

การจำลองแบบของอุปกรณ์ MEMS โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

5



นายกิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์

รฟ.
ก ๖๖๓๗
254๙

เลขหาญ.....
เลขทะเบียน..... 76652
วัน,เดือน,ปี.....-3 S.ค. 2550

b. 118 50358
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Modeling of MEMS devices using Finite Element Analysis



**A Special project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor
of Science**

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **Academic Year 2006** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การจำลองแบบของอุปกรณ์ MEMS โดยใช้
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

นักศึกษา

นายกิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

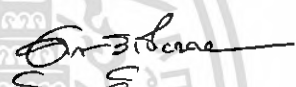

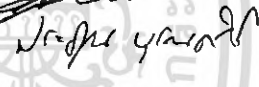
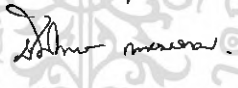
สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์ – โพลีเทคโตนิกอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ปิดิพร ถนอมงาม

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย	
กรรมการ	อ.วิฑูรย์ ยินดีสุข	
กรรมการ	ดร. ประธาน บุรณศิริ	
กรรมการที่ปรึกษา	ดร.ปิดิพร ถนอมงาม	



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การจำลองแบบของอุปกรณ์ MEMS โดยใช้
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

นักศึกษา

นายกิตติพงษ์ อำนวยสวัสดิ์

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา

2549

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ปิณฑร ถนอมงาม

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการจำลองแบบ 3 มิติ ของ โครงสร้างขนาดเล็กในระดับไมครอน โดยในโครงการนี้จะสนใจการจำลองแบบของสวิตช์เชิงแสงที่มีโครงสร้าง 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ชั้นอลูมิเนียม (Al) และชั้นซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ตามลำดับ โดยทำการให้อุณหภูมิกับปลายด้านหนึ่งของโครงสร้างแล้ววิเคราะห์การยกตัวที่อีกปลายหนึ่ง ซึ่งจะใช้การจำลองแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS ผลของการจำลองแบบแสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ของการยกตัวที่แปรผันตรงกับอุณหภูมิ โดยความชันของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของโครงสร้างสวิตช์เชิงแสง การจำลองแบบสวิตช์เชิงแสงนี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบสร้างสวิตช์เชิงแสงต่อไป

Special Project Title	A Modeling of MEMS devices using Finite Element Analysis	
Name	Mr. Kittiphong Amnuyswat	
Department	Applied Physics	Faculty of Science
Program	Applied Physics	
Academic year	2006	
Special Project Adviser	Dr. Pitiporn Thanomngam	

ABSTRACT

This special project is a 3 dimensional simulation of a structure in micrometer scale. In this paper, an optical switch with 3 layers of silicon dioxide (SiO_2), aluminum (Al) and silicon nitride (Si_3N_4) was studied. The thermal was applied at one end of this structure and measured the lifting at the other end. This simulation was done by finite element method with the computer program ANSYS. The result is shown as graphs of the lifting displacement versus temperature which show direct variation. The changing of slopes of these graphs are related to the lengths of the optical switch structure. This simulation can be used for designing and constructing the optical switch.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความสนับสนุนและช่วยเหลือจาก ดร. ปิติพร ถนอมงาม อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำงานวิจัย การแก้ไขข้อบกพร่อง รวมถึงให้คำปรึกษาต่างๆ ที่ใช้ในโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ดร. ประธาน นุรณศิริ อ.วิฑูรย์ ยินดีสุข และคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ

ขอขอบคุณ นาย เฉลิมพล สารินุตตร นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาต่างๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อน ที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาตลอดการสัมมนาโครงการพิเศษฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงการพิเศษนี้ ผู้เขียนขอมอบแต่ บิดามารดา และผู้มีพระคุณในการศึกษา

นายกิตติพงษ์ อำนวยสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ระบบเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม	3
2.1.1 กฎการเปลี่ยนขนาด	4
2.1.2 วัสดุที่ใช้ในระบบเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม	5
2.1.3 ประโยชน์ของระบบเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม	6
2.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	6
2.2.1 ความเค้นจากความร้อน	8
2.3 การถ่ายโอนความร้อน	9
2.3.1 การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำ	9
2.3.2 การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา	9
2.3.3 การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี	10
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2.4.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย	12
2.4.2 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น	13
2.4.3 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	18
3.1	ระบบสวิตช์เชิงแสง	18
3.2	คุณลักษณะของระบบสวิตช์เชิงแสง	19
3.3	การจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS	21
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผล	32
4.1	ตัวอย่างโครงสร้าง	32
4.2	ลักษณะของโหนด	33
4.3	Parameter ที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	36
4.4	ผลการจำลองโครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็ก	37
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	45
5.1	สรุปผลการทดลอง	45
5.2	ข้อเสนอแนะ	45
5.3	การประยุกต์ใช้งาน	46
เอกสารอ้างอิง		
ภาคผนวก		

สารบัญตาราง

ชื่อตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น	7
ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ย β สำหรับวัสดุชนิดต่างๆ	7
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ	19
ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลของ Force Load ที่กระทำกับ โครงสร้างขนาดเดียวกับ ตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก	37
ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดเดียวกับตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก	38
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อให้โครงสร้างสวิตช์ มีขนาดกว้าง 240 ไมครอน ยาว 400 ไมครอน มีความหนาเท่าเดิม	41
ตารางที่ 4.4 ตารางบันทึกผลระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อให้โครงสร้างสวิตช์ มีขนาดกว้าง 240 ไมครอน ยาว 600 ไมครอน มีความหนาเท่าเดิม	43

สารบัญรูป

ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม	3
รูปที่ 2.2 วัสดุฐานซิลิกอน	5
รูปที่ 2.3 การผนวกเอาความรู้แขนงต่างๆ มาใช้การคำนวณเชิงตัวเลข	12
รูปที่ 2.4 แผ่น โลหะที่เป็นตัวอย่างปัญหาที่จะวิเคราะห์	13
รูปที่ 2.5 การจำลองแผ่น โลหะด้วยตารางสี่เหลี่ยมเพื่อหาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี ผลต่างสืบเนื่อง	14
รูปที่ 2.6 การจำลองแผ่น โลหะด้วยเอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	14
รูปที่ 2.7 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเท่าๆ กัน	15
รูปที่ 2.8 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ	16
รูปที่ 3.1 สวิตช์เชิงแสง	18
รูปที่ 3.2 การทำงานของสวิตช์เชิงแสง	19
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการจำลองสวิตช์เชิงแสง	20
รูปที่ 3.4 โปรแกรม ANSYS	21
รูปที่ 3.5 การจัดการของ โปรแกรม ANSYS	21
รูปที่ 3.6 การระบุนชนิดของเอลิเมนต์และทางเลือกต่างๆ	24
รูปที่ 3.7 การระบุนปริมาณที่จำเพาะสำหรับเอลิเมนต์	24
รูปที่ 3.8 การกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	25
รูปที่ 3.9 การสร้างแบบจำลอง	26
รูปที่ 3.10 การกำหนดคุณลักษณะของการ Meshing	27
รูปที่ 3.11 การให้โปรแกรม ANSYS ทำการคำนวณแก่ระบบสมการ	28
รูปที่ 3.12 โปรแกรม ANSYS เตือนเมื่อคำนวณเสร็จแล้ว	28
รูปที่ 3.13 การพล็อตการเสียรูป	29
รูปที่ 3.14 พล็อตการกระจายของปริมาณใดๆ	30
รูปที่ 3.15 การแสดงปริมาณใดๆ ออกมาในรูปแบบตัวอักษร	31
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็กที่ใช้ในการจำลองแบบ	32
รูปที่ 4.2 โหลดน้ำหนักที่ใช้ในการจำลองแบบ	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.3 โหลดความร้อนที่ใช้ในการจำลองแบบ	35
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดเดียวกับ ตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก	37
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองของ Walied A. Moussa ซึ่งใช้โครงสร้างขนาดเท่ากันและ แรงขนาดเท่ากัน	38
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดเดียวกับ ตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก ที่น้ำหนักต่างๆ กัน	39
รูปที่ 4.7 แสดงการพล็อตการกระจัดในทิศแกน z	40
รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายของอุณหภูมิใน โครงสร้าง	40
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดสั้นกว่า ตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก ที่น้ำหนักต่างๆ กัน	42
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดยาวกว่า ตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก ที่น้ำหนักต่างๆ กัน	44
รูปที่ 5.1 การประยุกต์ใช้สวิตช์เชิงแสง	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical Systems: MEMS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการสร้างระบบหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ประกอบด้วยส่วนไฟฟ้าขับเคลื่อนและส่วนโครงสร้างที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งสร้างขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor Integrate Circuit) เช่นเดียวกับการผลิตวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เหล่านี้มีความสามารถที่จะรับรู้ ตรวจวัด ควบคุม และทำงานได้ในระดับที่ละเอียดมากและให้ผลเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เรววัดได้

ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคจึงเติบโตอย่างสูงและต่อเนื่อง โดยมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องมือวัดประเภทเซ็นเซอร์ขนาดเล็ก (Microsensor) ชนิดต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิ ความดัน ความเร่ง ฯลฯ และแอกทิเวเตอร์ชนิดต่างๆ เช่น ป้อนขนาดเล็ก ระบบสวิตช์เชิงแสง เป็นต้น เซ็นเซอร์ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคสามารถนำไฟใช้ประโยชน์ในสาขาต่างๆ อาทิเช่น การสื่อสาร โทรคมนาคม เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม รวมทั้งเทคโนโลยีการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพ

ในการออกแบบระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคจำเป็นต้องใช้ความรู้ในหลายๆ สาขาวิชา ไม่ว่าจะเป็นวิศวกรรม วัสดุศาสตร์ ฟิสิกส์ เคมี ซึ่งในการจำลองแบบอันเป็นส่วนสำคัญของการสร้างระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค จะใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการลดความยุ่งยาก ลดค่าใช้จ่ายและลดเวลาในการออกแบบได้เป็นอย่างมาก

สำหรับในโครงการพิเศษฉบับนี้จะทำการศึกษาคูณลักษณะของระบบสวิตช์เชิงแสงอันได้แก่ MEMS Multiplexer โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปมาช่วยในการจำลองแบบและการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อให้ได้ระบบสวิตช์เชิงแสงที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เพื่อศึกษาการใช้งานโปรแกรม ANSYS ในการจำลองแบบ
3. เพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบสวิตช์เชิงแสงที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

เพื่อทำการออกแบบระบบสวิตช์เชิงแสง และจำลองการทำงานของสวิตช์เชิงแสง ซึ่งเป็นระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค โดยการใช้โปรแกรมคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS เพื่อที่จะให้ได้ระบบสวิตช์เชิงแสงที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุดที่นำไปใช้งานในใยแก้วนำแสงต่อไป

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

แผนการดำเนินการแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1. ศึกษาทฤษฎีการจำลองแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- ขั้นตอนที่ 2. ศึกษาข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับระบบสวิตช์เชิงแสงซึ่งเป็นระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) รวมไปถึงหลักการพื้นฐานและการใช้งาน โปรแกรมคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS
- ขั้นตอนที่ 3. ทำการจำลองแบบของระบบสวิตช์เชิงแสงขึ้นบนโปรแกรม ANSYS
- ขั้นตอนที่ 4. ทำการคำนวณผลต่างๆ ที่เกิดบนระบบสวิตช์เชิงแสง MEMS Multiplexer
- ขั้นตอนที่ 5. ปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้น
- ขั้นตอนที่ 6. สรุปผล และนำเสนอแนวทางที่จะพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำการจำลองแบบระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคจากโปรแกรมคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS ได้
2. ได้ระบบสวิตช์เชิงแสงที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค

ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค เป็นชื่อเรียกในแถบอเมริกาเหนือ โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ในส่วนอื่นของโลกก็มีชื่อเรียกที่แตกต่างกันออกไป เช่น ในยุโรปจะเรียกว่า ระบบจิว (Microsystems Technology: MST) หรือในญี่ปุ่นจะเรียกว่า เครื่องกลจิว (Micromachines) แต่อย่างไรก็ตามทั้งหมดหมายถึงสิ่งเดียวกันคือ อุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีส่วนเคลื่อนที่ได้และสร้างด้วยเทคนิคของการสร้างขนาดจิว (Microfabrication) ซึ่งมีส่วนที่คล้ายคลึงกับการผลิตวงจรรวม โดยการสร้างลวดลาย (Lithography) การเคลือบสาร (Deposition) และการกัด (Etching) โดยที่ส่วนมากเกือบทั้งหมดถูกสร้างด้วยซิลิคอน (Silicon) โดยใช้คุณสมบัติที่ดัดแปลงของซิลิคอนทั้งด้านไฟฟ้า (Electrical Properties) และกลศาสตร์ (Mechanical Properties) มาใช้เพื่อสร้างส่วนที่เป็น โครงสร้างขนาดเล็กต่างๆ โดยมีส่วน วงจรอิเล็กทรอนิกส์และส่วนขับเคลื่อนที่เป็นไฟฟ้าบนชิปตัวเดียวกันซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่ประณีตและเปลี่ยนแปลงโฉมหน้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ และอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมปัจจุบัน

เทคโนโลยีนี้มีการนำความรู้หลากหลายสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วัสดุศาสตร์ เคมี ฟิสิกส์ รวมทั้งกลศาสตร์ มาตราวิทยา และการประกอบชิ้นส่วนมาใช้ในทุกๆ ขั้นตอน ตั้งแต่ การออกแบบ การสร้าง รวมทั้งการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุผลที่มีการนำอุปกรณ์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคมาใช้มากขึ้นเพราะว่า

1. ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค สามารถสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลง เป็นไปตามแนวโน้มการพัฒนาของสิ่งประดิษฐ์ในอนาคต
2. อุปกรณ์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค สามารถสร้างได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกัน (Batch Fabrication) เช่นเดียวกับเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมทำให้ราคาถูกลงมาก สามารถใช้แล้วทิ้งได้ในงานบางอย่างที่ไม่ต้องการใช้ซ้ำ เช่น การตรวจสอบสารชีวภาพ เป็นต้น
3. อุปกรณ์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค สามารถรวมเอาวงจรรีเลย์ทรอนิกส์เข้าไว้ด้วยกันได้ง่าย เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุประเภทเดียวกันกับวัสดุทางอิเล็กทรอนิกส์และเซมิคอนดักเตอร์
4. อุปกรณ์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค สามารถรวมเอาส่วนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ต่างๆ มารวมกันไว้บนชิปตัวเดียวได้ เช่น ส่วนตรวจวัด ส่วนประมวลผลและส่วนติดต่อสื่อสารข้อมูล เป็นต้น
5. เทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น ตัวตรวจวัดที่มีความไวสูงและกินไฟฟ้าน้อยมาก หรือในการตรวจวัดสารทางชีวภาพสามารถตรวจวัดได้รวดเร็วขึ้น ทั้งใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อยลงและปลอดภัยมากขึ้น
6. เทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สามารถฝังหรือติดเข้ากับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นๆ

2.1.1 กฎการเปลี่ยนขนาด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคไม่ได้เป็นเพียงแค่การย่อส่วนเท่านั้น แต่เป็นเทคโนโลยีการสร้างส่วนประกอบขนาดเล็ก ดังนั้นจึงต้องมีการคำนึงถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อขนาดเล็กลงเรียกว่า กฎการเปลี่ยนขนาด (Scaling Law) เช่น

