



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลภายใต้ภาระแบบพลวัต

A Study of the Dimensional Effect on Dynamic Mechanical Behavior of Engine Mounts

นามผู้วิจัย นางสาวยุพา ตาวัน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชชนะ รักษ์ศิริ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกสิทธิ รอดขวัญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสังวี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลภายใต้ภาระแบบพลวัต

A Study of the Dimensional Effect on Dynamic Mechanical Behavior of Engine Mounts

โดย

นางสาวยุพา ตาวัน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยุพา ตาวัน 2553: การศึกษาขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกล
ภายใต้ภาระแบบพลวัต ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชนะ รักยศิริ, D.Eng. 152 หน้า

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับขนาดรูปร่างของยางรองแท่นเครื่อง และคุณสมบัติเชิงกลของยางสำหรับผลิตยางรองแท่นเครื่อง ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการเสียดรูปของยางรองแท่นเครื่องภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบพลวัต โดยวิเคราะห์จากการจำลองการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่องด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพิจารณาการดูดซับการสั่นสะเทือนจากระยะช่วงการเคลื่อนที่ของยางรองแท่นเครื่อง และเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาดต่างๆ การกำหนดค่าแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก ด้วยแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด ของอ็อกเดน และฟังก์ชันการคลายความเค้นแทนด้วยอนุกรมโพรนี อันดับ 3 ซึ่งแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง ทำการจำลองการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 3 ระดับ คือ ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์, 35 เฮิร์ตซ์ และ 50 เฮิร์ตซ์ โดยมีแรงกระทำ 1,200 นิวตัน โดยกำหนดให้แรงกระทำเป็นแบบไซน์ซายด์ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของขนาดรูปร่างยางรองแท่นเครื่องเพื่อให้ค่าการดูดซับการสั่นสะเทือนและค่าความแข็งแรงมีค่าที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ โดยใช้การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นคือ การกำหนดค่าที่ความกว้างเท่ากับ 58 มิลลิเมตร และองสามมเอียง เท่ากับ 90 องศา จะทำให้ค่าการดูดซับการสั่นสะเทือนและค่าความแข็งแรงมีค่าที่สูงที่สุด

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Yupa Tawan 2010: A Study of the Dimensional Effect on Dynamic Mechanical Behavior of Engine Mounts. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chana Raksiri, D.Eng. 152 pages.

The objective of this research is to study the engine mount mechanical dynamic behavior such as the deformations, shapes and mechanical properties of composite rubber effect to engine mount deformation by finite element analysis. Consider the vibration absorption and measurement stiffness of engine mount model. The rubber hyperelastic material model using the strain energy function which is expressed by the Ogden model and the relaxation function was represented by a prony series $N=2$. The finite element models of engine mount to simulate the vibration frequency of 3 levels are 20, 35 and 50 hertz and the dynamic load is 1,200 N. In this research, the design of experiments was conducted to find the most appropriate parameter of the engine mount setting to the higher value of vibration absorption and stiffness of engine mount by using 2^3 Factorial Design to find the optimal factors values. Finally, the significant factors and optimize the parameters of engine mount dimension such as width is 58 millimeter and angle is 90 degree.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ชนะ รัศมีศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ อ.ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ และ ผศ.ดร. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายทุกท่านที่เสียสละเวลาในการควบคุมการสอบ และให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัท คีอิกเตอร์บู จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ผลิตภัณฑ์ยางรอง แทนเครื่อง และส่วนผสมวัสดุยางที่ให้สำหรับผลิตยางรองแทนเครื่องเพื่อนำไปทดสอบและ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานเครื่องทดสอบแรงดึง โดยทำการทดสอบการดึง แบบภาระแบบวงรอบ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย แห่งมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ และทุนมูลนิธิโทเร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย (TTSF) ที่ให้การ สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนทั้ง กำลังทรัพย์และกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

ยุพา ตาวัน
มีนาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	49
อุปกรณ์	49
วิธีการ	49
ผลและวิจารณ์	73
สรุปและข้อเสนอแนะ	115
สรุป	115
ข้อเสนอแนะ	119
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	120
ภาคผนวก	123
ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดจากการทดสอบแรงดึงในแนว แกนเดียว	124
ภาคผนวก ข ภาพแสดงข้อมูลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแบบจำลองยางรอง แท่นเครื่อง	127
ภาคผนวก ค กราฟแสดงข้อมูลระยะการเคลื่อนที่ ของการวิเคราะห์การดูดซับ การสันสะเทือนของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาดต่างๆ	133
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	152

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรม Marc Mentat 2005r1	31
2	รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย	36
3	แสดงระดับของปัจจัยต่าง ๆ สำหรับแผนการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล	67
4	แสดงขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่ทำการศึกษา	67
5	ค่าการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตที่ความถี่ 3 ระดับ	81
6	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรม Marc Mentat 2005r1	87
7	ค่าสเป็คตรัมการผ่อนคลายความเค้น	90
8	ค่าการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความถี่ 3 ระดับ	99
9	สัญลักษณ์แทนขนาดยางรองแท่นเครื่อง	100
10	แสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง	102
11	แสดงค่าการดูดซับแรงสั่นสะเทือนของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง	103
12	แสดงปัจจัยและผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนที่ระดับความถี่ 20 เฮิรตซ์	104
13	แสดงปัจจัยและผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนที่ระดับความถี่ 35 เฮิรตซ์	108
14	แสดงปัจจัยและผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนที่ระดับความถี่ 50 เฮิรตซ์	111

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แรงที่กระทำต่อเพลาช้อเหียงของเครื่องยนต์ 4 สูบ	5
2	การติดตั้งยางรองแท่นเครื่องกับฐานของเครื่องยนต์	5
3	การติดตั้งยางรองแท่นเครื่อง	6
4	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางรองแท่นเครื่องที่ทำการศึกษา	6
5	แบบจำลองอย่างง่ายของยางรองแท่นเครื่อง	7
6	รูปแบบของระยะการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง	8
7	ตัวอย่างสัญญาณความถี่สูงที่กระทำต่อยางรองแท่นเครื่อง ขณะเครื่องยนต์ทำงาน	8
8	ผลของค่า C และ K ที่มีต่อการสั่นสะเทือนของแท่นเครื่อง	9
9	พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของยาง	10
10	ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก	13
11	พฤติกรรมการคืบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่เวลา t ใด ๆ	18
12	พฤติกรรมการคลายความเค้นที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่เวลา t ใด ๆ	19
13	รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ	33
14	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล	35
15	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล	35
16	เอลิเมนต์มิติเดียว	41
17	เอลิเมนต์สองมิติ	42
18	เอลิเมนต์สามมิติ	43
19	เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน	43
20	ขั้นตอนการทำงานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	44
21	ส่วนผสมยางที่ผ่านการบดผสมแล้ว	50
22	เครื่องบดผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง	50
23	เครื่องอบคงรูปยาง	51
24	แม่พิมพ์สำหรับอบคงรูปยางแผ่น	51
25	ยางที่ผ่านการอบคงรูปและทำการตัดขอบแล้ว	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ขั้นตอนทดสอบการมาตรฐาน ASTM D 412	52
27	ขั้นตอนทดสอบการดึง และเส้นอ้างอิงระยะเริ่มต้น	52
28	เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)	54
29	เครื่องทดสอบไดนามิกส์เชิงกล (Dynamics Mechanical Analyzer DMA)	55
30	ขั้นตอนทดลองการดึงไดนามิกส์เชิงกล	56
31	รูปร่างและขนาดของแบบจำลอง	58
32	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุยาง	58
33	ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองฮ็อกเคน	59
34	ค่าสเป็คตรัมของอนุกรม โพรนี้ อันดับ 3	60
35	เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง	61
36	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง	61
37	เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	62
38	เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าของแบบจำลองวัสดุยาง	63
39	ลักษณะรูปร่างของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง	68
40	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางรองแท่นเครื่อง	69
41	เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง	70
42	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง	71
43	เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง	72
44	ผลกระทบของมูนลิน ต่อการทดสอบการดึง	74
45	ผลการทดสอบการดึงครั้งที่ 1 และครั้งที่ 6	74
46	ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับการทดสอบการดึงอย่างขึ้นทดสอบ	75
47	เปรียบเทียบค่าความเค้นจริงจากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว กับค่าความเค้นจริงที่ได้จากวิธีอัตราส่วนปัวส์ซอง	76
48	เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว กับข้อมูลที่ได้จากวิธีอัตราส่วนปัวส์ซอง	76
49	เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดสอบดึงอย่างทั้งสามลักษณะ โดยใช้วิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	ผลการทดสอบการคลายความเค้นกับเวลา	78
51	ผลการทดสอบระหว่างค่าโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลา	79
52	ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต ที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์	80
53	ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต ที่ความถี่ 35 เฮิรตซ์	80
54	ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์	81
55	การทดลองดึงที่รับภาระแบบวงรอบ	82
56	ผลการทดลองดึงที่รับภาระแบบวงรอบ ที่กำจัดผลกระทบของมูนลิน	83
57	ผลการทำนายการดึงในแนวแกนเดียวโดยใช้แบบจำลองทั้ง 8 แบบ	84
58	ผลการทำนายการดึงเท่ากันในสองแนวแกนโดยใช้แบบจำลองทั้ง 8 แบบ	85
59	ผลการทำนายการดึงแบบความกว้างคงที่โดยใช้แบบจำลองทั้ง 8 แบบ	85
60	ผลการทำนายการทดสอบการดึงทั้ง 3 แบบ โดยใช้แบบจำลองอ้อกเคน	86
61	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองอ้อกเคน	87
62	ขั้นตอนการทำนายผลการทดสอบยาง	89
63	ค่าสเป็คตรัมของอนุกรม โพรนี้ อันดับ 3 และค่าความผิดพลาดจากการทำนาย	90
64	การหาค่าสเป็คตรัมอนุกรมโพรนี้จากการคลายความเค้น	91
65	ขั้นตอนการวิเคราะห์การหาค่าตัวแปรวิสโคอีลาสติก	92
66	ลักษณะการรับภาระแรงดึงของแบบจำลอง	93
67	การเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงกับแบบจำลองการดึง	94
68	ลักษณะการรับภาระแรงดึงแบบคงที่ ของการทดสอบการคลายความเค้น	95
69	การเปรียบเทียบผลการทดสอบการคลายความเค้นกับผลจากแบบจำลอง	96
70	ลักษณะการรับภาระแรงดึง ของการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ	97
71	ลักษณะการปล่อยกลับ ของการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ	98
72	การเปรียบเทียบผลการทดสอบดึงที่รับภาระแบบวงรอบกับแบบจำลองไฟไนต์ เอลิเมนต์	98
73	การพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบที่ระดับความถี่ 20 เฮิรตซ์	106
74	กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียงที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
75	การพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบที่ระดับความถี่ 35 เฮิร์ตซ์	110
76	กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียงที่ความถี่ 35 เฮิร์ตซ์	110
77	การพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบที่ระดับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์	113
78	กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียงที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์	113
ภาพผนวกที่		
ก1	ลักษณะการทดสอบการดึงของชิ้นทดสอบยาง	125
ข1	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00	128
ข2	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01	128
ข3	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02	129
ข4	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03	129
ข5	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04	130
ข6	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05	130
ข7	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06	131
ข8	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07	131
ข9	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08	132
ค1	แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00	134
ค2	กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิร์ตซ์	134
ค3	กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิร์ตซ์	135
ค4	กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิร์ตซ์	135

สารบัญภาพ (ต่อ)

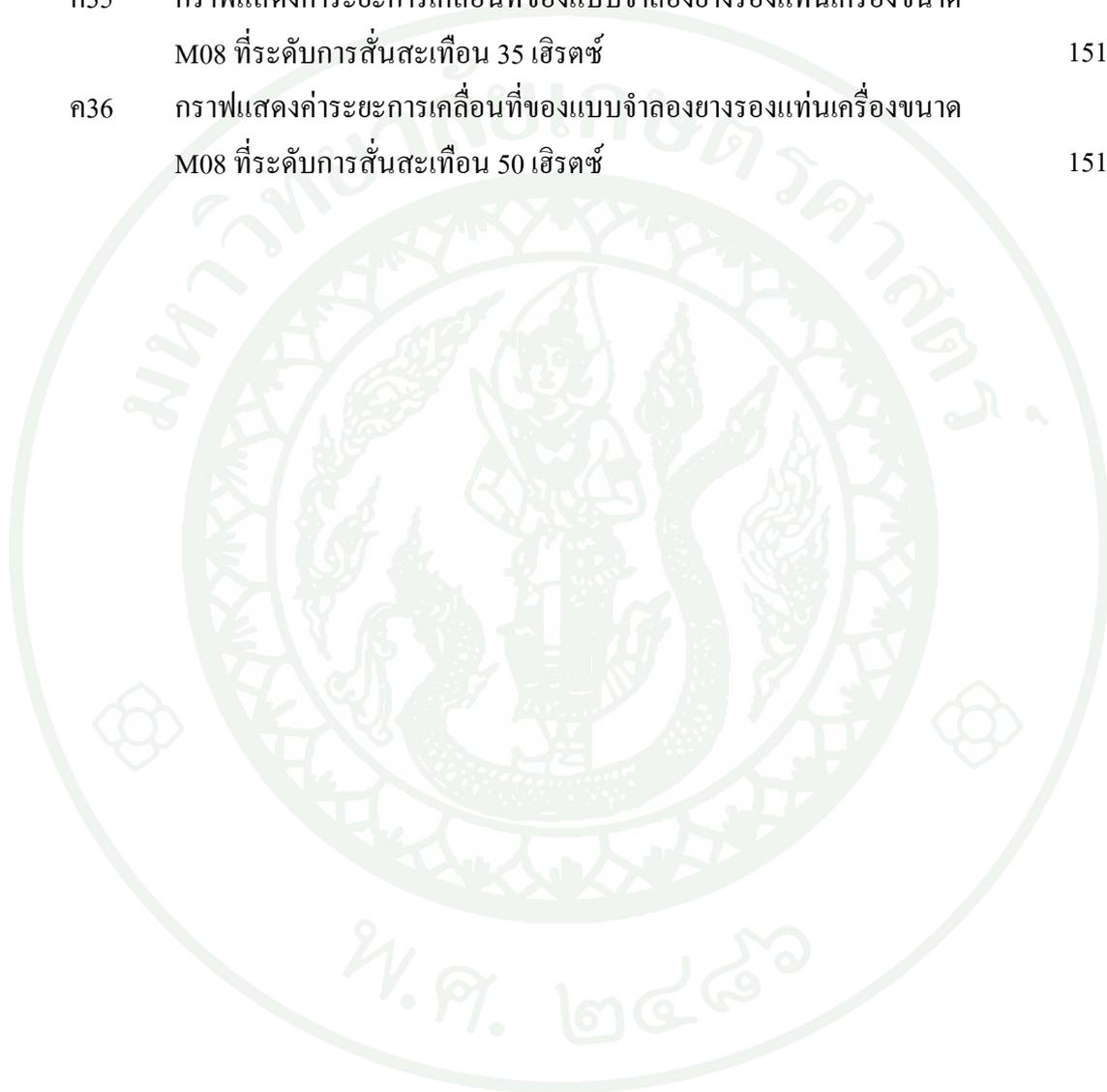
ภาพผนวกที่	หน้า
ค5 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01	136
ค6 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	136
ค7 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	137
ค8 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	137
ค9 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02	138
ค10 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	138
ค11 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	139
ค12 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	139
ค13 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03	140
ค14 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	140
ค15 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	141
ค16 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	141
ค17 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04	142
ค18 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	142
ค19 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	143

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค20 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	143
ค21 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05	144
ค22 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	144
ค23 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	145
ค24 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	145
ค25 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06	146
ค26 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	146
ค27 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	147
ค28 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	147
ค29 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07	148
ค30 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	148
ค31 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	149
ค32 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	149
ค33 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08	150
ค34 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์	150

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค35	กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์	151
ค36	กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์	151



การศึกษาขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกล

ภายใต้ภาระแบบพลวัต

A Study of the Dimensional Effect on Dynamic Mechanical Behavior of Engine Mounts

คำนำ

ในอุตสาหกรรมยานยนต์มีชิ้นส่วนยางเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นหลายอย่าง เช่น ยางรถยนต์ ยางรองแท่นเครื่อง ยางขอบประตู ฯลฯ ซึ่งงานวิจัยนี้เราจะพิจารณาในชิ้นส่วนยางรองแท่นเครื่องของรถยนต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพ ในการช่วยลดความเสียหายที่จะส่งผลกระทบต่อฐานรองแท่นเครื่อง และลดเสียงรบกวนที่จะเกิดขึ้นกับห้องโดยสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งยางรองแท่นเครื่อง ใช้เพื่อดูดซับแรงสั่นสะเทือนที่ส่งผลมาจากการทำงานของเครื่องยนต์และปกป้องความเสียหายของฐานรองแท่นเครื่องจากแรงสั่นสะเทือนนั้น

