



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

ปริญญา

เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

วิศวกรรมศาสตร์

สาขา

คณะ

เรื่อง การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการออกแบบยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและ  
ตัวถังของรถกระบะ

An Appilcation of Reverse Engineering in the Door Grommet Design used in Trucks

นามผู้วิจัย นายกิตติรัตน์ ตันติกฤตยา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์ชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng. )

ประธานสาขาวิชา

( รองศาสตราจารย์พิรุทธิ์ ชามุสเศรษฐิกุล, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการออกแบบยางหุ้มสายไฟ  
ระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ

An Appilcation of Reverse Engineering in the Door Grommet Design used in Trucks

โดย

นายกิตติรัตน์ ตันติกฤตยา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติรัตน์ ดันติกฤตยา 2556: การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการออกแบบยางหุ้ม  
สายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
(เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม) สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. 134 หน้า

ปัจจุบันอุตสาหกรรมรถยนต์มีการใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากวัสดุประเภทยางเป็นจำนวนมาก ซึ่งการออกแบบชิ้นงานของวัสดุที่ผลิตจากวัสดุประเภทยางมีความซับซ้อนมาก ผู้วิจัยจึงนำเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยและเทคโนโลยีช่วยในการออกแบบทางคอมพิวเตอร์ โดยผู้วิจัยเลือกชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะมาทำการออกแบบ ซึ่งภาระที่กระทำกับชิ้นงานเป็นแบบการเคลื่อนที่จำลองการใช้งานจริง จากการเคลื่อนที่จะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสีรูปร่าง และผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบการเสีรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับการเสีรูปร่างจริงของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยเลือกใช้อิเลิเมนต์รูปทรง 3 มิติ (Hex Element) ชนิดอิเลิเมนต์แบบเฮอ์แมนอิเลิเมนต์ (Hermann Element) และแบบจำลองสมการอ็อกเคนลำดับที่ 3 จากผลการเปรียบเทียบการเสีรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์กับการเสีรูปร่างจริงของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 13.05 เปอร์เซ็นต์ ค่าดังกล่าวเป็นที่ยอมรับได้ในงานวิจัยนี้ และเมื่อค่าการเสีรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือส่งผลให้ค่าความเค้นและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงมีความน่าเชื่อถือด้วย โดยค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเท่ากับ 1.01 เมกะปาสคาล และพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงเท่ากับ 0.16 เมกะปาสคาล

คำหลัก วิศวกรรมย้อนรอย ยาง หุ้มสายไฟ การวิเคราะห์ไฟไนต์อิเลิเมนต์

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kittirat Tantikritaya 2013: An Application of Reverse Engineering in the Door Grommet Design used in Trucks. Master of Engineering (Industrial Production Technology), Major Field: Industrial Production Technology, Faculty of Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Supasit Rodkwon, Ph.D. 134 pages.

Currently, The automotive industry is to use component made from rubber material are numerous which the design is very complicated. The reverse engineering and computer aided engineering have been involved the design. This research selected the door grommet is to design which the simulate load is actual movement of door grommet. The movement is to involve door grommet is deformed and this research compared the actual deformation from testing with the deformation from computer simulation. The computer simulation used hex element shape, hermann element type and ogden degree 3 boundary. The compare result have maximum error of the deformation 13.05 %, it are acceptable in this research. The deformation result have credibility involve the stress and strain energy density result have credibility which the maximum stress are 1.01 MPa and the maximum strain energy density are 0.16 MPa.

**Keywords:** Reverse Engineering, Rubber, Grommet, Finite Element Analysis

\_\_\_\_\_  
Student's Signature

\_\_\_\_\_  
Thesis Advisor's Signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร. ชนะ รักษ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. ชัชพล ชังชู ประธานสาขาวิชา และรองศาสตราจารย์ ดร. ชาวสวน กาญจ โนมัย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่ให้ปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยซัมมิทฮาร์เนส จำกัด ที่ให้การสนับสนุนอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ด้านการทดสอบและทำการวิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง (CERM) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้การอนุเคราะห์ให้คำปรึกษาในด้านวิชาการเป็นอย่างดี

กิตติรัตน์ ตันติกฤตยา

มีนาคม 2556

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	52
อุปกรณ์	52
วิธีการ	59
ผลและวิจารณ์	67
ผล	67
วิจารณ์	91
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	96
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของยาง	99
ภาคผนวก ข แบบชิ้นงาน 2 มิติ	108
ภาคผนวก ค วิธีการวิเคราะห์เพื่อหาแบบสมการที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณ	110
ภาคผนวก ง วิธีการวิเคราะห์หาขนาดอิลิเมนต์ที่เหมาะสม	117
ภาคผนวก จ วิธีการอ่านผลการเสียรูปของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย คอมพิวเตอร์	131
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	134

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบสมบัติของยาง	12
2	ผลการวัดการเสียรูปของชิ้นงานเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงด้วยเครื่องวัดขนาดชิ้นงาน	72
3	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลจากสมการจำลองพฤติกรรมยาง	73
4	ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3	74
5	แสดงผลการวิเคราะห์ห้ขนาดคอลลีเมนต์เทียบกับพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน	75
6	แสดงผลการวิเคราะห์ห้ขนาดคอลลีเมนต์เทียบกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน	77
7	ผลการจำลองการเสียรูปของชิ้นงานจากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3	80
8	ผลการวัดระยะการเสียรูปจริงของชิ้นงานจากตำแหน่งอ้างอิงถึงตำแหน่งการวัดชิ้นงานกับผลการจำลองการเสียรูปของชิ้นงานจากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3	81
9	ค่าความเค้นวอนนิสสูงสุดและค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน	86
10	ผลค่าความเค้นวอนนิสและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	88
ตารางผนวกที่		
ง1	ตัวแปรที่เป็นเงื่อนไขการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับเวลา	123

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างชิ้นงานยางที่นำมาทำวิจัย	2
2	สูตรโครงสร้างของยางเอทธิลีน โพรพิลีน ไดอีนมोनอเมอร์	7
3	ลักษณะการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก	21
4	แสดงการทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียว	23
5	แสดงการทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียว	23
6	แสดงการทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบ	24
7	แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic)	25
8	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์	25
9	แสดงชุดอุปกรณ์ในการทดสอบแรงดึงสองแกนเท่ากันสำหรับขึ้นทดสอบแบบแผ่น	26
10	แสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากันกับผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียว	26
11	แสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากันกับผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงสองแกน	27
12	แรงชนิดต่างๆ	28
13	ความเค้นอัด	29
14	ความเค้นเฉือน	30
15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเค้นเฉือน	31
16	ภาพประกอบการอธิบายสมการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรง	32
17	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะทาง	33
18	ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด	36
19	ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	37

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ระนาบความเค้นวอนมิต	38
21	การเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นของทฤษฎีความเสียหายต่างๆ	39
22	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบการเสียดรูปชิ้นงานกับการจำลองการเสียดรูป	41
23	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบชิ้นงานกับผลการจำลองชิ้นงาน	42
24	การใช้งานของชิ้นงานซิลิโคน	43
25	รูปทรงของชิ้นงานซิลิโคน	43
26	ความสัมพันธ์แสดงการรับแรงของชิ้นงานแบบที่ 1	44
27	ความสัมพันธ์แสดงการรับแรงของชิ้นงานแบบที่ 2	44
28	แสดงลักษณะการรับแรงของ Double Cantilever Beam	45
29	ความสัมพันธ์การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลของไฟไนต์อิลิเมนต์	45
30	แสดงค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นกับยาง	46
31	แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับยาง	46
32	ความสัมพันธ์การเปรียบเทียบค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นกับยางแบบต่างๆ	47
33	อิลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	51
34	ชิ้นยางทดสอบสมบัติแรงดึงในแนวแกนเดียว	52
35	ชิ้นยางทดสอบสมบัติแรงดึงในแนวระนาบ	53
36	ชิ้นงานยางทดสอบสมบัติแรงกดในแนวแกนเดียว	53
37	เครื่องทดสอบแรงดึง	54
38	อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว	54
39	อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ	55
40	อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว	55
41	แสดงสมบัติของคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์	56
42	ชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ กับตำแหน่งอ้างอิงของชิ้นงาน	57
43	อุปกรณ์การทดสอบยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ	57

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	เครื่องวัดขนาดชิ้นงาน	58
45	แนวทางการวิจัย	59
46	การทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางกายภาพของยาง	60
47	การกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืด (Mullins Effect)	61
48	ชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ กับตำแหน่งอ้างอิงของชิ้นงาน	61
49	ตำแหน่งวัดระยะการเสีรูป 8 ตำแหน่ง	62
50	วิธีการวัดการเสีรูปของชิ้นงาน	63
51	วิธีการจำลองหาแบบจำลองสมการที่เหมาะสม	64
52	วิธีการจำลองหาขนาดอิลิเมนต์ที่เหมาะสม	65
53	วิธีการจำลองการเสีรูปของชิ้นงานยาง	66
54	ความสัมพันธ์ผลการทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียวของชิ้นงาน	68
55	ความสัมพันธ์แสดงผลการทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบของชิ้นงาน	69
56	ความสัมพันธ์แสดงผลการทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียวของชิ้นงาน	70
57	ผลการวัดการเสีรูปของชิ้นงานเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงด้วยเครื่องวัดขนาดชิ้นงาน	71
58	ความสัมพันธ์การเปรียบเทียบค่าผลการทดสอบสมบัติยางกับค่าผลที่ได้จากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3	74
59	ความสัมพันธ์ของขนาดอิลิเมนต์กับค่าความเค้นในที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน	76
60	ความสัมพันธ์ของขนาดอิลิเมนต์กับพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงในที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน	76
61	ความสัมพันธ์ของขนาดอิลิเมนต์กับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์	77
62	ผลการจำลองการเสีรูปของชิ้นงานจากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3	79
63	ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของผลการเสีรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผลของการจำลองการเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
64	กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของผลการเสีรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผลของการจำลองการเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	83
65	ความสัมพันธ์ของการเสีรูปของชิ้นงานตำแหน่งที่ 4	83
66	ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่ตำแหน่งวัดชิ้นงาน	84
67	ค่าความเค้นวอนมิสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่ตำแหน่งวัดชิ้นงาน	85
68	ค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Strain Energy Density) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	85
69	ค่าพลังงานสะสมการในการเปลี่ยนรูปทรงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่ตำแหน่งวัดชิ้นงาน	86
70	ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นวอนมิสสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	87
71	ตำแหน่งที่มีค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	87
72	ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นวอนมิสสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	89
73	ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	89
74	ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นวอนมิสสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	90
75	ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	90
76	แสดงตำแหน่งของการเกิดความสัมพันธ์ต่างๆ	94

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 1	100
ก2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 2	100
ก3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 3	101
ก4 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 4	101
ก5 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 5	102
ก6 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 1	102
ก7 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 2	103
ก8 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 3	103
ก9 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 4	104
ก10 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 5	104
ก11 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 1	105
ก12 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 2	105
ก13 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 3	106
ก14 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 4	106
ก15 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 5	107
ข1 แบบชิ้นงาน 2 มิติ	109

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค1	โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาแบบสมการที่เหมาะสม	111
ค2	หน้าต่างการเลือกฟังก์ชันคุณสมบัติวัสดุ	111
ค3	หน้าต่างการเลือกชุดข้อมูลเพื่อสร้างในโปรแกรม	112
ค4	หน้าต่างผลที่ได้จากของการดึงข้อมูลชุดการทดสอบแรงดึง	112
ค5	หน้าต่างผลการตั้งชื่อชุดข้อมูล	113
ค6	กำหนดค่าตัวแปรอิสระ	113
ค7	การปรับปรุงชุดข้อมูล	114
ค8	หน้าต่างย่อยในการเลือกชุดข้อมูลที่สร้างขึ้น	114
ค9	เลือกฟังก์ชันของยางและแบบจำลองพฤติกรรมของยาง	115
ค10	หน้าต่างในการคำนวณค่าตัวแปรของสมการ	115
ค11	หน้าต่างของสมการจำลองมูนนี่รีฟลินระดับ 2 (Mooney (2))	116
ค12	สมการจำลองพฤติกรรมของยางที่สามารถวิเคราะห์ได้ในโปรแกรม	116
ง1	หน้าต่างโปรแกรมและวิธีการเลือกโปรแกรมการวิเคราะห์	118
ง2	วิธีการนำเข้าแบบชิ้นงานยางและการกำหนดหน่วยของแบบชิ้นงาน	118
ง3	แบบชิ้นงานที่นำเข้าในโปรแกรม	119
ง4	ขนาดเงื่อนไขอิเลเมนต์ของแบบชิ้นงาน	119
ง5	วิธีการกำหนดขนาดเงื่อนไขอิเลเมนต์	120
ง6	วิธีการสร้างอิเลเมนต์แบบทรงมิติเท่ากัน 2 มิติ	120
ง7	วิธีการสร้างอิเลเมนต์แบบทรงมิติไม่เท่ากัน 2 มิติ	121
ง8	วิธีการขึ้นรูปอิเลเมนต์โดยวิธีการหมุนขึ้นรูป	121
ง9	วิธีการเชื่อมต่อโหนด	122
ง10	วิธีการสร้างโหนด	122
ง11	วิธีการจัดกลุ่มโหนด	123
ง12	ผลการกำหนดจัดกลุ่มโหนด	123
ง13	วิธีการกำหนดให้เงื่อนไขในการวิเคราะห์เป็นเงื่อนไขที่ขึ้นกับเวลา	124
ง14	วิธีการกำหนดตัวแปรที่เป็นเงื่อนไขการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับเวลา	125

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ง15	วิธีการกำหนดเงื่อนไขการยึดติดไม่เคลื่อนที่ของชิ้นงาน	125
ง16	ผลการกำหนดเงื่อนไขการยึดติดไม่เคลื่อนที่ของชิ้นงาน	126
ง17	วิธีการกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน	126
ง18	ผลการกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน	127
ง19	วิธีการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส	127
ง20	ผลการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส	128
ง21	วิธีการกำหนดสร้างข้อมูลวัตถุคิบบางเอทริสอินโพพิลีนไดอินมอนอเมอร์	128
ง22	วิธีการกำหนดสมบัติของชิ้นงาน	129
ง23	วิธีการกำหนดสมบัติการวิเคราะห์	130
จ1	วิธีการอ่านค่าข้อมูลการวิเคราะห์	132
จ2	วิธีการแสดงผลข้อมูลการวิเคราะห์	132
จ3	ผลการวิเคราะห์	133
จ4	วิธีการวัดระยะการเสีขรูป	133

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Reverse Engineering	วิศวกรรมย้อนรอย
Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM	ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีนมอนอเมอร์
Polythene, PE	พอลิเอทิลีน
<i>Polypropylene</i> , PP	พอลิโพรพิลีน
Ethylene Propylene Monomer, EPM	ยางเอทิลีน โพรพิลีนมอนอเมอร์
Dicyclopentadiene, DCPD	ไดไซโคลเพนเตไดอีน
Ethylidene Norbornene, ENB	เอทิลิดไดอีน นอเบอร์นีน
Trans 1-4 Hexadiene, 1-4 HD	ทราน 1-4 เฮกซะไดอีน
Hyperelasticity	คุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก
Stain Energy Function, W	พลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง
U	เทนเซอร์ระยะยืด (Stretch Tensor)
$\lambda_1$	เป็นระยะยืดในทิศทางตามแนวแกนหลัก x
$\lambda_2$	เป็นระยะยืดในทิศทางตามแนวแกนหลัก y
$\lambda_3$	เป็นระยะยืดในทิศทางตามแนวแกนหลัก z
J	อัตราส่วนเชิงปริมาตร
V	ปริมาตร
$\mu$	มอดูลัสการเฉือน (Shear Modulus)
$\square$	ค่าคงที่ของสมการ
K	มอดูลัสการกด (Bulk Modulus)
Uniaxial Tension	การทดสอบแบบแรงดึงแนวแกนเดียว
Biaxial Tension	การทดสอบแบบแรงดึงในหลายแนวแกน
Planar Tension	การทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบ
Volumetric Test	การทดสอบแบบการอัดตัว
Uniaxial Compression	การทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียว
Mullin's Effect	ผลกระทบของของเหลวหนืด
$\sigma$	ความเค้นกด
$\tau$	ความเค้นเฉือน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

F  
A  
E  
D  
L  
E

แรงที่กระทำกับพื้นที่

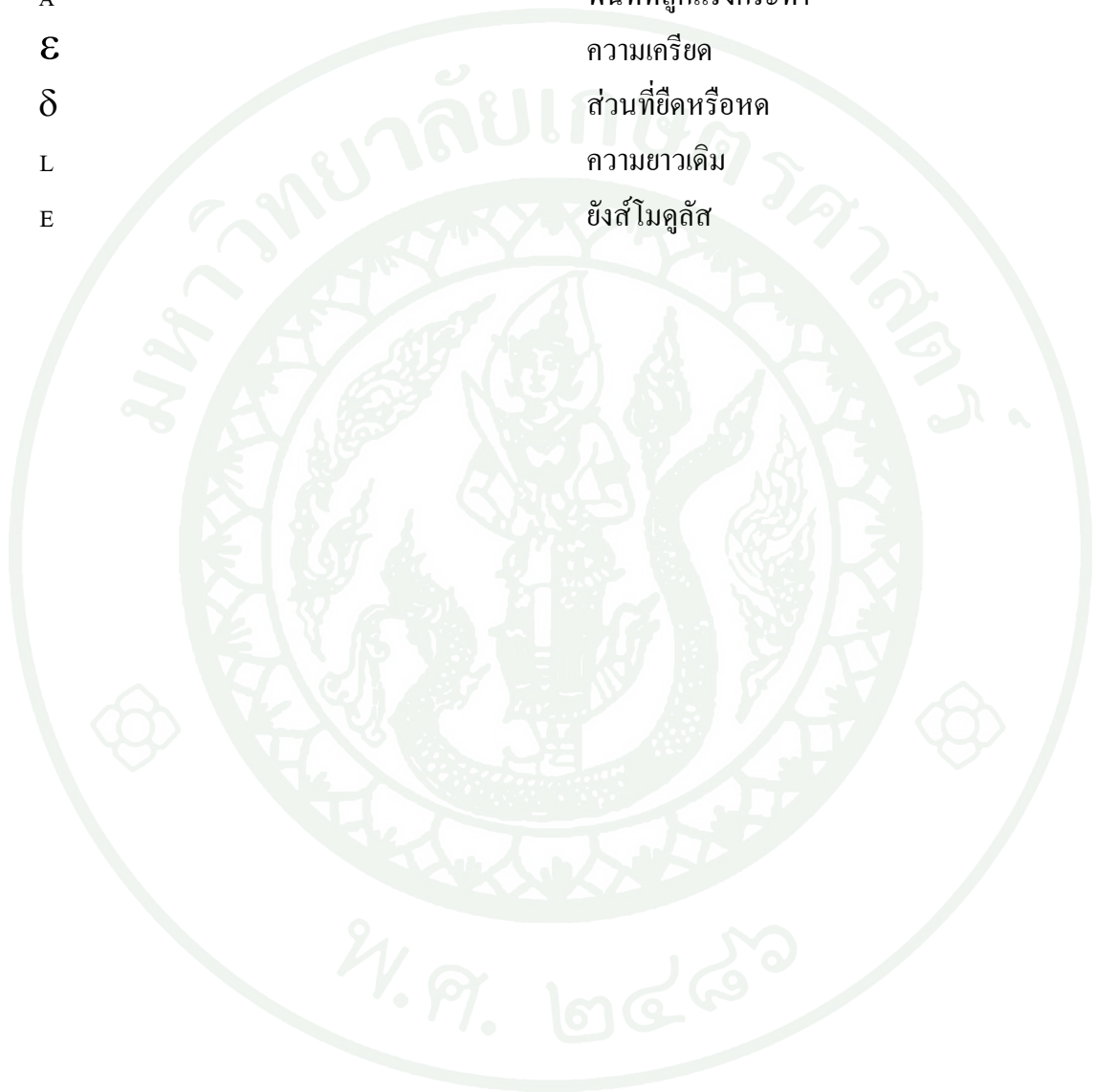
พื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ

ความเครียด

ส่วนที่ยืดหรือหด

ความยาวเดิม

ยังส์โมดูลัส



# การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการออกแบบยางหุ้มสายไฟ ระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ

## An Application of Reverse Engineering in the Door Grommet Design used in Trucks

### คำนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมรถยนต์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีการแข่งขันในเชิงการตลาดสูงมาก ผู้ผลิตทุกค่ายต้องทำการพัฒนาชิ้นงาน โดยต้องมีราคาต้นทุนที่ลดลงและคุณภาพต้องดีขึ้นหรือเท่าเดิม ซึ่งวิธีการปัจจุบันใช้วิธีขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบและทำการทดสอบตามหัวข้อมาตรฐานของลูกค้า โดยถ้าชิ้นงานต้นแบบไม่สามารถผ่านการทดสอบตามมาตรฐานของลูกค้าได้ ส่งผลให้เกิดการลงทุนซ้ำซ้อนในการสร้างแม่พิมพ์ ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทดสอบชิ้นงาน และต้องเสียเวลามาก ประกอบกับทางบริษัทนำเข้าชิ้นงานจากต่างประเทศเพื่อใช้ในการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำหลักการการประยุกต์เทคโนโลยี 2 กลุ่ม มาช่วยในการพัฒนาวิธีการออกแบบ คือ เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยการออกแบบและเทคโนโลยีการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยนำเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยการออกแบบมาช่วยในการวิเคราะห์ชิ้นงานจากต่างประเทศ และนำเทคโนโลยีการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการใช้งานของชิ้นงานนั้น เพื่อหาวิธีการออกแบบที่ถูกต้อง แล้วทำการออกแบบชิ้นงานใหม่ต่อไปได้ในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกตัวอย่างชิ้นงาน โดยชิ้นงานเป็นชิ้นงานที่ทำจากวัสดุคิบบประเภทยางดังภาพที่ 1 อยู่ในระบบการเปิดและปิดประตูรถ ทำหน้าที่ทางเชื่อมสายไฟระหว่างตัวรถกับประตูรถ



ภาพที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานยางที่นำมาทำวิจัย

จากข้อมูลเบื้องต้นชิ้นงานตัวอย่างมีลักษณะการทำงานแบบแกว่งไปพร้อมกับการเปิดและปิดประตูรถ โดยการออกแบบชิ้นงานนี้มีความซับซ้อนมากยากต่อการออกแบบ แนวทางการทำวิจัยจึงได้นำเทคโนโลยีด้านการออกแบบทางคอมพิวเตอร์นำมาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้การออกแบบที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

## วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ โดยใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมคาร์บอนรอยและเทคโนโลยีช่วยในการออกแบบทางคอมพิวเตอร์

### ขอบเขตงานวิจัย

1. กำหนดให้ใช้โปรแกรม MSC.Patran ร่วมกับ MSC.Marc ในการวิเคราะห์ชิ้นงาน
2. กำหนดให้คำนวณภาระที่กระทำกับชิ้นงานในลักษณะแรงสถิต (Static Load) เท่านั้น
3. กำหนดให้ชิ้นงานขึ้นรูปจากยางเอทธิลีน โพรพิลีน ไดอีนมอโนเมอร์ (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM)
4. กำหนดให้ยางหุ้มสายไฟในงานวิจัยนี้เป็นของรถกระบะ
5. กำหนดให้สายไฟที่สอดผ่านมานั้นไม่สัมผัสต่อชิ้นงาน
6. กำหนดให้ชิ้นงานเริ่มต้นทำการวิเคราะห์ที่ไม่มีรอยฉีกขาด

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ โดยเป็นแบบชิ้นงานที่ผ่านการวิเคราะห์ความเสียหายทางวิศวกรรม ด้วยเทคโนโลยีวิศวกรรมคาร์บอนรอยและการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถช่วยลดเวลาในการออกแบบ ลดความเสี่ยงที่เกิดจากการออกแบบชิ้นงานผิดพลาด และลดต้นทุนในการผลิตได้ เป็นผลให้เพิ่มโอกาสเชิงการตลาดของผลิตภัณฑ์มากขึ้นด้วย

## การตรวจเอกสาร

### 1. วิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering), Phonpet (2011)

วิศวกรรมย้อนรอย เป็นขบวนการสร้างและผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่างๆขึ้นเอง แต่บางคน อาจจะมีแนวความคิดที่ว่าเป็นการเลียนแบบชิ้นส่วนเดิมที่เสียหาย แต่แท้จริงแล้วการทำวิศวกรรมย้อนรอยที่ดีต้องอาศัยการตรวจสอบข้อมูลทางเทคนิคและอื่นๆ เปรียบเทียบระหว่างชิ้นส่วนที่กำลังจะสร้างขึ้นใหม่ กับชิ้นส่วนต้นแบบ ดังนั้น การทำวิศวกรรมย้อนรอยอย่างเต็มรูปแบบจึงเกี่ยวข้องกับ การสืบค้นหาข้อมูลทางเทคนิค การย้อนรอยขนาดและรูปร่างของต้นแบบ วัสดุและกรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วนแต่ละชิ้น การประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นอุปกรณ์หรือระบบ รวมทั้งการตรวจสอบสมบัติ และพัฒนาสมรรถนะทั้งในระหว่างการผลิตและระหว่างการใช้งาน

#### 1.1 วัตถุประสงค์ของการทำวิศวกรรมย้อนรอย

ปัจจุบันผู้ประกอบการในภาคธุรกิจอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจกับการทำวิศวกรรมย้อนรอย เนื่องจากเหตุผลตามสภาพธุรกิจ และความจำเป็นต่างๆ กัน เช่น

1.1.1 ต้องการศึกษาผลิตภัณฑ์ต้นแบบจากที่อื่น เช่น จากบริษัทคู่แข่งหรือจากบริษัทต่างประเทศ เพื่อศึกษาว่าผลิตภัณฑ์นั้นได้รับการออกแบบและผลิตมาอย่างไร

1.1.2 ต้องการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ของตนเองที่มีอยู่ แต่เนื่องจากไม่มีแบบและรายละเอียดข้อกำหนดทางเทคนิคที่ไม่ครบถ้วน

1.1.3 ต้องการผลิตชิ้นส่วนอะไหล่ใช้แทนชิ้นส่วนเดิมซึ่งเกิดความเสียหาย เนื่องจากผู้ผลิตไม่ได้ทำการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวอีกต่อไป หรือ เนื่องจากชิ้นส่วนของแท้จากต่างประเทศมีราคาแพง รวมทั้งการจัดส่งล่าช้า ทำให้ไม่ทันต่อความจำเป็นในการใช้งาน

ใน 2 กรณีแรกนั้น จุดมุ่งหมายของการทำวิศวกรรมย้อนรอย คือ การผลิตในปริมาณมากเพื่อผลในเชิงพาณิชย์เป็นหลัก ส่วนกรณีสุดท้ายนั้น จุดมุ่งหมายคือ การผลิตอะไหล่ทดแทน เนื่องจากความจำเป็นบังคับ โดยมีผลพลอยได้คือ ความรู้ความเข้าใจ ความสามารถในการผลิต ตรวจสอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น รวมทั้งข้อมูลทางวิชาการต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ใน

การซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลอื่นๆ และปรับปรุงชิ้นส่วนอุปกรณ์ให้มีสมรรถนะสูงขึ้น หากมีการพัฒนาความรู้ความชำนาญอย่างต่อเนื่อง ก็อาจนำไปสู่งานวิศวกรรมย้อนรอยชิ้นส่วนเครื่องจักรเพื่อการจำหน่ายได้ในที่สุด แต่ไม่ว่าจะทำวิศวกรรมย้อนรอยด้วยเหตุผลใดก็ตาม จะต้องมีการตรวจสอบอย่างละเอียดถี่ถ้วนเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้มีสมรรถนะเหมาะสมตรงกับวัตถุประสงค์การใช้งาน อีกทั้งยังสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยและเชื่อถือได้ตลอดช่วงอายุการใช้งาน

## 1.2 การดำเนินการเพื่องานวิศวกรรมย้อนรอย

การผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ด้วยขบวนการทางวิศวกรรมย้อนรอยที่มีการดำเนินการอยู่ในปัจจุบันนั้น บ่อยครั้งจะพบปัญหาที่ว่า ชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นนั้นไม่ได้คุณภาพตามวัตถุประสงค์การใช้งาน หรือตามสมรรถนะของชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ทั้งนี้ เนื่องมาจากสาเหตุหลักได้แก่ การที่ผู้ประกอบการยังไม่มีระบบการศึกษาย้อนกลับถึงข้อมูลที่สำคัญของชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์นั้นๆ ในรายละเอียด ได้แก่ การออกแบบทางวิศวกรรม สมบัติทางวัสดุ กรรมวิธีการผลิต และสภาพเงื่อนไขการใช้งาน เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการกำหนดความเหมาะสม สำหรับการนำไปใช้ทดแทนชิ้นส่วนที่ทำขึ้นใหม่ ดังนั้น กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร ให้มีคุณภาพตามต้องการด้วยการทำวิศวกรรมย้อนรอยอย่างถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบข้อมูลที่สำคัญดังนี้

1.2.1 ข้อมูลชิ้นงานเดิม เช่น ความจำเป็นเร่งด่วน ราคา และสมบัติต่างๆ จากผู้ผลิต ข้อมูลเหล่านี้อาจได้จากผู้ผลิตหรือจากประสบการณ์ของผู้ใช้โดยตรง

1.2.2 ข้อมูลวัสดุที่ใช้ เช่น ชนิด สมบัติการใช้งาน มาตรฐานคุณภาพ และราคา ข้อมูลเหล่านี้อาจได้จากผู้ผลิตทั้งในและต่างประเทศ เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัสดุที่มีสมบัติและความเหมาะสมกับชิ้นงานเดิมหรือใกล้เคียงกัน

1.2.3 ขั้นตอน กรรมวิธี และความเป็นไปได้ในการขึ้นรูป

1.2.4 การปรับปรุงคุณภาพภายหลังขั้นตอนการขึ้นรูป ได้แก่ การปรับปรุงพื้นผิว การอบชุบ และการเคลือบผิว เป็นต้น

1.2.5 การตรวจสอบคุณภาพภายหลังการผลิตแต่ละขั้นตอน โดยการตรวจสอบมีทั้งแบบทำลายและไม่ทำลาย

1.2.6 การติดตามผลการใช้งาน เพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสำหรับการผลิตชิ้นส่วนอื่นๆ ต่อไป

1.2.7 การวิจัยและพัฒนา ในกรณีที่ต้องการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้งานให้สูงกว่าต้นแบบ

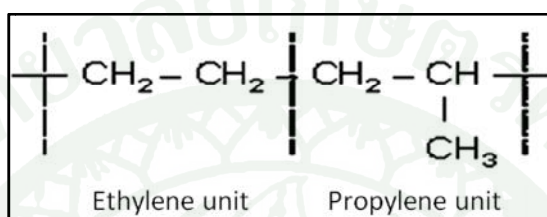
การดำเนินงานทางวิศวกรรมย้อนรอยเป็นการผสมผสานความรู้จากงานวิศวกรรมการออกแบบและผลิต กับความรู้จากงานอุตสาหกรรม ความหลากหลายของขบวนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมและธุรกิจ เนื่องจากระบบเครื่องจักรในอุตสาหกรรมแต่ละประเภทประกอบด้วยเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน ดังนั้น การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของอุตสาหกรรมและวิศวกรรมที่หลากหลาย จะสามารถช่วยให้ผู้ดำเนินการมีความเข้าใจปัญหาของการสร้างอะไหล่ หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรได้กว้างขึ้น ข้อมูลเหล่านี้จะต้องนำมาแลกเปลี่ยน รวบรวม และบูรณาการทางความคิด เพื่อให้การผลิตชิ้นส่วนและอะไหล่ชิ้นใหม่มีโอกาสประสบความสำเร็จมากยิ่งขึ้น

## 2. ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM), พงษ์ธร (2548)

เป็นที่ทราบกันดีว่าทั้งพอลิเอทิลีน (Polythene, PE) และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ต่างก็มีสมบัติเป็นพลาสติกที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดดังกล่าวสามารถตกผลึกได้ง่าย แต่หากทำการป้องกันการตกผลึกของพอลิเอทิลีน โดยการเติมมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงไป ในระหว่างกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันก็จะได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติความเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง

ในระยะแรกเริ่มที่ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) กับ โพรพิลีน (Propylene) จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติเป็นยางเรียกว่า ยางเอทิลีนโพรพิลีนมอนอเมอร์ (Ethylene Propylene Monomer, EPM) เนื่องจากโมเลกุลของยางชนิดนี้ไม่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว (ไม่มีพันธะคู่) ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอัน

เนื่องจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลักของยางชนิดนี้ก็คือไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ (เพราะไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล) การทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เพอร์ออกไซด์เท่านั้น ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนายางชนิดใหม่โดยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่สามคือ ไดอินลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในสายโมเลกุล ยางจึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถันและเรียกยางชนิดนี้ว่า ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์ โดยมีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์

ที่มา: พงษ์ธร (2548)

เนื่องจากไดอินที่เติมลงไปไม่ได้ไปแทรกอยู่ที่สายโซ่หลักของโมเลกุล แต่จะเกาะอยู่กับสายโซ่หลักเป็นลักษณะกิ่งก้านสาขา ด้วยเหตุนี้ แม้ว่าตำแหน่งพันธะคู่จะเกิดการแตกตัวอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น แสงแดด ออกซิเจน โอโซน ฯลฯ แต่สายโซ่หลักก็ยังคงเหมือนเดิมหรือได้รับผลกระทบน้อยมาก ด้วยเหตุนี้ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์จึงมีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อความร้อน แสงแดด ออกซิเจน และโอโซนได้เป็นอย่างดี

ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอิน โดยทั่วไป ยางชนิดนี้มีเอทิลีนอยู่ในช่วง 45-85 เปอร์เซ็นต์โมล (หรือ 40-80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) แต่เกรดที่มีขายกันโดยทั่วไปจะมีปริมาณเอทิลีนอยู่ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์โมลและมีปริมาณของไดอินอยู่ในช่วง 3-11 เปอร์เซ็นต์โมล แม้ว่าไดอินที่ใช้กันอย่างกว้างขวางจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ ไดไซโคลเพนทาไดอิน (Dicyclopentadiene, DCPD) เอทิลิดีนนอร์บอร์นีน (Ethylidene Norbornene, ENB) และ ทราน 1-4 เฮกซะไดอิน (Trans 1-4 Hexadiene, 1-4 HD) แต่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ เอทิลิดีนนอร์บอร์นีนเนื่องจากจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันสูงที่สุด แม้ว่าการใช้ทราน 1-4 เฮกซะไดอินจะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ช้ากว่าเอทิลิดีนนอร์บอร์นีน

เบอร์นั้นแต่สมบัติบางประการของยางจะดีกว่าเช่น ความทนทานต่อความร้อน รวมถึงการบดผสม และการขึ้นรูปยางก็จะทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากโมเลกุลของยางมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ส่วนการใช้ ไคโซโลพีเนตอะไดอินจะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาของรูปได้ช้าที่สุด

สัดส่วนของเอทธิลีนและ โพรพิลีนในยางก็มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของยาง กล่าวคือ ยางที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงจะมีความแข็งแรงในสภาพที่ยังไม่คงรูปสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทธิลีน ลดลง ยางจะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น

นอกจากจะมีการแบ่งเกรดตามชนิดและปริมาณของ ไคอินและสัดส่วนของเอทธิลีนและ โพรพิลีนแล้ว ยังมีการแบ่งเกรดยางเอทธิลีน โพรพิลีน ไคอินมอนอเมอร์ตามความหนืด (น้ำหนัก โมเลกุล) อีกด้วย โดยทั่วไป สามารถแบ่งยางตามค่าความหนืดดังนี้ได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- ยางเกรดที่ความหนืดต่ำถึงปานกลาง โดยมีค่าความหนืดที่ 100 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 25 ถึง 60

- ยางเกรดที่ความหนืดปานกลางถึงสูง โดยมีค่าความหนืดที่ 125 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 60 ถึง 100

- ยางเกรดที่ความหนืดสูงมาก โดยมีค่าความหนืดที่ 125 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 100 ถึง 200

ยางเกรดที่มีความหนืดต่ำแม้ว่าจะสามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย แต่ยางจะมีความสามารถรับ สารตัวเติมได้ในปริมาณปานกลางเท่านั้นจึงเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูก

ยางเอทธิลีนโพรพิลีนมอนอเมอร์และเอทธิลีนโพรพิลีนไคอินมอนอเมอร์มีความหนาแน่น ที่อุณหภูมิห้องค่อนข้างต่ำกว่ายางชนิดอื่นๆ ประมาณ 0.86-0.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมี ค่าของอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ -60 องศาเซลเซียส

ความยืดหยุ่น (Elasticity) ของเอทธิลีนโพรพิลีนไคอินมอนอเมอร์มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายาง สังกะหรณ์ชนิดอื่นๆ แต่ยังคงต่ำกว่ายางธรรมชาติ

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในสายโซ่โพลิเมอร์เป็นแบบไม่มีรูปแบบ ทำให้ได้พอลิเมอร์แบบอสัณฐาน ภายนอกนี้จึงไม่สามารถคลิกได้ ส่งผลให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ ต้องอาศัยการเติมสารตัวเสริมแรงเข้ามาช่วย โดยค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้รับการเสริมแรงจะสูงหรือต่ำมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้

ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) เมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมที่เหมาะสม ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ ภายนอกนี้จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

ความสามารถการอัดตัว (Compression Set) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์มีค่าความสามารถการอัดตัวต่ำมาก โดยเฉพาะในยางเกรดที่มีเอทิลไดอีน นอเบอร์ในปริมาณที่สูง และได้รับการคงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์หรืออาจคงรูปด้วยระบบกำมะถันที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความว่องไวสูงๆ แต่ว่าค่าความสามารถการอัดตัวของยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความสามารถการอัดตัวของยางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถันจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์มีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมากและมีความทนทานต่อความล้าสูง โดยเฉพาะในยางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบกำมะถัน

ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging Properties) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์มีพันธะคู่ในโพลิเมอร์น้อยมาก ดังนั้น ภายนอกนี้จึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพอากาศออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ ยังทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสารเคมี กรด และด่างได้ดีอีกด้วย ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณไดอีนที่มีอยู่ในโพลิเมอร์ ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์เกรดที่มีไดอีนต่ำจะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูง (จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ) แต่ว่าในยางเกรดที่มีไดอีนค่อนข้างสูง อาจจำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและแสงแดดลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม ภายนอกนี้ทุกเกรดมีความทนทานต่อโอโซนดีมาก จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันโอโซนลงไป ส่วนระบบการคงรูปก็มีผลกระทบโดยตรงต่อความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนของยาง เพราะยาง

ที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงกว่าที่คงรูปด้วยกำมะถัน

ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and Chemical Resistance) จากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล จะเห็นว่ายางเอทิลีน โพรพิลีนมอนอเมอร์และยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์เป็นยางไม่มีขี้ผึ้ง ดังนั้น ยางจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือ ตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง (เช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตาไดอิน) แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้งได้ดี ยางชนิดนี้จึงทนต่อกรด ค้าง แอลกอฮอล์ น้ำ น้ำมันไฮดรอลิก และตัวทำละลายที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้เป็นอย่างดี มีความทนทานต่อน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อตัวทำละลายที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ กรดอินทรีย์เข้มข้น ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนวงแหวน เป็นต้น

