูล ทำให้เกิดการประหยัดในด้านของการสร้างโปรแกรม ตัวอย่างเช่น หากโมดูลที่ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่สามารถที่จะวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดได้ในตัว การสร้างโมดูลนี้ก็จะต้องเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ Structure เข้าไป ซึ่งจะทำให้โมดูลมีขนาดใหญ่และอาจใช้เวลาในการ

วิเคราะห์นานขึ้นกว่าเดิม และเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น ถ้าหากมีโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ Structure ที่สามารถใช้งานร่วมกันได้อยู่แล้ว

### 5.2.2 ปัญหาเนื่องมาจากแหล่งข้อมูลของโปรแกรม

เนื่องจากมีโปรแกรมในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์ในปัจจุบัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นมีอยู่มากมายหลายโปรแกรมด้วยกัน และโปรแกรม Pro/MECHANICA เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์ ที่พัฒนาควบคู่ไปกับโปรแกรมช่วยออกแบบ คือ Pro/ENGINEER ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใหม่ และยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก รวมไปถึงราคาที่ค่อนข้างแพง ดังนั้นแหล่งข้อมูลเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม เช่น คู่มือ หนังสือ และบทความวิจัยที่นำโปรแกรม Pro/MECHANICA มาใช้จึงมีค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์อื่นๆ โดยเฉพาะคู่มือการใช้งานจะเป็นบางโมดูลเท่านั้น ส่วนใหญ่จะมีเฉพาะโมดูลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างและการเคลื่อนที่



## รายการอ้างอิง

- กนต์ธร ชำนิประศาสน์, (2545). เอกสารประกอบการสอนเรื่องกลศาสตร์วัสดุขั้นสูง. สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ, (2537). ไฟไฟต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, ประเทศไทย
- Bickford, W. (1998). **Advanced mechanics of materials**. Addison Wesley Langman, USA.
- Boresi, P. A., Schmidt, R. T., and Sidebottom, O. M. (1993) **Advanced mechanics of materials**.  
5<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, Singapore.
- Beer, P. F., and Johnston, Jr. R. (1992). **Mechanics of Materials**. 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill,  
Singapore.
- Carrino, A., Guidi, L. and Speranza, D. (2001). Development of a procedure for the optimized  
design of thermoelectric generation components using Pro/MECHANICA software. **XII  
ADM International Conference**, Italy, Sept.5<sup>th</sup> – 7<sup>th</sup>.
- Central Sales Office, Principal Metals. **Hardness conversion** [On-line]. Available: [http://www.  
principalmetals.com/utilities/hardness.htm](http://www.principalmetals.com/utilities/hardness.htm)
- Chen, X., Nakamura, K., Mori, M., and Hisada, T. (2000). Sensitivity analysis for thermal stress  
and creep problems. **JSME International Journal**. 43 (3).
- Collins, J. A., (1993). **Failure of Materials in Mechanical Design**. 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley &  
Sons, USA.
- Erdman, A. G., and Sandor, G. N. (1991) **Mechanism design: Analysis and synthesis**. 2<sup>nd</sup>  
edition, Prentice-Hall, USA.
- Gagnon, Y. (2000). **Pro/MECHANICA Structure 2000i<sup>2</sup>: Element and Applications  
(Integrated Mode)**. SDC Publications, USA.
- Heywood, J. B. (1988). **Internal combustion engine fundamental**. McGraw-Hill, Singapore.
- Holman, P. J. (1990). **Heat Transfer**. 7<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, Singapore.
- Krishnaswamy, S. (1994). **760-C62 Stress analysis** [On-line]. Available: [http://www.cqe.nwu.  
edu/sk/C62/stress.pdf](http://www.cqe.nwu.edu/sk/C62/stress.pdf)

- Logan, L. D. (1993). **A first course in the finite element method**. 2<sup>nd</sup> edition, PWS Publishing, USA.
- Lueptow, M. R., Snyder, T. M., and Steger, J. (2001). **Graphics concepts with Pro/ENGINEER**. Prentice-Hall, USA.
- Metal suppliers online, **Material property data** [On-line]. Available: <http://www.suppliersonline.com/research/property/metals/2642.asp>
- Milton, B. E. (1995). **Thermodynamics, Combustion and Engines**. 1<sup>st</sup> edition, Chapman & Hall, UK.
- Norton, R. L. (1999). **Design of machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms of machinery**. 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, Singapore.
- Parametric Technology Corporation, (1998). **Pro/MECHANICA using structure with Pro/ENGINEER: Release 20.0**. USA.
- Parametric Technology Corporation (2000) **Suggested technique for creating surface regions within holes or cylindrical cutouts** [On-line]. Available: [http://www.ptc.com/cs/cs\\_21/howto/mst731/mst731.htm](http://www.ptc.com/cs/cs_21/howto/mst731/mst731.htm)
- Parametric Technology Corporation (2000) **Suggested technique for constraining a model in static equilibrium** [On-line]. Available: [http://www.ptc.com/cs/cs\\_21/howto/mst727/mst727.htm](http://www.ptc.com/cs/cs_21/howto/mst727/mst727.htm)
- Parametric Technology Corporation (2000) **Suggested technique for preparing an assembly for motion analysis** [On-line]. Available: [http://www.ptc.com/cs/cs\\_21/howto/mst704/mst704.htm](http://www.ptc.com/cs/cs_21/howto/mst704/mst704.htm)
- Parametric Technology Corporation (2000) **Suggested technique for transferring integrated motion load into structure** [On-line]. Available: [http://www.ptc.com/cs/cs\\_21/howto/mst1245/mst1245.htm](http://www.ptc.com/cs/cs_21/howto/mst1245/mst1245.htm)
- Parametric Technology Corporation (2000) **Suggested technique for troubleshooting insufficiently constrained models** [On-line]. Available: [http://www.ptc.com/cs/cs\\_21/howto/mst1375/mst1375.htm](http://www.ptc.com/cs/cs_21/howto/mst1375/mst1375.htm)
- Pro/MECHANICA Process advisor [Data file]. (2001). USA: Parametric Technology Corporation
- Pulkrabek, W. W. (1997). **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. Prentice-Hill, USA.

- Segerlind, L. J. (1984). *Applied finite element analysis*. 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, USA.
- Shames, I. H., and Cozzarelli, F. A. (1992). **Elastic and Inelastic Stress Analysis**. 1<sup>st</sup> edition, Prentice-Hall, USA.
- Shigley, J. E., and Mischke, C. R. (1989). **Mechanical Engineering Design**. 5<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, Singapore.
- Shigley, J. E., and Uiker, J. J., Jr. (1995). **Theory of Machines and Mechanisms**. 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, Singapore.
- Short, K. (2002). **Adaptivity methods in Pro/MECHANICA Structure** [On-line]. Available: <http://www.ptc.com/products/proe/sim/adaptivity.pdf>
- Sugita, J., Iton T., and Abe, T. (1990). Engine component design system using BEM
- Toogood, R. (2000). **Pro/MECHANICA Structure Release 2000i<sup>2</sup> : Integrated Mode**. SCD Publications, USA.
- Wang K. L. (1999). **ME 371/5765: Computer-aided design** [On-line]. Available: <http://www-me.engr.ccny.cuny.edu/content/courses/me371-5765.html>
- Weins, W. (2000). 2001 SAE Mini Baja design by the University of Nebraska-Lincoln vehicle number 20. **Society of automotive engineers, Inc.** University of Nebraska-Lincoln.

ภาคผนวก ก

ทฤษฎี การคำนวณที่เกี่ยวข้อง และ Script file โปรแกรม MATLAB

## ก.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### ก.1.1 บรรทัดฐานการคราก (เกณฑ์คราก ข่านิประศาสน์, 2545, บทที่ 5)

บรรทัดฐานการครากที่จะสามารถใช้กำหนดเพื่อคาดการณ์การครากหรือการแตกหักของวัสดุได้ทุกชนิดมีหลายแบบด้วยกัน สำหรับความเหมาะสมของบรรทัดฐานแต่ละแบบนั้นจะตรวจสอบได้เมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1. บรรทัดฐานของความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress Criterion) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Rankine's Criterion กำหนดว่า “การครากของวัสดุจะเริ่มขึ้นเมื่อค่าความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นที่จุดใดในวัสดุมีค่าเท่ากับค่าความเค้นครากที่ได้จากการทดสอบแรงดึงปกติ”
2. บรรทัดฐานความเครียดหลักสูงสุด (Maximum Principal Strain Criterion) หรือรู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า St. Venant's Criterion กำหนดไว้ว่า “การครากของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดหลักสูงสุดที่จุดใดในวัสดุมีค่าเท่ากับค่าความเครียดคราก  $\epsilon_Y = \frac{Y}{E}$ ”
3. บรรทัดฐานความหนาแน่นพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Criterion) ได้รับการนำเสนอโดย Beltrami ซึ่งได้กำหนดบรรทัดฐานไว้ว่า “การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพลังงานความเครียดที่จุดใดในวัสดุ มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของพลังงานความเครียดที่ทำให้เกิดการครากที่ได้จากการตรวจสอบแรงดึงปกติ”
4. บรรทัดฐานความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear - Stress Criterion) หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Tresca Criterion สำหรับบรรทัดฐานนี้กำหนดการครากไว้ว่า “การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดใดในวัสดุมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีการทดสอบแรงดึงปกติ”
5. บรรทัดฐานความหนาแน่นของพลังงานผิดรูป (Distortion Energy Density Criterion) หรือบรรทัดฐานของพลังงานผิดรูป หรือรู้จักกันในชื่อ บรรทัดฐานของมิส (Von Mises Criterion) ซึ่งกำหนดบรรทัดฐานของการครากไว้ว่า “การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพลังงานผิดรูปที่จุดใด เท่ากับความหนาแน่นของพลังงานผิดรูป เมื่อเกิดการครากในกรณีการทดสอบด้วยแรงดึงปกติ”

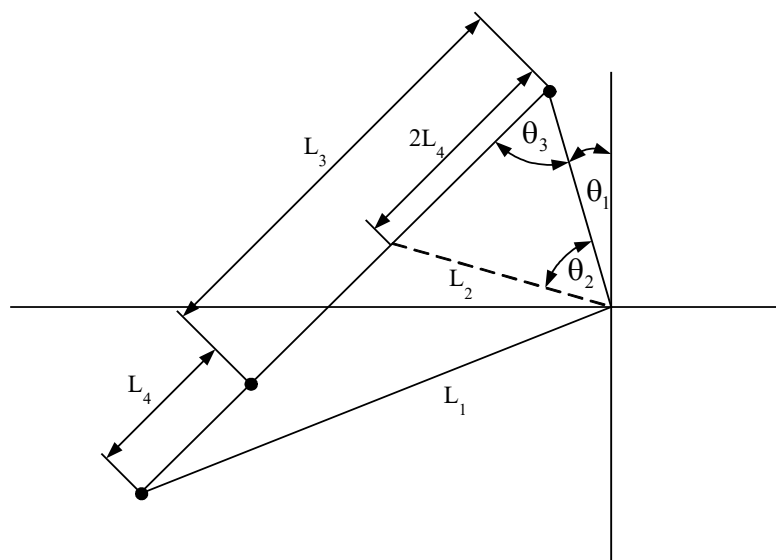
## ก.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

- การคำนวณหาความยาวแขนส่งกำลัง

กำหนดให้

- ความยาว link ที่สั้นที่สุด ( $L_4$ ) = 2 cm
- ความยาว link ที่ยาวที่สุด ( $L_1 = r_1 + r_2$ ) = 9 cm

วิธีทำ



รูปที่ ก.1 รูปประกอบการคำนวณหาความยาวของ Connecting rod

- ▶ ความยาว link ที่ 2 ( $L_2$ )

จากรูปที่ 5 ใช้กฎของ sin จะได้ว่า

$$\frac{L_2}{\sin \theta_2} = \frac{2L_4}{\sin \theta_3} \quad (\text{ก 1})$$

- ▶ ความยาว Connecting rod ( $L_3$ )

จากรูปที่ 5 ใช้กฎของ cosin จะได้ว่า

$$L_1^2 = L_2^2 + (L_3 + L_4)^2 - 2L_2(L_3 + L_4)\cos(\theta_3) \quad (\text{ก 2})$$

และเราจะได้  $L_3$  เป็น

$$L_3 = \left( L_1^2 + 2L_2L_4 \cos(\theta_3) - L_4^2 - L_2^2 \right)^{1/2} \quad (\text{ก 3})$$

► Check Grasoft's Law

Link ที่สั้นที่สุด + Link ที่ยาวที่สุด จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับผลรวมของ Link ที่เหลือ หรือ

$$L + s \leq p + q$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ในที่นี้คือ

$$L_4 + L_1 \leq L_2 + L_3 \quad (\text{ก 4})$$

### ก.3 Script M-file โปรแกรม MATLAB

#### ก.3.1 Script M-file สำหรับแผนรับแรง

##### - Air Standard Cycle

```
rc = 8;
k = 1.35;
Cp = 1.108e3;
Cv = 0.821e3;
R = Cp - Cv;
P0 = 101.325e3;
P1 = P0;
T0 = 300;
T1 = T0;
V3 = 62.458e-6;
V6 = V3;
V2 = V3;
V1 = 500e-6;
QHV = 44e6;
eff = 0.5;
AF = 14.3;

% Process 1-2
T2 = T1*(rc)^(k-1);
P2 = P1*(rc)^k;
w1_2 = Cv*(T1-T2);

% Process 2-3
mm = P1*V1/(R*T1);
ma = (AF/(AF+1))*mm;
mf = (1/(AF+1))*mm;
Qin = mf*QHV*eff;
T3 = (Qin/(mm*Cv))+T2;
P3 = P2*(T3/T2);

% Process 3-4
T4 = T3*(1/rc)^(k-1);
P4 = P3*(1/rc)^k;
w3_4 = Cv*(T3-T4);

% Process 4-5
Qout = mm*Cv*(T1-T4);

% Process 5-6
w5_6 = P0*(V6-V1)/mm;
eff_th = 1-((T4-T1)/(T3-T2));

theta = (17:1:34)*pi/180;
constant_P = P3*(V3/mm)^k;
constant_T = T3*(V3/mm)^(k-1);
```

```

P_theta = constant_P./ (0.7614*theta-0.11965).^k;
T_theta = constant_T./ (0.7614*theta-0.11965).^(k-1);

fprintf('theta (degree)      P(theta) (Pa) \n')
for l=1:18
    fprintf('%5.2f           %5.4f\n',theta(l)*180/pi,P_theta(l))
end

fprintf('theta (degree)      T(theta) (K) \n')
for l=1:18
    fprintf('%5.2f           %5.4f\n',theta(l)*180/pi,T_theta(l))
end

plot(theta*180/pi,P_theta)
grid
title('Pressure vs \theta')
xlabel('\theta (degree)')
ylabel('Pressure (Pa)')
figure
plot(theta*180/pi,T_theta)
grid
title('Temperature vs \theta')
xlabel('\theta (degree)')
ylabel('Temperature (K)')

```

### ก.3.2 Script M-file สำหรับแขนส่งกำลัง

#### - Kinematics Analysis

```

% Crank and rock mechanism
% Position Analysis and Velocity Analysis
% pi <= Theta2 <= 2*pi

n=201;
theta1=-28*pi/180;
theta2=linspace(-pi,pi,n);
%theta2=28*pi/180;
w2=3.14159; %rad/s

% Constant unit in mm
a=30;
b=105.9;
c=63.9;
d=120;
t=linspace(0,2,n);

f1=fopen('c:\MATLABR12\work\data_pos_vel_conrod.txt','wt');
fprintf(f1,'t          theta2      theta3      theta4');
fprintf(f1,'          w2          w3          w4');
fprintf(f1,'          alpha3          alpha4\n\n');

for k=1:n
    Ax=a*cos(theta2(k));
    Ay=a*sin(theta2(k));
    S = ((a^2-b^2+c^2-d^2)/(2*(Ax-d)));
    P = (Ay^2/(Ax-d)^2)+1;
    Q = 2*Ay*(d-S)/(Ax-d);
    R = (d-S)^2-c^2;
    By = (-Q+sqrt(Q^2-4*P*R))/(2*P);
    Bx = S-2*Ay*By/(2*(Ax-d));
    theta3(k) = atan2((By-Ay),(Bx-Ax))+28*pi/180;
    theta4(k) = atan2(By,(Bx-d))+28*pi/180;
    A1=[b*sin(theta3(k)) -c*sin(theta4(k));b*cos(theta3(k)) -c*cos(theta4(k))];
    B1=[-a*sin(theta2(k))*w2
        -a*cos(theta2(k))*w2];
    C1=A1\B1;
    w3(k)=C1(1);
    w4(k)=C1(2);
    A2=[b*sin(theta3(k)) -c*sin(theta4(k));b*cos(theta3(k)) -c*cos(theta4(k))];
    B2=[-(w2)^2*a*cos(theta2(k))-(w3(k))^2*b*cos(theta3(k))+(w4(k))^2*c*cos(theta4(k))
        (w2)^2*a*sin(theta2(k))+(w3(k))^2*b*sin(theta3(k))-(w4(k))^2*c*sin(theta4(k))];
    C2=A2\B2;
    alpha3(k)=C2(1);
    alpha4(k)=C2(2);
    fprintf(f1,'%4.5f           ',t(k));
    fprintf(f1,'%4.5f           %4.5f
    %4.5f',theta2(k)*180/pi,theta3(k)*180/pi,theta4(k)*180/pi);
    fprintf(f1,'          %4.5f           %4.5f           %4.5f',w2,w3(k),w4(k));
    fprintf(f1,'          %4.5f           %4.5f\n',alpha3(k),alpha4(k));
end
fclose(f1);

plot(t,theta2,'-o')
grid on
xlabel('time')
ylabel('Angular Position of link 2')
figure;
plot(t,theta3,'-v')
grid on
xlabel('time')
ylabel('Angular Position of link 3')
figure;
plot(t,theta4,'-*')
grid on
xlabel('time')