- แรงเสียดทาน (Friction Force) จะมีผลมากกว่าแรงเฉื่อย (Inertial Force) ดังนั้นในอุปกรณ์ขนาดเล็ก แรงตึงผิว (Capillary Force) แรงจากไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) หรือแรงดึงดูดระหว่างอะตอมจึงมีผลเป็นอย่างมากในการทำงานของอุปกรณ์
- การสูญเสียความร้อน (Heat Dissipation) จะมากกว่าการเก็บกักความร้อน (Heat Storage) ในโครงสร้างขนาดเล็กจึงมีผลต่อการนำความร้อน (Thermal Conduction) และการถ่ายเทอุณหภูมิ (Thermal Transport)
- การถ่ายเทมวล (Mass Transport) และพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) มีผลเป็นอย่างมากเมื่อปริมาตรเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) เช่น Young's Modulus, Poisson's Ratio, ขนาดของ Grain และทฤษฎีทางกลศาสตร์ เช่น ความเค้น ความเครียด การสีกหรือ เป็นต้น ล้วนแล้วแต่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของโครงสร้าง
- การประกอบหรือบรรจุหีบห่อขนาดเล็กบนบรรจุภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน (Electronics Packages) ทำได้ยากต้องมีการประดิษฐ์วิธีการใหม่เนื่องจากต้องมีการปฏิสัมพันธ์กับสถานะแวดล้อม

2.1.2 วัสดุที่ใช้ในระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค

1. วัสดุฐาน (Substrate)

วัสดุฐาน (Substrate) ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการสร้างระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคมักจะเป็น ซิลิคอน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการสร้างวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย ด้วยเหตุผลที่ว่า

- ซิลิคอนบริสุทธิ์มีราคาถูกและหาง่าย
- ซิลิคอนสามารถเคลือบเป็นฟิล์มบางด้วยขบวนการที่ควบคุมได้
- ซิลิคอนมีสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ที่ดี มีความแข็งแรง การนำไฟฟ้า การนำไฟฟ้า การยืดหยุ่นที่เหมาะสม สามารถใช้ในการสร้างเครื่องกลขนาดเล็ก
- ซิลิคอนเป็นวัสดุเดียวกันกับวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งได้รับการศึกษาวิจัยเป็นเวลานานจึงสามารถสร้างได้อย่างแม่นยำและมีความหนาเชื่อถือได้ และสามารถรวมระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคและวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์บนชิปตัวเดียวกันได้



รูปที่ 2.2 วัสดุฐานซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุโครงสร้าง (Structure)

โครงสร้างของเครื่องกลจุลภาคสามารถสร้างขึ้นบนวัสดุฐาน เพื่อทำหน้าที่เป็นส่วนกลไก และส่วนนำไฟฟ้า หรือวัสดุที่คั่นระหว่างชั้นต่างๆ เพื่อกำหนดช่องว่าง (Sacrificial Layer) วัสดุโครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้วัสดุได้หลากหลายชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

2.1.3 ประโยชน์ของระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค

ในปัจจุบัน ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคถูกนำมาใช้งานต่างๆ มากมาย เช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ การแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสารและสารสนเทศ หรือแม้กระทั่งการป้องกันประเทศ และเรายังพบอุปกรณ์ที่ใช้ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคในชีวิตประจำวันมากมาย เช่น อุปกรณ์ควบคุม การทำงานของถุงลมนิรภัยในรถยนต์ หัวฉีดหมึกในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท หัวอ่านในอุปกรณ์เก็บความจำในคอมพิวเตอร์ ส่วนชีพแสดงภาพในเครื่องฉายภาพแบบโปรเจคเตอร์ เซ็นเซอร์วัดความดันเลือดในร่างกาย อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงในระบบสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง ป้อนและวาล์วขนาดเล็ก เซ็นเซอร์ชีวภาพ เป็นต้น

2.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ของแข็งส่วนใหญ่จะเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากการสั่นของโครงผลึก โดยสมมติให้แท่งวัตถุยาว L_0 มีอุณหภูมิเริ่มต้น T_0 ถ้าให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น ΔT ความยาวของวัตถุจะเพิ่มขึ้นเป็น ΔL กำหนดให้ α เป็นสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น มีหน่วยเป็น K^{-1} สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (2.1)$$

โดยปกติ α เป็นค่าคงที่ ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ไม่กว้างนัก และเราสามารถหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง ความยาว และอุณหภูมิน้อยๆ ดังสมการ

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (2.2)$$

ตาราง 2-1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น

วัสดุ	$\beta (K^{-1})$
อลูมิเนียม	2.4×10^{-5}
ทองเหลือง	2.0×10^{-5}
ทองแดง	1.7×10^{-5}
แก้ว	$0.4 - 0.9 \times 10^{-5}$
ควอทซ์	0.004×10^{-5}
คอนกรีต	$0.7 - 1.4 \times 10^{-5}$

การขยายตัวของวัตถุทั้งของแข็งและของเหลวเป็นไปทุกทิศทางทาง ไม่เฉพาะแต่ด้านยาวเท่านั้น ด้านกว้างและด้านสูงก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น เมื่อวัตถุขยายตัว ปริมาตรจึงเพิ่มขึ้น ΔV กำหนดให้ β เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางปริมาตร มีหน่วยเป็น K^{-1} สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (2.3)$$

ตาราง 2-2 ค่าเฉลี่ย β สำหรับวัสดุชนิดต่างๆ

ของแข็ง	$\beta (K^{-1})$	ของเหลว	$\beta (K^{-1})$
อลูมิเนียม	7.2×10^{-5}	เอทานอล	75×10^{-5}
ทองเหลือง	6.0×10^{-5}	คาร์บอนไดออกไซด์	115×10^{-5}
ทองแดง	5.1×10^{-5}	กลีเซอริน	49×10^{-5}
แก้ว	$1.2 - 2.7 \times 10^{-5}$	ปรอท	18×10^{-5}
เหล็กกล้า	3.6×10^{-5}		
ควอทซ์	0.12×10^{-5}		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ความเค้นจากความร้อน

ถ้ายึดแท่งวัตถุที่ปลายทั้ง 2 ข้าง และให้ความร้อน แท่งวัตถุจะขยายตัว แต่เนื่องจากมันถูกยึดไว้ จึงเกิดความเค้นอัดขึ้น แต่ถ้าลดอุณหภูมิลง แท่งวัตถุจะหดตัว แต่เนื่องจากมันถูกยึดไว้ จึงเกิดความเค้นดึงขึ้น ความเค้นทั้ง 2 กรณีเป็นความเค้นที่เกิดจากความร้อน

สมมติให้แท่งวัตถุยาว L_0 พื้นที่หน้าตัด A และอุณหภูมิลดลง ΔT การเปลี่ยนแปลงของความยาวต่อความยาวเดิม จะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\alpha \Delta T \quad (2.4)$$

สมการนี้มีเครื่องหมายเป็นลบ เพราะว่าแท่งวัตถุไม่ได้หดตัวลงอย่างอิสระขณะที่อุณหภูมิลดลง ตัวยึดจะดึงวัตถุให้ยาวขึ้น จากสมการนิยาม โมดูลัสของยังจะได้

$$Y = \frac{F A}{\Delta L, L_0} \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F}{A y}$$

เมื่อแทนสมการ (2.4) ลงในสมการ (2.5) จะได้

$$\alpha \Delta T + \frac{F}{A y} = 0 \quad (2.6)$$

$$F = -A y \alpha \Delta T$$

ถ้าอุณหภูมิลดลง ΔT เป็นลบ ค่า F จะเป็นบวก

$$\frac{F}{A} = -y \alpha \Delta T \quad (2.7)$$

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ΔT เป็นบวก ค่า $\frac{F}{A}$ เป็นลบ จะเป็นความเค้นชนิดอัด

ความเค้นเนื่องจากความร้อน อาจเกิดจากการขยายตัวทางความร้อนของวัตถุที่ไม่สม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น ใสน้ำร้อนเดือดลงไปในแก้ว ทำให้แก้วแตกสาเหตุเป็นเพราะปริมาตรที่ขยายตัวของน้ำมากกว่าการขยายตัวของแก้ว

2.3 การถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิ 2 บริเวณ โดยความร้อนจะถ่ายโอนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ถ่ายโอนจนกระทั่งทั้ง 2 บริเวณมีอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งเราสามารถแบ่งการถ่ายโอนความร้อนออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำ
2. การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา
3. การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี

2.3.1 การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำ

ถ้าเราเผาปลายแท่งโลหะข้างหนึ่ง ความร้อนก็จะไหลจากด้านปลายที่ร้อนไปยังด้านปลายที่เย็น โดยโมเลกุลของแท่งโลหะด้านปลายที่ร้อนจะเกิดการสั่นอย่างรุนแรง พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลที่อยู่ใกล้ๆ ส่งต่อไปเป็นทอดๆ โดยที่โมเลกุลไม่ได้มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง

ถ้าความร้อนไหลจากอุณหภูมิสูง T_2 ไปสู่อุณหภูมิต่ำ T_1 ตามแนวแกน x ของแท่งโลหะ ซึ่งมีความยาว L พื้นที่หน้าตัด A อัตราการไหลของความร้อนหรือกระแสความร้อน แทนด้วย H คือปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลง ΔQ ในช่วงเวลาใด Δt เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.8)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่บอก เรียกว่า สภานำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุ หน่วยของ H คือ $J.s^{-1}$ หรือ วัตต์ (W)

2.3.2. การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา

เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยอาศัยให้โมเลกุลของตัวกลางเคลื่อนที่พาพลังงานความร้อนไปกับตัวกลางจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการส่งผ่านความร้อนออกจากวัตถุก้อนหนึ่งโดยการพาความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของของไหลที่เป็นตัวพาความร้อนกับอุณหภูมิของพื้นที่ผิว A ที่อยู่ติดกับของไหล เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = hA\Delta T \quad (2.9)$$

เมื่อ h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection coefficient)

2.3.3. การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิเหนือศูนย์องศาสัมบูรณ์จะปลดปล่อยพลังงานจากผิวของวัตถุนั้น อัตราการแผ่รังสีจากผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว A และอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสี่ (หน่วยเป็นเคลวิน) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่า e เป็นค่าสภาพส่งรังสี (emissivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวนั้นๆ โดยค่า e จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติถ้าวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อม ก็จะแผ่และดูดกลืนพลังงานในอัตราเดียวกัน จึงทำให้อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าวัตถุนั้นร้อนกว่าสิ่งที่อยู่รอบๆ ก็จะแผ่พลังงานออกมามากกว่าที่จะดูดกลืน ตัวแผ่รังสีในอุดมคติหรือวัตถุดำ (black body) จะดูดกลืนรังสีทั้งหมดที่ตกกระทบวัตถุ ค่า e ของวัตถุดำมีค่าเท่ากับ 1

กฎของสเตฟาน เขียนเป็นสมการการแผ่รังสีของวัตถุได้ดังนี้

$$H = e\sigma AT^4 \quad (2.10)$$

H คือ อัตราการแผ่รังสีมีหน่วยเป็นวัตต์

σ เป็นค่าคงตัวสากล เรียกว่า ค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลตมานน์ = 5.67×10^{-8}

$W.m^{-2}.K^{-4}$

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

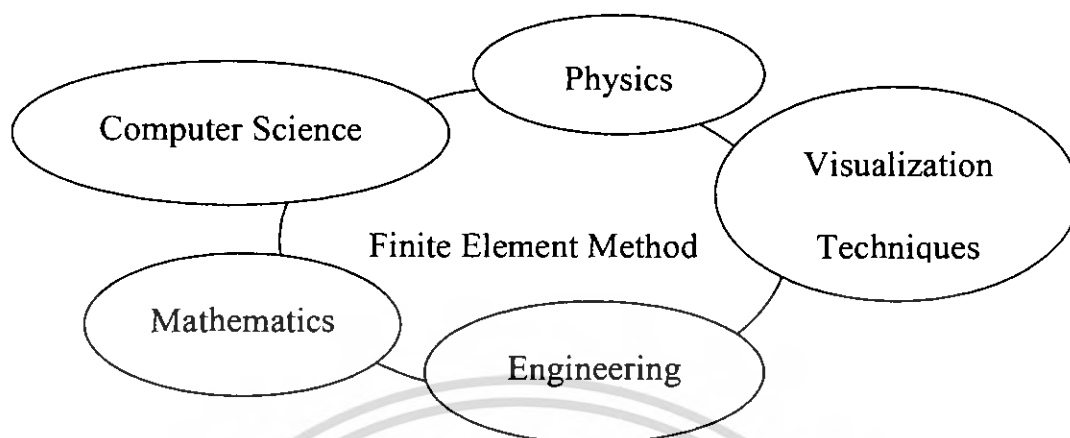
ปัญหาทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ ล้วนประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ในรูปแบบต่างๆ กัน ที่สอดคล้องกับลักษณะชนิดของปัญหานั้นๆ สมการเชิงอนุพันธ์ใดๆ จะถูกเรียกว่าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย หากสมการนั้นประกอบด้วยจำนวนจำนวนตัวแปรต้นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เช่น

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.11)$$

โดยในที่นี้ x และ y คือตัวแปรต้น และ u คือตัวแปรตาม สมการข้างต้นนี้เรียกว่าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ซึ่งการจัดอันดับนั้นวัดจากอันดับที่สูงที่สุดของตัวอนุพันธ์ในสมการนั้น สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์โดยทั่วไปแล้วจะมีอันดับจากหนึ่ง ไปจนถึงอันดับสี่ จำนวนตัวแปรต้นก็เช่นเดียวกันอาจจะมีจำนวนหลายตัว เช่น x, y, z ซึ่งแทนโคออร์ดิเนตใน 3 มิติ และ t แทนเวลา เป็นต้น

การแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ปกติแล้วจะกระทำโดย

1. การใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง (Advance Mathematics) เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution)
 2. การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution)
- ประโยชน์จากการใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงจะก่อให้เกิดผลเฉลยแม่นยำที่ถูกต้องเที่ยงตรงตามตำแหน่งใดๆ ที่ต้องการ แต่โดยปกติสำหรับปัญหาต่างๆ ไปแล้ว ผลเฉลยแม่นยำจะไม่สามารถหาได้ โดยเฉพาะปัญหาทางปฏิบัติในปัจจุบันที่เงื่อนไขขอบเขตและลักษณะรูปแบบของปัญหานั้นมีความซับซ้อน ทำให้ต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่สามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี แต่ในขณะเดียวกันจะให้ผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งบางตำแหน่งเท่านั้น ซึ่งวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) แบบนี้ จึงจำเป็นต้องมีการผนวกเอาความรู้แขนงต่างๆ มาใช้งานร่วมกันดังรูป



รูปที่ 2.3 การผนวกเอาความรู้แขนงต่างๆ มาใช้การคำนวณเชิงตัวเลข

2.4.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

เราจะศึกษาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สองที่อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f \quad (2.12)$$

โดย a, b, c อาจเป็นค่าคงที่หรือฟังก์ชันของ x และ y ส่วน f อาจเป็นค่าคงที่หรือเป็นฟังก์ชันของ $x, y, u, \frac{\partial u}{\partial x}$ และ $\frac{\partial u}{\partial y}$ เราสามารถจำแนกสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยออกเป็นชนิดต่างๆ กัน ดังต่อไปนี้

1. สมการเอลลิปติก (Elliptic Equation) หาก $b^2 - 4ac < 0$ ตัวอย่างของสมการในกรณีนี้ได้แก่ สมการของลาปลาซ (Laplace's Equation) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.13)$$

2. สมการพาราโบลิก (Parabolic Equation) หาก $b^2 - 4ac = 0$ ตัวอย่างของสมการในกรณีนี้ได้แก่ สมการการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สมการไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Equation) หาก $b^2 - 4ac > 0$ ตัวอย่างของสมการในกรณีนี้ได้แก่ สมการการสั่นของเส้นลวดที่ขึงปลายทั้งสองข้าง ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

