

บทที่ 7

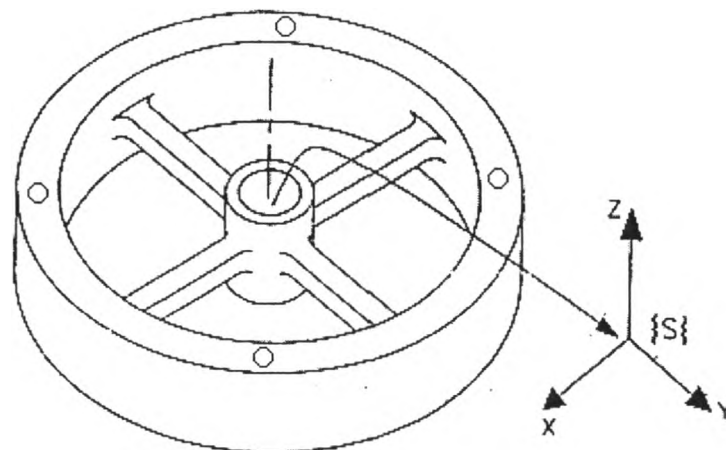
การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อพิจารณาลักษณะของรูปร่าง, การยึดจับและ Load ที่มากระทำต่ออุปกรณ์ตรวจจู้แรงและแรงบิด เราพบว่ามีลักษณะดังนี้

สภาพโดยทั่วไป

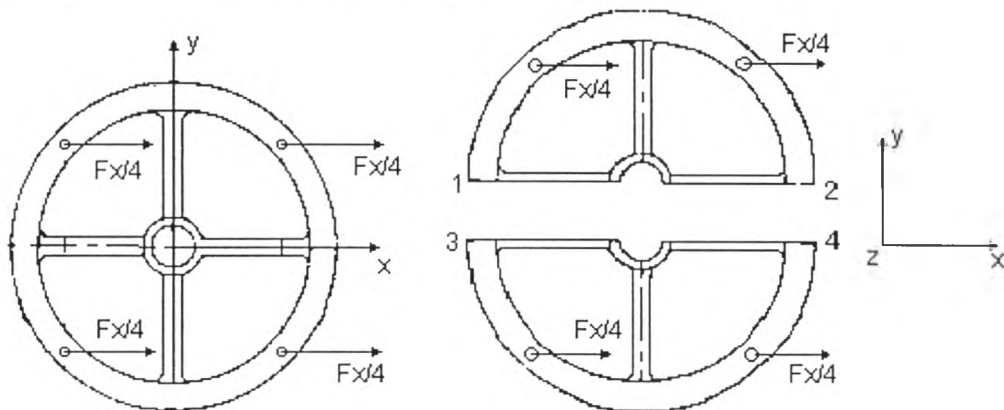
boundary condition ของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงและแรงบิดมีดังนี้ คือ ที่วงแหวนใน ผิวบน และผิวล่างถูกยึดแน่น (fixed) ส่วนรูของวงแหวนในมีไว้สำหรับเสียบเข้ากับเพลา ดังนั้นผิวด้านในนี้จึงถูกจำกัดให้ไม่สามารถที่เคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของวงแหวนตามแนวรัศมีได้

Load ต่าง ๆ ที่กระทำต่ออุปกรณ์ตรวจจู้แรงและแรงบิดจะกระทำที่รูนอตทั้ง 4 รู



รูปที่ 7.1 แสดงรูปแบบจำลองของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงและแรงบิด

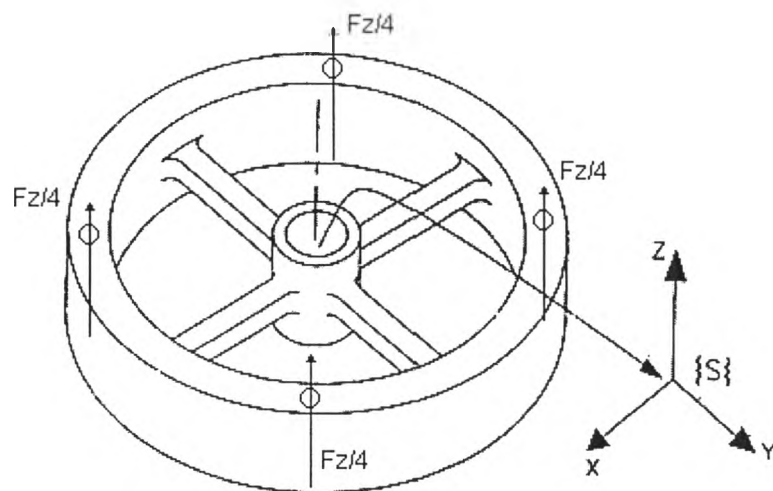
การพิจารณากรณีที่มีแรงในแนวแกน x มากกระทำ



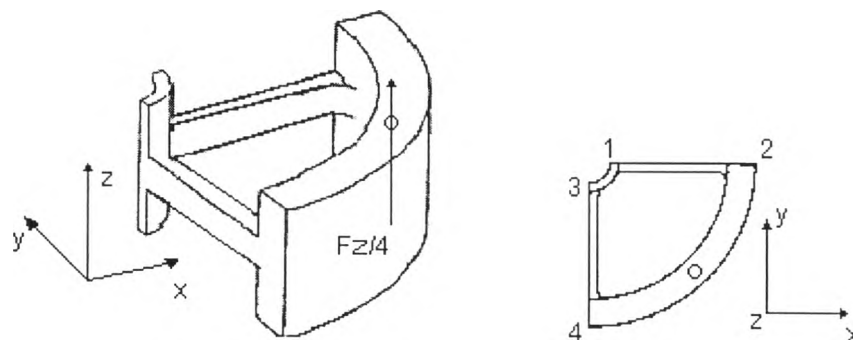
รูปที่ 7.2 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีแรงในแนวแกน x มากกระทำ

จากลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด รวมทั้งลักษณะของแรงที่มากกระทำ เราสามารถที่จะวิเคราะห์ชิ้นงานโดยใช้แบบจำลองเพียงครึ่งเดียวได้ โดยที่มี boundary condition เพิ่มเติมที่ผิว 12 และ ผิว 34 ซึ่งเป็นผิวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดแบ่งวัตถุออกเป็น 2 ส่วน ผิว 12 และ ผิว 34 จะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน y การพิจารณาสำหรับกรณีของแรงในแนวแกน y ก็เป็นไปในทำนองเดียวกับแรงในแนวแกน x

การพิจารณากรณีเมื่อมีแรงในแนวแกน z มากกระทำ



รูปที่ 7.3 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีแรงในแนวแกน z มากกระทำ

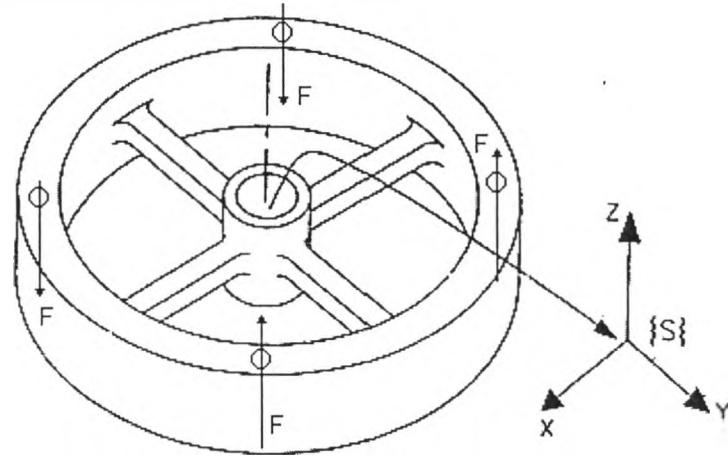


รูปที่ 7.4 แสดงรูปแบบจำลองที่ถูกแบ่งส่วนแล้ว เมื่อมีแรงในแนวแกน z มากกระทำ

จากลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด รวมทั้งลักษณะของแรงที่มากกระทำ เราสามารถที่จะวิเคราะห์ชิ้นงานโดยใช้แบบจำลองเพียง $1/4$ ได้ โดยที่มี boundary condition เพิ่มเติมที่ผิว 12 และ ผิว 34 ซึ่งเป็นผิวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดแบ่งวัตถุออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ คือ