```



```

ylabel('Angular Position of link 4')
figure;
plot(t,w3,'-h')
grid on
xlabel('time')
ylabel('Angular Velocity of link 3')
figure;
plot(t,w4,'-x')
grid on
xlabel('time')
ylabel('Angular Velocity of link 4')
figure;
plot(t,alpha3,'-p')
grid on
xlabel('time')
ylabel('Angular Acceleration of link 3')
figure;
plot(t,alpha4,'-s')
grid on
xlabel('time')
ylabel('Angular Acceleration of link 4')

```

## - Dynamics Analysis

```

m2=0.74798;
m3=0.4832;
m4=0.98166;
IG2=0.0002925;
IG3=0.001829;
IG4=0.0011524;
R12x=0;
R12y=0;
R32x=0.03*cos(28*pi/180);
R32y=0.03*sin(28*pi/180);
R23x=-0.05295*cos(28*pi/180);
R23y=-0.05295*sin(28*pi/180);
R43x=0.05295*cos(28*pi/180);
R43y=0.05295*sin(28*pi/180);
R34x=0.05902*cos(90*pi/180);
R34y=0.05902*sin(90*pi/180);
R14x=-0.00488*cos(90*pi/180);
R14y=-0.00488*sin(90*pi/180);
aG2x=-7261.987;
aG2y=3861.267;
alfa2=0;
aG3x=-5606.281;
aG3y=2332.522;
alfa3=52939.50;
aG4x=-11957.59;
aG4y=0;
alfa4=187129.73;
A=[1 0 1 0 0 0 0 0 0;
   0 1 0 1 0 0 0 0 0;
   -R12y R12x -R32y R32x 0 0 0 0 1;
   0 0 -1 0 1 0 0 0 0;
   0 0 0 -1 0 -1 0 0 0;
   0 0 R23y -R23x -R43y R43x 0 0 0;
   0 0 0 0 -1 0 1 0 0;
   0 0 0 0 0 -1 0 1 0;
   0 0 0 0 R34y -R34x -R14y R14x 0];
B=[m2*aG2x;
   m2*aG2y;
   IG2*alfa2;
   m3*aG3x;
   m3*aG3y;
   IG3*alfa3;
   m4*aG4x;
   m4*aG4y;
   IG4*alfa4];
F=A^(-1)*B;
F12=sqrt((F(1))^2+(F(2))^2);
F32=sqrt((F(3))^2+(F(4))^2);
F43=sqrt((F(5))^2+(F(6))^2);
F14=sqrt((F(7))^2+(F(8))^2);
theta12=atan2(F(1),F(2));
theta32=atan2(F(3),F(4));
theta43=atan2(F(5),F(6));
theta14=atan2(F(7),F(8));
fprintf('Force\n');
fprintf('F12 = %4.4f\n',F12);
fprintf('theta12 = %4.4f\n',theta12*180/pi);
fprintf('F32 = %4.4f\n',F32);
fprintf('theta32 = %4.4f\n',theta32*180/pi);
fprintf('F43 = %4.4f\n',F43);
fprintf('theta43 = %4.4f\n',theta43*180/pi);
fprintf('F14 = %4.4f\n',F14);
fprintf('theta14 = %4.4f\n',theta14*180/pi);
fprintf('T12 = %4.4f\n',F(9));

```

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลของวัสดุที่เลือกใช้

### ข.1 เหล็ก Tool Steel SKD11 หรือ D2

#### - ข้อมูลทั่วไป

Related Metals:		Specifications:	
	Microfine D2(tm)		ASTM A681 (D-2)
	High-Chrome(tm)		DIN 1.2379
	Thyrodur 2379(tm)		SAE J437
	Sverker 21(tm)		SAE J438
	Olympic(tm)		UNS T30402
	610(tm)		
	CNA 1(tm)		
	Aristocrat(tm)		
	AL3(tm)		
	Airdi 150(tm)		
	Ohio Die(tm)		

#### - องค์ประกอบทางเคมี

สารประกอบ	ปริมาณ
Carbon	1.4 - 1.6
Chromium	11 - 13
Cobalt	1 max
Iron	Balance
Manganese	0.6 max
Molybdenum	0.7 - 1.2
Phosphorus	0.03 max
Silicon	0.6 max
Sulphur	0.03 max
Vanadium	1.1 max

#### - คุณสมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่น (Density), $\rho$	= 7834.268 kg/m <sup>3</sup>
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	= 7.8
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	= 1421.11°C หรือ 1694.11K
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Young's Modulus), E	= 192.92 GPa
อัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's Ratio), $\nu$	= 0.3
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal expansion), $\alpha$	= 6.5 x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity), $k_c$	= 20 W/m.K
ความแข็งแรงเชิงดึง (Tensile Strength), $\sigma_y$	= 700 MPa

- คุณสมบัติทางกล

ตารางที่ ข.1 ตารางคุณสมบัติทางกลของ SKD11

		Mild steel	Free cut steel	Tool steel	Silver steel	Special alloy steel	Aust. stain less steel	Mart. stain less steel
Tensile strength	N/mm <sup>2</sup>	400	400	500	500	700	650	600
Hardened up to	HRC	-	-	60	62	63	-	50
Wear resistance		low	low	fair	good	excell	fair	good
Corrosion resistance		low	low	medium	high	high	excell	excell
Weld ability		good	no	good	good	some	excell	no
Polish ability		no	no	some	good	some	excell	good
Magnetizability		yes	yes	yes	yes	yes	no	yes
Price (in PH)		low	?	medium	high	v high	medium	v high
Machine ability		easy	excell	good	fair	diffic	diffic	fair
German standard type		St37		C40	1.2510	1.2379	1.4301	1.4028
Japan standard type		SPCC		S50C	SKS3	SKD11	SUS304	SUS420
USA standard type		A570		1040	O1	D1	304	420

Armin Möller and German Tool Consultancy & Services, Lipa, Batangas 2001 Feb 06

ข.2 SCM4 หรือ AISI 4140

- องค์ประกอบทางเคมี

สารประกอบ	ปริมาณ
Carbon	0.38 - 0.43
Chromium	0.8 - 1.1
Iron	Balance
Manganese	0.75 - 1
Molybdenum	0.15 - 0.25
Phosphorus	0.035 max
Silicon	0.15 - 0.35
Sulphur	0.04 max

- ข้อมูลทั่วไป

Related Metals:	Specifications:
Folder	AISI 4140
Finkl 4140(tm)	AMS 6349
Maxell Tooling	AMS 6381
Alloy(tm)	AMS 6382
	AMS 6390
	AMS 6395
	AMS 6529
	ASTM A193 (B7, B7M)

		<b>Specifications:</b>	ASTM A194 (7, 7M) ASTM A29 (4140) ASTM A320 (L7, L7M, L7D) ASTM A322 (4140) ASTM A331 (4140) ASTM A506 (4140) ASTM A513 ASTM A513 (4140) ASTM A519 (4140) ASTM A646 (4140) ASTM A711 ASTM A752 (4140) ASTM A829 SAE J1397 (4140) SAE J404 (4140) SAE J412 (4140) UNS G41400
--	--	------------------------	---

- คุณสมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่น (Density), $\rho$	=	7750.372 kg/m <sup>3</sup>
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	=	7.83
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Young's Modulus), E	=	227.526 Gpa
อัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's Ratio), $\nu$	=	0.3
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coeff. of Thermal expansion), $\alpha$	=	12.56 x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity), $k_c$	=	3.3166 W/m.K
ความแข็งแรงเชิงดึง (Tensile Strength), $\sigma_y$	=	329 MPa

- คุณสมบัติทางกายกล

ค่าความแข็งแรงของวัสดุเทียบจากตาราง ข 2 โดยที่คิดค่าความแข็ง Rockwell สเกล C (Rockwell Hardness C Scales) มีค่าอยู่ระหว่าง 58-60

ตารางที่ ข. 2 ตารางเทียบคุณสมบัติทางกลกับค่าความแข็งของวัสดุ

### Hardness Conversion

Brinell Hardness	Rockwell Hardness			Tensile Strength	Brinell Hardness	Rockwell Hardness			Tensile Strength
	A Scale 60KG	B Scale 100KG	C Scale 150KG			A Scale 60KG	B Scale 100KG	C Scale 150KG	
Tungsten Carbide Ball 3000 KG				(Approx.)	Tungsten Carbide Ball 3000 KG				(Approx.)
-	85.6	-	68.0	-	331	68.1	-	35.5	166,000
-	85.3	-	67.5	-	321	67.5	-	34.3	160,000
-	85.0	-	67.0	-	311	66.9	-	33.1	155,000
767	84.7	-	66.4	-	302	66.3	-	32.1	150,000
757	84.4	-	65.9	-	293	65.7	-	30.9	145,000
745	84.1	-	65.3	-	285	65.3	-	29.9	141,000
733	83.8	-	64.7	-	277	64.6	-	28.8	137,000
722	83.4	-	64.0	-	269	64.1	-	27.6	133,000
712	-	-	-	-	262	63.6	-	26.6	129,000
710	83.0	-	63.3	-	255	63.0	-	25.4	126,000
698	82.6	-	62.5	-	248	62.5	-	24.2	122,000
684	82.2	-	61.8	-	241	61.8	100.0	22.8	118,000
682	82.2	-	61.7	-	235	61.4	99.0	21.7	115,000
670	81.8	-	61.0	-	229	60.8	98.2	20.5	111,000
656	81.3	-	60.1	-	223	-	97.3	20.0	-
653	81.2	-	60.0	-	217	-	96.4	18.0	105,000
647	81.1	-	59.7	-	212	-	95.5	17.0	102,000
638	80.8	-	59.2	329,000	207	-	94.6	16.0	100,000
630	80.6	-	58.8	324,000	201	-	93.8	15.0	98,000
627	80.5	-	58.7	323,000	197	-	92.8	-	95,000
601	79.8	-	57.3	309,000	192	-	91.9	-	93,000
578	79.1	-	56.0	297,000	187	-	90.7	-	90,000
555	78.4	-	54.7	285,000	183	-	90.0	-	89,000
534	77.8	-	53.5	274,000	179	-	89.0	-	87,000
514	76.9	-	52.1	263,000	174	-	87.8	-	85,000
495	76.3	-	51.0	253,000	170	-	86.8	-	83,000
477	75.6	-	49.6	243,000	167	-	86.0	-	81,000
461	74.9	-	48.5	235,000	163	-	85.0	-	79,000
444	74.2	-	47.1	225,000	156	-	82.9	-	76,000
429	73.4	-	45.7	217,000	149	-	80.8	-	73,000
415	72.8	-	44.5	210,000	143	-	78.7	-	71,000
401	72.0	-	43.1	202,000	137	-	76.4	-	67,000
388	71.4	-	41.8	195,000	131	-	74.0	-	65,000
375	70.6	-	40.4	188,000	126	-	72.0	-	63,000
363	70.0	-	39.1	182,000	121	-	69.8	-	60,000
352	69.3	-	37.9	176,000	116	-	67.6	-	58,000
341	68.7	-	36.6	170,000	111	-	65.7	-	56,000

ภาคผนวก ค

ตารางผลการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์จาก Pro/MECHANICA

### ค.1 ตารางผลการวิเคราะห์จาก Pro/MECHANICA สำหรับแขนส่งกำลัง

ผลการวิเคราะห์ต่างๆ ส่วนใหญ่จะนำเสนอในรูปแบบของกราฟหรือรูปภาพ สำหรับภาคผนวกนี้จะรวบรวมตารางการผลการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้นำเสนอของกราฟกราฟไว้แล้ว

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์ของกลไกชิ้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion

เวลา	ความเร็วเชิงมุมของ ชิ้นที่ 3 (r/s)	ความเร่งเชิงมุมของ ชิ้นที่ 3 (r/s <sup>2</sup> )	โมเมนตัมความเฉื่อยของ ชิ้นที่ 3 (kg-m <sup>2</sup> )
0.0000	84.1299	37585.1100	0.0005276406
0.0010	115.5517	22308.7500	0.0005276406
0.0020	125.7673	2333.3700	0.0005276406
0.0030	109.2685	28544.9300	0.0005276406
0.0040	64.9438	54995.6000	0.0005276406
0.0050	5.1548	75423.0200	0.0005276406
0.0060	76.3958	74907.3000	0.0005276406
0.0070	129.5883	34578.8400	0.0005276406
0.0080	136.3061	19166.0300	0.0005276406
0.0090	103.0057	36175.8600	0.0005276406
0.0100	68.5620	32510.8700	0.0005276406
0.0110	41.2569	27026.7400	0.0005276406
0.0120	15.0725	25671.0800	0.0005276406
0.0130	12.7581	30104.9800	0.0005276406
0.0140	47.4048	37473.9500	0.0005276406
0.0150	86.8722	36763.5000	0.0005276406



ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ทางคินิเมติกส์ของกลไกชั้นที่ 4 ด้วย Pro/MECHANICA Motion

เวลา	ความเร็วเชิงมุมของ ชั้นที่ 4 (r/s)	ความเร่งเชิงมุมของ ชั้นที่ 4 (r/s <sup>2</sup> )	โมเมนตัมความเฉื่อยของ ชั้นที่ 4 (kg-m <sup>2</sup> )
0.0000	83.0921	72662.1900	0.0004584141
0.0010	10.2514	68727.9200	0.0004584141
0.0020	52.9347	55889.3600	0.0004584141
0.0030	105.2864	48329.7400	0.0004584141
0.0040	153.4982	45155.4600	0.0004584141
0.0050	194.5902	37232.8100	0.0004584141
0.0060	218.2709	1586.4710	0.0004584141
0.0070	183.1455	70724.1900	0.0004584141
0.0080	76.5979	123682.5000	0.0004584141
0.0090	46.9526	105955.4000	0.0004584141
0.0100	135.3248	67068.7600	0.0004584141
0.0110	180.7858	33812.1300	0.0004584141
0.0120	199.4357	3484.4450	0.0004584141
0.0130	187.9810	26058.2100	0.0004584141
0.0140	145.6198	55904.4300	0.0004584141
0.0150	77.1158	72817.0100	0.0004584141

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของกลไกชั้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion กรณี

ที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 100%

เวลา	แรงในแนวแกน X (N)	แรงในแนวแกน Y (N)	แรงในแนวแกน Z (N)	ขนาดของแรง (N)
0.0000	-2.5851E+09	2.1706E+02	-1.8190E-12	2.5851E+09
0.0010	-2.4151E+09	-1.5131E+06	-1.6485E-12	2.4151E+09
0.0020	-2.3013E+09	-2.7852E+06	-1.5916E-12	2.3013E+09
0.0030	-2.2923E+09	-1.8956E+06	-1.5348E-12	2.2923E+09
0.0040	-2.3908E+09	8.6919E+05	-1.6485E-12	2.3908E+09
0.0050	-2.5578E+09	5.8089E+06	-1.7621E-12	2.5579E+09
0.0060	-2.6867E+09	1.1821E+07	-1.8190E-12	2.6867E+09
0.0070	-2.6573E+09	1.4084E+07	-1.8190E-12	2.6573E+09
0.0080	-2.4994E+09	1.0607E+07	-1.7053E-12	2.4994E+09
0.0090	-2.3469E+09	6.2908E+06	-1.5916E-12	2.3469E+09
0.0100	-2.2828E+09	3.5198E+06	-1.6485E-12	2.2828E+09
0.0110	-2.3293E+09	1.5143E+06	-1.6485E-12	2.3293E+09
0.0120	-2.4704E+09	-4.3463E+04	-1.6485E-12	2.4704E+09
0.0130	-2.6353E+09	1.6963E+05	-1.8190E-12	2.6353E+09
0.0140	-2.6936E+09	2.1787E+06	-1.7621E-12	2.6936E+09
0.0150	-2.5856E+09	1.4755E+06	-1.7621E-12	2.5856E+09

ตารางที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของกลไกชั้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion กรณี

ที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70%

เวลา	แรงในแนวแกน X (N)	แรงในแนวแกน Y (N)	แรงในแนวแกน Z (N)	ขนาดของแรง (N)
0.0000	-1.9262E+09	2.1619E+02	0.0000E+00	1.9262E+09
0.0010	-1.7995E+09	-1.1274E+06	0.0000E+00	1.7995E+09
0.0020	-1.7148E+09	-2.0741E+06	0.0000E+00	1.7148E+09
0.0030	-1.7082E+09	-1.4100E+06	0.0000E+00	1.7082E+09
0.0040	-1.7817E+09	6.5182E+05	0.0000E+00	1.7817E+09
0.0050	-1.9063E+09	4.3345E+06	0.0000E+00	1.9063E+09
0.0060	-2.0022E+09	8.8127E+06	0.0000E+00	2.0022E+09
0.0070	-1.9800E+09	1.0491E+07	0.0000E+00	1.9801E+09
0.0080	-1.8623E+09	7.8961E+06	0.0000E+00	1.8623E+09
0.0090	-1.7487E+09	4.6819E+06	0.0000E+00	1.7487E+09
0.0100	-1.7011E+09	2.6188E+06	0.0000E+00	1.7011E+09
0.0110	-1.7359E+09	1.1249E+06	0.0000E+00	1.7359E+09
0.0120	-1.8412E+09	-3.4372E+04	0.0000E+00	1.8412E+09
0.0130	-1.9640E+09	1.2919E+05	0.0000E+00	1.9640E+09
0.0140	-2.0072E+09	1.6287E+06	0.0000E+00	2.0072E+09
0.0150	-1.9265E+09	1.1008E+06	0.0000E+00	1.9265E+09