ความเป็นฉนวน (Insulation) ยางชนิดนี้มีค่าความต้านไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้น ยางจึงมีความฉนวนสูงและยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นฉนวนได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูงๆ นอกจากนี้ ยางชนิดนี้ยังดูดซึมน้ำได้น้อยมาก จึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตยางหุ้มสายเคเบิลในกรณีที่สายเคเบิลนั้นต้องสัมผัสกับน้ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางเอทิลีน โพรพิลีนมอนอเมอร์กับยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์ พบว่ายางเอทิลีน โพรพิลีนมอนอเมอร์มีความเป็นฉนวนสูงกว่ายางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์เล็กน้อย

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Flexibility) ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์มีสมบัติด้านการหักงอที่อุณหภูมิต่ำได้ดีใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

อุณหภูมิของการใช้งาน (Service Temperature) ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์ที่ได้รับการคงรูปด้วยกำมะถันจะมีอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานต่ำกว่ายางที่ได้รับการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ โดยทั่วไป ยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์สามารถนำไปใช้ได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส ปกติยางจะทนต่ออุณหภูมิที่ 165 องศาเซลเซียส ได้นาน 1 เดือน หรือที่ 125 องศาเซลเซียส ได้นาน 1 ปี และที่ 100 องศาเซลเซียส ได้นาน 5 ปี ทั้งนี้สมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น การเลือกใช้ชนิดของสารป้องกันเสื่อมสภาพและปริมาณของไดอินในยาง เป็นต้น

ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตยางขึ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางขอบประตู แก้มยางรถยนต์ ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์ยังถูกใช้ในการผลิตท่อยางของเครื่องซักผ้า สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา ฉนวนหุ้มสายเคเบิล (โดยเฉพาะที่มีความต่างศักย์สูงๆ) และใช้ในการผสมกับพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก เช่น เพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น โดยสรุปคุณสมบัติของยางชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบสมบัติของยาง

สมบัติ	ชนิดของยาง							
	NR	IR	SBR	BR	NBR	CR	IIR	EPDM
ความทนต่อแรงดึง (ไม่มีสารเสริมแรง)	1	2	5	6	5	3	4	5
ความทนต่อแรงดึง (มีสารเสริมแรง)	1	2	2	4	2	2	3	3
ความต้านทานต่อการขีดถู (มีสารเสริมแรง)	4	4	3	1	2	3	4	3
ความทนต่อการฉีกขาด	2	2	3	5	3	2	3	3
การกระเดิงตัว	2	2	3	1	3	3	6	3
ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ	2	2	3	2	3	3	2	2
ความทนต่อความร้อน	5	5	4	4	3	3	3	2
การยืดตัวสูงสุด	1	1	2	3	2	2	2	3
ความทนต่อการเกิดออกซิเดชัน	4	4	3	2	3	2	2	1
ความทนต่อแสง UV	4	4	3	3	3	2	2	1
ความทนต่อโอโซนและสภาพอากาศ	4	4	4	3	3	2	2	1
ความทนต่อน้ำมัน	6	6	5	6	1	2	6	4
ความทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิง	6	6	6	6	2	3	6	5
ความทนต่อกรด	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนต่อด่าง	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนต่อการติดไฟ	6	6	6	6	6	2	6	6
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	1	1	2	2	5	4	2	2
การซึมผ่านก๊าซ	5	5	4	4	2	3	1	4

1 = ดีมาก, 6 = ต่ำสุด

ที่มา: พงษ์ธร (2548)

### 3. สมบัติไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelasticity), ไพโรจน์ และ ศิระ (2553)

วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก คือ วัสดุที่สามารถนิยามความเค้นของวัสดุในรูปของฟังก์ชันกำลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงและสมการคอนสตีติวทิฟ ที่แสดงพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ที่สามารถหาค่าความเค้นจากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันกำลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง

#### 3.1 แบบจำลองฟังก์ชันกำลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Strain Energy Function)

การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ (Polymer) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยแบบจำลองของวัสดุนี้จะแตกต่างจากแบบจำลองของวัสดุทั่วไปซึ่งเรียกพฤติกรรมของวัสดุประเภทนี้ว่า ไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) วัสดุที่มีพฤติกรรมลักษณะนี้จำเป็นต้องหาสมการความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Stain Energy Function,  $W$ ) ดังสมการ (1)

$$W = W(U) \quad (1)$$

โดย  $W$  = ความหนาแน่นของพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Stain Energy Function)

$U$  = เทนเซอร์ระยะยืด (Stretch Tensor)

โดยเทนเซอร์ระยะยืด มีลักษณะเป็นเมทริกซ์แนวทแยง (Diagonal Matrix) ประกอบไปด้วย  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  และ  $\lambda_3$  เป็นระยะยืดในทิศทางตามแนวแกนหลัก  $x$ ,  $y$ ,  $z$  สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic Material) พลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสามารถเขียนให้อยู่ในรูป ฟังก์ชันสมมาตร (Symmetric Function) ของ  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  และ  $\lambda_3$  ได้ตามสมการ (2)

$$w = w(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (2)$$

โดย  $\lambda_1$  = ระยะยืดในทิศทางตามแนวแกน x

$\lambda_2$  = ระยะยืดในทิศทางตามแนวแกน y

$\lambda_3$  = ระยะยืดในทิศทางตามแนวแกน z

โดยความสัมพันธ์ระหว่าง  $\lambda$  กับ  $\varepsilon$  ก็เป็นดังสมการ (3)

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \square L}{L_0} = 1 + \varepsilon \quad (3)$$

โดย  $L$  = ขนาดชิ้นงานหลังถูกแรงกระทำ

$L_0$  = ขนาดชิ้นงานก่อนถูกแรงกระทำ

$\square L$  = ขนาดชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง

$\varepsilon$  = ค่าความเครียด

ความสัมพันธ์ของระยะยืดตามแนวแกนหลักใดๆ  $\lambda_i$  กับแรงต่อพื้นที่  $f_i$  ในกรณีวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic Material) ฟังก์ชันพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงแสดงได้ตามสมการ (4)

$$f_i = \frac{\partial w}{\partial \lambda_i} \quad (4)$$

โดย  $f_i$  = แรงกระทำพื้นที่

โดยพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง  $W$  เป็นฟังก์ชันของสเตรนอินวาเรียนท์ (Strain Invariants) ดังสมการ (5) - (8)

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (5)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (6)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (7)$$

โดย  $I_i$  = ฟังก์ชันของสเตรนอินวาเรียนท์ (Strain Invariants)

หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูป

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (8)$$

ในกรณีที่พิจารณาเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) ทำให้สามารถสรุปได้ดังสมการ (9)

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{(v + \square v)}{v} = 1 \quad (9)$$

โดย  $J$  = อัตราส่วนเชิงปริมาตร

$v$  = ปริมาตร

จากสมการที่ (7) และ (9) สรุปได้ดังสมการ (10)

$$I_3 = J^2 = 1 \quad (10)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสามารถเขียนในรูปสมการ (11)

$$W = W(I_1, I_2) \quad (11)$$

ความเค้นหลักเคาซี (Cauchy Principle Stress) ซึ่งเป็นแรงต่อพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลง (Strained Area) สามารถอธิบายได้จากสมการ (12)

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} f_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} + \sigma \quad (12)$$

โดย  $\sigma_i$  = ความเค้นหลักเคาซี

### 3.2 แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material Model)

ฟังก์ชันพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปร่าง  $W$  เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) แบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model) พัฒนามาจากความสัมพันธ์ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปเมื่อไม่พิจารณาถึงโครงสร้างภายในโมเลกุล กลุ่มที่สองเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพ (Physical Based Model) เป็นการพัฒนามาจากกลไกโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ ทฤษฎีจลน์ศาสตร์ (Kinetic Theory) หรือทฤษฎีกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics Theory) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุพอลิเมอร์จะมีความเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงทางเอนโทรปี (Entropy)

#### 3.2.1 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model)

เป็นแบบจำลองที่อ้างอิงกับข้อมูลการทดสอบ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนี้จะไม่มีความหมายทางกายภาพ แต่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการปรับแบบจำลองให้เข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหรือการทำนายพฤติกรรมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์การจำลองพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุในลักษณะนี้มีข้อดีคือ มีความแม่นยำในช่วงที่มีข้อมูลทดลอง แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้สมการดังกล่าวทำนายพฤติกรรมในลักษณะที่ไม่มีข้อมูลทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบวัสดุในหลาย ๆ ลักษณะเพื่อใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมให้มีความถูกต้องมากที่สุด

### 3.2.1.1 แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model)

ฟังก์ชันพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Strain Energy Function) สำหรับวัสดุที่มีสมบัติไอโซโทรปิกและไม่สามารถอัดตัวได้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมของค่าที่ไม่ผันแปรของเทนเซอร์การเสียรูปได้ดังสมการ (13) มักใช้ในกรณีวัสดุรับแรงกระทำแบบแรงดึงที่ระยะยืดไม่เกิน 300%

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (13)$$

โดยที่  $C_{ij}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

จากสมมติฐานที่กำหนดให้ยางเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ ดังนั้น  $I_3 = 1$  จากสมการ (13) แบบจำลองพหุนามจึงลดรูปเป็นสมการ (14)

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (14)$$

เมื่อ,  $N = 2$  จะได้ดังสมการ (15)

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{02} (I_2 - 3)^2 \quad (15)$$

สมการข้างต้นเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้เนื่องจากจำนวนเทอมที่ใช้มีความเหมาะสมประกอบด้วยเทอมของ First Invariant,  $I_1$  และ Second Invariant,  $I_2$

3.2.1.2 แบบจำลองมูนีรีฟลิน (Mooney Rivlin Model) โดยมีรูปแบบดังสมการ (16)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (16)$$

เป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบจำลองสมการเดียวกับแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้เป็นอันดับที่ 1 ( $N=1$ ) แบบจำลองชนิดนี้ทำนายพฤติกรรมของพอลิเมอร์ได้ไม่ชัดเจนนัก โดยสาเหตุที่แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 1 ทำนายพฤติกรรมของวัสดุผิดพลาดนั้น เนื่องจากจำนวนเทอมของแบบจำลองมีน้อยเกินไป ทำให้แบบจำลองนี้สามารถนำไปอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ในช่วงที่การยืดตัวไม่สูงมาก มักใช้ในกรณีวัสดุรับแรงกระทำแบบแรงดึงที่ระยะยืดไม่เกิน 100% และจะไม่นำมาใช้พิจารณาแรงแบบแรงกด

3.2.1.3 แบบจำลองอ็อกเดน (Ogden Model) โดยมีรูปแบบดังสมการ (17)

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[ J^{\frac{-\alpha_n}{3}} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3 \right] + 4.5K \left( J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 \quad (17)$$

ข้อแตกต่างของแบบจำลองอ็อกเดน เมื่อเทียบกับแบบจำลองพหุนามคือ เลขยกกำลังไม่จำเป็นต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม จึงสามารถปรับให้เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูล และเนื่องจากเลขยกกำลังของแบบจำลองอ็อกเดนสามารถเป็นเลขจำนวนจริงใดๆ ก็ได้ ทำให้แบบจำลองนี้อาจจะเกิดการสั่นไหว (Oscillate) เมื่อมีอันดับสูงขึ้น  $N \geq 3$  แบบจำลองอ็อกเดนเขียนอยู่ในรูปแบบผลรวมของอัตราส่วนการยืดตัว ทำให้การใช้งานมีความยุ่งยากและสามารถหาค่ามอดูลัสของการเลื่อนได้เป็นดังสมการ (18)

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (18)$$

แบบจำลองอ็อกเดนที่นิยมใช้กันคือแบบจำลองอ็อกเดนอันดับที่ 3 ( $N = 3$ ) มักใช้ในกรณีวัสดุรับแรงกระทำแบบแรงดึงที่ระยะยืดไม่เกิน 700% และแบบแรงเฉือนที่ระยะยืดไม่เกิน 700%

### 3.2.2 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (Physical Based Model)

เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปลักษณะอื่น ๆ ที่ไม่ได้มีผลการทดลองมาก่อน เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกตจะอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองมาทำนายพฤติกรรมจากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาแบบจำลองที่นำความรู้ด้านกลไกการเสียรูปและการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ดังนั้น แม้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีไม่เพียงพอ แต่แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพสามารถทำนายพฤติกรรมในช่วงที่ไม่มีข้อมูลได้

3.2.2.1 แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo Hookean Model) โดยมีรูปแบบดังสมการ (19)

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (19)$$

แบบจำลองนี้มีค่าคงที่  $C_{10}$  ซึ่งเป็นมอดูลัสของการเฉือน (Shear Modulus) มักใช้ในกรณีวัสดุรับแรงกระทำแบบแรงดึงที่ระยะยืดไม่เกิน 40% และแบบแรงเฉือนที่ระยะยืดไม่เกิน 90%

3.2.2.2 แบบจำลองอรรูดาบอยซ์ (Arruda Boyce Model) โดยมีรูปแบบดังสมการ (20)

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (20)$$

โดยที่  $C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750}$

$\mu$  = มอดูลัสการเฉือน (Shear Modulus) ที่ความเครียดต่ำ

$\lambda_m$  = เป็นการลือคตัวของระยะยืด

แบบจำลองนี้เรียกอีกอย่างว่า แบบจำลอง Eight Chain Model เนื่องจากพิสูจน์มาจากทฤษฎี Non – Gaussian Network ที่กำหนดให้มีสปริง 8 อันเชื่อมต่อกันที่จุดศูนย์กลางของอิเลเมนต์รูปลูกบาศก์ (Cubic Element) ค่าคงที่ได้มาจากการขยายอนุกรมของ Inverse Langevin Function จากรูปแบบของสมการในทฤษฎีข้างต้นสามารถนำค่าคงที่มาใช้ได้มากกว่า 5 เทอมที่กล่าวมา แต่มีนักวิจัยหลายคนพบว่าเทอมที่เหลือส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุนี้เล็กน้อย จึงสามารถพิจารณาตัดออกได้ มักใช้ในกรณีวัสดุรับแรงกระทำแบบแรงดึงที่ระยะยืดไม่เกิน 300%

3.2.2.3 แบบจำลองวานเดอวาลส์ (Van Der Waals Model) โดยมีรูปแบบดังสมการ (21)

$$w = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta)\eta] - \frac{2}{3} a \left( \frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^2 \right\} \quad (21)$$

โดย

$$\tilde{I} = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$$

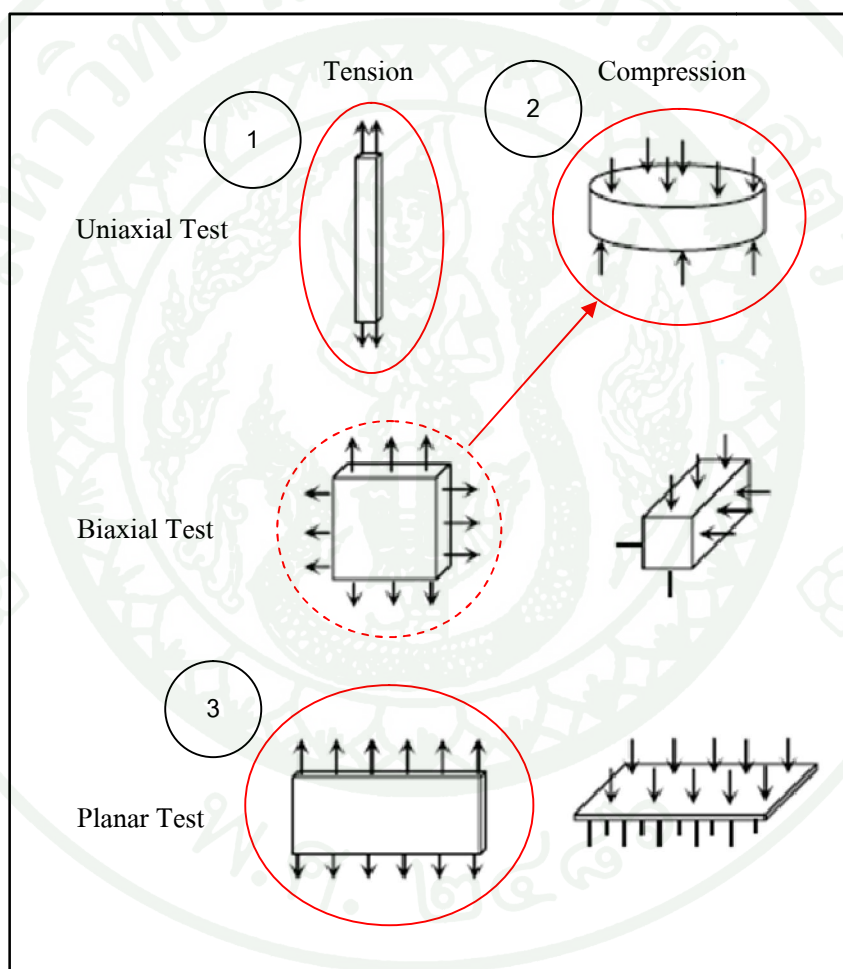
$$a = \frac{1}{\lambda_m - \frac{1}{\lambda_m^2 + \frac{2C_{01}}{3\mu}}} \quad \text{คือ Global Interaction Parameter}$$

$$\beta = \text{Invariant Mixture Parameter}$$

แบบจำลองวานเดอวาลส์มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แบบจำลองคิลเลียน (Kilian Model) แบบจำลองนี้แตกต่างจากแบบจำลองอื่นตรงที่มีค่า Locking Stretch ( $\lambda_m$ ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงข้อจำกัดในการยืดตัวของโครงข่ายต่อโยงแบบ Non Gaussian จากโครงสร้างสมการจะเห็นว่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงของวานเดอวาลส์ มีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าไม่จำกัด (Infinity) ดังนั้น แบบจำลองชนิดนี้จึงไม่สามารถอธิบายการดึงที่มีระยะยืดสูงกว่า  $\lambda_m$  ได้ ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน

#### 4. การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานสะสม ในการเปลี่ยนรูปทรง ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยนำชิ้นงานทดสอบ มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และอัตราการยืดตัวของยางในลักษณะการทดสอบแบบต่างๆดังแสดงในภาพที่ 3 โดยความสัมพันธ์เหล่านี้จะถูกนำมากำหนดพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 3 ลักษณะการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

ที่มา: Axel Products (2004)

จากการทดสอบวัสดุเชิงกลในลักษณะต่างๆ การทดสอบที่ใช้กำหนดพฤติกรรมของวัสดุ ประกอบด้วย การทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบแบบแรงดึงในหลายแนวแกน และการทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบ และเนื่องจากวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกส่วนใหญ่มีสมบัติการอัดตัวไม่ได้สูง ทำให้ไม่จำเป็นต้องทดสอบสมบัติของการอัดตัว และเมื่อชิ้นงานได้รับแรงในลักษณะ Hydrostatic Load จะพบว่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เมื่อแรงหรือความเค้นเปลี่ยนไปทำให้สามารถเทียบเท่าพฤติกรรมจากการทดสอบลักษณะต่างๆ

เนื่องจากการทดสอบแบบแรงดึงในหลายแนวแกน (Biaxial Tension) ในประเทศไทยยังไม่มีเครื่องที่ใช้ในการทดสอบดังกล่าวได้ นักวิจัยจึงได้ทำการทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression) แทน เนื่องจากการทดสอบทำได้ง่ายกว่าและผลการทดสอบทั้งสองอย่างสามารถทดแทนกันได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (22) และ (23)

$$\sigma_c = \sigma_b \times (1 + \epsilon_b)^3 \quad (22)$$

$$\epsilon_c = \frac{1}{(\epsilon_b + 1)^2} - 1 \quad (23)$$

ดังนั้นการทดสอบที่จำเป็นในการกำหนดพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกจึงประกอบด้วย การทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบแบบแรงดึงในหลายแนวแกน และการทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียว โดยมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

#### 4.1 การทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tension)

สำหรับการทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียวดังภาพที่ 4 ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ASTM D412-80 ชิ้นงานอยู่ในรูปของชิ้นงานทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว (Dumbbell Specimen) จะถูกดึงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยอัตราการดึงคงที่ 500 มิลลิเมตรต่ออนาที ค่าความเค้นและอัตราการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงดึงเปลี่ยนไป



ภาพที่ 4 แสดงการทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียว

ที่มา: Axel Products (2004)

#### 4.2 การทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียว

การทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียวดังภาพที่ 5 ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ASTM D 395-78 ชิ้นงานอยู่ในรูปของกระบอกสูบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร จะถูกนำมาทดสอบด้วยแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยอัตราการอัดคงที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีผิวของหัวกดชิ้นงานเป็นโครเมียม และใช้สารหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานและหัวกดเพื่อลดแรงเสียดทานให้เหลือน้อยที่สุด ค่าความเค้น และอัตราการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงอัดเปลี่ยนไป

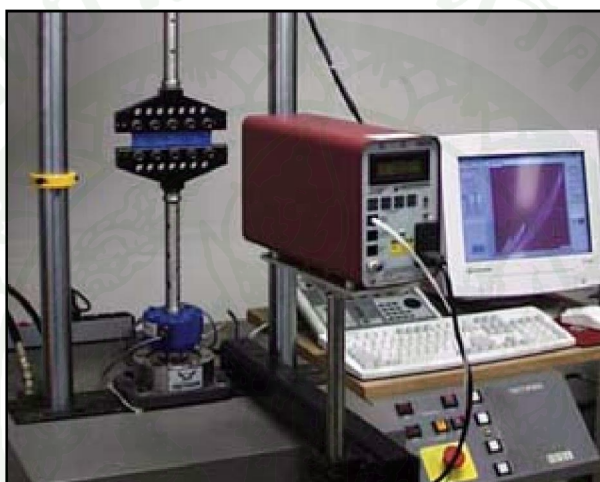


ภาพที่ 5 แสดงการทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียว

ที่มา: Axel Products (2004)

#### 4.3 การทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบ

ในการทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบดังภาพที่ 6 ชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่นบางด้านที่รับแรงดึงมีความยาวของชิ้นงานมากกว่าความกว้างไม่น้อยกว่า 10 เท่า ในการทดสอบนี้ใช้ชิ้นงานด้านที่รับแรงยาว 200 มิลลิเมตร ความกว้าง 20 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร โดยนำมาทดสอบด้วยแรงดึงด้วย เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยอัตราการอัดคงที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความเค้นและอัตราการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงดึงเปลี่ยนไป

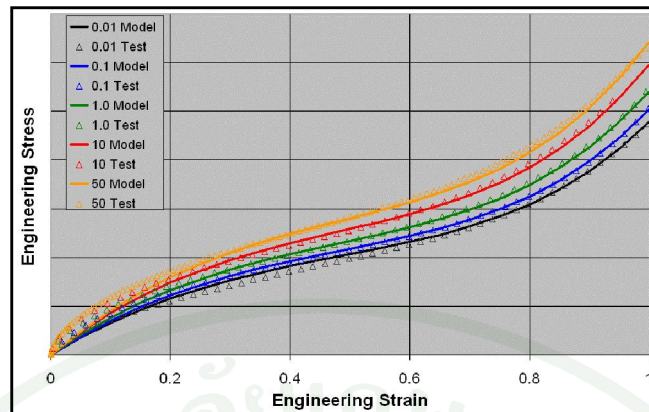


ภาพที่ 6 แสดงการทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบ

ที่มา: Axel Products (2004)

#### 4.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง

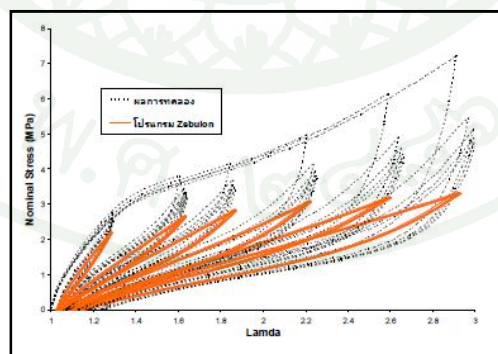
Dalrymple et al. (2007) ทำการทดสอบหาสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก ในรูปของความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยงานวิจัยนี้จะเสนอการทดสอบการพัฒนาตัวอย่างของข้อมูลการทดสอบวัสดุ รูปแบบวัสดุและผลตอบสนองรูปแบบวัสดุ โดยนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบค่าสมบัติของวัสดุที่ได้จากสมการจำลองพฤติกรรมยางแบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model) ดังภาพที่ 7 ค่าการทดสอบชิ้นงานและค่าการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถเป็นแนวทางเพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์จำลองพฤติกรรมยางต่อไป



ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic)

ที่มา: Dalrymple et al. (2007)

รพีภัทร์ และ บรรพต (2550) ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก โดยได้ทำการทดสอบแรงดึงของวัสดุประเภทยางเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์ของโปรแกรม Zebulon ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงเป็นดังภาพที่ 8 จากผลการทดสอบพบว่าเส้นกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดไม่ซ้ำแนวเดิมในแต่ละวงรอบ เนื่องจากในแต่ละวงรอบจะมีการปล่อยพลังงานออกมาในขณะที่ยางคืนตัวเรียกว่า ผลกระทบของของเหลวหนืด (Mullin's Effect) ซึ่งในการทดสอบหาค่าสมบัติทางกายภาพของยางจำเป็นต้องจัดผลกระทบของของเหลวหนืดก่อนทำการบันทึกค่าการทดสอบ



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์

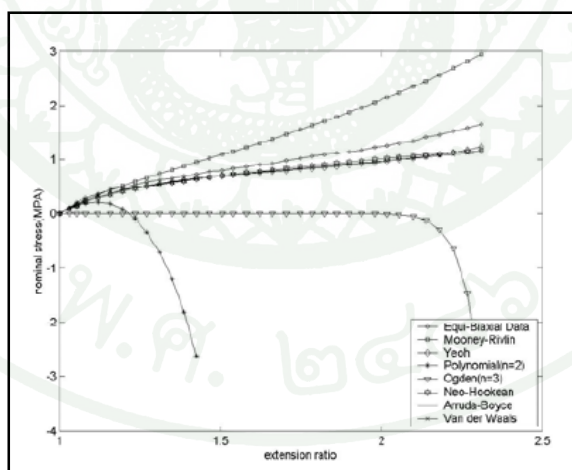
ที่มา: รพีภัทร์ และ บรรพต (2550)

ณัฐวิทย์ และ อริสรา (2547) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบสองแกนของวัสดุประเภทยาง โดยแนวทางการทำวิจัยได้ทำการสร้างชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบแรงดึงสองแกนเท่ากันสำหรับขึ้นทดสอบแบบแผ่น (ภาพที่ 9) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่หาได้จากการทดสอบแบบดึงแกนเดียวไม่สามารถที่จะอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทยางที่ใช้ในการศึกษาภาวะความเค้นแบบดึงสองแกนได้ ซึ่งผลการเปรียบเทียบเป็นดังภาพที่ 10 และ 11



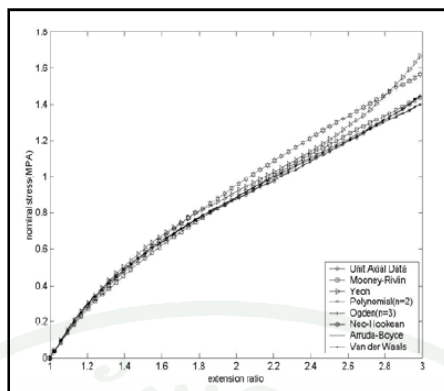
ภาพที่ 9 แสดงชุดอุปกรณ์ในการทดสอบแรงดึงสองแกนเท่ากันสำหรับขึ้นทดสอบแบบแผ่น

ที่มา: ณัฐวิทย์ และ อริสรา (2547)



ภาพที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากันกับผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียว

ที่มา: ณัฐวิทย์ และ อริสรา (2547)



ภาพที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากับผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงสองแกน

ที่มา: ญัฐวิทย์ และ อริสรา (2547)

## 5. การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง

การออกแบบชิ้นงานเราต้องพิจารณาถึงความเค้นและความเครียดที่เกิดภายในชิ้นงาน โดยค่าของความเค้นและความเครียดต้องไม่มากกว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย โดยอธิบายดังต่อไปนี้

### 5.1 ความเค้น (Stress)

คือ แรงที่กระทำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกระทำนั้นๆ ความเค้นแบ่งเป็น 3 ชนิด

#### 5.1.1 ความเค้นฉาก (Normal Stress) โดยมีรูปแบบดังสมการ (25)

คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ที่รับแรงกระทำ และมีแรงกระทำแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แรงกดและแรงดึงดังภาพที่ 12 โดยมีรูปแบบดังสมการ (25)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (24)$$

โดย  $\sigma$  = ความเค้นกด ( $\text{N/m}^2$  หรือ Pa)

$F$  = แรงที่กระทำกับพื้นที่ (N)

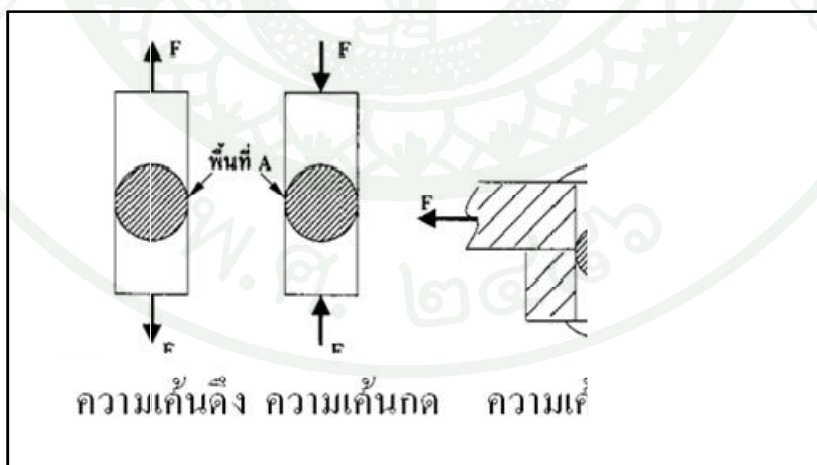
$A$  = พื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ ( $\text{m}^2$ )

### 5.1.2 ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

คือ แรงที่กระทำขนานกับพื้นที่ที่รับแรงกระทำดังภาพที่ 12 โดยมีรูปแบบดัง  
สมการ (25)

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (25)$$

โดย  $\tau$  = ความเค้นเฉือน ( $\text{N/m}^2$  หรือ Pa)



ภาพที่ 12 แรงชนิดต่างๆ

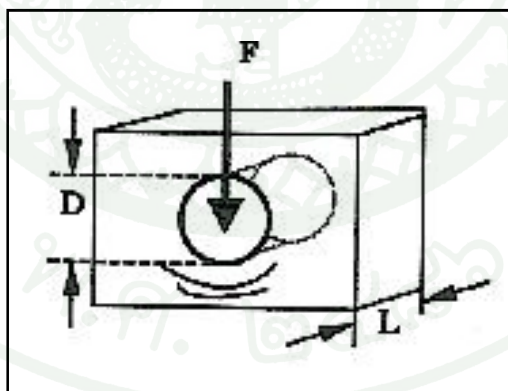
ที่มา: รัชฎงูะ (2548)

### 5.1.3 ความเค้นอัด (Bearing Stress)

คือ แรงกระทำที่กระทำกับพื้นที่ฉาย ส่วนมากจะเป็นลักษณะหมุดยึดดังภาพที่ 13 โดยมีรูปแบบดังสมการ (26)

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{DL} \quad (26)$$

โดย  $\sigma$  = ความเค้นอัด ( $\text{N/m}^2$  หรือ Pa)  
 $F$  = แรงที่กระทำกับพื้นที่ (N)  
 $A$  = พื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ ( $\text{m}^2$ )  
 $D$  = ความกว้างหมุดยึด (m)  
 $L$  = ความยาวหมุดยึดในชิ้นงาน (m)



ภาพที่ 13 ความเค้นอัด

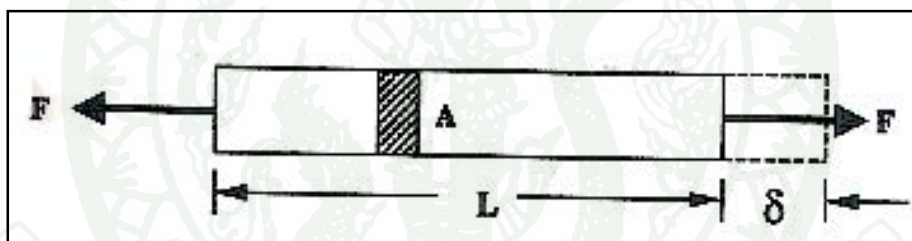
ที่มา: ชาญญะ (2548)

## 5.2 ความเครียด (Strain)

คือ อัตราส่วนระหว่างระยะที่มีการยืดหรือหดตัวกับความยาวเดิมดังภาพที่ 14 โดยมีรูปแบบดังสมการ (27)

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (27)$$

โดย  $\epsilon$  = ความเครียด  
 $\delta$  = ส่วนที่ยืดหรือหด (mm.)  
 $L$  = ความยาวเดิม (mm.)



ภาพที่ 14 ความเครียด

ที่มา: ชาญฤๅ (2548)

## 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

### กฎของฮุก (Hook's Law)

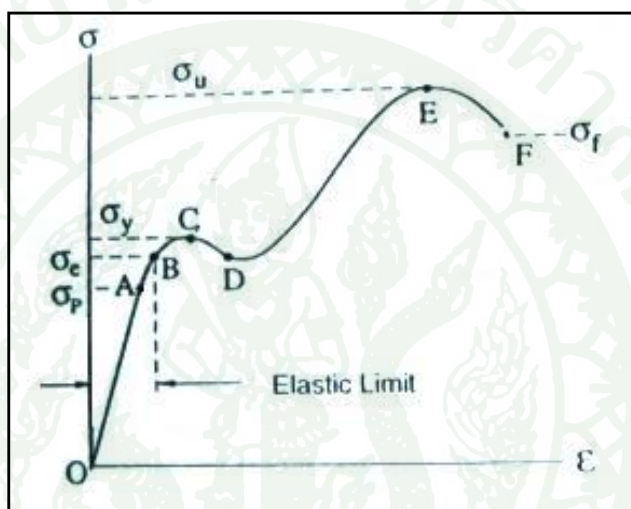
ในช่วงของขีดจำกัดความยืดหยุ่น ค่าความเค้นจะแปรผันตรงกับความเครียด โดยมีค่ายังส์โมดูลัสเป็นค่าคงที่ดังภาพที่ 15 โดยมีรูปแบบดังสมการ (28)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (28)$$

โดย  $\sigma$  = ความเค้น ( $\text{N/m}^2$  หรือ Pa)

$\varepsilon$  = ความเครียด (m/m)

$E$  = ยั่งส์โมดูลัส (Young's modulus,  $\text{N/m}^2$ )



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ที่มา: รัชฎงูะ (2548)

$\sigma_y$  ค่าความแข็งแรงก่อนเสียรูป ซึ่งสามารถพบได้จากตารางปกติของสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้มักจะเป็นความแข็งแรงของวัสดุการออกแบบ

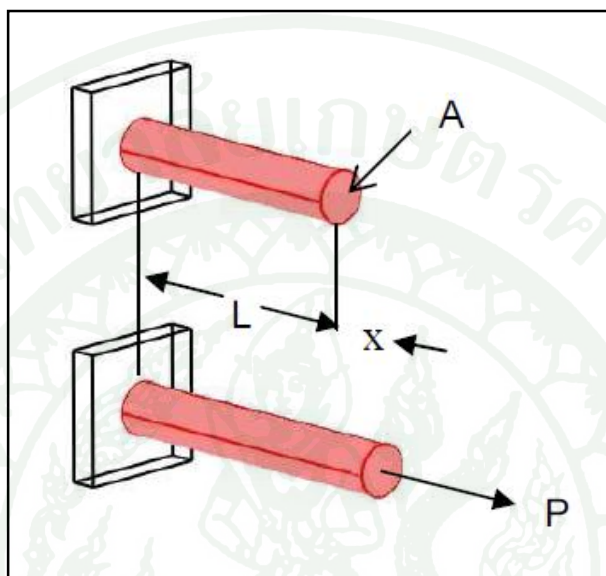
$\sigma_u$  ค่าความแข็งแรงก่อนการฉีกขาด ซึ่งสามารถพบรูปแบบตารางทั่วไปของสมบัติเชิงกลของวัสดุ

OA ชิดจำกัดส่วน ส่วนเส้นตรงที่ความเค้นและความเครียดมีความสัมพันธ์ตรงกัน

OB ส่วนจำกัดการคืนรูป ถ้าเกินส่วนนี้วัสดุจะทำงานยืดถาวรเมื่อนำภาชนะออก

#### 5.4 พลังงานในพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรง (Strain Energy)

เมื่อพิจารณาทรงกระบอกที่มีความยาว  $L$  มีพื้นที่หน้าตัดคงที่  $A$  และถูกยึดกับผนัง  $B$  ซึ่งถูกดึงด้วยแรง  $P$  ในแนวแกน ทำให้มีความยาวเปลี่ยนแปลงไปเป็นระยะ  $x$  ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ภาพประกอบการอธิบายสมการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรง

ที่มา: ธรรมบุญ (2550)

เมื่อเราพิจารณางาน  $dU$  ที่เกิดขึ้นจากแรง  $P$  ที่กระทำให้ทรงกระบอกยาวเป็นระยะ  $dx$  งานที่เกิดขึ้นเราสามารถเขียนได้เป็นดังสมการ (29)

$$dU = Pdx \quad (29)$$

จากสมการที่ (29) เมื่อทำการอินทิเกรต  $dU$  ที่ระยะ  $x=0$  และ  $x=x_1$  จะได้ค่าพลังงานทั้งหมด  $U$  ที่ทำให้ทรงกระบอกมีระยะทางเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ  $x$  ดังสมการ (30)

$$U = \int_0^{x_1} Pdx \quad (30)$$

งานที่เกิดจากแรง  $P$  ที่กระทำกับทรงกระบอกและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของทรงกระบอก เราเรียกพลังงานนี้ว่า Strain Energy ของทรงกระบอก ดังสมการ (31)

$$\text{Strain Energy} = U = \int_0^{x_1} P dx \quad (31)$$

พลังงานในการเปลี่ยนรูปทรงซึ่งเกิดจากการคูณกันของระยะทางกับแรง ดังนั้นในระบบ SI เราจะได้หน่วยของพลังงานพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรงเป็น N.m หรือเรียกว่า Joule (J)

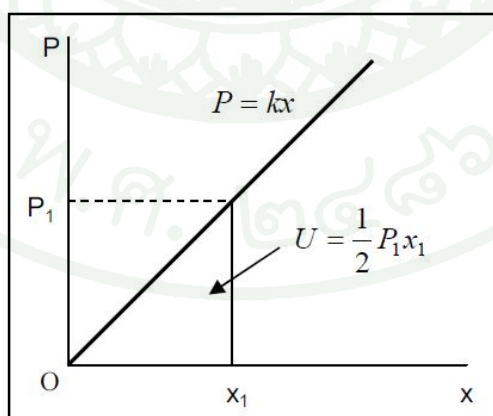
ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงรูปทรงแบบเส้นตรงและยืดหยุ่น ในส่วนของ Load Deformation Diagram จะแสดงให้เห็นถึงเส้น Straight Line ของสมการ  $P = kx$  (ภาพที่ 16) แทน  $P$  ด้วย  $kx$  ลงไปในสมการที่ (31) เราจะได้ดังสมการ (32) และ (33) และสรุปได้ดังภาพที่ 17

$$U = \int_0^{x_1} kx dx = \frac{1}{2} kx_1^2 \quad (32)$$

หรือ

$$U = \frac{1}{2} P_1 x_1 \quad (33)$$

เมื่อ  $P_1$  คือ ค่าของแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรง  $x_1$