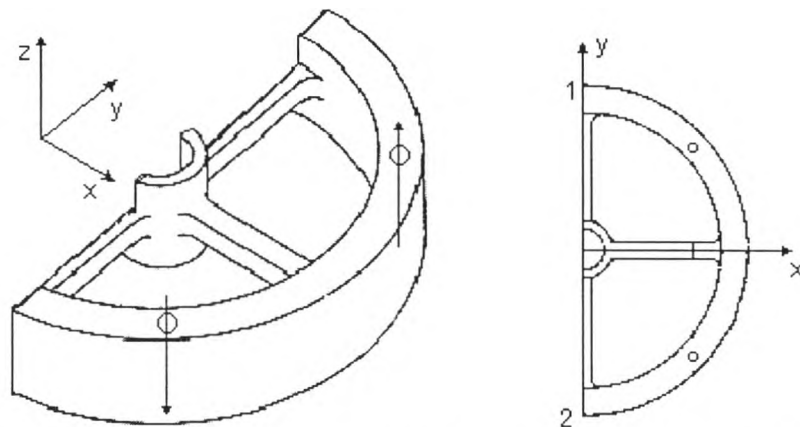
- ที่ผิว 12 จะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน y
- ที่ผิว 34 จะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x

การพิจารณากรณีที่มีโมเมนต์ในแนวแกน x มากกระทำ



รูปที่ 7.5 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีโมเมนต์ในแนวแกน x มากกระทำ

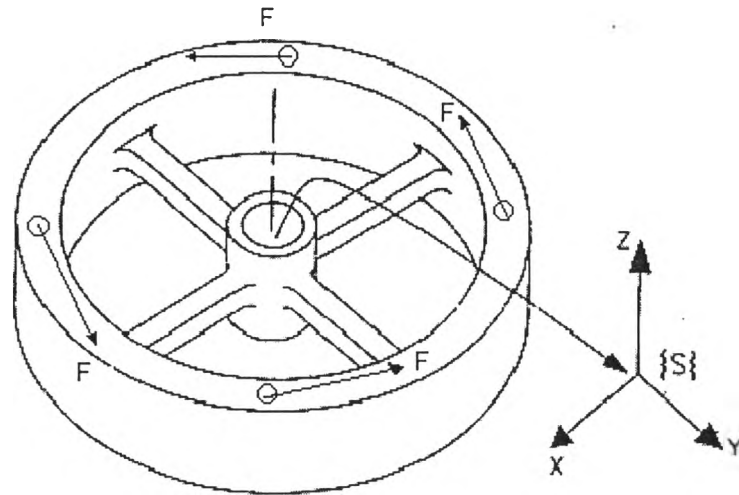
เนื่องจาก Load ภายนอกที่มากกระทำต่ออุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดจะกระทำผ่านมาจากน็อต ดังนั้นโมเมนต์ในแนวแกน x จากภายนอกจึงกลายมาเป็นแรงที่รูยึดน็อตทั้ง 4 รู ดังรูป 7.5



รูปที่ 7.6 แสดงรูปแบบจำลองที่ถูกแบ่งส่วนแล้ว เมื่อมีโมเมนต์ในแนวแกน x มากกระทำ

จากลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด รวมทั้งลักษณะของแรงที่มากกระทำ เราสามารถที่จะวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองเพียงครึ่งเดียวได้ โดยที่มี boundary condition เพิ่มเติมที่ผิว 12 ซึ่งเป็นผิวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดแบ่งวัตถุออกเป็น 2 ส่วน คือ ที่ผิว 12 จะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x สำหรับกรณีของโมเมนต์ในแนวแกน y ก็เป็นเช่นเดียวกัน

การพิจารณากรณีเมื่อมีโมเมนต์ในแนวแกน z มากกระทำ



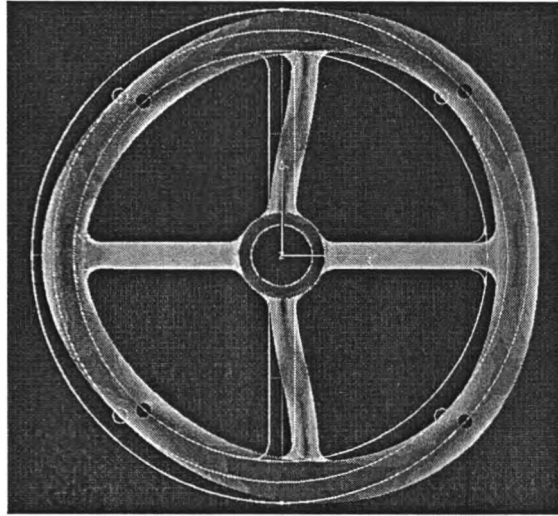
รูปที่ 7.7 แสดงรูปแบบจำลองเมื่อมีโมเมนต์ในแนวแกน z มากกระทำ

เนื่องจาก Load ภายนอกที่มากกระทำต่ออุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดจะกระทำผ่านมาจากน็อต ดังนั้นโมเมนต์ในแนวแกน z จากภายนอกจึงกลายมาเป็นแรงที่รูดยึดน็อตทั้ง 4 รู ดังรูปที่ 7.7 และเนื่องจากลักษณะของ Load ที่ไม่มีสมมาตร ดังนั้นเราจึงต้องวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองเต็ม

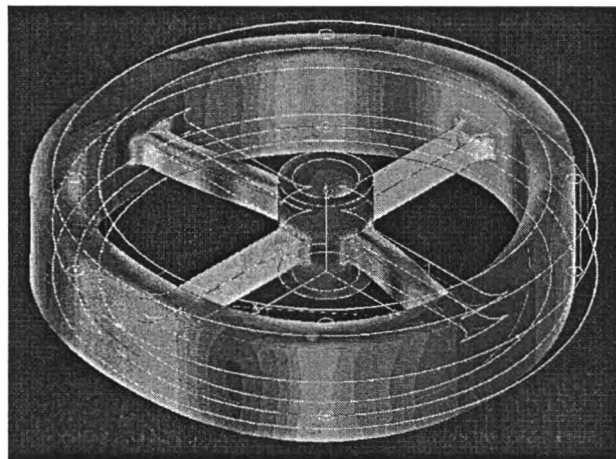
ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เราใช้เอลิเมนต์แบบ tetrahedra เพราะสะดวกในการ mesh แบบจำลอง ผลที่ได้เราพบว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิมของห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Sensor I) มีลักษณะของการเสียรูปและการเกิด von Mises stress เนื่องจากแรงและโมเมนต์ในแนวแกนต่างๆดังรูปที่ 7.8-7.15 ซึ่งเป็นรูปที่คำนวณจากแบบจำลองเต็มๆที่ถูก mesh ให้ละเอียดเพียงระดับหนึ่งเท่านั้นเพื่อแสดงให้เห็นภาพของการเสียรูปที่ชัดเจนดูได้ง่าย โดยที่ความเข้มของสีवाद้าที่ปรากฏในรูปบ่งบอกถึงค่า von Mises stress ที่เกิดขึ้นโดยมีค่ามากน้อยไล่ตามลำดับดังนี้

ขาว > เทา > ดำ

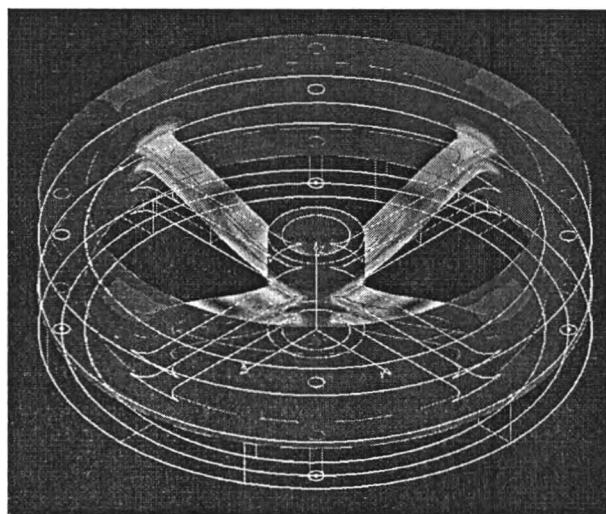
ส่วนแบบจำลองที่เรา mesh ละเอียดมากกว่านี้เพื่อหาดูว่าควรมีค่าที่ถูกต้องเป็นเท่าไรนั้นเป็นดังรูปที่ 7.16-7.19