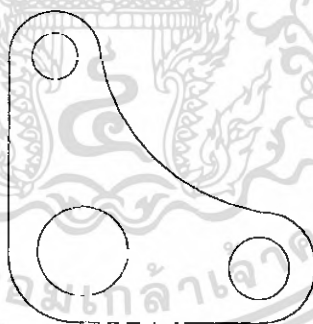
$$k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

2.4.2 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) หมายถึง เงื่อนไขที่กำหนดให้ที่ขอบเขตของปัญหานั้น โดยทั่วไปในทางปฏิบัติแล้ว เงื่อนไขขอบเขตสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ

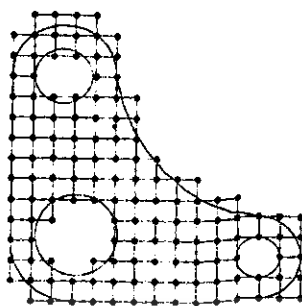
- เงื่อนไขแบบดิริคเลต (Dirichlet Condition) เป็นเงื่อนไขของการกำหนดตัวแปรตาม u ที่ขอบเขต เช่น การกำหนดอุณหภูมิที่ปลายแท่งโลหะ เป็นต้น
- เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann Condition) เป็นเงื่อนไขของการกำหนดค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของตัวแปรตาม u ที่ขอบเขตนั้น นั่นคือ กำหนด $\frac{\partial u}{\partial x}$

ส่วนเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) หมายถึงเงื่อนไขที่กำหนดให้ในตอนเริ่มต้นของการแก้ปัญหา นั่นคือ เงื่อนไขที่เวลา $t = 0$

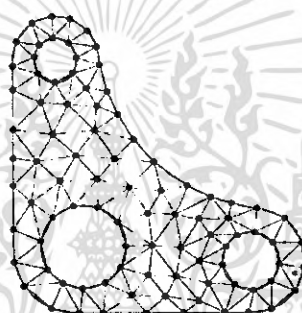


รูปที่ 2.4 แผ่นโลหะที่เป็นตัวอย่างปัญหาที่จะวิเคราะห์

โดยทั่วไปแล้ว สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ต่างอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน และจำเป็นต้องแก้ด้วยระเบียบวิธีที่ต่างกัน ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย อาจแบ่งได้เป็น 2 ระเบียบวิธีใหญ่ๆ คือ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) และ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)



รูปที่ 2.5 การจำลองแผ่นโลหะด้วยตารางสี่เหลี่ยมเพื่อการวิเคราะห์ด้วย
ระเบียบวิธีผลต่างสปีเนียง



รูปที่ 2.6 การจำลองแผ่นโลหะด้วยเอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์ด้วย
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง โดยปกติแล้วปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม ค่าของผลเฉลยแม่นยำตรงซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีขนาดต่างๆ กันและเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าจำนวนต่างๆ ดังกล่าวซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าแม่นยำตรงทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน เรียกว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการดังกล่าวนี้บอกเป็นนัยว่า ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์เงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์

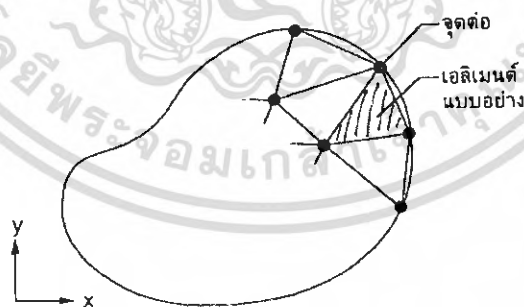
แล้วทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ โดยสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมานี้มาประกอบกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งความหมายทางกายภาพของการทำเช่นนี้ ก็คล้ายกับการนำตุ๊กๆ เอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดรูปร่างลักษณะของปัญหาทั้งหมด จากนั้นจึงทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้มันลงในระบบสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการทั้งหมด ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหานั้น

จะเห็นได้ว่า ความเที่ยงตรงของผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณมาได้นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น

2.4.3 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

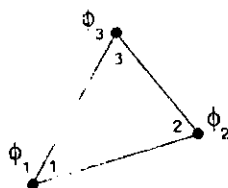
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การแบ่งรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาการเสียดรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นในของแข็ง ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในของแข็งหรือของเหลว หรือปัญหาของการไหลของของเหลว เป็นต้น



รูปที่ 2.7 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเท่าๆ กัน

2. การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่น เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมในสองมิติ เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังรูป



รูปที่ 2.8 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ

โดยจุดต่อเหล่านี้ เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Nodal Unknown) ซึ่งก็คือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจแทนขนาดของการเสียดรูป แทนค่าของอุณหภูมิ หรือแทนค่าของความเร็วของของเหลว เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.16)$$

โดยที่ $N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ สมการ (6) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

(1×3) (3×1)

โดยที่ $[N]$ แทนเมทริกซ์แนวนอน (Row Matrix) ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และ $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมทริกซ์หรือเมทริกซ์แนวตั้ง (Column Matrix) ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น

3. การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) เช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.19)$$

โดยครรชนีล่าง e แสดงถึงเมตริกซ์ต่างๆ นั้นเป็นเมตริกซ์ระดับเอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนนี้อาจถือได้ว่าเป็นหัวใจของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสมการของเอลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ ซึ่งพบว่า สมการของเอลิเมนต์นี้สามารถประดิษฐ์ได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการประยุกต์ระเบียบวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) ซึ่งถูกจัดได้ว่าเป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในการประยุกต์กับปัญหาต่างๆ ในปัจจุบัน

4. การนำสมการที่ประดิษฐ์ขึ้นได้จากทุกๆ เอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการ (System of Equations) ขนาดใหญ่ขึ้น ดังนี้

$$\sum (Element Eq) \Rightarrow [K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (2.20)$$

โดยตัวห้อย sys บ่งบอกถึงเมตริกซ์นั้นๆ เป็นเมตริกซ์ของระบบสมการรวม

5. การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในระบบสมการ จากนั้นจึงแก้ระบบสมการนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{sys}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ

6. การคำนวณค่าที่ต่อเนื่องอื่นๆ หลังจากคำนวณค่าที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 ออกมาได้แล้ว เช่น หลังจากที่อยู่ค่าการเคลื่อนตัวของการเสียรูปในของแข็งก็สามารถคำนวณค่าความเครียดและความเค้นได้ เป็นต้น

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้ จะเห็นได้ว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ (ขั้นตอนที่ 3) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนดมาให้

76652

บทที่ 3

วิธีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เนื่องจากโครงการพิเศษฉบับนี้เกี่ยวข้องเนื่องกับการจำลองแบบของ โครงสร้างขนาดเล็กใน ระดับไมครอน ซึ่งมีขั้นตอนหลักๆ ที่คล้ายคลึงกับการจำลองแบบของ โครงสร้างทั่วไป โดยการวิจัย นี้จะทำการจำลองแบบ โครงสร้างนี้ในลักษณะ 3 มิติ โดยมีการกระตุ้น โครงสร้างนี้ด้วยแรง (น้ำหนัก) และ โหลดความร้อน เป็นต้น

3.1 ระบบสวิตซ์เชิงแสง

ระบบสวิตซ์เชิงแสง ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคถูกสร้างขึ้นมาจากแผ่น บางยาวประกอบด้วยวัสดุหลายชั้น และมีกระจกวางอยู่ตลอดทิศความกว้าง โดยทั่วไปแล้วความ ยาวและ ความกว้างของระบบสวิตซ์เชิงแสงจะอยู่ในระดับ 100 ไมครอน ในขณะที่ความหนา มี ขนาดต่ำกว่า 10 ไมครอน ทำให้ อุปกรณ์นี้สามารถพิจารณาเป็น โครงสร้างคล้ายกับคาน ดังรูปที่ 3.3 โดยความหนาของแต่ละชั้นและคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สวิตซ์เชิงแสง

คุณสมบัติ	Silicon Dioxide	Aluminum	Silicon Nitride
Young's Modulus (GPa)	75	70	380
Poisson's ratio	0.17	0.33	0.24
Density (kg/m ³)	2200	2700	3100
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	0.5	23.1	3.1
Melting Point (°C)	1830	660	1900

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

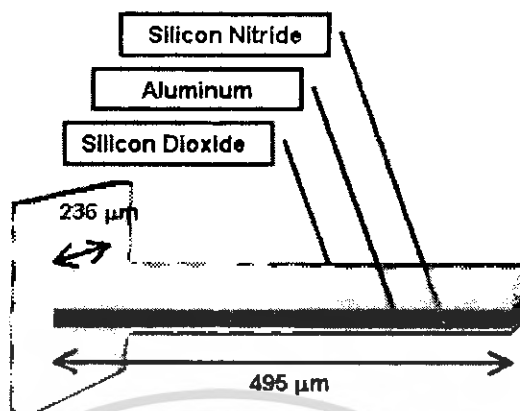
3.2 คุณลักษณะของระบบสวิตช์เชิงแสง

พฤติกรรมเชิงกลของระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหลายชนิดเป็นผลโดยตรงมาจากปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ไม่เป็นเชิงกล เช่น ไฟฟ้าสถิตย์, แม่เหล็กไฟฟ้าและการส่งผ่านความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 3.2 การทำงานของสวิตช์เชิงแสง

ในที่นี้ เราจะใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ MEMS Multiplexer ที่ใช้ในใยแก้วนำแสง สวิตช์ขนาดเล็กนี้ทำงานโดยการปรับตำแหน่งและการโฟกัสรังสีของแสง สำหรับการทำงานที่เหมาะสม สวิตช์จะต้องยังคงจัดอยู่เป็นแนวเดียวกัน โดยจะสนใจว่าผลของความร้อนมีอิทธิพลต่อการจัดเรียงนี้อย่างไร



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการจำลองสวิตช์เชิงแสง

โดยการวิเคราะห์โครงสร้างนี้ สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาการตอบสนอง โครงสร้าง 3 มิติ ที่มีขนาดและคุณสมบัติเดียวกันกับตัวอย่าง โดยมีโหนดน้ำหนักระทำที่บริเวณปลายโครงสร้าง และมีโหนดความร้อนกระทำที่ขอบ

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาการตอบสนอง โครงสร้าง 3 มิติ โดยให้โครงสร้างมีขนาดที่แตกต่างไปจากเดิม แต่ยังคงมีคุณสมบัติเดียวกันกับตัวอย่าง โดยมีโหนดน้ำหนักระทำที่บริเวณปลายโครงสร้าง และมีโหนดความร้อนกระทำที่ขอบเช่นเดิม

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาการตอบสนอง โครงสร้าง 3 มิติ โดยให้โครงสร้างมีขนาดและคุณสมบัติเดียวกันกับตัวอย่าง แต่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแต่ละชั้นสาร โดยมีโหนดน้ำหนักระทำที่บริเวณปลายโครงสร้าง และมีโหนดความร้อนกระทำที่ขอบ

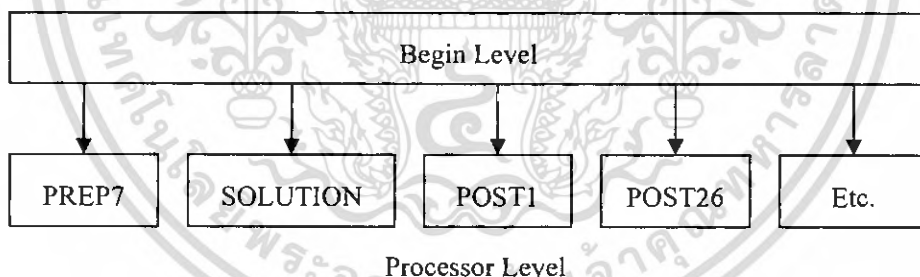
3.3 การจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS

ANSYS เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถใช้งานได้แทบทุกสาขาในงานทางด้านวิศวกรรม ทั้งการวิเคราะห์โครงสร้าง การส่งผ่านความร้อน การวิเคราะห์ของไหล และปัญหาทางไฟฟ้าแม่เหล็ก เป็นต้น นอกจากงานทางด้านวิศวกรรมแล้ว โปรแกรม ANSYS ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นอีกหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ Biomedicals อุตสาหกรรมเครื่องมือหนัก ระบบเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม รวมถึงอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น



รูปที่ 3.4 โปรแกรม ANSYS

โปรแกรม ANSYS สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระดับอย่างง่าย ๆ ได้แก่ Begin Level และ Processor Level เมื่อเปิดโปรแกรมมาจะอยู่ที่ Begin level ซึ่งที่ระดับนี้สามารถทำการจัดการกับฐานข้อมูลและไฟล์ของระบบได้ อีกทั้งสามารถเข้าถึง ANSYS Processor ใดๆ ได้ Processor คือ ส่วนที่รวบรวม Functions และ Routines ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่จำเพาะเจาะจงใดๆ ดังรูป



รูปที่ 3.5 การจัดการของโปรแกรม ANSYS

โดยทั่วไปแล้ว ขั้นตอนในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS จะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้

1. **Preliminary Decisions** เป็นการตัดสินใจขั้นพื้นฐานก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์
 - 1.1 Which analysis type?
 - 1.2 What to model?
 - 1.3 Which element type?
2. **Preprocessing** ประกอบด้วยคำสั่งที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลอง
 - 2.1 Define element type and option
 - 2.2 Define element real constant
 - 2.3 Define material property
 - 2.4 Create model geometry
 - 2.5 Define mesh controls
 - 2.6 Mesh the object created
3. **Solution** ประกอบด้วย คำสั่งที่ใช้ในการใส่เงื่อนไขขอบเขตและโหลด และการคำนวณให้ได้มาซึ่ง nodal solutions
 - 3.1 Define loads and conditions
 - 3.2 Solving to certain the solution
4. **Postprocessing** ประกอบด้วยคำสั่งที่ใช้สำหรับแสดงผลของการวิเคราะห์
 - 4.1 Read result data from result file
 - 4.2 Plot result
 - 4.3 List result

1. Preliminary Decisions เป็นการตัดสินใจขั้นพื้นฐานก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์

1.1 Which analysis type?

ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เราจะต้องรู้ก่อนว่าปัญหาที่เราจะทำการวิเคราะห์นั้นเป็นปัญหาชนิดใด ซึ่งโปรแกรม ANSYS นั้นได้ทำการแบ่งปัญหาที่สามารถทำการวิเคราะห์ออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

- Structure เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางโครงสร้าง ซึ่งเกี่ยวกับการเสถียรภาพ ความเค้น ความเครียด
- Thermal เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อน ซึ่งเกี่ยวกับการส่งผ่านความร้อนและการกระจายอุณหภูมิ
- Electromagnetic เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านไฟฟ้าและแม่เหล็ก ซึ่งเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์
- Fluid เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางของไหล ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของทั้งอากาศและของเหลว
- Coupled field เป็นการวิเคราะห์ปัญหาหลายๆ ชนิดข้างต้นร่วมกัน

1.2 What to model?

ก่อนที่จะเริ่มต้นทำการวิเคราะห์ปัญหาจริงๆ นั้น เราจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์ว่ามีลักษณะสมมาตรหรือไม่ การที่โครงสร้างที่จะวิเคราะห์มีลักษณะเป็นสมมาตรแล้ว เราสามารถทำการวิเคราะห์เฉพาะส่วนที่เป็นสมมาตรนั้น เพื่อให้ได้โครงสร้างของปัญหาที่จะทำการจำลองง่ายที่สุด

1.3 Which element type?

อีกขั้นตอนหนึ่งก่อนการทำการวิเคราะห์นั้น จำเป็นที่จะต้องเลือกชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ โดยเอลิเมนต์แต่ละชนิดนั้น ก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