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะทาง

ที่มา: ธรรมบุญ (2550)

### 5.5 พลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Strain Energy Density)

จากที่ได้กล่าวมาจาก ภาพที่ 17 ของทรงกระบอกขึ้นอยู่กับระยะ ( $L$ ) และพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) ค่าพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรง ( $U$ ) จากสมการที่ (31) ก็จะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกด้วยเพื่อที่จะกำจัดผลของขนาด ดังนั้นเราจะพิจารณาในเทอมของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Strain Energy Per Unit Volume) โดยการพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรงด้วยปริมาตร  $V = AL$  ซึ่งจากสมการที่ (31) เราจะได้ดังสมการ (34)

$$\frac{U}{V} = \int_0^{x_1} \frac{P}{A} \frac{dx}{L} \quad (34)$$

แสดง  $\left(\frac{P}{A}\right)$  ให้อยู่ในรูปของ Normal Stress ( $\sigma$ ) และ  $\left(\frac{x}{L}\right)$  ในรูปของ Normal Strain, ( $\epsilon$ ) จะได้ดังสมการ (35)

$$\frac{U}{V} = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_x d\epsilon_x \quad (35)$$

เมื่อ  $\epsilon_1$  แสดงถึงค่าของพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรงที่ความยาว  $x_1$  พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร  $\frac{U}{V}$  ถูกแสดงในรูปของพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $u$  ดังสมการ (36)

$$\text{Strain Energy Density} = u = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_x d\epsilon_x \quad (36)$$

Strain Energy Density,  $u$  แสดงในหน่วยของ พลังงานต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้นหน่วยของ Strain Energy Density คือ  $\frac{J}{m^3}$

ถ้า Normal Stress,  $\sigma_x$  ยังคงอยู่ในขอบเขตสัดส่วนของวัตถุ สามารถนำ Hooke's Law มาประยุกต์ใช้ จะได้สมการใหม่เป็นดังสมการ (37)

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (37)$$

แทน  $\sigma_x$  จากสมการที่ (36) ลงในสมการ (35) จะได้ดังสมการ (38)

$$u = \int_0^{\varepsilon_1} E\varepsilon_x d\varepsilon_x = \frac{E\varepsilon_1^2}{2} \quad (38)$$

หรือใช้สมการที่ (38) แสดง  $\varepsilon_1$  ในเทอมของ  $\sigma_1$  จะได้ดังสมการ (39)

$$u = \frac{\sigma_1^2}{2E} \quad (39)$$

## 5.6 ทฤษฎีความเสียหาย

คือ ทฤษฎีที่ช่วยในการออกแบบวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงาน

### 5.6.1 ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

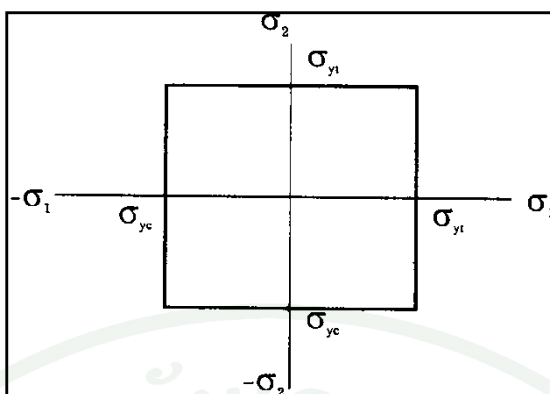
ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นหลักสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับความต้านแรงดึงครากของวัสดุนั้น ดังสมการ (40) และ (41)

พิจารณาจาก

$$\sigma_1 = \pm \frac{\sigma_y}{N} \quad \text{ถ้า} \quad |\sigma_1| > |\sigma_2| \quad (40)$$

$$\text{หรือ} \quad \sigma_2 = \pm \frac{\sigma_y}{N} \quad \text{ถ้า} \quad |\sigma_1| < |\sigma_2| \quad (41)$$

จากสมการ (40) และ (41) ได้ความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

ที่มา: รัชญะ (2548)

#### 5.6.2 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับความต้านแรงเฉือนสูงสุดของวัสดุนั้นๆ ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงเมื่อถึงจุดคราก

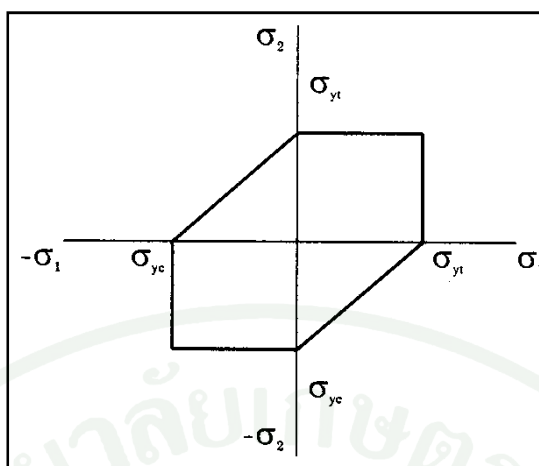
จากกลศาสตร์วัสดุพบว่า ความต้านแรงเฉือนสูงสุดเมื่อได้รับแรงดึงจนถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sigma_y}{2}$  และเกิดบนระนาบเอียงทำมุม  $45^\circ$  กับแนวแรงดึงของชิ้นทดสอบ เพราะฉะนั้นสมการที่ต้องนำมาคิดในการออกแบบ คือ สมการ (42) และ (43)

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \frac{\sigma_y}{2N} \quad (42)$$

ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \frac{\sigma_y}{N} \quad (43)$$

จากสมการ (43) สามารถนำมาสร้างรูปแสดงขอบเขตของความเค้นผสมที่เกิดขึ้นได้ โดยทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ที่มา: รัชญะ (2548)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำนวนมากจะมีสถานะของความเค้นเป็นกรณีพิเศษ ในกรณีนี้ถ้ายอมให้มีความเค้นเฉือนสูง ดังสมการ (44)

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_y}{N} \quad (44)$$

แล้วแทนค่า  $\tau_{\max}$  ลง แล้วจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการ (45)

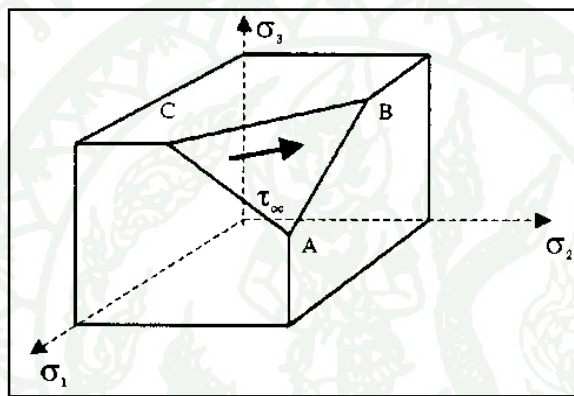
$$\frac{1}{N} = \left[ \left[ \frac{\tau}{\tau_y} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma}{\sigma_y} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (45)$$

โดยที่  $\tau_y = \frac{\sigma_y}{2}$  ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

### 5.6.3 ทฤษฎีความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress)

ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นวอนมิสในวัสดุมีค่าเท่ากับความเค้นวอนมิสที่ได้จากการทดสอบแรงดึงซึ่งขึ้นทดลองขณะจุดคราก

ระนาบวอนมิส (Von Mises Plane) หมายถึง ระนาบที่เอียงทำมุมกับทิศทางของความเค้นหลักทั้งสามเท่ากัน ทิศทางโคไซน์ (Directional Cosine) ของระนาบมีค่าเท่ากับ  $1/\sqrt{3}$  และความเค้นเฉือนบนระนาบนี้เรียกว่า ความเค้นวอนมิส  $\tau_v$  ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ระนาบความเค้นวอนมิส

ที่มา: รัชญะ (2548)

ในกรณีที่ชิ้นส่วนอยู่ภายใต้ความเค้นสามมิติ ค่าความเค้นวอนมิสเป็นดังสมการ (46)

$$\tau_v = \frac{1}{3} \left( (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right)^{1/2} \quad (46)$$

ในการทดสอบแรงดึง ความเค้นหลัก  $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$  เท่ากับศูนย์ และเมื่อถึงจุดคราก ความเค้นหลัก  $\sigma_1 = \sigma_y$  ดังนั้นความเค้นวอนมิสจากสมการ (46) โดยให้  $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$  เท่ากับศูนย์ และ  $\sigma_1 = \sigma_y$  นั้นดังสมการ (47)

$$\tau = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_y = 0.471 \sigma_y \quad (47)$$

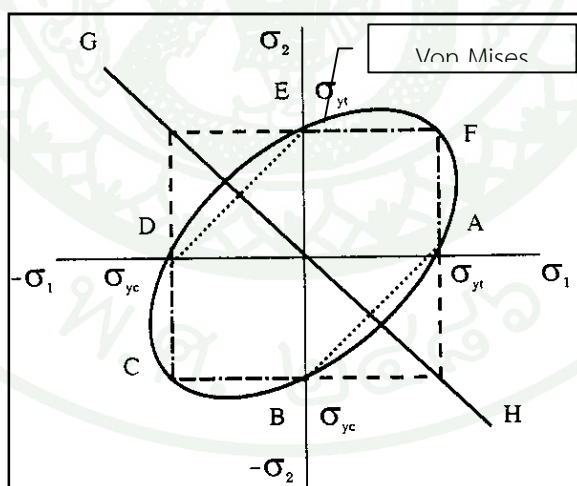
จากทฤษฎีนี้ความเสียหายหรือการคราก จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\tau_v = \tau$  นั้นเป็นดังสมการ (48)

$$\sigma_v = \sigma_y = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2} \quad (48)$$

ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไป มักพิจารณาความเค้นในระบบระนาบสองมิติ ซึ่ง  $\sigma_3 = 0$  จะสามารถจัดรูปสมการ (48) ได้ใหม่ ดังสมการ (49)

$$\left( \frac{\sigma_y}{N} \right)^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (49)$$

ซึ่งสมการ (49) เป็นสมการของรูปวงรี แสดงขอบเขตของความเค้นที่ยอมมีได้ในวัสดุ สำหรับชิ้นงานที่ออกแบบจึงเป็นรูปวงรี ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นของทฤษฎีความเสียหายต่างๆ

ที่มา: รัชญะ (2548)

การเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเสียหายทั้งสามทฤษฎี ดูได้จากภาพที่ 21 ซึ่งพบว่า ถ้าความเค้นภายในชิ้นงานที่รับแรงอยู่ ณ บริเวณจุด A B C D E หรือ F แล้วทฤษฎีทั้งสามจะให้ขนาดของชิ้นงานเท่ากัน แต่ทฤษฎีทั้งสามนี้จะแตกต่างกันมากที่สุดตามแนวแกน GH

เนื่องจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดล้อมรอบพื้นที่ที่น้อยที่สุด ดังนั้นชิ้นส่วนที่คำนวณหาขนาดโดยใช้ทฤษฎีนี้จะมีขนาดโตกว่าที่คำนวณโดยใช้ทฤษฎีอื่นสองทฤษฎี (ยกเว้นที่จุดร่วมกัน)

ถ้าสถานะของความเค้นในกรณีของเพลาส่งกำลังเมื่อแทนค่า  $\sigma$  ลงในสมการที่ (47) แล้วจัดรูปแบบใหม่จะได้ดังสมการ (50) และ (51)

$$\frac{\sigma_y}{N} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2} \quad (50)$$

หรือ

$$\frac{1}{N} = \left[ \left[ \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_y} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma}{\sigma_y} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (51)$$

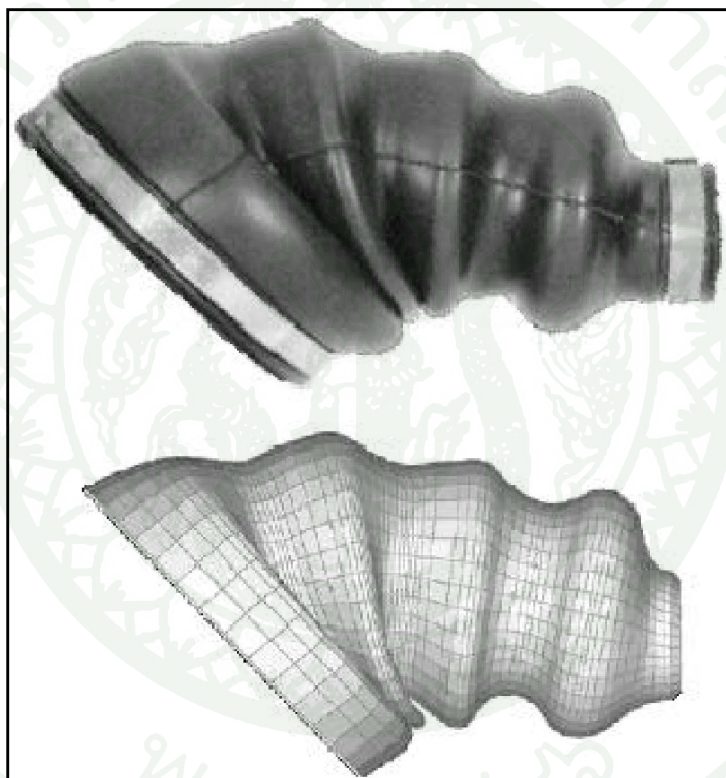
ถ้าให้  $\tau_y = \frac{1}{3}\sigma_y = 0.577\sigma_y$  แล้ว อาจจัดรูปสมการที่ (51) ได้เหมือนกับสมการที่ (45) ดังสมการ (52)

$$\frac{1}{N} = \left[ \left[ \frac{\tau}{\tau_y} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma}{\sigma_y} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (52)$$

นอกจากนี้ยังมีทฤษฎีความเสียหายอื่นๆอีก เช่น ทฤษฎีความเครียดหลักสูงสุด (Maximum Principal Strain Theory) และทฤษฎีพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุด (Maximum Strain Energy Theory) แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

### 5.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเชิงวิศวกรรม

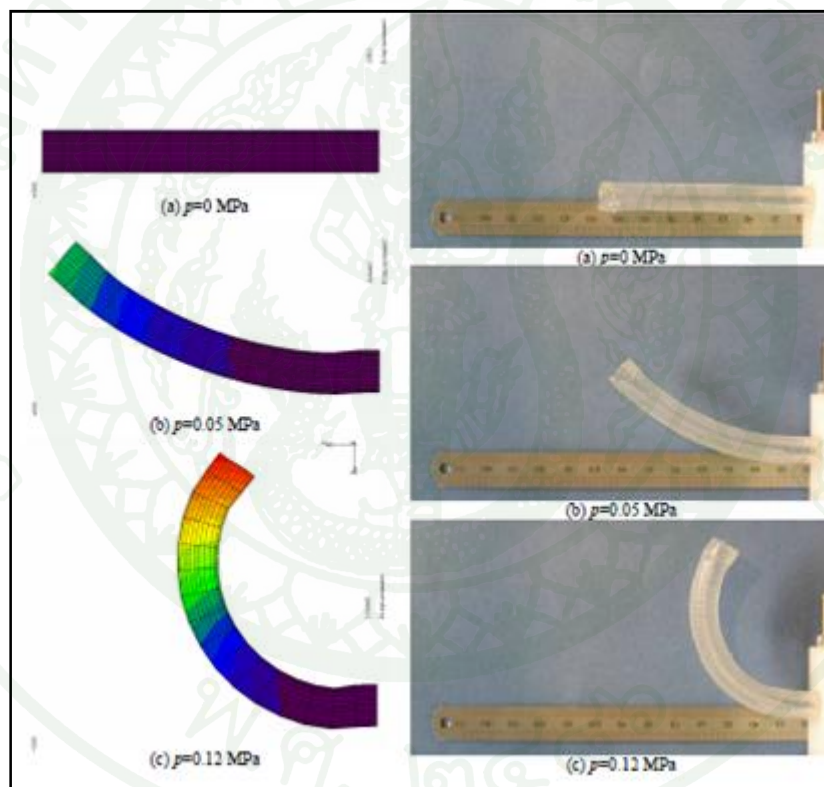
Jaskulski (2005) ทำการศึกษาการวิเคราะห์การเสียรูปเนื่องจากการใช้งานของชิ้นงานยางหุ้มเพลาล้อรถยนต์ด้วยโปรแกรม MSC.Nastran ซึ่งรูปร่างอิลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบอิลิเมนต์แผ่น (Plate Element) ชนิดอิลิเมนต์เป็นแบบเมมเบรน (Membrane Element) โดยเปรียบเทียบกับการเสียรูปจริงที่เกิดจากการใช้งาน และผลการวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นงานยางหุ้มเพลาล้อรถยนต์เปรียบเทียบกับการเสียรูปจริงของชิ้นงานเป็นดังภาพที่ 22 ซึ่งผลที่ได้มีการเสียรูปของชิ้นงานมีความสอดคล้องกัน



ภาพที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบการเสียรูปชิ้นงานกับการจำลองการเสียรูป

ที่มา: Jaskulski (2005)

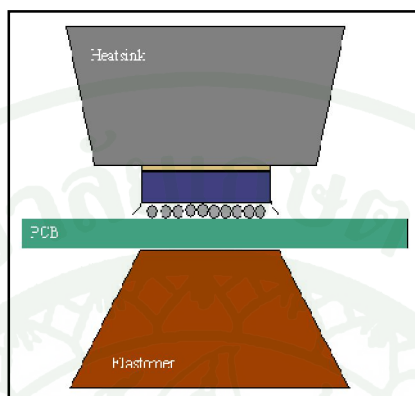
Suzumori et al. (2008) ทำการศึกษาการออกแบบชิ้นงานท่อยางลม (Pneumatic Rubber Actuator) โดยใช้โปรแกรม MSC.Marc ช่วยในการวิเคราะห์การออกแบบชิ้นงานท่อยางลมแบบต่างๆ โดยใช้รูปร่างอิเลเมนต์แบบอิเลเมนต์ 3 มิติ (HEX Element) ชนิดของอิเลเมนต์ที่ใช้เป็นแบบอิเลเมนต์ของแข็ง (Solid Element) ซึ่งใช้การวิเคราะห์การเสถียรของชิ้นงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกแบบโมเดลของชิ้นงานท่อยางลม เมื่อได้แบบที่เหมาะสมแล้วทำการเปรียบเทียบการเสถียรการใช้งานจริงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเมื่อกำหนดภาระด้วยแรงดันลมขนาดต่างๆ ท่อยางลมจะเสถียร และเมื่อนำผลการเสถียรมาเปรียบเทียบกับผลการเสถียรที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ปรากฏว่ามีความสอดคล้องกันดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบชิ้นงานกับผลการจำลองชิ้นงาน

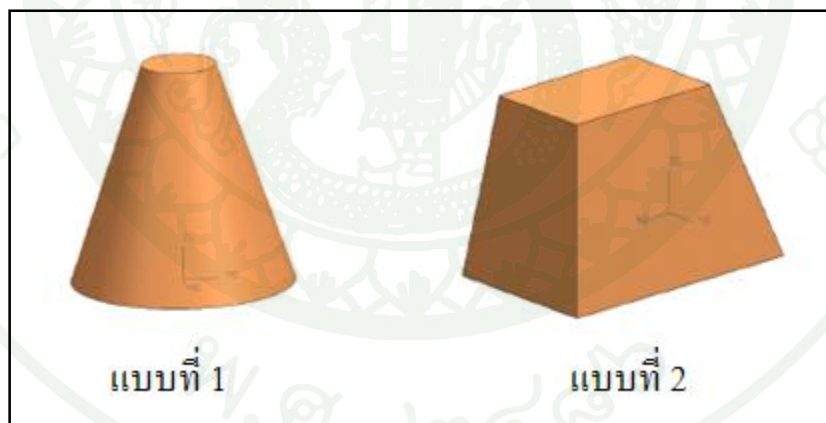
ที่มา: Suzumori et al. (2008)

Dadkhah F. and A. Zahiri (2004) ได้ทำการศึกษาการออกแบบชิ้นงานยางซิลิโคนที่ใช้สำหรับการช่วยรองรับแรงกระแทกในวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ของชิ้นส่วนยานยนต์ดังภาพที่ 24 โดยได้ทำการออกแบบรูปทรงของชิ้นงานซิลิโคนไว้ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 24 การใช้งานของชิ้นงานซิลิโคน

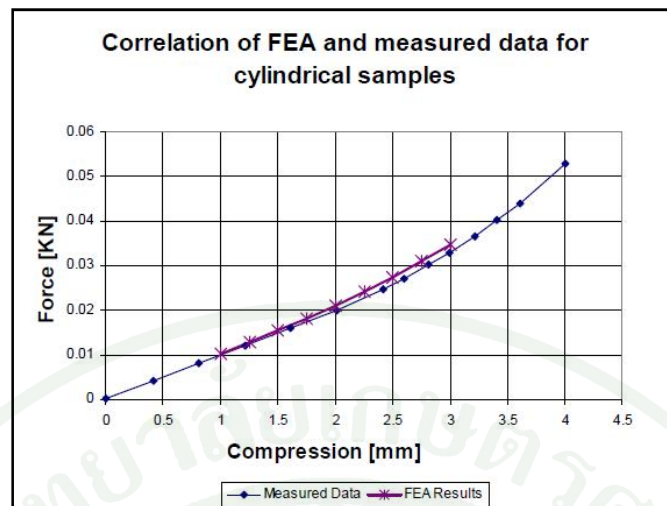
ที่มา: Dadkhah and Zahiri (2004)



ภาพที่ 25 รูปทรงของชิ้นงานซิลิโคน

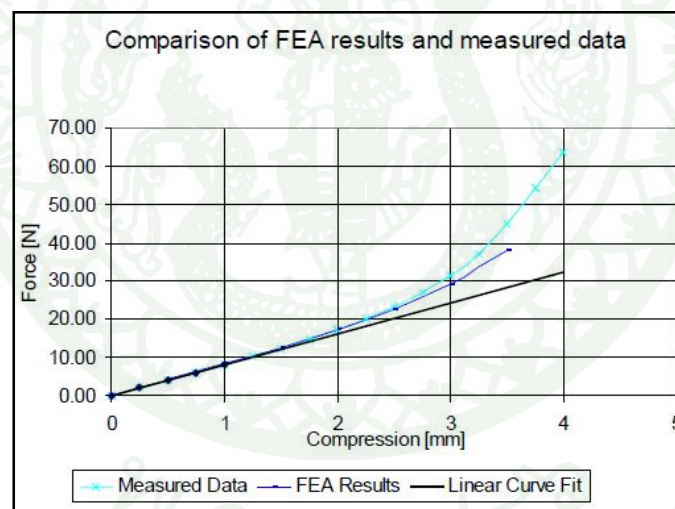
ที่มา: Dadkhah and Zahiri (2004)

โดยผลการเปรียบเทียบการรับแรงของชิ้นงานซิลิโคนแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นดังภาพที่ 26 และ 27 ตามลำดับ



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์แสดงการรับแรงของชิ้นงานแบบที่ 1

ที่มา: Dadkhah and Zahiri (2004)

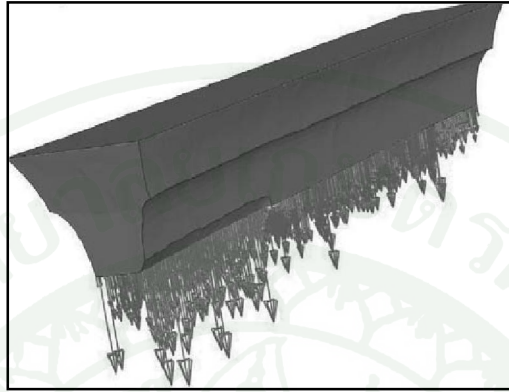


ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์แสดงการรับแรงของชิ้นงานแบบที่ 2

ที่มา: Dadkhah and Zahiri (2004)

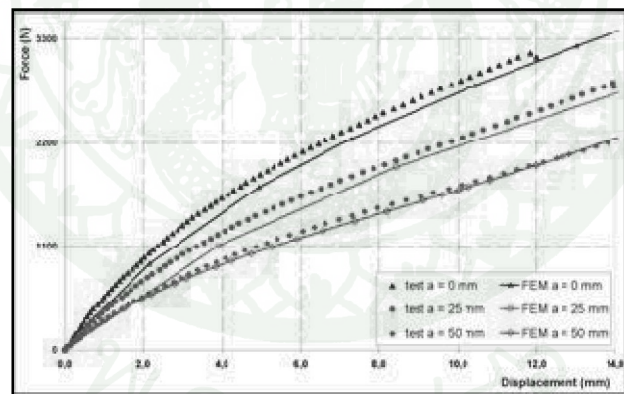
จากการศึกษา แสดงให้เห็นว่าเราสามารถทำนายประสิทธิภาพการใช้งานของชิ้นงาน  
 ยางซิลิโคนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้

Silva Botelho and Bayraktar (2009) ได้ทำการศึกษาการออกแบบ Double Cantilever Beam และใช้วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ช่วยในการวิเคราะห์การเสียหาย ซึ่งผลการเสียหายเป็นดังภาพที่ 28 และ 29



ภาพที่ 28 แสดงลักษณะการรับแรงของ Double Cantilever Beam

ที่มา: Silva Botelho and Bayraktar (2009)

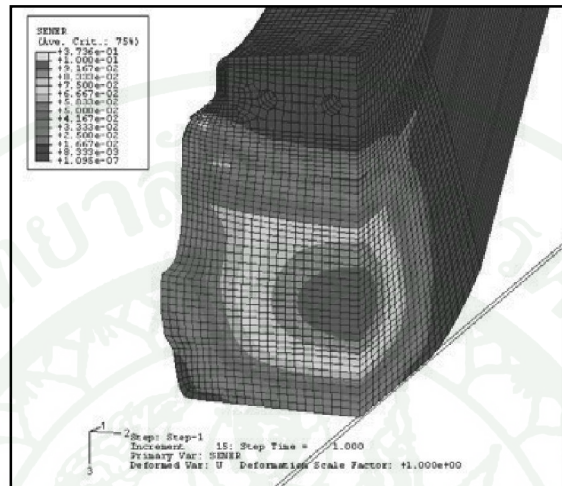


ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลของไฟไนต์อีลิเมนต์

ที่มา: Silva Botelho and Bayraktar (2009)

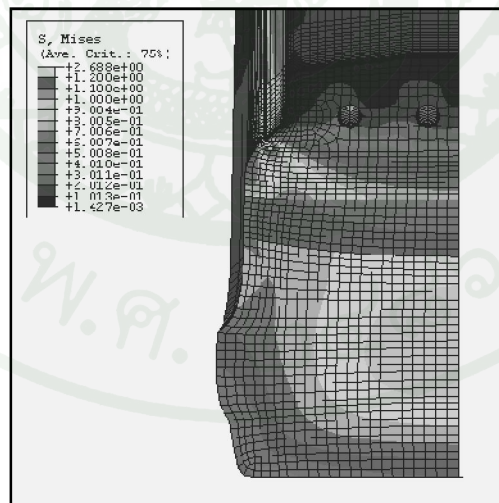
จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถช่วยในการทำนายผลการเสียหายของ Double Cantilever Beam ได้

Suripa and Chaikittiratana (2008) ได้ทำการศึกษาการออกแบบยางแข็ง โดยโปรแกรม ABAQUS ช่วยในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมุ่งวิเคราะห์การเสีรูป พลังงานในการเปลี่ยนรูปทรง และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับยาง โดยผลที่ได้เป็นดังภาพที่ 30 - 32



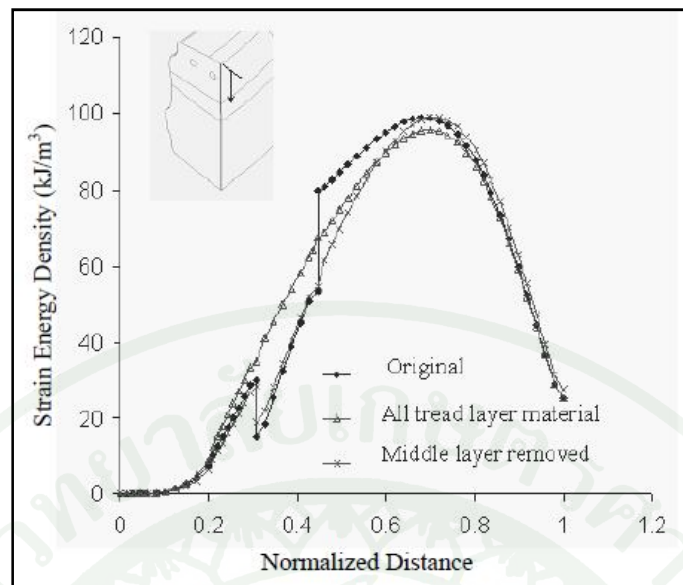
ภาพที่ 30 แสดงค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นกับยาง

ที่มา: Suripa and Chaikittiratana (2008)



ภาพที่ 31 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับยาง

ที่มา: Suripa and Chaikittiratana (2008)



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์การเปรียบเทียบค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นกับยางแบบต่างๆ

ที่มา: Suripa and Chaikittiratana (2008)

จากงานวิจัยนี้ เสนอแนะในการพิจารณาความแข็งแรงของชิ้นงานยางจำเป็นต้องพิจารณาค่าของความเค้น (Stress) และค่าของพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Strain Energy Density)

## 6. ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นระเบียบวิธีการคำนวณชนิดหนึ่งซึ่งได้ นำมาใช้ วิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาและออกแบบงานทางวิศวกรรมกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพราะสามารถลดค่าใช้จ่ายและช่วงเวลาในการออกแบบได้เป็นอย่างมาก หลีกเลี่ยงการลองผิดลองถูกที่เคยใช้กันในอดีตไปโดยเกือบสิ้นเชิง

การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการออกแบบปัญหาต่างๆ จำเป็นต้องมีความรู้ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีของซอฟต์แวร์นั้นบ้างจึงสามารถใช้ได้อย่างถูกต้องและเกิดความมั่นใจในผลลัพธ์ที่ได้ทั้งนี้ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Equations) จะถูกประดิษฐ์ขึ้นจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ที่บ่งบอกสถานภาพความเป็นจริงของปัญหานั้นๆ ปัญหาต่างๆทางวิศวกรรมล้วนมีสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกันเสมอ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้เองที่เป็นหัวใจอันแท้จริงและเป็นจุดเริ่มต้นระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกเหนือจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้นๆ แล้ว ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ของปัญหานั้นด้วย ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ยังขึ้นอยู่กับรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาอีกด้วย

ทั้งสามองค์ประกอบใหญ่ๆ นี้ ซึ่งคือ (1) ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (2) เงื่อนไขขอบเขต ในลักษณะต่างๆ และ (3) รูปร่างของปัญหาที่อาจมีความซับซ้อน สามารถแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นผลให้ระเบียบวิธีนี้ได้รับความนิยมใช้แก้ปัญหากันอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ปัญหาจะสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ได้นั้น หากทราบเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมและรูปร่างของปัญหาที่กำหนดมาให้องค์ประกอบแรกซึ่งคือการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยมักประกอบด้วยสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Derivative) จำนวนหลายสมการ (Coupled Partial Differential Equations) จำนวนสมการในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนี้ขึ้นอยู่กับตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) ของปัญหานั้นๆ การแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนี้เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน อาจกล่าวว่าเป็นไปไม่ได้เลย ดังนั้น ในอดีตจึงมักหลีกเลี่ยงด้วยการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) จัดได้ว่าเป็นระเบียบวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณวิธีหนึ่งที่เคยได้รับความนิยมมากในอดีต เนื่องจากการประมาณเพื่อเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้ไปเป็นสมการทางพีชคณิต (Algebraic Equations) แล้วนำไปแก้หาผลเฉลยโดยประมาณได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีผลต่าง

สืบเนื่องนี้ไม่สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพนัก จึงไม่ได้รับความนิยมนิยมนในปัจจุบันเนื่องจากผลิตภัณฑ์สมัยใหม่ล้วนถูกออกแบบให้มีรูปร่างที่ซับซ้อน และเนื่องจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในระยะเวลาหลังมากยิ่งขึ้นจุดเด่นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ ความสามารถในการประยุกต์เข้าแก้ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

การแปลงระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อยู่ในรูปแบบเลขหกกลับทาง ให้ไปเป็นสมการทางพีชคณิตสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ขั้นสูงรวมทั้งการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบต่างๆกัน เช่น การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation Functions) สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ การประยุกต์วิธีหาค่าอนุพันธ์และอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Differentiation and Integration) การประยุกต์ระเบียบวิธีการแก้ระบบสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่ (Algebraic Simultaneous Equations) ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linear) หรือไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ก็ได้ หากระบบสมการนั้นอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้นก็จำเป็นต้องประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขชนิดอื่นเพิ่มเติมเพื่อช่วยแก้เข้าไปอีก

จากคำอธิบายต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นนี้จะเห็นได้ว่าผู้ที่จะสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่คำนวณได้นั้น จำเป็นต้องมีความรู้ในหลายๆด้าน ดังนี้

1. ความเข้าใจในคณิตศาสตร์ขั้นสูงที่เกี่ยวข้องกับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งสอดคล้องกับปัญหาที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น
2. ความรู้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเปลี่ยนระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านั้นให้อยู่ในรูปแบบของสมการพีชคณิตเพื่อสามารถนำไปใช้แก้หาผลลัพธ์ได้
3. ความรู้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบต่างๆ กันเพื่อประยุกต์สำหรับการประดิษฐ์สมการพีชคณิตเหล่านั้นรวมทั้งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้ระบบสมการขนาดใหญ่
4. ความเข้าใจในไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์

5. ประสิทธิภาพในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์และเข้าใจอัลกอริทึมจะช่วยทำให้เกิดความเข้าใจในผลลัพธ์ได้โดยลึกซึ้งอย่างรวดเร็ว

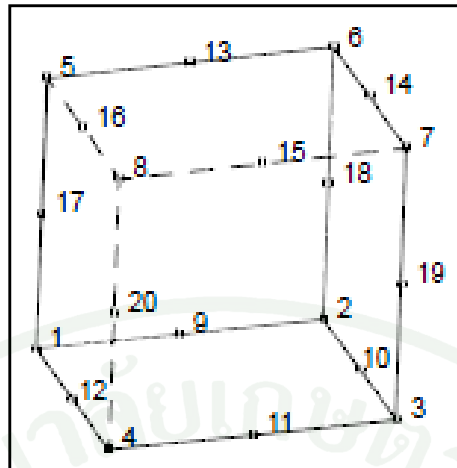
## 7. เฮอ์แมนต์อิลิเมนต์ (Hermann Element)

เฮอ์แมนต์อิลิเมนต์ เป็นชนิดอิลิเมนต์ที่พัฒนามาขึ้นเพื่อใช้คำนวณวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก และชิ้นงานที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก เป็นผลให้ผู้วิจัยได้เลือกเฮอ์แมนต์อิลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ โดยปัจจัยที่ส่งผลให้เลือกใช้อิลิเมนต์ในการวิเคราะห์เป็นแบบอิลิเมนต์ชนิดเฮอ์แมนต์ เพราะวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่สามารถอัดตัวได้ ซึ่งการคำนวณจะแตกต่างจากวัสดุทั่วไป และถ้าใช้อิลิเมนต์ทั่วไปในการวิเคราะห์จะส่งผลให้เกิดการยึดตัวในเชิงปริมาตรได้ (Volumetric Locking) โดยเฮอ์แมนต์อิลิเมนต์จะเพิ่มสมการเพื่อใช้ในการคำนวณวัสดุที่ไม่สามารถอัดตัวได้ดังภาพที่ 33 และดังสมการที่ (53)

$$\|u^h - u\|_1 + \|p^h - p\|_0 = O(h^{\min\{k, l+1\}}) \quad (53)$$

โดย

k	=	คำสั่งของการแก้ไขการเคลื่อนที่ (Displacement Interpolation)
l	=	คำสั่งของการแก้ไขความดัน (Pressure Interpolation)
u	=	ระยะกรเคลื่อนที่
p	=	ความดัน

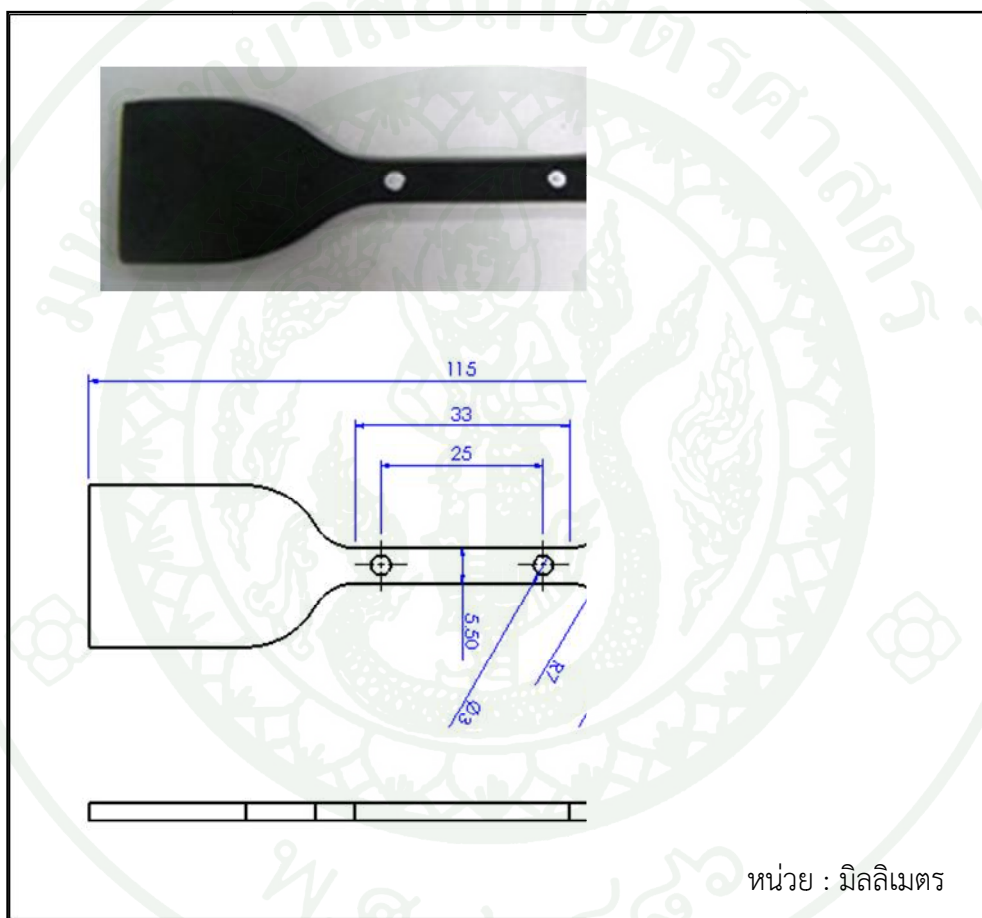


ภาพที่ 33 อลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. ชิ้นงานยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ สำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tension) โดยมีขนาดของชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 34



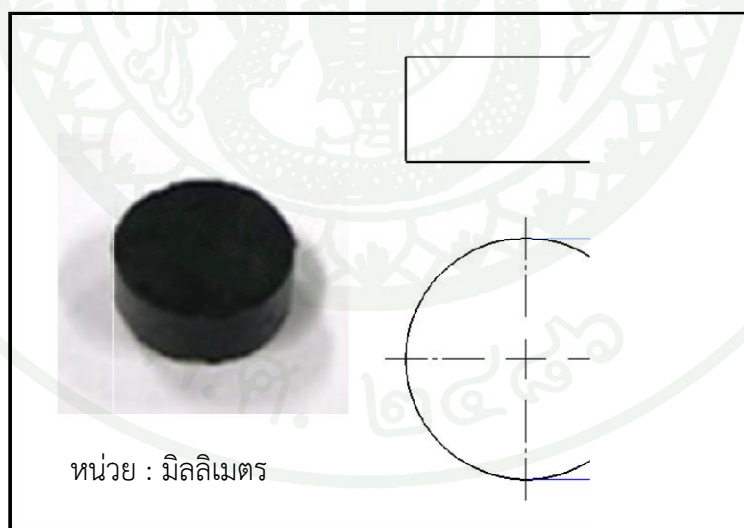
ภาพที่ 34 ชิ้นงานทดสอบสมบัติแรงดึงในแนวแกนเดียว