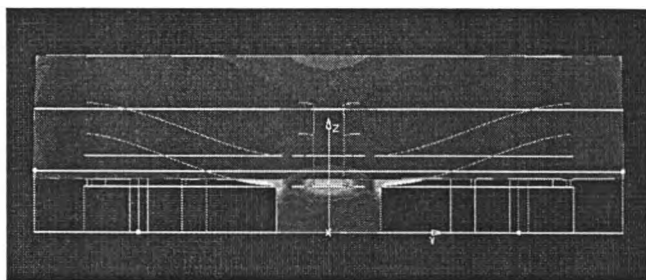
รูปที่ 7.8 การเสียรูปเนื่องจาก F_x หรือ F_y ของ Sensor I, top view



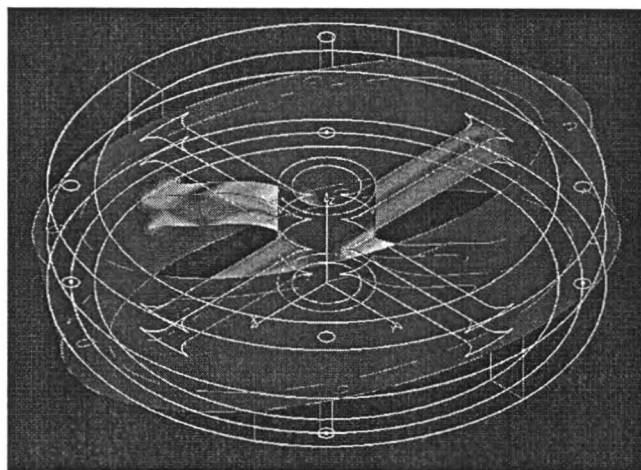
รูปที่ 7.9 การเสียรูปเนื่องจาก F_x หรือ F_y ของ Sensor I, isometric view



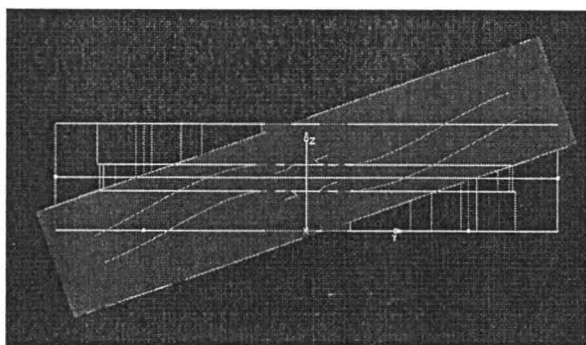
รูปที่ 7.10 การเสียรูปเนื่องจาก F_z ของ Sensor I, isometric view



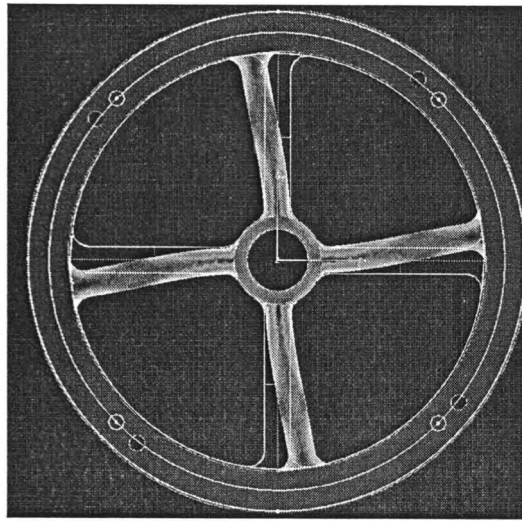
รูปที่ 7.11 การเสียรูปเนื่องมาจาก F_z ของ Sensor I, side view



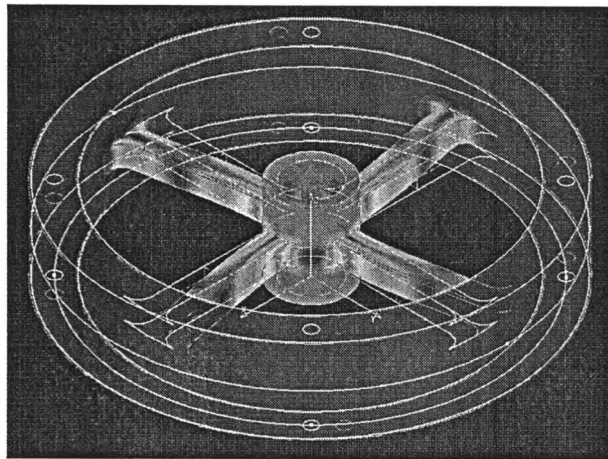
รูปที่ 7.12 การเสียรูปเนื่องมาจาก M_x หรือ M_y ของ Sensor I, isometric view



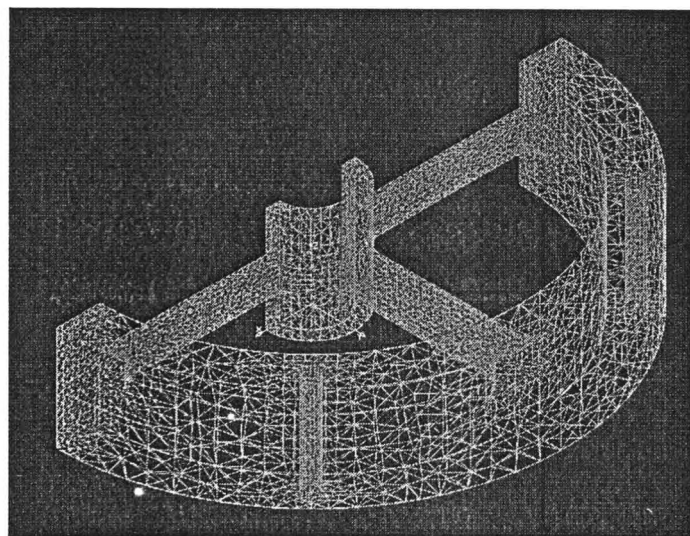
รูปที่ 7.13 การเสียรูปเนื่องมาจาก M_x หรือ M_y ของ Sensor I, side view



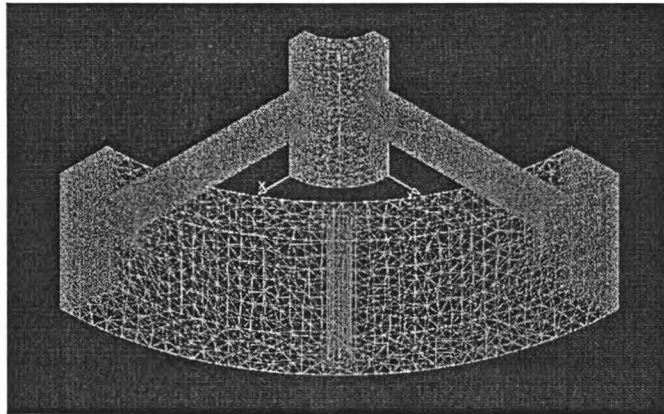
รูปที่ 7.14 การเสียรูปเนื่องจาก M_z ของ Sensor I, top view



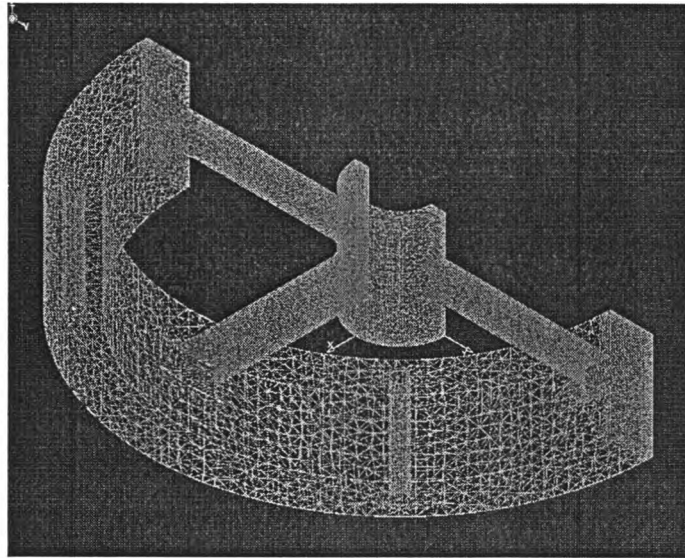
รูปที่ 7.15 การเสียรูปเนื่องจาก M_z ของ Sensor I, isometric view