2. Preprocessing ประกอบด้วยคำสั่งที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลอง

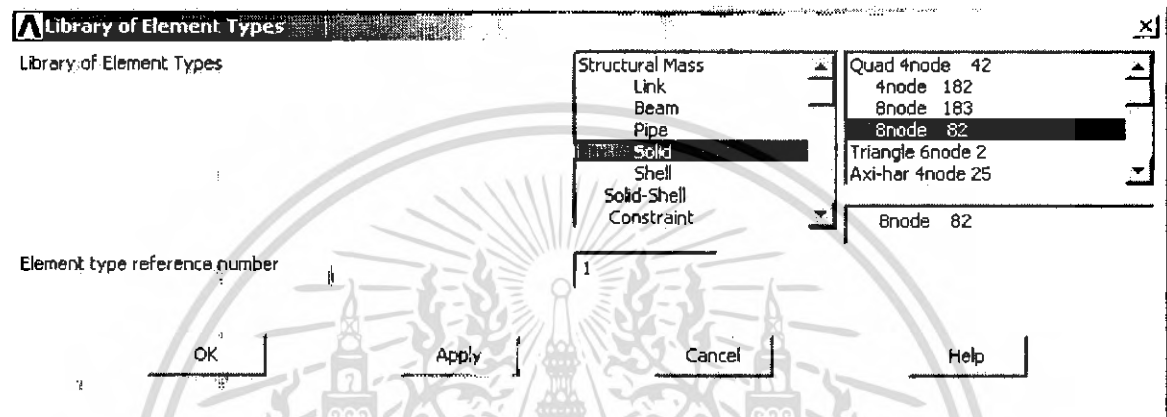
2.1 Define element type and option

เป็นการระบุชนิดของเอลิเมนต์และทางเลือกต่างๆ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม ANSYS ได้จัดเตรียมเอลิเมนต์ไว้มากกว่า 150 ชนิด ไว้เพื่อการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ที่ถูกต้องเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการวิเคราะห์ ในโปรแกรม ANSYS แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเอลิเมนต์จะถูกระบุด้วย category name ตามด้วย number หลายๆ เอลิเมนต์ใน ANSYS จะมีทางเลือกที่อนุญาตให้แก้ไขข้อมูลเพิ่มเติมได้ในการวิเคราะห์ ซึ่งเรียกว่า keyoptions ซึ่งการกำหนดชนิดของเอลิเมนต์และทางเลือกต่างๆ ได้จาก

Main menu: **Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**

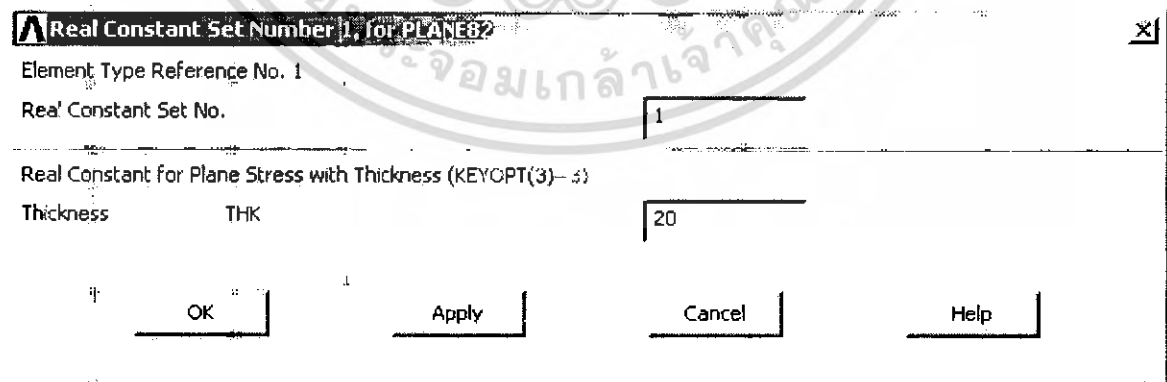


รูปที่ 3.6 การระบุชนิดของเอลิเมนต์และทางเลือกต่างๆ

2.2 Define element real constants

เป็นการระบุปริมาณที่จำเพาะสำหรับเอลิเมนต์ แต่ไม่ทุกเอลิเมนต์ที่ต้องการค่า real constant โดยค่า real constant นั้นสามารถกำหนดด้วยคำสั่ง

Main menu: **Preprocessor > Real Constant > Add/Edit/Delete**



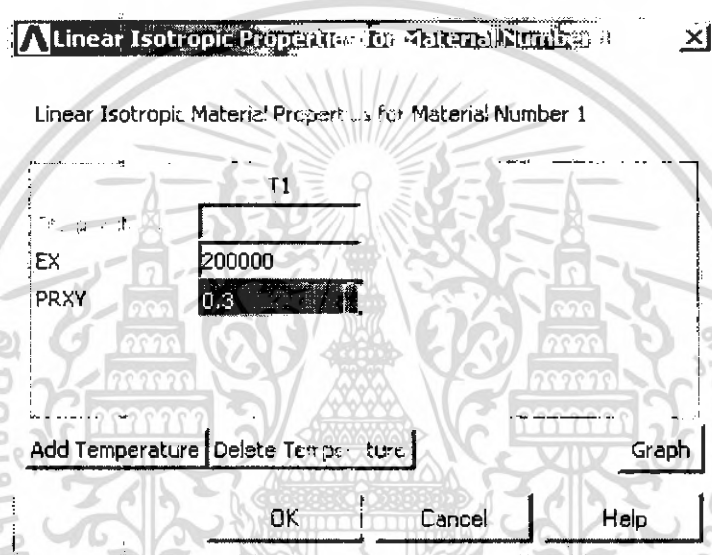
รูปที่ 3.7 การระบุปริมาณที่จำเพาะสำหรับเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Define material properties

ที่จุดนี้ เป็นการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น สำหรับปัญหา โครงสร้างของแข็ง จะต้องทำการกำหนดค่า modulus of elasticity, Poisson's ratio, ความหนาแน่นของวัสดุ, ค่าความนำไฟฟ้าและค่าความร้อนจำเพาะ ซึ่งการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ นั้นสามารถกำหนดด้วยคำสั่ง

Main menu: **Preprocessor > Material Props > Material Models**

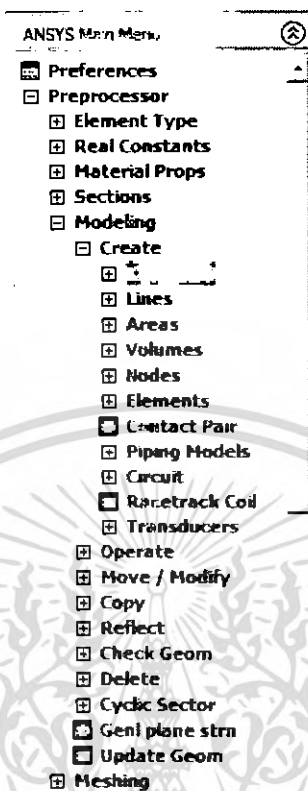


รูปที่ 3.8 การกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

2.4 Create model geometry

ในการสร้างแบบจำลองหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบเล็กๆ อันได้แก่ keypoint, เส้น, พื้นที่ และปริมาตร โดยปริมาตรจะมีนัยสำคัญสูงสุด โดยปริมาตรเกิดขึ้นจากการปิดล้อมของพื้นที่ พื้นที่เกิดจากการปิดล้อมของเส้น และเส้นเกิดจาก Keypoint โดย Keypoint จะมีนัยสำคัญต่ำที่สุด

Main menu: **Preprocessor > Modeling**



รูปที่ 3.9 การสร้างแบบจำลอง

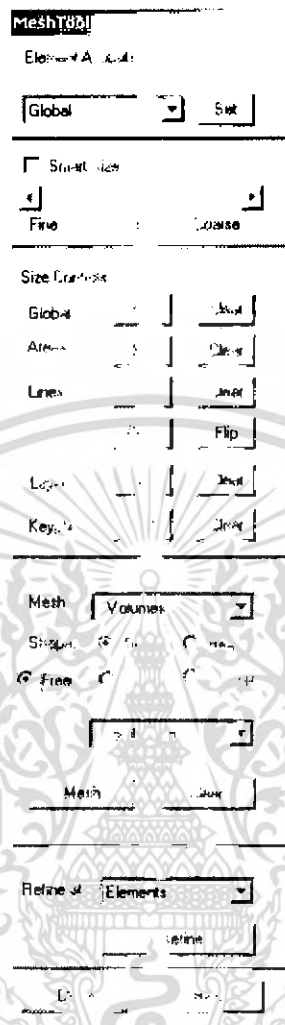
2.5 Define mesh controls

หลังจากที่เราทำการสร้างโครงสร้างของปัญหานั้นๆ เสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะเริ่มทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็นจุดและเอลิเมนต์ โดยกระบวนการนี้เรียกว่า Meshing โดยที่เราสามารถกำหนดคุณลักษณะของการ Meshing อันได้แก่

- องศาแห่งความอิสระ Degree of freedom (DOF) ได้แก่ การกระจัด, อุณหภูมิ, แรง
- รูปร่างของเอลิเมนต์ ได้แก่ สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม บล็อก Tetrahedral เป็นต้น
- Dimensionary : 2D, 3D, line, shell
- Assumed displacement shape: Linear, Quadratic

ซึ่งเราสามารถกำหนดคุณลักษณะของเอลิเมนต์ได้จากคำสั่ง

Main menu: **Preprocessor > Meshing > Meshtool**



รูปที่ 3.10 การกำหนดคุณลักษณะของการ Meshing

2.6 Mesh the object created

หลังจากที่เราได้กำหนดคุณลักษณะของการ Meshing ไว้แล้ว ขั้นตอนต่อมา ก็คือการแบ่งโครงสร้างจริงๆ โดยที่โปรแกรม ANSYS สามารถทำการสร้างจุดและเอลิเมนต์อย่างง่ายได้เอง โดยใช้คำสั่ง

Main menu: Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free

3. **Solution** ประกอบด้วย คำสั่งที่ใช้ในการใส่เงื่อนไขขอบเขตและโหลด และการคำนวณให้ได้มาซึ่ง nodal solutions

3.1 Define loads and conditions

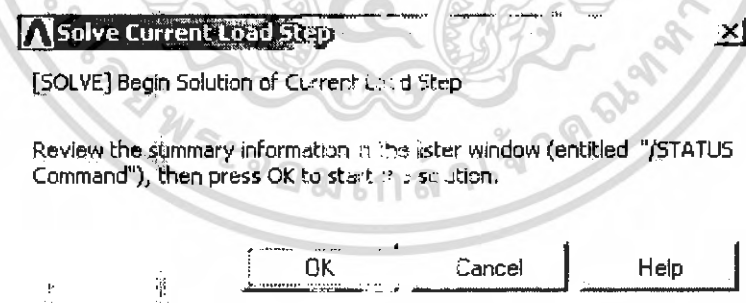
ขั้นตอนถัดมาของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือการใส่โหลดหรือเงื่อนไขต่างๆ โดยสามารถใส่โหลดเข้าไปที่โครงสร้าง (จุด เส้นหรือพื้นที่) หรือใส่โหลดเข้าไปโดยตรงที่จุดหรือเอลิเมนต์ก็ได้ โดยโปรแกรม ANSYS ได้แบ่งโหลดและเงื่อนไขต่างๆ ออกเป็น 5 ชนิด ดังนี้

- DOF (Degree of Freedom) Constraints เป็น โหลดคงที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์
- Concentrate loads เป็น โหลดที่มีค่าคงที่แน่นอนและกระทำไปที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง
- Surface loads เป็น โหลดที่มีลักษณะกระจายไปทั่วทั้งพื้นผิว
- Body loads เป็น โหลดที่เกี่ยวกับทางปริมาตร เช่น Internal heat generation
- Inertia Loads เป็น โหลดที่เกิดจากมวลอยู่ในสภาพเฉื่อย เช่น การเคลื่อนที่แบบหมุน

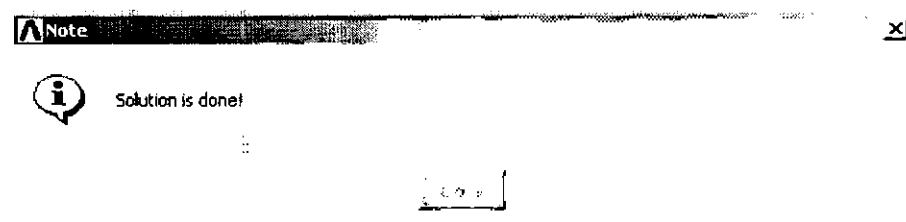
3.2 Solving to certain the solution

หลังจากที่ทำการกำหนดเงื่อนไขและโหลดให้กับโครงสร้างแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือ การให้โปรแกรม ANSYS ทำการคำนวณแก้ระบบสมการที่สอดคล้องกับปัญหานั้นๆ โดยใช้คำสั่ง

Main menu: **Solution > Solve > Current LS**



รูปที่ 3.11 การให้โปรแกรม ANSYS ทำการคำนวณแก้ระบบสมการ



รูปที่ 3.12 โปรแกรม ANSYS เตือนเมื่อคำนวณเสร็จแล้ว

4. Postprocessing ประกอบด้วยคำสั่งที่ใช้สำหรับแสดงผลของการวิเคราะห์

4.1 Read result data from result file

หลังจากที่โปรแกรมทำการคำนวณเพื่อแก้ระบบสมการที่สอดคล้องกับปัญหานั้นๆ แล้ว จะยังไม่ได้แสดงผลการคำนวณออกมาทันทีแต่จะถูกนำไปเก็บไว้ที่ไฟล์ผลลัพธ์ ดังนั้นหากเราต้องการดูผลจากการวิเคราะห์จะต้องทำการสั่งให้โปรแกรม ANSYS อ่านไฟล์ผลลัพธ์นั้น โดยใช้คำสั่ง

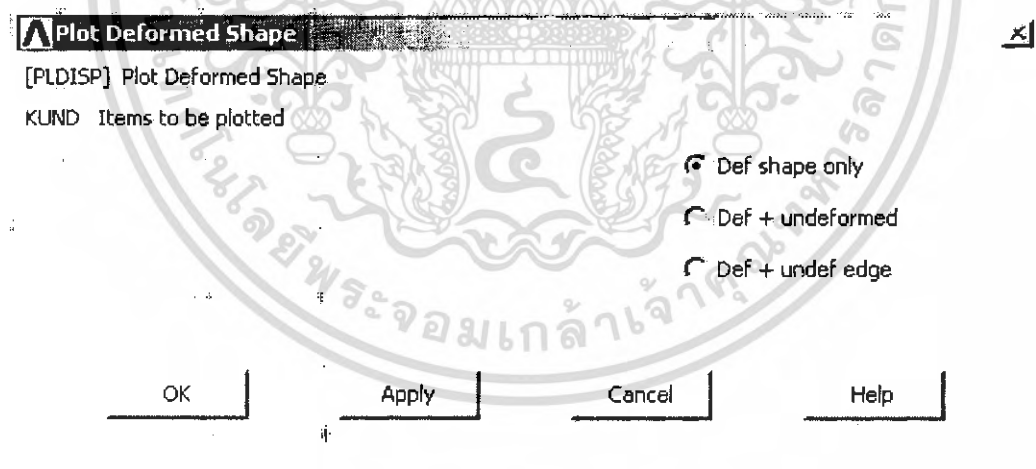
Main menu: **General Postproc > Read Results**