2. ชิ้นงานยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ สำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ (Planar Tension) โดยมีขนาดของชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ชิ้นงานทดสอบสมบัติแรงดึงในแนวระนาบ

3. ชิ้นงานยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์สำหรับการทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อทดแทนการทดสอบแบบแรงดึงในหลายแนวแกน (Biaxial Tension) โดยมีขนาดของชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 36



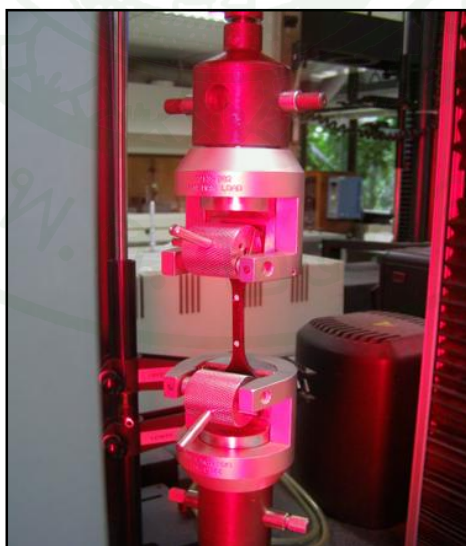
ภาพที่ 36 ชิ้นงานทดสอบสมบัติแรงกดในแนวแกนเดียว

#### 4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tension Machine) ดังภาพที่ 37



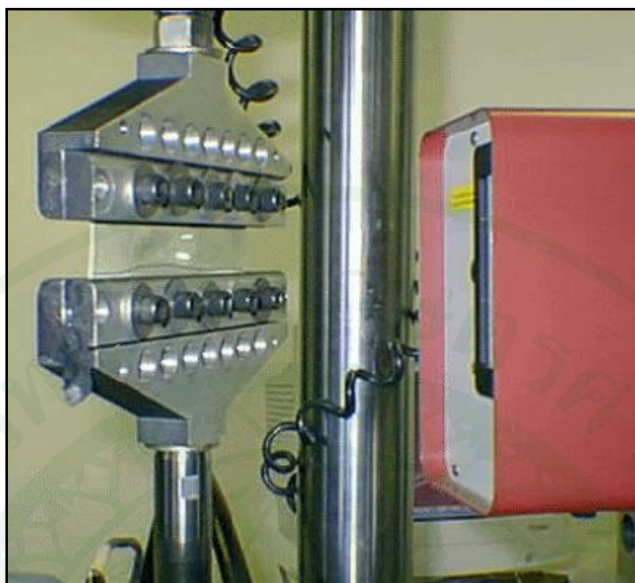
ภาพที่ 37 เครื่องทดสอบแรงดึง

#### 5. อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียวดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว

6. อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบดังภาพที่ 39



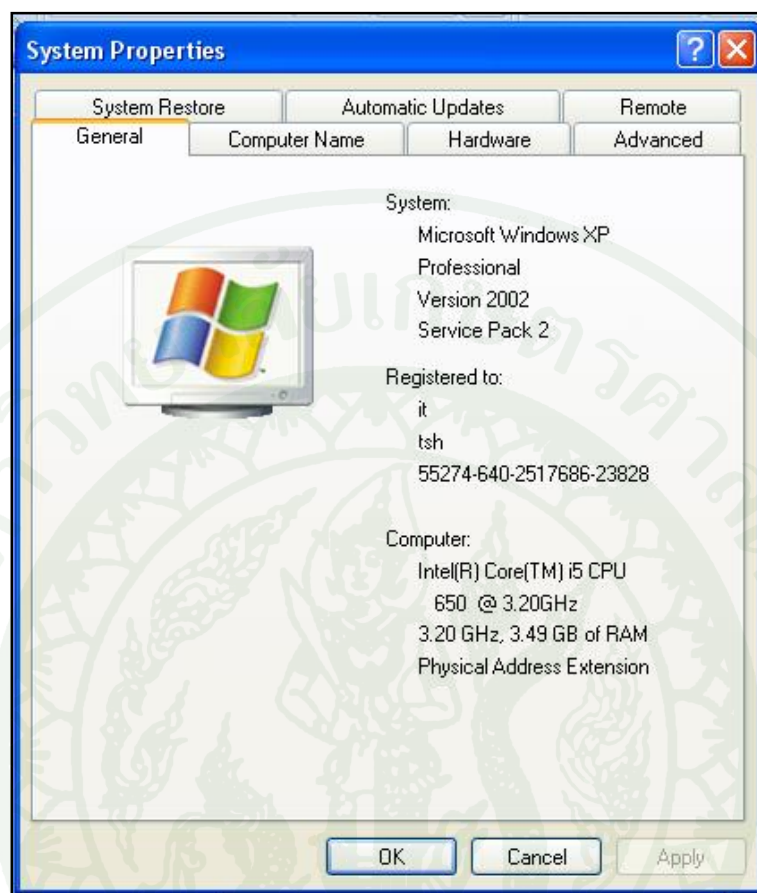
ภาพที่ 39 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ

7. อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกดตั้งภาพที่ 40



ภาพที่ 40 อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว

## 8. คอมพิวเตอร์โดยมีสมบัติตามภาพที่ 41



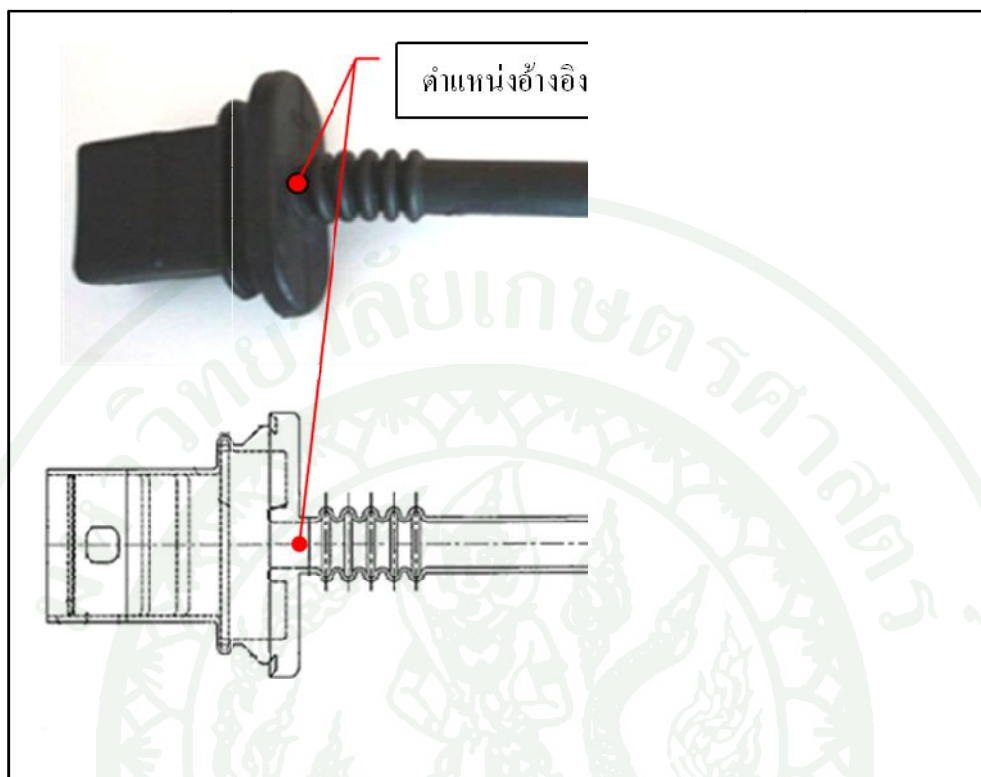
ภาพที่ 41 แสดงสมบัติของคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์

9. โปรแกรม MSC.Patran

10. โปรแกรม MSC.Marc

11. แบบชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ

12. ชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ (ภาพที่ 42)



ภาพที่ 42 ชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ กับตำแหน่งอ้างอิงของชิ้นงาน

13. อุปกรณ์การทดสอบยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ (ภาพที่ 43)



ภาพที่ 43 อุปกรณ์การทดสอบยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ

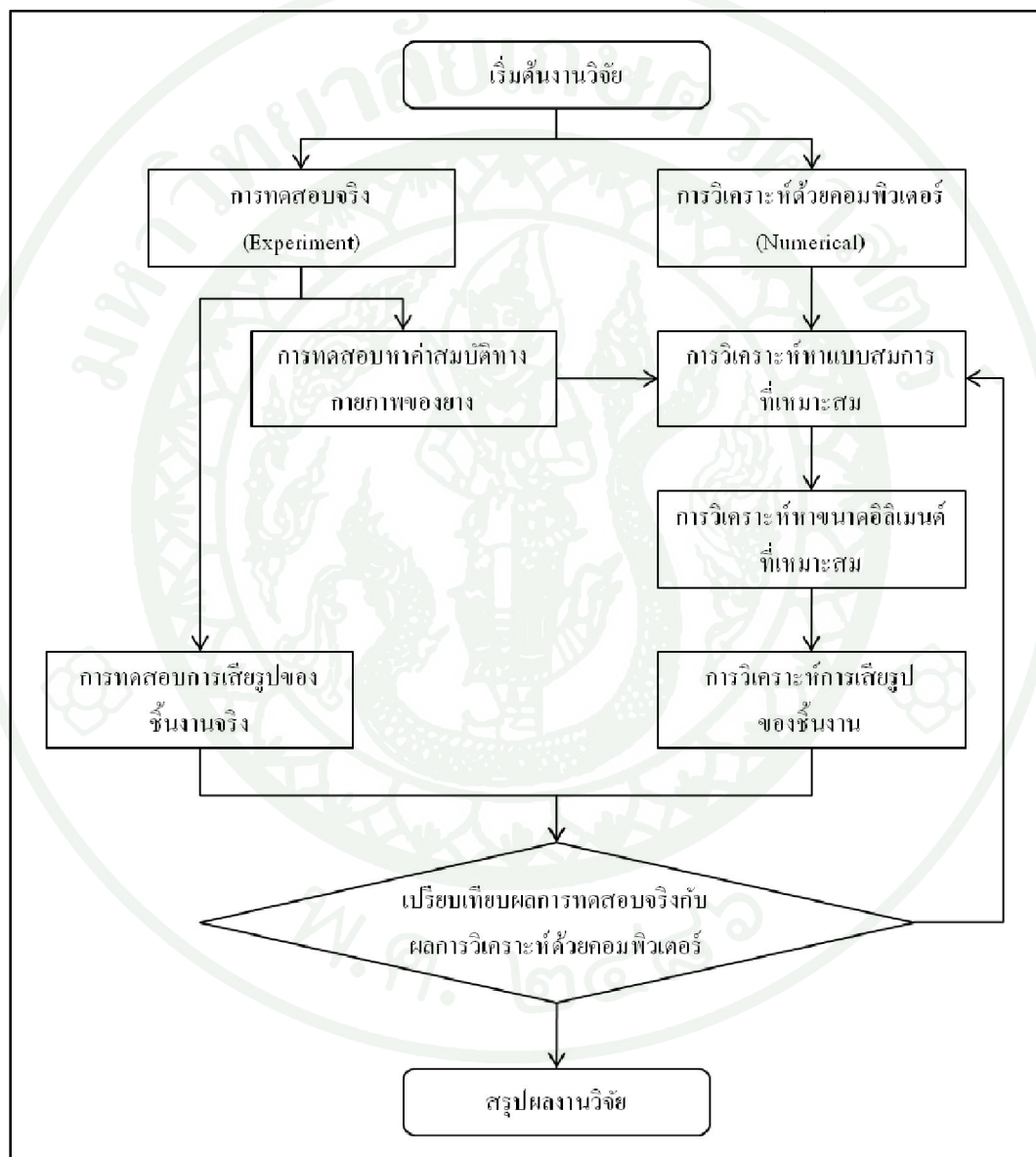
## 14. เครื่องวัดขนาดชิ้นงาน (Microscope) (ภาพที่ 44)



ภาพที่ 44 เครื่องวัดขนาดชิ้นงาน

## วิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบขงหุ่นสายไฟระหว่างประตูและตัวถังรถกระบะ โดยใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยและเทคโนโลยีการออกแบบทางคอมพิวเตอร์ โดยระเบียบวิธีการสามารถอธิบายได้ ดังภาพที่ 45 ซึ่งมีวิธีการ ดังนี้



ภาพที่ 45 แนวทางการวิจัย

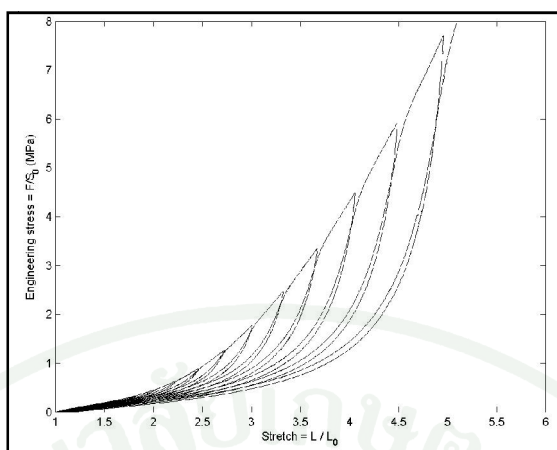
## 1. การทดสอบชิ้นงาน (Experiment)

### 1.1 การทดสอบหาค่าสมบัติทางกายภาพของยาง

ทำการทดสอบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียด ของวัสดุดิบ ชิ้นงาน โดยจำเป็นต้องทดสอบด้วยกัน 3 แบบ คือ แรงดึงในแนวแกนเดียว แรงดึงในแนวระนาบ และแรงกดในแนวแกนเดียว โดยนำชิ้นงานทดสอบยาง ติดตั้งกับเครื่องทดสอบดังภาพที่ 46 และทำการทดสอบ เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) โดยทำการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 10 ครั้ง และบันทึกค่าผลของการทดสอบครั้งที่ 10 ซึ่งจะเป็นการกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืดของชิ้นงานทดสอบก่อน แล้วจึงทำการบันทึกค่า การกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืดเป็นดังภาพที่ 47



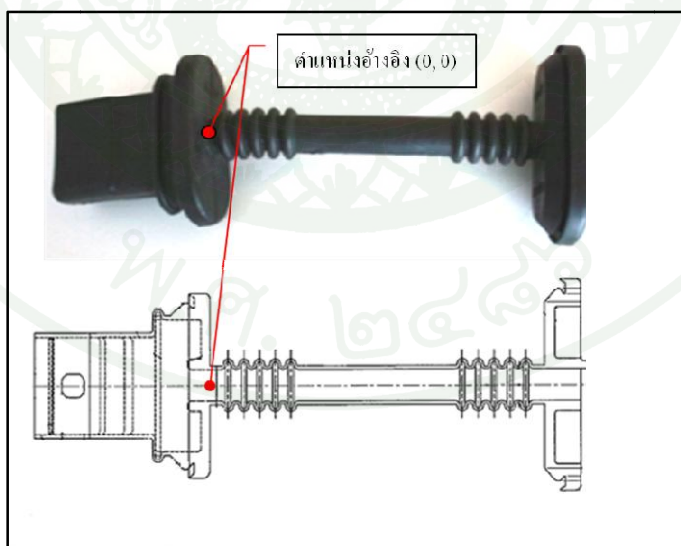
ภาพที่ 46 การทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติทางกายภาพของยาง



ภาพที่ 47 การกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืด (Mullins Effect)

### 1.2 การทดสอบการเสีรูปของชิ้นงานจริง

การทดสอบเป็นการนำชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ ติดตั้งกับอุปกรณ์ทดสอบ แล้วทำการวัดระยะการเสีรูปเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงภาพรูปที่ 48 โดยแนวทางการทำวิจัยกำหนดตำแหน่งวัดระยะการเสีรูปทั้งหมด 8 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 49 ซึ่งวิธีการวัดการเสีรูปของชิ้นงานเป็นดังภาพที่ 50



ภาพที่ 48 ชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ กับตำแหน่งอ้างอิงของชิ้นงาน



ภาพที่ 49 ตำแหน่งวัดระยะการเสี้ยวรูป 8 ตำแหน่ง

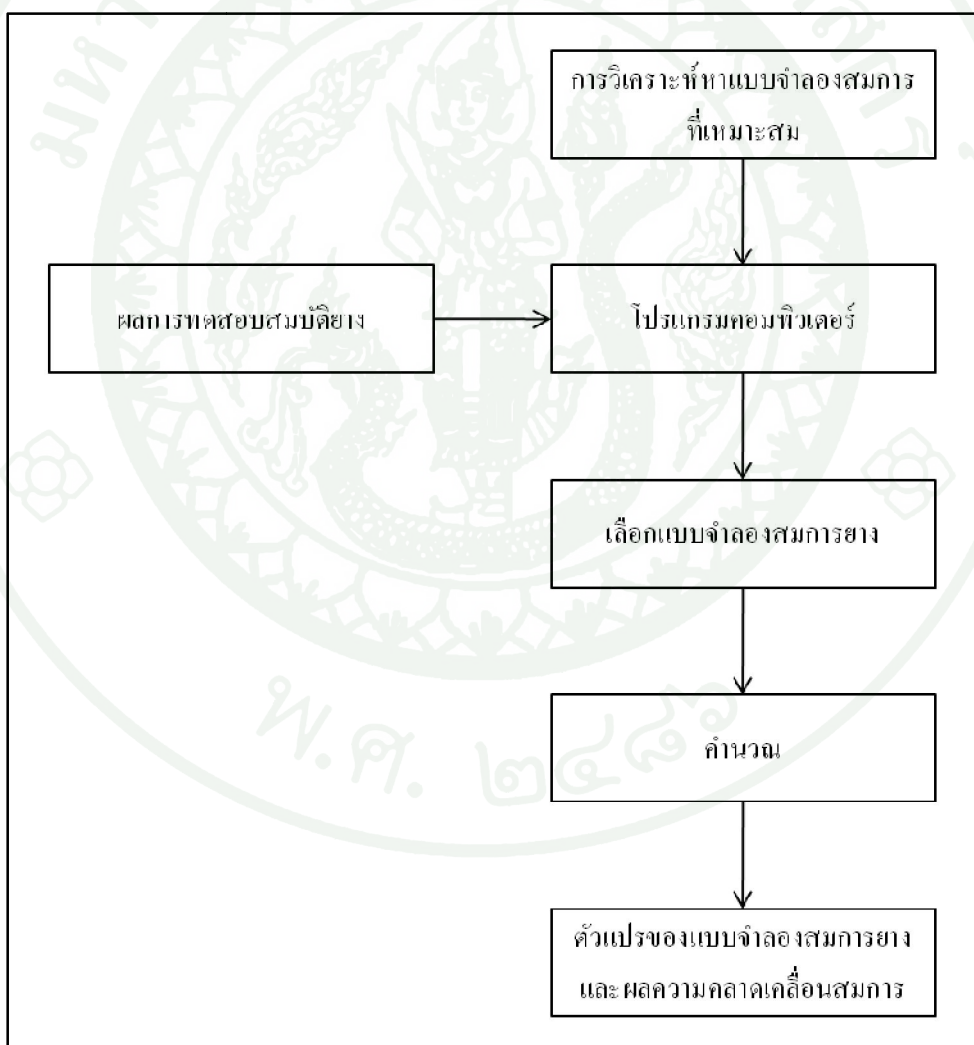


ภาพที่ 50 วิธีการวัดการเสีรูปของชิ้นงาน

## 2. การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Numerical)

### 2.1 การจำลองหาแบบจำลองสมการที่เหมาะสม

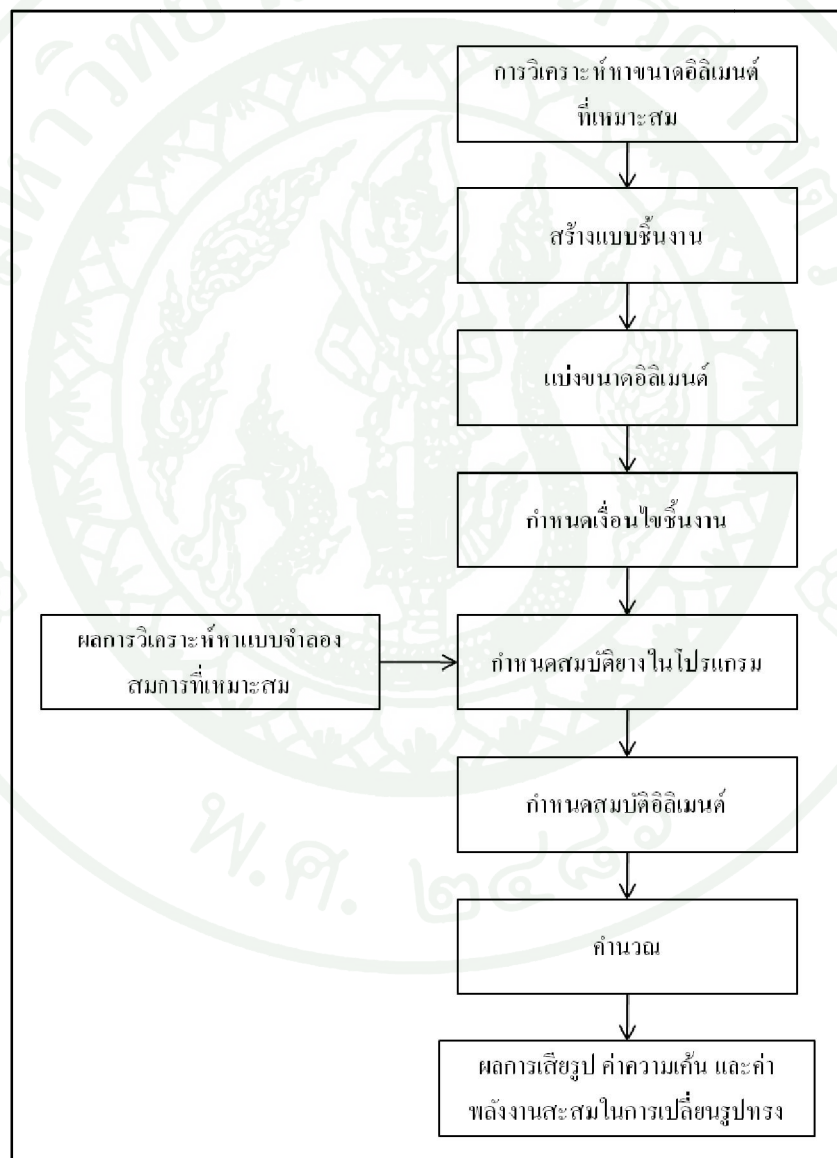
นำผลการทดสอบค่าสมบัติทางกายภาพของยางในการทดสอบที่ (1.2) จำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแบบจำลองสมการที่วิเคราะห์ คือ แบบจำลองสมการมุนีรีฟลินดิกรี 2 แบบจำลองสมการอรูดาบอยซ์ แบบจำลองสมการอีอกเคนดิกรี 2 - 4 และแบบจำลองสมการเก็น นำผลการจำลองได้เปรียบเทียบค่าการผิดพลาดของสมการ เพื่อเลือกแบบจำลองสมการที่ใช้ในการจำลองชิ้นงานต่อไป ซึ่งวิธีการเป็นดังภาพที่ 51 (ขั้นตอนโดยละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค)



ภาพที่ 51 วิธีการจำลองหาแบบจำลองสมการที่เหมาะสม

## 2.2 การจำลองหาขนาดอิลิเมนต์ที่เหมาะสม

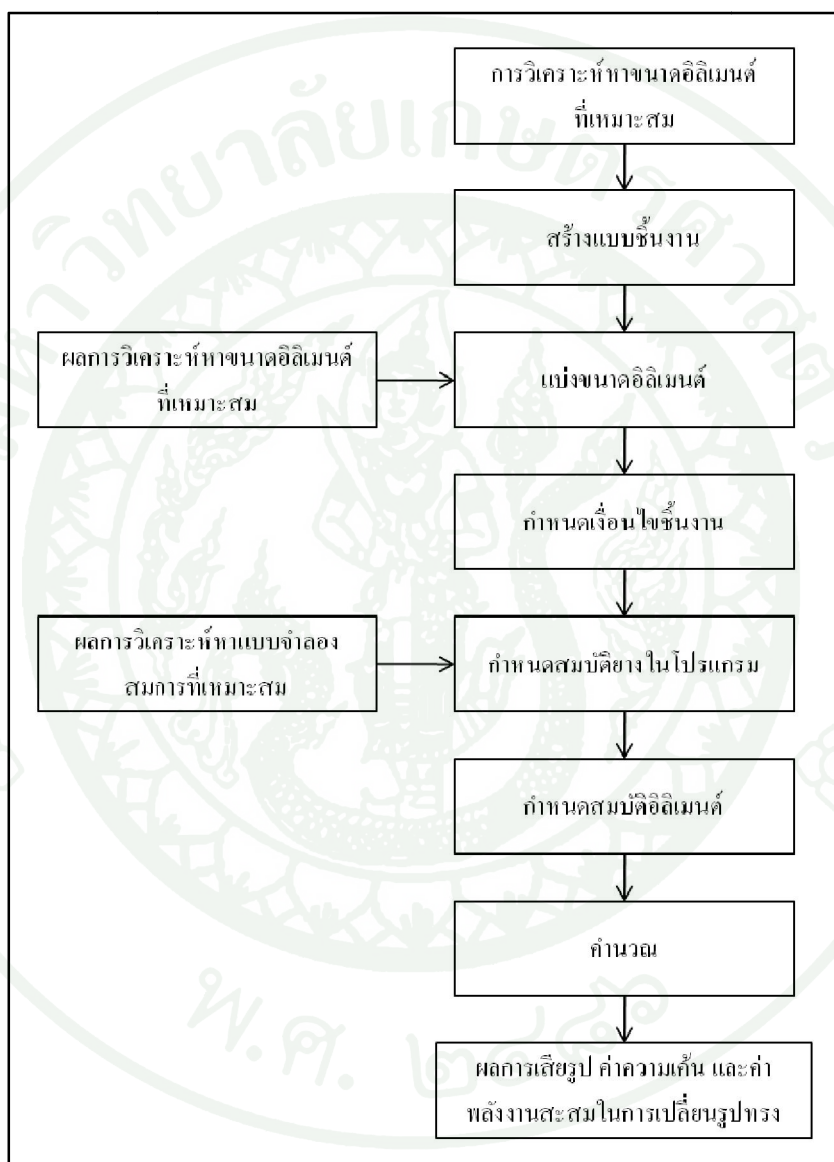
การจำลองหาขนาดอิลิเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญของความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ โดยรูปทรงของอิลิเมนต์เป็นแบบอิลิเมนต์ 3 มิติ (Hex Element) และชนิดอิลิเมนต์เป็นแบบเฮร์แมนต์อิลิเมนต์ (Hermann Element) ซึ่งเริ่มจำลองที่ขนาดอิลิเมนต์เท่ากับ 20 และลดขนาดอิลิเมนต์ลงจนกระทั่งค่าผลการจำลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งวิธีการจำลองเป็นดังภาพที่ 52 (ขั้นตอนโดยละเอียดอยู่ในภาคผนวก ง)



ภาพที่ 52 วิธีการจำลองหาขนาดอิลิเมนต์ที่เหมาะสม

### 2.3 การจำลองการเสีรูปของชิ้นงานยาง

การจำลองการเสีรูปของชิ้นงานยาง โดยเลือกใช้สมการและขนาดของอิติเมนต์จากผลการจำลองข้อ (2.1) และ (2.2) ซึ่งวิธีการจำลองเป็นดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 วิธีการจำลองการเสีรูปของชิ้นงานยาง

## ผลและวิจารณ์

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการแสดงผลค่าการทดสอบ และการจำลองต่างๆ ตามรายละเอียดที่กำหนดไว้ในส่วนของวิธีการทดลอง โดยผลการจำลองที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

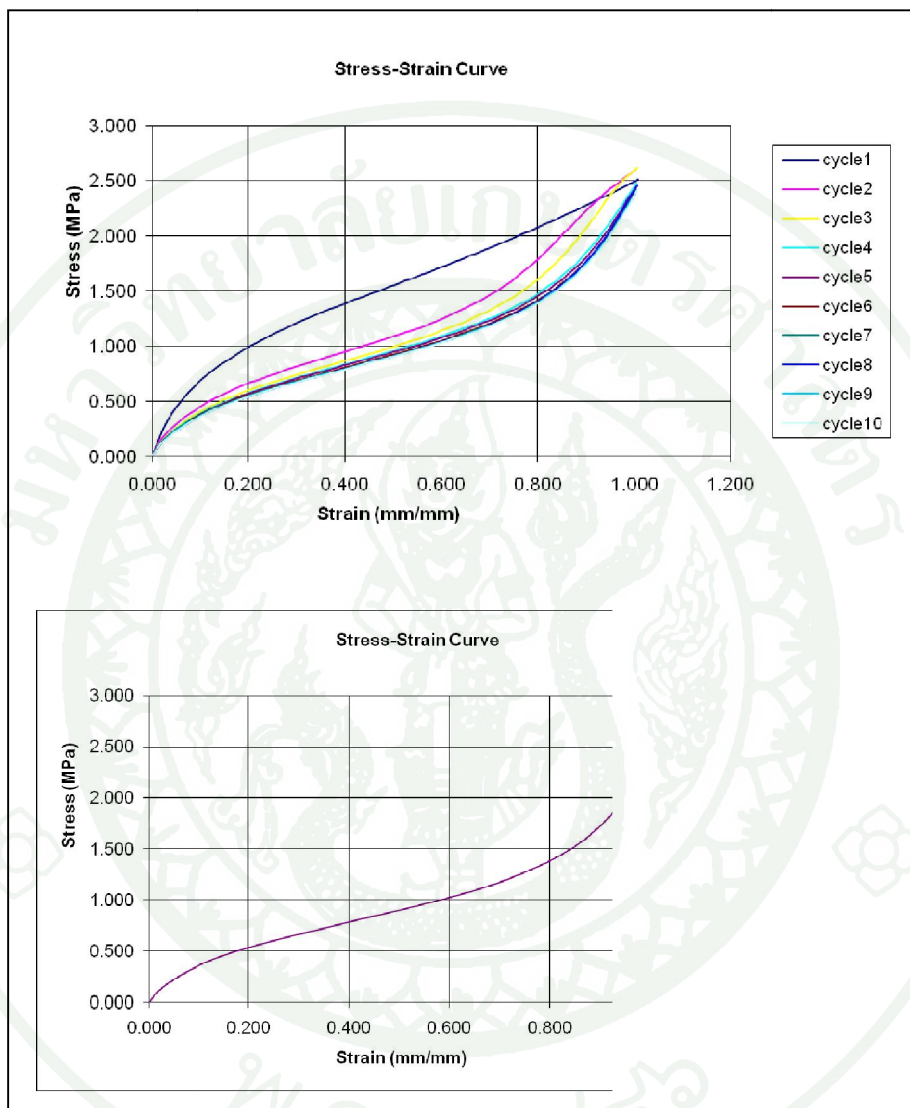
### ผล

#### 1. ผลการทดสอบชิ้นงาน

##### 1.1 ผลการทดสอบหาค่าสมบัติทางกายภาพของยาง

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง โดยยางในที่นี่กำหนดไว้เป็นยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) แนวทางการทำวิจัยได้นำยางไปทำการทดสอบที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย (RDCTRI) มหาวิทยาลัยมหิดล โดยการผลทดสอบแสดงผลการกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืด (Mullins Effect) และแสดงผลการทดสอบครั้งที่ 10 ของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งผลที่ได้แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

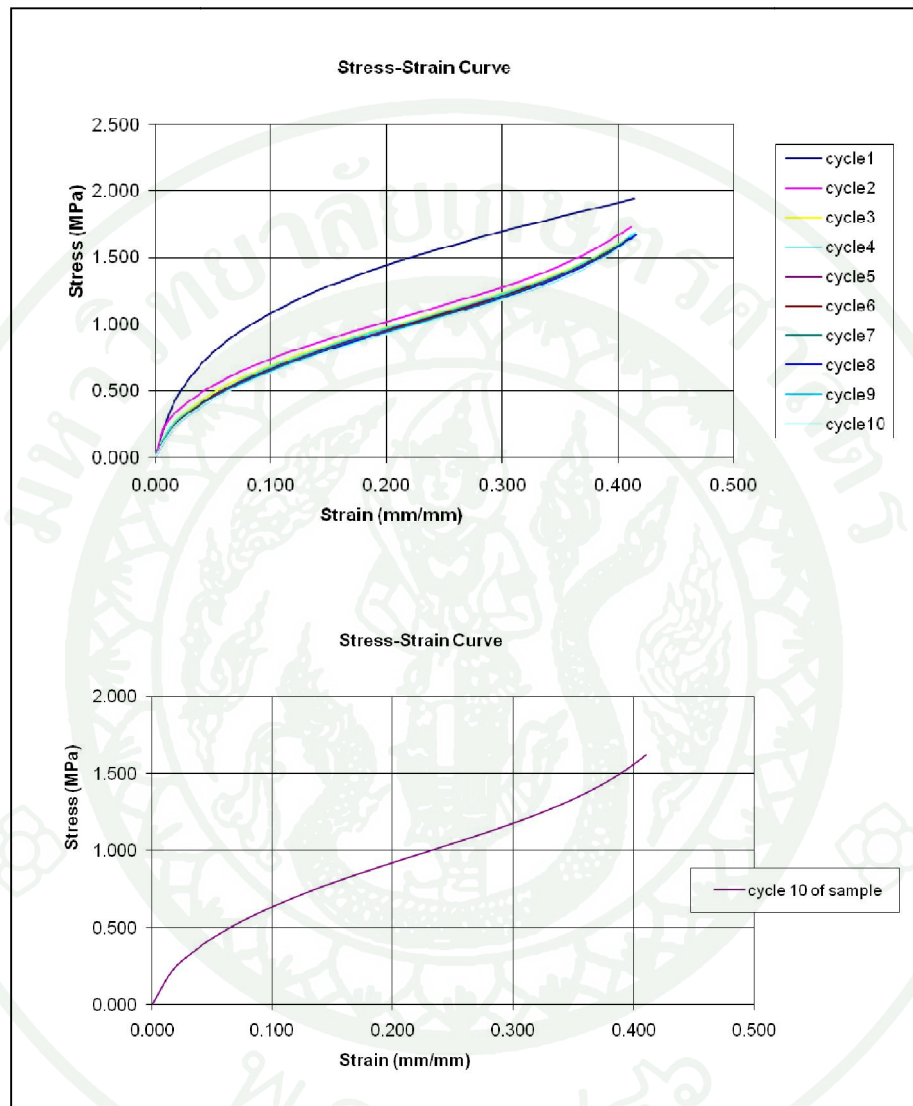
1.1.1 ผลการทดสอบชิ้นยางเพื่อหาสมบัติแบบแรงดึงแนวแกนเดียว (Uniaxial Tension) ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ผลการทดสอบแบบแรงดึงในแนวแกนเดียวของชิ้นงาน

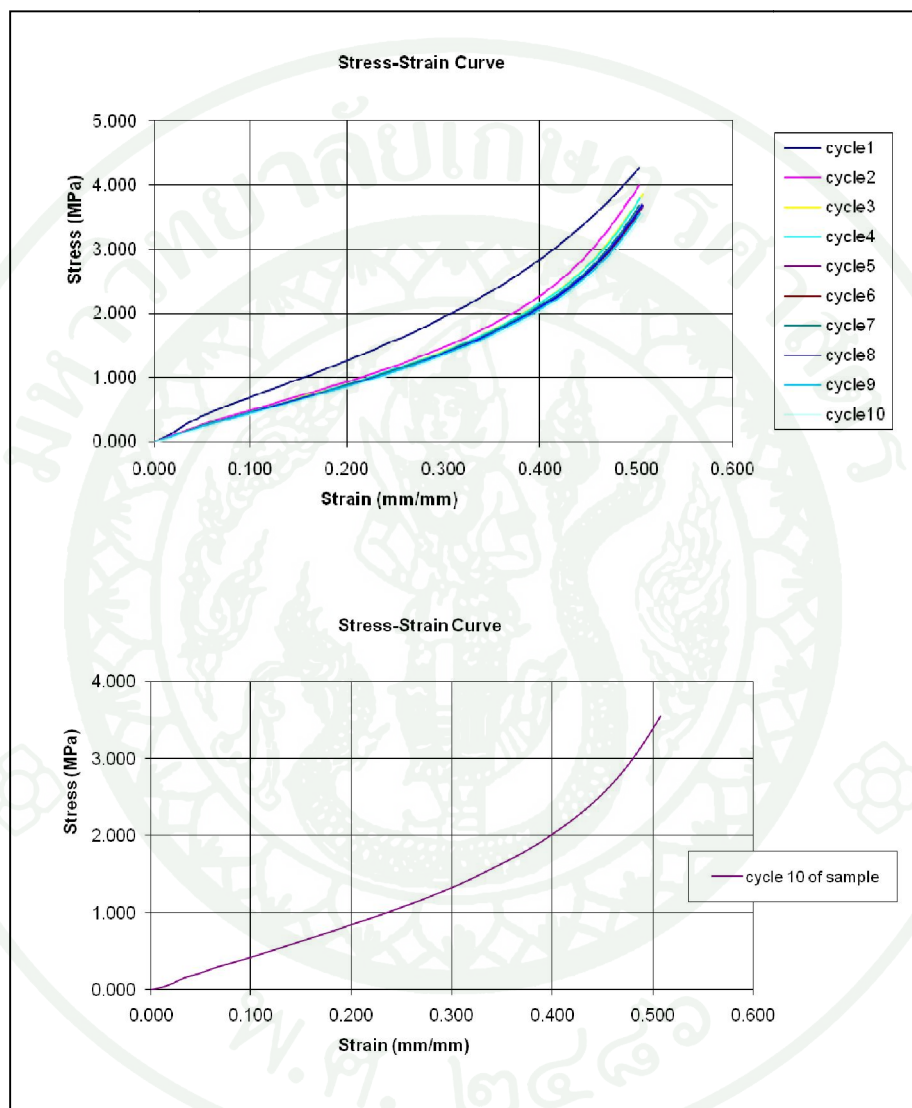
## 1.1.2 ผลการทดสอบชิ้นยางเพื่อหาสมบัติแรงดึงในแนวระนาบ (Planar Tension)

ดั่งภาพที่ 55



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์แสดงผลการทดสอบแบบแรงดึงในแนวระนาบของชิ้นงาน