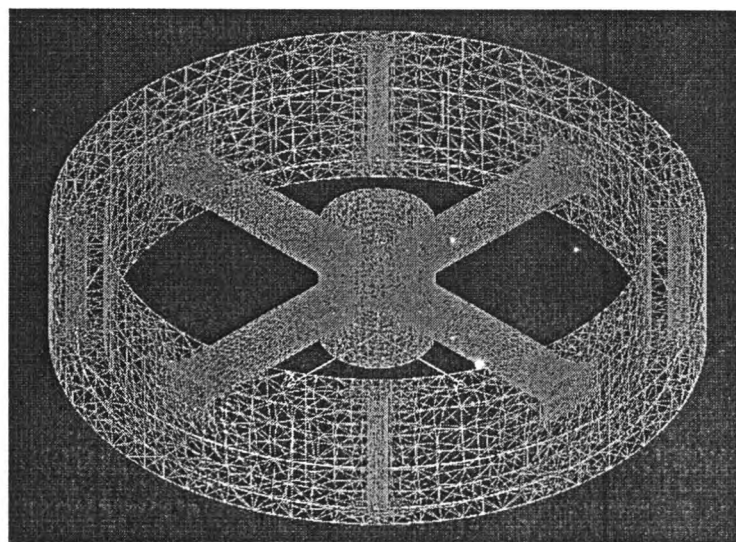
รูปที่ 7.16 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor I : Fx 10096 nodes 42113 elements



รูปที่ 7.17 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor I : Fz 21493 nodes 95178 elements



รูปที่ 7.18 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor I : Mx 42441 nodes 195837 elements



รูปที่ 7.19 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor I : Mz 57233 nodes 281739 elements

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เราจะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 7.1 แสดงผลของ Sensor I ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Load	ที่ตำแหน่ง	ความเครียด	ระยะที่เคลื่อนที่ไป	von Mises stress
Fx	ϵ_6, ϵ_8	0.179	1.800E-02	0.028
Fy	ϵ_5, ϵ_7	0.179	1.800E-02	0.028
Fz	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.794	2.220E-01	0.345
Mx	ϵ_2, ϵ_4	156.951	6.010E-04	28.550
My	ϵ_1, ϵ_3	156.951	6.010E-04	28.550
Mz	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	86.860	3.192E-04	9.688

ช่องของ " Load " คือ ประเภทของแรงหรือโมเมนต์

ช่องของ " ความเครียด " คือ ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัด

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz หน่วยคือ $\mu\text{strain/N}$
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz หน่วยคือ $\mu\text{strain/N.m}$

ช่องของ " ระยะที่เคลื่อนที่ไป "

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ ระยะที่ขอบนอกสุดของอุปกรณ์ตรวจรูแรงและแรงบิดที่เคลื่อนที่ไปมากที่สุด หน่วยคือ micron/N
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ องศาที่อุปกรณ์ตรวจรูแรงและแรงบิดหมุนไป หน่วยคือ degree/N.m

ช่องของ " von Mises stress " คือ ค่า maximum von Mises stress ที่เกิดขึ้น

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz หน่วยคือ MPa/N
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz หน่วยคือ MPa/N.m

เราหา strain compliance matrix จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เท่ากับ

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.794 & 0 & -156.951 & 0 \\ 0 & 0 & -1.794 & -156.951 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.794 & 0 & 156.951 & 0 \\ 0 & 0 & -1.794 & 156.951 & 0 & 0 \\ 0 & 0.179 & 0 & 0 & 0 & 86.860 \\ 0.179 & 0 & 0 & 0 & 0 & -86.860 \\ 0 & -0.179 & 0 & 0 & 0 & 86.860 \\ -0.179 & 0 & 0 & 0 & 0 & -86.860 \end{bmatrix}$$

จาก strain compliance matrix ที่ได้ เราสามารถหาได้ว่ามีค่า singular value เท่ากับ

$$\sigma_1 = 221.9622$$

$$\sigma_2 = 221.9622$$

$$\sigma_3 = 173.7200$$

$$\sigma_4=3.5880$$

$$\sigma_5=0.2531$$

$$\sigma_6=0.2531$$

เมื่อทำการหาค่า condition number ตามสมการที่ 3.28 เราจะได้ว่า condition number ของ Sensor I ที่หาได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ $221.9622/0.2531= 876.97$

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับที่ได้จากการทดลองจริง ณ ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัด เราพบว่า ตารางที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียด ณ ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัดระหว่างการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sensor I

Load	ที่ตำแหน่ง	ผลโดยเฉลี่ยจากการทดลองจริง	ผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์	% error
Fx	ϵ_6, ϵ_8	0.191	0.179	6.704
Fy	ϵ_5, ϵ_7	0.187	0.179	4.469
Fz	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.940	1.794	8.138
Mx	ϵ_2, ϵ_4	161.580	156.951	2.949
My	ϵ_1, ϵ_3	161.355	156.951	2.806
Mz	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	91.888	86.860	5.786

ช่องของ " Load " คือ ประเภทของแรงหรือโมเมนต์

ช่องของ " ผลโดยเฉลี่ยจากการวัดจริง " และ " ผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์ " คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัด

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N}$
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$

เมื่อพิจารณาดูจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง เมื่อเราดูลักษณะของการเสียรูปเนื่องจากแรงและโมเมนต์ในแนวแกนต่างๆ ก็จะได้ว่าการเสียรูปเนื่องจาก Fz, Mx, My และ Mz วงกลมนอกยังรักษาสภาพความเป็นวงกลมไว้ได้อยู่ค่อนข้างมาก แต่การเสียรูปเนื่องจาก Fx, Fy วงกลมไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นวงกลมไว้ได้ นี่เองที่เป็นสาเหตุที่ทำให้การวิเคราะห์อุปกรณ์ตรวจแรงและแรงบิดด้วยการใช้ทฤษฎีของคานสำหรับแรงในแนวแกน x, y ให้ค่าที่ผิดพลาดไป ดังนั้นเราจึงใช้วิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไปในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจแรงและแรงบิดเพื่อให้สามารถตรวจวัดแรงและโมเมนต์ได้ดีขึ้นโดยมีเป้าหมายที่จะทำให้แรงและโมเมนต์ที่มากกระทำ ทำให้เกิดความเครียดมากขึ้น มีการเสียรูปน้อย การเปลี่ยนแปลงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจแรงและแรงบิดที่จะดำเนินต่อไป จะเป็นไปในทางที่พยายามจะเพิ่มค่าความเครียดที่ได้จาก Fx, Fy เป็นหลัก เพราะว่าความเครียดที่ได้จาก

Fx, Fy ของ Sensor I นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเครียดที่ได้จาก Fz, Mx, My และ Mz

ตารางการดำเนินการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อที่จะหาว่าควรจะเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดอย่างไรเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นนั้น เราไม่จำเป็นที่จะต้องได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำของการเปลี่ยนแปลงแต่ละอย่าง เราเพียงแต่ต้องการผลลัพธ์ที่ดีเพียงพอที่จะนำมาเปรียบเทียบกันได้ว่าอย่างไรหนึ่ดีกว่าอย่างไรหนึ่เท่านั้น จนกระทั่งเราได้รูปร่างลักษณะที่ต้องการจริงๆแล้ว เราจึงทำการวิเคราะห์ห้อย่างละเอียดเพื่อที่จะได้คำตอบที่ถูกต้อง ดังนั้นการวิเคราะห์ต่อไปนี้ก็จะเป็นไปในแนวทางดังกล่าว

ลองเปลี่ยนขนาดความหนาของวงแหวนนอก ได้ผลดังตารางข้างล่างนี้

ตาราง 7.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของวงแหวนนอก

ความหนา	Load	ที่ตำแหน่ง	ความเครียด	ระยะที่เคลื่อนที่ไป	von Mises stress
4	Fx, Fy	$\epsilon_6, \epsilon_8, \epsilon_5, \epsilon_7$	0.448	4.664E-02	0.064
	Fz	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.637	2.128E-01	0.178
	Mx, My	$\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_1, \epsilon_3$	141.066	5.343E-04	14.060
	Mz	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	76.995	3.091E-04	7.163
8	Fx, Fy	$\epsilon_6, \epsilon_8, \epsilon_5, \epsilon_7$	0.179	1.800E-02	0.028
	Fz	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.570	1.971E-01	0.173
	Mx, My	$\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_1, \epsilon_3$	139.013	5.169E-04	13.662
	Mz	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	73.497	2.858E-04	7.016
12	Fx, Fy	$\epsilon_6, \epsilon_8, \epsilon_5, \epsilon_7$	0.112	1.298E-02	0.024
	Fz	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.570	1.942E-01	0.172
	Mx, My	$\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_1, \epsilon_3$	135.831	5.114E-04	13.583
	Mz	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	72.433	2.819E-04	6.924

ความหนามีหน่วยเป็น mm.