ตารางที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ทางไดนามิกส์ของกลไกชั้นที่ 3 ด้วย Pro/MECHANICA Motion กรณี

ที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 50%

เวลา	แรงในแนวแกน X (N)	แรงในแนวแกน Y (N)	แรงในแนวแกน Z (N)	ขนาดของแรง (N)
0.0000	-1.4871E+09	2.1662E+02	0.0000E+00	1.4871E+09
0.0010	-1.3894E+09	-8.7056E+05	0.0000E+00	1.3894E+09
0.0020	-1.3239E+09	-1.6020E+06	0.0000E+00	1.3239E+09
0.0030	-1.3188E+09	-1.0899E+06	0.0000E+00	1.3188E+09
0.0040	-1.3755E+09	5.0135E+05	0.0000E+00	1.3755E+09
0.0050	-1.4716E+09	3.3440E+06	0.0000E+00	1.4716E+09
0.0060	-1.5457E+09	6.8022E+06	0.0000E+00	1.5457E+09
0.0070	-1.5287E+09	8.1009E+06	0.0000E+00	1.5287E+09
0.0080	-1.4379E+09	6.0992E+06	0.0000E+00	1.4379E+09
0.0090	-1.3501E+09	3.6170E+06	0.0000E+00	1.3501E+09
0.0100	-1.3133E+09	2.0236E+06	0.0000E+00	1.3133E+09
0.0110	-1.3401E+09	8.7002E+05	0.0000E+00	1.3401E+09
0.0120	-1.4214E+09	-2.5567E+04	0.0000E+00	1.4214E+09
0.0130	-1.5162E+09	9.8885E+04	0.0000E+00	1.5162E+09
0.0140	-1.5496E+09	1.2556E+06	0.0000E+00	1.5496E+09
0.0150	-1.4874E+09	8.4943E+05	0.0000E+00	1.4874E+09

ตารางที่ ค.6 แนวโน้มของความเค้นเมื่อเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลัง ที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

ความหนาของ แขนส่งกำลัง (m)	ความเค้นของ von Mises (Pa)	ความเค้นหลักสูงสุด (E)	ขนาดของ การขจัดสูงสุด (m)
1.0000E-02	1.9041E+13	8.9511E+01	2.5094E+00
1.9000E-02	1.0866E+13	5.2396E+01	1.3206E+00
2.8000E-02	7.8000E+12	3.7824E+01	8.9590E-01
3.7000E-02	6.1574E+12	2.9840E+01	6.7866E-01
4.6000E-02	5.1148E+12	2.4722E+01	5.4829E-01
5.5000E-02	4.3876E+12	2.1140E+01	4.6268E-01
6.4000E-02	3.8502E+12	1.8493E+01	4.0273E-01
7.3000E-02	3.4372E+12	1.6463E+01	3.5847E-01
8.2000E-02	3.1099E+12	1.4876E+01	3.2420E-01
9.1000E-02	2.8431E+12	1.3596E+01	2.9671E-01
1.0000E-01	2.6201E+12	1.2519E+01	2.7422E-01

ตารางที่ ค.7 แนวโน้มของความเค้นเมื่อเพิ่มความหนาของแกนส่งกำลังที่ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ เท่ากับ 70%

ความหนาของ แกนส่งกำลัง (m)	ความเค้นของ von Mises (Pa)	ความเค้นหลักสูงสุด (E)	ขนาดของ การขจัดสูงสุด(m)
1.0000E-02	1.4189E+13	6.6700E+01	1.8699E+00
1.9000E-02	8.0968E+12	3.9044E+01	9.8404E-01
2.8000E-02	5.8122E+12	2.8185E+01	6.6759E-01
3.7000E-02	4.5882E+12	2.2236E+01	5.0571E-01
4.6000E-02	3.8114E+12	1.8422E+01	4.0857E-01
5.5000E-02	3.2695E+12	1.5753E+01	3.4477E-01
6.4000E-02	2.8690E+12	1.3780E+01	3.0010E-01
7.3000E-02	2.5613E+12	1.2267E+01	2.6712E-01
8.2000E-02	2.3174E+12	1.1085E+01	2.4158E-01
9.1000E-02	2.1186E+12	1.0131E+01	2.2110E-01
1.0000E-01	1.9524E+12	9.3290E+00	2.0434E-01

ตารางที่ ค.8 แนวโน้มของความเค้นเมื่อเพิ่มความหนาของแขนส่งกำลังที่ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ เท่ากับ 50%

ความหนาของ แขนส่งกำลัง (m)	ความเค้นของ von Mises (Pa)	ความเค้นหลักสูงสุด (E)	ขนาดของ การขจัดสูงสุด (m)
1.0000E-02	1.0954E+13	5.1493E+01	1.4436E+00
1.9000E-02	6.2507E+12	3.0145E+01	7.5963E-01
2.8000E-02	4.4855E+12	2.1755E+01	5.1534E-01
3.7000E-02	3.5393E+12	1.7155E+01	3.9037E-01
4.6000E-02	2.9390E+12	1.4209E+01	3.1539E-01
5.5000E-02	2.5189E+12	1.2138E+01	2.6614E-01
6.4000E-02	2.2122E+12	1.0621E+01	2.3168E-01
7.3000E-02	1.9694E+12	9.4312E+00	2.0656E-01
8.2000E-02	1.7811E+12	8.5084E+00	1.8692E-01
9.1000E-02	1.6277E+12	7.7591E+00	1.7107E-01
1.0000E-01	1.4996E+12	7.1351E+00	1.5793E-01

## ค.2 ผลการวิเคราะห์จาก Pro/MECHANICA สำหรับแผ่นรับแรง

### ค.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบภาวะกรรมเป็นแรงดัน

- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

Pro/MECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'P\_100'  
Sun Aug 25, 2002 15:14:17

Run Settings  
Memory allocation for block solver:48.0

Checking the model before creating elements..  
These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

No errors were found in the model.

Pro/MECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Static Analysis 'P\_100':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (15:14:26)

>> Pass 1 <<  
Calculating Element Equations (15:14:27)  
Total Number of Equations: 7470  
Maximum Edge Order: 3  
Solving Equations (15:14:29)  
Post-Processing Solution (15:14:32)  
Checking Convergence (15:14:34)  
Resource Check (15:14:35)  
Elapsed Time (sec): 18.66  
CPU Time (sec): 15.21  
Memory Usage (kb): 110482  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<  
Calculating Element Equations (15:14:36)  
Total Number of Equations: 12807  
Maximum Edge Order: 8  
Solving Equations (15:14:52)  
Post-Processing Solution (15:14:58)  
Checking Convergence (15:15:05)  
Calculating Disp and Stress Results (15:15:10)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	2.38e+09	2.0% of 1.19e+11

Resource Check (15:15:15)  
Elapsed Time (sec): 58.67  
CPU Time (sec): 48.86  
Memory Usage (kb): 130358  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 23552

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04  
Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03



Ixx: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03  
Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01  
WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01  
WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:  
(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.67995e-04  
Ixy: -6.11494e-13 Iyy: 3.15696e-04  
Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01  
WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08  
WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:  
in global X direction: 2.606306e-09  
in global Y direction: 3.381632e+04  
in global Z direction: -5.216427e-09

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
max\_disp\_x: 5.000000e-04  
max\_disp\_y: 2.090447e-04  
max\_disp\_z: 5.000000e-04  
max\_prin\_mag: -1.185847e+11  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00

max\_stress\_prin: 1.066126e+11  
max\_stress\_vm: 1.251862e+11  
max\_stress\_xx: -1.067166e+11  
max\_stress\_xy: 2.446331e+10  
max\_stress\_xz: -5.270100e+10  
max\_stress\_yy: 4.305021e+10  
max\_stress\_yz: -1.776152e+10  
max\_stress\_zz: 7.000474e+10  
min\_stress\_prin: -1.185847e+11  
strain\_energy: 3.695348e+03

Analysis 'P\_100' Completed (15:15:15)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NTx86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0  
Total Elapsed Time (seconds): 58.95  
Total CPU Time (seconds): 48.98  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 130358  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 23552

Results Directory Size (kilobytes):  
6309.\P\_100

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
20480.\P\_100.tmp\kel1.bas  
3072.\P\_100.tmp\oel1.bas

Run Completed  
Sun Aug 25, 2002 15:15:15

- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'P\_70'  
Sun Aug 25, 2002 15:16:13

Run Settings  
Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements...

These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements...

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
 Mass: kg  
 Time: sec  
 Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
 Edges: 835  
 Faces: 1168

Springs: 0  
 Masses: 0  
 Beams: 0  
 Shells: 0  
 Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Static Analysis 'P\_70':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
 Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (15:16:22)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (15:16:23)  
 Total Number of Equations: 7470  
 Maximum Edge Order: 3  
 Solving Equations (15:16:24)  
 Post-Processing Solution (15:16:27)  
 Checking Convergence (15:16:29)  
 Resource Check (15:16:30)

Elapsed Time (sec): 18.03  
 CPU Time (sec): 15.21  
 Memory Usage (kb): 110482  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (15:16:30)  
 Total Number of Equations: 12807  
 Maximum Edge Order: 8  
 Solving Equations (15:16:46)  
 Post-Processing Solution (15:16:52)  
 Checking Convergence (15:16:58)  
 Calculating Disp and Stress Results (15:17:04)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
----------	--------------	-------------------

LoadSet1	2.36e+09	2.0% of 1.19e+11
----------	----------	------------------

Resource Check (15:17:08)

Elapsed Time (sec): 56.19  
 CPU Time (sec): 48.37  
 Memory Usage (kb): 130358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 23552

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04  
 Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03  
 Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01  
 WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01  
 WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.67995e-04  
 Ixy: -6.11494e-13 Iyy: 3.15696e-04

Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04
WCS X:	3.17119e-09	5.21715e-01	8.53120e-01
WCS Y:	1.00000e+00	-3.66182e-08	1.86763e-08
WCS Z:	4.09834e-08	8.53120e-01	-5.21715e-01

Constraint Set:ConstraintSet1

Load Set:LoadSet1

Resultant Load on Model:

in global X direction: -5.545026e-09  
in global Y direction: 2.519946e+04  
in global Z direction: -5.372004e-09

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
max\_disp\_x: 5.000000e-04  
max\_disp\_y: 2.084860e-04  
max\_disp\_z: 5.000000e-04  
max\_prin\_mag: -1.185896e+11  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00  
max\_stress\_prin: 1.066476e+11  
max\_stress\_vm: 1.251840e+11  
max\_stress\_xx: -1.067202e+11  
max\_stress\_xy: 2.445787e+10  
max\_stress\_xz: -5.270005e+10  
max\_stress\_yy: 4.306328e+10  
max\_stress\_yz: -1.776031e+10  
max\_stress\_zz: 6.999852e+10  
min\_stress\_prin: -1.185896e+11  
strain\_energy: 3.695337e+03

Analysis 'P\_70' Completed (15:17:08)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 56.46  
Total CPU Time (seconds): 48.50  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 130358  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 23552

Results Directory Size (kilobytes):  
6309.\P\_70

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
20480.\P\_70.tmp\kel1.bas  
3072.\P\_70.tmp\oel1.bas

Run Completed  
Sun Aug 25, 2002 15:17:08

### - กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'P\_50'  
Sun Aug 25, 2002 15:11:30

Run Settings  
Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements...  
These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements...

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg

Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Static Analysis 'P\_50'

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (15:11:39)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (15:11:40)

Total Number of Equations: 7470

Maximum Edge Order: 3

Solving Equations (15:11:42)

Post-Processing Solution (15:11:45)

Checking Convergence (15:11:46)

Resource Check (15:11:48)

Elapsed Time (sec): 18.62

CPU Time (sec): 15.20

Memory Usage (kb): 110482

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (15:11:48)

Total Number of Equations: 12807

Maximum Edge Order: 8

Solving Equations (15:12:04)

Post-Processing Solution (15:12:10)

Checking Convergence (15:12:16)

Calculating Disp and Stress Results (15:12:22)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set Stress Error % of Max Prin Str

LoadSet1 2.38e+09 2.0% of 1.19e+11

Resource Check (15:12:27)

Elapsed Time (sec): 57.42

CPU Time (sec): 48.54

Memory Usage (kb): 130358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 23552

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04

Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03

Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01

WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01

WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.67995e-04

Ixy: -6.11494e-13 Iyy: 3.15696e-04

Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01

WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08

WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:

in global X direction: 2.220716e-09

in global Y direction: 1.945489e+04  
in global Z direction: -8.813813e-10

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
max\_disp\_x: 5.000000e-04  
max\_disp\_y: 2.081135e-04  
max\_disp\_z: 5.000000e-04  
max\_prin\_mag: -1.185929e+11  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00  
max\_stress\_prin: 1.066709e+11  
max\_stress\_vm: 1.251841e+11  
max\_stress\_xx: -1.067227e+11  
max\_stress\_xy: 2.445424e+10  
max\_stress\_xz: -5.269942e+10  
max\_stress\_yy: 4.307199e+10  
max\_stress\_yz: -1.775951e+10  
max\_stress\_zz: 6.999437e+10  
min\_stress\_prin: -1.185929e+11  
strain\_energy: 3.695331e+03

Analysis 'P\_50' Completed (15:12:27)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 57.65  
Total CPU Time (seconds): 48.67  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 130358  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 23552

Results Directory Size (kilobytes):  
6309.\P\_50

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
20480.\P\_50.tmp\kel1.bas  
3072.\P\_50.tmp\oelibas

Run Completed  
Sun Aug 25, 2002 15:12:27

## ก.2.2 ผลการวิเคราะห์หาภาระกรรมอุณหภูมิจาก

### Pro/MECHANICA Thermal

- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

Pro/MECHANICA THERMAL Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'heat100\_th'  
Sat Sep 14, 2002 23:29:55

Run Settings

Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements..

These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

No errors were found in the model.

Pro/MECHANICA THERMAL Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Beams: 0  
Shells: 0

Solids: 509  
Elements: 509

CPU Time (sec): 31.73  
Memory Usage (kb): 116974  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

Standard Design Study

Transient Thermal Analysis 'heat100\_th':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Begin Time Stepping (23:30:01)

Time Range:

Min: 0.000000e+00 Max: 3.500000e-03

Summing Load Sets:

Load Set: ThermLoadSet3

>> Step 1 <<

Calculating Element Equations (23:30:01)

Total Number of Equations: 3014  
Maximum Edge Order: 3

Resource Check (23:30:06)

Elapsed Time (sec): 13.09  
CPU Time (sec): 9.00  
Memory Usage (kb): 113560  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 2048

>> Step 2 <<

Calculating Element Equations (23:30:06)

Total Number of Equations: 5129  
Maximum Edge Order: 6

Full Results for Time: 0.000000e+00

Calculating Temp and Flux Results (23:30:18)

Resource Check (23:30:19)

Elapsed Time (sec): 26.86  
CPU Time (sec): 20.89  
Memory Usage (kb): 116974  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 3 <<

Time: 0.000000e+00

>> Step 4 <<

Calculating Element Equations (23:30:23)

Total Number of Equations: 5466  
Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:30:32)

Elapsed Time (sec): 39.40

>> Step 5 <<

Time: 3.25621e-07

Calculating Element Equations (23:30:32)

Total Number of Equations: 5494  
Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:30:37)

Elapsed Time (sec): 44.83  
CPU Time (sec): 36.32  
Memory Usage (kb): 116974  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 6 <<

Calculating Element Equations (23:30:37)

Total Number of Equations: 5656  
Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:30:46)

Elapsed Time (sec): 53.19  
CPU Time (sec): 43.50  
Memory Usage (kb): 133358  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 7 <<

Time: 7.59844e-07

Calculating Element Equations (23:30:46)

Total Number of Equations: 5677  
Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:30:51)

Elapsed Time (sec): 58.84  
CPU Time (sec): 48.18  
Memory Usage (kb): 133358  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 8 <<

Calculating Element Equations (23:30:52)

Total Number of Equations: 5806  
Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:31:00)

Elapsed Time (sec): 67.35  
CPU Time (sec): 55.41  
Memory Usage (kb): 133358  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 9 <<

Time: 1.33889e-06

Calculating Element Equations (23:31:00)