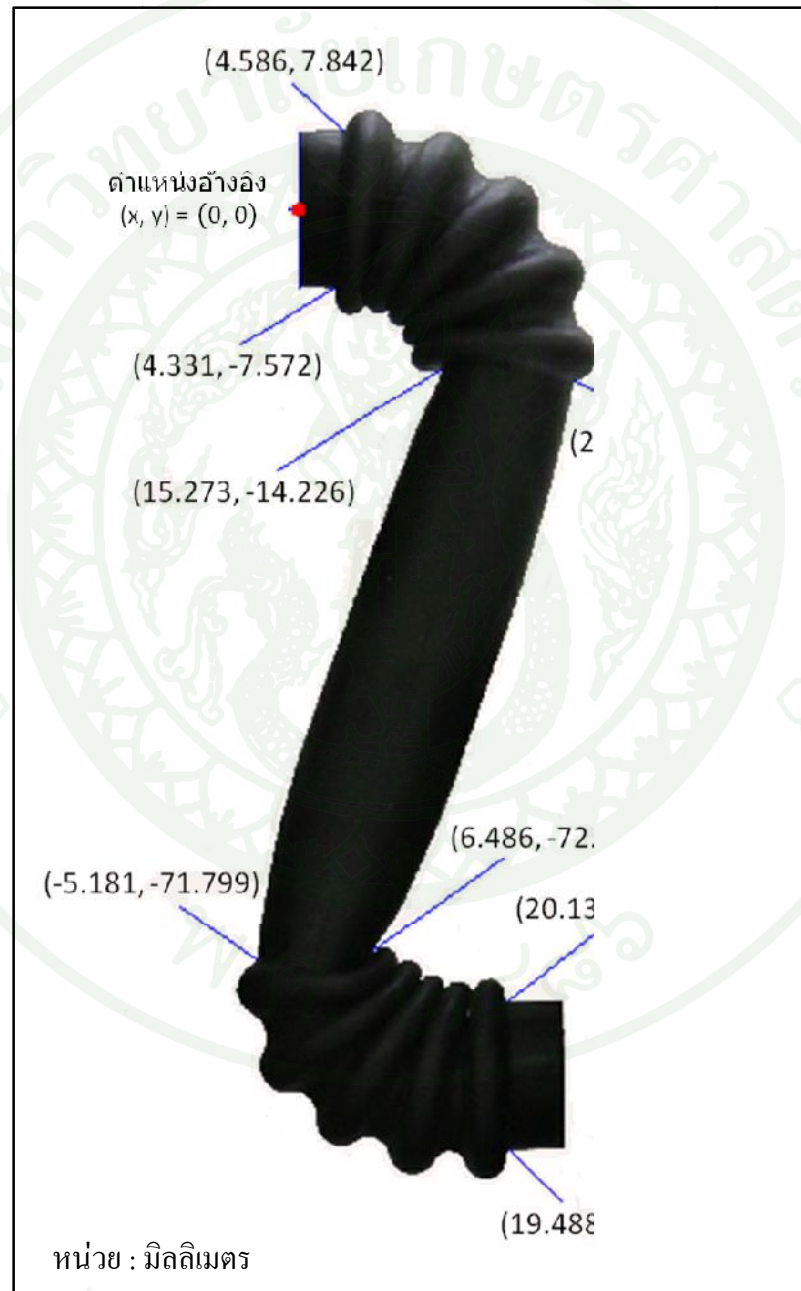
1.1.3 ผลการทดสอบชิ้นงานเพื่อหาสมบัติแรงกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อทดแทนการทดสอบแบบแรงดึงในหลายแนวแกน (Biaxial Tension) ดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์แสดงผลการทดสอบแบบแรงกดในแนวแกนเดียวของชิ้นงาน

## 1.2 ผลการทดสอบการเสีรูปของชิ้นงานจริง

ผลการทดสอบเป็นการวัดการเสีรูปของชิ้นงานเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงด้วยเครื่องวัดขนาดชิ้นงาน และเนื่องจากกำหนดเครื่องวัดให้ทำการวัด โดยวัดค่าที่ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ซึ่งผลการวัดเป็นดังตารางที่ 2 และภาพที่ 57



ภาพที่ 57 ผลการวัดการเสีรูปของชิ้นงานเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงด้วยเครื่องวัดขนาดชิ้นงาน

ตารางที่ 2 ผลการวัดการเสียรูปของชิ้นงานเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงด้วยเครื่องวัดขนาดชิ้นงาน

ตำแหน่งการวัดชิ้นงาน	ตำแหน่งในแกน x หลังการเสียรูป (mm)	ตำแหน่งในแกน y หลังการเสียรูป (mm)	ระยะการเสียรูป เทียบกับตำแหน่ง อ้างอิง (mm)
1	4.586	7.842	9.085
2	27.381	-16.116	31.772
3	6.486	-72.521	72.810
4	20.130	-76.090	78.708
5	19.488	-93.253	95.268
6	-5.181	-71.799	71.986
7	15.273	-14.226	20.872
8	4.331	-7.572	8.723

## 2. ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

### 2.1 ผลการจำลองหาแบบจำลองสมการที่เหมาะสม

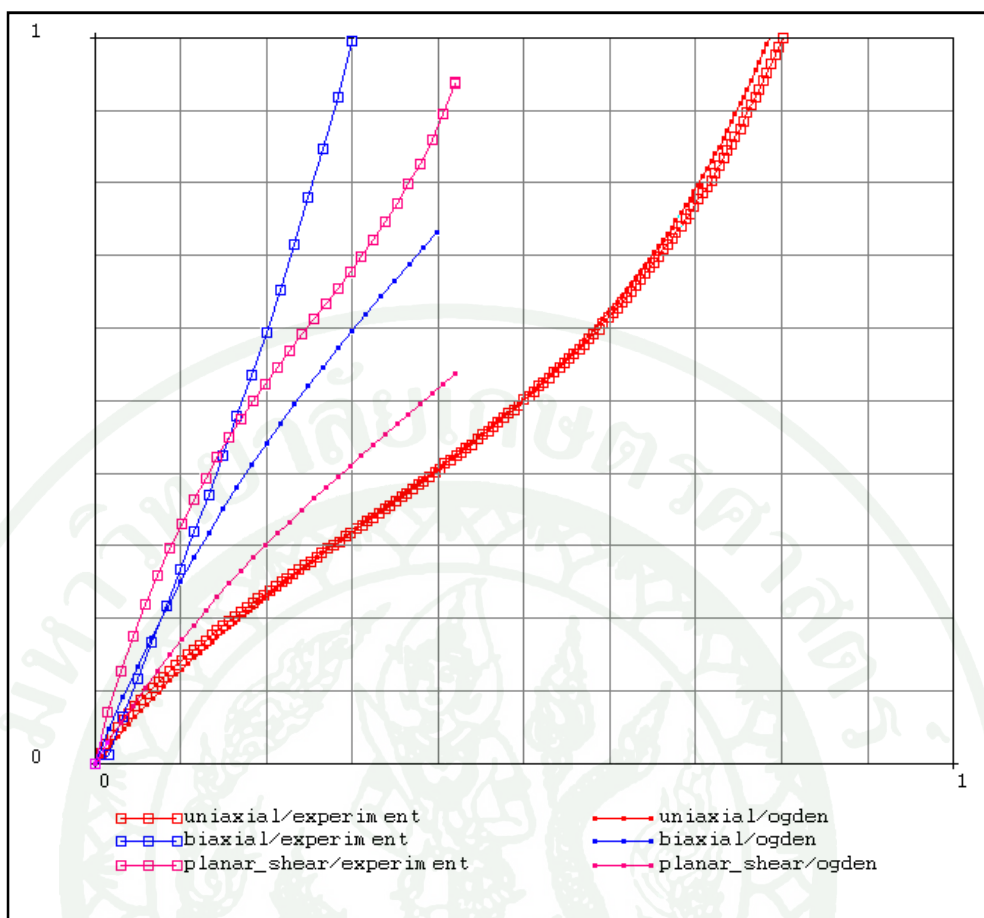
นำค่าผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางมาจำลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมการชนิดต่างๆของยาง โดยผลที่ได้จะเป็นดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลจาก  
สมการจำลองพฤติกรรมยาง

ชนิดของสมการ	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเปรียบเทียบระหว่างผล การทดสอบจริงกับผลจากสมการจำลองพฤติกรรมยาง (Error)
Arruda-Boyce	19.32
Gent	18.76
Mooney(2)	30.10
Ogden(2)	18.61
Ogden(3)	18.56
Ogden(4)	18.67

จากตารางที่ 3 พบว่าแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3 (Ogden (3)) ดังสมการที่ (54) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด โดยกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าสมบัติทางกายภาพของยางกับแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3 และเป็นดังภาพที่ 58 และค่าคงที่ของแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3 เป็นดังตารางที่ 4

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[ J^{\frac{-\alpha_n}{3}} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3 \right] + 4.5K \left( J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 \quad (54)$$



ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์การเปรียบเทียบค่าผลการทดสอบสมบัติยางกับค่าผลที่ได้จากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3

ชนิดตัวแปร	ค่าคงที่	
Degree 1	Modulus	0.00687
	Exponents	6.96259
Degree 2	Modulus	46.90320
	Exponents	0.01947
Degree 3	Modulus	0.00085
	Exponents	11.30540
Bulk Modulus	2427.01000	

## 2.2 ผลการจำลองหาขนาดอิทธิเมนต์ที่เหมาะสม

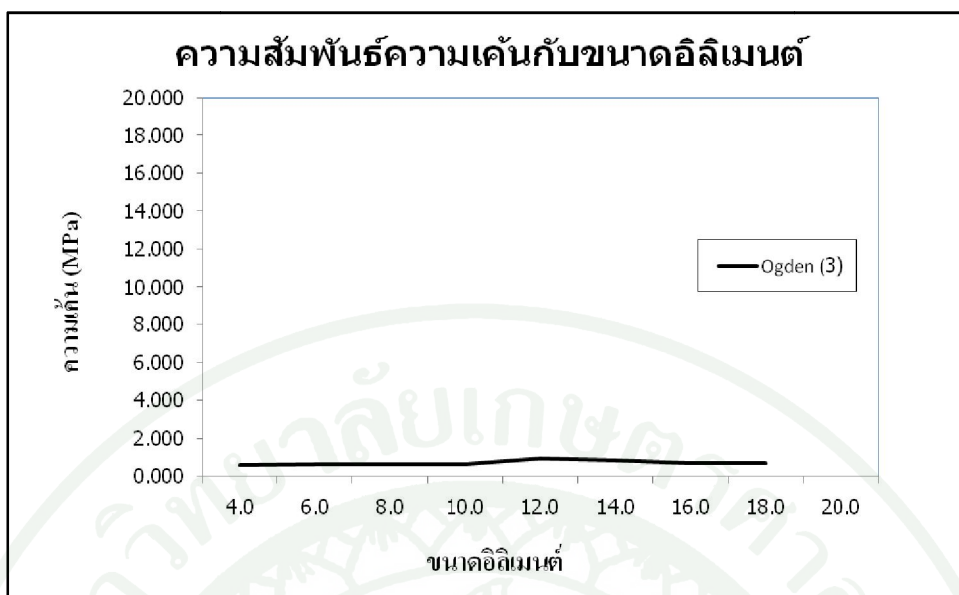
การเลือกขนาดอิทธิเมนต์ ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาผลของพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง ความเค้น และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ห้จ้นกว่าผลของพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงและความเค้นเกิดการลู่เข้า โดยผลการจำลองเป็นดังตารางที่ 5 และเวลาที่ใช้ในการจำลองเป็นดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดอิทธิเมนต์เทียบกับพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

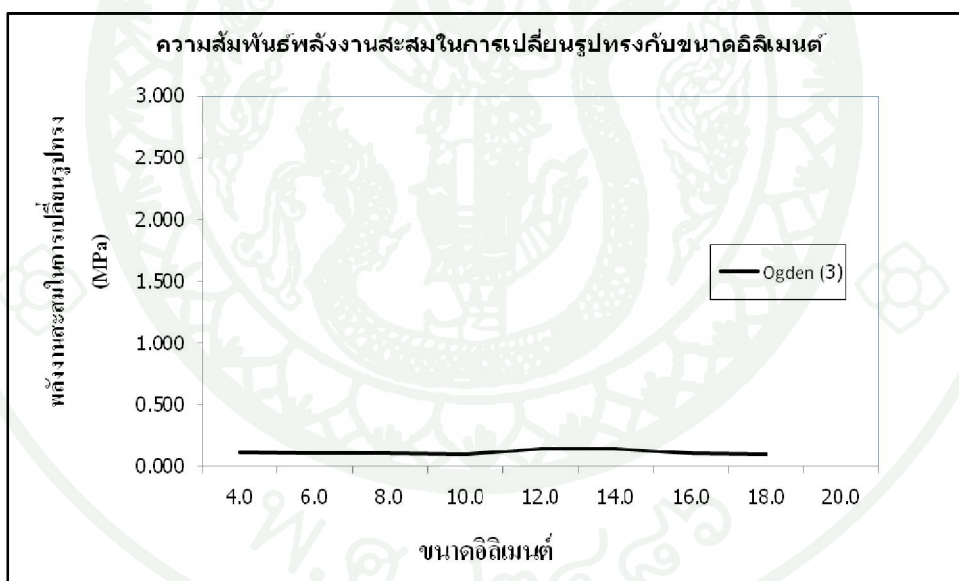
ขนาดอิทธิเมนต์	พลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นสูงสุดในชิ้นงาน, (MPa)	ความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในชิ้นงาน, (MPa)
4	0.11	0.57
6	0.10	0.65
8	0.10	0.66
10	0.09	0.65
12	0.14	0.94
14	0.14	0.87
16	0.10	0.70
18	0.10	0.70
20	*	*

\* ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากขนาดอิทธิเมนต์ที่ใหญ่เกินไปส่งผลให้เกิดความผิดพลาด

ซึ่งนำมาเขียนได้ดังภาพที่ 59 และ 60



ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ของขนาดอิลิเมนต์กับค่าความเค้นในที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน



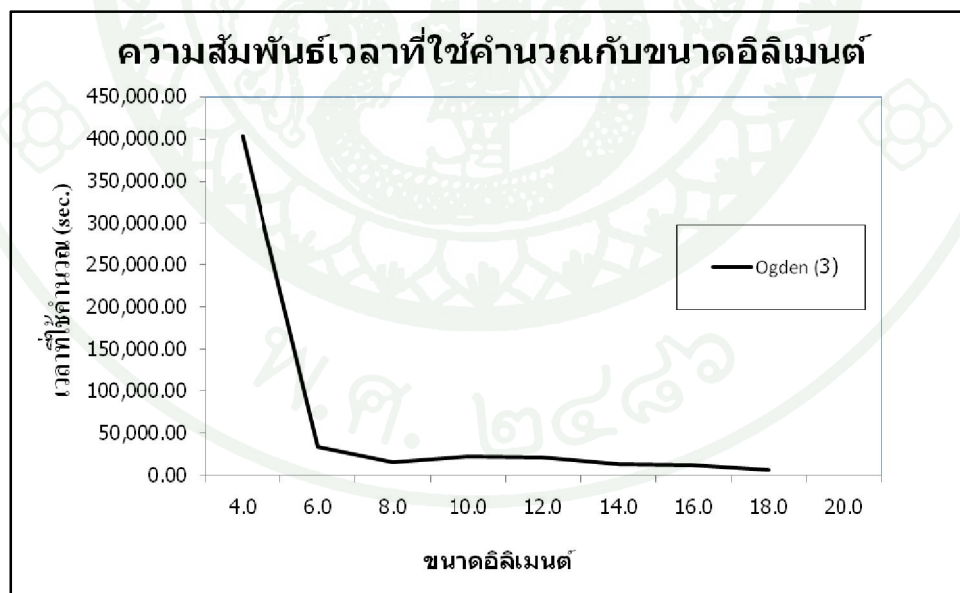
ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ของขนาดอิลิเมนต์กับพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงในที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดอิเลเมนต์เทียบกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

ขนาดอิเลเมนต์	เวลา, (s)
4	403,056.44
6	34,171.63
8	15,725.84
10	22,704.71
12	21,933.51
14	13,218.06
16	12,914.79
18	6,793.95
20	*

\* ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากขนาดอิเลเมนต์ที่ใหญ่เกินไปส่งผลให้เกิดความผิดพลาด

ซึ่งนำมาเขียนได้ดังภาพที่ 61

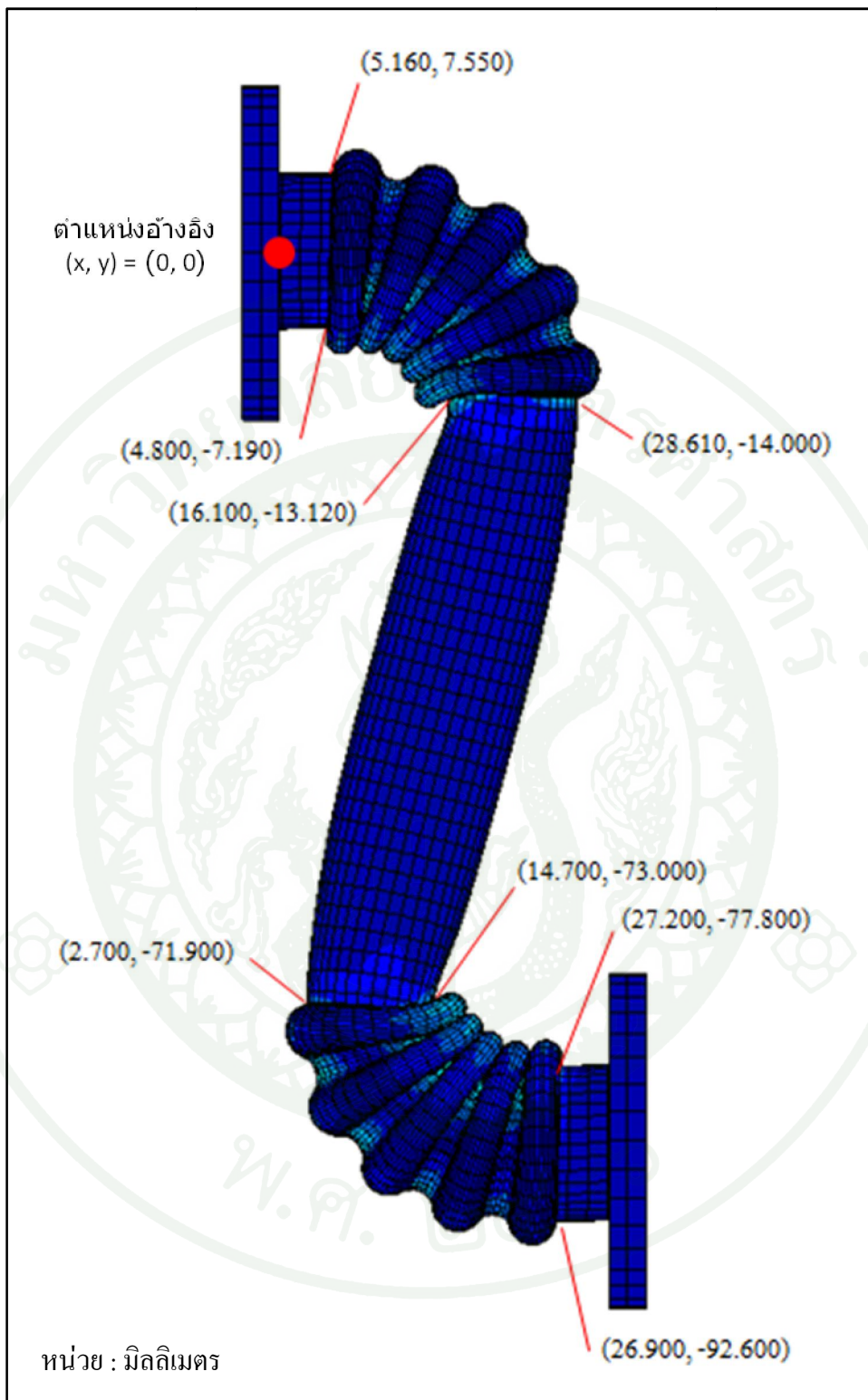


ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ของขนาดอิเลเมนต์กับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

ผู้วิจัยได้เลือกขนาดอิลิเมนต์โดยพิจารณาจากการดูเข้าของผลปฏิบัติงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงและผลของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ซึ่งจากภาพที่ 66 - 67 ปรากฏว่าค่าผลการวิเคราะห์ที่ขนาดอิลิเมนต์ที่ 20 ไม่สามารถคำนวณหาผลการวิเคราะห์ได้เนื่องจากขนาดอิลิเมนต์มีขนาดใหญ่มากเกินไป และขนาดอิลิเมนต์ที่ 18 สามารถคำนวณหาผลการวิเคราะห์ได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์ตั้งแต่ขนาดอิลิเมนต์ที่ 18 จนถึงขนาดอิลิเมนต์ที่ 4 มีค่าผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 59 และ 60 ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ขนาดอิลิเมนต์เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจากภาพที่ 61 ขนาดอิลิเมนต์ที่ 18 จนถึงขนาดอิลิเมนต์ที่ 8 เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน เส้นกราฟที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และขนาดอิลิเมนต์ที่ 6 เป็นช่วงการเริ่มการเพิ่มความชันของกราฟ และที่ขนาดอิลิเมนต์ที่ 4 เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นมากเป็นผลให้ค่าความชันของกราฟวิเคราะห์ขนาดอิลิเมนต์เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่ามากดังภาพที่ 61 สรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์เลือกขนาดอิลิเมนต์ผู้วิจัยเลือกขนาดอิลิเมนต์ที่ 12 เนื่องจากเป็นช่วงการดูเข้าของผลการวิเคราะห์ปฏิบัติงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงและผลของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน และเป็นช่วงก่อนการเริ่มต้นเพิ่มความชันของกราฟวิเคราะห์ขนาดอิลิเมนต์เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งขนาดอิลิเมนต์ที่ 12 จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ต่อไป

### 2.3 ผลการจำลองการเสียรูปของชิ้นงานยาง

ผู้วิจัยทำการจำลองการเสียรูปของชิ้นงาน โดยเลือกแบบจำลองพฤติกรรมยางที่มีผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลจากสมการจำลองพฤติกรรมยางน้อยที่สุดของแบบจำลองสมการอ็อกเคนลำดับที่ 3 ซึ่งผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 7 และดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 ผลการจำลองการเสียรูปของชิ้นงานจากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3

ตารางที่ 7 ผลการจำลองการเสีรูปของชิ้นงานจากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3

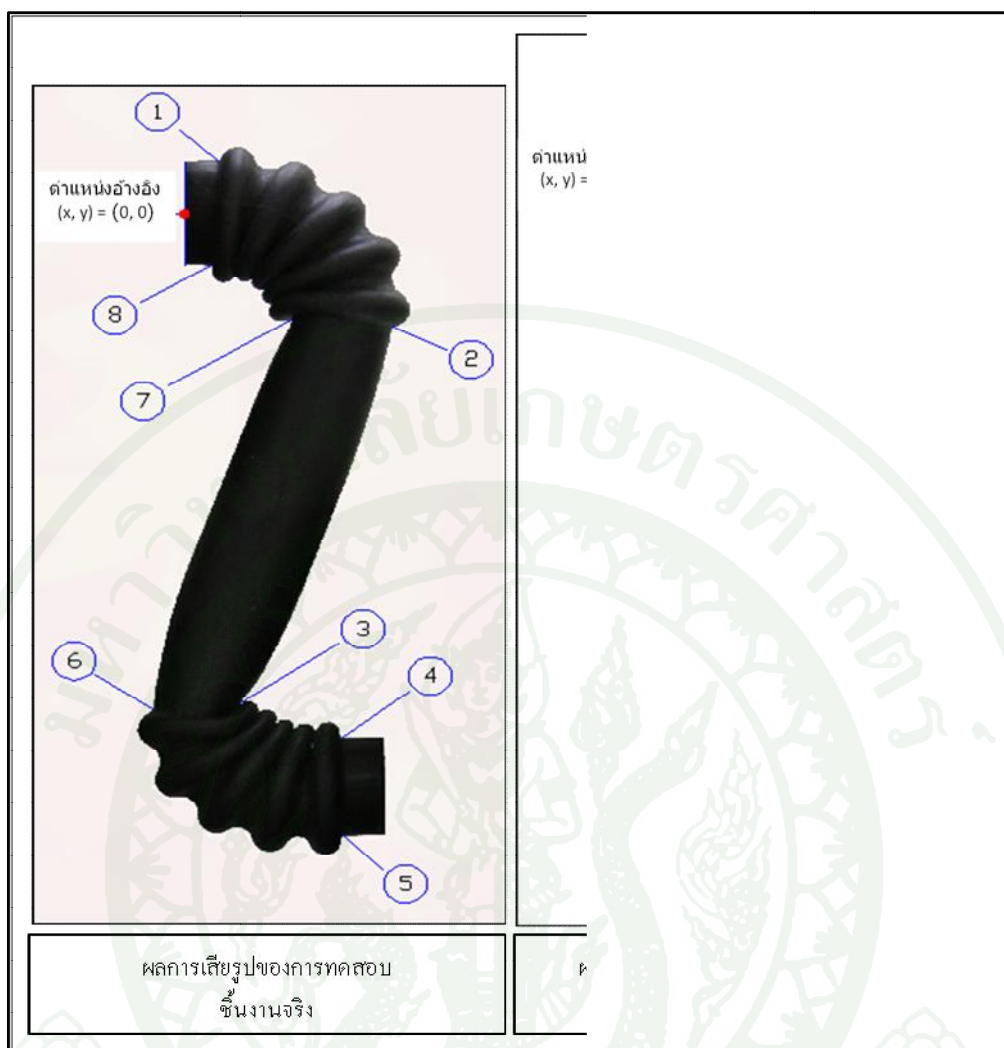
ตำแหน่งการวัดชิ้นงาน	ตำแหน่งในแกน x หลังการเสีรูป (mm)	ตำแหน่งในแกน y หลังการเสีรูป (mm)	ระยะการเสีรูป เทียบกับตำแหน่ง อ้างอิง (mm)
1	5.160	7.550	9.143
2	28.610	-14.000	31.852
3	14.700	-73.000	74.465
4	27.200	-77.800	82.418
5	26.900	-92.600	96.428
6	2.700	-71.900	71.951
7	16.100	-13.120	20.769
8	4.800	-7.190	8.646

จากผลการทดสอบการเสีรูปของชิ้นงานจริงและผลการวิเคราะห์การเสีรูปของชิ้นงาน  
 ยางมาเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งผลระยะการเสีรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผล  
 ของการวิเคราะห์การเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นดังตารางที่ 8 ซึ่งแสดงดังภาพที่ 63 และ

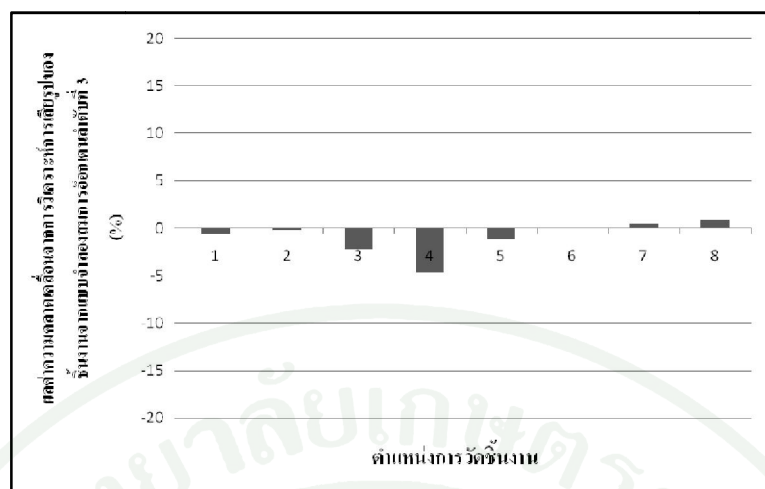
64

ตารางที่ 8 ผลการวัดระยะการเสีรูปจริงของชิ้นงานจากตำแหน่งอ้างอิงถึงตำแหน่งการวัดชิ้นงาน  
กับผลการจำลองการเสีรูปของชิ้นงานจากแบบจำลองสมการอ็อกเดนลำดับที่ 3

ตำแหน่ง การวัด ชิ้นงาน	ผลการวัดการ เสีรูปจริงของ ชิ้นงาน	ผลการจำลอง การเสีรูปของ ชิ้นงาน	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณการเสีรูป ของชิ้นงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับ การวัดการเสีรูปของชิ้นงานจริง (เปอร์เซ็นต์)
1	9.085	9.143	-0.64
2	31.772	31.852	-0.25
3	72.810	74.465	-2.27
4	78.708	82.418	-4.71
5	95.268	96.428	-1.21
6	71.986	71.951	0.04
7	20.872	20.769	0.495
8	8.723	8.646	0.886



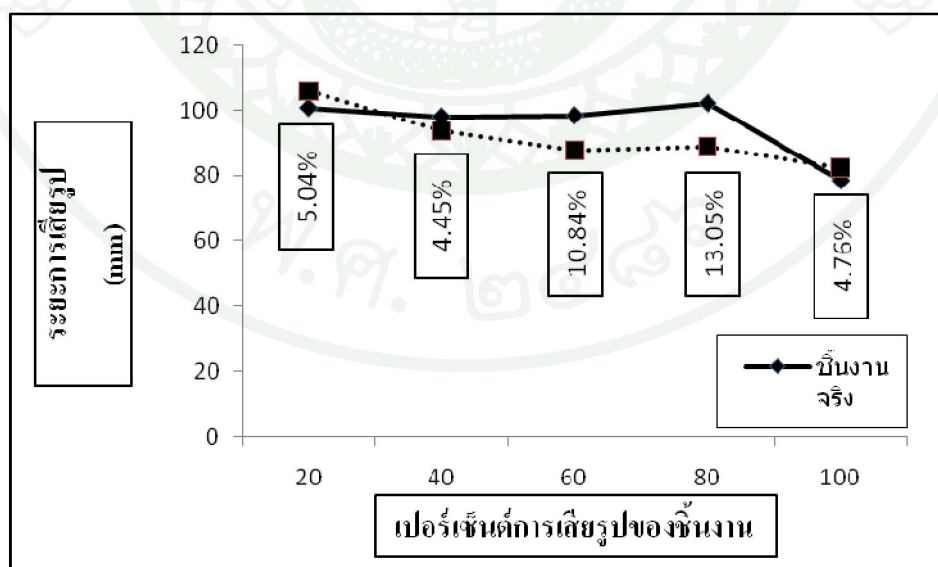
ภาพที่ 63 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของผลการเสียรูปของการทดสอบชิ้นงานจริง กับผลของการจำลองการเสียรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 64 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของผลการเสีรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผลของการจำลองการเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากภาพที่ 64 ตำแหน่งวัดชิ้นงานตำแหน่งที่ 4 มีผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของผลระยะการเสีรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผลของการจำลองการเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สูงที่สุด ผู้วิจัยนำตำแหน่งวัดชิ้นงานตำแหน่งที่ 4 ทำการเปรียบเทียบเพิ่มเติมที่การเสีรูปของชิ้นงานเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบการเสีรูปเป็นดังภาพที่

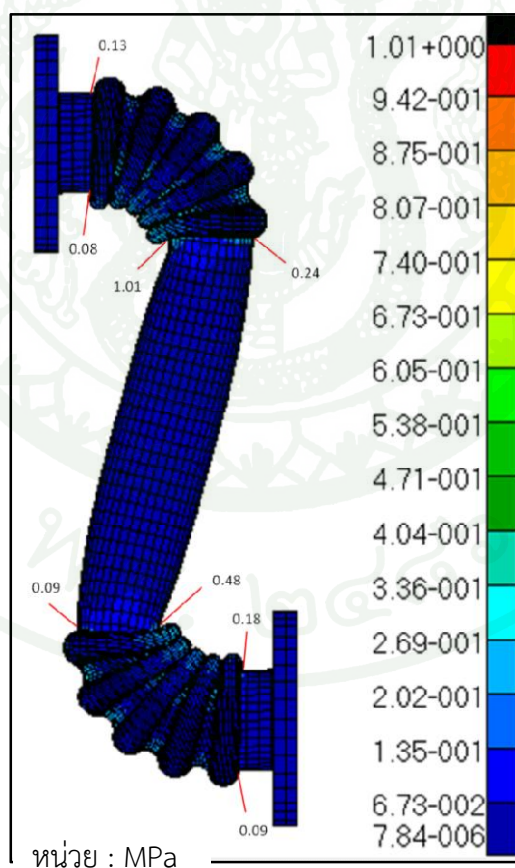
65



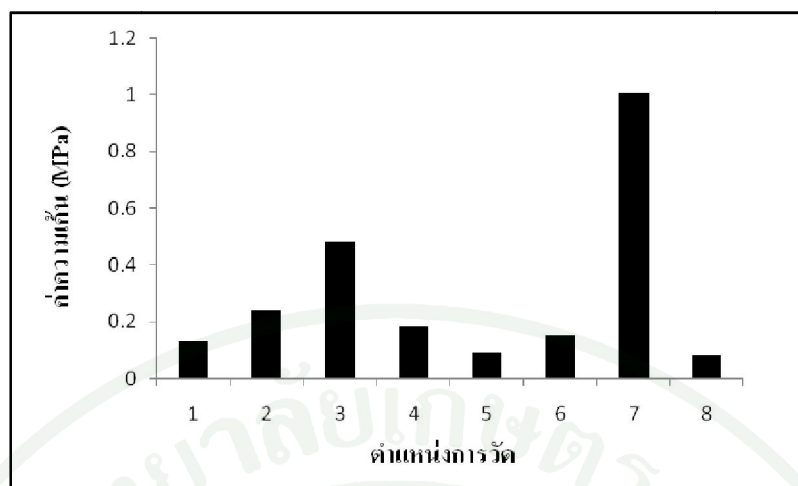
ภาพที่ 65 ความสัมพันธ์ของการเสีรูปของชิ้นงานตำแหน่งที่ 4

จากภาพที่ 65 ผลการเปรียบเทียบการเสีรูปของชิ้นงานของตำแหน่งวัดชิ้นงานตำแหน่งที่ 4 ที่เปอร์เซ็นต์การเสีรูปของชิ้นงาน 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของผลระยการเสีรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผลของการวิเคราะห์การเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มากที่สุดเท่ากับ 13.05 เปอร์เซ็นต์

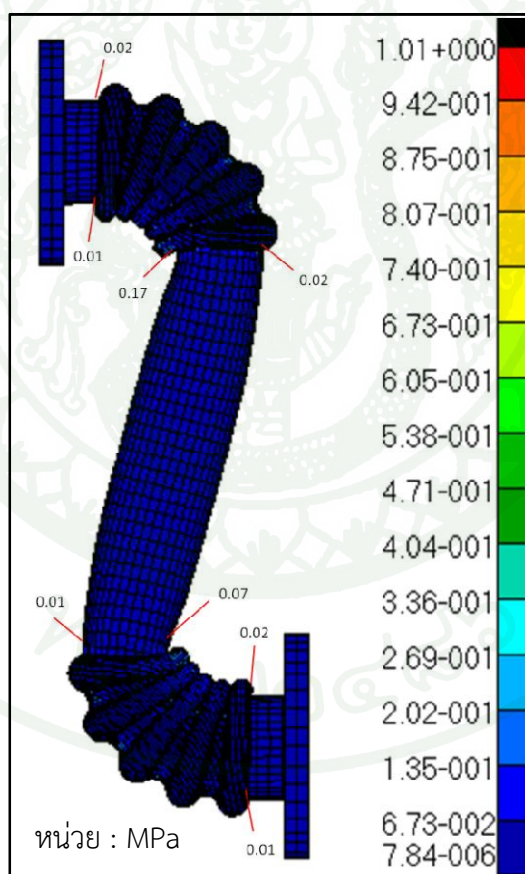
จากผลการวิจัยการเสีรูปของชิ้นงาน ค่าความคลาดเคลื่อนของผลระยการเสีรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผลของการวิเคราะห์การเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นเมื่อค่าการเสีรูปของชิ้นงานมีความสอดคล้องกันส่งผลให้ค่าความเค้นวอนมิสและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่ได้จากการวิเคราะห์การเสีรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือเช่นกัน เนื่องจากความสัมพันธ์ของค่าความเค้นวอนมิส ค่าความเครียดและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง โดยค่าความเค้นวอนมิสและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ดังภาพที่ 66 - 69



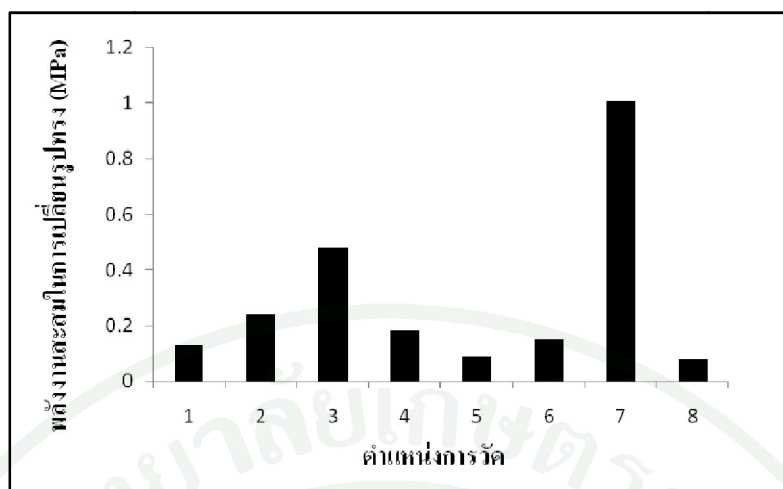
ภาพที่ 66 ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่ตำแหน่งวัดชิ้นงาน



ภาพที่ 67 ค่าความเค้นเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่ตำแหน่งวัดชิ้นงาน



ภาพที่ 68 ค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง (Strain Energy Density) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

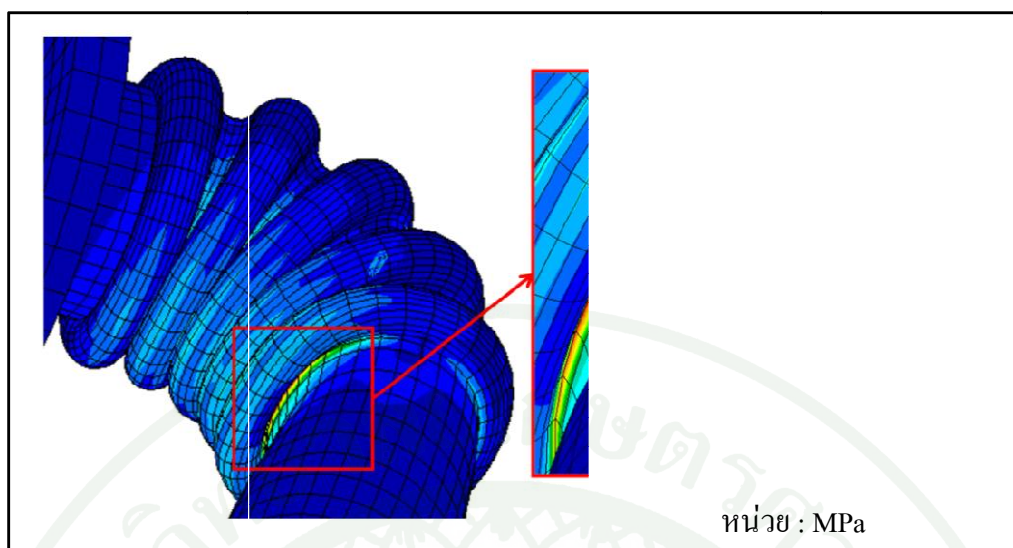


ภาพที่ 69 ค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่ตำแหน่งวัดชิ้นงาน