ในปัจจุบันการผลิตยางรองแท่นเครื่องในประเทศไทยส่วนใหญ่ จะทำการผลิตตามแบบรูปร่างของยางรองแท่นเครื่องที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น และสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับยางรองแท่นขณะใช้งาน ได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการจำลองการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง และศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของยางรองแท่นเครื่องภายใต้สภาวะที่รับ โหลดแบบพลวัต การเสียรูปของยางรองแท่นเครื่อง และความสามารถในการดูดซับแรงสั่นสะเทือน และศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับขนาดรูปร่างของยางรองแท่นเครื่อง ในสภาพการทำงานการรับแรงสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่างๆ กัน ซึ่งจะพิจารณายางรองแท่นเครื่องเพียงสูตรเดียว เนื่องจากเป็นสูตรมาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดให้

งานวิจัยนี้จะศึกษายางรองแท่นเครื่องที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดไม่เกิน 3,000 ซีซี โดยปัจจัยเกี่ยวกับรูปร่างของยางรองแท่นเครื่อง จะทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าลักษณะการออกแบบ เช่น ปริมาตรของเนื้อยาง ขนาดของยางรองแท่นเครื่อง และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กกับเนื้อยาง กับค่าคงที่ความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของยางรองแท่นเครื่อง โดยจะประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE) โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรม Marc Mentat 2005r1 ใช้วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการนำหลักการการออกแบบการทดลอง (Design of

Experiments, DOE) มาสร้างความสัมพันธ์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสันดาปของยางรองแท่นเครื่อง เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยทางด้านรูปร่างของยางรองแท่นเครื่อง ที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลของยางรองแท่นเครื่องภายใต้ภาระแบบพลวัต (Dynamic) ในสภาวะการทำงานที่ความถี่ต่างๆ ของเครื่องยนต์
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ยางรองแท่นเครื่อง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะศึกษายางรองแท่นเครื่องที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดไม่เกิน 3,000 ซีซี
2. พิจารณายางรองแท่นเครื่องเพียงสูตรเดียว เนื่องจากเป็นสูตรยางมาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดให้
3. การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะกำหนดให้ยางรองแท่นเครื่องทำงานภายใต้อุณหภูมิคงที่
4. พิจารณารูปร่างยางรองแท่นเครื่องเพียงรูปแบบเดียว

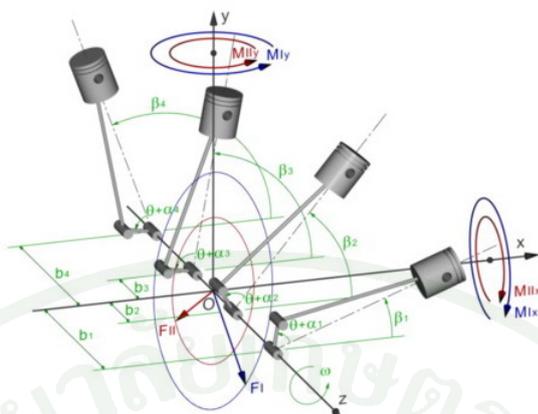
การตรวจเอกสาร

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การศึกษาขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกล ภายใต้ภาระแบบพลวัต ได้อาศัยข้อมูลและทฤษฎีต่อไปนี้เป็นพื้นฐานในการดำเนินงานวิจัย

1. การรับแรงสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง
2. ลักษณะทั่วไปของยาง
3. ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก
4. พฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยาง
5. คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity)
6. แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function)
7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive Model)
8. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)
9. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM)

1. การรับแรงสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง

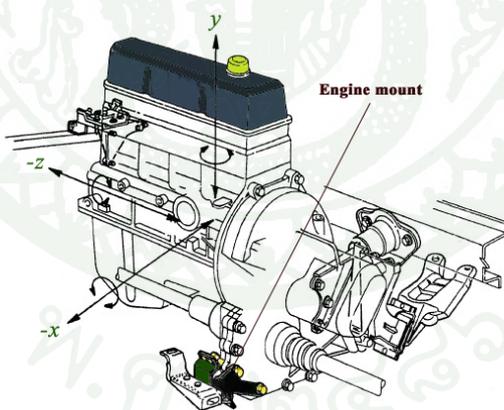
ในการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายในทั้งประเภทเครื่องยนต์เบนซินหรือเครื่องยนต์ดีเซลแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการระเบิดของการสันดาปภายในเครื่องยนต์ในลักษณะการสั่นสะเทือนแบบ 6 องศาความอิสระ (6 Degree of Freedom Vibration Mode) ดังแสดงในภาพที่ 1 จะถูกถ่ายทอดผ่านมายังโครงเครื่องยนต์แล้วผ่านไปยังแท่นเครื่องส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนกับตัวถังรถยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของแท่นเครื่องลดลง



ภาพที่ 1 แรงที่กระทำต่อเพลาคือเหวี่ยงของเครื่องยนต์ 4 สูบ

ที่มา: Anthony (2005)

เพื่อลดการสั่นสะเทือนนี้ จึงได้มีการใส่อุปกรณ์เพื่อช่วยดูดซับแรงสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ ก่อนที่จะติดตั้งเครื่องยนต์เข้ากับแท่นเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การติดตั้งยางรองแท่นเครื่องกับฐานของเครื่องยนต์

ที่มา: Anthony (2005)

ยางรองแท่นเครื่องเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องยนต์ โดยด้านหนึ่งติดอยู่กับเครื่องยนต์ ส่วนอีกด้านติดอยู่กับแท่นเครื่อง สามารถให้ความยืดหยุ่นได้ แรงสั่นสะเทือนที่เกิด

จากเครื่องยนต์จะส่งผ่านมายังยางรองแท่นเครื่องเพื่อดูดซับพลังงานและลดการสั่นสะเทือน แล้วจะถ่ายทอดแรงนี้ผ่านไปยังแท่นเครื่อง ส่งผลให้การสั่นสะเทือนนี้ลดลง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของแท่นเครื่องและยังช่วยลดเสียงรบกวนที่เกิดกับห้องโดยสาร

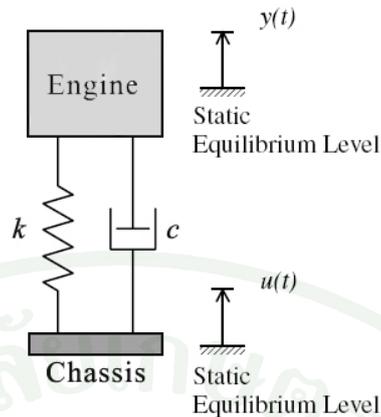


ภาพที่ 3 การติดตั้งยางรองแท่นเครื่อง



ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางรองแท่นเครื่องที่ทำการศึกษา

จากทฤษฎีการสั่นสะเทือนทางกลเบื้องต้น พบว่ายางรองแท่นเครื่องมีคุณสมบัติเป็นทั้งสปริงและตัวหน่วง ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่องเบื้องต้นได้ ดังแสดงในภาพที่ 5



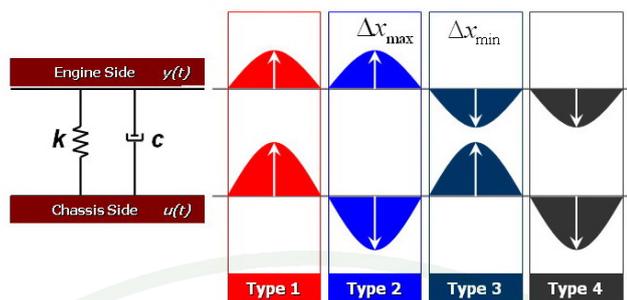
ภาพที่ 5 แบบจำลองอย่างง่ายของยางรองแท่นเครื่อง

ที่มา: Yu (2001)

สมการการเคลื่อนที่ของยางรองแท่นเครื่อง สามารถเริ่มต้นจากสมการของ Lagrange

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial V}{\partial x_i} = F_i \quad (1)$$

สำหรับระยการยวบตัวและขยายตัวที่มากที่สุดและน้อยที่สุด ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณา ออกแบบระยการเคลื่อนตัวของระบบเครื่องทดสอบยางรองแท่นเครื่อง สามารถหาได้โดยการ สมมติให้รูปแบบของการสั่นสะเทือนเป็นแบบ Sinusoidal ที่มีขนาดแตกต่างกัน และเฟสเริ่มต้น เป็นตามทศที่ลูกศรชี้ภาพที่ 6



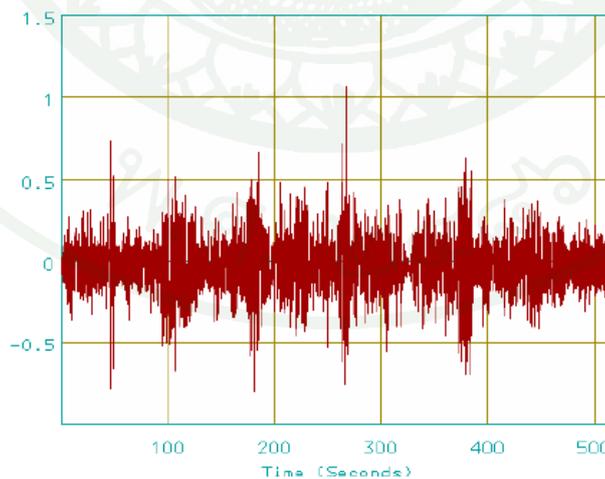
ภาพที่ 6 รูปแบบของระยะการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง

ที่มา: Vahdati (2002)

อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล จะต้องเหมาะสมกับคุณลักษณะของเครื่องยนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีความถี่และระยะการเคลื่อนตัวที่ค่อนข้างสูง และจะต้องทำการวิเคราะห์แบบเวลาจริง ซึ่งสามารถอธิบายได้ในฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแบบของโดเมนเวลา

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (2)$$

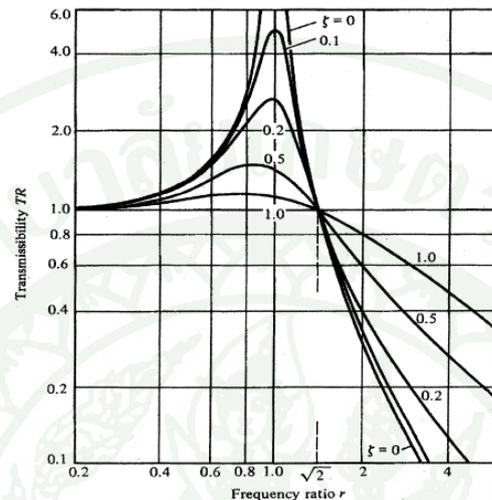
$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [c]\{\dot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{f(t)\}, \quad (3)$$



ภาพที่ 7 ตัวอย่างสัญญาณความถี่สูงที่กระทำต่อยางรองแท่นเครื่อง ขณะเครื่องยนต์ทำงาน

ที่มา: Su (2006)

ประสิทธิภาพการทำงานของยางรองแท่นเครื่องจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสปริง (k) และค่าความหน่วง (c) โดยสามารถแสดงได้ในภาพที่ 8 ซึ่งถ้า Frequency Ratio (r) มีค่าเท่ากับ 1 จะทำให้มีการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่องที่สูงมากซึ่งเป็นจุดที่ควรหลีกเลี่ยง



ภาพที่ 8 ผลของค่า C และ K ที่มีต่อการสั่นสะเทือนของแท่นเครื่อง

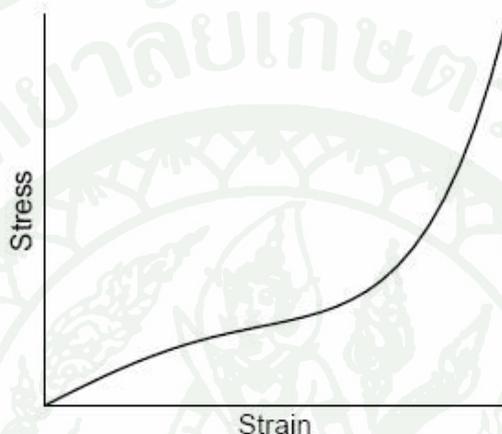
ที่มา: Yu (2001)

2. ลักษณะทั่วไปของยาง

2.1 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประเภทยาง (Mechanical Properties of Rubber)

วารภรณ์ (2530) คุณสมบัติเด่นหลักๆ ของยางในงานวิศวกรรม คือ มีความยืดหยุ่นที่ค่าความเครียดสูง, คุณสมบัติการหน่วงทางพลศาสตร์, ความต้านทานการสึกหรอ และมีค่าพลังงานการแตกหักสัมพัทธ์สูง โดยปกติยางเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material) ซึ่งมีพฤติกรรมความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยรูปแบบความเสียหายที่แตกต่างกันจะทำให้พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดแตกต่างกัน โดยรูปแบบความเสียหายการเฉือนอย่างง่าย (Simple Shear) จะมีพฤติกรรมของความเครียดเป็นเชิงเส้นมากกว่ารูปแบบความเสียหายแบบกดอัด (Compression) และแบบแรงดึง (Tensile) นอกจากนี้ยางยังมีพฤติกรรมที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible) หมายถึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้เมื่อ

มีแรงกระทำยางจะมีค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ต่ำกว่าค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus) อยู่มากโดยค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรจะมีค่าประมาณ 1000-2000 MPa แต่ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่าประมาณ 1 MPa ความสามารถในการอัดตัวของวัสดุ สามารถอธิบายผ่านค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) หมายถึง ค่าอัตราส่วนระหว่างความเครียดที่มี ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางขนานกับแรงที่กระทำบนวัสดุสำหรับยางจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองอยู่ที่ประมาณ 0.5



ภาพที่ 9 พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของยาง

ที่มา: วราภรณ์ (2530)

พงษ์ธร (2550) ยางเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากและมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะความยืดหยุ่น (Elasticity) นั่นคือเมื่อมีแรงดึงยางที่คงรูปแล้วจะสามารถยืดตัวได้หลายเท่าของความยาวเดิมและเมื่อปล่อยแรงออก ยางก็จะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ นอกจากนี้ยางยังมีคุณสมบัติเด่นอื่นๆ อีกด้วย เช่น มีความเหนียว (Toughness) และมีความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) สูงสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของยาง ได้แก่ ความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะและสิ่งทอ (เส้นใย ผ้าใบ ฯลฯ) การเชื่อมติดยางกับวัสดุเหล่านี้ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้นจึงสามารถนำยางไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

2.2 ชนิดของยาง

ความรู้เรื่องยางแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลักๆ ได้แก่ การผลิตยางดิบ (Raw Rubber) และการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Product) ในส่วนของยางดิบนั้นสามารถแบ่งยางดิบออกได้เป็นสองประเภทคือ ยางดิบที่ได้มาจากต้นพืชเรียกว่ายางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) และยางดิบที่ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) เรียกว่า ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR) ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์อาจอยู่ในรูปของยางแห้ง (Dry Rubber) หรือน้ำยาง (Latex) ก็ได้ สำหรับในส่วนของการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางนั้นโดยทั่วไปสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ยางออกได้เป็นสองกลุ่มตามลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นยางแห้งและกลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นน้ำยางทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ต่างก็มีความสมบัติเด่นที่แตกต่างกันเช่น ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้น ส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูงมากโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงอันเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ เป็นต้น ส่วนยางสังเคราะห์นั้นมียางหลายชนิด ซึ่งยางสังเคราะห์ในแต่ละชนิดนั้นจะมีความแตกต่างกันไป เช่น ยางบิวตาไดอีน (BR) ที่มีคุณสมบัติเด่น ในด้านความต้านทานต่อการขีดถูหรือยางไนไตรล์ (NBR) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อน้ำมัน เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์แต่ละชนิดต่างก็มีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทจึงจำเป็นต้องนำยางมากกว่าหนึ่งชนิดมาผสมกันเพื่อให้ยางผสมที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ในการเลือกชนิดของยางที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ใดๆ ได้อย่างเหมาะสมนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติของยางแต่ละชนิดโดยละเอียด นอกจากนี้ผู้ผลิตยังต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องร่วมด้วย เช่น ความยากง่ายในด้านกระบวนการการผลิต (Processability) ของยางที่จะเลือกใช้ราคาต้นทุนของการผลิต รวมถึงความยากง่ายในการจัดหายางนั้นๆ

3. ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก

การทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น การทดสอบหนึ่งแนวแกน (Uniaxial Test) การทดสอบสองแนวแกน (Biaxial Test) การทดสอบแบบความกว้างคงที่ (Planar Test) และการทดสอบแบบปริมาตร (Volumetric Test) ดังภาพที่ 10 การใช้ข้อมูลการทดสอบวัสดุ