4.2 Plot result

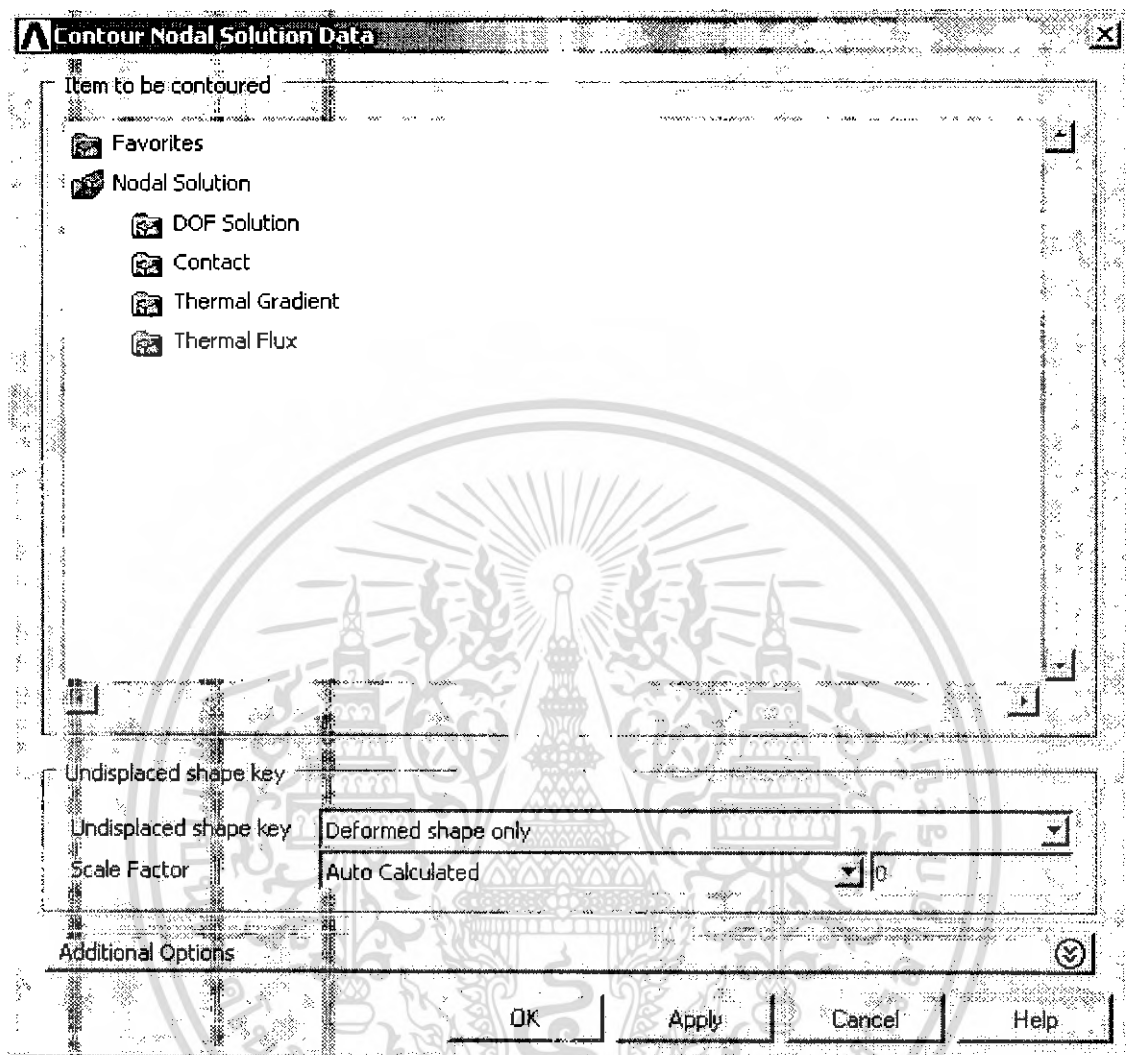
ขั้นตอนนี้เป็นารแสดงผลที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขและโหลดที่ใส่เข้าไปให้กับโครงสร้าง โดยที่เราสามารถนำผลที่ได้จากการคำนวณมาทำการพล็อตออกมาเป็นรูปภาพเทียบกับโครงสร้างก่อนการใส่โหลดได้ โดยการพล็อตผลลัพธ์นี้สามารถทำได้ทั้งพล็อตการเสียรูปและพล็อตการกระจายของปริมาณใดๆ ในโครงสร้างก็ได้ โดยใช้คำสั่ง

Main menu: **General Postproc > Plot Results > Deformed Shape**

Main menu: **General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solution**



รูปที่ 3.13 การพล็อตการเสียรูป



รูปที่ 3.14 พล็อตการกระจายของปริมาณใดๆ

4.3 List result

นอกจากการนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการพล็อตแล้วนั้น เรายังสามารถตั้งให้โปรแกรมทำการแสดงปริมาณใดๆ ออกมาในรูปแบบตัวอักษรและซึ่งมีการเรียงเป็นตาราง โดยใช้คำสั่ง

Main menu: General Postproc > List Results

```

PRNSOL Command
File

PRINT U  NODAL SOLUTION PER NODE

**** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING ****

LOAD STEP= 1  SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000  LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE      UX          UY          UZ          USUM
1  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
2 -0.24179E-01-0.10418E-02  0.0000  0.24201E-01
3 -0.68230E-03-0.41305E-03  0.0000  0.79759E-03
4 -0.12842E-02-0.64389E-03  0.0000  0.14366E-02
5 -0.18093E-02-0.81397E-03  0.0000  0.19840E-02
6 -0.23242E-02-0.91055E-03  0.0000  0.24962E-02
7 -0.28695E-02-0.98862E-03  0.0000  0.30350E-02
8 -0.34335E-02-0.10528E-02  0.0000  0.35913E-02
9 -0.40194E-02-0.11111E-02  0.0000  0.41701E-02
10 -0.46314E-02-0.11745E-02  0.0000  0.47780E-02
11 -0.52769E-02-0.12549E-02  0.0000  0.54241E-02
12 -0.59527E-02-0.13645E-02  0.0000  0.61071E-02
13 -0.66617E-02-0.15150E-02  0.0000  0.68318E-02
14 -0.73918E-02-0.17189E-02  0.0000  0.75890E-02
15 -0.81405E-02-0.19853E-02  0.0000  0.83791E-02
16 -0.88821E-02-0.23186E-02  0.0000  0.91797E-02
17 -0.96012E-02-0.27075E-02  0.0000  0.99756E-02
18 -0.10269E-01-0.31367E-02  0.0000  0.10738E-01
19 -0.10858E-01-0.35539E-02  0.0000  0.11425E-01
20 -0.11383E-01-0.39151E-02  0.0000  0.12038E-01
21 -0.11818E-01-0.41627E-02  0.0000  0.12530E-01
22 -0.12224E-01-0.42485E-02  0.0000  0.12941E-01
23 -0.12631E-01-0.41627E-02  0.0000  0.13299E-01
24 -0.13067E-01-0.39208E-02  0.0000  0.13642E-01

```

รูปที่ 3.15 การแสดงปริมาณใดๆ ออกมาในรูปแบบตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดลองในโครงการพิเศษฉบับนี้ จะเป็นการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ โครงสร้างขนาดเล็กในระดับไมครอน ซึ่งจะทำให้ผลออกมาในรูปแบบเชิงตัวเลข รูปภาพกราฟฟิค โดยการออกแบบนั้นจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 ตัวอย่างโครงสร้าง

ตัวอย่างโครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็ก เป็น โครงสร้างที่มีลักษณะบางยาวคล้ายคาน ขนาด กว้าง 236 ไมครอน ยาว 495 ไมครอน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 โดยประกอบด้วยวัสดุ 3 ชั้น ได้แก่

1. ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นบนสุดมีความหนา 2.5 ไมครอน
2. ชั้นอะลูมิเนียม (Al) เป็นชั้นกลาง มีความหนา 2.0 ไมครอน
3. ชั้นซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) เป็นชั้นล่างสุด มีความหนา 0.5 ไมครอน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็กที่ใช้ในการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ลักษณะของโหลด

ลักษณะของโหลดที่กระทำกับโครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็กนี้ ประกอบด้วยโหลด 2 ลักษณะ ได้แก่

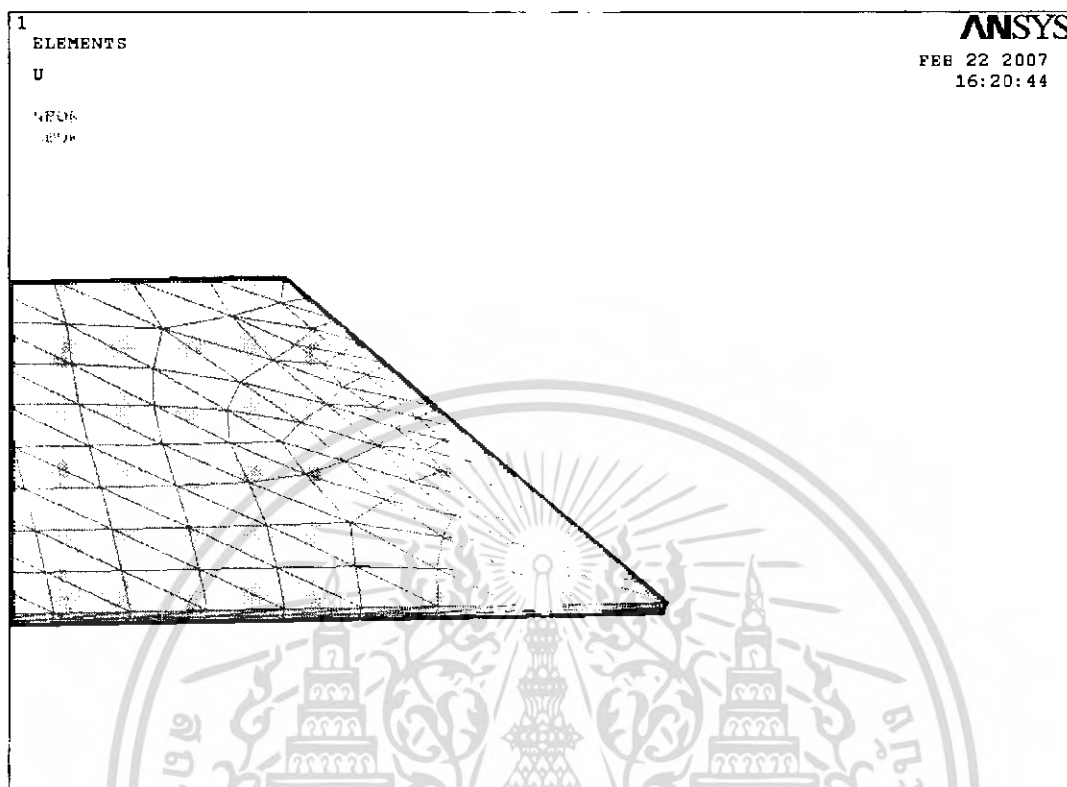
1. โหลดน้ำหนักที่กระทำบริเวณปลายของสวิตช์ สามารถกำหนดได้จากขนาดของกระจกสะท้อนที่สร้างไว้ที่ปลายของสวิตช์ โดยการปลูกสาร SiO_2 ขนาดต่างๆ กัน โดยขนาดของน้ำหนักจะคำนวณจากสมการกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน คือ

$$F = mg \quad (4.1)$$

โดยที่ F คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักกระจก, g คือ ค่าคงที่โน้มถ่วงของโลก $= 9.8 \text{ m/s}^2$ และ m คือมวลของกระจกซึ่งคำนวณได้จากความหนาแน่นและปริมาตรของตัวกระจกเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

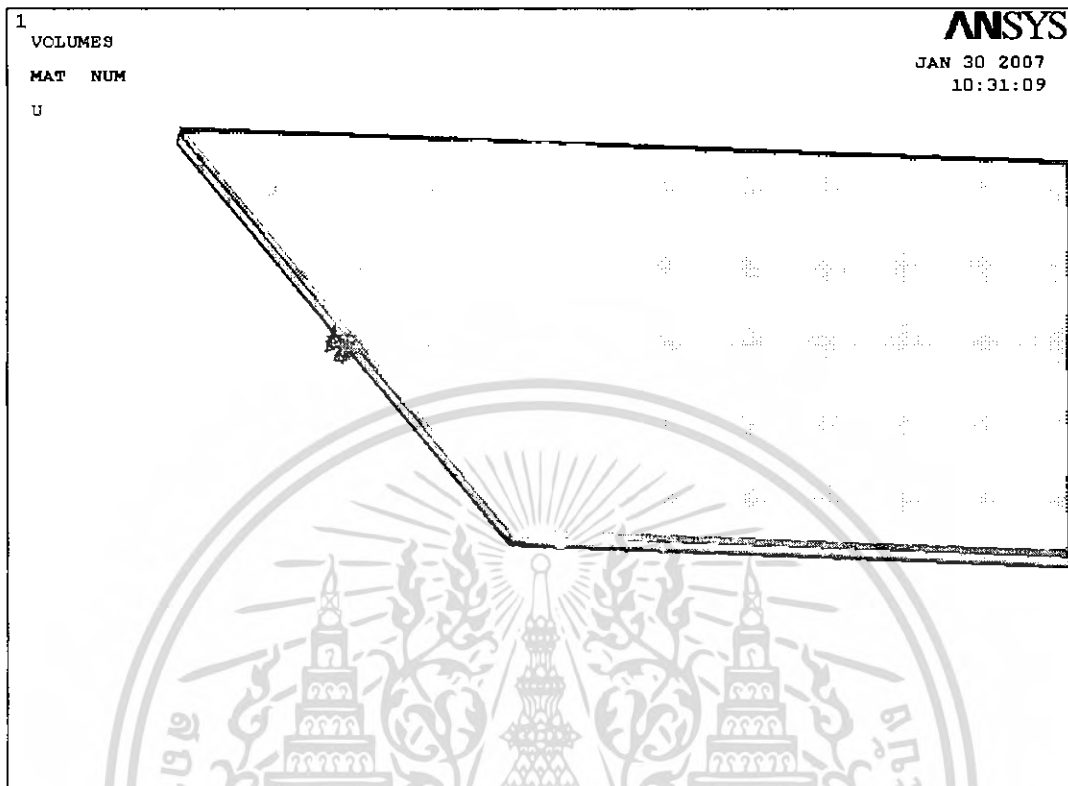
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.2)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของ SiO_2 ซึ่งประมาณเท่ากับ 2800 kg/m^3 และ V คือปริมาตรของกระจกสะท้อน โดยในการทดลองนี้ กรณีแรก สมมุติให้ขนาดกระจกเป็น $51 \mu\text{m} \times 236 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ จะทำให้ได้แรงซึ่งเป็นน้ำหนักของกระจกเท่ากับ $1 \times 10^{-8} \text{ N}$. กรณีที่ 2 สมมุติให้ขนาดกระจกเป็น $120 \mu\text{m} \times 236 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$ จะทำให้ได้แรงซึ่งเป็นน้ำหนักของกระจกเท่ากับ $1 \times 10^{-7} \text{ N}$. กรณีสุดท้าย สมมุติให้ขนาดกระจกเป็น $300 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ จะทำให้ได้แรงซึ่งเป็นน้ำหนักของกระจกเท่ากับ $1 \times 10^{-6} \text{ N}$. โดยน้ำหนักจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในทุกๆ จุดโหนดบริเวณปลายสวิตช์ ดังรูป โดยน้ำหนักของกระจกจะมีค่าตั้งแต่ $0, 1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-7}$ และ $1 \times 10^{-6} \text{ N}$.