Total Number of Equations: 5866

```

Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:31:08)
  Elapsed Time (sec): 75.41
  CPU Time (sec): 62.32
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 10 <<
Time: 2.11106e-06
Calculating Element Equations (23:31:08)
  Total Number of Equations: 5982
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:31:15)
  Elapsed Time (sec): 82.70
  CPU Time (sec): 68.55
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 11 <<
Calculating Element Equations (23:31:15)
  Total Number of Equations: 6204
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:31:23)
  Elapsed Time (sec): 90.01
  CPU Time (sec): 74.82
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 12 <<
Calculating Element Equations (23:31:23)
  Total Number of Equations: 6284
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:31:31)
  Elapsed Time (sec): 98.66
  CPU Time (sec): 82.22
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 13 <<
Time: 3.14076e-06
>> Step 14 <<
Calculating Element Equations (23:31:36)
  Total Number of Equations: 6455
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:31:44)
  Elapsed Time (sec): 111.62
  CPU Time (sec): 93.29
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 15 <<
Calculating Element Equations (23:31:44)
  Total Number of Equations: 6645
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:31:52)
  Elapsed Time (sec): 119.36
  CPU Time (sec): 99.88
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192
>> Step 16 <<
Calculating Element Equations (23:31:52)
  Total Number of Equations: 6727
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:32:01)
  Elapsed Time (sec): 128.63
  CPU Time (sec): 107.81
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192
>> Step 17 <<
Time: 4.80076e-06
>> Step 18 <<
Calculating Element Equations (23:32:07)
  Total Number of Equations: 7610
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:32:19)
  Elapsed Time (sec): 146.16
  CPU Time (sec): 123.08
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192
>> Step 19 <<
Calculating Element Equations (23:32:19)
  Total Number of Equations: 8078
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:32:32)
  Elapsed Time (sec): 159.66
  CPU Time (sec): 134.64
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192
>> Step 20 <<
Time: 6.66911e-06
Calculating Element Equations (23:32:32)
  Total Number of Equations: 8123
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:32:43)
  Elapsed Time (sec): 170.08

```

CPU Time (sec): 143.60  
Memory Usage (kb): 133358  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 21 <<

Time: 9.16059e-06

Calculating Element Equations (23:32:43)

Total Number of Equations: 8141

Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:32:51)

Elapsed Time (sec): 178.87

CPU Time (sec): 151.17

Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 22 <<

Calculating Element Equations (23:32:52)

Total Number of Equations: 8276

Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:33:03)

Elapsed Time (sec): 190.64

CPU Time (sec): 161.19

Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 23 <<

Time: 1.24830e-05

>> Step 24 <<

Time: 1.86082e-05

Calculating Element Equations (23:33:13)

Total Number of Equations: 8283

Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:33:21)

Elapsed Time (sec): 208.91

CPU Time (sec): 176.69

Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 25 <<

Calculating Element Equations (23:33:22)

Total Number of Equations: 8391

Maximum Edge Order: 6

Resource Check (23:33:33)

Elapsed Time (sec): 220.92

CPU Time (sec): 187.02

Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 26 <<

Time: 2.67762e-05

>> Step 27 <<

Time: 3.59031e-05

>> Step 28 <<

Time: 5.49511e-05

>> Step 29 <<

Time: 8.26247e-05

>> Step 30 <<

Time: 1.23645e-04

Resource Check (23:34:20)

Elapsed Time (sec): 267.47

CPU Time (sec): 228.21

Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 31 <<

Time: 1.86665e-04

>> Step 32 <<

Time: 2.89865e-04

Calculating Element Equations (23:34:30)

Total Number of Equations: 7957

Maximum Edge Order: 6

Full Results for Time: 3.50000e-04

Calculating Temp and Flux Results (23:34:42)

Resource Check (23:34:44)

Elapsed Time (sec): 291.77

CPU Time (sec): 249.42

Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 33 <<

Time: 3.50000e-04

>> Step 34 <<

Time: 4.56556e-04

Full Results for Time: 7.00000e-04

Calculating Temp and Flux Results (23:35:00)

Resource Check (23:35:02)

Elapsed Time (sec): 309.20

CPU Time (sec): 264.84

Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 35 <<



Time: 7.00000e-04

Full Results for Time: 1.05000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:35:08)  
 Resource Check (23:35:11)  
 Elapsed Time (sec): 318.18  
 CPU Time (sec): 272.60  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 36 <<  
 Time: 1.05000e-03  
 Calculating Element Equations (23:35:11)  
 Total Number of Equations: 7075  
 Maximum Edge Order: 6

Full Results for Time: 1.40000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:35:24)  
 Resource Check (23:35:26)  
 Elapsed Time (sec): 333.52  
 CPU Time (sec): 285.98  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 37 <<  
 Time: 1.40000e-03

Full Results for Time: 1.75000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:35:32)  
 Resource Check (23:35:34)  
 Elapsed Time (sec): 341.32  
 CPU Time (sec): 292.88  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 38 <<  
 Time: 1.75000e-03

Full Results for Time: 2.10000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:35:40)  
 Resource Check (23:35:42)  
 Elapsed Time (sec): 349.24  
 CPU Time (sec): 299.75  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 39 <<  
 Time: 2.10000e-03

Full Results for Time: 2.45000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:35:48)

Resource Check (23:35:50)  
 Elapsed Time (sec): 357.38  
 CPU Time (sec): 306.91  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 40 <<  
 Time: 2.45000e-03  
 Calculating Element Equations (23:35:50)  
 Total Number of Equations: 5598  
 Maximum Edge Order: 6

Full Results for Time: 2.80000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:35:59)  
 Resource Check (23:36:01)  
 Elapsed Time (sec): 368.32  
 CPU Time (sec): 316.42  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 41 <<  
 Time: 2.80000e-03

Full Results for Time: 3.15000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:36:05)  
 Resource Check (23:36:07)  
 Elapsed Time (sec): 374.57  
 CPU Time (sec): 321.91  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 42 <<  
 Time: 3.15000e-03

Full Results for Time: 3.50000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (23:36:12)  
 Resource Check (23:36:13)  
 Elapsed Time (sec): 380.79  
 CPU Time (sec): 327.45  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

Maximum Temperature Variation:  
 3.34e+01

Temperature Variation estimated from heat loads:  
 6.27e+02

--Warning: The estimated temperature variation is much larger than the computed maximum temperature variation. This may result in a solution that does not meet the desired accuracy.

Total Mass of Model: 5.551848e-01  
Total Cost of Model: 0.000000e+00  
Analysis 'heat100\_th' Completed (23:36:13)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0  
Total Elapsed Time (seconds): 380.99  
Total CPU Time (seconds): 327.54  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 133358  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 10240

Results Directory Size (kilobytes):  
26588.\heat100\_th

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
5120.\heat100\_th.tmp\kel1.bas  
5120.\heat100\_th.tmp\mel1.bas

Run Completed  
Sat Sep 14, 2002 23:36:14

- กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

ProMECHANICA THERMAL Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'heat70\_th'  
Sat Sep 14, 2002 23:55:24

Run Settings

Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements..  
These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

No errors were found in the model.

ProMECHANICA THERMAL Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Transient Thermal Analysis 'heat70\_th':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Begin Time Stepping (23:55:29)

Time Range:  
Min: 0.000000e+00 Max: 3.500000e-03

Summing Load Sets:  
Load Set: ThermLoadSet3

>> Step 1 <<

Calculating Element Equations (23:55:29)

Total Number of Equations: 3014  
Maximum Edge Order: 3

Resource Check (23:55:34)

Elapsed Time (sec): 10.63  
CPU Time (sec): 9.08  
Memory Usage (kb): 113560  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 2048

>> Step 2 <<

Calculating Element Equations (23:55:34)

Total Number of Equations: 5129  
Maximum Edge Order: 6

```

Full Results for Time: 0.00000e+00
  Calculating Temp and Flux Results (23:55:47)
  Resource Check (23:55:49)
    Elapsed Time (sec): 25.14
    CPU Time (sec): 21.29
    Memory Usage (kb): 116974
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 3 <<
  Time: 0.00000e+00
>> Step 4 <<
  Calculating Element Equations (23:55:53)
  Total Number of Equations: 5466
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:02)
    Elapsed Time (sec): 38.43
    CPU Time (sec): 32.60
    Memory Usage (kb): 116974
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 5 <<
  Time: 3.25621e-07
  Calculating Element Equations (23:56:02)
  Total Number of Equations: 5494
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:08)
    Elapsed Time (sec): 44.86
    CPU Time (sec): 37.62
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 6 <<
  Calculating Element Equations (23:56:08)
  Total Number of Equations: 5656
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:17)
    Elapsed Time (sec): 53.79
    CPU Time (sec): 45.09
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 7 <<
  Time: 7.59844e-07
  Calculating Element Equations (23:56:17)
  Total Number of Equations: 5677
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:23)
    Elapsed Time (sec): 59.99
    CPU Time (sec): 50.19
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 8 <<
  Calculating Element Equations (23:56:23)
  Total Number of Equations: 5806
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:33)
    Elapsed Time (sec): 69.19
    CPU Time (sec): 57.84
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 9 <<
  Time: 1.33889e-06
  Calculating Element Equations (23:56:33)
  Total Number of Equations: 5866
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:41)
    Elapsed Time (sec): 77.84
    CPU Time (sec): 64.93
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 10 <<
  Time: 2.11106e-06
  Calculating Element Equations (23:56:41)
  Total Number of Equations: 5982
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:49)
    Elapsed Time (sec): 85.96
    CPU Time (sec): 71.57
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 11 <<
  Calculating Element Equations (23:56:49)
  Total Number of Equations: 6204
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:56:57)
    Elapsed Time (sec): 93.90
    CPU Time (sec): 78.24
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144
>> Step 12 <<
  Calculating Element Equations (23:56:57)
  Total Number of Equations: 6284
  Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:57:07)
    Elapsed Time (sec): 103.28

```

```

CPU Time      (sec): 86.04
Memory Usage  (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 13 <<
Time: 3.14076e-06

>> Step 14 <<
Calculating Element Equations      (23:57:12)
Total Number of Equations: 6455
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:57:21)
Elapsed Time      (sec): 117.50
CPU Time         (sec): 98.00
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 15 <<
Calculating Element Equations      (23:57:21)
Total Number of Equations: 6645
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:57:29)
Elapsed Time      (sec): 126.06
CPU Time         (sec): 104.94
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 16 <<
Calculating Element Equations      (23:57:30)
Total Number of Equations: 6727
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:57:40)
Elapsed Time      (sec): 136.67
CPU Time         (sec): 113.54
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 17 <<
Time: 4.80076e-06

>> Step 18 <<
Calculating Element Equations      (23:57:46)
Total Number of Equations: 7610
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:57:59)
Elapsed Time      (sec): 155.74
CPU Time         (sec): 129.76
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 19 <<
Calculating Element Equations      (23:57:59)
Total Number of Equations: 8078
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:58:14)
Elapsed Time      (sec): 170.31
CPU Time         (sec): 142.02
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 20 <<
Time: 6.66911e-06
Calculating Element Equations      (23:58:14)
Total Number of Equations: 8123
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:58:25)
Elapsed Time      (sec): 181.86
CPU Time         (sec): 151.69
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 21 <<
Time: 9.16059e-06
Calculating Element Equations      (23:58:25)
Total Number of Equations: 8141
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:58:35)
Elapsed Time      (sec): 191.65
CPU Time         (sec): 159.75
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 22 <<
Calculating Element Equations      (23:58:35)
Total Number of Equations: 8276
Maximum Edge Order: 6
Resource Check                      (23:58:49)
Elapsed Time      (sec): 205.46
CPU Time         (sec): 170.28
Memory Usage     (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 23 <<
Time: 1.24830e-05

>> Step 24 <<
Time: 1.86082e-05
Calculating Element Equations      (23:58:59)
Total Number of Equations: 8283
Maximum Edge Order: 6

```

```

Resource Check (23:59:09)
  Elapsed Time (sec): 225.39
  CPU Time (sec): 187.20
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240
>> Step 25 <<
  Calculating Element Equations (23:59:09)
    Total Number of Equations: 8391
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:59:22)
    Elapsed Time (sec): 238.71
    CPU Time (sec): 198.27
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240
>> Step 26 <<
  Time: 2.67762e-05
>> Step 27 <<
  Time: 3.59031e-05
>> Step 28 <<
  Time: 5.49511e-05
>> Step 29 <<
  Time: 8.26247e-05
>> Step 30 <<
  Time: 1.23645e-04
  Resource Check (00:00:13)
    Elapsed Time (sec): 289.26
    CPU Time (sec): 242.90
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240
>> Step 31 <<
  Time: 1.86685e-04
>> Step 32 <<
  Time: 2.89865e-04
  Calculating Element Equations (00:00:23)
    Total Number of Equations: 7957
    Maximum Edge Order: 6
Full Results for Time: 3.50000e-04
  Calculating Temp and Flux Results (00:00:37)
  Resource Check (00:00:39)
    Elapsed Time (sec): 315.43
    CPU Time (sec): 265.52
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

```

```

>> Step 33 <<
  Time: 3.50000e-04
>> Step 34 <<
  Time: 4.56556e-04
Full Results for Time: 7.00000e-04
  Calculating Temp and Flux Results (00:00:55)
  Resource Check (00:00:58)
    Elapsed Time (sec): 334.30
    CPU Time (sec): 282.17
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240
>> Step 35 <<
  Time: 7.00000e-04
Full Results for Time: 1.05000e-03
  Calculating Temp and Flux Results (00:01:05)
  Resource Check (00:01:07)
    Elapsed Time (sec): 344.05
    CPU Time (sec): 290.80
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240
>> Step 36 <<
  Time: 1.05000e-03
  Calculating Element Equations (00:01:08)
    Total Number of Equations: 7075
    Maximum Edge Order: 6
Full Results for Time: 1.40000e-03
  Calculating Temp and Flux Results (00:01:21)
  Resource Check (00:01:24)
    Elapsed Time (sec): 360.20
    CPU Time (sec): 304.67
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240
>> Step 37 <<
  Time: 1.40000e-03
Full Results for Time: 1.75000e-03
  Calculating Temp and Flux Results (00:01:30)
  Resource Check (00:01:32)
    Elapsed Time (sec): 368.79
    CPU Time (sec): 312.23
    Memory Usage (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240
>> Step 38 <<

```

Time: 1.75000e-03  
 Full Results for Time: 2.10000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (00:01:38)  
 Resource Check (00:01:41)  
 Elapsed Time (sec): 377.20  
 CPU Time (sec): 319.56  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

Elapsed Time (sec): 409.62  
 CPU Time (sec): 347.84  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240  
 Maximum Temperature Variation:  
 2.34e+01

Temperature Variation estimated from heat loads:  
 4.39e+02

>> Step 39 <<  
 Time: 2.10000e-03

Warning: The estimated temperature variation is much larger than the computed maximum temperature variation. This may result in a solution that does not meet the desired accuracy.

Full Results for Time: 2.45000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (00:01:47)  
 Resource Check (00:01:49)  
 Elapsed Time (sec): 385.73  
 CPU Time (sec): 327.13  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

Total Mass of Model: 5.551848e-01  
 Total Cost of Model: 0.000000e+00

Analysis 'heat70\_th' Completed (00:02:13)

>> Step 40 <<  
 Time: 2.45000e-03  
 Calculating Element Equations (00:01:49)  
 Total Number of Equations: 5598  
 Maximum Edge Order: 6

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NTx86  
 RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Full Results for Time: 2.80000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (00:01:58)  
 Resource Check (00:02:00)  
 Elapsed Time (sec): 396.83  
 CPU Time (sec): 336.63  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

Total Elapsed Time (seconds): 409.79  
 Total CPU Time (seconds): 347.93  
 Maximum Memory Usage (kilobytes): 133358  
 Working Directory Disk Usage (kilobytes): 10240

Results Directory Size (kilobytes):  
 26589.\heat70\_th

>> Step 41 <<  
 Time: 2.80000e-03

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
 5120.\heat70\_thtmp\keli.bas  
 5120.\heat70\_thtmp\meli.bas

Full Results for Time: 3.15000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (00:02:05)  
 Resource Check (00:02:07)  
 Elapsed Time (sec): 403.23  
 CPU Time (sec): 342.24  
 Memory Usage (kb): 133358  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

Run Completed  
 Sun Sep 15, 2002 00:02:13

>> Step 42 <<  
 Time: 3.15000e-03

Full Results for Time: 3.50000e-03  
 Calculating Temp and Flux Results (00:02:11)  
 Resource Check (00:02:13)

### - กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

ProMECHANICA THERMAL Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'heat50\_th'  
Sat Sep 14, 2002 23:46:16

#### Run Settings

Memory allocation for block solver:48.0  
Checking the model before creating elements..  
These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

No errors were found in the model.