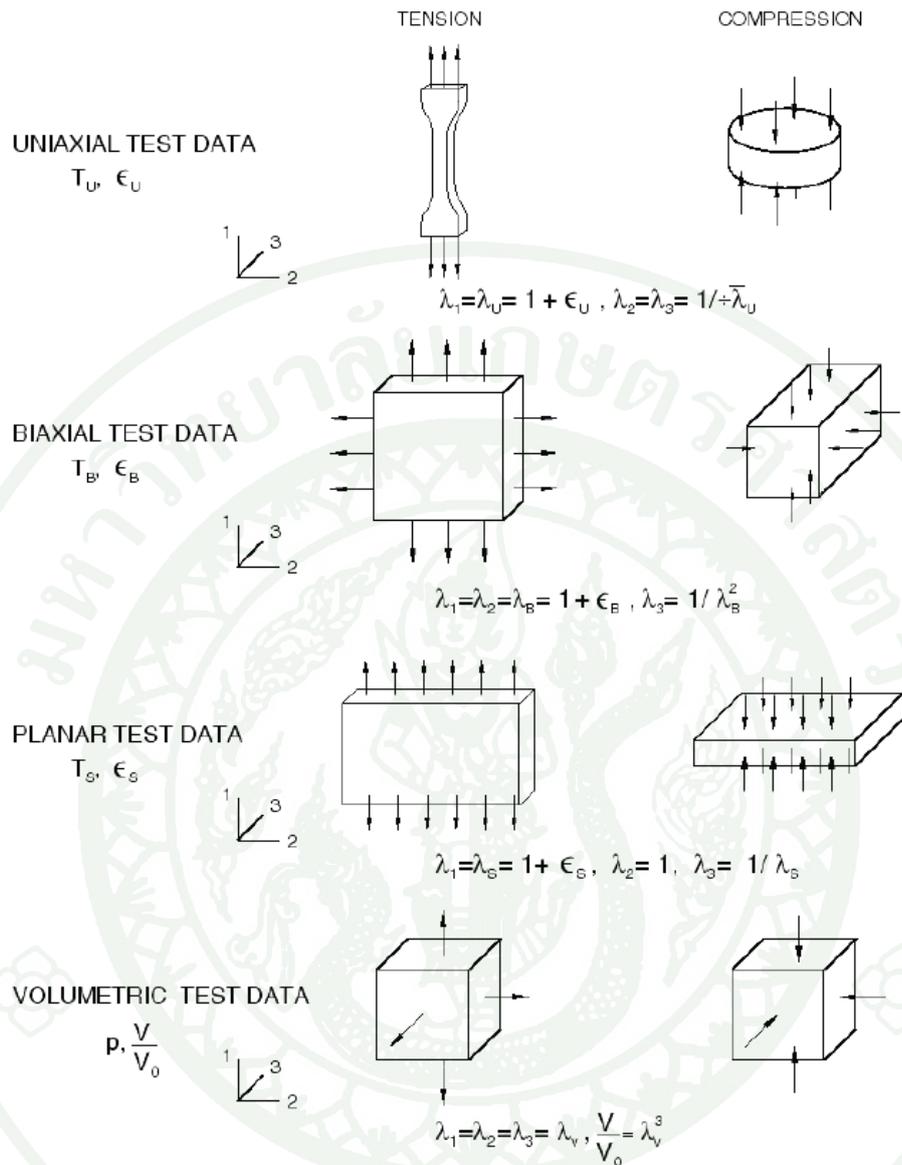
หลายๆ ลักษณะเพื่อมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ ทำให้เลือกแบบจำลองที่ถูกต้องและสามารถจำลองพฤติกรรมของวัสดุในขณะที่รับภาระแบบซับซ้อนได้อย่างแม่นยำจากวิธีการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกทั้งหมด แปลวิธี การทดสอบแบบปริมาตรเป็นการทดสอบเพื่อหาการอัดตัวได้ (Compressibility) ของวัสดุ แต่เนื่องจากในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานให้ยางเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ ดังนั้นการทดสอบแบบปริมาตรจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นจากคุณสมบัตินี้ทำให้วิธีการทดสอบวัสดุลดลงเหลือเพียง 3 วิธีดังนี้

3.1 การทดสอบแบบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) ซึ่งสมมูล (Equivalent) กับการทดสอบแบบการกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression Test)

3.2 การทดสอบแบบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equibiaxial Tensile Test) ซึ่งสมมูล กับการทดสอบแบบการกดเท่ากันในสองแนวแกน (Equibiaxial Compression Test)

3.3 การทดสอบแบบการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Tensile Test) ซึ่งสมมูลกับการทดสอบแบบการกดแบบความกว้างคงที่ (Planar Compression Test)

ดังนั้นข้อมูลการทดสอบวัสดุทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบการดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบแบบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน การทดสอบแบบการดึงแบบความกว้างคงที่ ซึ่งจะครอบคลุมพฤติกรรมของวัสดุอย่างต่อเนื่องไปหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยนำชิ้นยางทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาความ สัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และอัตราการยืดตัว (Stretch Ratio) ของยาง



ภาพที่ 10 ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก

ที่มา: Gent (2001)

4. พฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยาง

ในการศึกษาพฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยางเป็นผลงานวิจัยของ Turner and Brennan (1990) ซึ่งสามารถนำมาใช้กับวัสดุยางที่มีการยืดน้อยๆ เพราะที่การยืดตัวน้อยๆ พฤติกรรมยืดหยุ่นแนวแกนเดียวของยางเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยาง

ได้จากข้อมูลความสัมพันธ์ของความเค้นจริงกับอัตราส่วนการยืด โดยใช้วิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง ซึ่งจะพิจารณาให้อัตราส่วนปัวส์ซองเป็นค่าที่มีการผันแปร (Variable Value) ความสัมพันธ์ของความเค้น โมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนการยืดและอัตราส่วนปัวส์ซอง โดยนำข้อมูลการทดสอบยางแบบการดึงในแนวแกนเดียว และสามารถนำค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยางใน การดึงแบบเท่ากันทั้งสองแนวแกน และการดึงแบบความกว้างคงที่ แต่มีเงื่อนไขว่าจะประยุกต์วิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง เพื่อทำนายข้อมูลของการทดสอบยางทั้งสามลักษณะได้ต้องมีการยืดตัวน้อยๆ ($\lambda \leq 1.8$) ถ้าเป็นการยืดตัวมากๆ ก็สามารถใช้ได้แต่ไม่สามารถรับรองผลได้ว่ามีความแม่นยำมากนักน้อยเพียงไร

เริ่มต้นจากสมการพื้นฐานทางวิศวกรรมอธิบายความเครียดในเทอมของโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ความเค้น (Stress) และอัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio)

$$\sigma_1 = E[\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1)] / (1 - \nu^2) + \sigma_3 \quad (4)$$

$$\sigma_2 = E[\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1)] / (1 - \nu^2) + \sigma_3 \quad (5)$$

$$\nu = (\lambda_1 \lambda_2 - 1) / (\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 - 1) - 1) \quad (6)$$

เมื่อ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ค่าความเค้นจริงในแนวแกนที่ 1, 2 และ 3

λ_1 คือ อัตราส่วนการยืดในแนวแกนที่ 1, 2

ν คือ อัตราส่วนปัวส์ซอง

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น

พิจารณาในกรณีของการดึงในแนวแกนเดียว การดึงในสองแนวแกนและการดึงแบบความกว้างคงที่ จึงส่งผลให้ $\sigma_3 = 0$ เพราะเราไม่คำนึงถึงแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งกล่าว ทำให้สมการที่ (4) และ (5) สามารถเขียนเป็น

$$\sigma_1 = E[\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (7)$$

$$\sigma_2 = E[\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (8)$$

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงในแนวแกนเดียวดังแสดงในภาพที่ 10 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_u$ และ $\lambda_2 = 1/\lambda_u$ แทนค่าลงในสมการที่ (6), (7) และ (8) จะได้ว่า

$$\nu = 1/(\lambda_U + \sqrt{\lambda_U}) \quad (9)$$

$$\sigma_U = \sigma_1 = E \left[\lambda_U - 1 + \nu \left(\frac{1 - \sqrt{\lambda_U}}{\sqrt{\lambda_U}} \right) \right] / (1 - \nu^2) \quad (10)$$

เมื่อ λ_U คือ อัตราส่วนการยึดในแนวการดึง

σ_U คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงในแนวแกนเดียว

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงเท่ากันในสองแนวแกนดังแสดงในภาพที่ 10 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B$ แทนค่าลงในสมการที่ (6), (7) และ (8) จะได้ว่า

$$\nu = (\lambda_B + 1)/(2\lambda_B^2 + \lambda_B + 1) \quad (11)$$

$$\sigma_B = \sigma_1 = \sigma_2 = E[\lambda_B - 1 + \nu(\lambda_B - 1)]/(1 - \nu^2) \quad (12)$$

เมื่อ λ_B คือ อัตราส่วนการยึดในแนวการดึง

σ_B คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงเท่ากันทั้งสองแนวแกน

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงแบบความกว้างคงที่ดังแสดงในภาพที่ 10 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_s$ และ $\lambda_2 = 1$ แทนค่าลงในสมการที่ (6), (7) และ (8) จะได้ว่า

$$\nu = 1/(\lambda_s + 1) \quad (13)$$

$$\sigma_s = E(\lambda_s - 1)/(1 - \nu^2) \quad (14)$$

เมื่อ λ_s คือ อัตราส่วนการยึดในแนวการดึง

σ_s คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงแบบความกว้างคงที่

จากสมการที่กล่าวมานี้สังเกตเห็นว่าความเค้นในกรณีที่ได้รับภาระลักษณะต่างๆ จะเป็นฟังก์ชันของโมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวส์ซองและอัตราส่วนการยึดตัวในแนวการดึงของแต่ละกรณี

ดังนั้นสามารถหาความเค้นได้ หากกำหนดค่าอัตราส่วนการยืดในแนวการดึง โดยใช้สมการที่ (10), (12) หรือ (14) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของภาระที่กระทำส่วนโมดูลัสความยืดหยุ่นหาได้จากข้อมูลการทดสอบการดึงวัสดุในแนว แกนเดียวโดยมีรายละเอียดดังนี้พิจารณาการดึงในแนวแกนเดียวจากสมการที่ (10)

$$\sigma_U = \sigma_1 = E \left[\lambda_U - 1 + \nu \frac{(1 - \sqrt{\lambda_U})}{\sqrt{\lambda_U}} \right] / (1 - \nu^2)$$

สามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\sigma_U = EP(\lambda_U, \nu) \quad (15)$$

เมื่อ

$$P = \left[\lambda_U - 1 + \nu \frac{(1 - \sqrt{\lambda_U})}{\sqrt{\lambda_U}} \right] / (1 - \nu^2)$$

$$\nu = 1 / (\lambda_U + \sqrt{\lambda_U})$$

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและนำไปใช้คือค่าความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress) และค่าความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถนำไปใช้แปลงเป็นค่าความเค้นจริงและอัตราส่วนการยืดตามลำดับได้

$$\sigma_U = \sigma_{Eng} (\varepsilon_{Eng} + 1) \quad (16)$$

$$\lambda_U = \varepsilon_{Eng} + 1 \quad (17)$$

เมื่อ σ_{Eng} คือ ความเค้นวิศวกรรมในแนวการดึง

ε_{Eng} คือ ความเครียดวิศวกรรมในแนวการดึง

ดังนั้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางในสมการที่ (15) สามารถหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (18)

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{U_i} P(\lambda_{U_i}, \nu_i)}{\sum_{i=1}^N P^2(\lambda_{U_i}, \nu_i)} \quad (18)$$

เมื่อ N คือ จำนวนจุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุ

σ_{U_i} คือ ความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่ i

λ_{U_i} คือ อัตราส่วนการยืดที่ได้จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่ i

ν_i คือ อัตราส่วนปัวส์ซองค่าที่ i หาได้จากสมการที่ (9)

5. คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity)

คุณสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติกที่มีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือส่วนที่ไหลได้คล้ายของเหลวหนืด (Viscous Liquid) และส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น (Elastic Solid) ยางได้รับการคงรูปแล้ว การเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ของโมเลกุลยาง จะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและทำให้ยางไม่สามารถไหลได้ ดังนั้นยางที่คงรูปแล้ว จะมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นสูง แม้ว่าการคงรูปจะทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดมีสัดส่วนลดลง แต่การคงรูปก็ไม่สามารถทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดนี้หายไปจากเนื้อยางได้หมด ดังนั้น ยางจึงไม่ใช่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก เมื่อมีแรงกระทำต่อโซ่โมเลกุลของยาง การตอบสนองต่อแรงของโซ่โมเลกุลจะมีลักษณะต่างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบอีลาสติก ซึ่งค่าความเครียดจะแปรผันตรงกับค่าความเค้น โดยที่ไม่มีตัวแปรของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่กรณีของวัสดุแบบวิสโคอีลาสติก โซ่โมเลกุลจะยืดตัวอย่างช้า ๆ จนถึงสภาวะที่โซ่โมเลกุลทุกโซ่ตอบสนองต่อแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ และเมื่อกำจัดแรงกระทำออก โซ่โมเลกุลจะค่อย ๆ เรียงตัวสู่ช่องว่างและความเครียดจะลดลงสู่สภาวะใกล้เคียงเดิมเท่านั้น แต่จะไม่สามารถกลับคืนอย่างสมบูรณ์เหมือนก่อนที่โครงสร้างจะมีแรงมากระทำ คุณสมบัติลักษณะนี้เรียกว่า คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity)

ทฤษฎีและการทดลองคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก ศึกษาโดยนักฟิสิกส์หลายคนรวมถึงแมกซ์เวลล์ (Maxwell) โบลท์แมน (Boltzman) และเคลวิน (Kelvin) สนใจในคุณสมบัติการคืบ (Creep) และการคืนตัว (Recovery) ของวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกกลายเป็นหัวข้อสำคัญทางวิศวกรรม เพราะการเพิ่มขึ้นของการใช้งานพอลิเมอร์สังเคราะห์ในทางวิศวกรรม

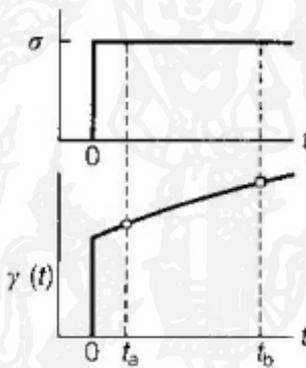
5.1 การคืบ (Creep)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคุณสมบัตินี้คือ เมื่อมีการดึงวัสดุ ยางแล้วรักษาความเค้นหรือแรงดึงให้มีค่าคงที่ตลอด ความเครียดที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามเวลา (Time Dependent) เขียนได้ดังนี้

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma} \quad (19)$$

$J(t)$ คือ Creep compliance at time (t)

$\gamma(t)$ คือ ฟังก์ชันของความเครียดที่ขึ้นกับเวลา



ภาพที่ 11 พฤติกรรมการคืบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่เวลา t ใดๆ

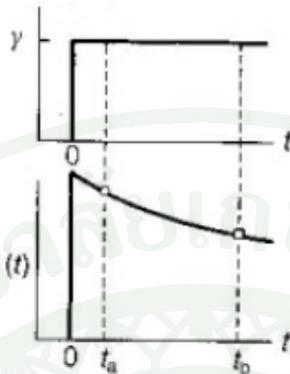
ที่มา: McCrum and Buckley (1988)

5.2 การคลายความเค้น (Stress Relaxation)

เป็นพฤติกรรมที่มีการศึกษาต่างจากการคืบ โดยการคลายความเค้นทำการศึกษาโดยดึงวัสดุแล้วให้ระยะยึดคงที่ ความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการดึงจะค่อยๆ ลดลงตามเวลา สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\gamma} \quad (20)$$

$E(t)$ คือ โมดูลัสการคลายความเค้นที่เวลา t
 $\sigma(t)$ คือ ฟังก์ชันของความเค้นที่ขึ้นกับเวลา



ภาพที่ 12 พฤติกรรมการคลายความเค้นที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่เวลา t ใดๆ

ที่มา: McCrum and Buckley (1988)

ในการทำนายพฤติกรรมของวิสโคอีลาสติกรเราสามารถกำหนดฟังก์ชัน โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นให้อยู่ในรูปสมการอนุกรมพหุนาม (Prony Series Function) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (21)$$

เมื่อ $g(t)$ คือ โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นอยู่กับการเวลาในเทอมของอนุกรมพหุนาม
 τ_i คือ เวลาการคลายตัว (Relaxation Time)

จากสมการอนุกรมพหุนาม ค่าโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเมื่อที่ขึ้นอยู่กับการเวลานั้น เราจะเริ่มต้นที่ค่าเท่ากับ $g(0) = 1$ จากนั้นแสดงว่าค่าต่อไปเริ่มมีการคลายความเค้นเกิดขึ้นแล้วจะมีค่าตัวแปรสองตัวที่เราจะได้จากการทดลองการคลายความเค้นของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นคือค่า τ_i g_i และค่า $g(t)$ นั้นเราสามารถหาได้จากสมการฟังก์ชันการผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นกับเวลา โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่แทนพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกรด้วยแบบจำลองที่มีทั้งสปริง และตัวหน่วงคือแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวล

$$g(t) = \frac{G(t)}{G_0} = \frac{E(t)}{E_0} \quad (22)$$

โดยที่ $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ จากสมการนี้เราสามารถหาค่าโมดูลัส
 $G(t)$ คือ โมดูลัสการเฉือนผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นอยู่กับเวลา
 G_0 คือ โมดูลัสการเฉือนผ่อนคลายความเค้นที่มีค่าสูงสุด ($t = 0$)
 $E(t)$ คือ โมดูลัสผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นอยู่กับเวลา
 E_0 คือ โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่มีค่าสูงสุด ($t = 0$)