ช่องของ " Load " คือ ประเภทของแรงหรือโมเมนต์

ช่องของ " ความเครียด " คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ณ. ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัด

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N}$
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$

ช่องของ " ระยะที่เคลื่อนที่ไป "

- ถ้า Load คือ F_x, F_y, F_z ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ ระยะที่ขอบนอกสุดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่เคลื่อนที่ไปมากที่สุด หน่วยคือ micron/N
- ถ้า Load คือ M_x, M_y, M_z ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ องศาที่อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดหมุนไป หน่วยคือ degree/N.m

ช่องของ " von Mises stress " คือ ค่า maximum von Mises stress ที่เกิดขึ้น

- ถ้า Load คือ F_x, F_y, F_z หน่วยคือ MPa/N
- ถ้า Load คือ M_x, M_y, M_z หน่วยคือ MPa/N.m

จากตาราง 7.3 เราจะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดความหนาของวงแหวนนอกเล็กลงจะมีผลให้เกิดความเครียดมากขึ้นสำหรับแรงและโมเมนต์ในทุกทิศทาง โดยเฉพาะจะเห็นได้ชัดเจนในกรณีของแรง F_x, F_y ซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องการอย่างยิ่งเนื่องจากค่าความเครียดที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าอื่นๆมาก ดังนั้นเราเลือกใช้ความหนาของวงแหวนนอกเท่ากับ 4 มม.

ต่อไปเราจะลองเปลี่ยนแปลงขนาดความสูงของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด
ตารางที่ 7.4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงขนาดความสูง

height	Load	ที่ตำแหน่ง	ความเครียด	ระยะที่เคลื่อนที่ไป	von Mises stress
16	F_x, F_y	$\epsilon_6, \epsilon_8, \epsilon_5, \epsilon_7$	0.561	5.538E-02	0.077
	F_z	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.659	2.265E-01	0.183
	M_x, M_y	$\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_1, \epsilon_3$	141.066	5.450E-04	14.075
	M_z	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	79.328	3.118E-04	7.280
20	F_x, F_y	$\epsilon_6, \epsilon_8, \epsilon_5, \epsilon_7$	0.448	4.664E-02	0.064
	F_z	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.637	2.128E-01	0.178
	M_x, M_y	$\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_1, \epsilon_3$	141.066	5.343E-04	14.060
	M_z	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	76.995	3.091E-04	7.163
24	F_x, F_y	$\epsilon_6, \epsilon_8, \epsilon_5, \epsilon_7$	0.415	4.148E-02	0.058
	F_z	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$	1.592	2.056E-01	0.170
	M_x, M_y	$\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_1, \epsilon_3$	139.498	5.272E-04	14.013
	M_z	$\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$	76.995	3.088E-04	7.140

ความสูงมีหน่วยเป็น mm.

ช่องของ " Load " คือ ประเภทของแรงหรือโมเมนต์

ช่องของ " ความเครียด " คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัด

- ถ้า Load คือ F_x, F_y, F_z หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N}$
- ถ้า Load คือ M_x, M_y, M_z หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$

ช่องของ " ระยะที่เคลื่อนที่ไป "

- ถ้า Load คือ F_x, F_y, F_z ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ ระยะที่ขอบนอกสุดของอุปกรณ์ตรวจรับแรงและแรงบิดที่เคลื่อนที่ไปมากที่สุด หน่วยคือ $\mu\text{m}/\text{N}$
- ถ้า Load คือ M_x, M_y, M_z ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ องศาที่อุปกรณ์ตรวจรับแรงและแรงบิดหมุนไป หน่วยคือ $\text{degree}/\text{N.m}$

ช่องของ " von Mises stress " คือ ค่า maximum von Mises stress ที่เกิดขึ้น

- ถ้า Load คือ F_x, F_y, F_z หน่วยเป็น MPa/N
- ถ้า Load คือ M_x, M_y, M_z หน่วยคือ $\text{MPa}/\text{N.m}$

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของความสูงพบว่า เมื่อความสูงลดลง แรง F_x, F_y ทำให้เกิดความเครียดมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่เราต้องการ ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ความสูงเท่ากับ 16 มม.

จากการที่เรามีความต้องการ 2 อย่างที่ขัดแย้งกันในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรับแรงและแรงบิดนั่นคือ การที่เราต้องการที่จะให้มีความเครียดเกิดขึ้นมากๆ ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ต้องการที่จะทำให้มีการเสียรูปหรือก็คือการเคลื่อนที่มากเกินไป เราจึงนำประโยชน์ของ stress concentration เข้ามาช่วย ต่อไปเราจะพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อ F_x, F_y แต่เพียงอย่างเดียว เพราะเราจะไม่เปลี่ยนขนาดภายนอกอีก แต่จะหาดำแหน่งในการใส่ stress concentration ซึ่งในที่นี้เราเลือกใช้ Slot เป็นตัวทำให้เกิด stress concentration เรามุ่งเน้นที่จะให้เกิดผลกับแรง F_x, F_y เป็นหลักเนื่องจากแรง F_x, F_y ทำให้เกิดความเครียด ณ ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัดน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแรงและโมเมนต์ในทิศทางอื่นๆ ตารางที่ 7.5 แสดงผลของการใส่ Slot ขนาดความยาว 5 mm. เมื่อมีแรง F_x มากกระทำ

Slot	ความเครียด	ระยะ	ระยะที่เคลื่อนที่ไป	von Mises stress
32-37	1.009	36.50	5.762E-02	0.089
30-35	1.009	36.00	5.785E-02	0.087
28-33	0.874	33.50	5.785E-02	0.080
26-31	0.673	31.5,36	5.807E-02	0.078
24-29	0.493	36.50	5.807E-02	0.077
22-27	0.471	37.00	5.807E-02	0.077

- ช่องของ " Slot " บอกถึงตำแหน่งตามแนวแกนที่ปรากฏช่องว่างขึ้น หน่วยเป็น mm.
- ช่องของ " ความเครียด " บอกถึงค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้น หน่วยเป็น $\mu\text{strain/N}$
- ช่องของ " ระยะ " บอกถึงระยะตามแนวแกนที่เกิดค่าความเครียดสูงสุด หน่วยเป็น mm.
- ช่องของ " ระยะที่เคลื่อนที่ไป " บอกถึงตำแหน่งที่ขอบนอกสุดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีการเคลื่อนที่มากที่สุด หน่วยเป็น micron/N
- ช่องของ " von Mises stress " บอกถึงค่า von Mises stress สูงสุดที่เกิดขึ้น หน่วยเป็น MPa/N

จากตาราง 7.4 เราพบว่า เมื่อมี Slot อยู่ที่ระยะความยาวตามแนวแกนเท่ากับ 26 ถึง 31 มม. จะเหมาะสมที่สุด เพราะจะทำให้บริเวณที่มีความเครียดเกิดขึ้นสูงสุดอยู่ในระยะที่สามารถดัดสเตรนเกจได้ ต่อไปเราจะลองเปลี่ยนขนาดความยาวของ Slot