#### ProMECHANICA THERMAL Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 509

Elements: 509

#### Standard Design Study

Transient Thermal Analysis 'heat50\_th':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

```
Begin Time Stepping (23:46:21)
Time Range:
  Min: 0.000000e+00 Max: 3.500000e-03
Summing Load Sets:
Load Set:ThermLoadSet3

>> Step 1 <<
  Calculating Element Equations (23:46:22)
    Total Number of Equations: 3014
    Maximum Edge Order: 3
  Resource Check (23:46:26)
    Elapsed Time (sec): 10.73
    CPU Time (sec): 9.11
    Memory Usage (kb): 113560
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 2048

>> Step 2 <<
  Calculating Element Equations (23:46:26)
    Total Number of Equations: 5129
    Maximum Edge Order: 6
Full Results for Time: 0.000000e+00 (23:46:38)
  Calculating Temp and Flux Results (23:46:38)
  Resource Check (23:46:40)
    Elapsed Time (sec): 24.63
    CPU Time (sec): 21.09
    Memory Usage (kb): 116974
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 3 <<
  Time: 0.000000e+00

>> Step 4 <<
  Calculating Element Equations (23:46:44)
    Total Number of Equations: 5466
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:46:53)
    Elapsed Time (sec): 37.74
    CPU Time (sec): 32.45
    Memory Usage (kb): 116974
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 5 <<
  Time: 3.25621e-07
  Calculating Element Equations (23:46:53)
    Total Number of Equations: 5494
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check (23:46:59)
    Elapsed Time (sec): 43.60
    CPU Time (sec): 37.40
```

```

Memory Usage      (kb): 116974
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 6 <<
  Calculating Element Equations      (23:46:59)
    Total Number of Equations: 5656
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:47:08)
    Elapsed Time      (sec): 52.15
    CPU Time          (sec): 44.85
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 7 <<
  Time: 7.59644e-07
  Calculating Element Equations      (23:47:08)
    Total Number of Equations: 5677
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:47:14)
    Elapsed Time      (sec): 58.10
    CPU Time          (sec): 49.84
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 8 <<
  Calculating Element Equations      (23:47:14)
    Total Number of Equations: 5806
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:47:22)
    Elapsed Time      (sec): 66.87
    CPU Time          (sec): 57.49
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 9 <<
  Time: 1.33889e-06
  Calculating Element Equations      (23:47:22)
    Total Number of Equations: 5866
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:47:31)
    Elapsed Time      (sec): 75.25
    CPU Time          (sec): 64.68
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 10 <<
  Time: 2.11106e-06
  Calculating Element Equations      (23:47:31)
    Total Number of Equations: 5982
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:47:38)
    Elapsed Time      (sec): 82.86
    CPU Time          (sec): 71.22
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 11 <<
  Calculating Element Equations      (23:47:38)
    Total Number of Equations: 6204
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:47:46)
    Elapsed Time      (sec): 90.55
    CPU Time          (sec): 77.82
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 12 <<
  Calculating Element Equations      (23:47:46)
    Total Number of Equations: 6284
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:47:55)
    Elapsed Time      (sec): 99.64
    CPU Time          (sec): 85.61
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 13 <<
  Time: 3.14076e-06

>> Step 14 <<
  Calculating Element Equations      (23:48:01)
    Total Number of Equations: 6455
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:48:09)
    Elapsed Time      (sec): 113.32
    CPU Time          (sec): 97.27
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 6144

>> Step 15 <<
  Calculating Element Equations      (23:48:09)
    Total Number of Equations: 6645
    Maximum Edge Order: 6
  Resource Check                      (23:48:17)
    Elapsed Time      (sec): 121.68
    CPU Time          (sec): 104.35
    Memory Usage      (kb): 133358
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 16 <<
  Calculating Element Equations      (23:48:17)

```



```

Total Number of Equations: 6727
Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:48:27)
  Elapsed Time (sec): 131.25
  CPU Time (sec): 112.63
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 17 <<
Time: 4.80076e-06
>> Step 18 <<
Calculating Element Equations (23:48:33)
  Total Number of Equations: 7610
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:48:45)
  Elapsed Time (sec): 149.96
  CPU Time (sec): 128.80
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 19 <<
Calculating Element Equations (23:48:46)
  Total Number of Equations: 8078
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:49:00)
  Elapsed Time (sec): 164.05
  CPU Time (sec): 141.00
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 20 <<
Time: 6.66911e-06
Calculating Element Equations (23:49:00)
  Total Number of Equations: 8123
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:49:11)
  Elapsed Time (sec): 175.20
  CPU Time (sec): 150.51
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 21 <<
Time: 9.16059e-06
Calculating Element Equations (23:49:11)
  Total Number of Equations: 8141
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:49:20)
  Elapsed Time (sec): 185.03
  CPU Time (sec): 158.84
  Memory Usage (kb): 133358

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Step 22 <<
Calculating Element Equations (23:49:21)
  Total Number of Equations: 8276
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:49:33)
  Elapsed Time (sec): 197.72
  CPU Time (sec): 169.55
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 23 <<
Time: 1.24830e-05

>> Step 24 <<
Time: 1.86082e-05
Calculating Element Equations (23:49:43)
  Total Number of Equations: 8283
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:49:53)
  Elapsed Time (sec): 217.16
  CPU Time (sec): 186.39
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 25 <<
Calculating Element Equations (23:49:53)
  Total Number of Equations: 8391
  Maximum Edge Order: 6
Resource Check (23:50:05)
  Elapsed Time (sec): 229.96
  CPU Time (sec): 197.38
  Memory Usage (kb): 133358
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 26 <<
Time: 2.67762e-05

>> Step 27 <<
Time: 3.59031e-05

>> Step 28 <<
Time: 5.49511e-05

>> Step 29 <<
Time: 8.26247e-05

>> Step 30 <<
Time: 1.23645e-04
Resource Check (23:50:56)

```

```

Elapsed Time      (sec): 280.41
CPU Time          (sec): 242.04
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 31 <<
Time: 1.86665e-04

>> Step 32 <<
Time: 2.89865e-04
Calculating Element Equations      (23:51:06)
Total Number of Equations: 7957
Maximum Edge Order: 6

Full Results for Time: 3.50000e-04
Calculating Temp and Flux Results  (23:51:19)
Resource Check                     (23:51:22)
Elapsed Time      (sec): 306.23
CPU Time          (sec): 264.51
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 33 <<
Time: 3.50000e-04

>> Step 34 <<
Time: 4.56556e-04

Full Results for Time: 7.00000e-04
Calculating Temp and Flux Results  (23:51:38)
Resource Check                     (23:51:41)
Elapsed Time      (sec): 325.05
CPU Time          (sec): 281.01
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 35 <<
Time: 7.00000e-04

Full Results for Time: 1.05000e-03
Calculating Temp and Flux Results  (23:51:48)
Resource Check                     (23:51:50)
Elapsed Time      (sec): 334.66
CPU Time          (sec): 289.53
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 36 <<
Time: 1.05000e-03
Calculating Element Equations      (23:51:50)
Total Number of Equations: 7075

Maximum Edge Order: 6

Full Results for Time: 1.40000e-03
Calculating Temp and Flux Results  (23:52:04)
Resource Check                     (23:52:06)
Elapsed Time      (sec): 350.46
CPU Time          (sec): 303.13
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 37 <<
Time: 1.40000e-03
Full Results for Time: 1.75000e-03
Calculating Temp and Flux Results  (23:52:12)
Resource Check                     (23:52:14)
Elapsed Time      (sec): 358.82
CPU Time          (sec): 310.52
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 38 <<
Time: 1.75000e-03

Full Results for Time: 2.10000e-03
Calculating Temp and Flux Results  (23:52:21)
Resource Check                     (23:52:23)
Elapsed Time      (sec): 367.21
CPU Time          (sec): 317.90
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 39 <<
Time: 2.10000e-03

Full Results for Time: 2.45000e-03
Calculating Temp and Flux Results  (23:52:29)
Resource Check                     (23:52:31)
Elapsed Time      (sec): 375.77
CPU Time          (sec): 325.28
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 40 <<
Time: 2.45000e-03
Calculating Element Equations      (23:52:31)
Total Number of Equations: 5598
Maximum Edge Order: 6

Full Results for Time: 2.80000e-03
Calculating Temp and Flux Results  (23:52:40)
Resource Check                     (23:52:42)

```

```

Elapsed Time      (sec): 386.78
CPU Time          (sec): 334.91
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 41 <<
Time: 2.80000e-03

Full Results for Time: 3.15000e-03
Calculating Temp and Flux Results (23:52:47)
Resource Check (23:52:49)
Elapsed Time      (sec): 393.28
CPU Time          (sec): 340.51
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

>> Step 42 <<
Time: 3.15000e-03

Full Results for Time: 3.50000e-03
Calculating Temp and Flux Results (23:52:53)
Resource Check (23:52:55)
Elapsed Time      (sec): 399.67
CPU Time          (sec): 346.06
Memory Usage      (kb): 133358
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 10240

Maximum Temperature Variation:
1.67e+01

Temperature Variation estimated from heat loads:
3.14e+02

--Warning: The estimated temperature variation is much
larger than the computed maximum temperature
variation. This may result in a solution that
does not meet the desired accuracy.

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Analysis 'heat50_th' Completed (23:52:55)

-----

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NTx86
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 399.84

```

```

Total CPU Time      (seconds): 346.12
Maximum Memory Usage (kilobytes): 133358
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 10240

Results Directory Size (kilobytes):
26731.\heat50_th

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):
5120.\heat50_thtmp\kell1.bas
5120.\heat50_thtmp\mel1.bas

-----

Run Completed
Sat Sep 14, 2002 23:52:55

-----

```

## ก.2.2 ผลการวิเคราะห์แบบการกรรมเป็นอุณหภูมิ

### - กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

```

-----

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)
Summary for Design Study 'T_100'
Sun Sep 15, 2002 00:50:08

-----

Run Settings
Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements...
These checks take into account the fact that AutoGEM will
automatically create elements in volumes with material
properties, on surfaces with shell properties, and on curves
with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements...

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m
Mass: kg
Time: sec
Temperature: K

```

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 509

Elements: 509

Resource Check (00:51:24)

Elapsed Time (sec): 76.85  
CPU Time (sec): 65.91  
Memory Usage (kb): 132789  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 22526

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04  
Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03  
Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01  
WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01  
WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.67995e-04  
Ixy: -6.11494e-13 Iyy: 3.15696e-04  
Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01  
WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08  
WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:  
in global X direction: 1.541821e-09  
in global Y direction: -3.663935e-09  
in global Z direction: -5.791015e-09

Measures:

Standard Design Study

Static Analysis "T\_100":

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (00:50:12)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (00:50:13)  
Total Number of Equations: 7470  
Maximum Edge Order: 3  
Solving Equations (00:50:18)  
Post-Processing Solution (00:50:21)  
Checking Convergence (00:50:23)  
Resource Check (00:50:26)  
Elapsed Time (sec): 18.82  
CPU Time (sec): 15.93  
Memory Usage (kb): 111583  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (00:50:26)  
Total Number of Equations: 12546  
Maximum Edge Order: 8  
Solving Equations (00:50:51)  
Post-Processing Solution (00:50:57)  
Checking Convergence (00:51:05)  
Calculating Disp and Stress Results (00:51:13)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
----------	--------------	-------------------

LoadSet1	2.18e+09	1.8% of 1.20e+11
----------	----------	------------------

```
max_beam_bending: 0.000000e+00
max_beam_tensile: 0.000000e+00
max_beam_torsion: 0.000000e+00
max_beam_total: 0.000000e+00
max_disp_mag: 5.000000e-04
max_disp_x: 5.000000e-04
max_disp_y: 1.485639e-04
max_disp_z: 5.000000e-04
max_prin_mag: -1.200746e+11
max_rot_mag: 0.000000e+00
max_rot_x: 0.000000e+00
max_rot_y: 0.000000e+00
max_rot_z: 0.000000e+00
max_stress_prin: 8.614538e+10
max_stress_vm: 1.257309e+11
max_stress_xx: -1.080156e+11
max_stress_xy: 2.478202e+10
max_stress_xz: -5.240584e+10
max_stress_yy: 3.011012e+10
max_stress_yz: -1.786311e+10
max_stress_zz: 6.859977e+10
min_stress_prin: -1.200746e+11
strain_energy: 2.718810e+03
```

Analysis "T\_100" Completed (00:51:24)

Memory and Disk Usage:

```
Machine Type: Windows NT/x86
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 77.05
Total CPU Time (seconds): 66.02
Maximum Memory Usage (kilobytes): 132789
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 22528
```

Results Directory Size (kilobytes):  
6295.\T\_100

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
19456.\T\_100.tmp\kel1.bas  
3072.\T\_100.tmp\oel1.bas

Run Completed  
Sun Sep 15, 2002 00:51:24

## - กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study "T\_70"  
Sun Sep 15, 2002 00:47:55

Run Settings  
Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements...  
These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements...

No errors were found in the model.

### ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Static Analysis "T\_70"

Convergence Method: Single-Pass Adaptive

Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (00:48:00)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (00:48:01)  
 Total Number of Equations: 7470  
 Maximum Edge Order: 3  
 Solving Equations (00:48:05)  
 Post-Processing Solution (00:48:08)  
 Checking Convergence (00:48:10)  
 Resource Check (00:48:13)  
 Elapsed Time (sec): 18.99  
 CPU Time (sec): 16.26  
 Memory Usage (kb): 111539  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (00:48:14)  
 Total Number of Equations: 12546  
 Maximum Edge Order: 8  
 Solving Equations (00:48:37)  
 Post-Processing Solution (00:48:44)  
 Checking Convergence (00:48:51)  
 Calculating Disp and Stress Results (00:49:00)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	2.18e+09	1.8% of 1.20e+11

Resource Check (00:49:11)  
 Elapsed Time (sec): 76.31  
 CPU Time (sec): 66.13  
 Memory Usage (kb): 132789  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 22528

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04  
 Iyy: 4.19984e-04 Iyz: 3.34791e-03  
 Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01  
 WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01  
 WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:  
 (6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:  
 Ixx: 1.67995e-04  
 Iyy: 6.11494e-13 Iyz: 3.15696e-04  
 Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01  
 WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08  
 WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:  
 in global X direction: -4.984585e-09  
 in global Y direction: 4.789001e-09  
 in global Z direction: -4.419969e-09

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
 max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
 max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
 max\_beam\_total: 0.000000e+00  
 max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
 max\_disp\_x: 5.000000e-04  
 max\_disp\_y: 1.489934e-04  
 max\_disp\_z: 5.000000e-04  
 max\_prin\_mag: -1.200767e+11  
 max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
 max\_rot\_x: 0.000000e+00  
 max\_rot\_y: 0.000000e+00  
 max\_rot\_z: 0.000000e+00  
 max\_stress\_prin: 8.616453e+10  
 max\_stress\_vm: 1.257303e+11  
 max\_stress\_xx: -1.080172e+11  
 max\_stress\_xy: 2.478018e+10  
 max\_stress\_xz: -5.240562e+10  
 max\_stress\_yy: 3.013032e+10

max\_stress\_yz: -1.786249e+10  
max\_stress\_zz: 6.860052e+10  
min\_stress\_prin: -1.200767e+11  
strain\_energy: 2.722214e+03

Analysis 'T\_70' Completed (00:49:11)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 76.62  
Total CPU Time (seconds): 66.24  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 132789  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 22528

Results Directory Size (kilobytes):

6440.\T\_70

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):

19456.\T\_70.tmp\keli.bas

3072.\T\_70.tmp\oelibas

Run Completed

Sun Sep 15, 2002 00:49:11

- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)

Summary for Design Study 'T\_50'

Sun Sep 15, 2002 00:53:19

Run Settings

Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements..

These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
Edges: 835  
Faces: 1168

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Static Analysis 'T\_50':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (00:53:24)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (00:53:24)  
Total Number of Equations: 7470  
Maximum Edge Order: 3  
Solving Equations (00:53:29)  
Post-Processing Solution (00:53:32)  
Checking Convergence (00:53:34)  
Resource Check (00:53:37)  
Elapsed Time (sec): 18.90  
CPU Time (sec): 15.77  
Memory Usage (kb): 111510  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (00:53:38)

Total Number of Equations: 12546  
 Maximum Edge Order: 8  
 Solving Equations (00:54:01)  
 Post-Processing Solution (00:54:08)  
 Checking Convergence (00:54:15)  
 Calculating Disp and Stress Results (00:54:23)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	2.18e+09	1.8% of 1.20e+11

Resource Check (00:54:34)  
 Elapsed Time (sec): 75.87  
 CPU Time (sec): 65.43  
 Memory Usage (kb): 132789  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 22528

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04  
 Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03  
 Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01  
 WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01  
 WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.67995e-04  
 Ixy: -6.11494e-13 Iyy: 3.15696e-04  
 Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01  
 WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08  
 WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:

in global X direction: 1.344532e-09  
 in global Y direction: -2.269431e-09  
 in global Z direction: -1.837855e-09

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
 max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
 max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
 max\_beam\_total: 0.000000e+00  
 max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
 max\_disp\_x: 5.000000e-04  
 max\_disp\_y: 1.492798e-04  
 max\_disp\_z: 5.000000e-04  
 max\_prin\_mag: -1.200781e+11  
 max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
 max\_rot\_x: 0.000000e+00  
 max\_rot\_y: 0.000000e+00  
 max\_rot\_z: 0.000000e+00  
 max\_stress\_prin: 8.617730e+10  
 max\_stress\_vm: 1.257299e+11  
 max\_stress\_xx: -1.080183e+11  
 max\_stress\_xy: 2.477895e+10  
 max\_stress\_xz: -5.240547e+10  
 max\_stress\_yy: 3.014370e+10  
 max\_stress\_yz: -1.786207e+10  
 max\_stress\_zz: 6.860102e+10  
 min\_stress\_prin: -1.200781e+11  
 strain\_energy: 2.724494e+03

Analysis "T\_50" Completed (00:54:34)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NTx86  
 RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 76.11  
 Total CPU Time (seconds): 65.58  
 Maximum Memory Usage (kilobytes): 132789



```

Working Directory Disk Usage (kilobytes):22528

Results Directory Size (kilobytes):
6295.\T_50

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):
19456.\T_50.tmp\kel1bas
3072.\T_50.tmp\oel1bas

-----
Run Completed
Sun Sep 15, 2002 00:54:34
-----

```

```

Points: 176
Edges: 835
Faces: 1168

Springs: 0
Masses: 0
Beams: 0
Shells: 0
Solids: 509

Elements: 509
-----