รูปที่ 4.2 โหลดน้ำหนักที่ใช้ในการจำลองแบบ

2. โหลดความร้อนที่กระทำบริเวณ โคนของสวิตช์ โดยถือว่าการกระจายของอุณหภูมิ เป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของ โคนสวิตช์ ดังรูป โดยอุณหภูมินี้มีค่าตั้งแต่ 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 โหลดความร้อนที่ใช้ในการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 Parameter ที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองแบบด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS สามารถทำการใส่ค่า Parameter ต่างๆ ได้อย่างง่ายด้วยคลิกเมาส์ในโหมดกราฟฟิค GUI (Graphic User Interface) ซึ่งพอที่จะสรุปออกมาเป็นรายการได้ดังนี้

- **Preference:** Structural
- **Problem dimensionality:** 3-D
- **Element type:** Solid95
- **Temperature unit:** Celsius
- **Material property:**

Young's Modulus (EX)		
SiO ₂ :	75	GPa
Al:	70	GPa
Si ₃ N ₄ :	380	GPa
Poisson's ratio (PREX)		
SiO ₂ :	0.17	
Al:	0.33	
Si ₃ N ₄ :	0.24	
Density (DENS)		
SiO ₂ :	2200	kg/m ³
Al:	2700	kg/m ³
Si ₃ N ₄ :	3100	kg/m ³
Coefficeint of Thermal Expansion (ALPX)		
SiO ₂ :	5x10 ⁻⁶	μK ⁻¹
Al:	2.3.1x10 ⁻⁶	μK ⁻¹
Si ₃ N ₄ :	3.1x10 ⁻⁶	μK ⁻¹
- **Analysis Type:** Static(Steady-State)
- **Define Loads:**

Force Load:	0, 1x10 ⁻⁸ , 1x10 ⁻⁷ , 1x10 ⁻⁶ N
Thermal Load:	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 °C
- **Degrees of freedom:** UX, UY, UZ (Displacement)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Load step option**

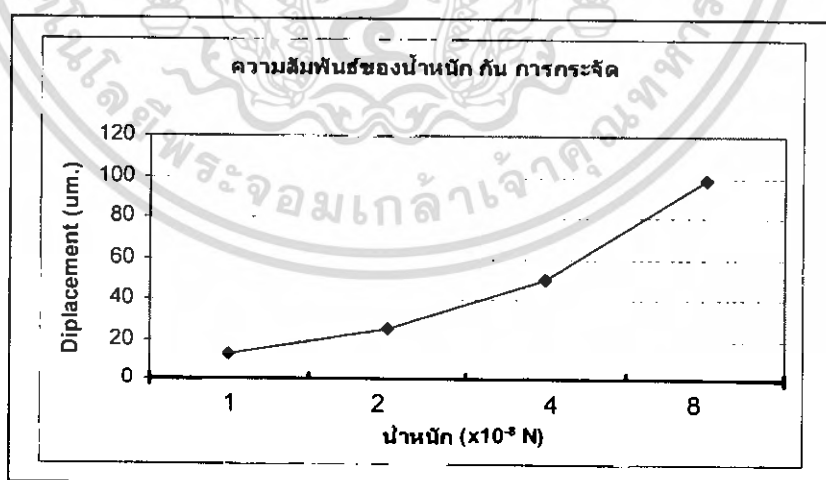
Load step number:	1	
Time at the end of load step:	1.0000	sec
Number of substep:	1	

4.4 ผลการจำลองโครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็ก

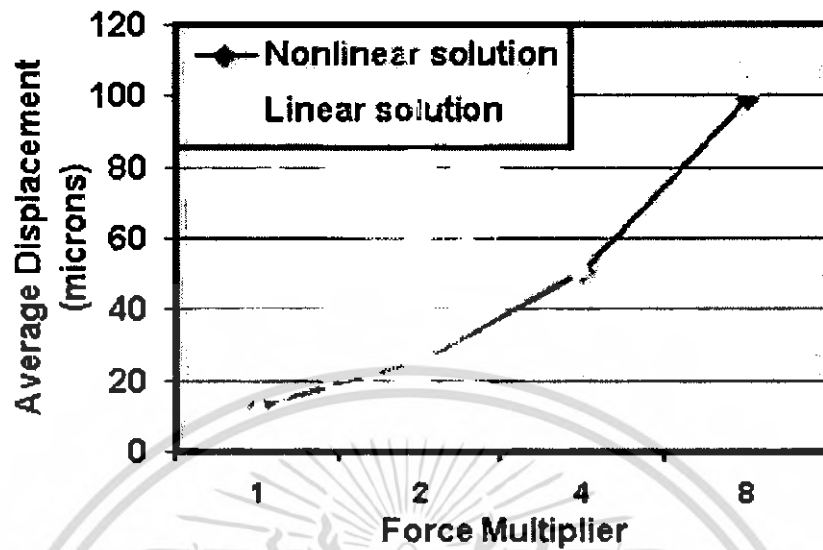
ในการทำการจำลองแบบนี้ ได้ทำการจำลองผลของ Force Load เทียบกับผลการทดลองของ Walied A. Moussa ซึ่งใช้โครงสร้างขนาดเท่ากันและแรงขนาดเท่ากัน แต่จากการจำลองในโหมดต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลของ Force Load ที่กระทำกับโครงสร้างขนาดเดียวกับตัวอย่างโครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก

Force Load (N.)	Displacement (μm)
1×10^{-4}	12.5
2×10^{-4}	25
4×10^{-4}	50
8×10^{-4}	99



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดเดียวกับตัวอย่างโครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก

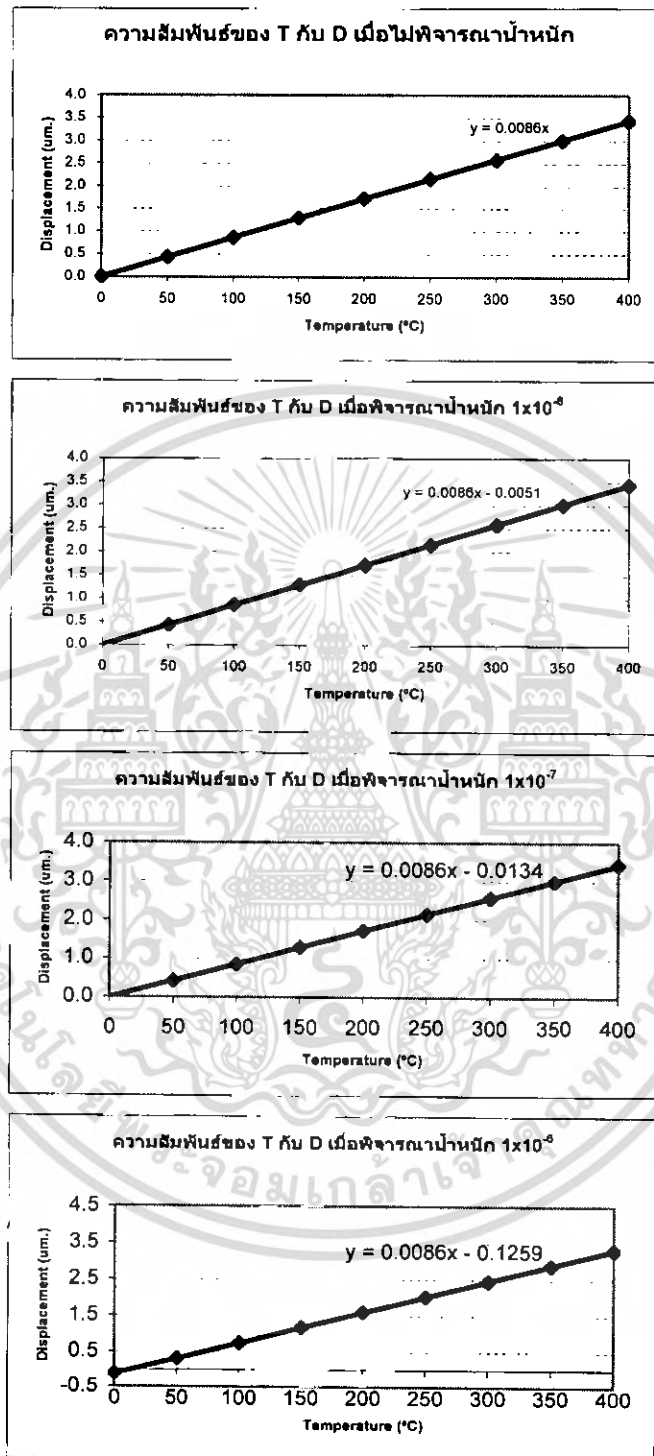


รูปที่ 4.5 ผลการทดลองของ Walied A. Moussa ซึ่งใช้โครงสร้างขนาดเท่ากันและแรงขนาดเท่ากัน

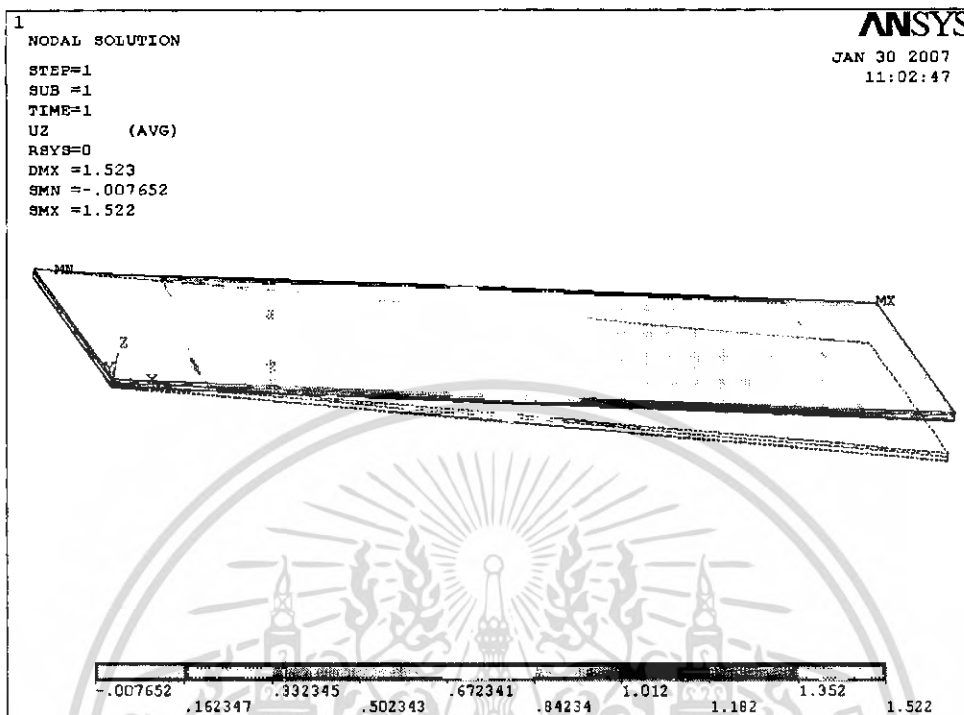
ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดเดียวกับตัวอย่างโครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก

Weight (N) T (°C)	0		1×10^{-8}		1×10^{-7}		1×10^{-6}	
	D_0 (μm)	Δ_0 (μm)	D_1 (μm)	Δ_1 (μm)	D_2 (μm)	Δ_2 (μm)	D_3 (μm)	Δ_3 (μm)
0	0.000	0.000	-0.013	0.013	-0.013	0.013	-0.125	0.125
50	0.429	0.000	0.428	0.001	0.417	0.012	0.304	0.125
100	0.858	0.000	0.857	0.001	0.846	0.012	0.734	0.124
150	1.290	0.000	1.290	0.000	1.270	0.020	1.160	0.130
200	1.720	0.000	1.710	0.010	1.700	0.020	1.590	0.130
250	2.150	0.000	2.140	0.010	2.130	0.020	2.020	0.130
300	2.570	0.000	2.570	0.000	2.560	0.010	2.450	0.120
350	3.000	0.000	3.000	0.000	2.990	0.010	2.880	0.120
400	3.430	0.000	3.430	0.000	3.420	0.010	3.310	0.120
sensitivity	$D = 0.0086T$		$D = 0.0086T - 0.0051$		$D = 0.0086T - 0.0134$		$D = 0.0086T - 0.1259$	

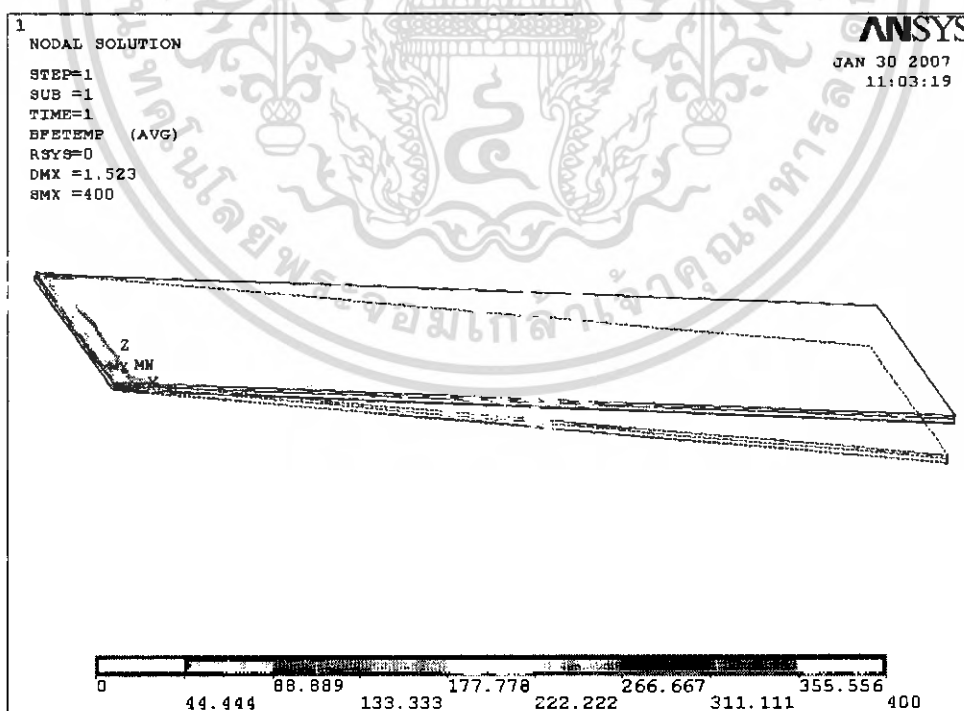
หมายเหตุ T = Temperature, D = Displacement, Δ_n = Difference $D_n - D_0$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดเดียวกับ ตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก ที่น้ำหนักต่างๆ กัน



รูปที่ 4.7 แสดงการพล็อตการกระจัดในทิศแกน z



รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในโครงสร้าง

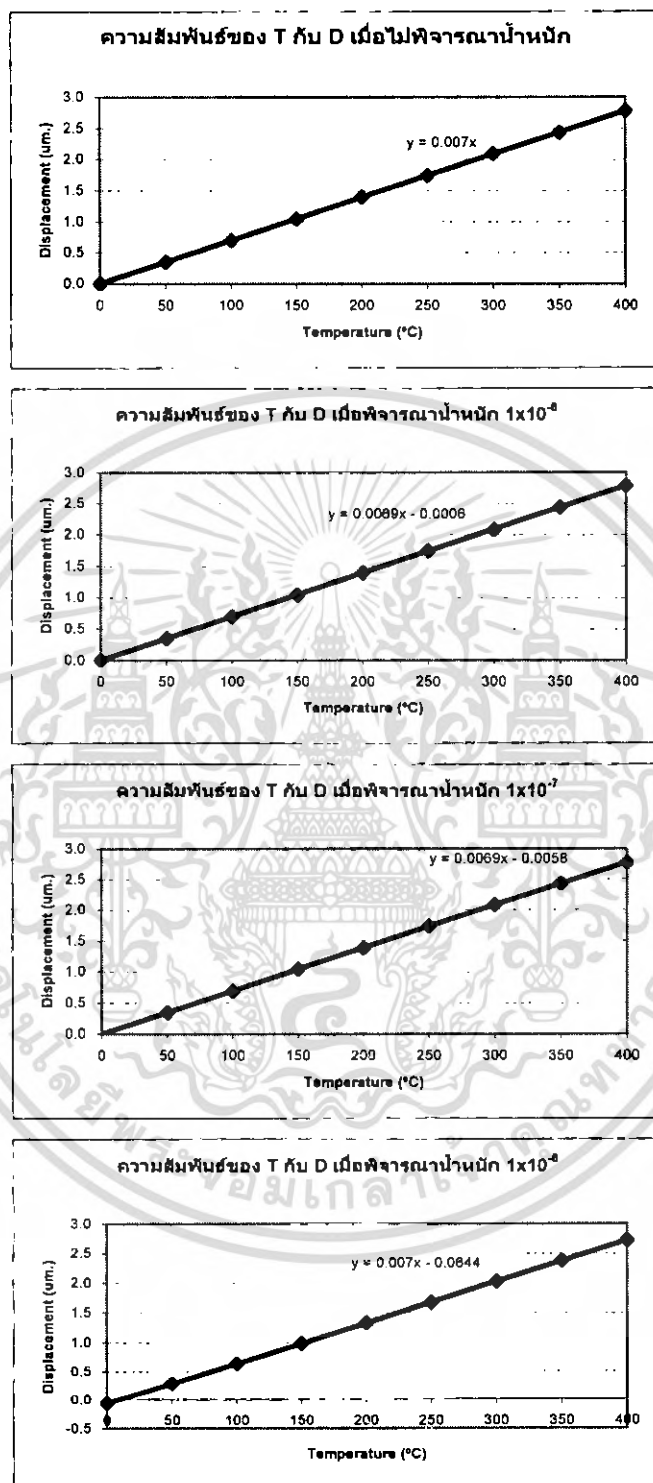
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อให้โครงสร้างสวิตช์มีขนาดกว้าง 240 ไมครอน ขาว 400 ไมครอน มีความหนาเท่าเดิม