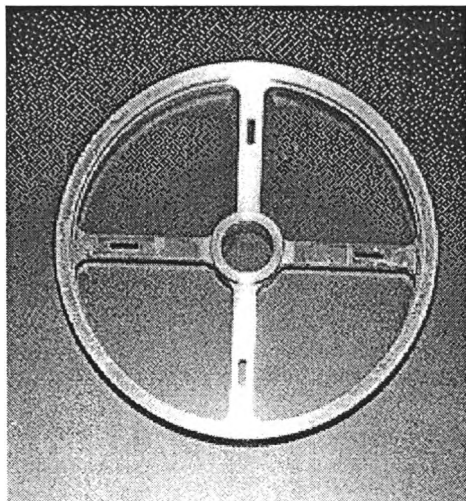
ตาราง 7.6 แสดงผลการเปลี่ยนความยาวของ Slot ต่อ F_x

Slot	ความเครียด	ระยะ	ระยะที่เคลื่อนที่ไป	von Mises stress
26-31	0.673	31.5,36	5.807E-02	0.078
28-31	0.673	36	5.807E-02	0.078
31	0.673	36	5.695E-02	0.078

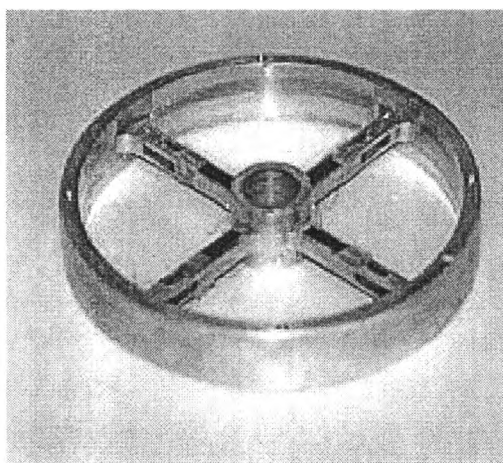
- ช่องของ " Slot " บอกถึงระยะตามแนวแกนที่ปรากฏช่องว่างขึ้น หน่วยเป็น mm.
- ช่องของ " ความเครียด " บอกถึงค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้น หน่วยเป็น $\mu\text{strain/N}$
- ช่องของ " ระยะ " บอกถึงระยะตามแนวแกนที่เกิดค่าความเครียดสูงสุด หน่วยเป็น mm.
- ช่องของ " ระยะที่เคลื่อนที่ไป " บอกถึงตำแหน่งที่ขอบนอกสุดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีการเคลื่อนที่มากที่สุด หน่วยเป็น micron/N
- ช่องของ " von Mises stress " บอกถึงค่า von Mises stress สูงสุดที่เกิดขึ้น หน่วยเป็น MPa/N

จากตาราง 7.6 เราจะเห็นได้ว่าการลดความยาวของ Slot ลงไม่ได้มีผลทำให้ความเครียดที่เกิดขึ้นลดลง แต่ทำให้ระยะที่เกิดความเครียดสูงสุดเปลี่ยนไปอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สามารถดัดสเตรนเกจได้ เราไม่เพิ่มความยาวของ Slot เนื่องจากในการดัดสเตรนเกจ เราจำเป็นที่จะต้องออกแรงกดเพื่อให้สเตรนเกจแนบติดกับพื้นผิว จึงเกรงว่าจะทำให้เกิดการหักงอได้ เพราะเราต้องออกแรงกดอยู่ในบริเวณที่ใกล้กับ Slot นั้น

จากที่เราทำการวิเคราะห์เราจึงได้ว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่จะมีรูปจริงและขนาดดังนี้ ขนาดต่างๆที่ปรากฏในรูปมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)



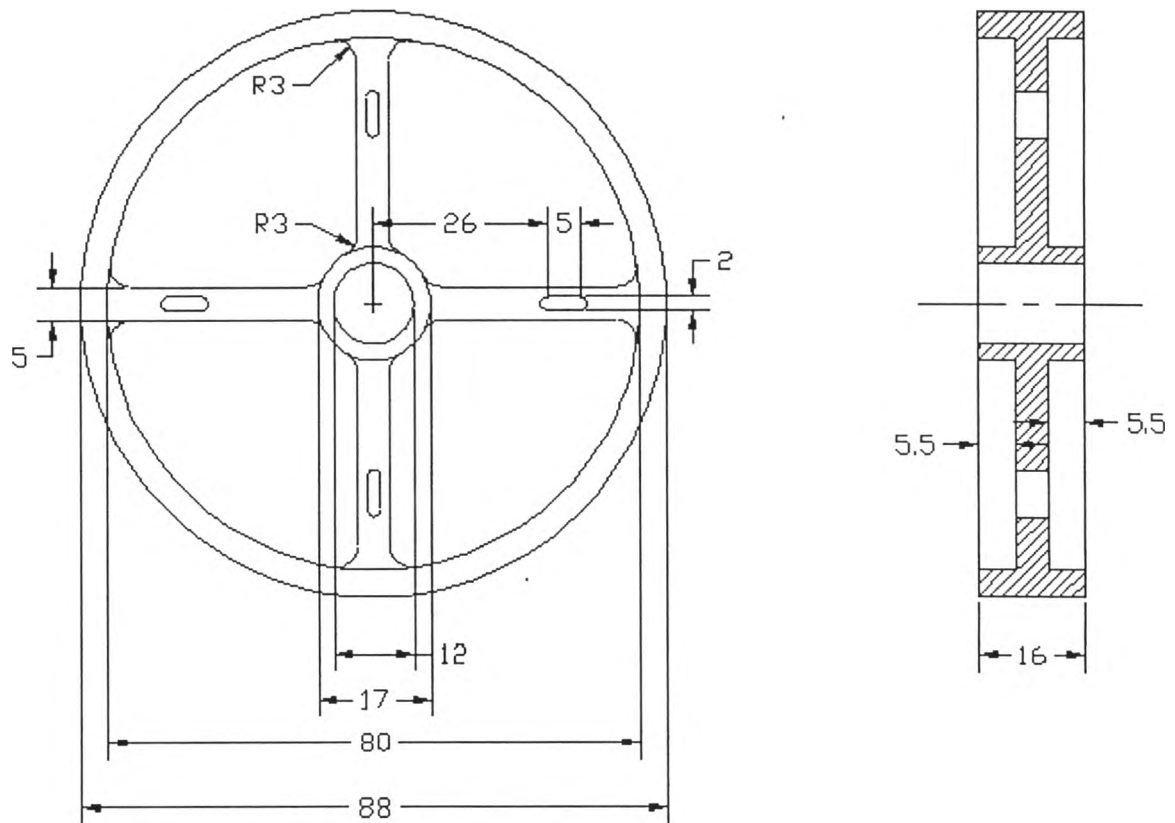
รูปที่ 7.20 แสดงรูปจริงของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่, Sensor II



รูปที่ 7.21 แสดงรูปของ Sensor II เมื่อติดสเตรนเกจแล้ว

ตำแหน่งที่ติดสเตรนเกจจุด ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 และ ϵ_4 คือ ที่ระยะ 13.5 mm. จากจุดศูนย์กลาง
กลางของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดไปตามแนวแกน

ตำแหน่งที่ติดสเตรนเกจจุด ϵ_5 , ϵ_6 , ϵ_7 และ ϵ_8 คือ ที่ระยะ 31.5 mm. จากจุดศูนย์กลาง
กลางของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดไปตามแนวแกน

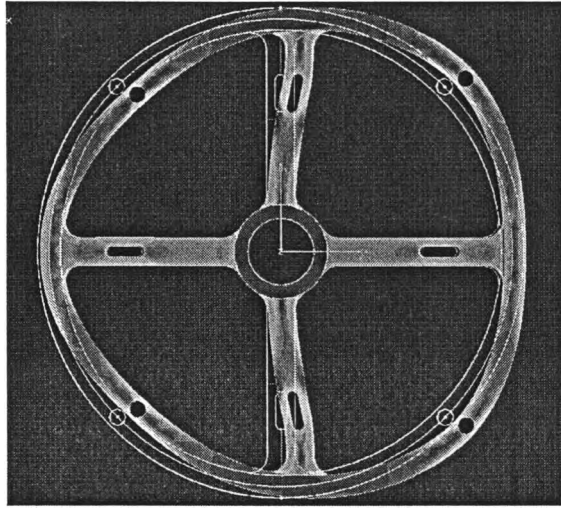


รูปที่ 7.22 แสดงขนาดของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Sensor II)