```

### ก.2.3 ผลการวิเคราะห์แบบการกรรมเป็นแรงดันและอุณหภูมิ

- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

```

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)
Summary for Design Study 'P_H_100X'
Sun Sep 15, 2002 00:58:47
-----

```

```

Run Settings
Memory allocation for block solver:48.0

```

Checking the model before creating elements..  
 These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
 Mass: kg  
 Time: sec  
 Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Standard Design Study

Static Analysis 'P\_H\_100X':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
 Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (00:58:51)

```

>> Pass 1 <<
Calculating Element Equations (00:58:52)
Total Number of Equations: 7470
Maximum Edge Order: 3
Solving Equations (00:58:56)
Post-Processing Solution (00:59:00)
Checking Convergence (00:59:02)
Resource Check (00:59:05)
Elapsed Time (sec): 19.02
CPU Time (sec): 16.02
Memory Usage (kb): 111381
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

```

```

>> Pass 2 <<
Calculating Element Equations (00:59:05)
Total Number of Equations: 12546
Maximum Edge Order: 8
Solving Equations (00:59:29)
Post-Processing Solution (00:59:36)
Checking Convergence (00:59:43)
Calculating Disp and Stress Results (00:59:52)

```

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
----------	--------------	-------------------

LoadSet1	2.18e+09	1.8% of 1.20e+11
----------	----------	------------------

Resource Check (01:00:03)

Elapsed Time (sec): 77.72  
CPU Time (sec): 66.58  
Memory Usage (kb): 135285  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 22528

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04  
Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03  
Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01  
WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01  
WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.67995e-04  
Ixy: -6.11494e-13 Iyy: 3.15696e-04  
Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01  
WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08  
WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:

in global X direction: 1.740531e-09  
in global Y direction: 3.381632e+04  
in global Z direction: -4.732954e-09

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00

max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
max\_disp\_x: 5.000000e-04  
max\_disp\_y: 1.507528e-04  
max\_disp\_z: 5.000000e-04  
max\_prin\_mag: -1.200553e+11  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00  
max\_stress\_prin: 8.607440e+10  
max\_stress\_vm: 1.257354e+11  
max\_stress\_xx: -1.080011e+11  
max\_stress\_xy: 2.480337e+10  
max\_stress\_xz: -5.240955e+10  
max\_stress\_yy: 3.012124e+10  
max\_stress\_yz: -1.786784e+10  
max\_stress\_zz: 6.859402e+10  
min\_stress\_prin: -1.200553e+11  
strain\_energy: 2.718835e+03

Analysis \*P\_H\_100x\*Completed (01:00:03)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NTx86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 77.99  
Total CPU Time (seconds): 66.69  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 135285  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 22528

Results Directory Size (kilobytes):

6297.\P\_H\_100x

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):

19456.\P\_H\_100x.tmp\kel1bas  
3072.\P\_H\_100x.tmp\oel1bas

Run Completed  
Sun Sep 15, 2002 01:00:04

## - กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
 Summary for Design Study "P\_H\_70X"  
 Sun Sep 15, 2002 01:01:18

Run Settings  
 Memory allocation for block solver:48.0

Checking the model before creating elements..  
 These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
 Mass: kg  
 Time: sec  
 Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 176  
 Edges: 835  
 Faces: 1168

Springs: 0  
 Masses: 0  
 Beams: 0  
 Shells: 0  
 Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Static Analysis "P\_H\_70X":

Convergence Method: Single-Pass Adaptive

Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (01:01:23)

>> Pass 1 <<  
 Calculating Element Equations (01:01:23)  
 Total Number of Equations: 7470  
 Maximum Edge Order: 3  
 Solving Equations (01:01:28)  
 Post-Processing Solution (01:01:31)  
 Checking Convergence (01:01:33)  
 Resource Check (01:01:36)  
 Elapsed Time (sec): 19.00  
 CPU Time (sec): 16.02  
 Memory Usage (kb): 111155  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<  
 Calculating Element Equations (01:01:37)  
 Total Number of Equations: 12546  
 Maximum Edge Order: 8  
 Solving Equations (01:02:01)  
 Post-Processing Solution (01:02:07)  
 Checking Convergence (01:02:15)  
 Calculating Disp and Stress Results (01:02:23)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
----------	--------------	-------------------

LoadSet1	2.18e+09	1.8% of 1.20e+11
----------	----------	------------------

Resource Check (01:02:34)  
 Elapsed Time (sec): 76.58  
 CPU Time (sec): 66.10  
 Memory Usage (kb): 135285  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 22528

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04  
 Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03  
 Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

Max Prin	Mid Prin	Min Prin
3.41177e-03	3.30871e-03	1.56965e-04

WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01  
WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01  
WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:  
(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:  
Ixx: 1.67995e-04  
Iyy: 6.11494e-13 Izz: 3.15696e-04  
Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04  
Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	3.15696e-04	2.11082e-04	1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01  
WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08  
WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:  
in global X direction: -1.371831e-09  
in global Y direction: 2.519946e+04  
in global Z direction: -7.058637e-09

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
max\_disp\_x: 5.000000e-04  
max\_disp\_y: 1.506245e-04  
max\_disp\_z: 5.000000e-04  
max\_prin\_mag: -1.200623e+11  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00  
max\_stress\_prin: 8.811163e+10  
max\_stress\_vm: 1.257337e+11  
max\_stress\_xx: -1.080064e+11  
max\_stress\_xy: 2.479609e+10  
max\_stress\_xz: -5.240838e+10  
max\_stress\_yy: 3.013861e+10

max\_stress\_yz: -1.786600e+10  
max\_stress\_zz: 6.859623e+10  
min\_stress\_prin: -1.200623e+11  
strain\_energy: 2.722228e+03

Analysis 'P\_H\_70x' Completed (01:02:34)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 76.87  
Total CPU Time (seconds): 66.24  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 135285  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 22528

Results Directory Size (kilobytes):  
6297.\P\_H\_70x

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
19456.\P\_H\_70x.tmp\kel1.bas  
3072.\P\_H\_70x.tmp\oel1.bas

Run Completed  
Sun Sep 15, 2002 01:02:34

### - กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'P\_H\_50x'  
Sun Sep 15, 2002 00:58:17

Run Settings  
Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements..  
These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements...

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m
Mass: kg
Time: sec
Temperature: K
Model Type: Three Dimensional

Points: 176
Edges: 835
Faces: 1168

Springs: 0
Masses: 0
Beams: 0
Shells: 0
Solids: 509

Elements: 509

Standard Design Study

Static Analysis 'P\_H\_50X':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (00:56:22)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (00:56:22)
Total Number of Equations: 7470
Maximum Edge Order: 3
Solving Equations (00:56:27)
Post-Processing Solution (00:56:30)
Checking Convergence (00:56:32)
Resource Check (00:56:35)
Elapsed Time (sec): 18.72
CPU Time (sec): 15.97
Memory Usage (kb): 111151
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 8192

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (00:56:36)

Total Number of Equations: 12546
Maximum Edge Order: 8
Solving Equations (00:57:00)
Post-Processing Solution (00:57:06)
Checking Convergence (00:57:14)
Calculating Disp and Stress Results (00:57:22)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set Stress Error % of Max Prin Str
LoadSet1 2.18e+09 1.8% of 1.20e+11
Resource Check (00:57:33)
Elapsed Time (sec): 76.55
CPU Time (sec): 65.66
Memory Usage (kb): 135285
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 22528

Total Mass of Model: 5.551848e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 6.41706e-04
Ixy: -4.19984e-04 Iyy: 3.34791e-03
Ixz: 1.05951e-03 Iyz: 1.65257e-04 Izz: 2.88783e-03

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

Max Prin Mid Prin Min Prin
3.41177e-03 3.30871e-03 1.56965e-04
WCS X: -1.35371e-01 3.67255e-01 9.20217e-01
WCS Y: 9.90046e-01 1.40265e-02 1.40045e-01
WCS Z: 3.85249e-02 9.30015e-01 -3.65498e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(6.87705e-02, 1.10000e-02, -2.70601e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.67995e-04
Ixy: -6.11494e-13 Iyy: 3.15696e-04
Ixz: 2.63492e-05 Iyz: 4.86427e-12 Izz: 1.94969e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

Max Prin Mid Prin Min Prin
3.15696e-04 2.11082e-04 1.51882e-04

WCS X: 3.17119e-09 5.21715e-01 8.53120e-01  
WCS Y: 1.00000e+00 -3.66182e-08 1.86763e-08  
WCS Z: 4.09834e-08 8.53120e-01 -5.21715e-01

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:  
in global X direction: 1.136499e-09  
in global Y direction: 1.945489e+04  
in global Z direction: -9.425749e-09

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 5.000000e-04  
max\_disp\_x: 5.000000e-04  
max\_disp\_y: 1.505390e-04  
max\_disp\_z: 5.000000e-04  
max\_prin\_mag: -1.200670e+11  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00  
max\_stress\_prin: 8.613646e+10  
max\_stress\_vm: 1.257326e+11  
max\_stress\_xx: -1.080100e+11  
max\_stress\_xy: 2.479123e+10  
max\_stress\_xz: -5.240760e+10  
max\_stress\_yy: 3.015019e+10  
max\_stress\_yz: -1.786478e+10  
max\_stress\_zz: 6.859771e+10  
min\_stress\_prin: -1.200670e+11  
strain\_energy: 2.724503e+03

Analysis 'P\_H\_50X' Completed (00:57:33)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 76.82  
Total CPU Time (seconds): 65.80  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 135285  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 22528

Results Directory Size (kilobytes):  
6296.\P\_H\_50x

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
19456.\P\_H\_50x.tmp\kel1.bas  
3072.\P\_H\_50x.tmp\oel1.bas

Run Completed  
Sun Sep 15, 2002 00:57:33

### ค.3 ตารางผลการวิเคราะห์จาก Pro/MECHANICA สำหรับแขนส่งกำลัง

#### ค.3.1 ผลการวิเคราะห์แขนส่งกำลังแบบ Static

- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'link3\_half100'  
Wed Aug 07, 2002 03:02:25

Run Settings  
Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements...  
These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

One or more forces may have no effect with the given constraints.  
One or more forces may have no effect with the given constraints.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements...

One or more forces may have no effect with the given constraints.

One or more forces may have no effect with the given constraints.  
No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 32  
Edges: 127  
Faces: 158

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 63

Elements: 63

Standard Design Study

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (03:02:27)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (03:02:27)  
Total Number of Equations: 1026  
Maximum Edge Order: 3  
Solving Equations (03:02:27)  
Post-Processing Solution (03:02:27)  
Checking Convergence (03:02:27)  
Resource Check (03:02:27)  
Elapsed Time (sec): 2.94  
CPU Time (sec): 2.37  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 0

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (03:02:27)  
Total Number of Equations: 3045  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (03:02:30)  
Post-Processing Solution (03:02:31)  
Checking Convergence (03:02:32)

Calculating Disp and Stress Results (03:02:34)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	1.74e+11	1.3% of 1.39e+13

Resource Check (03:02:35)

Elapsed Time (sec): 10.19  
CPU Time (sec): 8.45  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Total Mass of Model: 2.145156e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 3.91617e-05  
Ixy: 3.29274e-10 Iyy: 2.81862e-04  
Ixz: -6.32200e-05 Iyz: 6.28384e-11 Izz: 2.63820e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	2.81862e-04	2.80388e-04	2.25932e-05

WCS X: 5.15056e-06 -2.53515e-01 9.67331e-01  
WCS Y: 1.00000e+00 1.53945e-05 -1.28996e-06  
WCS Z: -1.45645e-05 9.67331e-01 2.53515e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(2.94710e-02, -2.91514e-08, 1.00000e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.77102e-05  
Ixy: 1.44979e-10 Iyy: 7.40948e-05  
Ixz: 1.14773e-11 Iyz: 3.04153e-13 Izz: 7.75039e-05

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	7.75039e-05	7.40948e-05	1.77102e-05

WCS X: 1.91948e-07 2.57125e-06 1.00000e+00  
WCS Y: 8.92258e-08 1.00000e+00 -2.57125e-06  
WCS Z: 1.00000e+00 -8.92263e-08 -1.91948e-07

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set:LoadSet1

Resultant Load on Model:  
in global X direction: -2.285005e+02  
in global Y direction: 7.769298e+01  
in global Z direction: 2.717448e-08

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 1.254403e+00  
max\_disp\_x: -1.248174e+00  
max\_disp\_y: 1.053542e-01  
max\_disp\_z: -8.719991e-02  
max\_prin\_mag: 1.386255e+13  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00  
max\_stress\_prin: 1.386255e+13  
max\_stress\_vm: 1.039558e+13  
max\_stress\_xx: 1.284234e+13  
max\_stress\_xy: -4.528622e+12  
max\_stress\_xz: 2.959140e+12  
max\_stress\_yy: 4.503357e+12  
max\_stress\_yz: 1.866664e+12  
max\_stress\_zz: 5.146015e+12  
min\_stress\_prin: -5.816880e+12  
strain\_energy: 1.677682e+09

Analysis 'link3\_half100' Completed (03:02:35)

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0  
Total Elapsed Time (seconds): 10.34  
Total CPU Time (seconds): 8.52  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 102290  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 4096

Results Directory Size (kilobytes):  
1130.\link3\_half100

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):

4096.\link3\_half100.tmp\keli.bas

Run Completed  
Wed Aug 07, 2002 03:02:35

## - กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'link3\_half100'  
Wed Aug 07, 2002 03:01:00

Run Settings

Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements..

These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

One or more forces may have no effect with the given constraints.  
One or more forces may have no effect with the given constraints.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

One or more forces may have no effect with the given constraints.

One or more forces may have no effect with the given constraints.

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 32



Edges: 127  
 Faces: 158  
 Springs: 0  
 Masses: 0  
 Beams: 0  
 Shells: 0  
 Solids: 63  
 Elements: 63

CPU Time (sec): 8.45  
 Memory Usage (kb): 102290  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Total Mass of Model: 2.145156e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 3.91617e-05  
 Ixy: 3.29274e-10 Iyy: 2.81862e-04  
 Ixz: -6.32200e-05 Iyz: 6.28384e-11 Izz: 2.63820e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
2.81862e-04	2.80388e-04	2.25932e-05	
WCS X: 5.15056e-06	-2.53515e-01	9.67331e-01	
WCS Y: 1.00000e+00	1.53945e-05	-1.28996e-06	
WCS Z: -1.45645e-05	9.67331e-01	2.53515e-01	

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(2.94710e-02, -2.91514e-08, 1.00000e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.77102e-05  
 Ixy: 1.44979e-10 Iyy: 7.40948e-05  
 Ixz: 1.14779e-11 Iyz: 3.04153e-13 Izz: 7.75039e-05

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
7.75039e-05	7.40948e-05	1.77102e-05	
WCS X: 1.91948e-07	2.57125e-06	1.00000e+00	
WCS Y: 8.92258e-08	1.00000e+00	-2.57125e-06	
WCS Z: 1.00000e+00	-8.92263e-08	-1.91948e-07	

Constraint Set:ConstraintSet1

Load Set:LoadSet1

Resultant Load on Model:

in global X direction: -1.702700e+02  
 in global Y direction: 8.097798e+01  
 in global Z direction: -7.218320e-08

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
 max\_beam\_tensile: 0.000000e+00

Standard Design Study  
 Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
 Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (03:01:01)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (03:01:02)  
 Total Number of Equations: 1026  
 Maximum Edge Order: 3  
 Solving Equations (03:01:02)  
 Post-Processing Solution (03:01:02)  
 Checking Convergence (03:01:02)  
 Resource Check (03:01:02)  
 Elapsed Time (sec): 3.30  
 CPU Time (sec): 2.33  
 Memory Usage (kb): 102290  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 0

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (03:01:02)  
 Total Number of Equations: 3045  
 Maximum Edge Order: 6  
 Solving Equations (03:01:05)  
 Post-Processing Solution (03:01:06)  
 Checking Convergence (03:01:07)  
 Calculating Disp and Stress Results (03:01:09)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	1.30e+11	1.3% of 1.03e+13

Resource Check (03:01:09)  
 Elapsed Time (sec): 10.36

```

max_beam_torsion: 0.000000e+00
max_beam_total: 0.000000e+00
max_disp_mag: 9.347342e-01
max_disp_x: -9.300929e-01
max_disp_y: 7.850607e-02
max_disp_z: -6.497813e-02
max_prin_mag: 1.032986e+13
max_rot_mag: 0.000000e+00
max_rot_x: 0.000000e+00
max_rot_y: 0.000000e+00
max_rot_z: 0.000000e+00
max_stress_prin: 1.032986e+13
max_stress_vm: 7.746403e+12
max_stress_xx: 9.569639e+12
max_stress_xy: -3.374561e+12
max_stress_xz: 2.205042e+12
max_stress_yy: 3.355734e+12
max_stress_yz: 1.390969e+12
max_stress_zz: 3.834619e+12
min_stress_prin: -4.334523e+12
strain_energy: 9.315626e+08

```

Analysis 'link3\_half70' Completed (03:01:09)

-----  
Memory and Disk Usage:

```

Machine Type: Windows NT/x86
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 10.46
Total CPU Time (seconds): 8.52
Maximum Memory Usage (kilobytes): 102290
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 4096

```

```

Results Directory Size (kilobytes):
1129.\link3_half70

```

```

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):
4096.\link3_half70.tmp\kel1bas

```

-----  
Run Completed  
Wed Aug 07, 2002 03:01:09

- กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

-----  
ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'link3\_half50'

Thu Aug 08, 2002 10:45:46

-----  
Run Settings

Memory allocation for block solver: 48.0

Checking the model before creating elements..