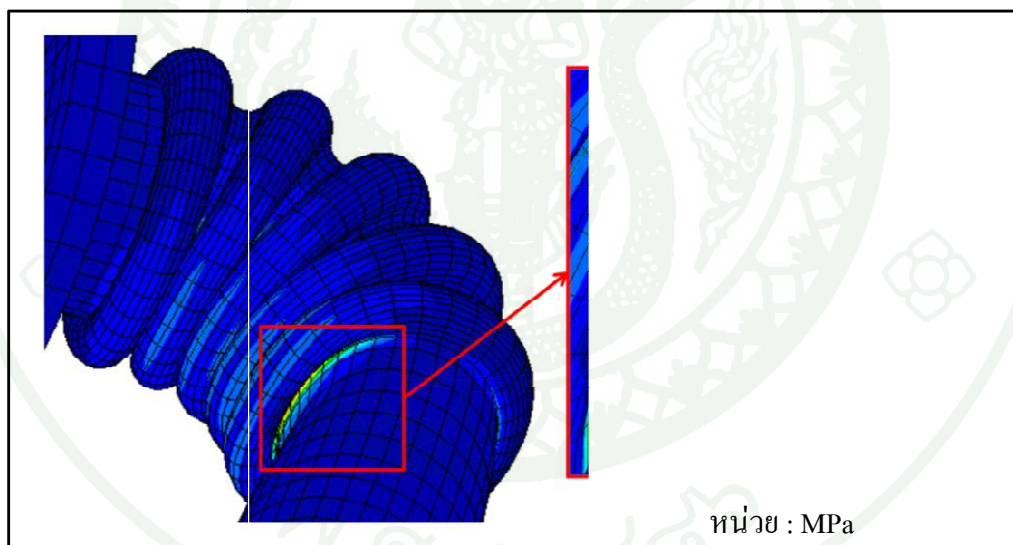
จากภาพที่ 66 - 69 ค่าความเค้นวอนนิสและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงจะเกิดในตำแหน่งการพับตัวของชิ้นงาน โดยมีค่าความเค้นวอนนิสสูงสุดและค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ดังตารางที่ 9 และตำแหน่งที่มีค่าความเค้นวอนนิสสูงสุดและค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เป็นดังภาพที่ 70 และ 71

ตารางที่ 9 ค่าความเค้นวอนนิสสูงสุดและค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

ค่าความเค้นวอนนิสสูงสุด ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน (MPa)	ค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุด ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน (MPa)
1.01	0.165



ภาพที่ 70 ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นวอนมีสสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์



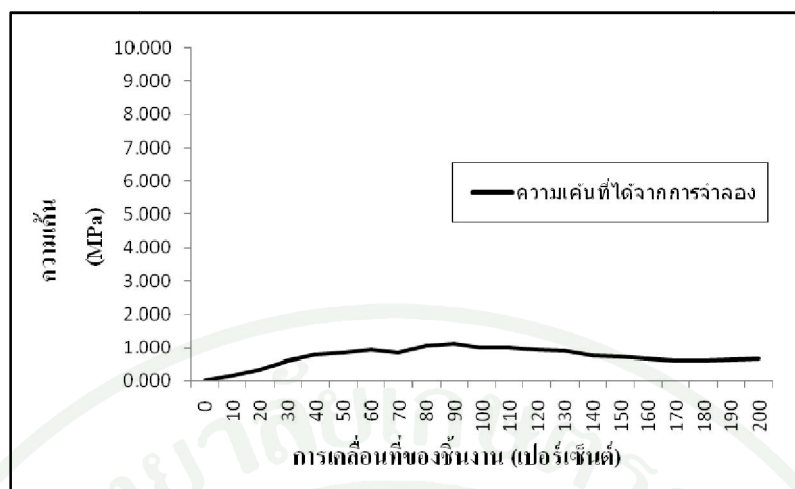
ภาพที่ 71 ตำแหน่งที่มีค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

จากภาพที่ 70 และ 71 ค่าความเค้นวอนมีสสูงสุดและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างขดยางช่วยในการหักงอชิ้นงานกับท่อโดยตรง ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะเกิดการพิบตัวของชิ้นงานอย่างหุ่มส่ายไปจากการเคลื่อนที่ใช้งานจริงมากที่สุด ดังนั้นตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นวอนมีสและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดสอดคล้อง

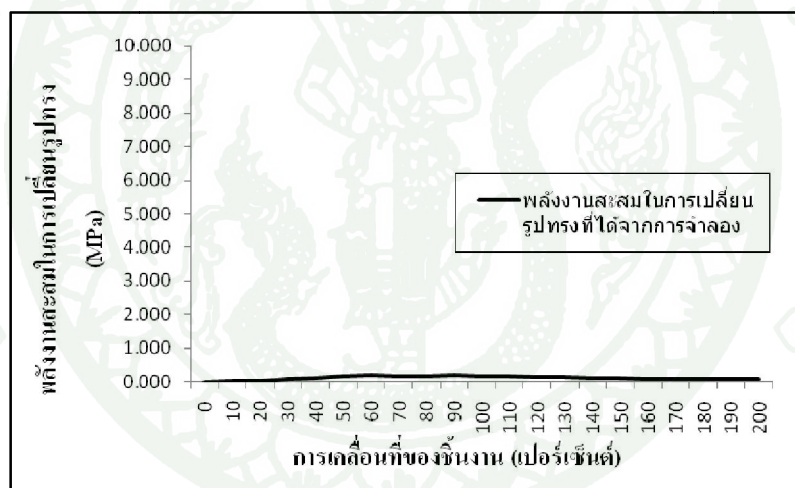
กับการเสีรูปร่างจริงของชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ ซึ่งผลค่าความเค้นวอนมิตและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่เป็นดังตารางที่ 10 และแสดงดังภาพที่ 72 และ 73

**ตารางที่ 10** ผลค่าความเค้นวอนมิตและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

การเคลื่อนที่ของชิ้นงาน (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความเค้นวอนมิต สูงสุด (MPa)	ค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรง สูงสุด (MPa)
0	0.00	0.00
10	0.15	0.01
20	0.34	0.02
30	0.61	0.07
40	0.79	0.11
50	0.84	0.16
60	0.92	0.19
70	0.84	0.16
80	1.07	0.17
90	1.12	0.19
100	1.01	0.16
110	1.00	0.16
120	0.94	0.15
130	0.91	0.14
140	0.76	0.10
150	0.71	0.09
160	0.65	0.09
170	0.61	0.08
180	0.61	0.08
190	0.63	0.08
200	0.65	0.09

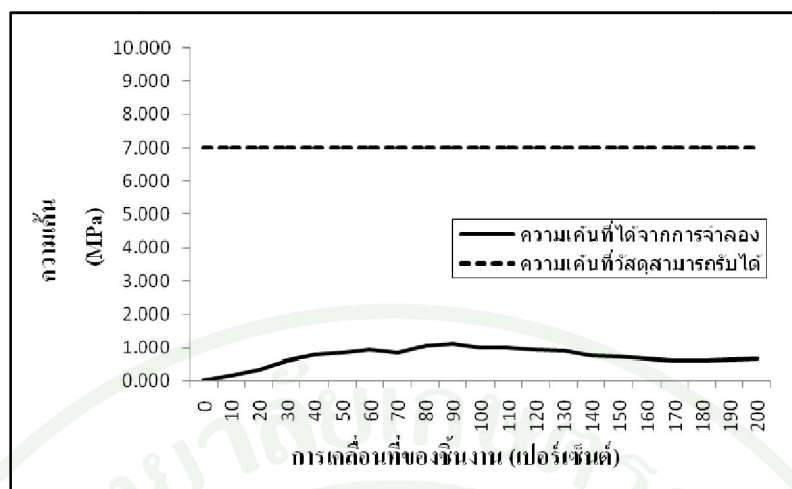


ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นวอนนิสสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

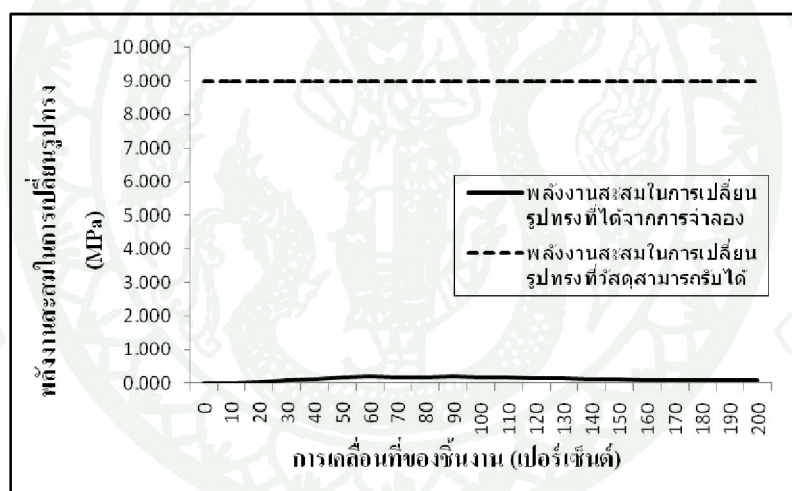


ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

จากภาพที่ 72 และ 73 เป็นผลค่าความเค้นวอนนิสและค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และเมื่อนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นวอนนิสและค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่วัสดุยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์สามารถรับได้ เป็นดังภาพที่ 74 และ 75



ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นวอนมิตสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

จากภาพที่ 74 และ 75 เส้นทึบแสดงค่าความเค้นวอนมิตและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ และเส้นประแสดงค่าเบื้องต้นที่ความเค้นวอนมิตและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่วัสดุของเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์สามารถรับได้ จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นวอนมิตและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงสูงสุดที่เกิดจากการเคลื่อนที่มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าเบื้องต้นที่ความเค้นวอนมิตและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงที่วัสดุของเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์สามารถรับได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานยางหุ้มสายไฟ

ระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ จะไม่เกิดการเสียหายเนื่องจากแรงสถิตของการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

### วิจารณ์

จากผลการวิจัยผลความคลาดเคลื่อนของผลระยะการเสี้ยวรูปของการทดสอบชิ้นงานจริงกับผลของการวิเคราะห์การเสี้ยวรูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับ 13.05 เปอร์เซ็นต์ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน ดังนี้

#### ด้านแนวทางการทำวิจัย (Man)

- ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่นตัวสูง ดังนั้นส่งผลให้ผู้วิจัยทำวัดขนาดชิ้นงานคลาดเคลื่อนได้

- ความชำนาญในการใช้อุปกรณ์การวัดต่างๆ ส่งผลให้ผู้ทำวัดขนาดชิ้นงานคลาดเคลื่อนได้

#### ด้านเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย (Machine)

- ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ทำการวิจัยไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์งานวิจัยนี้ ส่งผลให้เกิดคลาดเคลื่อนได้

- ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การวัดที่ใช้ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดคลาดเคลื่อนได้

#### ด้านวัสดุชิ้นงานที่ใช้ทำการวิจัย (Material)

- สูตรยางที่ใช้ขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบเป็นสูตรยางที่เป็นลิขสิทธิ์ของลูกค้า แต่สูตรยางที่นำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางเป็นสูตรยางที่พัฒนาขึ้นในประเทศไทย ซึ่งสูตรยางทั้งสองมีความแตกต่างกัน

ด้านวิธีการที่ใช้ทำการวิจัย

- วิธีการที่ใช้ทำการวัดชิ้นงานไม่เหมาะสมกับงานวิจัย ส่งผลให้เกิดคลาดเคลื่อนได้



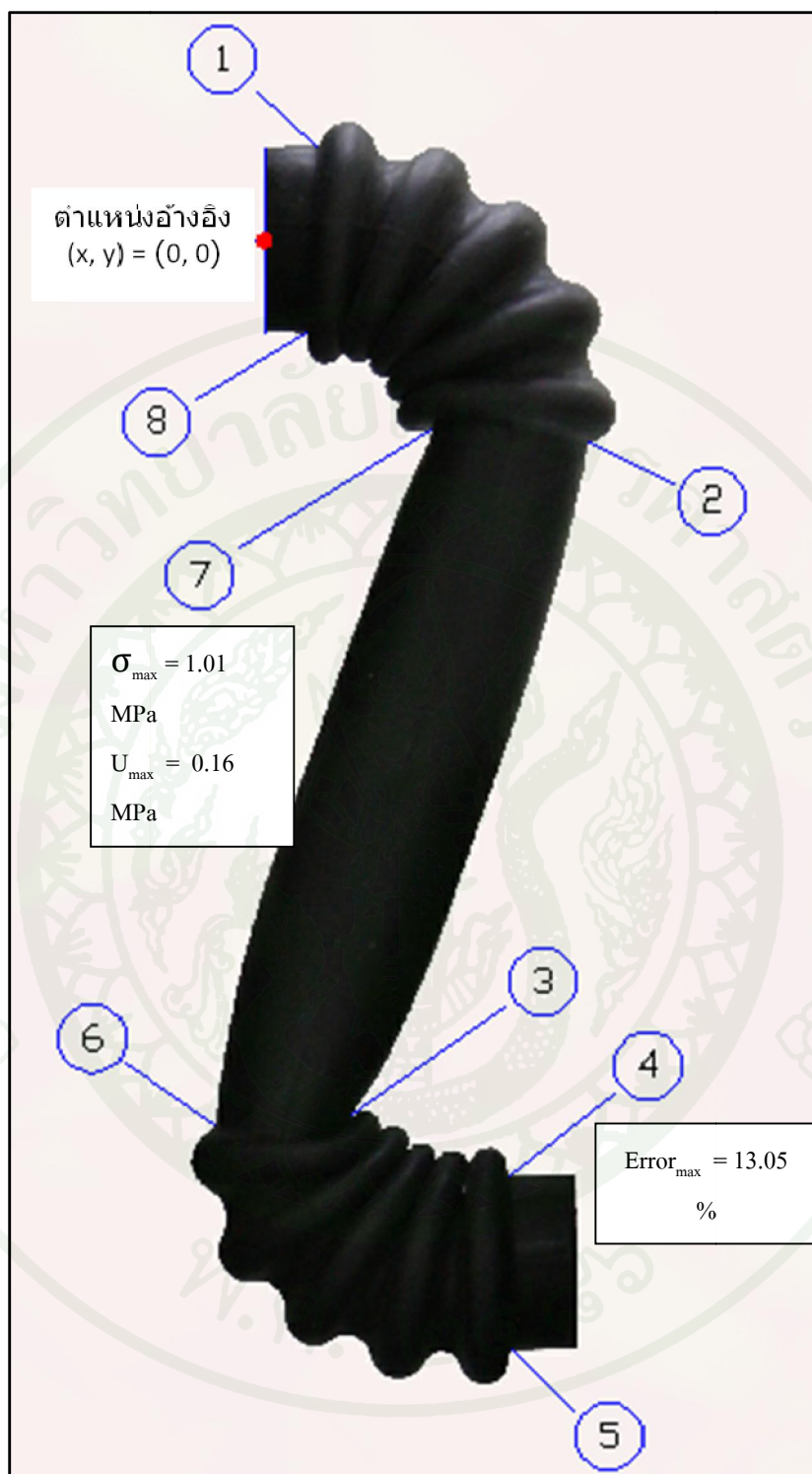
## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมรถยนต์มีการใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากวัสดุประเภทยางเป็นจำนวนมาก เช่น ยางขอบประตูรถ ยางหุ้มเพลาทด ยางหุ้มสายไฟ เป็นต้น ซึ่งการออกแบบชิ้นงานของวัสดุที่ผลิตจากวัสดุประเภทยางมีความซับซ้อนมาก ผู้วิจัยจึงนำเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยและเทคโนโลยีช่วยในการออกแบบทางคอมพิวเตอร์ โดยผู้วิจัยเลือกชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะมาทำการออกแบบ ซึ่งมีราคาสูงมากเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลเกิดขีดจำกัดทางการตลาด เป็นผลให้ทางบริษัทต้องการออกแบบผลิตภัณฑ์ขึ้นมาทดแทน

วิธีการทางเทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยและเทคโนโลยีช่วยในการออกแบบทางคอมพิวเตอร์ออกแบบชิ้นงานยางหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะ ภาวะที่กระทำกับชิ้นงานเป็นแบบการเคลื่อนที่จำลองการใช้งานจริง ซึ่งจากการเคลื่อนที่จะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป และผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการเสียรูปของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับการเสียรูปจริงของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยเลือกใช้ลิเมนต์รูปทรง 3 มิติ (Hex Element) ชนิดลิเมนต์แบบเฮร์แมนส์ลิเมนต์ (Hermann Element) ขนาดของลิเมนต์เท่ากับ 12 และแบบจำลองสมการอ็อกเคนลำดับที่ 3

จากผลการเปรียบเทียบการเสียรูปของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์กับการเสียรูปจริงของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 13.05 เปอร์เซ็นต์ ค่าดังกล่าวเป็นที่ยอมรับได้ในงานวิจัยนี้ และเมื่อค่าการเสียรูปของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์มีความน่าเชื่อถือส่งผลให้ค่าความเค้นวอนนิสและพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงมีความน่าเชื่อถือ โดยค่าความเค้นวอนนิสสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเท่ากับ 1.01 เมกะปาสคาล และพลังงานสะสมในการเปลี่ยนรูปทรงเท่ากับ 0.16 เมกะปาสคาล ซึ่งสรุปได้ดังภาพที่ 76



ภาพที่ 76 แสดงตำแหน่งของการเกิดความสั่นไหวต่างๆ

### ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยการประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยในการออกแบบขงหุ้มสายไฟระหว่าง  
ประตูและตัวถังของรถกระบะเป็นการวิเคราะห์เบื้องต้น ซึ่งนักวิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อทำการวิจัย  
ต่อไป ดังนี้

1. วิเคราะห์ชิ้นงานในรูปภาระแรงกระทำแบบแรงพลวัต (Dynamic Load)
2. วิเคราะห์เรื่องพลังงานความล้าที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน (Fatigue Load)
3. วิเคราะห์เรื่องพลังงานการฉีกขาดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน (Tearing Energy)
4. วิเคราะห์เรื่องการใช้งานเมื่อประกอบร่วมกับสายไฟ (Full Assembly)
5. วิเคราะห์ออกแบบขงหุ้มสายไฟระหว่างประตูและตัวถังของรถกระบะแบบใหม่ (New Designs)

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ธัญญา เกียรติวัฒน์. 2548. การออกแบบเครื่องจักรกล 1. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

ไพโรจน์ จิตธรรม และศิระ มีศฤงคาร. 2553. การออกแบบและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์. ใน การอบรมเทคโนโลยียาง. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ศาลายา), นครปฐม.

พงษ์ธร แซ่อูย. 2548. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ปทุมธานี.

ณัฐวิทย์ วัฒนสกุลพงศ์ และอริสรา ชัยกิตติรัตนนา. 2547. การศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบสองแกนของวัสดุประเภทยาง. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

รพีภัทร์ วีระชาติพิทักษ์ชน และบรรพต หอบรรลือกิจ. 2550. การวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของวัสดุไฮเปอร์วิสโคอีลาสติกโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 17 (1): 37-44.

วิภู พิวัฒน์ เจริญยุทธ เดชวายุกุล วิริยะทองเรือง และชลดา เลวิส. 2547. การทดสอบสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

Beer, P.F., Johoston, E.R.Jr., Dewolf, J.T. and D.F. Mazurek. 2009. **Mechanics of Materials**. 5th. The McGraw-Hill, USA.

Jaskulski, L. 2005. **Driveshaft Seal Boot Finite Element Analysis**. ATH - Albarus Transmissões Homocinéticas Ltda, Brazil.

Silva Botelho, T.D. and E. Bayraktar. 2009. Experimental and numerical study of damage initiation mechanism in elastomeric composites. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering** 36(1): 65-70.

Suripa, U. and A. Chaikittiratana. 2008. Finite element stress and strain analysis of a solid tyre. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering** 31(2): 576-579.

Suzumori, K., Endo, S. and T. Kanda. Optimal Design of Bending Pneumatic Rubber Actuator Based on Non-linear Finite Element Analysis. **IFTOMM World Congress 12th**. International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science. Besançon, France.

Dadkhah F. and A. Zahiri. 2004. **Finite Element Analysis of Silicone Rubber Spacers Used in Automotive Engine Control Modules**. Delphi Electronics and Safety, USA.

Axel Products Inc. 2004. **Elastomer (hyperelastic) Characterization. Physical Testing Services**. Available Source: <http://axelproducts.com/pages/hyperelastic.html>.

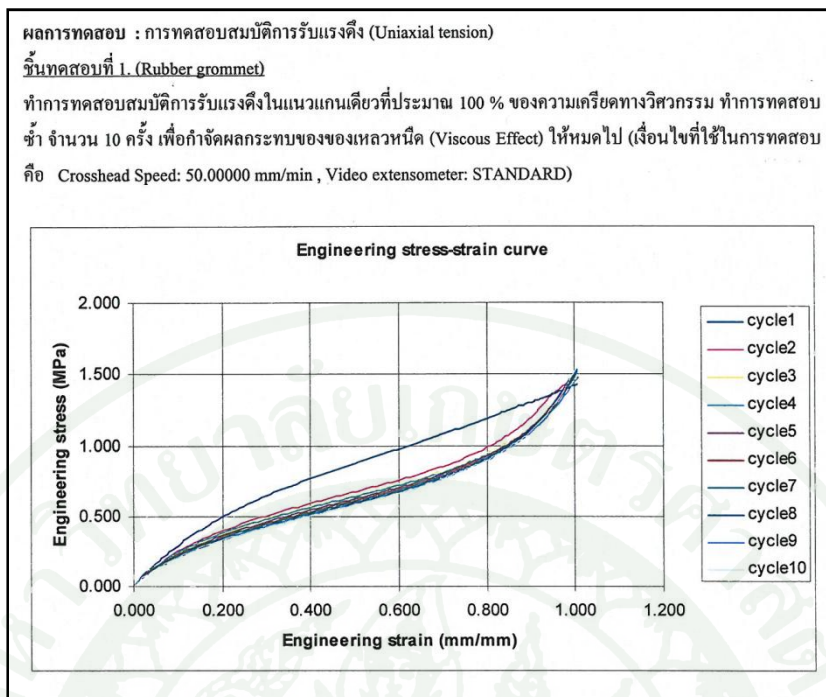
Cam, J.B., Verron, E. and B. Huneau. 2007. **Description of fatigue damage in carbon black**. Elsevier, France.

Dalrymple, T., Choi, J. and K. Miller. Elastomer Rate-Dependence a Testing and Material Modeling Methodology. **Technical Meeting of the Rubber Division of the American Chemical Society**. Rubber Division of the American Chemical Society Inc. USA.

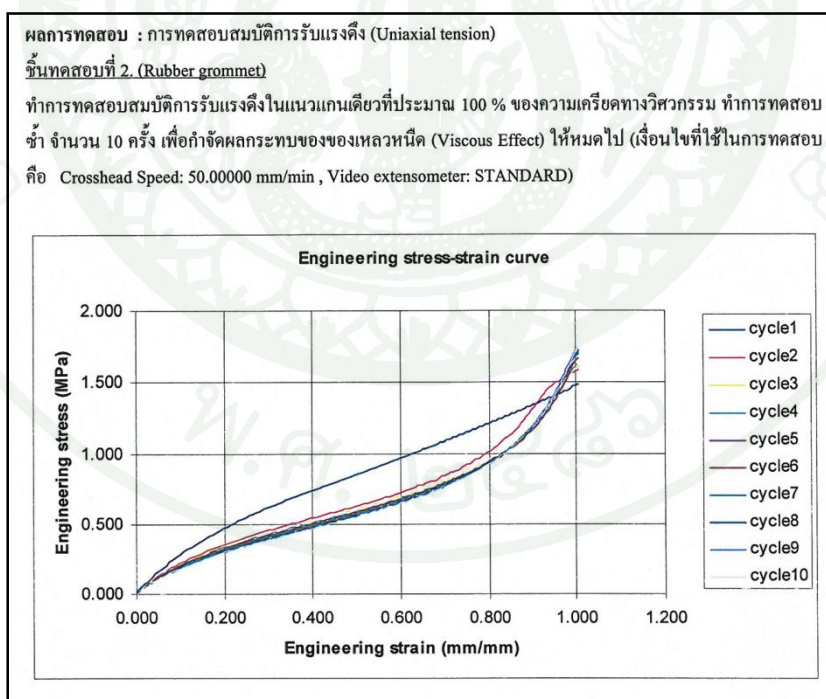


ภาคผนวก

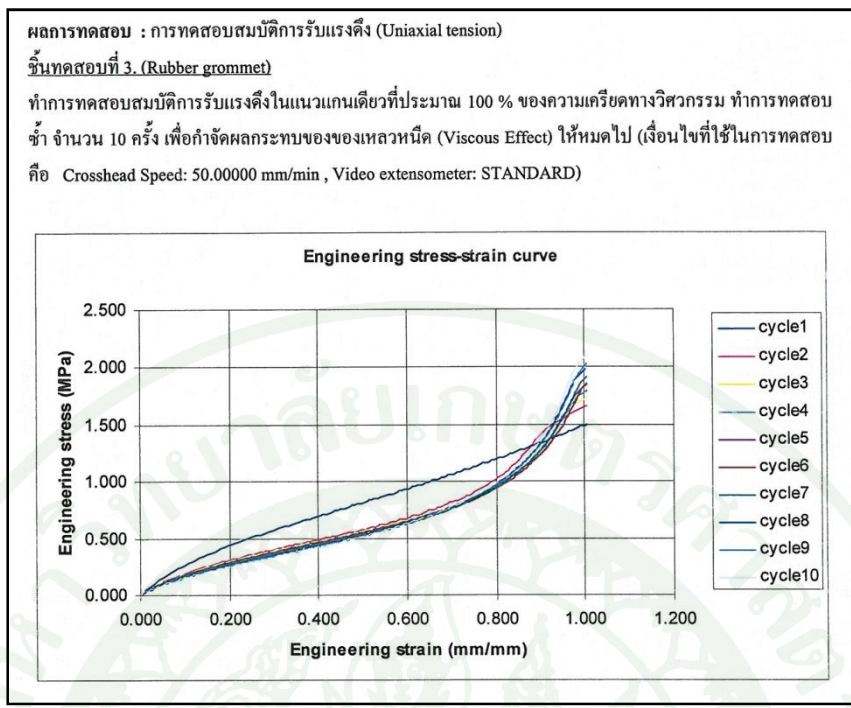




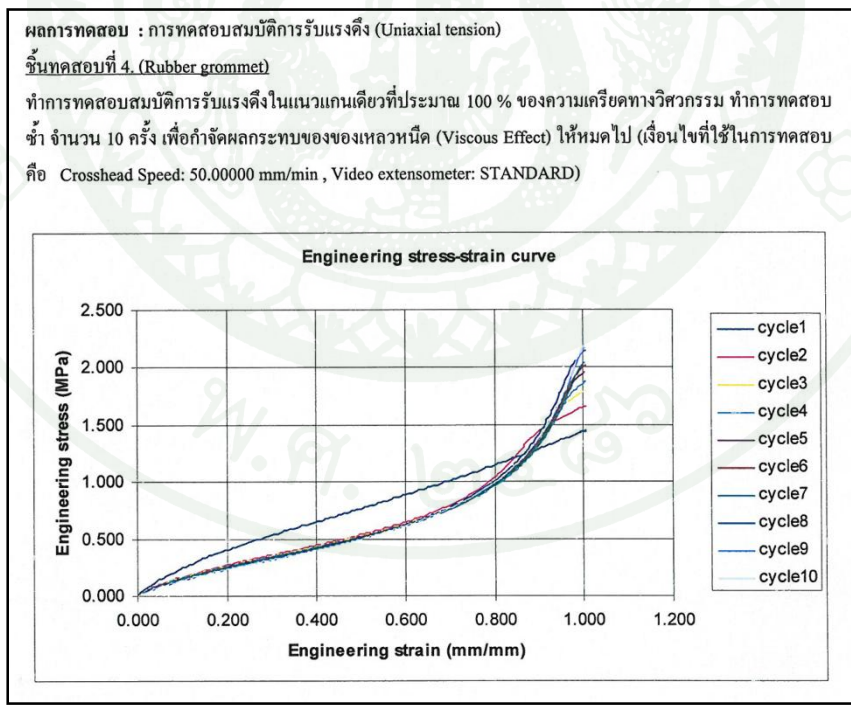
ภาพผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 1



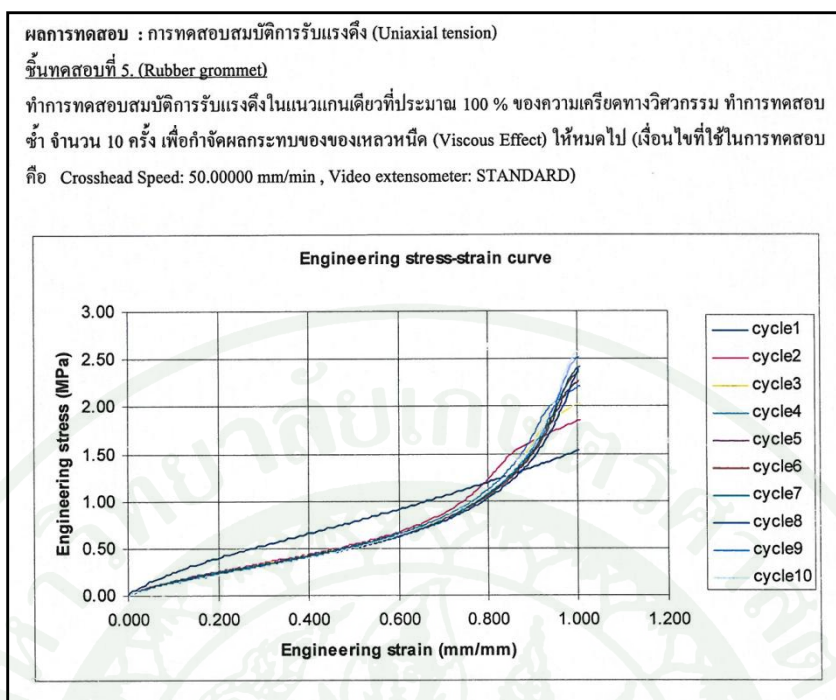
ภาพผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 2



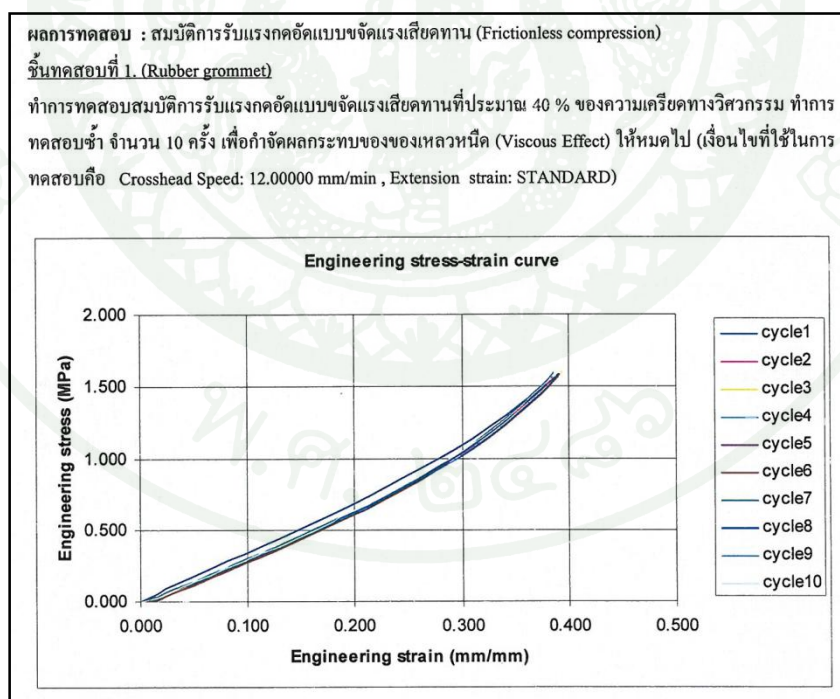
ภาพผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 3



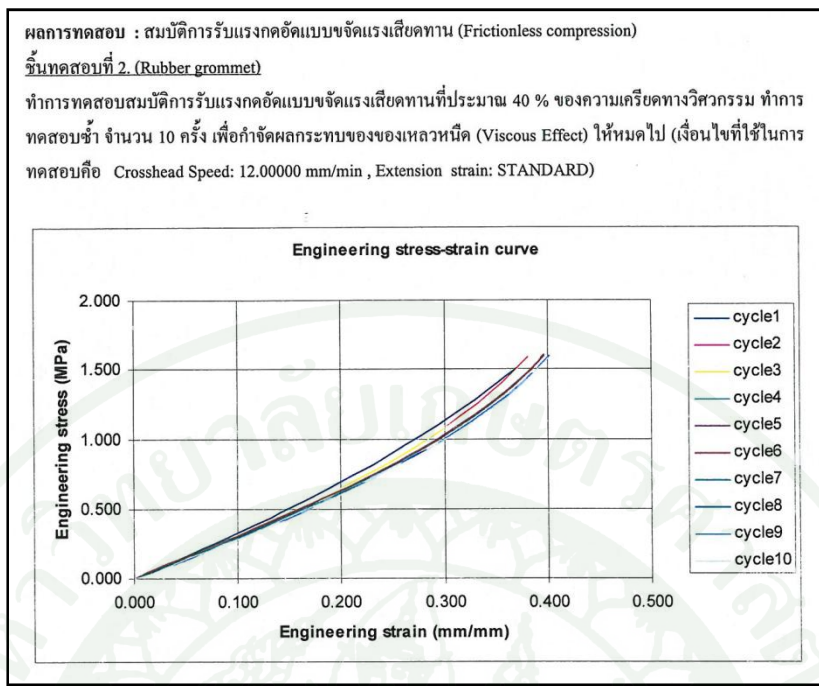
ภาพผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 4



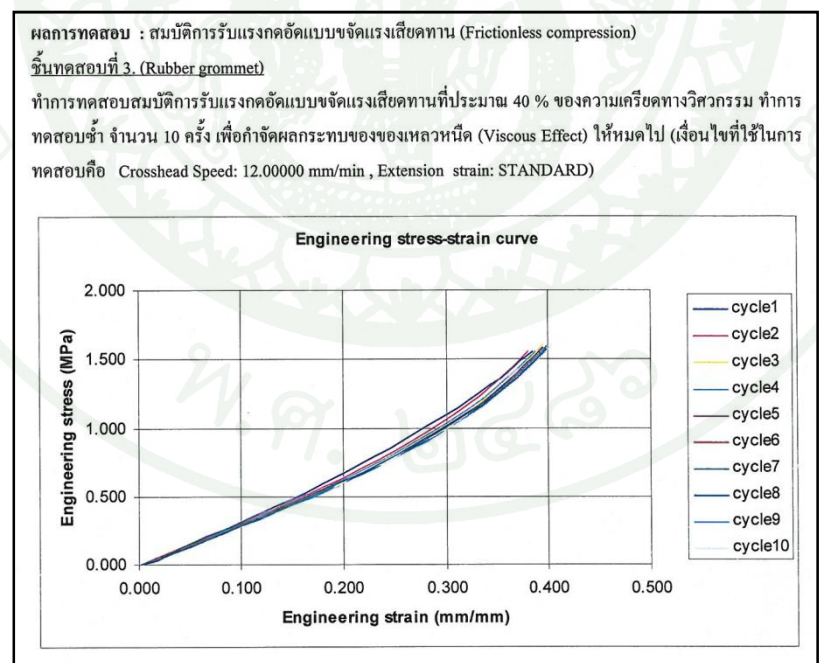
ภาพผนวกที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ 5



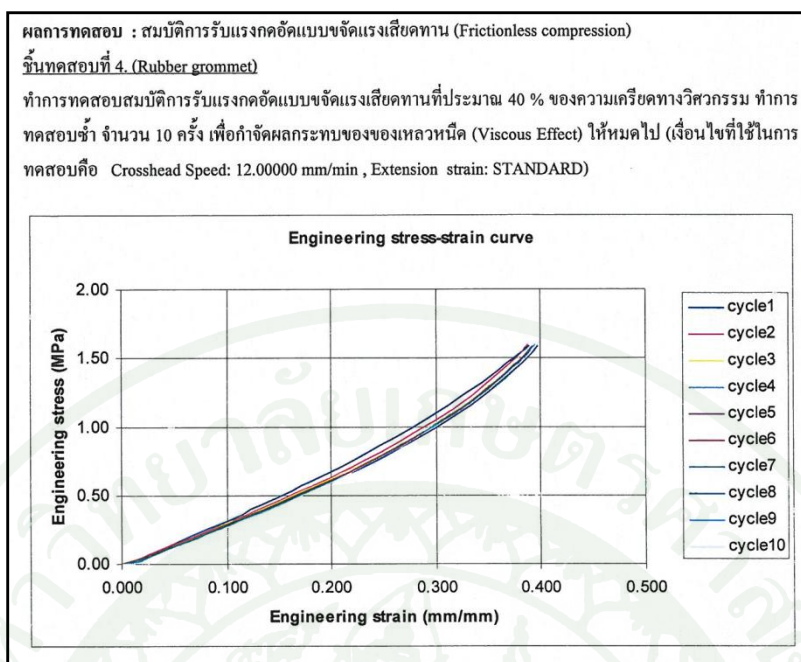
ภาพผนวกที่ 6 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 1



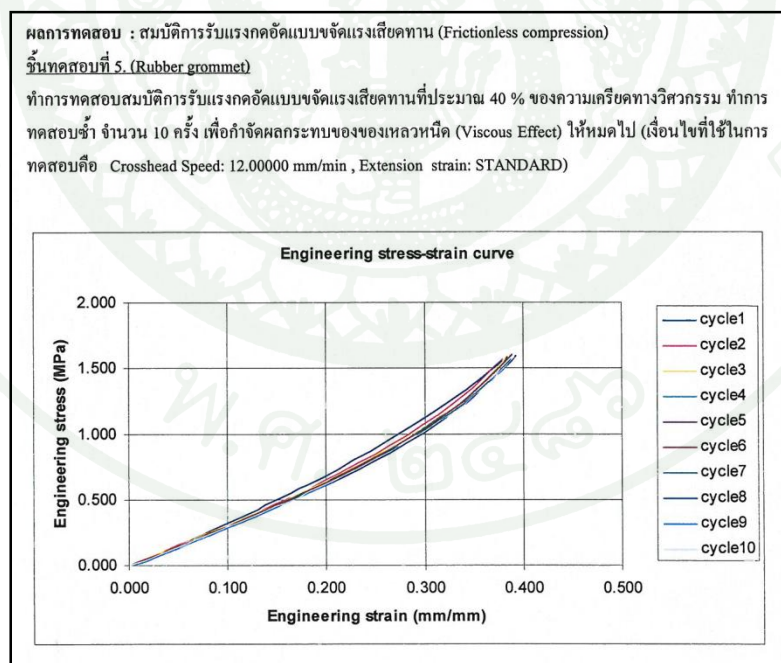
ภาพผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 2



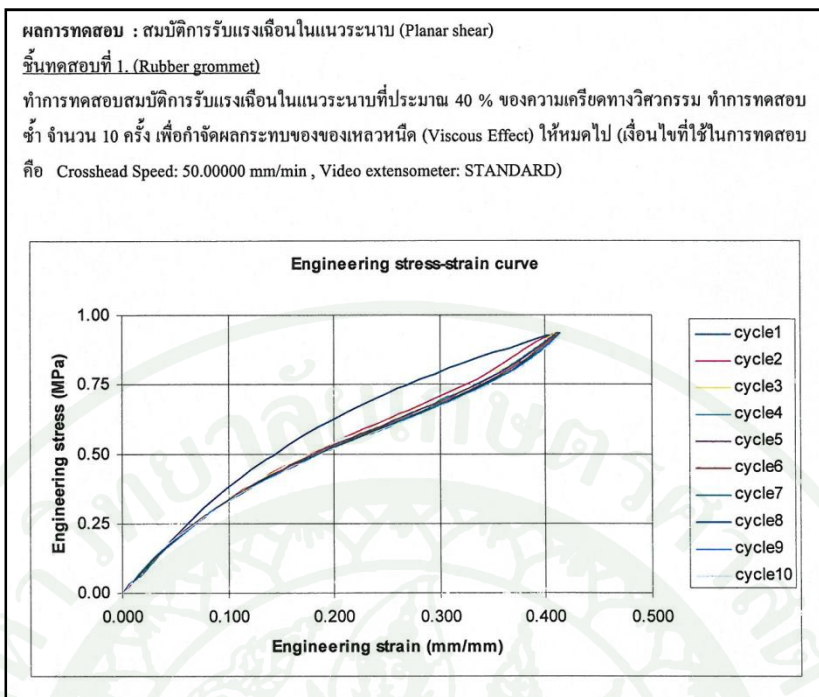
ภาพผนวกที่ ก8 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 3