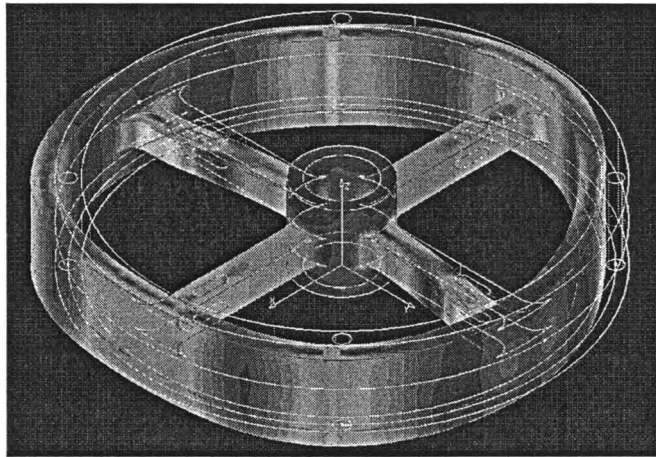
การเสียรูปและการเกิด von Mises stress ของของ Sensor II มีลักษณะดังรูปที่ 7.23-7.30 ซึ่งเป็นรูปที่คำนวณจากแบบจำลองเต็มๆที่ถูก mesh ให้ละเอียดเพียงระดับหนึ่งเท่านั้นเพื่อแสดงให้เห็นภาพของการเสียรูปที่ชัดเจนดูได้ง่าย โดยที่ความเข้มของสีขาวดำที่ปรากฏในรูปบ่งบอกถึงค่า von Mises stress ที่เกิดขึ้นโดยมีค่ามากน้อยไล่ตามลำดับดังนี้

ขาว > เทา > ดำ

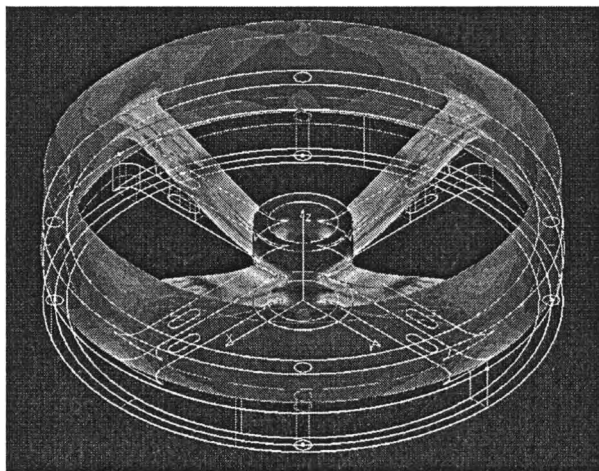
ส่วนแบบจำลองที่เรา mesh ละเอียดมากกว่านี้เพื่อหาดูว่าควรมีค่าที่ถูกต้องเป็นเท่าไรนั้นเป็นดังรูปที่ 7.31-7.34



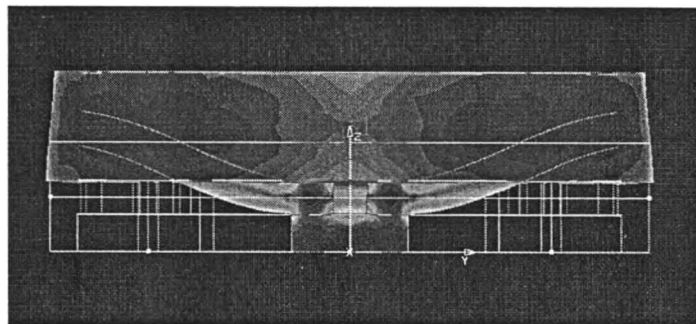
รูปที่ 7.23 การเสียรูปเนื่องจาก F_x หรือ F_y ของ Sensor II, top view



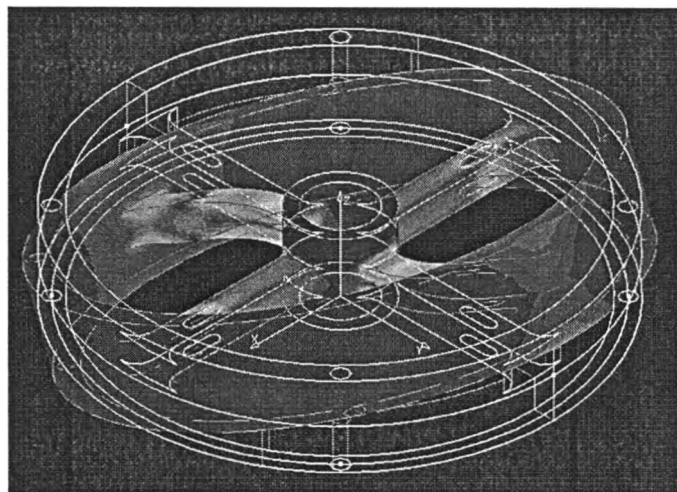
รูปที่ 7.24 การเสียรูปเนื่องจาก F_x หรือ F_y ของ Sensor II, isometric view



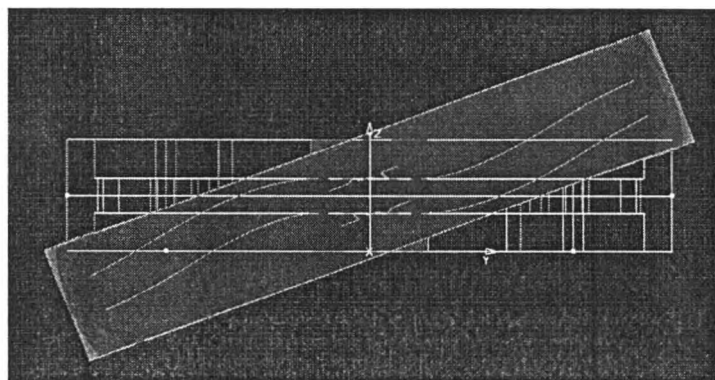
รูปที่ 7.25 การเสียรูปเนื่องจาก F_z ของ Sensor II, isometric view



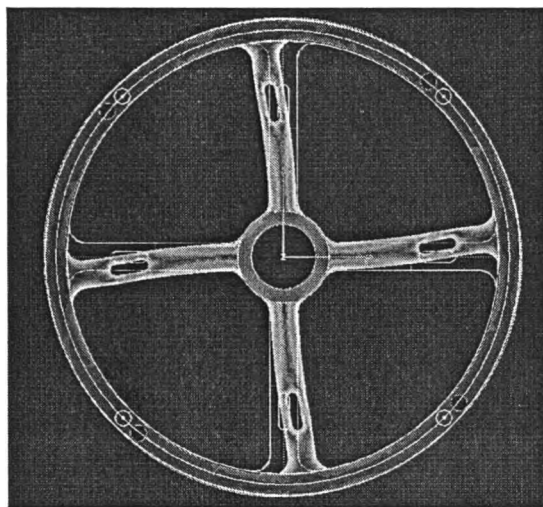
รูปที่ 7.26 การเสียรูปเนื่องจาก F_z ของ Sensor II, side view



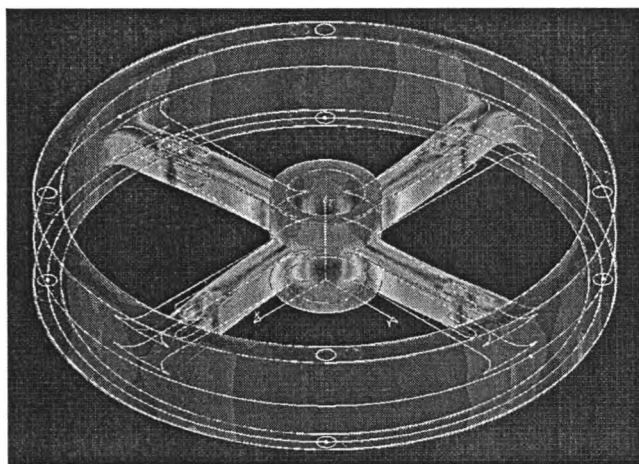
รูปที่ 7.27 การเสียรูปเนื่องจาก M_x หรือ M_y ของ Sensor II, isometric view