These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

One or more forces may have no effect with the given constraints.  
One or more forces may have no effect with the given constraints.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

One or more forces may have no effect with the given constraints.

One or more forces may have no effect with the given constraints.

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

```

Length: m
Mass: kg
Time: sec
Temperature: K

```

Model Type: Three Dimensional

```

Points: 32
Edges: 127
Faces: 158

```

```

Springs: 0
Masses: 0
Beams: 0
Shells: 0
Solids: 63

```

```

Elements: 63

```

-----  
Standard Design Study

Static Analysis 'link\_half50':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:45:47)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (10:45:48)  
Total Number of Equations: 1026  
Maximum Edge Order: 3  
Solving Equations (10:45:48)  
Post-Processing Solution (10:45:48)  
Checking Convergence (10:45:48)  
Resource Check (10:45:48)  
Elapsed Time (sec): 3.67  
CPU Time (sec): 2.24  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 0

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (10:45:48)  
Total Number of Equations: 3045  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (10:45:51)  
Post-Processing Solution (10:45:52)  
Checking Convergence (10:45:53)  
Calculating Disp and Stress Results (10:45:54)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	1.00e+11	1.3% of 7.97e+12

Resource Check (10:45:55)  
Elapsed Time (sec): 10.46  
CPU Time (sec): 8.08  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Total Mass of Model: 2.145156e-01

Total Cost of Model: 0.000000e+00

Mass Moments of Inertia about WCS Origin:

Ixx: 3.91617e-05  
Ixy: 3.29274e-10 Iyy: 2.81862e-04  
Ixz: -6.32200e-05 Iyz: 6.28384e-11 Izz: 2.63820e-04

Principal MMOI and Principal Axes Relative to WCS Origin:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	2.81862e-04	2.80388e-04	2.25932e-05

WCS X: 5.15056e-06 -2.53515e-01 9.67331e-01  
WCS Y: 1.00000e+00 1.53945e-05 -1.28996e-06  
WCS Z: -1.45645e-05 9.67331e-01 2.53515e-01

Center of Mass Location Relative to WCS Origin:

(2.94710e-02, -2.91514e-08, 1.00000e-02)

Mass Moments of Inertia about the Center of Mass:

Ixx: 1.77102e-05  
Ixy: 1.44979e-10 Iyy: 7.40948e-05  
Ixz: 1.14773e-11 Iyz: 3.04153e-13 Izz: 7.75039e-05

Principal MMOI and Principal Axes Relative to COM:

	Max Prin	Mid Prin	Min Prin
	7.75039e-05	7.40948e-05	1.77102e-05

WCS X: 1.91948e-07 2.57125e-06 1.00000e+00  
WCS Y: 8.92258e-08 1.00000e+00 -2.57125e-06  
WCS Z: 1.00000e+00 -8.92263e-08 -1.91948e-07

Constraint Set: ConstraintSet1

Load Set: LoadSet1

Resultant Load on Model:  
in global X direction: -1.013145e+04  
in global Y direction: 8.424998e+01  
in global Z direction: -2.360103e-08

Measures:

max\_beam\_bending: 0.000000e+00  
max\_beam\_tensile: 0.000000e+00  
max\_beam\_torsion: 0.000000e+00  
max\_beam\_total: 0.000000e+00  
max\_disp\_mag: 7.216234e-01  
max\_disp\_x: -7.180404e-01  
max\_disp\_y: 6.060742e-02  
max\_disp\_z: -5.016371e-02  
max\_prin\_mag: 7.974749e+12  
max\_rot\_mag: 0.000000e+00  
max\_rot\_x: 0.000000e+00  
max\_rot\_y: 0.000000e+00  
max\_rot\_z: 0.000000e+00  
max\_stress\_prin: 7.974749e+12  
max\_stress\_vm: 5.980295e+12  
max\_stress\_xx: 7.387851e+12  
max\_stress\_xy: -2.605193e+12

```
max_stress_xz: 1.702313e+12
max_stress_yy: 2.590658e+12
max_stress_yz: 1.073841e+12
max_stress_zz: 2.960362e+12
min_stress_prin: -3.346292e+12
strain_energy: 5.552090e+08
strain100: 2.887625e+01
```

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:45:55)

Memory and Disk Usage:

```
Machine Type: Windows NT/x86
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0
Total Elapsed Time (seconds): 10.59
Total CPU Time (seconds): 8.14
Maximum Memory Usage (kilobytes): 102290
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 4096
```

```
Results Directory Size (kilobytes):
1126.\link3_half50
```

```
Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):
4096.\link3_half50.tmp\kel1bas
```

```
Run Completed
Thu Aug 08, 2002 10:45:55
```

### ค.3.2 ผลการวิเคราะห์แผนผังกำลังแบบ Sensitivity study

- กรณีที่ 1 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 100%

```
ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)
Summary for Design Study 'S_100'
Thu Aug 08, 2002 00:16:36
```

Run Settings

```
Memory allocation for block solver: 48.0
Perform mesh smoothing after each parameter update.
Remesh after each parameter update.
```

Checking the model before creating elements..
These checks take into account the fact that AutoGEM will

automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

One or more forces may have no effect with the given constraints.
One or more forces may have no effect with the given constraints.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

One or more forces may have no effect with the given constraints.

One or more forces may have no effect with the given constraints.

No errors were found in the model.

ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

```
Length: m
Mass: kg
Time: sec
Temperature: K
```

Model Type: Three Dimensional

```
Points: 32
Edges: 127
Faces: 158
```

```
Springs: 0
Masses: 0
Beams: 0
Shells: 0
Solids: 63
Elements: 63
```

Global Sensitivity Design Study

```
Parameter          Start          End
t1                  0.01          0.1
```

Sensitivity Step 1 of 11

```
Parameters:
t1          0.01
```

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (00:17:24)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (00:17:24)  
Total Number of Equations: 1026  
Maximum Edge Order: 3  
Solving Equations (00:17:24)  
Post-Processing Solution (00:17:24)  
Checking Convergence (00:17:24)  
Resource Check (00:17:25)  
Elapsed Time (sec): 49.09  
CPU Time (sec): 3.41  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 0

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (00:17:25)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:17:27)  
Post-Processing Solution (00:17:28)  
Checking Convergence (00:17:29)  
Calculating Disp and Stress Results (00:17:30)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----	-----	-----
LoadSet1	3.65e+11	1.5% of 2.46e+13

Resource Check (00:17:31)  
Elapsed Time (sec): 55.48  
CPU Time (sec): 8.97  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:17:31)

Sensitivity Step 2 of 11

Parameters:

t1 0.019

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:18:25)

Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6

Solving Equations (00:18:28)  
Post-Processing Solution (00:18:29)  
Calculating Disp and Stress Results (00:18:30)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----	-----	-----
LoadSet1	1.71e+11	1.2% of 1.45e+13

Resource Check (00:18:33)  
Elapsed Time (sec): 117.19  
CPU Time (sec): 15.55  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:18:33)

Sensitivity Step 3 of 11

Parameters:

t1 0.028

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:19:26)

Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6

Solving Equations (00:19:28)  
Post-Processing Solution (00:19:29)  
Calculating Disp and Stress Results (00:19:30)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----	-----	-----
LoadSet1	1.13e+11	1.1% of 1.04e+13

Resource Check (00:19:32)  
Elapsed Time (sec): 176.32  
CPU Time (sec): 22.08  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:19:32)

Sensitivity Step 4 of 11

Parameters:

t1 0.037

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:20:27)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:20:31)  
Post-Processing Solution (00:20:32)  
Calculating Disp and Stress Results (00:20:34)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	9.22e+10	1.1% of 8.21e+12

Resource Check (00:20:35)  
Elapsed Time (sec): 239.92  
CPU Time (sec): 29.04  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:20:35)

Sensitivity Step 5 of 11

Parameters:

t1 0.046

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:21:08)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:21:11)  
Post-Processing Solution (00:21:11)  
Calculating Disp and Stress Results (00:21:13)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		

LoadSet1 8.15e+10 1.2% of 6.79e+12

Resource Check

(00:21:15)

Elapsed Time (sec): 279.43  
CPU Time (sec): 35.83  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:21:15)

Sensitivity Step 6 of 11

Parameters:

t1 0.055

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:21:46)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:21:49)  
Post-Processing Solution (00:21:49)  
Calculating Disp and Stress Results (00:21:51)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	7.35e+10	1.3% of 5.83e+12

Resource Check

(00:21:52)

Elapsed Time (sec): 316.82  
CPU Time (sec): 42.41  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:21:52)

Sensitivity Step 7 of 11

Parameters:

t1 0.064

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:22:24)

Total Number of Equations: 3111  
 Maximum Edge Order: 6  
 Solving Equations (00:22:27)  
 Post-Processing Solution (00:22:28)  
 Calculating Disp and Stress Results (00:22:29)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	6.86e+10	1.3% of 5.12e+12
Resource Check (00:22:31)		
Elapsed Time (sec):	355.09	
CPU Time (sec):	49.17	
Memory Usage (kb):	103351	
Wrk Dir Dsk Usage (kb):	4096	

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:22:31)

Sensitivity Step 8 of 11

Parameters:

t1 0.073

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
 Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:23:02)  
 Total Number of Equations: 3111  
 Maximum Edge Order: 6  
 Solving Equations (00:23:05)  
 Post-Processing Solution (00:23:05)  
 Calculating Disp and Stress Results (00:23:07)  
 RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	6.52e+10	1.4% of 4.57e+12
Resource Check (00:23:09)		
Elapsed Time (sec):	393.04	
CPU Time (sec):	56.04	
Memory Usage (kb):	103351	
Wrk Dir Dsk Usage (kb):	4096	

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:23:09)

Sensitivity Step 9 of 11

Parameters:

t1 0.082

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
 Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:23:43)  
 Total Number of Equations: 3111  
 Maximum Edge Order: 6  
 Solving Equations (00:23:46)  
 Post-Processing Solution (00:23:47)  
 Calculating Disp and Stress Results (00:23:48)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	6.30e+10	1.5% of 4.12e+12
Resource Check (00:23:50)		
Elapsed Time (sec):	434.53	
CPU Time (sec):	63.02	
Memory Usage (kb):	103351	
Wrk Dir Dsk Usage (kb):	4096	

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:23:50)

Sensitivity Step 10 of 11

Parameters:

t1 0.091

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
 Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:24:20)  
 Total Number of Equations: 3111  
 Maximum Edge Order: 6  
 Solving Equations (00:24:23)  
 Post-Processing Solution (00:24:24)  
 Calculating Disp and Stress Results (00:24:25)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	6.14e+10	1.6% of 3.76e+12
Resource Check (00:24:27)		

Elapsed Time (sec): 471.57  
CPU Time (sec): 69.82  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096  
Analysis 'link3\_half100' Completed (00:24:27)

Sensitivity Step 11 of 11

Parameters:

t1 0.1

Static Analysis 'link3\_half100':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive

Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:24:58)

Total Number of Equations: 3111

Maximum Edge Order: 6

Solving Equations (00:25:01)

Post-Processing Solution (00:25:02)

Calculating Disp and Stress Results (00:25:04)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
----------	--------------	-------------------

LoadSet1	6.01e+10	1.7% of 3.46e+12
----------	----------	------------------

Resource Check (00:25:06)

Elapsed Time (sec): 510.00

CPU Time (sec): 76.93

Memory Usage (kb): 103351

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half100' Completed (00:25:06)

Completed Global Sensitivity Study

Use Results to plot measures.

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86

RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 510.15

Total CPU Time (seconds): 77.03

Maximum Memory Usage (kilobytes): 103351

Working Directory Disk Usage (kilobytes): 4096

Total Elapsed Time in Parameter Updates (seconds):

423.35

Total Engine Elapsed Time Minus Param Updates (seconds):

86.80

Total CPU Time in Parameter Updates (seconds):

6.62

Total Engine CPU Time Minus Param Updates (seconds):

70.41

Results Directory Size (kilobytes):

1077.\S\_100

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):

4096.\S\_100.tmp\kel1.bas

Run Completed

Thu Aug 08, 2002 00:25:06

## - กรณีที่ 2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 70%

Pro/MECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)

Summary for Design Study 'S\_70'

Thu Aug 08, 2002 00:44:10

Run Settings

Memory allocation for block solver: 48.0

Perform mesh smoothing after each parameter update.

Remesh after each parameter update.

Checking the model before creating elements...

These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

One or more forces may have no effect with the given constraints.

One or more forces may have no effect with the given constraints.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements...

One or more forces may have no effect with the given constraints.

One or more forces may have no effect with the given constraints.



No errors were found in the model.

Pro/MECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 32  
Edges: 127  
Faces: 158

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 63

Elements: 63

Global Sensitivity Design Study

Parameter t1 0.01 0.1 Start End

Sensitivity Step 1 of 11

Parameters:

t1 0.01

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (00:45:05)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (00:45:05)  
Total Number of Equations: 1026  
Maximum Edge Order: 3  
Solving Equations (00:45:05)  
Post-Processing Solution (00:45:05)  
Checking Convergence (00:45:06)  
Resource Check (00:45:06)

Elapsed Time (sec): 56.69  
CPU Time (sec): 3.69  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 0

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (00:45:06)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:45:09)  
Post-Processing Solution (00:45:10)  
Checking Convergence (00:45:11)  
Calculating Disp and Stress Results (00:45:12)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set Stress Error % of Max Prin Str  
-----  
LoadSet1 2.72e+11 1.5% of 1.83e+13

Resource Check (00:45:13)

Elapsed Time (sec): 64.08  
CPU Time (sec): 9.90  
Memory Usage (kb): 102290  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:45:13)

Sensitivity Step 2 of 11

Parameters:

t1 0.019

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:45:56)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:45:59)  
Post-Processing Solution (00:46:00)  
Calculating Disp and Stress Results (00:46:01)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set Stress Error % of Max Prin Str  
-----  
LoadSet1 1.28e+11 1.2% of 1.08e+13

Resource Check (00:46:03)

Elapsed Time (sec): 114.11  
CPU Time (sec): 16.93  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:46:03)

Sensitivity Step 3 of 11

Parameters:

t1 0.028

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:46:46)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6

Solving Equations (00:46:49)  
Post-Processing Solution (00:46:50)  
Calculating Disp and Stress Results (00:46:51)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----	-----	-----
LoadSet1	8.40e+10	1.1% of 7.77e+12

Resource Check (00:46:53)  
Elapsed Time (sec): 163.86  
CPU Time (sec): 23.96  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:46:53)

Sensitivity Step 4 of 11

Parameters:

t1 0.037

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:47:29)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6

Solving Equations (00:47:32)  
Post-Processing Solution (00:47:33)

Calculating Disp and Stress Results (00:47:34)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----	-----	-----
LoadSet1	6.87e+10	1.1% of 6.11e+12

Resource Check (00:47:36)

Elapsed Time (sec): 206.81  
CPU Time (sec): 30.94  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:47:36)

Sensitivity Step 5 of 11

Parameters:

t1 0.046

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:48:07)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6

Solving Equations (00:48:10)  
Post-Processing Solution (00:48:11)  
Calculating Disp and Stress Results (00:48:12)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----	-----	-----
LoadSet1	6.07e+10	1.2% of 5.06e+12

Resource Check (00:48:14)

Elapsed Time (sec): 244.69  
CPU Time (sec): 37.85  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:48:14)

Sensitivity Step 6 of 11

Parameters:

t1 0.055

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:48:45)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:48:48)  
Post-Processing Solution (00:48:49)  
Calculating Disp and Stress Results (00:48:50)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	5.47e+10	1.3% of 4.35e+12

Resource Check (00:48:52)  
Elapsed Time (sec): 282.97  
CPU Time (sec): 44.77  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:48:52)

Sensitivity Step 7 of 11

Parameters:

t1 0.064

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:49:23)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:49:26)  
Post-Processing Solution (00:49:27)  
Calculating Disp and Stress Results (00:49:28)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	5.12e+10	1.3% of 3.82e+12

Resource Check (00:49:30)  
Elapsed Time (sec): 320.68  
CPU Time (sec): 51.70  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:49:30)

Sensitivity Step 8 of 11

Parameters:

t1 0.073

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:50:01)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:50:05)  
Post-Processing Solution (00:50:06)  
Calculating Disp and Stress Results (00:50:07)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	4.88e+10	1.4% of 3.40e+12

Resource Check (00:50:09)  
Elapsed Time (sec): 359.71  
CPU Time (sec): 58.98  
Memory Usage (kb): 103351  
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:50:09)

Sensitivity Step 9 of 11

Parameters:

t1 0.082

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations (00:50:40)  
Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:50:42)  
Post-Processing Solution (00:50:43)  
Calculating Disp and Stress Results (00:50:45)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	4.69e+10	1.5% of 3.07e+12
Resource Check (00:50:46)		
Elapsed Time	(sec): 397.25	
CPU Time	(sec): 65.89	
Memory Usage	(kb): 103351	
Wrk Dir Dsk Usage	(kb): 4096	

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:50:46)

Sensitivity Step 10 of 11

Parameters:

t1 0.091

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations	(00:51:17)
Total Number of Equations: 3111	
Maximum Edge Order: 6	
Solving Equations	(00:51:20)
Post-Processing Solution	(00:51:21)
Calculating Disp and Stress Results	(00:51:22)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	4.57e+10	1.6% of 2.80e+12
Resource Check (00:51:24)		
Elapsed Time	(sec): 434.93	
CPU Time	(sec): 72.79	
Memory Usage	(kb): 103351	
Wrk Dir Dsk Usage	(kb): 4096	

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:51:24)

Sensitivity Step 11 of 11

Parameters:

t1 0.1

Static Analysis 'link3\_half70':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Calculating Element Equations	(00:51:55)
-------------------------------	------------

Total Number of Equations: 3111  
Maximum Edge Order: 6  
Solving Equations (00:51:58)  
Post-Processing Solution (00:51:59)  
Calculating Disp and Stress Results (00:52:00)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
LoadSet1	4.48e+10	1.7% of 2.58e+12
Resource Check (00:52:02)		
Elapsed Time	(sec): 472.51	
CPU Time	(sec): 79.78	
Memory Usage	(kb): 103351	
Wrk Dir Dsk Usage	(kb): 4096	

Analysis 'link3\_half70' Completed (00:52:02)

Completed Global Sensitivity Study

Use Results to plot measures.

Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NTx86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

Total Elapsed Time (seconds): 472.64  
Total CPU Time (seconds): 79.88  
Maximum Memory Usage (kilobytes): 103351  
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 4096  
Total Elapsed Time in Parameter Updates (seconds):  
384.70  
Total Engine Elapsed Time Minus Param Updates (seconds):  
87.94  
Total CPU Time in Parameter Updates (seconds):  
7.03  
Total Engine CPU Time Minus Param Updates (seconds):  
72.85

Results Directory Size (kilobytes):  
1077.\S\_70

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
4096.\S\_70.tmp\kel1.bas

Run Completed  
Thu Aug 08, 2002 00:52:02

### - กรณีที่ 3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้เท่ากับ 50%

ProMECHANICA STRUCTURE Version 23.3(311)  
Summary for Design Study 'S\_50'  
Thu Aug 08, 2002 10:27:52

#### Run Settings

Memory allocation for block solver:48.0  
Perform mesh smoothing after each parameter update.  
Remesh after each parameter update.

Checking the model before creating elements..

These checks take into account the fact that AutoGEM will automatically create elements in volumes with material properties, on surfaces with shell properties, and on curves with beam section properties.

One or more forces may have no effect with the given constraints.  
One or more forces may have no effect with the given constraints.

Generate elements automatically.

Checking the model after creating elements..

One or more forces may have no effect with the given constraints.

One or more forces may have no effect with the given constraints.

No errors were found in the model.

#### ProMECHANICA STRUCTURE Model Summary

Principal System of Units: Meter Kilogram Second (MKS)

Length: m  
Mass: kg  
Time: sec  
Temperature: K

Model Type: Three Dimensional

Points: 32  
Edges: 127  
Faces: 158

Springs: 0  
Masses: 0  
Beams: 0  
Shells: 0  
Solids: 63

Elements: 63

#### Global Sensitivity Design Study

Parameter		Start	End
t1	0.01 0.1		

Sensitivity Step 1 of 11

Parameters:

t1	0.01
----	------

Static Analysis 'link3\_half50':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:28:32)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (10:28:32)

Total Number of Equations: 1026

Maximum Edge Order: 3

Solving Equations (10:28:32)

Post-Processing Solution (10:28:33)

Checking Convergence (10:28:33)

Resource Check (10:28:33)

Elapsed Time (sec): 41.63

CPU Time (sec): 2.76

Memory Usage (kb): 102290

Wrk Dir Dsk Usage (kb): 0

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (10:28:33)

Total Number of Equations: 3111

Maximum Edge Order: 6

Solving Equations (10:28:36)

Post-Processing Solution (10:28:36)

Checking Convergence (10:28:38)

Calculating Disp and Stress Results (10:28:39)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	2.10e+11	1.5% of 1.42e+13
Resource Check (10:28:40)		
Elapsed Time	(sec): 48.23	
CPU Time	(sec): 8.35	
Memory Usage	(kb): 102290	
Wrk Dir Dsk Usage	(kb): 4096	

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:28:40)

Sensitivity Step 2 of 11

Parameters:

t1 0.019

Static Analysis 'link3\_half50':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:29:18)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations	(10:29:18)
Total Number of Equations: 1026	
Maximum Edge Order: 3	
Solving Equations	(10:29:18)
Post-Processing Solution	(10:29:18)
Checking Convergence	(10:29:18)
Resource Check	(10:29:19)
Elapsed Time (sec): 87.30	
CPU Time (sec): 9.96	
Memory Usage (kb): 103351	
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096	

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations	(10:29:19)
Total Number of Equations: 3045	
Maximum Edge Order: 6	
Solving Equations	(10:29:21)
Post-Processing Solution	(10:29:22)
Checking Convergence	(10:29:23)
Calculating Disp and Stress Results	(10:29:24)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		

LoadSet1	1.06e+11	1.3% of 8.32e+12
----------	----------	------------------

Resource Check (10:29:25)

Elapsed Time	(sec): 93.21
CPU Time	(sec): 15.29
Memory Usage	(kb): 103351
Wrk Dir Dsk Usage	(kb): 4096

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:29:25)

Sensitivity Step 3 of 11

Parameters:

t1 0.028

Static Analysis 'link3\_half50':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:30:00)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations	(10:30:00)
Total Number of Equations: 1026	
Maximum Edge Order: 3	
Solving Equations	(10:30:01)
Post-Processing Solution	(10:30:01)
Checking Convergence	(10:30:01)
Resource Check	(10:30:01)
Elapsed Time (sec): 129.69	
CPU Time (sec): 16.81	
Memory Usage (kb): 103351	
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096	

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations	(10:30:01)
Total Number of Equations: 2967	
Maximum Edge Order: 6	
Solving Equations	(10:30:03)
Post-Processing Solution	(10:30:04)
Checking Convergence	(10:30:05)
Calculating Disp and Stress Results	(10:30:06)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		

LoadSet1	7.10e+10	1.2% of 6.00e+12
----------	----------	------------------

```

Resource Check (10:30:07)
  Elapsed Time (sec): 135.54
  CPU Time (sec): 22.14
  Memory Usage (kb): 103351
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3_half50' Completed (10:30:07)

Sensitivity Step 4 of 11

Parameters:
  t1 0.037

Static Analysis 'link3_half50':

  Convergence Method: Single-Pass Adaptive
  Plotting Grid: 4

  Convergence Loop Log: (10:30:40)

  >> Pass 1 <<
    Calculating Element Equations (10:30:40)
      Total Number of Equations: 1026
      Maximum Edge Order: 3
    Solving Equations (10:30:40)
    Post-Processing Solution (10:30:41)
    Checking Convergence (10:30:41)
    Resource Check (10:30:41)
      Elapsed Time (sec): 169.59
      CPU Time (sec): 23.72
      Memory Usage (kb): 103351
      Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

  >> Pass 2 <<
    Calculating Element Equations (10:30:41)
      Total Number of Equations: 2967
      Maximum Edge Order: 6
    Solving Equations (10:30:43)
    Post-Processing Solution (10:30:44)
    Checking Convergence (10:30:45)
    Calculating Disp and Stress Results (10:30:46)

  RMS Stress Error Estimates:

  Load Set      Stress Error % of Max Prin Str
  -----
  LoadSet1  5.96e+10  1.3% of  4.72e+12

  Resource Check (10:30:47)
    Elapsed Time (sec): 175.40
    CPU Time (sec): 28.99

```

```

Memory Usage (kb): 103351
Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3_half50' Completed (10:30:47)

Sensitivity Step 5 of 11

Parameters:
  t1 0.046

Static Analysis 'link3_half50':

  Convergence Method: Single-Pass Adaptive
  Plotting Grid: 4

  Convergence Loop Log: (10:31:20)

  >> Pass 1 <<
    Calculating Element Equations (10:31:20)
      Total Number of Equations: 1026
      Maximum Edge Order: 3
    Solving Equations (10:31:20)
    Post-Processing Solution (10:31:20)
    Checking Convergence (10:31:21)
    Resource Check (10:31:21)
      Elapsed Time (sec): 209.59
      CPU Time (sec): 30.57
      Memory Usage (kb): 103351
      Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

  >> Pass 2 <<
    Calculating Element Equations (10:31:21)
      Total Number of Equations: 2967
      Maximum Edge Order: 6
    Solving Equations (10:31:24)
    Post-Processing Solution (10:31:24)
    Checking Convergence (10:31:26)
    Calculating Disp and Stress Results (10:31:27)

  RMS Stress Error Estimates:

  Load Set      Stress Error % of Max Prin Str
  -----
  LoadSet1  5.40e+10  1.4% of  3.90e+12

  Resource Check (10:31:27)
    Elapsed Time (sec): 215.91
    CPU Time (sec): 36.13
    Memory Usage (kb): 103351
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

```

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:31:27)

Sensitivity Step 6 of 11

Parameters:

t1 0.055

Static Analysis 'link3\_half50':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:31:58)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (10:31:58)  
 Total Number of Equations: 1026  
 Maximum Edge Order: 3  
 Solving Equations (10:31:59)  
 Post-Processing Solution (10:31:59)  
 Checking Convergence (10:31:59)  
 Resource Check (10:31:59)

Elapsed Time (sec): 247.88  
 CPU Time (sec): 37.70  
 Memory Usage (kb): 103351  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (10:31:59)  
 Total Number of Equations: 3141  
 Maximum Edge Order: 6  
 Solving Equations (10:32:02)  
 Post-Processing Solution (10:32:03)  
 Checking Convergence (10:32:04)  
 Calculating Disp and Stress Results (10:32:05)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	4.93e+10	1.5% of 3.34e+12

Resource Check (10:32:05)  
 Elapsed Time (sec): 254.18  
 CPU Time (sec): 43.45  
 Memory Usage (kb): 103351  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:32:05)

Sensitivity Step 7 of 11

Parameters:

t1 0.064

Static Analysis 'link3\_half50':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:32:36)

>> Pass 1 <<

Calculating Element Equations (10:32:36)  
 Total Number of Equations: 1026  
 Maximum Edge Order: 3  
 Solving Equations (10:32:37)  
 Post-Processing Solution (10:32:37)  
 Checking Convergence (10:32:37)  
 Resource Check (10:32:37)

Elapsed Time (sec): 285.94  
 CPU Time (sec): 45.08  
 Memory Usage (kb): 103351  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

>> Pass 2 <<

Calculating Element Equations (10:32:37)  
 Total Number of Equations: 3219  
 Maximum Edge Order: 6  
 Solving Equations (10:32:40)  
 Post-Processing Solution (10:32:41)  
 Checking Convergence (10:32:42)  
 Calculating Disp and Stress Results (10:32:44)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set	Stress Error	% of Max Prin Str
-----		
LoadSet1	4.67e+10	1.6% of 2.93e+12

Resource Check (10:32:44)  
 Elapsed Time (sec): 293.00  
 CPU Time (sec): 51.14  
 Memory Usage (kb): 103351  
 Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:32:44)

Sensitivity Step 8 of 11

Parameters:

t1 0.073

Static Analysis 'link3\_half50':



```

Convergence Method:Single-Pass Adaptive
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:33:17)
>> Pass 1 <<
  Calculating Element Equations (10:33:17)
    Total Number of Equations: 1026
    Maximum Edge Order: 3
  Solving Equations (10:33:17)
  Post-Processing Solution (10:33:17)
  Checking Convergence (10:33:17)
  Resource Check (10:33:18)
    Elapsed Time (sec): 326.34
    CPU Time (sec): 52.73
    Memory Usage (kb): 103351
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 4096
>> Pass 2 <<
  Calculating Element Equations (10:33:18)
    Total Number of Equations: 3288
    Maximum Edge Order: 6
  Solving Equations (10:33:20)
  Post-Processing Solution (10:33:21)
  Checking Convergence (10:33:22)
  Calculating Disp and Stress Results (10:33:24)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set          Stress Error %of Max Prin Str
-----
LoadSet1  4.44e+10  1.7% of  2.61e+12

Resource Check (10:33:24)
  Elapsed Time (sec): 332.87
  CPU Time (sec): 58.62
  Memory Usage (kb): 103351
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 5120

Analysis 'link3_half50'Completed (10:33:24)

Sensitivity Step 9 of 11

Parameters:
  t1  0.082

Static Analysis 'link3_half50':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:33:58)

```

```

>> Pass 1 <<
  Calculating Element Equations (10:33:58)
    Total Number of Equations: 1026
    Maximum Edge Order: 3
  Solving Equations (10:33:58)
  Post-Processing Solution (10:33:58)
  Checking Convergence (10:33:59)
  Resource Check (10:33:59)
    Elapsed Time (sec): 367.48
    CPU Time (sec): 60.18
    Memory Usage (kb): 103351
    Wrk Dir Dsk Usage (kb): 5120
>> Pass 2 <<
  Calculating Element Equations (10:33:59)
    Total Number of Equations: 3288
    Maximum Edge Order: 6
  Solving Equations (10:34:01)
  Post-Processing Solution (10:34:02)
  Checking Convergence (10:34:04)
  Calculating Disp and Stress Results (10:34:05)

RMS Stress Error Estimates:

Load Set          Stress Error %of Max Prin Str
-----
LoadSet1  4.19e+10  1.8% of  2.35e+12

Resource Check (10:34:05)
  Elapsed Time (sec): 373.96
  CPU Time (sec): 66.07
  Memory Usage (kb): 103351
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 5120

Analysis 'link3_half50'Completed (10:34:05)

Sensitivity Step 10 of 11

Parameters:
  t1  0.091

Static Analysis 'link3_half50':

Convergence Method:Single-Pass Adaptive
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:34:36)

>> Pass 1 <<
  Calculating Element Equations (10:34:36)
    Total Number of Equations: 1026

```

```

Maximum Edge Order: 3
Solving Equations (10:34:37)
Post-Processing Solution (10:34:37)
Checking Convergence (10:34:37)
Resource Check (10:34:37)
  Elapsed Time (sec): 405.89
  CPU Time (sec): 67.72
  Memory Usage (kb): 103351
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 5120
>> Pass 2 <<
  Calculating Element Equations (10:34:37)
    Total Number of Equations: 3288
    Maximum Edge Order: 6
  Solving Equations (10:34:40)
  Post-Processing Solution (10:34:41)
  Checking Convergence (10:34:43)
  Calculating Disp and Stress Results (10:34:44)

RMS Stress Error Estimates:
-----
Load Set          Stress Error %of Max Prin Str
-----
LoadSet1  4.01e+10  1.9% of  2.14e+12

Resource Check (10:34:45)
  Elapsed Time (sec): 413.33
  CPU Time (sec): 74.05
  Memory Usage (kb): 103351
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 5120

```

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:34:45)

Sensitivity Step 11 of 11

Parameters:

t1 0.1

Static Analysis 'link3\_half50':

Convergence Method: Single-Pass Adaptive  
Plotting Grid: 4

Convergence Loop Log: (10:35:19)

>> Pass 1 <<

```

Calculating Element Equations (10:35:19)
  Total Number of Equations: 1026
  Maximum Edge Order: 3
Solving Equations (10:35:19)
Post-Processing Solution (10:35:19)

```

```

Checking Convergence (10:35:20)
Resource Check (10:35:20)
  Elapsed Time (sec): 448.56
  CPU Time (sec): 75.66
  Memory Usage (kb): 103351
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 5120

```

>> Pass 2 <<

```

Calculating Element Equations (10:35:20)
  Total Number of Equations: 3288
  Maximum Edge Order: 6
Solving Equations (10:35:23)
Post-Processing Solution (10:35:23)
Checking Convergence (10:35:25)
Calculating Disp and Stress Results (10:35:26)

```

RMS Stress Error Estimates:

```

-----
Load Set          Stress Error %of Max Prin Str
-----
LoadSet1  3.88e+10  2.0% of  1.97e+12

```

```

Resource Check (10:35:26)
  Elapsed Time (sec): 455.09
  CPU Time (sec): 81.56
  Memory Usage (kb): 103351
  Wrk Dir Dsk Usage (kb): 5120

```

Analysis 'link3\_half50' Completed (10:35:26)

Completed Global Sensitivity Study

Use Results to plot measures.

-----  
Memory and Disk Usage:

Machine Type: Windows NT/x86  
RAM Allocation for Solver (megabytes): 48.0

```

Total Elapsed Time (seconds): 455.23
Total CPU Time (seconds): 81.68
Maximum Memory Usage (kilobytes): 103351
Working Directory Disk Usage (kilobytes): 5120
Total Elapsed Time in Parameter Updates (seconds):
367.71
Total Engine Elapsed Time Minus Param Updates (seconds):
87.52
Total CPU Time in Parameter Updates (seconds):
6.45

```

Total Engine CPU Time Minus Param Updates (seconds):  
75.23

Results Directory Size (kilobytes):  
1064.\S\_50

Maximum Data Base Working File Sizes (kilobytes):  
5120.\S\_50.tmp\kelibas

-----  
Run Completed  
Thu Aug 08, 2002 10:35:27  
-----

## ประวัติผู้เขียน

นางสาว โศรฎา แจ็งการ เกิดเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พุทธศักราช 2520 สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อพุทธศักราช  
2541 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบัน เป็นผู้ช่วยวิจัยโครงการพัฒนา  
เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบใหม่ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์ เป็นหัวหน้าโครง  
การ