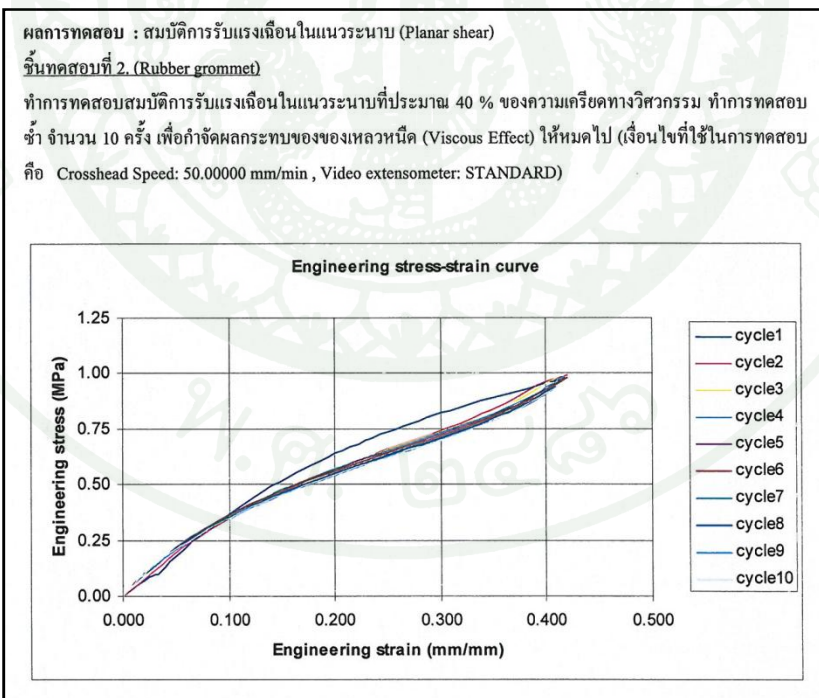
ภาพผนวกที่ ก9 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 4



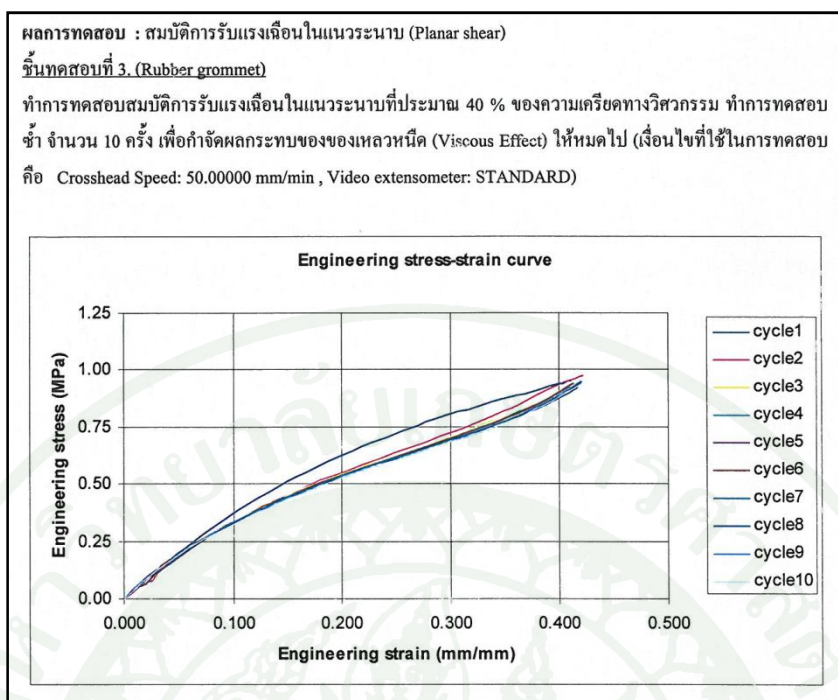
ภาพผนวกที่ ก10 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทานของชิ้นงานทดสอบที่ 5



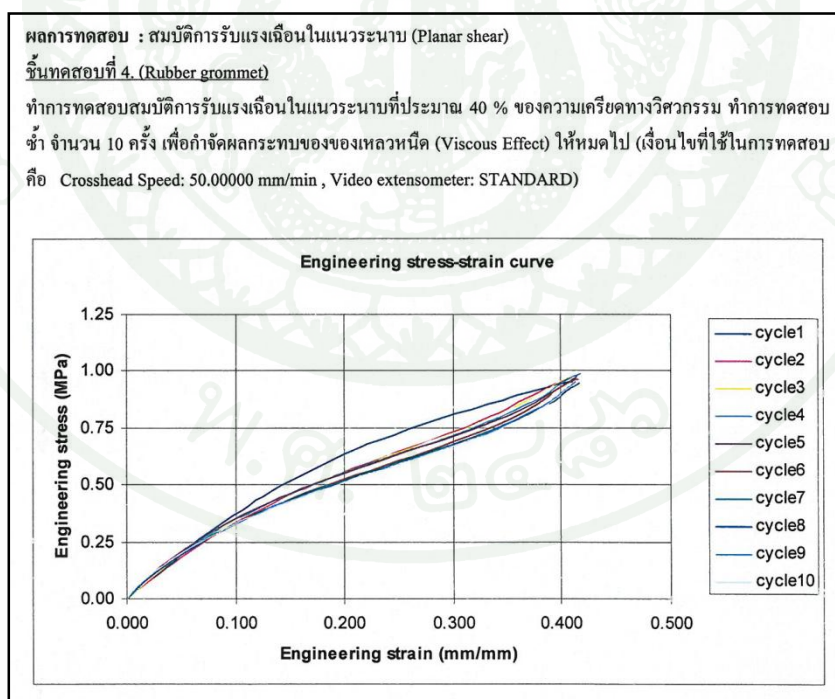
ภาพผนวกที่ ก11 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 1



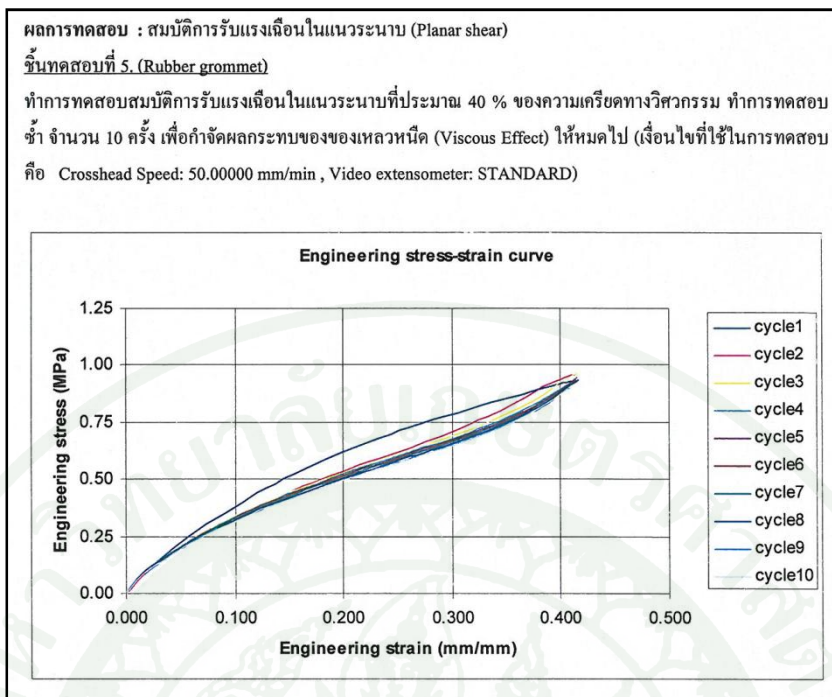
ภาพผนวกที่ ก12 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 2



ภาพผนวกที่ ก13 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 3

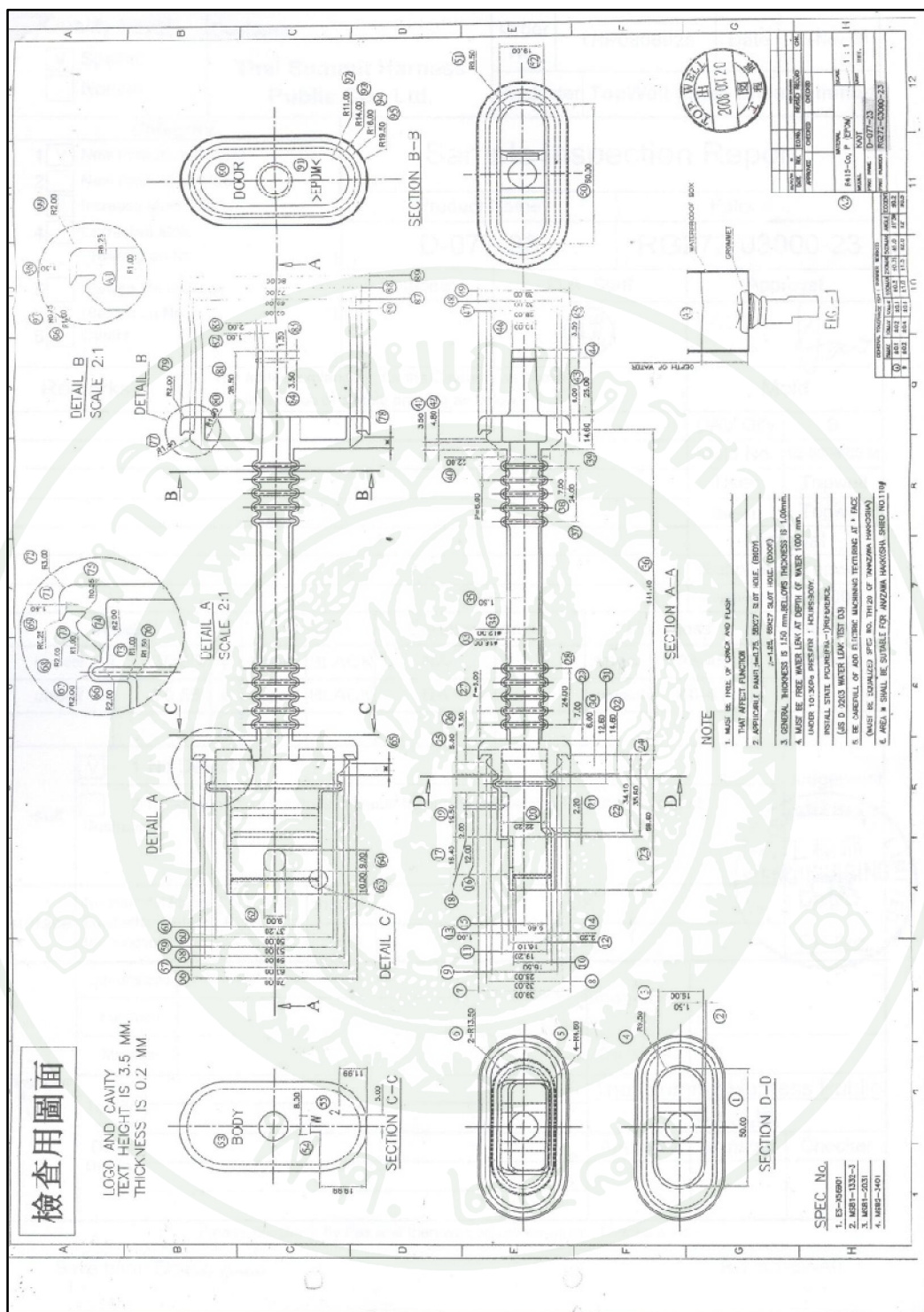


ภาพผนวกที่ ก14 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 4



ภาพผนวกที่ ก15 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบของชิ้นงานทดสอบที่ 5





ภาพผนวกที่ ข1 แบบชิ้นงาน 2 มิติ



**ภาคผนวก ค**

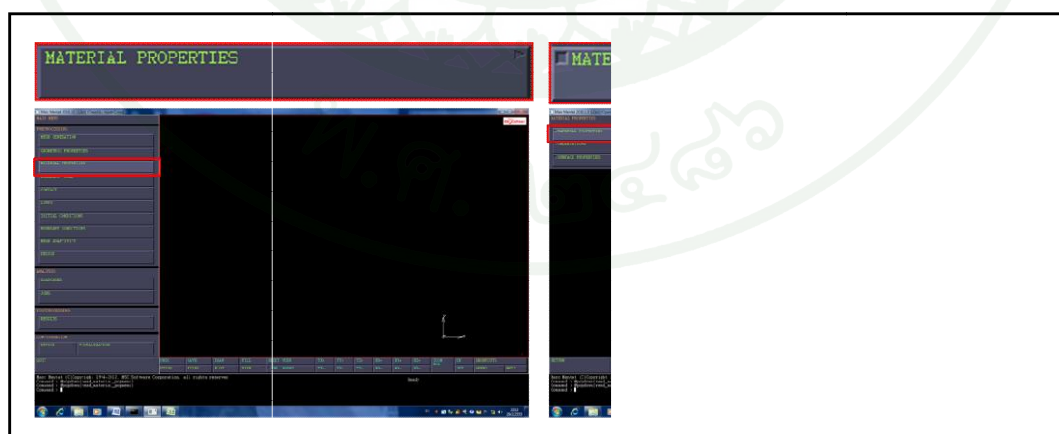
วิธีการวิเคราะห์เพื่อหาแบบสมการที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณ

## 1. การวิเคราะห์เพื่อหาแบบสมการที่เหมาะสม นักวิจัยได้ใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์



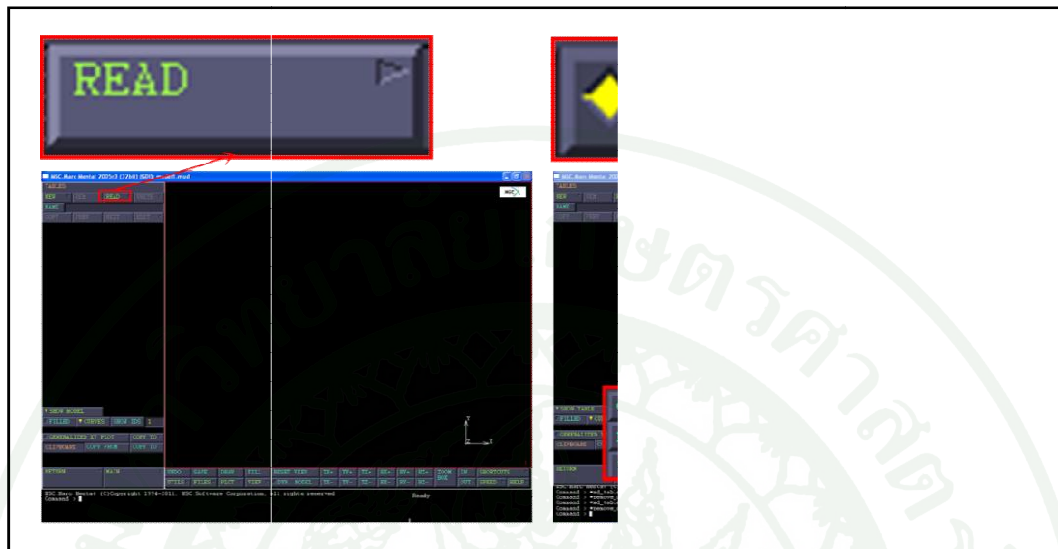
ภาพผนวกที่ ค1 โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาแบบสมการที่เหมาะสม

## 2. กำหนดข้อมูลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบโดยเลือกฟังก์ชันคุณสมบัติวัสดุ (Material Property) ดังภาพผนวกที่ ค2



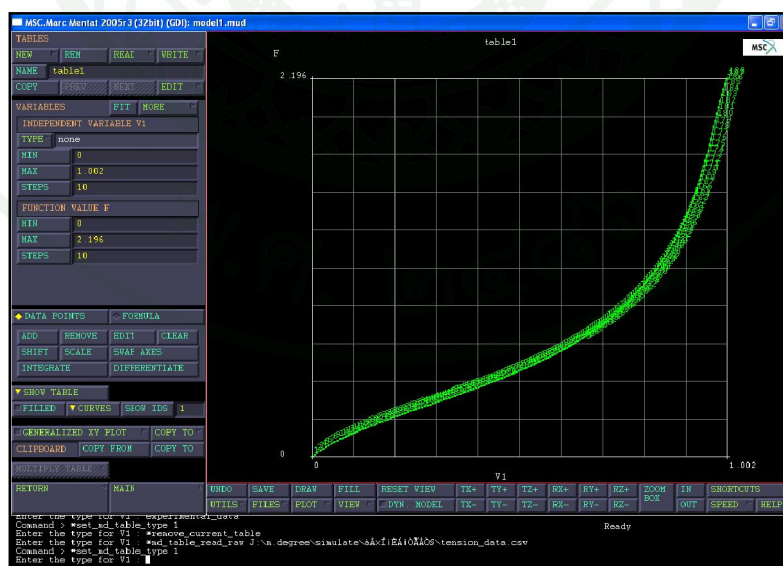
ภาพผนวกที่ ค2 หน้าต่างการเลือกฟังก์ชันคุณสมบัติวัสดุ

3. ทำการสร้างข้อมูลวัสดุโดยกำหนดข้อมูลเป็นแบบตาราง โดยใช้ฟังก์ชันดึงข้อมูล (Read) และสร้างชุดข้อมูลดิบ (Raw) แล้วเลือกชุดข้อมูลที่ต้องการสร้าง ดังภาพผนวกที่ ค3



ภาพผนวกที่ ค3 หน้าต่างการเลือกชุดข้อมูลเพื่อสร้างในโปรแกรม

4. เลือกชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ จะได้กราฟของชุดข้อมูลดังภาพผนวกที่ ค4 และทำการตั้งชื่อดังภาพผนวกที่ ค5

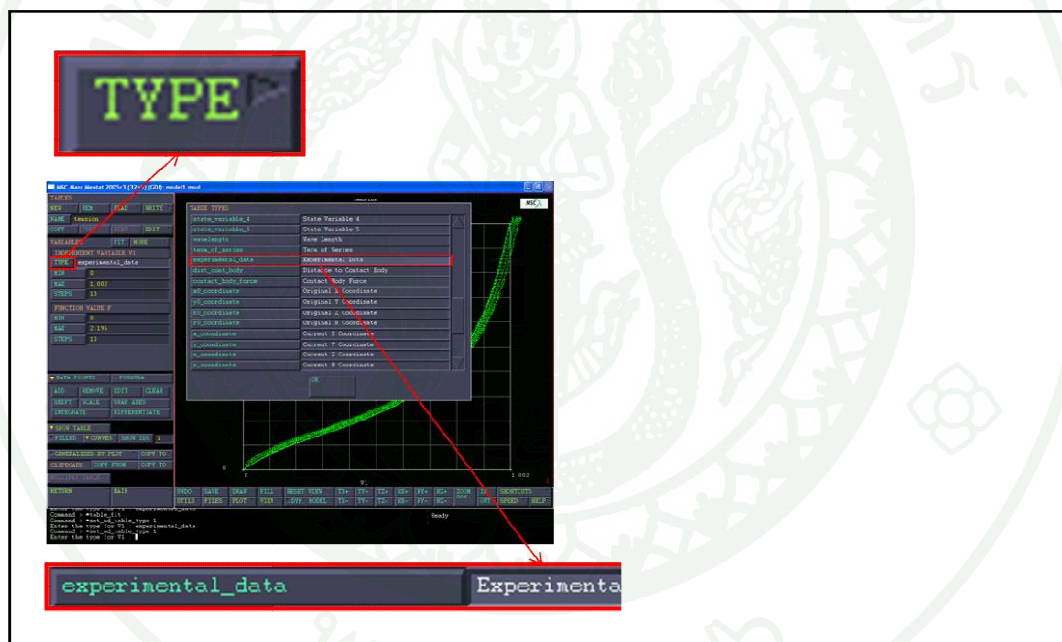


ภาพผนวกที่ ค4 หน้าต่างผลที่ได้จากการดึงข้อมูลชุดการทดสอบแรงดึง



ภาพผนวกที่ ค5 หน้าต่างผลการตั้งชื่อชุดข้อมูล

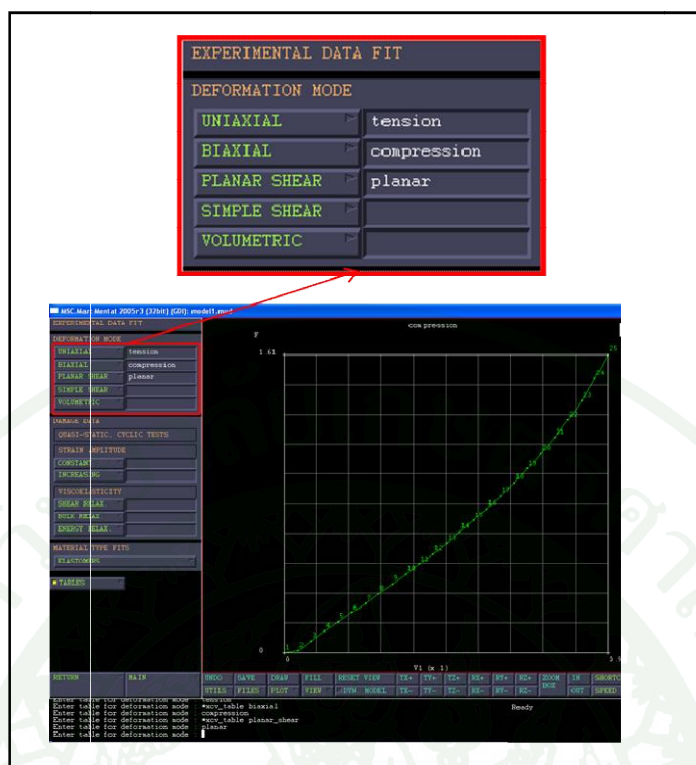
5. กำหนดค่าตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ในชุดข้อมูล โดยเลือกชนิด (Type) แบบข้อมูลทดลอง (Experimental Data) ดังภาพผนวกที่ ค6



ภาพผนวกที่ ค6 กำหนดค่าตัวแปรอิสระ

6. ทำการสร้างชุดข้อมูลด้วยวิธีการตามข้อ 3 - 5 จนครบทุกชุดข้อมูล

7. นำชุดข้อมูลทั้ง 3 ชุด ทำการปรับปรุงชุดข้อมูล (Experimental Data Fit)



ภาพผนวกที่ ค7 การปรับปรุงชุดข้อมูล

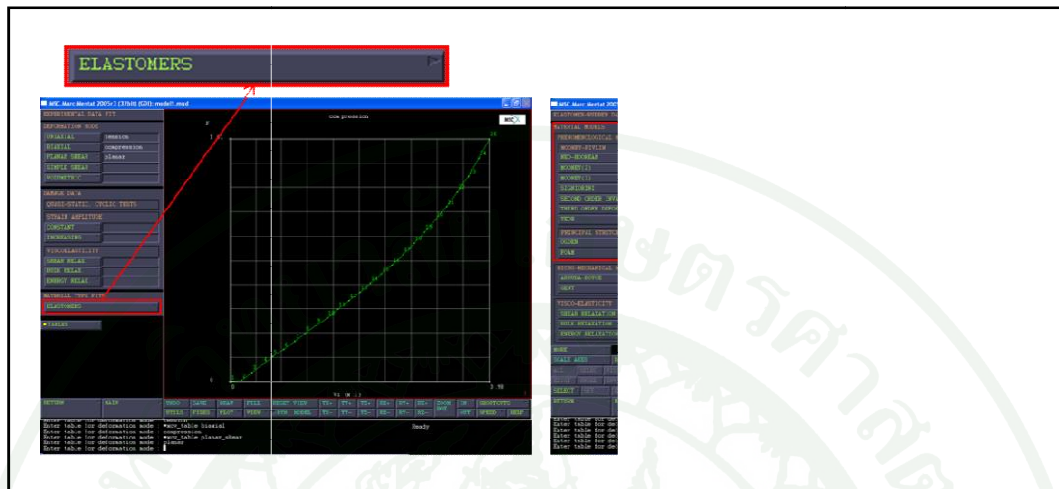
CURRENTLY DEFINED TABLES (EXPERIMENTAL DATA)

NAME	#V	INDEPENDENT VARIABLE TYPE(S)
tension	1	experimental_data
planar	1	experimental_data
compression	1	experimental_data

CLEAR OK

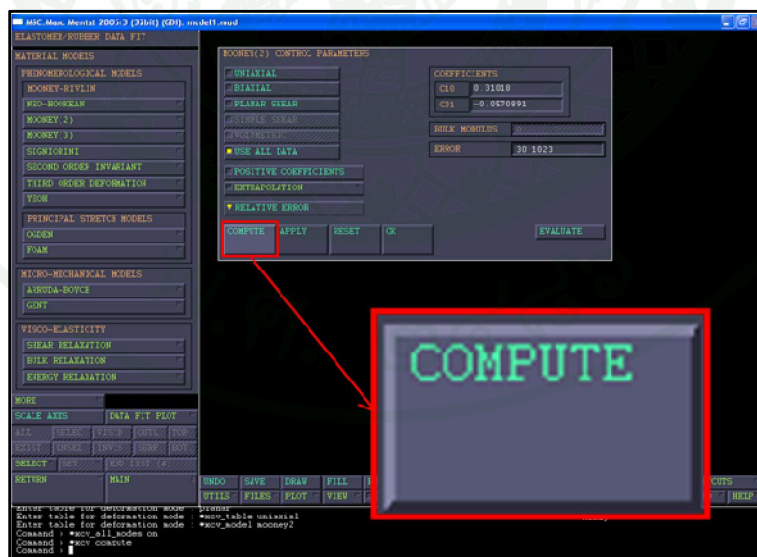
ภาพผนวกที่ ค8 หน้าต่างย่อยในการเลือกชุดข้อมูลที่สร้างขึ้น

8. เลือกฟังก์ชันของยาง (Elastomer) และเลือกแบบสมการจำลองพฤติกรรมของยางที่ต้องการวิเคราะห์ ดังภาพผนวกที่ ค9



ภาพผนวกที่ ค9 เลือกฟังก์ชันของยางและแบบจำลองพฤติกรรมของยาง

9. ทำการคำนวณ (Compute) โดยจะได้ค่าตัวแปรของสมการของยางที่ต้องการวิเคราะห์ และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของสมการ ดังภาพผนวกที่ ค10



ภาพผนวกที่ ค10 หน้าต่างในการคำนวณค่าตัวแปรของสมการ

## 10. บันทึกค่าการวิเคราะห์ที่ได้



ภาพผนวกที่ ค11 หน้าต่างของสมการจำลองมูนนี่รีฟลินระดับ 2 (Mooney (2))

11. ทำการวิเคราะห์แบบสมการของยางที่น่าสนใจโดยการทำตามวิธีการในข้อ 8-10 จนครบทุกสมการที่ต้องการวิเคราะห์

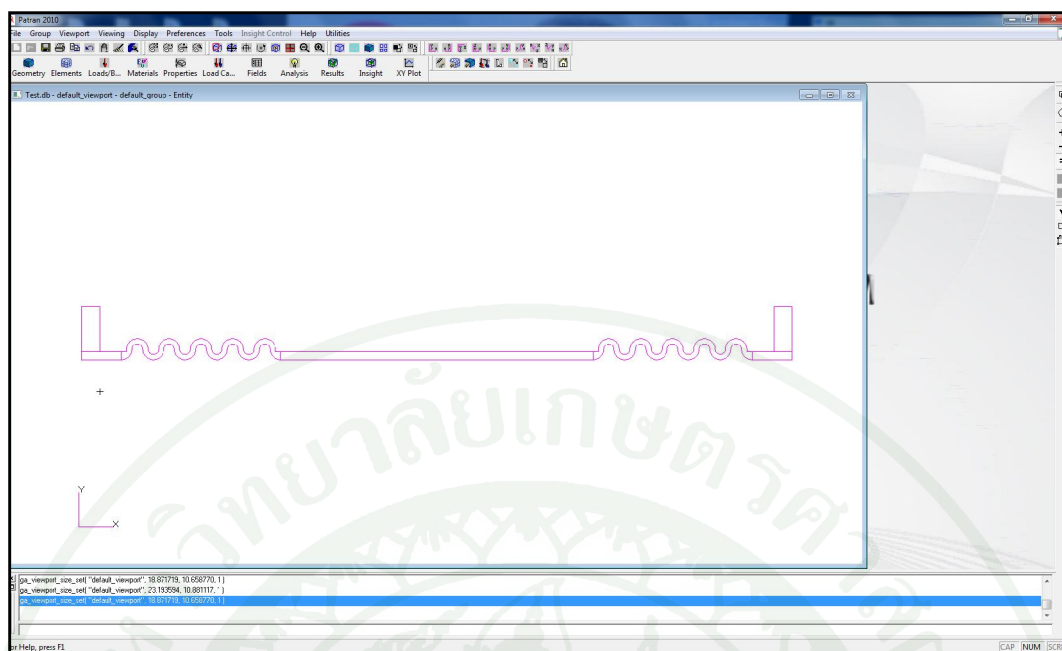


ภาพผนวกที่ ค12 สมการจำลองพฤติกรรมของยางที่สามารถวิเคราะห์ได้ในโปรแกรม



ภาคผนวก ง  
วิธีการวิเคราะห์หาขนาดอิเลเมนต์ที่เหมาะสม



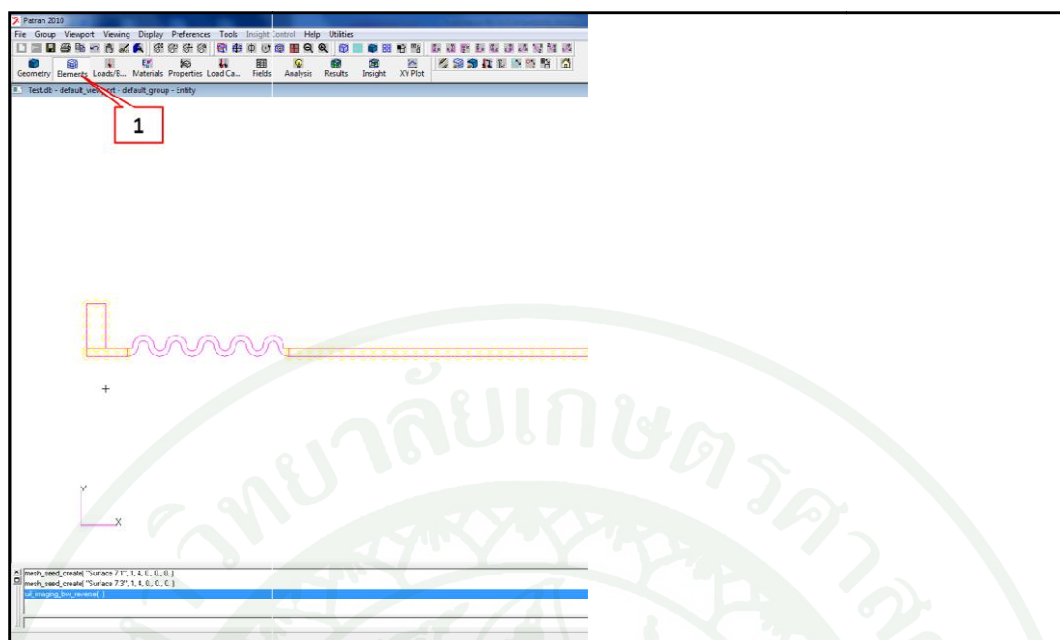


ภาพผนวกที่ 33 แบบชิ้นงานที่นำเข้าไปในโปรแกรม

3. กำหนดขนาดเงื่อนไขไอลิเมนต์ (Mesh Seed) ให้กับแบบชิ้นงานดังภาพผนวกที่ 34 โดยวิธีการกำหนดขนาดเงื่อนไขไอลิเมนต์ดังภาพผนวกที่ 35

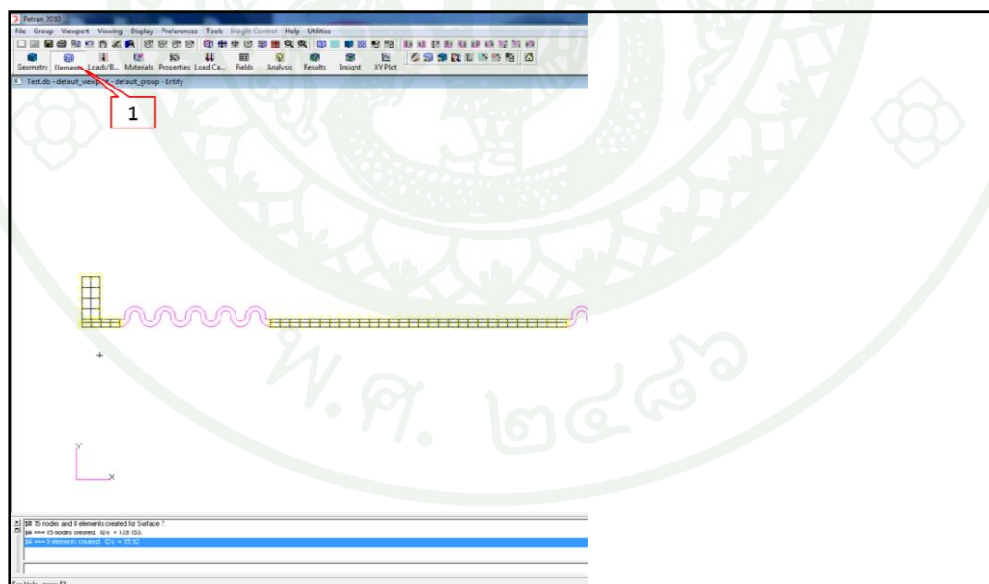


ภาพผนวกที่ 34 ขนาดเงื่อนไขไอลิเมนต์ของแบบชิ้นงาน



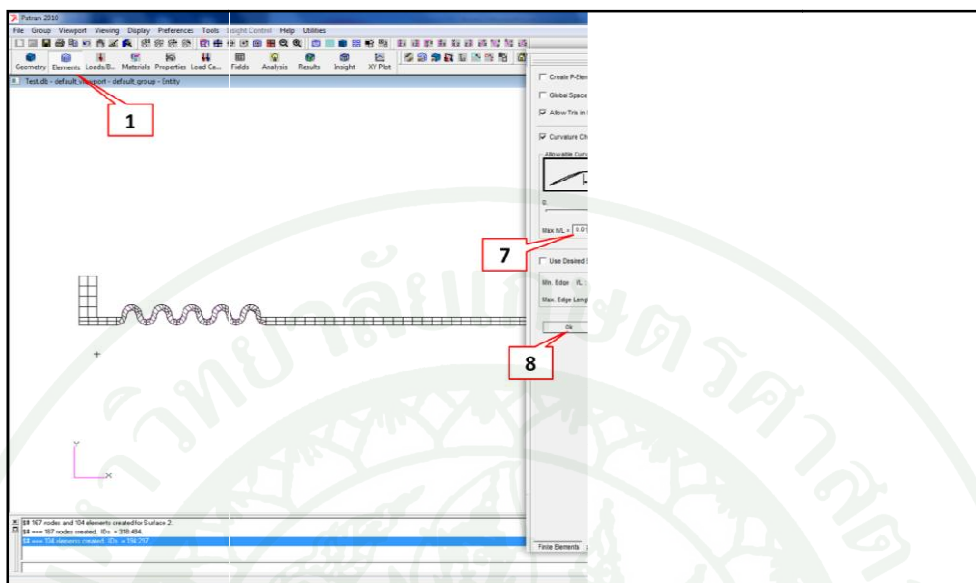
ภาพผนวกที่ 5 วิธีการกำหนดขนาดเงื่อนไขอิเลเมนต์

#### 4. สร้างอิเลเมนต์แบบทรงมิติเท่ากัน 2 มิติ (Iso Mesh) ในแบบชิ้นงาน



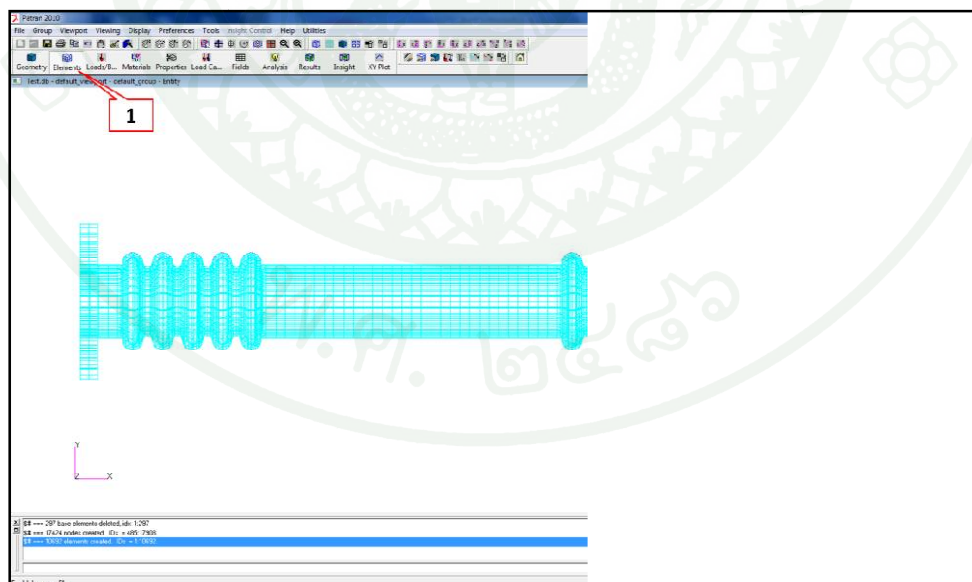
ภาพผนวกที่ 6 วิธีการสร้างอิเลเมนต์แบบทรงมิติเท่ากัน 2 มิติ

### 5. สร้างอิลิเมนต์แบบมิติไม่เท่ากัน 2 มิติ (Paver Mesh) ในแบบใช้งาน



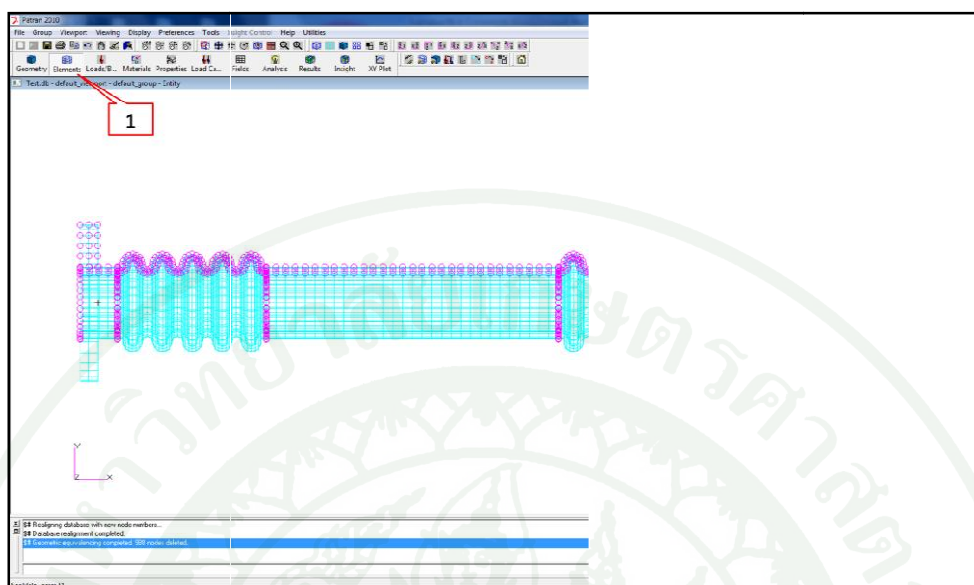
ภาพผนวกที่ 7 วิธีการสร้างอิลิเมนต์แบบทรงมิติไม่เท่ากัน 2 มิติ