โมดูลัสการผ่อนคลายความเค้น (Stress Relaxation Modulus) ที่ขึ้นอยู่กับเวลาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (23)$$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (24)$$

โดยที่ $\sigma(t)$ คือ ความเค้นที่ขึ้นกับเวลา
 ε_0 คือ ความเครียดคงที่

5.3 วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

เมื่อวัสดุยางได้รับการเป็นแบบวงรอบจะเกิดการเสียรูปจากเดิม วัสดุจะมีการกระจายตัวของพลังงานภายในวัสดุยาง ทำให้เกิดผลกระทบที่เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส ซึ่งวัสดุจะมีการเสียรูปตามลักษณะของแรงกระทำเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เมื่อพิจารณาการใส่ภาระเข้าไปในวัสดุยางค่าของความเครียดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อความเครียดลดลงภาระจะไม่สามารถย้อนกลับมาได้หมดพลังงานส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน คือพลังงานกลที่อยู่ในรูปของแรงดึงที่ใส่ให้กับยาง แต่ยางไม่สามารถกักเก็บพลังงานเชิงกลที่ใส่เข้าไปได้หมด เป็นผลทำให้เกิดการสูญเสีย และจากนั้นได้เปลี่ยนรูปจากพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุยาง คือเมื่อดึงวัสดุยางจะมีการปล่อยความร้อนออกและตอนปล่อยให้หดตัวกลับจะมีการดูดความร้อน แต่ตอนดูดความร้อนจะไม่

เท่ากับตอนปล่อยความร้อนจึงทำให้เกิดการสูญเสีย การสูญเสียพลังงานเป็นผลมาจากสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกของวัสดุยาง

5.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamics Mechanical Analysis)

สมบัติเชิงกลพลวัตอ้างอิงจากความเค้นและความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการเคลื่อนที่จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยเราจะอธิบายความเค้น ความเครียดที่เปลี่ยนแปลงในกรณีไซนูซอยดัล เมื่ออย่างได้รับความเค้นความเครียดจะไม่ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจะเกิดล่าช้าเล็กน้อย กรณีที่มีการเสียรูปเพียงเล็กน้อยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดคล้ายเป็นเชิงเส้น การทดสอบเชิงกลพลวัตสามารถทำการทดสอบได้ในโหมดของการดึง การกดอัด การเฉือนและรูปแบบอื่นๆ หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์อธิบายได้ดังนี้

สำหรับการดึงความเครียดไซนูซอยดัลในฟังก์ชันของเวลา (t) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (25)$$

เมื่อ ε_0 คือ แอมพลิจูดของความเครียด

ω คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

ความถี่เชิงมุมมีความสัมพันธ์กับความถี่ f (รอบต่อวินาที, เฮิรตซ์) ดังนี้

$$\omega = 2\pi f \quad (26)$$

ผลของความเค้นจากการกำหนดความเครียดไซนูซอยดัล (Sinusoidal Strain) เขียนสมการได้ดังนี้

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (27)$$

เมื่อ σ คือ แอมพลิจูดของความเค้น

δ คือ มุมเฟส (Phase Angle) ระหว่างความเค้นและความเครียด

ในกรณีการยืดหยุ่นอุดมคติของแข็ง (Ideal Elastic Solid) สามารถเขียนได้จากกฎของฮุค (Hooke's Law $\sigma = E\varepsilon$) ซึ่งค่าความเค้นจะเกิดในเฟสกับความเครียด (เมื่อ $\delta = 0$ จากสมการ (27)) สมการเขียนได้

$$\sigma = E\varepsilon = E\varepsilon_0 \sin(\omega t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (28)$$

เมื่อ σ_0 คือ ขนาดฟังก์ชันของความเค้น ($\sigma_0 = E\varepsilon_0$)

ในกรณีของเหลวหนืดอุดมคติ (Ideal Viscous Fluid) ความเค้นนอกเฟสกับความเครียด ($\delta = \pi/2$) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถเขียนสมการได้

$$\sigma = \eta_e \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (29)$$

เมื่อ η_e คือ ความหนืดของการดึง

สมการอนุพันธ์ของความเครียดไซน์ซอซัดเทียบกับเวลา

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = i\omega\varepsilon_0 \exp(i\omega t) = i\omega\varepsilon \quad (30)$$

สมการอนุพันธ์ของความเครียดไซน์ซอซัด จากสมการที่ (25) ได้ผลลัพธ์แทนค่าในสมการที่ (29) สมการเขียนได้

$$\sigma = \eta\omega\varepsilon_0 \cos(\omega t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \pi/2) \quad (31)$$

เมื่อกำหนดให้ $\sigma_0 = \eta\omega\varepsilon_0$

ความเครียดไซน์ซอซัด (Sinusoidal Strain) สามารถเขียนได้ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (32)$$

เมื่อ $i = \sqrt{-1}$ แทนค่าในสมการที่ (27) ความเค้นสามารถเขียนในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้โดย

$$\sigma^* = \sigma_0 [\cos(\omega t + \delta) + i \sin(\omega t + \delta)] \quad (33)$$

ตามกฎของฮุก โมดูลัสเชิงซ้อนสามารถกำหนดได้ด้วยอัตราส่วนของความเค้นเชิงซ้อนและความเครียดเชิงซ้อนได้

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \exp(i\delta) \quad (34)$$

โมดูลัสเชิงซ้อนสามารถแยกกระจายออกเป็น 2 องค์ประกอบ คือ อินเฟส (In Phase (E_1)) และออกนอกเฟส (Out of Phase (E_2)) กับความเครียดจากกฎที่ว่า

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (35)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (36)$$

$$\exp(i\delta) = \cos \delta + i \sin \delta \quad (37)$$

แทนค่าในสมการที่ (34) จะได้

$$E^* = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \cos \delta + i \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \sin \delta \quad (38)$$

หรือสมการที่ (38) สามารถเขียนได้

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (39)$$

เมื่อ E^* คือ โมดูลัสเชิงซ้อน (Complex Modulus)

E_1 คือ โมดูลัสสะสม (Storage Modulus)

E_2 คือ โมดูลัสสูญเสีย (Loss Modulus)

อัตราส่วนของโมดูลัสสูญเสียและโมดูลัสสะสมสามารถกำหนดได้เป็นตัวแปรใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่เชิงกลพลวัตเรียกว่า $\tan \delta$

$$\tan \delta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} \quad (40)$$

6. แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function)

ในการวิเคราะห์วัสดุประเภทยางแบบจำลองของวัสดุจะแตกต่างจากฟังก์ชันพลังงานความเครียดทั่วไปเพราะยางมีสมบัติที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา คือความเค้นสมดุลหรือความเค้นที่เกิดจากการให้ภาระด้วยความเร็วช้าๆ ซึ่งเรียกพฤติกรรมของวัสดุประเภทนี้ว่า ไฮเปอร์อีลาสติกผลึกพันธ์ที่ทำจากวัสดุที่มีพฤติกรรมลักษณะนี้จำเป็นต้องหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) ซึ่งนักวิจัยหลายท่านได้เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function, W)

$$W = W(U) \quad (41)$$

เมื่อ U คือ ค่าเทนเซอร์ระยะการยืด (Stretch Tensor) เป็นเมทริกซ์แนวทแยงประกอบไปด้วยค่า $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ เป็นค่าระยะการยืดในแนวแกนหลัก X, Y, Z สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic Material) ซึ่งค่าของพลังงานความเครียดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสมมาตร (Symmetric Function) ของ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ได้

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (42)$$

พลังงานความเครียด W เป็นฟังก์ชันของสเตรนอินวาเรียนท์ (Strain Invariants)

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (43)$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\
 I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\
 I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

สมมติฐานที่ว่าวัสดุจะเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ ดังนั้น $I_3 = 1$

$$W = W(I_1, I_2) \tag{45}$$

ค่าความเค้นหลักเคาซี (Cauchy Principle Stress) ซึ่งเป็นค่าแรงต่อพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลง (Strained Area) สามารถอธิบายได้

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} f_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} + \sigma \tag{46}$$

7. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive Model)

ฟังก์ชันพลังงานความเครียด W เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมความยืดหยุ่น แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model) พัฒนามาจากความสัมพันธ์ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปเมื่อไม่พิจารณาถึงโครงสร้างภายในโมเลกุล โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนี้ไม่มีความหมายทางกายภาพ แต่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการปรับแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากที่สุดหรือการทำนายพฤติกรรมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ การจำลองพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุในลักษณะนี้มีข้อดีคือ จะทำนายได้แม่นยำในช่วงที่มีข้อมูลทดลอง แต่ไม่สามารถใช้สมการดังกล่าวทำนายพฤติกรรมในลักษณะที่ไม่มีข้อมูลทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบวัสดุในหลายๆ ลักษณะเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมให้มีความถูกต้องมากที่สุดกลุ่มที่สองเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพ (Physical Based Model) เป็นแบบจำลองที่ไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลการทดลองมากที่สุดก็สามารถทำนายพฤติกรรมได้ การพัฒนามาจากกลไกโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ ทฤษฎีจลนศาสตร์ (Kinetic Theory) หรือทฤษฎีกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics Theory) สมมติฐานจากการเคลื่อนที่ระดับโซโมเลกุลในแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุพอลิเมอร์ประเภทยาง ถูกนำมาเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงทางเอนโทรปี (Entropy) เนื่องจากแบบจำลองจากการสังเกตไม่สามารถทำนายพฤติกรรมที่ไม่ได้มีผล

การทดลองได้ เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกตจะอ้างอิงข้อมูลจากการทดลอง มาทำนายพฤติกรรม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาแบบจำลองที่นำความรู้ด้านกลไกการเสยรูป และการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นแม้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีไม่เพียงพอ แต่แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพสามารถทำนายพฤติกรรมช่วงที่ไม่มีข้อมูลได้

7.1 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model)

เป็นแบบจำลองที่อ้างอิงกับข้อมูลทดสอบ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนี้ ไม่มีความหมายทางกายภาพ แต่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการปรับแบบจำลองให้เข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหรือการทำนายพฤติกรรมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ การจำลองพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุในลักษณะนี้มีข้อดีคือ มีความแม่นยำในช่วงที่มีข้อมูลทดลอง แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้สมการดังกล่าวทำนายพฤติกรรมในลักษณะที่มีการทดสอบเพียงอย่างเดียวได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบวัสดุในหลายๆ ลักษณะเพื่อใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมให้มีความถูกต้องมากที่สุด

7.1.1 แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model)

ฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function) สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก และอัดตัวไม่ได้ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมของค่าที่ไม่ผันแปรของเทนเซอร์การเสยรูปได้ มีรูปแบบดังนี้

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J_{el} - 1)^2 \quad (47)$$

โดยที่ C_{ij} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

$$\sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J_{el} - 1)^2 \text{ เทอมนี้ใช้ในกรณีที่ยางสามารถบีบอัดได้}$$

แต่ในงานวิจัยนี้ศึกษาขางซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่สามารถอัดตัวได้ดังนั้น ($J = 1$)

$$\text{ดังนั้น} \quad W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (48)$$

เมื่อ $N = 2$

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (49)$$

สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดสอบดึงแกนเดียวในช่วงความเครียด 0–300 เปอร์เซ็นต์

7.1.2 แบบจำลองมูนีรีฟลิน (Mooney-Rivlin Model)

แบบจำลองมูนีรีฟลิน นี้ค่าอันดับที่ 2 ($N = 2$) มีรูปแบบสมการเดียวกับแบบจำลองพหุนาม ที่มีค่าอันดับที่ 1 ($N = 1$) แบบจำลองมูนีรีฟลินเป็นแบบจำลองที่ทำนายพฤติกรรมของยางได้ไม่ถูกต้องมากนักเนื่องจากจำนวนเทอมของแบบจำลองมีน้อยเกินไปอย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้สามารถนำไปอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ในช่วงที่การยืดตัวไม่สูงมากดังนี้

เมื่อ $N = 2$

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (50)$$

สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดสอบดึงแกนเดียวในช่วงความเครียด 0–100 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่เหมาะกับการทดสอบแบบการกด

เมื่อ $N = 3$

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (51)$$

โดยที่ $C_{20} = C_{02} = 0$

7.1.3 แบบจำลองอ็อกเดน (Ogden Model)

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อีกแบบจำลองหนึ่ง ซึ่งเขียนอยู่ในรูปแบบผลรวมของอัตราส่วนการยืดตัวและสามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้ดี ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้งานในอันดับที่ $N=2$ หรือ $N=3$ แต่จะมีความคลาดเคลื่อนมากเมื่อมีอันดับมากกว่า 3 ($N > 3$) เนื่องจากเลขยกกำลังเป็นเลขจำนวนจริงใดๆ ก็ได้มีรูปแบบดังนี้

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3 \right] \quad (52)$$

$$\text{โดยที่ } \lambda_1 = \lambda \text{ และ } \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left(\lambda_1^{\alpha_n} + 2\lambda_2^{\frac{-\alpha_n}{2}} - 3 \right) \quad (53)$$

โดยที่ μ และ α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

7.1.4 แบบจำลองโยห์ (Yeoh Model)

เป็นแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลจากการทดสอบแบบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะสามารถลดการทดสอบวัสดุลง อย่างไรก็ตามจะให้ผลมีความคลาดเคลื่อนที่ค่าความเครียดต่ำ ซึ่งแบบจำลองมีรูปแบบดังนี้

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (54)$$

สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดสอบดึงแกนเดียว และการทดสอบแบบการกดในช่วงความเครียด 0–100 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่เหมาะสมกับความเครียดต่ำ และจะเหมาะสมเมื่อมีค่าจากการทดสอบดึงแกนเดียวเพียงค่าเดียว

7.1.5 แบบจำลองโฟม (Foam Model)

เป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมกรีดหยุ่น มีรูปแบบดังนี้

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} [\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3] + \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\beta_n} (1 - J^{\beta_n}) \quad (55)$$

โดย μ_n, α_n และ β_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

7.2 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (Physical Based Model)

เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปลักษณะอื่นๆ ที่ไม่ได้มีผลการทดลองมาก่อน เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกตจะอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองมาทำนายพฤติกรรม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาแบบจำลองที่นำความรู้ด้านกลไกการเสียรูปและการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นแม้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีไม่เพียงพอ แต่แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพสามารถทำนายพฤติกรรมในช่วงที่ไม่มีข้อมูลได้

7.2.1 แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)

เป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีมีรูปแบบดังนี้

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad \text{ซึ่งค่า } C_{10} = \frac{G}{2} \quad (56)$$

โดย G คือ ค่าโมดูลัสของการเฉือน (Shear Modulus)

สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดสอบดึงแกนเดียวในช่วงความเครียด 0–40 เปอร์เซ็นต์ และทำนายพฤติกรรมกรีดธรรมดา (Simple Shear) ได้ดีในช่วงความเครียด 0–90 เปอร์เซ็นต์

7.2.2 แบบจำลองอูรดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)

แบบจำลองอูรดาบอยซ์เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางฟิสิกส์ โดยการพิสูจน์มาจากทฤษฎี Non-Gaussian Network ที่กำหนดให้มีสปริง 8 อันเชื่อมต่อกันที่จุดศูนย์กลางของอิลิเมนต์รูปทรงลูกบาศก์ (Cubic Element) แบบจำลองนี้มีความพิเศษเฉพาะตั้งแต่ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดึงมีความแม่นยำเที่ยงตรงสำหรับวิธีการที่หลากหลายของการเสียรูปทั้งหมดของระดับความเครียด

$$W = nkT \left[\frac{1}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{20N}(I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050N^2}(I_1^3 - 27) + \frac{19}{7000N^3}(I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750N^4}(I_1^5 - 243) \right] \quad (57)$$

โดยที่ n คือ จำนวนโซ่ของพอลิเมอร์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Cross-link Density)

k คือ ค่าคงที่โบลท์ซแมน (Boltzman Constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature)

สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดสอบดึงแกนเดียวในช่วงความเครียด 0–300 เปอร์เซ็นต์ และจะเหมาะสมเมื่อมีค่าจากการทดสอบดึงแกนเดียวเพียงค่าเดียว

7.2.3 แบบจำลองเจนท์ (Gent Model)

แบบจำลองเจนท์เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากโครงสร้างโมเลกุลของสารที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (Elastomer) โดยการพิสูจน์มาจากทฤษฎี Non-Gaussian Network สามารถทำนายพฤติกรรมการยืดหยุ่น มีรูปแบบดังนี้

$$W = \frac{-EI_m}{6} \log \left[\frac{I_m}{I_m - I_1^*} \right] \quad (58)$$

โดย $I_1^* = I_1 - 3$

สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดสอบดึงแกนเดียวในช่วงความเครียด 0–300 เปอร์เซ็นต์