Weight (N) T (°C)	0		1×10^{-8}		1×10^{-7}		1×10^{-6}	
	D_0 (μm)	Δ_0 (μm)	D_1 (μm)	Δ_1 (μm)	D_2 (μm)	Δ_2 (μm)	D_3 (μm)	Δ_3 (μm)
0	0.000	0.000	-0.001	0.001	-0.006	0.006	-0.066	0.066
50	0.348	0.000	0.347	0.001	0.341	0.007	0.285	0.063
100	0.695	0.000	0.694	0.001	0.689	0.006	0.632	0.063
150	1.040	0.000	1.040	0.000	1.040	0.000	0.980	0.060
200	1.390	0.000	1.390	0.000	1.380	0.010	1.330	0.060
250	1.740	0.000	1.740	0.000	1.730	0.010	1.670	0.070
300	2.090	0.000	2.080	0.010	2.080	0.010	2.020	0.070
350	2.430	0.000	2.430	0.000	2.430	0.000	2.370	0.060
400	2.780	0.000	2.780	0.000	2.770	0.010	2.720	0.060
sensitivity	D = 0.007T		D = 0.0069T-0.0006		D = 0.0069T-0.0058		D = 0.007T - 0.0644	

หมายเหตุ T = Temperature, D = Displacement, Δ_n = Difference $D_n - D_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



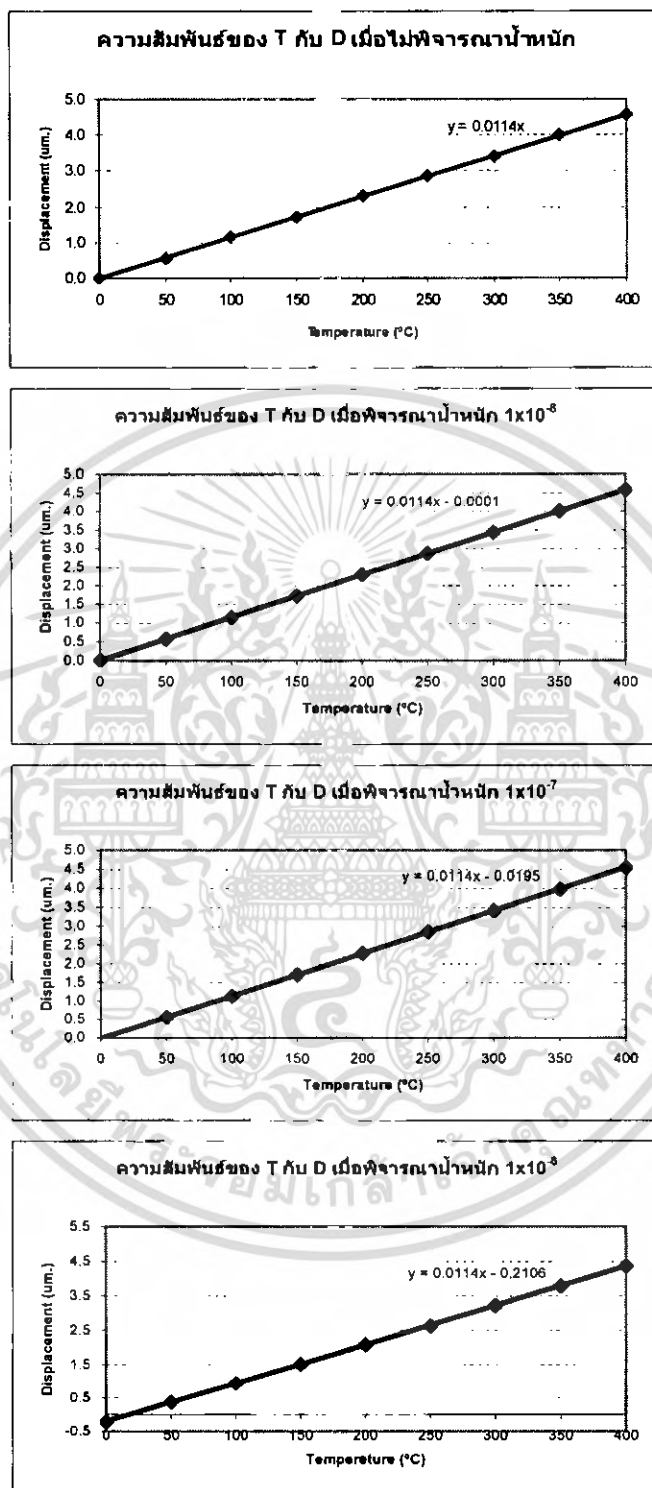
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดสั้นกว่าตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก ที่หน้าหนักต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางบันทึกผลระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อให้โครงสร้างสวิตช์มีขนาดกว้าง 240 ไมครอน ยาว 600 ไมครอน มีความหนาเท่าเดิม

Weight (N) T (°C)	0		1×10^{-8}		1×10^{-7}		1×10^{-6}	
	D_0 (μm)	Δ_0 (μm)	D_1 (μm)	Δ_1 (μm)	D_2 (μm)	Δ_2 (μm)	D_3 (μm)	Δ_3 (μm)
0	0.000	0.000	-0.002	0.002	-0.021	0.021	-0.214	0.214
50	0.572	0.000	0.570	0.002	0.551	0.021	0.362	0.210
100	1.140	0.000	1.140	0.000	1.120	0.020	0.934	0.206
150	1.720	0.000	1.720	0.000	1.700	0.020	1.510	0.210
200	2.290	0.000	2.290	0.000	2.270	0.020	2.080	0.210
250	2.860	0.000	2.860	0.000	2.840	0.020	2.620	0.240
300	3.430	0.000	3.430	0.000	3.410	0.020	3.220	0.210
350	4.000	0.000	4.000	0.000	3.980	0.020	3.790	0.210
400	4.570	0.000	4.570	0.000	4.550	0.020	4.360	0.210
sensitivity	$D = 0.0114T$		$D = 0.0114T - 0.0001$		$D = 0.0114T - 0.0195$		$D = 0.0114T - 0.2106$	

หมายเหตุ T = Temperature, D = Displacement, Δ_n = Difference $D_n - D_0$



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการกระจัด เมื่อใช้โครงสร้างที่มีขนาดยาวกว่า ตัวอย่าง โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็ก ที่หน้าหนักต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในการทดลองจำลองแบบ โครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็กนี้มีปัจจัยที่ทำการทดลองทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ โหลดน้ำหนัก, โหลดความร้อน, ขนาดของโครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็ก และ ความหนาของแต่ละชั้นในโครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็ก ซึ่งแต่ละปัจจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

โหลดความร้อน เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความโค้งงอของ โครงสร้างสวิตช์ขนาดเล็กนี้ อันเนื่องมาจากแต่ละชั้นวัสดุที่นำมาสร้างเป็นสวิตช์ขนาดเล็กนี้มีอัตราการขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion) แตกต่างกันมาก โดยอัตราการขยายตัวของ Al มากกว่า SiO_2 ประมาณ 50 เท่า ทำให้เมื่อ โครงสร้างได้รับความร้อนจึงเกิดการขยายตัวไม่เท่ากัน เป็นผลให้เกิดการโค้งงอขึ้นดังกล่าว ซึ่งเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 ปลายยังมีค่าสูง ยิ่งทำให้เกิดการโค้งงอมากขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ให้แก่โครงสร้างต้องไม่มากไปกว่าค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ

โหลดน้ำหนัก ซึ่งเกิดจากการพิจารณาเมื่อนำไปใช้งานจริง จำเป็นต้องมีการสร้างกระชกสะท้อนแสงขนาดเล็กไว้ที่ปลายของสวิตช์นี้ จึงทำให้เกิดมีน้ำหนัก(แรง) กดทับลงบนสวิตช์ซึ่งจะมีผลกับการปรับโค้งงอของสวิตช์ในปริมาณที่คงที่ นั่นคือ ไม่ว่าที่อุณหภูมิใดก็ตามผลของน้ำหนักทำให้เกิดการบิดงอมีค่าคงที่

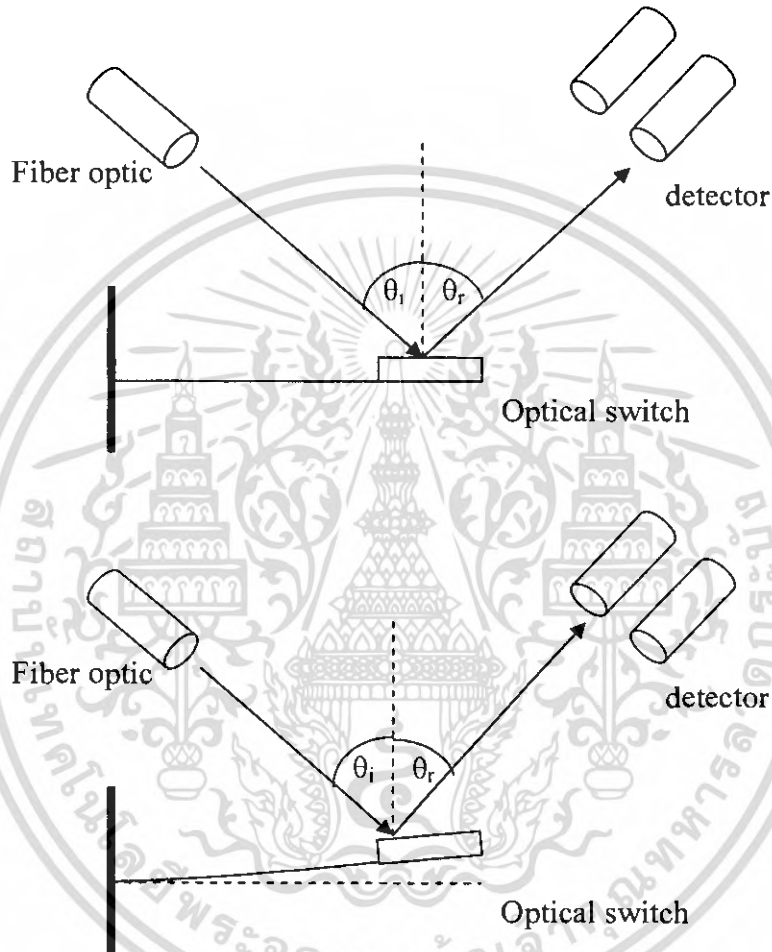
ขนาดของโครงสร้างของสวิตช์ขนาดเล็ก เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อการโค้งงอของโครงสร้างสวิตช์ เนื่องจากการโค้งงอของ โครงสร้างสวิตช์นี้เกิดขึ้นในบริเวณ โคนของสวิตช์ ทำให้เมื่อสวิตช์นี้ยาวขึ้น ระยะการกระจัดก็มีค่ามากขึ้น ไปด้วย ในทางกลับกันถ้าสวิตช์นี้สั้นลง ระยะการกระจัดก็มีค่าน้อยลงเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ลักษณะของโหลดความร้อนที่ให้กับ โครงสร้างของสวิตช์นี้ สามารถใส่ได้ในหลายลักษณะ เช่น โหลดความร้อนอุณหภูมิคงที่, โหลดการนำความร้อน และอื่นๆ โดยในโครงการพิเศษฉบับนี้ จะใช้โหลดความร้อนอุณหภูมิคงที่ให้แก่ปลายด้านหนึ่ง ดังนั้น ยังมีโหลดอีกหลายรูปแบบที่สามารถนำไปศึกษาได้ต่อไป

5.3 การประยุกต์ใช้งาน

หลังจากการจำลองแบบของสวิตช์เชิงแสงแล้ว เราสามารถนำสวิตช์เชิงแสงนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยการประกอบกับใยแก้วนำแสง และ Detector ดังรูป



รูปที่ 5.1 การประยุกต์ใช้สวิตช์เชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

Saeed Moaveni. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**, 2nd ed. , NJ: Pearson Education, 2003

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม** , จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ, 2537
อดิสร เตือนตรานนท์. **NECTEC: สถานภาพงานวิจัยไบโอเซ็นเซอร์ในประเทศไทย**, ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ 2548

อดิสร เตือนตรานนท์. **นาโนเทคโนโลยี จิวแต่แจ้ว**, เนชั่นบุ๊คส์: กรุงเทพฯ 2548

ฝ่ายพัฒนาศกยภาพเยาวชนด้านไอที ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. **ระบบเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม**, 2548

University of Alberta, Canada. **ANSYS Tutorials** [Online] Available:

www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys , 2006

Tai-Ran Hsu. **MEMS & microsystems: design and manufacture**. Boston : McGraw-Hill. 2002

Wailed A. Moussa. **Modeling and Simulating MEMS Device using Finite Element analysis**.

Available: http://www.algor.com/news_pub/tech_white_papers/MEMS_devices/default.asp

ANSYS Tutorials



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANSYS Release 9.0 Documentation

Element Reference | Part I. Element Library |

SOLID95
3-D 20-Node Structural Solid

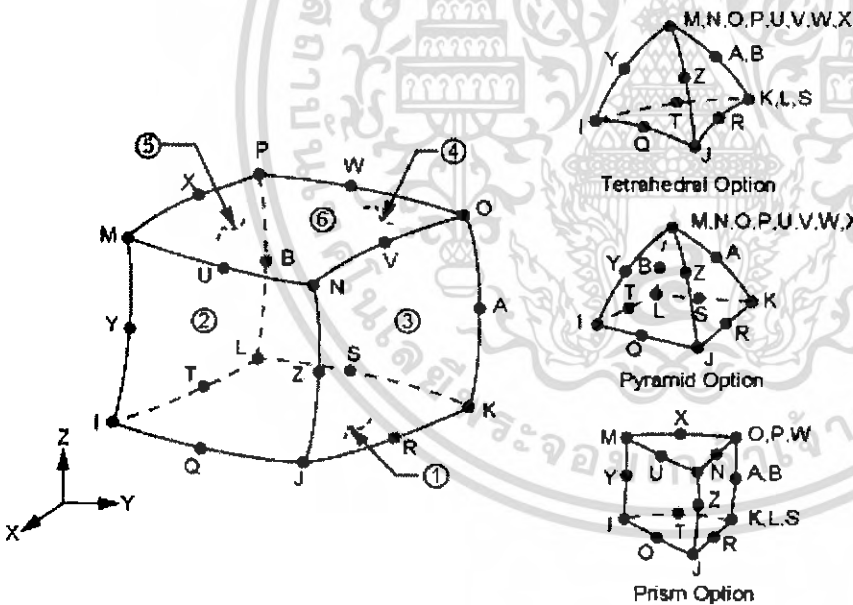
MP ME ST ◊ ◊ PR ◊ ◊ ◊ PP ED

SOLID95 Element Description

SOLID95 is a higher order version of the 3-D 8-node solid element [SOLID45](#). It can tolerate irregular shapes without as much loss of accuracy. SOLID95 elements have compatible displacement shapes and are well suited to model curved boundaries.