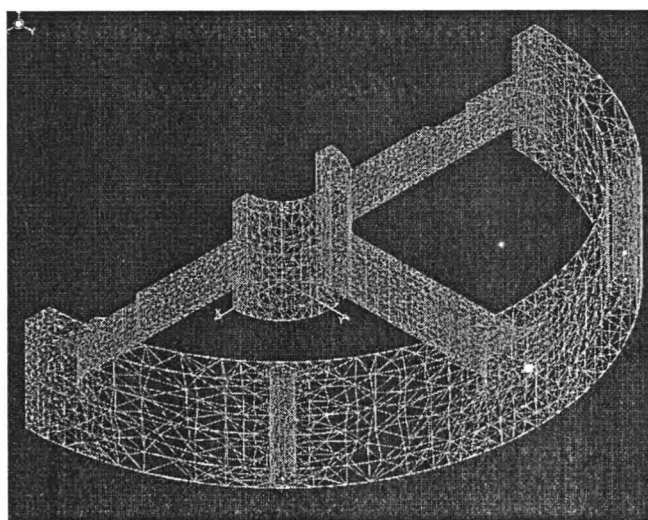
รูปที่ 7.28 การเสียรูปเนื่องจาก M_x หรือ M_y ของ Sensor II, side view



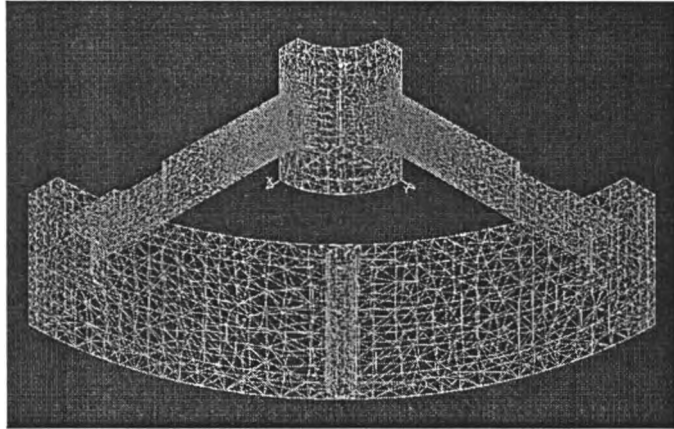
รูปที่ 7.29 การเสียรูปเนื่องจาก M_z ของ Sensor II, Top view



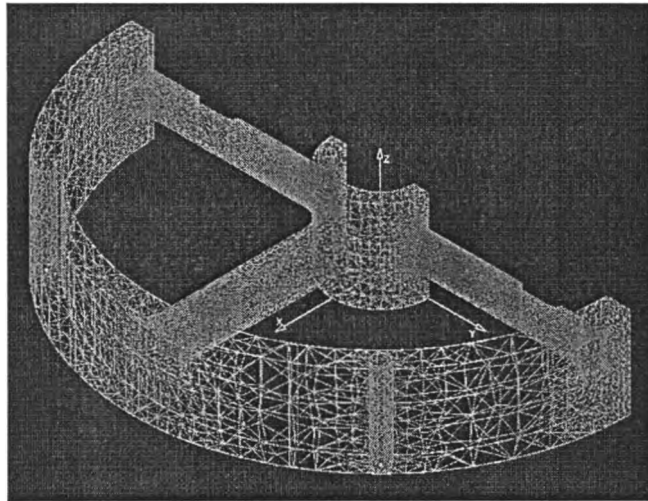
รูปที่ 7.30 การเสียรูปเนื่องจาก M_z ของ Sensor II, isometric view



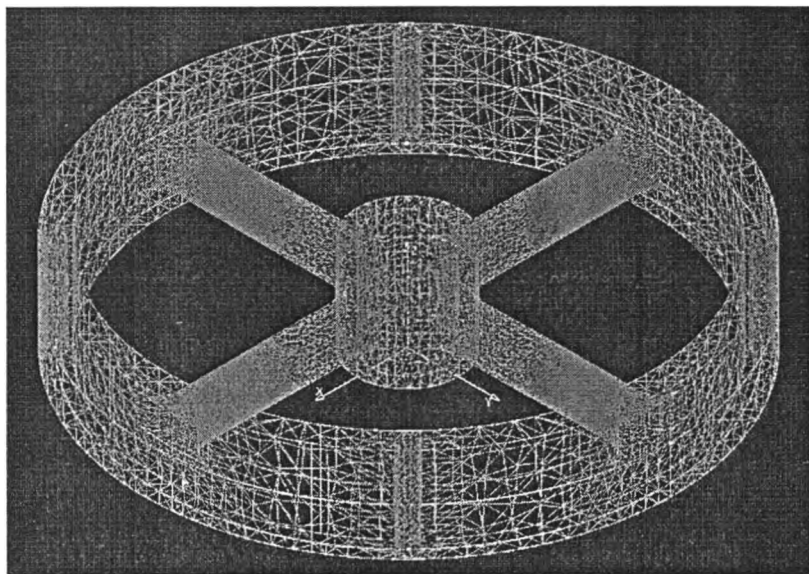
รูปที่ 7.31 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor II : Fx 7346 nodes 27704 elements



รูปที่ 7.32 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor II : Fz 22722 nodes 107736 elements



รูปที่ 7.33 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor II : Mx 47291 nodes 228384 elements



รูปที่ 7.34 แสดงภาพ meshed model ของ Sensor II : Mz 71329 nodes 333559 elements

จากผลการวิเคราะห์โดยการปรับจำนวนเอลิเมนต์ให้มากขึ้นเรื่อยๆจนคำตอบลู่เข้าหาค่าๆหนึ่ง เราพบว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Sensor II) จะได้ผลดังนี้

ตาราง 7.7 แสดงผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Sensor II

Load	ความเครียด	ระยะที่เคลื่อนที่ไป	von Mises stress
Fx	0.673	5.807E-02	0.078
Fy	0.673	5.807E-02	0.078
Fz	1.906	2.578E-01	0.258
Mx	169.279	6.626E-04	20.219
My	169.279	6.626E-04	20.219
Mz	67.662	3.632E-04	7.326

ช่องของ " Load " คือ ประเภทของแรงหรือโมเมนต์

ช่องของ " ความเครียด " คือ ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งของชุดสเตรนเกจที่เป็นหลักในการวัด

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N}$
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz หน่วยคือ $\mu\text{strain}/\text{N.m}$

ช่องของ " ระยะที่เคลื่อนที่ไป "

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ ระยะที่ขอบนอกสุดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่เคลื่อนที่ไปมากที่สุด หน่วยคือ micron/N
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz ระยะที่เคลื่อนที่ไปคือ องศาที่อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดหมุนไป หน่วยคือ degree/N.m

ช่องของ " von Mises stress " คือ ค่า maximum von Mises stress ที่เกิดขึ้น

- ถ้า Load คือ Fx, Fy, Fz หน่วยคือ MPa/N
- ถ้า Load คือ Mx, My, Mz หน่วยคือ MPa/N.m

จากค่าที่หาได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะได้ว่า Sensor II มี strain compliance matrix และค่า singular value ดังนี้

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.906 & 0 & -169.279 & 0 \\ 0 & 0 & -1.906 & -169.279 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.906 & 0 & 169.279 & 0 \\ 0 & 0 & -1.906 & 169.279 & 0 & 0 \\ 0 & 0.673 & 0 & 0 & 0 & 67.662 \\ 0.673 & 0 & 0 & 0 & 0 & -67.662 \\ 0 & -0.673 & 0 & 0 & 0 & 67.662 \\ -0.673 & 0 & 0 & 0 & 0 & -67.662 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 239.3967 & \sigma_2 &= 239.3967 & \sigma_3 &= 135.324 \\ \sigma_4 &= 3.812 & \sigma_5 &= 0.9518 & \sigma_6 &= 0.9518 \end{aligned}$$

เมื่อทำการหาค่า condition number ตามสมการที่ 3.28 เราจะได้ว่า condition number ของ Sensor II ที่หาได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ $239.3967/0.9518 = 251.52$