7.3 การวัดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์

การวัดความคลาดเคลื่อนของค่าจริงและค่าที่พยากรณ์ได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ หรือจำนวนข้อมูลต่างๆ จะพิจารณาจากการที่ค่าจริงใกล้เคียงค่าพยากรณ์มากที่สุด หรือทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จะเป็นค่าที่เหมาะสมกับการใช้พยากรณ์ให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ การวัดความคลาดเคลื่อนสามารถวัดได้จากค่าดังนี้

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

$$(MSE) = \frac{\sum (\text{ค่าจากการทดสอบจริง} - \text{ค่าจากแบบจำลอง})^2}{N} \times 100 \quad (59)$$

โดย ค่า N คือ จำนวนของข้อมูลที่พิจารณา

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรม Marc Mentat

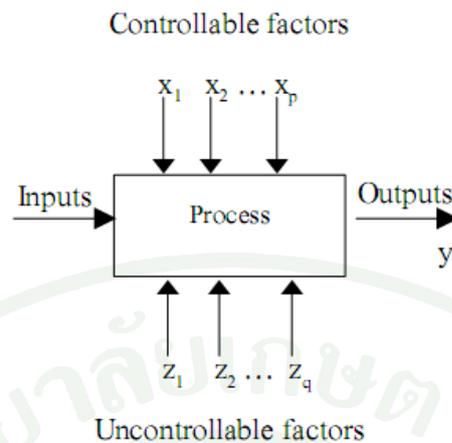
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าสัมประสิทธิ์
แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model) เมื่อ N = 2	C01
	C10
	C11
	C02
	C20
	C20
แบบจำลองมูนีรีฟลิน (Mooney-Rivlin Model)	C01
	C10
แบบจำลองอ็อกเดน (Ogden Model)	MODULI, μ
	EXPONENTS, α

ตารางที่ 1 (ต่อ)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	ค่าสัมประสิทธิ์
แบบจำลองโยห์ (Yeoh Model)	C10
	C20
	C30
แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)	C10
แบบจำลองอรรูดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)	NKT
	N
แบบจำลองโฟม (Foam Model)	MODULI, μ_n
	ALPHAS, α_n
	BETAS, β_n
แบบจำลองเจนท์ (Gent Model)	E
	I_M

8. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

Montgomery (2001) กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ การออกแบบการทดลอง คือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใด หรือตัวแปร (Input Response) ใด ที่มีผลต่อสิ่งที่ให้ความสำคัญ หรือสิ่งที่สนใจ ในลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response) ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วัตถุประสงค์ของการทดลองคือ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการ และระบบซึ่งแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 รูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

ที่มา: Montgomery (2001)

8.1 ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ

8.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ

8.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ เนื่องจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย, ต้นทุนในการควบคุมสูงมาก, มีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก

8.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

8.2.1 การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการ คือ ทำให้ผู้ทดลอง สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมา ใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองแล้วการทดลองซ้ำ จะสามารถทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

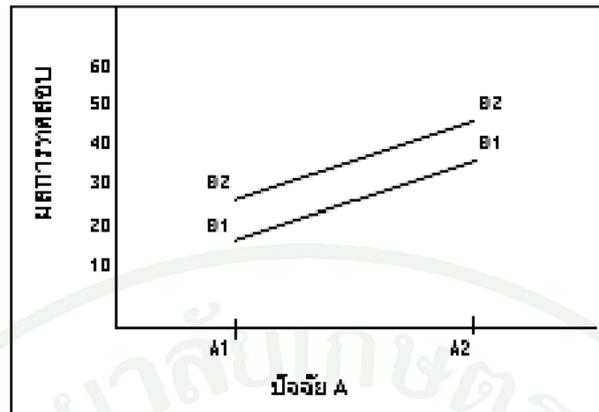
8.2.2 การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึงการทดลองที่มีลำดับของการทดลองและการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องมีการกระจายอย่างอิสระ การที่เราได้ทำการทดลองแบบสุ่ม จะทำให้เราลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

8.2.3 การทำการทดลองแบบบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง(Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ

8.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

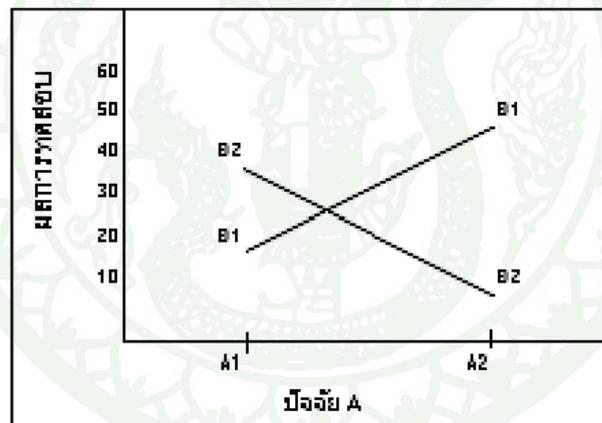
การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลคือ การศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลอง โดยระดับของปัจจัยคือ จำนวนของคุณภาพที่ศึกษาในแต่ละปัจจัยของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นการจัดการทดลอง ซึ่งการจัดการทดลองแบบนี้ผู้ทดลองสามารถที่จะศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้ในเวลาเดียวกันรวมทั้งสามารถศึกษาปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ซึ่งคือ การแสดงออกของระดับต่างๆ ในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย ซึ่งหมายถึงว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ นั่นเอง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลหลายๆ ปัจจัย โดยมีรูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท กล่าวคือ อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้นและอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) กล่าวคือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วม อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ ดังภาพที่ 14 ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วม และภาพที่ 15 เมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วม โดย A และ B คือปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 14 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล

ที่มา: ปารเมศ (2545)



ภาพที่ 15 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

ที่มา: ปารเมศ (2545)

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลทั่วไปมีรูปแบบต่างๆ ไป คือ $A \times B \times C \times \dots$ แฟคทอเรียล เช่น $3 \times 2 \times 2$ แฟคทอเรียล รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญได้แก่

8.3.1 2^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ เท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เช่น 2^2 แฟกทอเรียล ยกตัวอย่าง กล่าวคือ ปัจจัย A และ ปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ทั้งหมดนี้จะ ถูกจัดให้อยู่ในรูปการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละการทำซ้ำของการทดลอง จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนการทำซ้ำ ทั้งหมด n ครั้ง

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, a$ คือ ระดับของปัจจัย A

$j = 1, 2, \dots, b$ คือ ระดับของปัจจัย B

$k = 1, 2, \dots, n$ คือ จำนวนซ้ำ

รูปแบบโดยทั่วไปของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถ แสดงได้ดังตารางที่ 2 เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง abn ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่มดังนั้นการ ออกแบบเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Error)

ตารางที่ 2 รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

		ปัจจัย B			
		1	2	...	b
1		$Y_{111}, Y_{112},$	$Y_{121}, Y_{122},$		$Y_{1b1}, Y_{1b2},$
		\dots, Y_{11n}	\dots, Y_{12n}		\dots, Y_{1bn}
2		$Y_{211}, Y_{212},$	$Y_{221}, Y_{222},$		$Y_{2b1}, Y_{2b2},$
		\dots, Y_{21n}	\dots, Y_{22n}		\dots, Y_{2bn}
.					
ปัจจัย A	a		$Y_{a11}, Y_{a12},$	$Y_{a21}, Y_{a22},$	$Y_{ab1}, Y_{ab2},$
			\dots, Y_{a1n}	\dots, Y_{a2n}	\dots, Y_{abn}

ที่มา: ปารเมศ (2545)

ข้อมูลจากการทดลองอาจจะเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ ตัวอย่างการทดลองแฟคทอเรียลของปัจจัย 2 ปัจจัย A กับ B

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (60)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย A

β คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย B

$\tau\beta$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ กับ β

ε_{ijk} คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เนื่องจากการทดลองครั้งนี้มีจำนวนการทำซ้ำ n ครั้ง จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ abn

8.3.2 3^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ ใน k ปัจจัย เช่น 3^2 แฟคทอเรียล 3^3 แฟคทอเรียลเนื่องจากการออกแบบ 2^k แฟคทอเรียลเหมาะสมกับรูปแบบที่มีความเป็นเส้นตรง จึงจะมีความถูกต้องในการตีความข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นหากว่าอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองมีความเป็นเส้นตรงไม่ดีแล้วจะหันมาใช้แบบ 3^k แฟคทอเรียล แทนจะเหมาะสมกว่า

ตัวอย่างการทดลองแฟคทอเรียลของปัจจัย 3 ปัจจัย A B และ C โดยให้

$i = 1, 2, \dots, a$ คือ ระดับของปัจจัย A

$j = 1, 2, \dots, b$ คือ ระดับของปัจจัย B

$k = 1, 2, \dots, c$ คือ ระดับของปัจจัย C

$l = 1, 2, \dots, n$ คือ จำนวนซ้ำ

สมการตัวแบบของแหล่งความผันแปรต่อตัวแปรตอบสนอง คือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (61)$$

โดยที่ y คือ ค่าตัวแปรตอบสนองของการทดลอง
 μ คือ ค่าเฉลี่ย
 τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย A
 β คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย B
 γ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย C
 $\tau\beta$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ กับ β
 $\tau\gamma$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ กับ γ
 $\beta\gamma$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β กับ γ
 $\tau\beta\gamma$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ , β และ γ

8.4 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

8.4.1 กำหนดและทำความเข้าใจปัญหา คือ การศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการหรือระบบ เพื่อกำหนดปัญหาในการออกแบบการทดลองให้แน่ชัด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

8.4.2 เลือกปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง คือ การเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง การกำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง

8.4.3 เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ โดยจะเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษา

8.4.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ในการเลือกการออกแบบการทดลองจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเสมอ โดยจะพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อก หรือการทดลองแบบสุ่มอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่

8.4.5 ทำการทดลองตามวิธีการที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้ว

8.4.6 วิเคราะห์ผลโดยใช้หลักการทางสถิติ คือ การนำวิธีทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทำการทดลองไว้ เพื่อช่วยในการหาข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่

8.4.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการสรุปผลของกระบวนการที่ทำการทดลอง ซึ่งอาจแสดงในรูปของตาราง กราฟ หรือแผนภูมิ

9. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) อีกวิธีหนึ่งซึ่งให้ผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ของปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ โดยปัญหาเหล่านี้สามารถอธิบายอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หรืออยู่ในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น ซึ่งผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ของปัญหาเหล่านี้หาได้ยากหรืออาจจะหาไม่ได้เลย หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นต้น เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆ พื้นที่หรือเป็นปริมาตรหลายๆ ปริมาตรต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่าเอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ โดยผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์ต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขของเขตที่กำหนดให้ ซึ่งหมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ และทำการสร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ โดยสมการที่สร้างขึ้นมาต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายปัญหานั้น จากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ โดยสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาจะเป็นระบบสมการพีชคณิต จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงไปในระบบสมการรวม แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการดังกล่าวก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้นๆ ผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีนี้จะถูกต้องมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับ 2 ประการหลัก

การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างจริงของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด

การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) มีข้อดีเหนือกว่าการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีการอื่นดังนี้

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปวิเคราะห์ปัญหาได้หลายแขนง เช่น การวิเคราะห์ความเค้น การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การวิเคราะห์การไหล เป็นต้น

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่มีข้อจำกัดทางด้านรูปร่างของปัญหา นั่นคือสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้โดยง่าย และสะดวก

สามารถจำลองการกระทำของไหลในสภาพต่างๆ เช่น ไหลที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้ใกล้เคียงกับสภาพเป็นจริง

ใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ประกอบไปด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มีความยุ่งยาก

ไม่มีข้อจำกัดในด้านคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ทำกรวิเคราะห์

ไม่มีข้อจำกัดทางด้านของเงื่อนไขขอบเขต เงื่อนไขบังคับ และจุดรองรับ

ในการออกแบบและผลิตชิ้นงานในงานวิศวกรรมมักนิยมใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ก่อนที่จะผลิตชิ้นงานจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลา

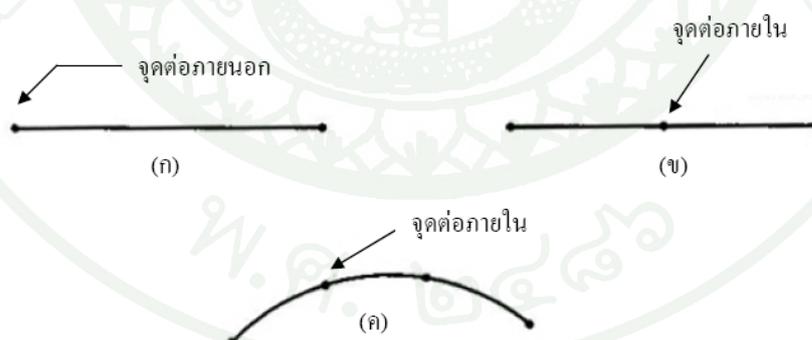
9.1 การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากรูปแบบของชิ้นงานต่างๆ ในทางวิศวกรรมโดยปกติจะมีความซับซ้อนวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมที่เป็นโครงสร้างและไม่เป็นโครงสร้าง โดยการวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างนับตั้งแต่ปัญหาการยึดหยุ่นของของแข็ง การถ่ายเทความร้อน ตลอดจนการไหลของของไหลและประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานชนิดต่างๆ ได้หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆ ที่เราสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ โดยในขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จะใช้ในการทดลอง เป็นต้น

9.2 ชนิดของเอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การเลือกใช้ให้เหมาะสมกับรูปร่างและลักษณะการกระทำของภาระ เอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับปัญหาเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์ปัญหาความเค้น (Stress Analysis) มีเอลิเมนต์ให้เลือกหลายลักษณะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างและภาระของปัญหาที่จะวิเคราะห์ เอลิเมนต์อาจจะแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ เอลิเมนต์มิติเดียว เอลิเมนต์สองมิติ เอลิเมนต์สามมิติและเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกน ในโปรแกรมที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากมีเอลิเมนต์ให้เลือกหลายลักษณะแล้ว การเลือกลักษณะของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ที่คำนวณได้ โดยแบ่งออกเป็น เอลิเมนต์อันดับหนึ่ง (First Order Element) และ เอลิเมนต์อันดับที่สอง (Second Order Element) มีความแตกต่างกันที่ เอลิเมนต์อันดับที่สองจะมีจุดต่อ (Node) ต่อเอลิเมนต์มากกว่าจึงให้ความแม่นยำกว่าเอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง เหมาะกับงานที่มีความโค้งงอมาก ๆ และบริเวณที่มีความเข้มของความเค้น (Stress Concentration) แต่ไม่เหมาะกับปัญหาที่มีเงื่อนไขการสัมผัส ปัญหาการกระแทก (Impact) และปัญหาที่เกิดการบิดตัว (Distort) ของเอลิเมนต์

9.2.1 เอลิเมนต์มิติเดียว เอลิเมนต์ชนิดนี้นิยมนำไปใช้วิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่เป็นเส้นลวด ท่อยาว ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน

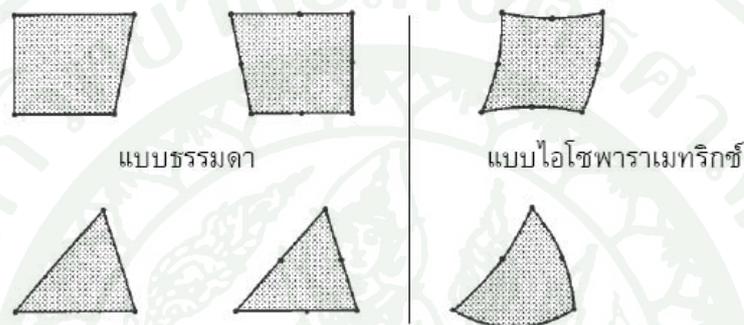


ภาพที่ 16 เอลิเมนต์มิติเดียว

ที่มา: เดช (2541)

ภาพที่ 16 (ก) เป็นเอลิเมนต์ที่มีจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้าน เรียกว่า จุดต่อภายนอก ภาพที่ 16 (ข) เป็นเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยสามจุดต่อ ภาพที่ 16 (ค) คือเอลิเมนต์แบบสี่จุดต่อ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างที่มีการยึดตัวไม่ตรง เช่น ขดลวด โค้งงอ

9.2.2 เอลิเมนต์สองมิติ เอลิเมนต์ชนิดนี้มักใช้กับการวิเคราะห์ชิ้นงานในแนวระนาบ แกน x-y โดยทั่วไปจะมีรูปทรงเป็นสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ประกอบเป็นด้านด้วยเส้นตรงหรือโค้ง