The element is defined by 20 nodes having three degrees of freedom per node: translations in the nodal x, y, and z directions. The element may have any spatial orientation. SOLID95 has plasticity, creep, stress stiffening, large deflection, and large strain capabilities. Various printout options are also available. See [SOLID95](#) in the *ANSYS, Inc. Theory Reference* for more details.

Figure 95.1 SOLID95 Geometry



SOLID95 Input Data

The geometry, node locations, and the coordinate system for this element are shown in Figure 95.1: "SOLID95 Geometry". A prism-shaped element may be formed by defining the same node numbers for nodes K, L, and S; nodes A and B; and nodes O, P, and W. A tetrahedral-shaped element and a pyramid-shaped element may also be formed as shown in Figure 95.1: "SOLID95 Geometry". A similar, but 10-node tetrahedron, element is [SOLID92](#).

Besides the nodes, the element input data includes the orthotropic material properties. Orthotropic material directions correspond to the element coordinate directions. The element coordinate system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

orientation is as described in [Coordinate Systems](#).

Element loads are described in [Node and Element Loads](#). Pressures may be input as surface loads on the element faces as shown by the circled numbers on Figure 95.1: "SOLID95 Geometry". Positive pressures act into the element. Temperatures may be input as element body loads at the nodes. The node I temperature T(I) defaults to TUNIF. If all other temperatures are unspecified, they default to T(I). If all corner node temperatures are specified, each midside node temperature defaults to the average temperature of its adjacent corner nodes. For any other input temperature pattern, unspecified temperatures default to TUNIF.

Material properties are oriented the same way as for a shell element (using the plane through the midside nodes Y-Z-A-B) when you set KEYOPT(1) = 1. The element z-axis is normal to this plane and the element x-axis is determined by projecting the x-axis (set with **ESYS**) onto the midside node plane. If needed, the x-axis can be adjusted by using THETA, an optional real constant. THETA cannot be changed between load steps.

A lumped mass matrix formulation, which may be useful for certain analyses, may be obtained with **LUMPM**. While the consistent matrix gives good results for most applications, the lumped matrix may give better results with reduced analyses using Guyan reduction. The KEYOPT(5) and (6) parameters provide various element printout options (see [Element Solution](#)).

You can apply an initial stress state to this element through the **ISTRESS** or **ISFILE** command. For more information, see [Initial Stress Loading](#) in the *ANSYS Basic Analysis Guide*. Alternately, you can set KEYOPT(9) = 1 to read initial stresses from the user subroutine USTRESS. For details on user subroutines, see the *Guide to ANSYS User Programmable Features*.

You can include the effects of pressure load stiffness using **SOLCONTROL**,,INCP. If an unsymmetric matrix is needed for pressure load stiffness effects, use **NROPT**,UNSYM.

A summary of the element input is given in "SOLID95 Input Summary". A general description of element input is given in [Element Input](#).

SOLID95 Input Summary

Nodes

I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, A, B

Degrees of Freedom

UX, UY, UZ

Real Constants

THETA - x-axis adjustment (used only when KEYOPT(1) = 1)

Material Properties

EX, EY, EZ, ALPX, ALPY, ALPZ (or CTEX, CTEY, CTEZ or THSX, THSY, THSZ),
PRXY, PRYZ, PRXZ (or NUXY, NUYZ, NUXZ), DENS, GXY, GYZ, GXZ, DAMP

Surface Loads

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pressures --

face 1 (J-I-L-K), face 2 (I-J-N-M), face 3 (J-K-O-N),
face 4 (K-L-P-O), face 5 (L-I-M-P), face 6 (M-N-O-P)

Body Loads

Temperatures --

T(I), T(J), ..., T(Z), T(A), T(B)

Special Features

Plasticity
Creep
Swelling
Stress stiffening
Large deflection
Large strain
Birth and death
Adaptive descent
Initial stress import

KEYOPT(1)

Element coordinate system:

0 --

(default)

1 --

Orient material properties using plane created by midside nodes (Y-Z-A-B) with the z-axis normal to that plane and the x-axis (from **ESYS**) projected onto that plane.

KEYOPT(5)

Extra element output:

0 --

Basic element printout

1 --

Repeat basic solution for all integration points

2 --

Nodal stress printout

KEYOPT(6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Extra surface output:

0 --

Basic element printout

1 --

Surface printout for face I-J-N-M

2 --

Surface printout for face I-J-N-M and face K-L-P-O (Surface printout valid for linear materials only)

3 --

Nonlinear printout at each integration point

4 --

Surface printout for faces with nonzero pressure

KEYOPT(9)

Initial stress subroutine option (available only through direct input of the **KEYOPT** command):

0 --

No user subroutine to provide initial stress (default)

1 --

Read initial stress data from user subroutine USTRESS (see the *Guide to ANSYS User Programmable Features* for user written subroutines)

KEYOPT(11)

Integration rule:

0 --

No reduced integration (default)

1 --

2 x 2 x 2 reduced integration option for brick shape

See Failure Criteria in the *ANSYS, Inc. Theory Reference* for an explanation of the three predefined failure criteria. For a complete discussion of failure criteria, please refer to Failure Criteria.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOLID95 Output Data

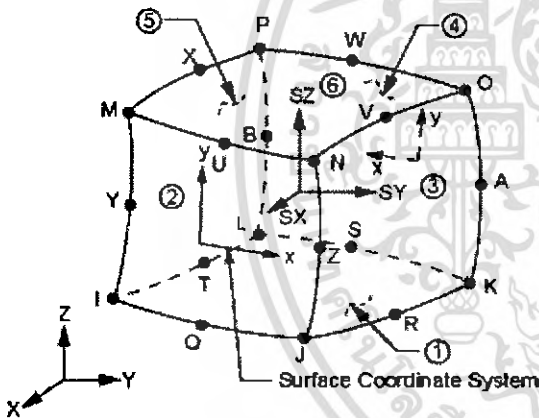
The solution output associated with the element is in two forms:

- Nodal displacements included in the overall nodal solution
- Additional element output as shown in Table 95.1: "SOLID95 Element Output Definitions"

Several items are illustrated in Figure 95.2: "SOLID95 Stress Output".

The element stress directions are parallel to the element coordinate system. The surface stress outputs are in the surface coordinate systems and are available for any face (KEYOPT(6)). The coordinate systems for faces I-J-N-M and K-L-P-O are shown in Figure 95.2: "SOLID95 Stress Output". The other surface coordinate systems follow similar orientations as indicated by the pressure face node description. Surface printout is valid only if the conditions described in Element Solution are met. The SXY component is the in-plane shear stress on that face. A general description of solution output is given in Solution Output. See the ANSYS Basic Analysis Guide for ways to view results.

Figure 95.2 SOLID95 Stress Output



The Element Output Definitions table uses the following notation:

A colon (:) in the Name column indicates the item can be accessed by the Component Name method [ETABLE, ESOL]. The O column indicates the availability of the items in the file Jobname.OUT. The R column indicates the availability of the items in the results file.

In either the O or R columns, Y indicates that the item is *always* available, a number refers to a table footnote that describes when the item is *conditionally* available, and a - indicates that the item is *not* available.

Table 95.1 SOLID95 Element Output Definitions

Name	Definition	O	R
EL	Element number and name	Y	Y
CORNER NODES	Nodes - I, J, K, L, M, N, O, P	Y	Y
MAT	Material number	Y	Y

VOLU:	Volume	Y	Y
XC, YC, ZC	Location where results are reported	Y	5
PRES	Pressures P1 at nodes J, I, L, K; P2 at I, J, N, M; P3 at J, K, O, N; P4 at K, L, P, O; P5 at L, I, M, P; P6 at M, N, O, P	Y	Y
TEMP	Temperatures T(I), T(J), ..., T(Z), T(A), T(B)	Y	Y
S:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	Stresses	Y	Y
S:1, 2, 3	Principal stresses	Y	Y
S:INT	Stress intensity	Y	Y
S:EQV	Equivalent stress	Y	Y
EPEL:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	Elastic strains	Y	Y
EPEL:1, 2, 3	Principal elastic strains	Y	-
EPEL:EQV	Equivalent elastic strain [6]	Y	Y
EPTH:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	Average thermal strains	1	1
EPTH:EQV	Equivalent thermal strain [6]	1	1
EPPL:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	Average plastic strains	1	1
EPPL:EQV	Equivalent plastic strain [6]	1	1
EPCR:X, Y, Z, XY, YZ, XZ	Average creep strains	1	1
EPCR:EQV	Equivalent creep strain [6]	1	1
EPSW:	Swelling strain	1	1
NL:EPEQ	Average equivalent plastic strain	1	1
NL:SRAT	Ratio of trial stress to stress on yield surface	1	1
NL:SEPL	Average equivalent stress from stress-strain curve	1	1
NL:HPRES	Hydrostatic pressure	-	1
FACE	Face label	2	2
AREA	Face area	2	2
TEMP	Face average temperature	2	2
EPEL(X, Y, XY)	Surface elastic strains	2	2
PRES	Surface pressure	2	2
S(X, Y, XY)	Surface stresses (X-axis parallel to line defined by first two nodes which define the face)	2	2
S(1, 2, 3)	Surface principal stresses	2	2
SINT	Surface stress intensity	2	2
SEQV	Surface equivalent stress	2	2
FC1, ..., FC6, FCMAX	Failure criterion values and maximum at each integration point	3	-
FC	Failure criterion number (FC1 to FC6, FCMAX)	4	Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัท การแข่งขันเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VALUE	Maximum value for this criterion (if value exceeds 9999.999, 9999.999 will be printed)	4	Y
LN	Layer number where maximum occurs	4	Y
EPELF(X, Y, Z, XY, YZ, XZ)	Elastic strains (in layer local coordinates) causing the maximum value for this criterion in the element.	4	Y
SF(X, Y, Z, XY, YZ, XZ)	Stresses (in layer local coordinates) causing the maximum value for this criterion in the element.	4	Y
LOCI:X, Y, Z	Integration point locations	-	Y

1. Nonlinear solution (output only if the element has a nonlinear material)
2. Surface output (if KEYOPT(6) is 1, 2, or 4)
3. Output only if KEYOPT(1) = 1, KEYOPT(5) = 1, and failure criteria was specified (**TB,FAIL**)
4. Summary of failure criteria calculation. Output of the elastic strains and stresses for each failure criterion and the maximum of all criteria (FCMAX). Output only if KEYOPT(1) = 1 and failure criteria was specified (**TB,FAIL**).
5. Available only at centroid as a *GET item
6. The equivalent strains use an effective Poisson's ratio: for elastic and thermal this value is set by the user (**MP,PRXY**); for plastic and creep this value is set at 0.5.

Table 95.2 SOLID95 Miscellaneous Element Output

Description	Names of Items Output	O	R
Nonlinear Integration Pt. Solution	EPPL, EPEQ, SRAT, SEPL, HPRES, EPCR	1	-
Integration Point Stress Solution	TEMP, S, SINT, SEQV, EPEL	2	-
Nodal Stress Solution	TEMP, S, SINT, SEQV, EPEL	3	-

1. Output at each integration point, if the element has a nonlinear material and KEYOPT(6) = 3
2. Output at each integration point, if KEYOPT(5) = 1
3. Output at each node, if KEYOPT(5) = 2

Table 95.3: "SOLID95 Item and Sequence Numbers" lists output available through the **ETABLE** command using the Sequence Number method. See The General Postprocessor (POST1) in the ANSYS Basic Analysis Guide and The Item and Sequence Number Table in this manual for more information. The following notation is used in Table 95.3: "SOLID95 Item and Sequence Numbers":

Name

output quantity as defined in Table 95.1: "SOLID95 Element Output Definitions"

tem เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

predetermined Item label for **ETABLE** command

I,J,...,P

sequence number for data at nodes I,J,...,P

Table 95.3 SOLID95 Item and Sequence Numbers

Output Quantity Name	ETABLE and ESOL Command Input								
	Item	I	J	K	L	M	N	O	P
P1	SMISC	2	1	4	3	-	-	-	-
P2	SMISC	5	6	-	-	8	7	-	-
P3	SMISC	-	9	10	-	-	12	11	-
P4	SMISC	-	-	13	14	-	-	16	15
P5	SMISC	18	-	-	17	19	-	-	20
P6	SMISC	-	-	-	-	21	22	23	24
S:1	NMISC	1	6	11	16	21	26	31	36
S:2	NMISC	2	7	12	17	22	27	32	37
S:3	NMISC	3	8	13	18	23	28	33	38
S:INT	NMISC	4	9	14	19	24	29	34	39
S:EQV	NMISC	5	10	15	20	25	30	35	40

The following output items are available only if KEYOPT(1) = 1 and the failure criteria information (TB,FAIL) was specified.

Output Quantity Name	ETABLE and ESOL Command Input	
	Item	Number
FCMAX	NMISC	61
VALUE	NMISC	62
FC	NMISC	$62 + 15(N-1) + 1$
VALUE	NMISC	$62 + 15(N-1) + 2$
LN (=1)	NMISC	$62 + 15(N-1) + 3$
EPELFX	NMISC	$62 + 15(N-1) + 4$
EPELFY	NMISC	$62 + 15(N-1) + 5$
EPELFZ	NMISC	$62 + 15(N-1) + 6$
EPELFX Y	NMISC	$62 + 15(N-1) + 7$
EPELFY Z	NMISC	$62 + 15(N-1) + 8$
EPELFX Z	NMISC	$62 + 15(N-1) + 9$
SFX	NMISC	$62 + 15(N-1) + 10$
SFY	NMISC	$62 + 15(N-1) + 11$
SFZ	NMISC	$62 + 15(N-1) + 12$
SFXY	NMISC	$62 + 15(N-1) + 13$

SFYZ	NMISC	$62 + 15(N-1) + 14$
SFXZ	NMISC	$62 + 15(N-1) + 15$

Note

N refers to the failure criterion number: N = 1 for the first failure criterion, N = 2 for the second failure criterion, and so on.

See [Surface Solution](#) in this manual for the item and sequence numbers for surface output for the **ETABLE** command.

SOLID95 Assumptions and Restrictions

- The element must not have a zero volume.
- The element may not be twisted such that the element has two separate volumes. This occurs most frequently when the element is not numbered properly.
- Elements may be numbered either as shown in Figure 95.1: "SOLID95 Geometry" or may have the planes IJKL and MNOP interchanged.
- An edge with a removed midside node implies that the displacement varies linearly, rather than parabolically, along that edge. See [Quadratic Elements \(Midside Nodes\)](#) in the *ANSYS Modeling and Meshing Guide* for more information on the use of midside nodes.
- Degeneration to the form of pyramid should be used with caution. The element sizes, when degenerated, should be small in order to minimize the stress gradients. Pyramid elements are best used as filler elements or in meshing transition zones.

SOLID95 Product Restrictions

When used in the product(s) listed below, the stated product-specific restrictions apply to this element in addition to the general assumptions and restrictions given in the previous section.

ANSYS Professional.

- The DAMP material property is not allowed.
- The only special feature allowed is stress stiffening.
- KEYOPT(6) = 3 is not applicable.

Prev
CIRCU94