### 6. ขี่นรูปอิลิเมนต์จากอิลิเมนต์ 2 มิติ เป็นอิลิเมนต์ 3 มิติ โดยวิธีการหมุนขี่นรูป (Sweep)



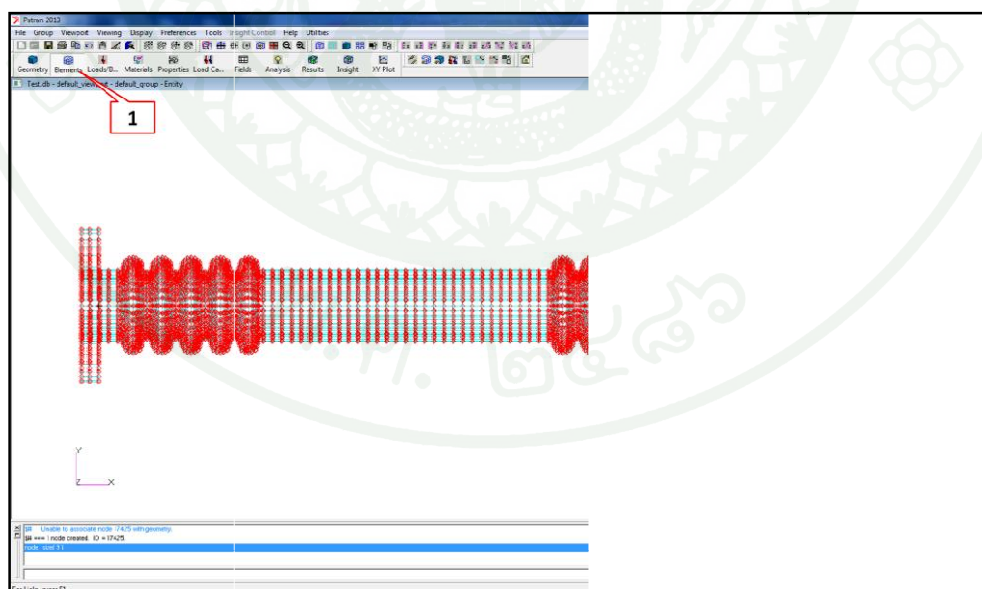
ภาพผนวกที่ 8 วิธีการขี่นรูปอิลิเมนต์โดยวิธีการหมุนขี่นรูป

## 7. เชื่อมต่อโหนด (Equivalence) ที่เกิดจากการขึ้นรูปโพลิเมนต์ 3 มิติ



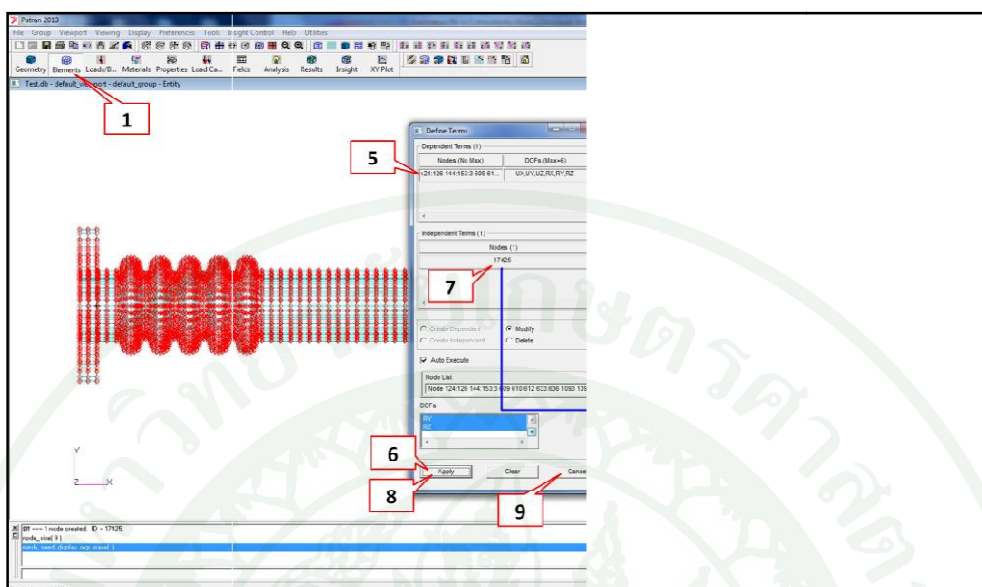
ภาพผนวกที่ 9 วิธีการเชื่อมต่อโหนด

## 8. สร้างโหนด (Node) ที่ตำแหน่ง [135, 0, 0] เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่

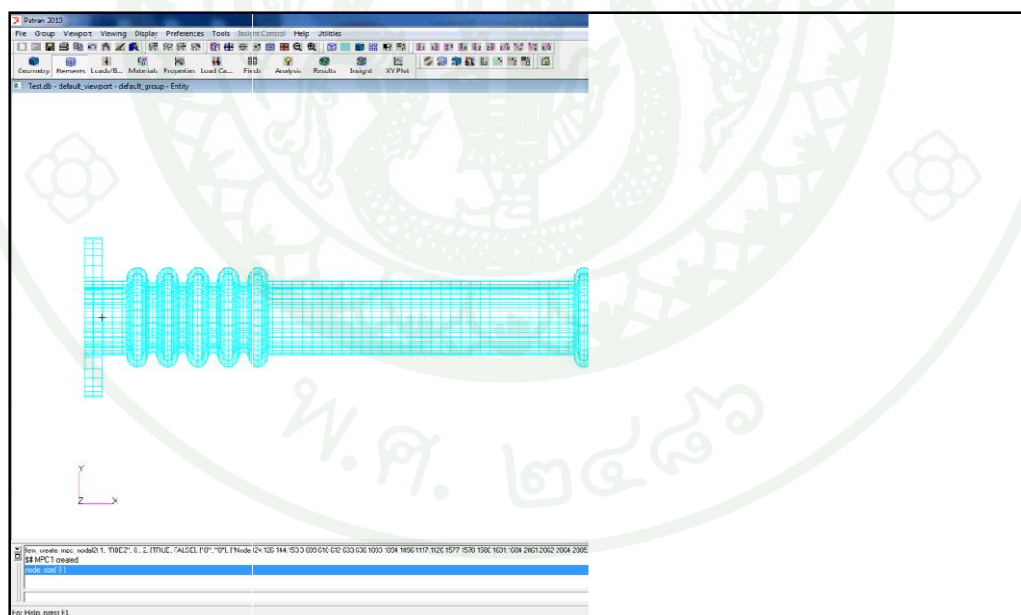


ภาพผนวกที่ 10 วิธีการสร้างโหนด

## 9. จัดกลุ่มโหนด (Multiple Point Control, MPC) เพื่อให้ง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไข

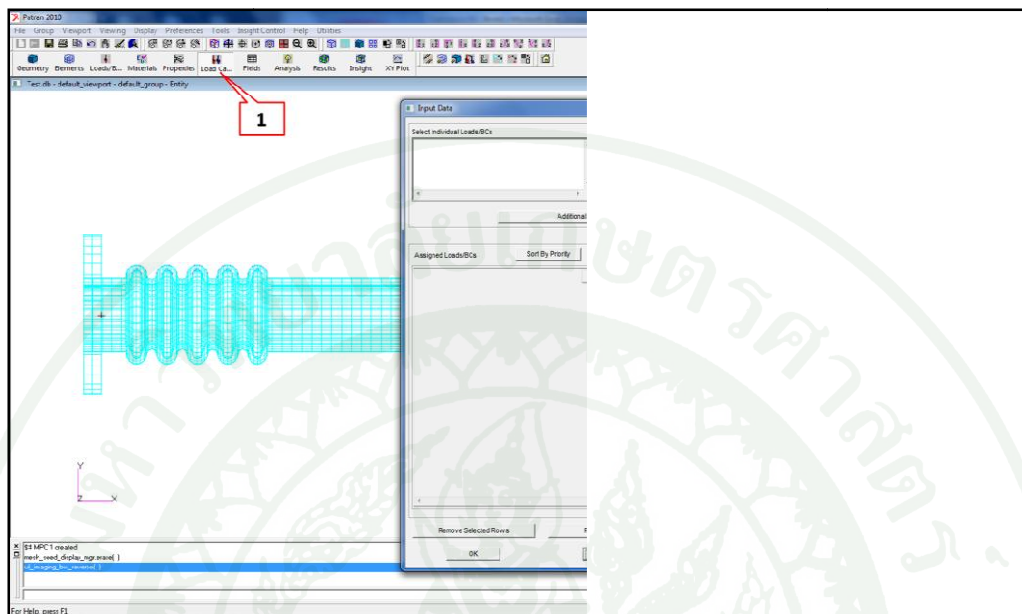


ภาพผนวกที่ 11 วิธีการจัดกลุ่มโหนด



ภาพผนวกที่ 12 ผลการกำหนดจัดกลุ่มโหนด

10. กำหนดให้เงื่อนไขในการวิเคราะห์เป็นเงื่อนไขที่ขึ้นกับเวลา เนื่องจากชิ้นงานนี้ กำหนดให้มีการเคลื่อนที่เป็น 2 กรณี

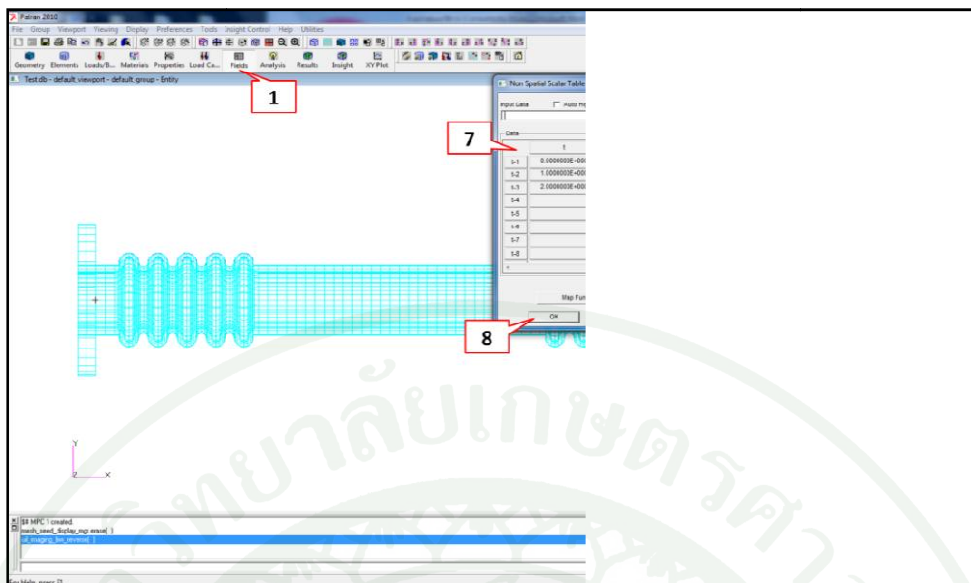


ภาพผนวกที่ 13 วิธีการกำหนดให้เงื่อนไขในการวิเคราะห์เป็นเงื่อนไขที่ขึ้นกับเวลา

11. กำหนดตัวแปรที่เป็นเงื่อนไขการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับเวลา ดังตารางที่ 1 และวิธีการกำหนดตัวแปรเป็น ดังภาพผนวกที่ 14

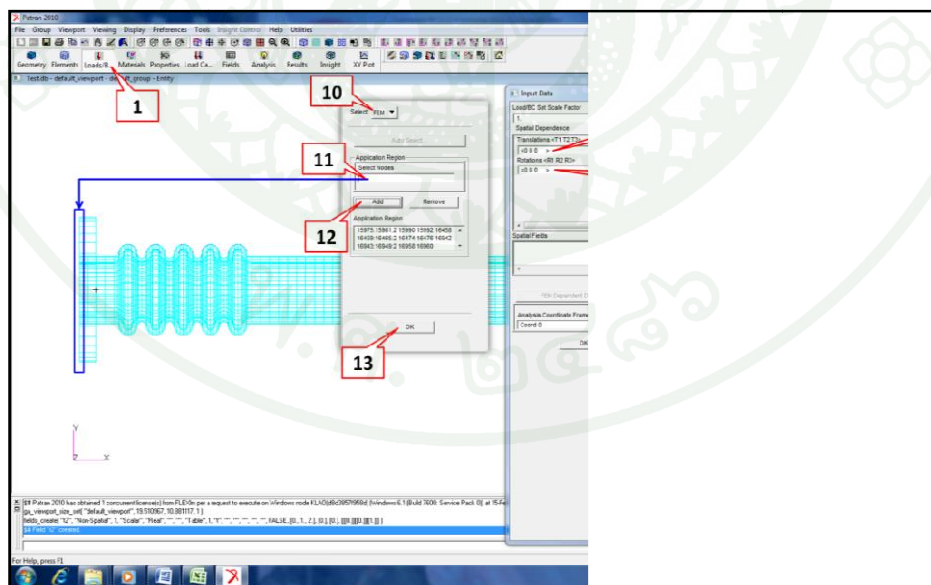
ตารางผนวกที่ 1 ตัวแปรที่เป็นเงื่อนไขการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับเวลา

หน่วยเวลาในการวิเคราะห์ของโปรแกรม	T1	T2
0	0	0
1	1	0
2	1	1

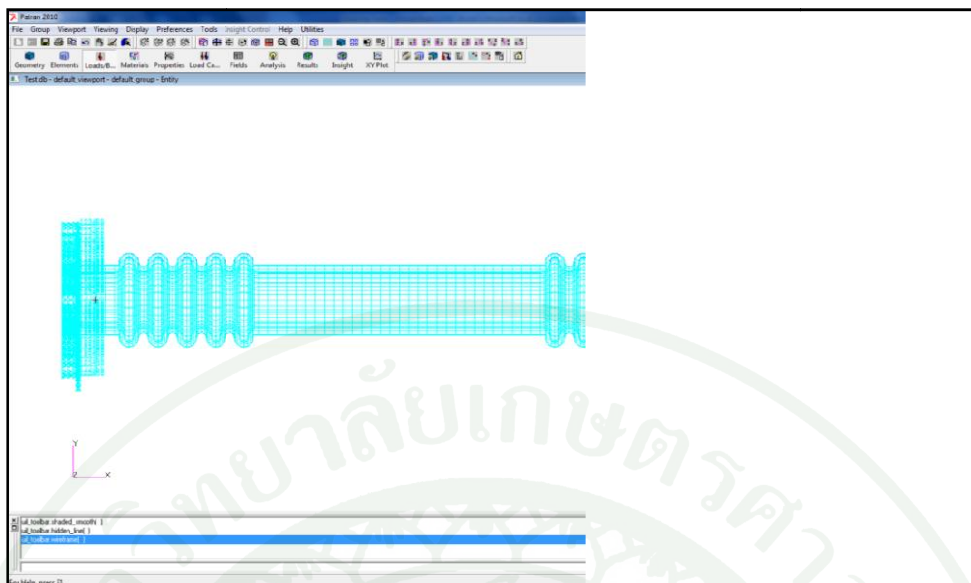


ภาพผนวกที่ 14 วิธีการกำหนดตัวแปรที่เป็นเงื่อนไขการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับเวลา

12. กำหนดเงื่อนไขการยึดติดไม่เคลื่อนที่ของชิ้นงาน โดยกำหนดให้ปลายชิ้นงานด้านซ้ายมือเป็นจุดที่ชิ้นงานยึดติดกับส่วนตัวถังรถยนต์ไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวในโปรแกรมเป็น ดังภาพผนวกที่ 15

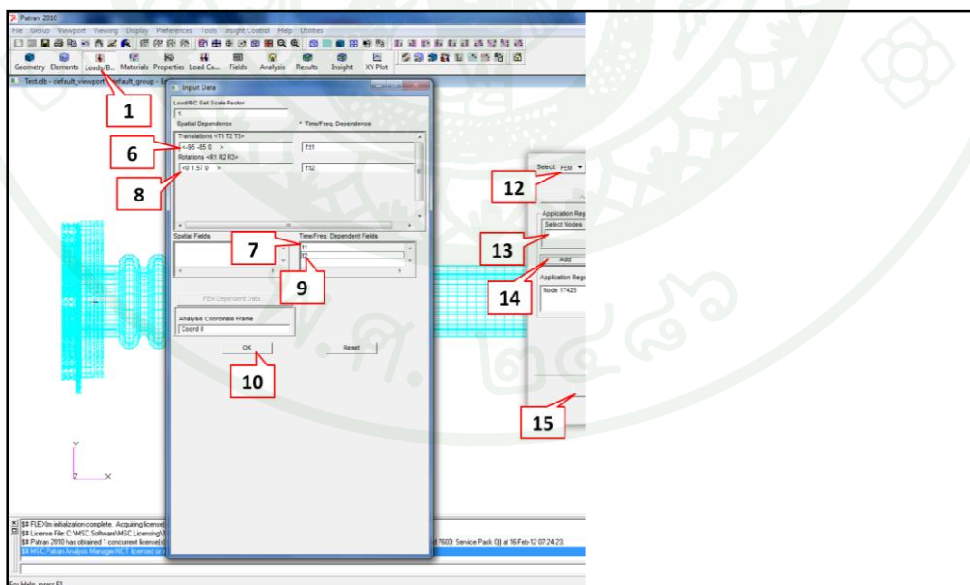


ภาพผนวกที่ 15 วิธีการกำหนดเงื่อนไขการยึดติดไม่เคลื่อนที่ของชิ้นงาน

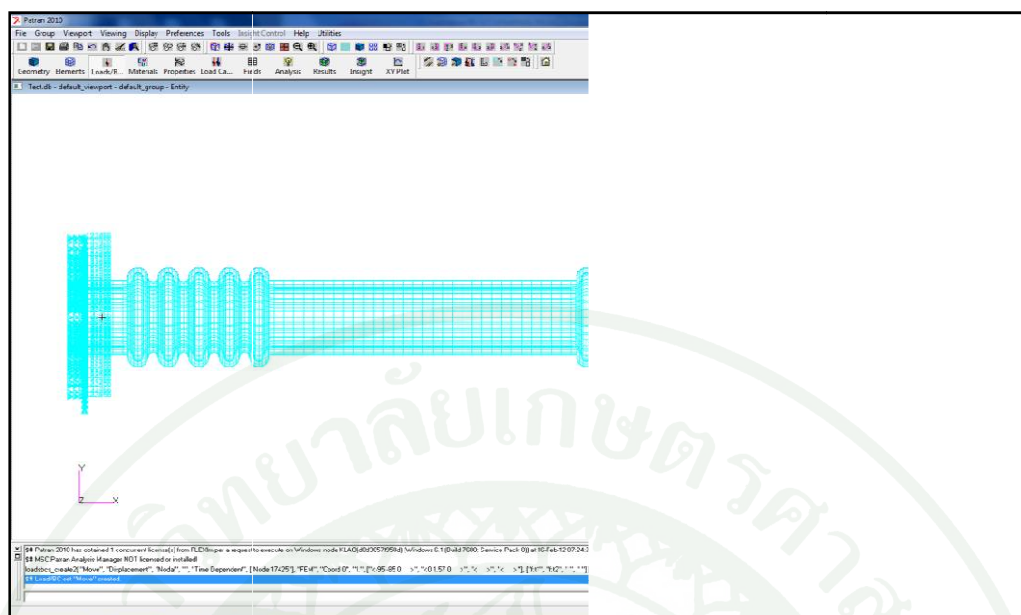


ภาพผนวกที่ 16 ผลการกำหนดเงื่อนไขการยึดติดไม่เคลื่อนที่ของชิ้นงาน

13. กำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน โดยกำหนดให้ปลายชิ้นงานด้านขวามือเป็นจุดที่ชิ้นงานทำการเคลื่อนที่เพื่อติดตั้งชิ้นงานเข้ากับประตูลอยนํ้า ซึ่งวิธีการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวเป็น ดังภาพผนวกที่ 17

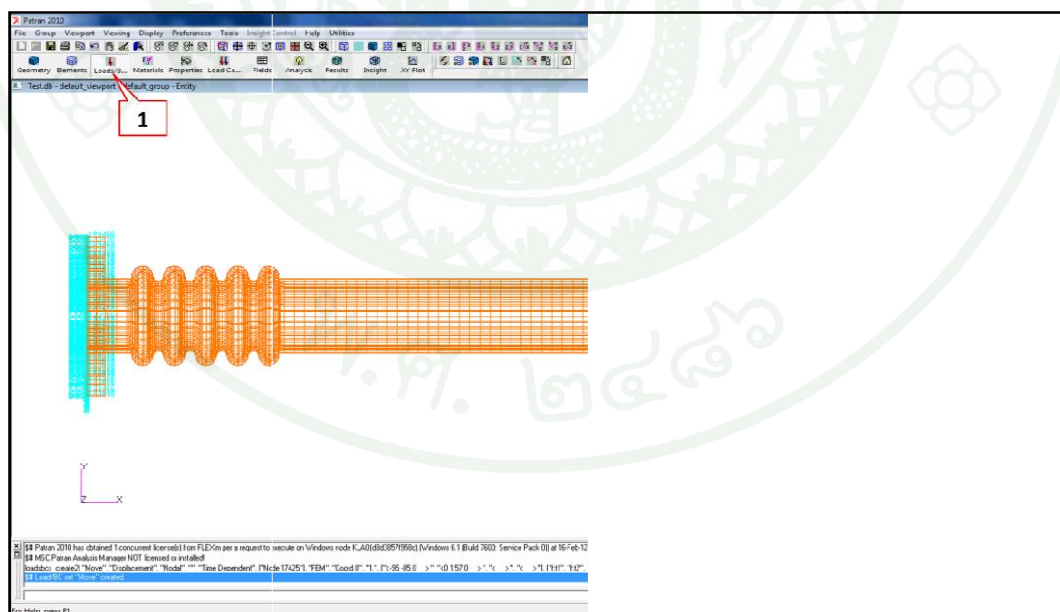


ภาพผนวกที่ 17 วิธีการกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

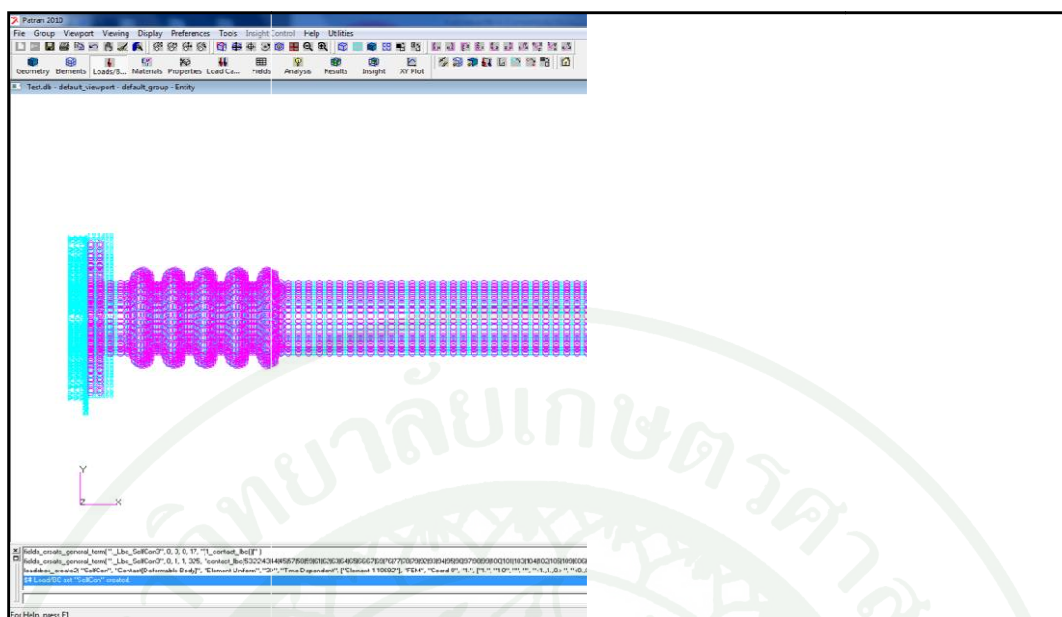


ภาพผนวกที่ 18 ผลการกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

14. การกำหนดการสัมผัส (Contact) เนื่องจากชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ มีเงื่อนไขที่การสัมผัส ดังนั้นจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบสัมผัส ซึ่งมีวิธี ดังภาพผนวกที่ 19

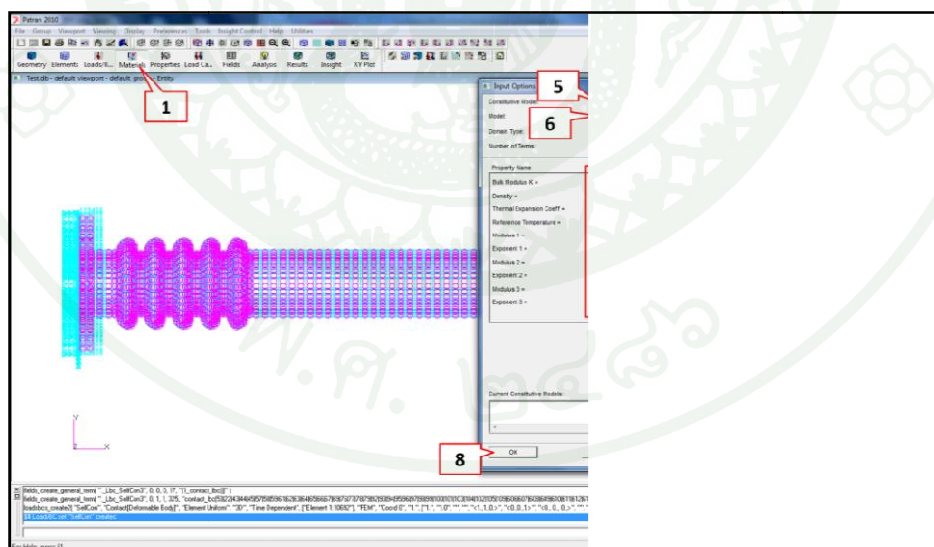


ภาพผนวกที่ 19 วิธีการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส



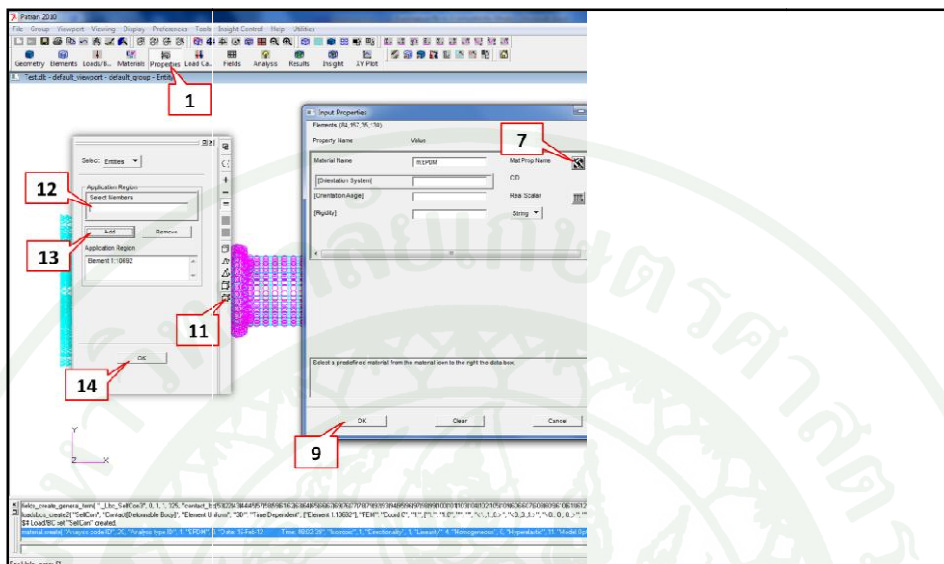
ภาพผนวกที่ 20 ผลการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

15. กำหนดสร้างข้อมูลวัสดุคียบางเอทริลิน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์ในโปรแกรม ซึ่งมีวิธีการดังภาพผนวกที่ 21



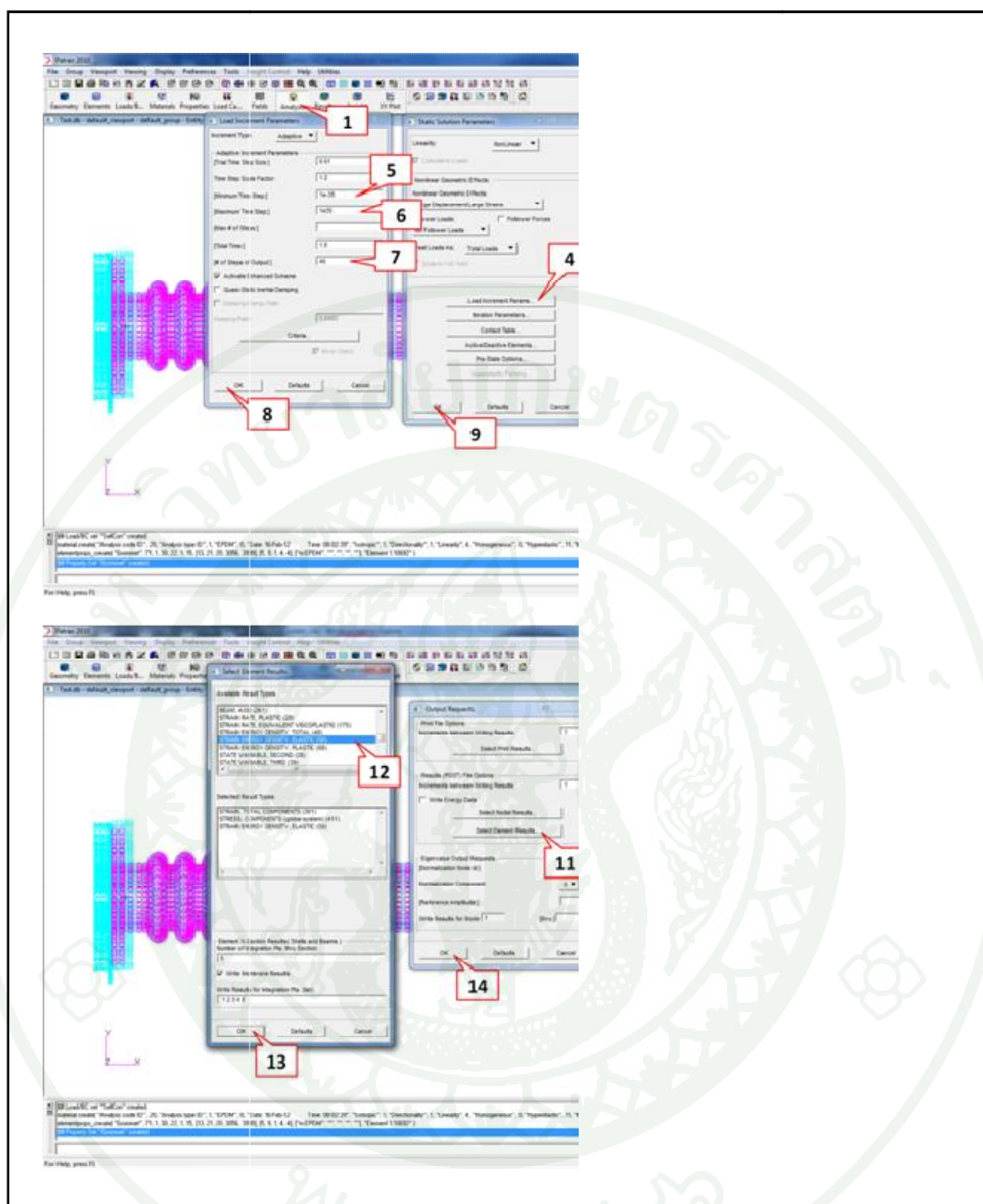
ภาพผนวกที่ 21 วิธีการกำหนดสร้างข้อมูลวัสดุคียบางเอทริลิน โพรพิลีน ไดอินมอนอเมอร์

16. กำหนดสมบัติชิ้นงาน ด้วยข้อมูลวัสดุคียบางที่สร้างขึ้นในหัวข้อที่ 13 ซึ่งมีวิธีการ ดังภาพผนวกที่ ง22



ภาพผนวกที่ ง22 วิธีการกำหนดสมบัติของชิ้นงาน

17. กำหนดสมบัติการวิเคราะห์ ซึ่งมีวิธีการ ดังภาพผนวกที่ ง23

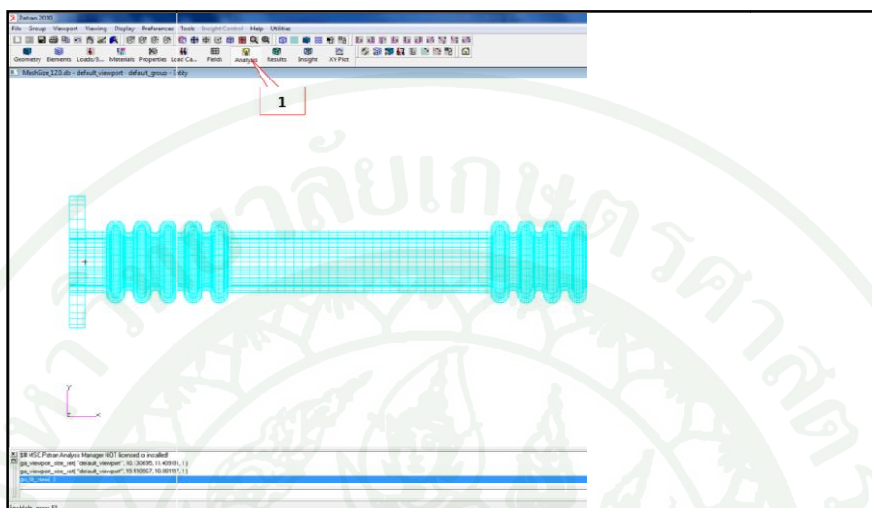


ภาพผนวกที่ 23 วิธีการกำหนดสมบัติการวิเคราะห์



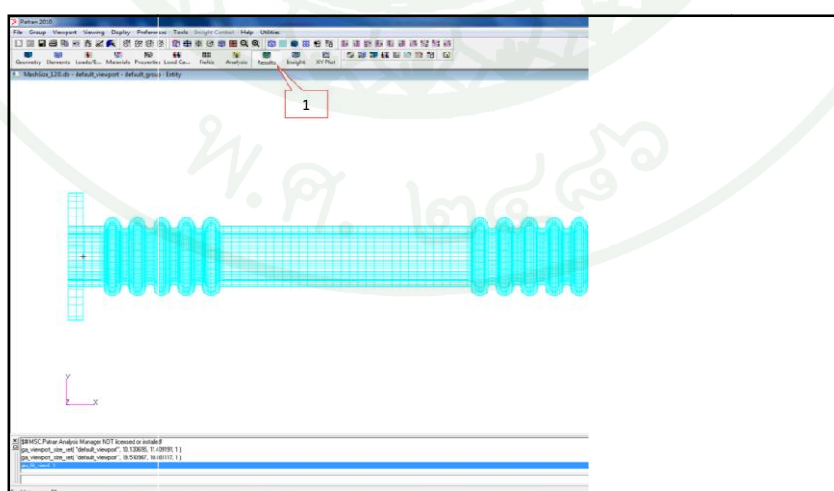
ภาคผนวก จ  
วิธีการอ่านผลการเสีชรูปของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

1. วิธีการอ่านค่าข้อมูลการวิเคราะห์ เลือกฟังก์ชันการวิเคราะห์ (Analysis) เลือกฟังก์ชันการอ่านข้อมูลการวิเคราะห์ (Read) เลือกชุดข้อมูลที่ต้องการอ่านค่า ดำเนินการ (Apply) ซึ่งมีวิธีการดังภาพผนวกที่ จ1

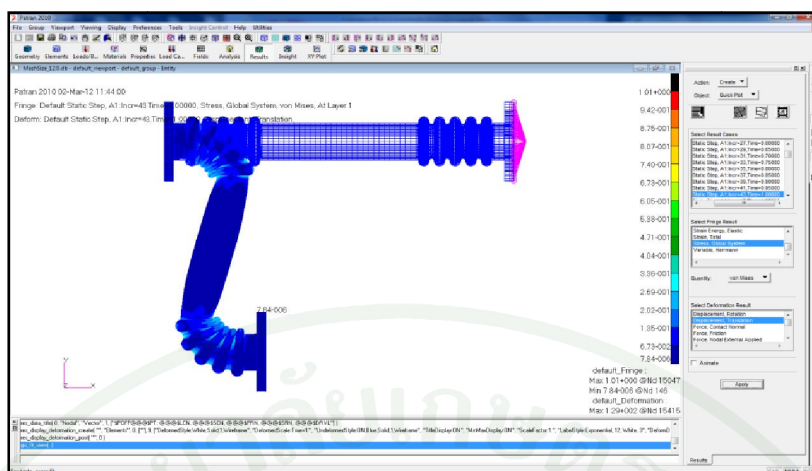


ภาพผนวกที่ จ1 วิธีการอ่านค่าข้อมูลการวิเคราะห์

2. วิธีการแสดงผลข้อมูลการวิเคราะห์ เลือกฟังก์ชันการแสดงผล (Results) เลือกฟังก์ชันการสร้างข้อมูลการแสดงผลวิเคราะห์ (Create) เลือกข้อมูลที่ต้องการแสดงผล เลือกผลการวิเคราะห์ ดำเนินการ (Apply) ซึ่งมีวิธีการดังภาพผนวกที่ จ2 และแสดงผลดังภาพผนวกที่ จ3

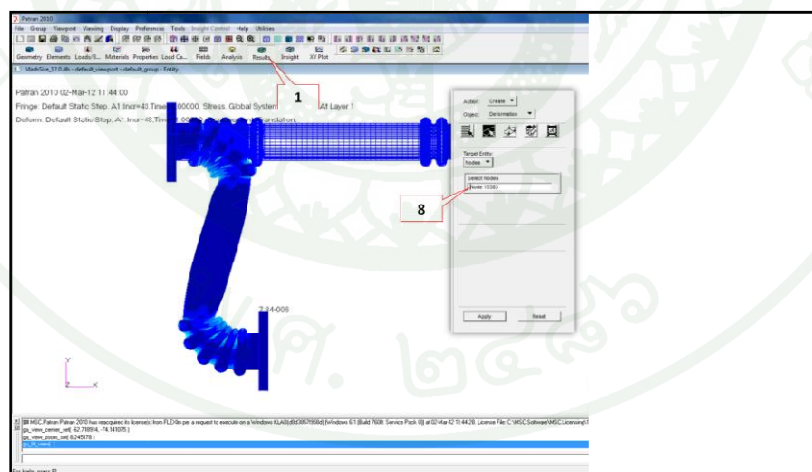


ภาพผนวกที่ จ2 วิธีการแสดงผลข้อมูลการวิเคราะห์



ภาพผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์

3. วิธีการวิเคราะห์การเสียรูป เลือกฟังก์ชันการแสดงผล (Results) เลือกฟังก์ชันการวิเคราะห์การเสียรูปของโหนด (Node) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตำแหน่งก่อนถูกกระทำกับหลังถูกกระทำ (Deformation) เลือกข้อมูลที่ต้องการแสดงผล เลือกผลการวิเคราะห์ เลือกการแสดงผลแบบแบ่งส่วนแกน (Component) เลือกแกนที่ต้องการแสดงผล เลือกการแสดงผลเฉพาะส่วน เลือกโหนดที่ต้องการแสดงผล ดำเนินการ (Apply)



ภาพผนวกที่ 4 วิธีการวิเคราะห์การเสียรูป

4. ทำซ้ำวิธีตามข้อที่ 3 จนครบทุกจุดการวิเคราะห์

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	กิตติรัตน์ ตันติกฤตยา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	20 กุมภาพันธ์ 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. เครื่องกลฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท