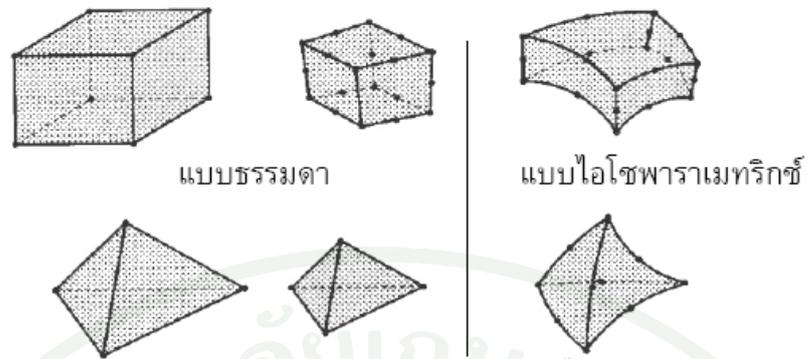


ภาพที่ 17 เอลิเมนต์สองมิติ

ที่มา: เดช (2541)

โดยทั่วไปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับการเลือกใช้มากกว่าเอลิเมนต์ชนิดอื่นๆ เพราะในระดับชั้นความอิสระที่เท่ากันเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องกำหนดเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมมาใช้ เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์เหมาะกับการแบ่งโดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม

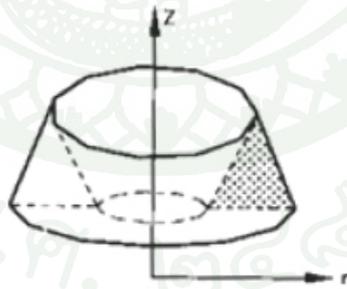
9.2.3 เอลิเมนต์สามมิติ รูปร่างในกรณีนี้จะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และรูปทรงสี่หน้า



ภาพที่ 18 เอลิเมนต์สามมิติ

ที่มา: เดช (2541)

9.2.4 เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Element) นอกจากเอลิเมนต์ทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมาแล้วยังมีเอลิเมนต์แบบสมมาตร รอบแกนซึ่งใช้วิเคราะห์กับรูปทรงที่มีความสมมาตรรอบแกน นอกจากการวิเคราะห์จะได้ผลเฉลยที่ถูกต้องเช่นเดิมแล้วยังลดภาระในการคำนวณลง เนื่องจากถ้าวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งชิ้นงานจะเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการและใช้เวลาในการคำนวณมาก

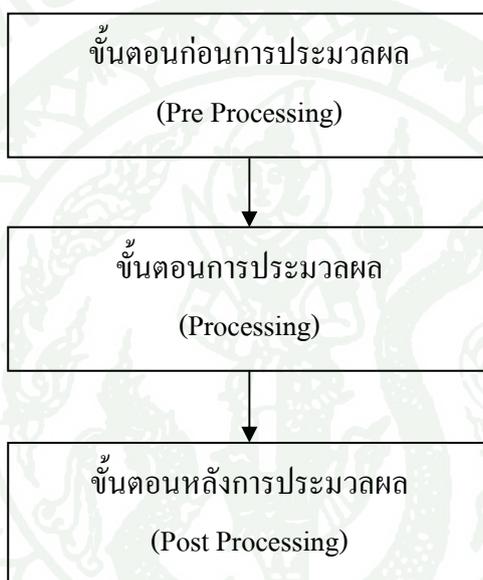


ภาพที่ 19 เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน

ที่มา: เดช (2541)

9.3 ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และเป็นที่ยอมรับใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีลักษณะรูปร่างและพฤติกรรมที่ซับซ้อน ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือสภาพยืดตัว (Plastic) ปัญหาที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการแก้ปัญหาวางออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการทำงานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ที่มา: ปราโมทย์ (2550)

9.3.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre Processing)

ขั้นตอนการเตรียมการประมวลผลเป็นขั้นตอนการจำลองปัญหาทางกายภาพ (Modeling) โดยเริ่มจากหาเอกลักษณ์ของปัญหาทางกายภาพที่จะวิเคราะห์ (Identify Problem) ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาที่วิเคราะห์เป็นปัญหาลักษณะใด? ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์คืออะไร? เป็นต้น คำตอบที่ได้เหล่านี้จะนำไปสู่การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาอันประกอบไปด้วยลักษณะรูปร่างของแบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและโหลดที่กระทำ (Boundary

Condition) เงื่อนไขการสัมผัส (Contact Condition) การเลือกแบบจำลองของวัสดุ (Constitutive Equation) การเลือกสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์ (เลือกวิธีการที่จะวิเคราะห์เช่น ปัญหาทางความร้อน การวิเคราะห์ความเค้น เป็นต้น) การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ และ กระบวนการเมช (Meshing) ที่จะแบ่งรูปร่างของแบบจำลอง ออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ (Discretization) โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องสอดคล้องกับเอกลักษณ์ของปัญหาทางกายภาพที่วิเคราะห์ด้วย

9.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล (Processing)

เป็นขั้นตอนการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาซึ่งสร้างได้หลายวิธี เช่น วิธีการโดยตรง (Direct Methods) วิธีการแปรผัน (Variational Methods) และ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weighted Residual Methods) โดยอาศัยข้อมูลและข้อกำหนดจากขั้นตอนก่อนการประมวลผล จากนั้นทำการแก้ระบบสมการเพื่อหาคำตอบที่ต้องการ

9.3.3 ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post Processing)

เป็นขั้นตอนของการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟฟิกหรือเป็นข้อมูลที่เป็นตัวเลข จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อจากขั้นตอนที่การแก้ปัญหาของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้ง สามขั้นตอนจะพบว่าหากใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมาวิเคราะห์ปัญหา ขั้นตอนที่มีความสำคัญคือขั้นตอนก่อนการประมวลผล และขั้นตอนหลังการประมวลผล เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการวิเคราะห์ปัญหาและความเข้าใจในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของผู้ใช้ (User) ส่วนขั้นตอนการประมวลผล เป็นขั้นตอนการเลือกกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ หรือเลือกใช้สมการในการแก้ปัญหาซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากที่ผู้ใช้จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุจากการทดสอบสมบัติจำเป็นที่เกี่ยวข้องการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต กำหนดการแบ่งเอลิเมนต์และกำหนดผลที่ได้จากการจำลอง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bergstrom and Boyce (1998) พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุประเภทโพลีเอทิลีน เป็นที่รู้กันดีว่าขึ้นกับภาวะแบบวงรอบ อย่างไรก็ตามลักษณะพิเศษเหล่านี้เป็นผลตอบสนองของคอนสตีติวทีฟของ

ยาง พิจารณาข้อมูลการทดลองและการสร้างโมเดลใหม่สำหรับการขึ้นกับเวลาของอิลาสโตเมอร์ได้ ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง พื้นฐานของโมเดลนี้คือสามารถแบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกสมมูล โครงสร้างสอดคล้องกับสถานะการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นที่เวลาหลายๆ ส่วนที่สองคือ การขึ้นกับอัตราไม่เชิงเส้นใน โครงสร้างที่มาจากการสมมูลสถานะการขึ้นของเวลาของสอง โครงสร้าง เราจะสมมติให้ถูกควบคุมโดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุล รายละเอียดของแบบจำลองเชิงกลขนาดเล็ก ถูกสร้างขึ้น โดยใช้การแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 และ 3 มิติ ผลที่ได้บ่งชี้ว่าผลกระทบจากการใส่อนุภาคที่ทำให้สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำโดยใช้แบบจำลองสามมิติ การเปรียบเทียบระหว่างโมเดลใหม่ที่ได้กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองสำหรับความแตกต่างของอิลาสโตเมอร์

Lee *et al.* (2000) สนใจในการพัฒนาออกแบบห้องโดยสารของรถยนต์ และวิธีการพัฒนาระบบรองรับที่ดีขึ้นกว่าเดิม โดยทำการพัฒนาปรับปรุงยางรองแท่นเครื่อง ระบบการลดเสียงรบกวน และการสั่นสะเทือนขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก เพื่อรองรับน้ำหนักของเครื่องยนต์ โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ออกแบบ active engine mount (AEM) ในการลดการสั่นสะเทือน ในขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสูง (High static stiffness) โดยจะทำการออกแบบบนพื้นฐานของโครงสร้างของยางรองแท่นเครื่องแบบไฮดรอลิก ซึ่งการลดเสียงรบกวนจากแรงของเครื่องยนต์ จะใช้วิธีการปรับเปลี่ยนการควบคุม โดยใช้ Normalized Filtered-X LMS algorithm ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า AEM และการปรับเปลี่ยนการควบคุม สามารถลดการส่งผ่านแรงสั่นสะเทือนของรถยนต์ได้

Imbimobo and Luca (1998) ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่รับแรง และพื้นที่ด้านข้างของชิ้นงาน (Shape Factor) ของแบริงยางแบบแผ่นกลม ต่อการกระจายความเค้นและการกระจายความเครียดในเนื้อยาง เมื่อชิ้นงานรับแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (vertical Load) อย่างเดียว รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบสองมิติสมมาตรในแนวแกนหมุน (Axisymmetric Element) จากการศึกษพบว่า Edge Effect จะลดลงเมื่อ Shape Factor มีค่ามากขึ้น

Christopherson and Jazar (2006) ทำการตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งมีความยากในการระบุค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมโครงสร้างของยางรองแท่นเครื่องแบบไฮดรอลิก โดยใช้ความสัมพันธ์แบบไฮเปอร์อิลาสติกของวัสดุประเภทยาง ซึ่งใช้ผลิตเป็นก้อนยางรองแท่นเครื่องที่มีความถูกต้องแม่นยำ และผลลัพธ์ของการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้พัฒนาปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบเพื่ออธิบาย

พฤติกรรมแบบพลวัตของยางรองแท่นเครื่องแบบไฮดรอลิกที่แตกต่างกัน 2 ชนิดชัดเจน คือ Direct-decoupler hydraulic mount และ Floating-decoupler hydraulic mount ซึ่งการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง และถูกต้องแม่นยำในการระบุค่าพารามิเตอร์ เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยเหลือในกระบวนการออกแบบ ความถูกต้องของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการออกแบบการทดลองเพื่ออธิบายระบุพฤติกรรมของสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้

Johnson (1997) แบบจำลองคอนสตีติวทีฟสำหรับวัสดุวิสโคอีลาสติกที่มีความเครียดสูง อุณหภูมิของยางถูกแสดงให้ดูเกี่ยวกับ โมเดลต่างๆ สำหรับวัสดุซึ่งแยกกันระหว่างวัสดุสั้นและยาวในทอมของความเค้น สำหรับทอมสั้นของความเค้นมีการแยกของผลกระทบที่มาจากเวลาและความเค้นพวกเขาได้ทำการรวมแบบจำลองอินทรีย์กับ ตัวแปรแบบจำลองความเค้นภายในตัวแปรแบบจำลองการยึดภายในและแบบจำลองของแข็งภายในไว้ด้วยกัน ตัวแปรแบบจำลองการยึดภายในและแบบจำลองของแข็งภายในนั้นถูกกระตุ้นโดยการอธิบายเชิงโมเลกุลในวิสโคอีลาสติกซิตีของยาง การทดสอบวัสดุเพื่อที่จะทำการหาค่าคงที่สำหรับความเครียดสูงเหล่านี้เป็นปัญหาของการคำนวณหาฟังก์ชันของความหนาแน่นของพลังงานในยางซึ่งถูกใช้ในการอธิบายทั้งในทอมของพลังงานที่สั้นและทอมของพลังงานที่ยาวใน โมเดลเหล่านี้ถูกแสดงไว้แล้ว การปรับปรุงขั้นตอนในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมโพร์นีย์ซึ่งระบุถึงสเปกตรัมเวลาการผ่อนคลายของวัสดุจากข้อมูลการคลายตัวจากการทดลองได้ถูกแสดงเอาไว้

Kim and Kim (1997) ทำการออกแบบรูปร่างยางรองแท่นเครื่องที่เหมาะสม โดยการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของยางรองแท่นเครื่อง โดยใช้วิธีแบบ parametric optimization โดยรูปร่างต้องมีความแข็งแรง และต้องคำนึงถึงวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบยางรองแท่นเครื่องสามารถปรับเปลี่ยนโดยการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมอะบาคัส ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของชิ้นงานจริงด้วย

Kim *et al.* (2004) ได้นำเสนอวิธีการประมาณระยะเวลาที่ยางรองแท่นเครื่องจะสูญเสียความยืดหยุ่น (Fatigue) อันเกิดจากผลกระทบของโหลดการเคลื่อนที่ที่ได้รับ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลหาได้โดยการทดลองให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบที่ระดับภาระแตกต่างกัน ในที่นี้ได้ค่าที่เหมาะสม คือ ค่าความเครียด Green-Lagrange สูงสุด (Maximum Green-Lagrange Strain) และค่าความหนาแน่นของพลังงานความเครียดสูงสุด(Maximum Strain Energy Density) ซึ่งค่าความเครียด Green-Lagrange สูงสุดให้ผลที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า จากนั้นใช้ Nonlinear Finite Element วิเคราะห์

หาความสัมพันธ์ของภาระที่ได้รับกับพารามิเตอร์ รวมทั้งวิเคราะห์หาเส้นโค้งของระยะ เวลาในการเสื่อมสภาพ (Fatigue Life Curve) ระยะเวลาที่ย่างรองแทนเครื่องจะเสื่อมสภาพสามารถประมาณได้โดยการวิเคราะห์ภาระที่ย่างได้รับเทียบกับค่าความเครียด Green-Lagrange สูงสุด ร่วมกับเส้นโค้งของระยะเวลาในการเสื่อมสภาพ ซึ่งให้ผลการทดลองที่น่าพอใจที่ระดับ 4 ตัวแปร (Factor)

Vahdati and Saunders (2002) ได้นำเสนอวิธีการทดสอบคุณสมบัติของยาง รองแทน ในการรองรับการทำงานที่มีความถี่การสั่นสะเทือนสูงมาก ถึงระดับ 5000 เฮิรตซ์ ในขณะที่เครื่องทดสอบที่มีโซ่อยู่ในตลาดสามารถทดสอบได้เพียงแค่ระดับ 1000 เฮิรตซ์ โดยการจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ผลการทดลองทำให้ทราบถึงรูปแบบในการจับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบที่เหมาะสม รวมทั้งการเลือกใช้มวลของยางรองที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูง 5000 เฮิรตซ์ ผลของการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของยางรองแทนต้องมีขนาดน้อยมากๆ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำได้

Su (2006) ได้นำเสนอขั้นตอนสำหรับทดสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้ข้อมูลจากภาระที่มากระทำกับรถยนต์ เช่น ภาระจากพื้นถนน ภาระจากเครื่องยนต์ และได้แสดงสมการและฟังก์ชันการถ่ายโอนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเบื้องต้นพร้อมทั้งตัวอย่างการทดสอบยางรองแทนเครื่องที่ได้ทำการทดสอบมาแล้ว

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนตัวสำหรับการออกแบบ และวิเคราะห์
2. เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine
3. เครื่องทดสอบไดนามิกส์เชิงกล Dynamics Mechanical Analyzer (DMA)
4. ชิ้นงานยางรองแทนเครื่อง
5. ยางคอมปาวด์ ซึ่งใช้ผลิตยางรองแทนเครื่อง 1 กิโลกรัม
6. โปรแกรมช่วยทางวิศวกรรม Marc Mentat 2005r1

วิธีการ

1. ศึกษากระบวนการทำงานของยางรองแทนเครื่องยนต์

ศึกษากระบวนการทำงานของยางรองแทนเครื่องยนต์ การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ และศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกล และคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุยาง และส่วนประกอบอื่นๆ ในยางรองแทนเครื่อง พื้นฐานเกี่ยวกับการรับแรงสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์

2. การเตรียมชิ้นทดสอบวัสดุยาง

ทำการทดสอบวัสดุยางที่เป็นองค์ประกอบของยางรองแทนเครื่อง เพื่อนำข้อมูลไปใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด พร้อมทั้งเลือกแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุยางได้สอดคล้องกับความเป็นจริง

2.1 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของยางเติมผงคาร์บอนดำชนิดที่ใช้สำหรับผลิตยางรองแทนเครื่อง ซึ่งเป็นสูตรเฉพาะในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางรองแทนเครื่อง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ส่วนผสมจาก บริษัท ดีเอกเทอร์บู จำกัด และผลิตขึ้นทดสอบยาง ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ยาง กรมวิชาการเกษตร



ภาพที่ 21 ส่วนผสมยางที่ผ่านการบดผสมแล้ว

2.1.1 บดผสมยางให้เป็นแผ่น ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนหลังจากที่ผ่านการบดผสมยางแล้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ยางที่ศึกษาได้รับการผสมมาแล้วจากบริษัท ดังนั้นจึงนำยางมาบดผสมต่อที่เครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง ซึ่งจะเป็นการบดเพื่อลดขนาดความหนาของยางลง และเพื่อไล่ฟองอากาศในยาง



ภาพที่ 22 เครื่องบดผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง

2.1.2 การอบคงรูปร่าง การอบคงรูปร่างในแม่พิมพ์เป็นกระบวนการที่ทำให้ยางคงรูป โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด โดยมีขั้นตอนดังนี้ คือนำยางที่ได้จากเครื่องบดผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง มาปล่อยวางทิ้งไว้อย่างน้อย 3 ชั่วโมงเพื่อให้ยางเซตตัว และคลายความร้อนที่สะสมไว้จาก ขั้นตอนการบดผสมยาง แล้วนำมาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามแบบเพื่อเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งยางสูตรนี้ใช้เวลาในการอบคงรูป 3 นาที ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 23 เครื่องอบทรงรูปยาง

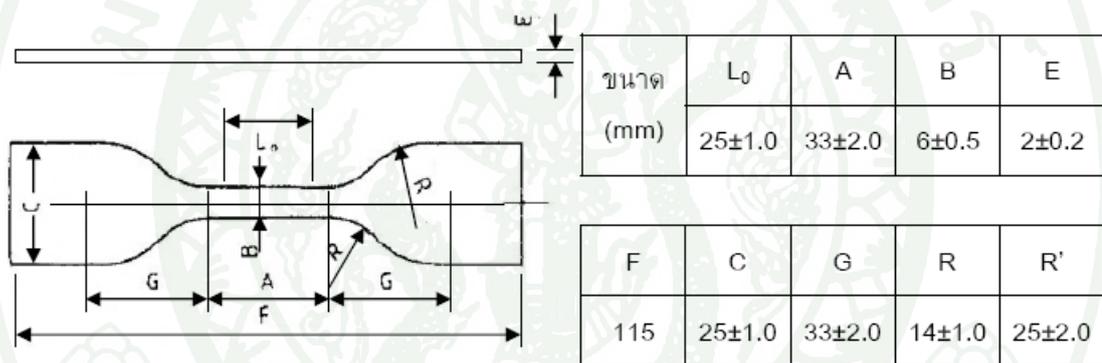


ภาพที่ 24 แม่พิมพ์สำหรับอบทรงรูปยางแผ่น

เมื่อผ่านการทรงรูปยางแล้ว ให้นำยางมาตัดขอบ ดังภาพที่ 25 หลังจากนั้นให้นำยางแผ่นที่ได้ไปตัดให้ได้ตามขนาดชิ้นงานมาตรฐาน ASTM D412 เป็นรูปร่างดัมเบลล์ ซึ่งมีขนาดและรูปร่างแสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 25 ยางที่ผ่านการอบคงรูปและทำการตัดขอบแล้ว



ภาพที่ 26 ชิ้นทดสอบมาตรฐาน ASTM D 412



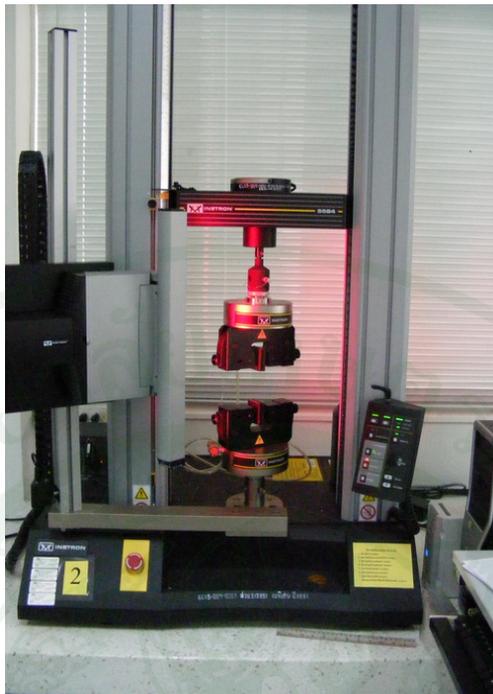
ภาพที่ 27 ชิ้นทดสอบการดึง และเส้นอ้างอิงระยะเริ่มต้น

3. การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุยาง และผลการทดสอบ

ทำการทดสอบวัสดุยาง ของยางรองแท่นเครื่อง ซึ่งแบ่งเป็น 3 การทดสอบ การทดสอบแรก เป็นการทดสอบการดึงเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด เพื่อหาค่าของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของวัสดุที่เหมาะสม การทดลองที่สอง เป็นจะเป็นการทดสอบการคลายความเค้น (Stress Relaxation) เพื่อนำค่าไปหาค่าสัมประสิทธิ์การผ่อนคลายความเค้น อนุกรมพอนี (Prony series) ของวัสดุยาง การทดลองครั้งที่สามคือ เพื่อตรวจสอบยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamics Mechanical Analysis) และการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ

3.1 การทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test)

ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 โดยดึงด้วยความเครียดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการความเร็วในการดึง 200 มิลลิเมตร/นาที ทำการดึงทั้งหมด 7 ครั้ง เพื่อกำจัดผลกระทบของมุลลิน (Mullins Effect) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้น โดยทำการทดลองที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (สาธยาย)



ภาพที่ 28 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine

3.2 การทดสอบการคลายความเค้น (Stress Relaxation)

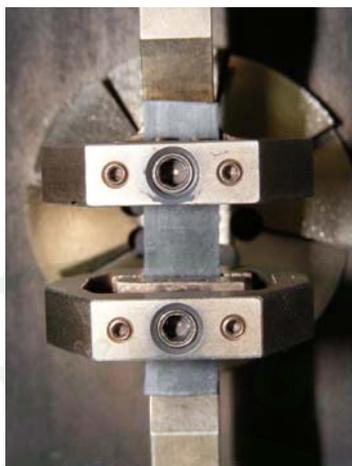
เนื่องจากยางมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น และมีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานเมื่อได้รับความเค้นในกรณีรับภาระเป็นวงรอบ (Cycle Load) ดังนั้นการทำนายพฤติกรรมนี้จึงต้องศึกษาพฤติกรรมการคลายความเค้น โดยการทดลองนี้ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมโพรนี่ (Prony Series) เพื่อใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางรองแท่นเครื่อง โดยกรณีที่กำลังจัดผลของมูนลินจากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine ดังภาพที่ 28 ด้วยขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 ที่ความเครียดเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำการกำจัดผลมูนลินโดยการดึงแล้วปล่อยกลับจำนวน 5 ครั้ง และจากนั้นคงที่ความเครียดเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ไว้เป็นเวลา 600 วินาที ทดลองภายในห้องอุณหภูมิให้คงที่ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองขึ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น โดยทำการทดลองที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (สาธายา)

3.3 การทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamics Mechanical Analysis)

ทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบ Dynamics Mechanical Analyzer (DMA) ดังภาพที่ 29 จะได้ค่าโมดูลัสของวัสดุ yang ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ค่าโมดูลัสได้แก่ โมดูลัสสะสม (Storage Modulus) โมดูลัสสูญเสีย (Loss Modulus) คอมเพล็กซ์โมดูลัส (Complex Modulus) และ $\tan \delta$ ซึ่งค่าคอมเพล็กซ์โมดูลัสที่กล่าวมานั้นเป็นผลรวมของค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสียดังสมการที่ (20) ซึ่งค่าคอมเพล็กซ์โมดูลัสเป็นสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์ไว้เพื่อตรวจสอบค่าการสูญเสีย เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสสะสม โดยทำการทดลองที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (สาขาศา) ชิ้นส่วนยางทดสอบมีขนาดความกว้าง 6 มิลลิเมตรยาว 20 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 30 โดยทำการทดสอบในโหมดการสั่นสะเทือน โดยเริ่มต้นด้วยการออกแรงดึงให้มีระยะยืดที่ความเครียด 25 เปอร์เซ็นต์ ก่อนและทำการดึงด้วยความเครียดไดนามิกส์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความถี่ 50 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์ และ 20 เฮิรตซ์ ทดลองภายในอุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส โดยจะทำการทดสอบที่ความถี่ 3 ระดับ คือ 20 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์ และ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งจะพิจารณาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องยนต์ คือรอบของเครื่องยนต์ที่ระดับสูง 3,000 รอบ/นาที หรือ 50 เฮิรตซ์ รอบเครื่องยนต์ระดับปกติ 2,100 รอบ/นาที หรือ 35 เฮิรตซ์ และรอบเครื่องยนต์ระดับเบา 1,200 รอบ/นาที หรือ 20 เฮิรตซ์



ภาพที่ 29 เครื่องทดสอบไดนามิกส์เชิงกล (Dynamics Mechanical Analyzer DMA)



ภาพที่ 30 ชิ้นทดลองการดึงไดนามิกส์เชิงกล

3.4 การทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ

การทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวที่รับในภาระแบบวงรอบจะมีผลกระทบของมุลลิน (Mullins Effect) ซึ่งขณะที่มีภาระแรงมากกระทำกับวัสดุอย่าง ในกรณีที่มีการคืนตัวของยางพหุติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะไม่ซ้ำแนวเดิม พลังงานไม่สามารถย้อนกลับได้หมด พลังงานที่มีการสูญเสียในแต่ละรอบเรียกว่าแฟคเตอร์การสูญเสีย (Loss Factor) แสดงค่าแฟคเตอร์การสูญเสียด้วยวงรอบฮิสเตอร์ีซิส ทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงดังในภาพที่ 28 ด้วยอัตราความเร็วในการดึง 200 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ความเครียดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 10 รอบ ภายในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด

การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดสามารถหาค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม Marc Mentat 2005r1 ช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของค่าพารามิเตอร์ โดยการนำข้อมูลค่าความเค้นวิศวกรรมกับความเครียดวิศวกรรมของการทดลองที่ได้จากการใช้วิธีอัตราส่วนปัวส์ซอง ของการทดลองทั้งสามแบบ และป้อนค่าเข้าไปใน โปรแกรม Marc Mentat 2005r1 เพื่อหาค่าพลังงานความเครียดที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมมากที่สุด

5. การหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมพอนี (Prony Series)

การหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมพอนี สามารถหาค่าพารามิเตอร์ จากโปรแกรม MSC. Software MarcMentat 2005r1 ช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์ โดยการนำข้อมูลค่าความเค้นกับเวลา จากการทดสอบการคลายความเค้น โดยการป้อนค่าเข้าไปในโปรแกรม MSC. Software Marc Mentat 2005r1 เพื่อหาค่าสเป็คตรัมของการผ่อนคลายความเค้นที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการคลายความเค้นมากที่สุด

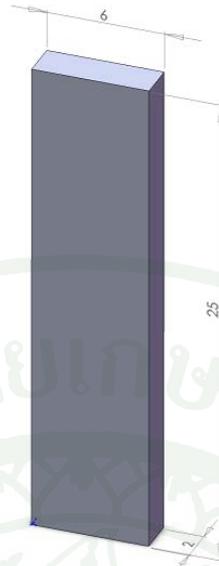
6. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุยาง

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งขั้นตอนการแก้ปัญหาออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่งขั้นตอนก่อนการคำนวณผล (Pre - Processing) ประกอบไปด้วยลักษณะรูปร่างของแบบจำลอง การเลือกแบบจำลองวัสดุ เงื่อนไขขอบเขต การเลือกใช้อิเล็กเมนต์ และภาวะที่กระทำ ขั้นตอนที่สองขั้นตอนการวิเคราะห์และคำนวณผล (Analysis) เป็นขั้นตอนการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหา โดยอาศัยข้อมูลและข้อกำหนดจากขั้นตอนก่อนการประมวลผล จากนั้นทำการแก้ระบบสมการเพื่อหาค่าตอบที่ต้องการ ขั้นตอนที่สามขั้นตอนการประมวลผลและแสดงผล (Post-Processing) เป็นขั้นตอนของการแสดงผลที่นำมาจากผลการคำนวณผล โดยอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟหรือข้อมูลที่เป็นตัวเลข จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อ

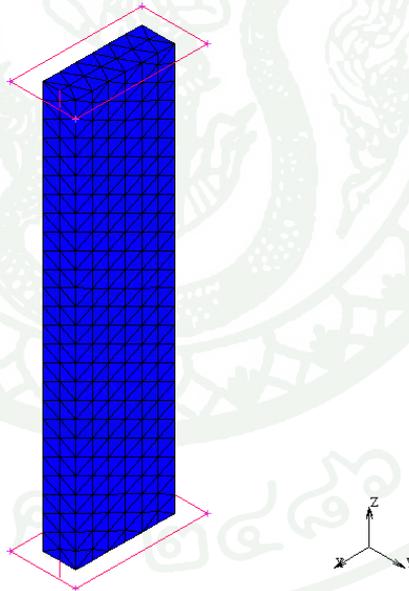
6.1 ขั้นตอนสร้างแบบจำลองวัสดุยางจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

6.1.1 ลักษณะรูปร่างและขนาดของแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้จะทำการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุยางรองแท่นเครื่อง เพื่อใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ว่าจะสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของวัสดุยางได้อย่างแม่นยำหรือไม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับการทดสอบการดึง การทดสอบการคลายความเค้น และการทดสอบการรับภาระแบบวงรอบ ซึ่งการตรวจสอบผลการทดลองเราจะใช้แบบจำลองที่มีรูปร่างเหมือนกันทั้ง 3 แบบ แต่จะกำหนดสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งในที่นี้จะใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขนาด กว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดเท่ากับชิ้นงานจริง โดยจะพิจารณาเฉพาะช่วงในการวัดเท่านั้น รายละเอียดรูปร่าง ขนาดของแบบจำลอง แสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 รูปร่างและขนาดของแบบจำลอง



ภาพที่ 32 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุยาง

6.1.2 การกำหนดแบบจำลองวัสดุ

จากการหาแบบจำลองของวัสดุยางที่เหมาะสม โดยจำลองให้ยางเป็นวัสดุแบบอัดตัวไม่ได้และมีคุณสมบัติไอโซโทรปิก และแบบจำลองวัสดุประเภทวิสโคไฮเปอร์อีลาสติก

ดังนั้นต้องหาค่าตัวแปรทั้ง 2 พฤติกรรมได้แก่ พฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติก พฤติกรรมวิสโคอีลาสติก โดยพฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติกได้เลือกแบบจำลองอ็อกเดน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดึงทั้ง 3 แบบของวัสดุอย่างมากที่สุด จากแบบจำลองทั้งหมด 8 แบบ ที่กล่าวไว้ในผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 33 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองอ็อกเดน และพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกจะหาได้จากผลการทดลองการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นค่าสเป็คตรัมของอนุกรมโพรนี อันดับ 3 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 34

OGDEN PROPERTIES			
METHOD			
ENTERED VALUES			
USER SUB. UELASTOMER			
BULK MODULUS	4796.32	TABLE	
MASS DENSITY	1		
# TERMS	2		
MODULI		EXPONENTS	
1	0.293486	1	2.61084
2	7.46412	2	0.154376
DAMPING		THERMAL EXPANSION	
RATE EFFECTS		DAMAGE EFFECTS	
VISCOELASTIC		RUBBER	
RESET	REMOVE	OK	

ภาพที่ 33 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองอ็อกเดน

WISCO-ELASTICITY FREE ENERGY RELAXATION CONTROL PARAMETERS

■ RELAXATION

NUMBER OF TERMS 3

COEFFICIENTS		
	LINEAR	RELAXATION TIME
1	0.0112521	10.4591
2	0.0127905	42.9802
3	0.0373549	316.604
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
LONG	0.692939	
SHORT	0.738267	

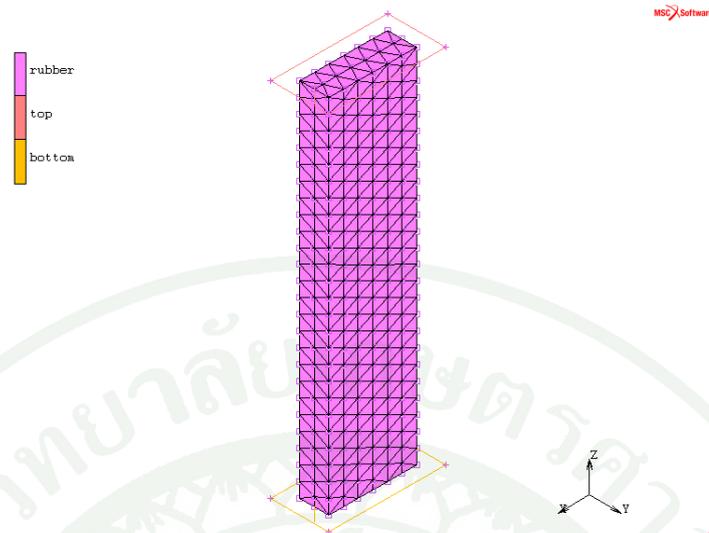
COMPUTE APPLY RESET OK

ERROR 5.77937e-006

ภาพที่ 34 ค่าสเป็คตรัมของอนุกรมโพรนี อันดับ 3

6.1.3 การกำหนดค่าของแบบจำลอง

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการสัมผัสให้กับแบบจำลองจะต้องสอดคล้องกับความเป็นจริงของการทดลอง แบบจำลองวัสดุขยงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนั้นจึงต้องกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสให้กับแบบจำลองวัสดุขยง โดยการสร้างพื้นผิว (Surface) สัมผัสด้านบนของแบบจำลองวัสดุขยง แสดงดังภาพที่ 35 ซึ่งผิวสัมผัสระหว่างพื้นผิวและผิวของวัสดุขยงกำหนดให้มีการมีสัมผัสแบบยึดติดกัน (Glued Contact) ที่เป็นฟังก์ชันภายในจากโปรแกรม Marc Mentat แสดงดังภาพที่ 36 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง



ภาพที่ 35 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองยางรถยนต์

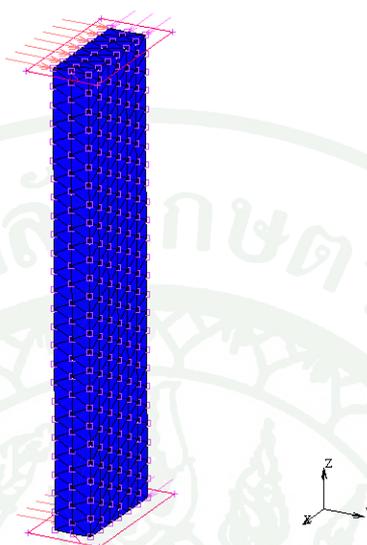


ภาพที่ 36 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง

6.1.4 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลองจะต้องสอดคล้องกับความเป็นจริงของการทดลอง โดยพิจารณาด้านบนของแบบจำลองจะใส่การตามการทดลองในแต่ละการทดลอง ด้านล่างของแบบจำลองจะยึดไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z รวมทั้งการกำหนด

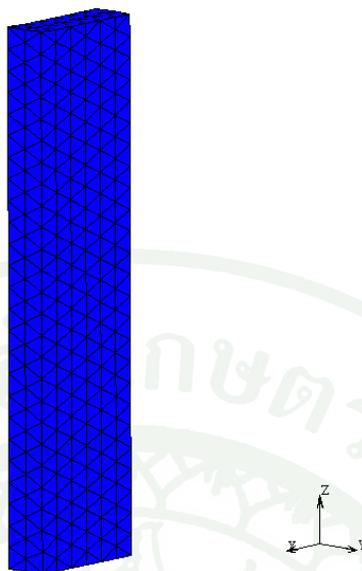
เงื่อนไขขอบเขตดังภาพที่ 37 กำหนดให้แบบจำลองไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y ตามลูกศร เพื่อป้องกันการลื่นไถลของแบบจำลอง



ภาพที่ 37 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

6.1.5 การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ในแบบจำลอง

การเลือกเอลิเมนต์ที่เหมาะสมนั้น เอลิเมนต์มีหลายแบบให้เลือกใช้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับรูปร่างและภาระของปัญหาที่จะวิเคราะห์ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบต่างๆ แต่ในตัวอย่างนี้เลือกใช้โซลิดเอลิเมนต์ (Solid Element) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบการใช้งานกว้าง มีรูปแบบเหมือนกับการแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ หลายๆ ส่วน โดยแต่ละเอลิเมนต์ต่อถึงกันด้วยหน้าของเอลิเมนต์ เหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นที่มีเงื่อนไขการสัมผัส ปัญหาการเสียดสีมาก เนื่องจากปัญหาที่วิเคราะห์เป็นปัญหาแบบสามมิติ แบบจำลองวัสดุขุ่นนี้เมฆโดยใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedron Element) เนื่องจากให้ความแม่นยำสูง และเข้าสู่ผลเฉลยเร็ว ซึ่งได้แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าของแบบจำลองวัสดุยาง

6.2 แบบจำลองการทดสอบการดึง

โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุยางที่รับภาระการดึงในแนวแกนเดียว ซึ่งแบบจำลองวัสดุยางที่ต้องการทดสอบคือ แบบจำลองการทดสอบการดึง กำหนดให้วัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบวิสโคอีลาสติกที่รับภาระแรงดึง ให้ยึดตัวไป 100 เปอร์เซ็นต์ ของรูปร่างแบบจำลองวัสดุยาง โดยให้อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส

การกำหนดแบบจำลองรับภาระแรงดึง

การกำหนดการเคลื่อนที่ของพื้นผิวด้านบน (Top) โดยกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ทำการดึงยางในด้านบนของแบบจำลองให้ยึดตัวออกไป 100 เปอร์เซ็นต์ของรูปร่างแบบจำลอง ในแนวแกน Z และส่วนที่เป็นพื้นผิวด้านล่าง (bottom) นั้นกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแกน X, Y, Z การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสมบัติวิสโคอีลาสติก ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองอ็อกเดน แสดงดังภาพที่ 33 ค่าสเป็คตรัมของอนุกรมพอร์นี่ อันดับ 3 แสดงดังภาพที่ 34 และการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง การกำหนดค่าของการแบ่งเอลิเมนต์ จะมีขั้นตอนและค่าตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

6.3 แบบจำลองการทดสอบการคลายความเค้น

โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุยาง ที่รับภาระการดึงแบบคงที่ ซึ่งแบบจำลองวัสดุยางที่ต้องการทดสอบคือ แบบจำลองการทดสอบการคลายความเค้น กำหนดให้วัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบวิสโคอีลาสติกที่รับภาระแรงดึง ให้ยึดตัวไป 25 เปอร์เซ็นต์ ของรูปร่างแบบจำลองวัสดุยาง และคงที่การดึงไว้เป็นเวลา 600 นาที โดยให้อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส

การกำหนดแบบจำลองรับภาระแรงดึงคงที่

การกำหนดการเคลื่อนที่ของพื้นผิวด้านบน (Top) โดยกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ทำการดึงยางในด้านบนของแบบจำลองให้ยึดตัวออกไป 25 เปอร์เซ็นต์ของรูปร่างแบบจำลอง ในแนวแกน Z และคงที่การดึงไว้เป็นเวลา 600 นาที ส่วนที่เป็นพื้นผิวด้านล่าง (bottom) นั้นกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแกน X, Y, Z การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสมบัติวิสโคอีลาสติก การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง การกำหนดค่าของการแบ่งเอลิเมนต์ จะมีขั้นตอนและค่าเหมือนกับแบบจำลองการทดสอบการดึง

6.4 แบบจำลองการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ

โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุยาง ที่รับภาระการดึงแบบวงรอบ ซึ่งแบบจำลองวัสดุยางที่ต้องการทดสอบคือ แบบจำลองการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ กำหนดให้วัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบวิสโคอีลาสติกที่รับภาระแรงดึง ระยะยึดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ โมดูลัสของรูปร่างแบบจำลอง โดยจะกำหนดให้มีการดึงแล้วปล่อยกลับไปตามขนาดเริ่มต้นแล้วจะดึงให้ยึดตัวอีกครั้ง เป็นจำนวน 10 รอบ โดยให้อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส

การกำหนดแบบจำลองรับภาระแรงดึงแบบวงรอบ

การกำหนดการเคลื่อนที่ของพื้นผิวด้านบน (Top) โดยกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ทำการดึงยางในด้านบนของแบบจำลองให้ยึดตัวออกไป 100 เปอร์เซ็นต์ โมดูลัสของรูปร่างแบบจำลอง ในแนวแกน Z และกำหนดให้มีการดึงปล่อยกลับเป็นจำนวน 10 รอบ ส่วนที่เป็นพื้นผิวด้านล่าง (bottom) นั้นกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแกน X, Y, Z การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสมบัติวิสโคอีลาสติก การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง การกำหนดค่าของการแบ่ง

เอลิเมนต์ จะมีขั้นตอนและค่าเหมือนกับแบบจำลองการทดสอบการดึง และการทดสอบการคลายความเค้น

6.5 แบบจำลองการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุยาง ที่รับภาระการการสั่นสะเทือน กำหนดให้วัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบวิสโคอีลาสติกที่รับการสั่นสะเทือน โดยกำหนดให้มีระยะยืดเริ่มต้นที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และดึงให้สั่นสะเทือนด้วยความเครียดไดนามิกส์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ โมดูลัสของรูปร่างแบบจำลอง มีค่าความถี่ 50 เฮิร์ตซ์, 35 เฮิร์ตซ์ และ 20 เฮิร์ตซ์ ทดลองภายในอุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส โดยจะทำการทดสอบที่ความถี่ 3 ระดับ คือ 20 เฮิร์ตซ์, 35 เฮิร์ตซ์ และ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งจะพิจารณาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องยนต์ คือรอบของเครื่องยนต์ที่ระดับสูง 3,000 รอบ/นาที หรือ 50 เฮิร์ตซ์ รอบเครื่องยนต์ระดับปกติ 2,100 รอบ/นาที หรือ 35 เฮิร์ตซ์ และรอบเครื่องยนต์ระดับเบา 1,200 รอบ/นาที หรือ 20 เฮิร์ตซ์ โดยจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 ความถี่ 3 แบบจำลอง

การกำหนดแบบจำลองการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

การกำหนดการเคลื่อนที่ของแบบจำลองชิ้นส่วนยางทดสอบมีขนาดความกว้าง 6 มิลลิเมตรยาว 20 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้มีการเคลื่อนที่แบบการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ โดยกำหนดให้มีระยะยืดเริ่มต้นที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และดึงด้วยความเครียดไดนามิกส์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของรูปร่างแบบจำลอง ในแนวแกน Z และกำหนดให้มีการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์, 35 เฮิร์ตซ์ และ 50 เฮิร์ตซ์ ส่วนด้านล่าง (bottom) นั้นกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งแกน X, Y, Z การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสมบัติวิสโคอีลาสติก การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง การกำหนดค่าของการแบ่งเอลิเมนต์ จะมีขั้นตอนและค่าเหมือนกับแบบจำลองการทดสอบการดึง การทดสอบการคลายความเค้น และการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ

7. ระบุปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์

จากการศึกษาขนาดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ที่ทำการศึกษา นั้น มีส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม จึงพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดของยางรถยนต์ คือ ขนาด

ความกว้าง ความยาว และขนาดของมุมเอียงของขาของยาง ส่วนปัจจัยด้านความสูงของก้อนยางนั้นไม่สามารถนำมาพิจารณาได้เนื่องจากข้อจำกัดด้านการนำไปใช้งานขณะติดตั้งเข้ากับฐานเครื่องยนต์ กำหนดตัวแปรหรือปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยแบ่งตัวแปรหรือปัจจัยออกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้คือ

7.1 ตัวแปรผลตอบสนอง (Response Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งตัวแปรผลตอบสนองนี้เป็นตัวแปรที่สนใจจะวิเคราะห์ คือ ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง

7.2 ปัจจัยควบคุมได้ (Control Factors) หมายถึง ปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าของตัวแปรผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในที่นี้มีปัจจัยควบคุมที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัยดังนี้ ความกว้าง ความยาว และองศาของมุมเอียง ส่วนปัจจัยด้านความสูงนั้นจะกำหนดให้คงที่เนื่องจากข้อจำกัดในการติดตั้งยางรองแท่นเครื่องกับเครื่องยนต์

7.2.1 ความกว้าง (A) คือ ความกว้างของก้อนเนื้อยางของยางรองแท่นเครื่อง หน่วยมิลลิเมตร

7.2.2 ความยาว (B) คือ ความยาวของก้อนเนื้อยางของยางรองแท่นเครื่อง หน่วยมิลลิเมตร

7.2.3 มุมเอียง (C) คือ มุมองศาเอียงของก้อนเนื้อยางกับฐานของยางรองแท่นเครื่อง หน่วย องศา

ระดับสูงของแต่ละปัจจัยพิจารณาจากขนาดที่สามารถผลิตได้โดยมีเนื้อยางมากที่สุดที่สามารถติดประกบกับแผ่นเหล็กได้

8. การออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล

ในขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ ออกแบบการทดลอง โดยทำการแบ่งแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษาออกเป็น 2^k ระดับ คือ ระดับต่ำและสูง แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 1 ครั้ง เนื่องจากการทำซ้ำคือ ค่าที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้จำนวนการประมวลผลโปรแกรม Marc Mentat 2005r1 ทั้งสิ้น 8 ครั้ง โดยจะทำการ

ทดสอบที่ความถี่ 3 ระดับ คือ 20 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์ และ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งจะพิจารณาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องยนต์ คือรอบของเครื่องยนต์ที่ระดับสูง 3,000 รอบ/นาที หรือ 50 เฮิรตซ์ รอบเครื่องยนต์ระดับปกติ 2,100 รอบ/นาที หรือ 35 เฮิรตซ์ และรอบเครื่องยนต์ระดับเบา 1,200 รอบ/นาที หรือ 20 เฮิรตซ์ ดังนั้นจำนวนครั้งของการประมวลผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ $2^3 \times 3$ ระดับความถี่ เท่ากับ 24 การทดลอง

ตารางที่ 3 แสดงระดับของปัจจัยต่าง ๆ สำหรับแผนการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล

ปัจจัยควบคุม	หน่วย	ระดับของปัจจัย	
		ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)
ความกว้าง (A)	มิลลิเมตร	43	58
ความยาว (B)	มิลลิเมตร	60	73
องศาเอียง (C)	องศา	70	90

ตารางที่ 4 แสดงขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่ต้องการศึกษา

Run	A	B	C		ความกว้าง (A)	ความยาว (B)	องศาเอียง (C)
1	-1	-1	-1	(1)	43	60	70
2	+1	-1	-1	a	58	60	70
3	-1	+1	-1	b	43	73	70
4	+1	+1	-1	ab	58	73	70
5	-1	-1	+1	c	43	60	90
6	+1	-1	+1	ac	58	60	90
7	-1	+1	+1	bc	43	73	90
8	+1	+1	+1	abc	58	73	90

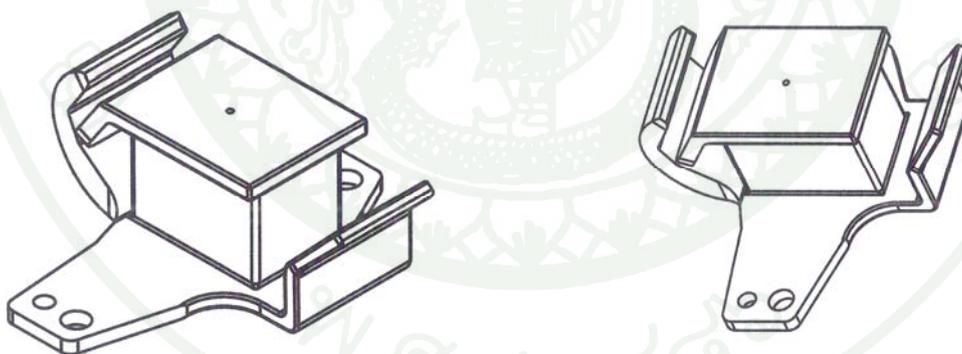
หมายเหตุ ความสูงกำหนดให้คงที่ 45 มิลลิเมตร

9. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางรองแท่นเครื่อง

จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบที่ผ่านมานั้น เราจะใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด และค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมโฟรนี ที่เหมาะสมกับวัสดุยางนั้น สามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุยางได้แม่นยำเพียงใด เมื่อทำการตรวจสอบและยืนยันผลแล้ว ดังนั้นในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง และเปรียบเทียบค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของแต่ละแบบจำลอง

9.1 ลักษณะรูปร่างและขนาดของยางรองแท่นเครื่อง

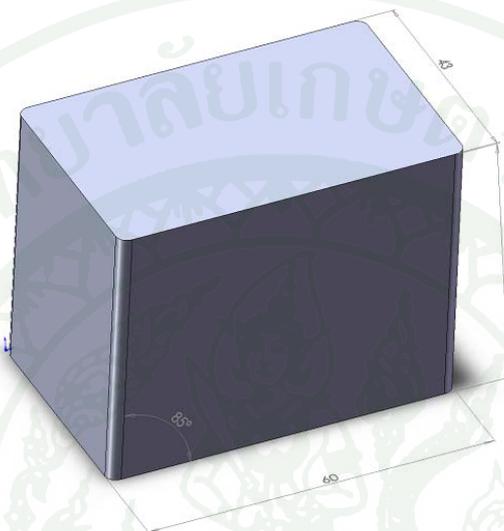
ลักษณะรูปร่างและขนาดของยางรองแท่นเครื่องที่จะนำมาพิจารณาแสดงดังภาพที่ 39 โดยลักษณะรูปร่างของยางรองแท่นเครื่องที่พิจารณานั้น ส่วนด้านบนและด้านล่างของยางรองแท่นเครื่องจะยึดติดกับแผ่นเหล็ก ส่วนตรงกลางระหว่างแผ่นเหล็กนั้นเป็นยาง ซึ่งในการจำลองการรับภาระของยางรองแท่นเครื่องในขณะทำงานในสภาวะที่รับภาระแบบพลวัตและมีอุณหภูมิคงที่ขณะทำงาน ซึ่งยางจะมีส่วนผสมชนิดเดียวกับแบบจำลองที่ผ่านมา



ภาพที่ 39 ลักษณะรูปร่างของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง

โดยแบบจำลองดังกล่าว รูปร่างของยางรองแท่นเครื่องที่พิจารณาจะรับภาระกระทำเต็มหน้าตัดกับยางรองแท่นเครื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเสีรูปร่างของยางรองแท่นเครื่องในส่วนที่เป็นวัสดุยางเพื่อต่อการคำนวณ แบบจำลองที่นำมาพิจารณาจึงวิเคราะห์เฉพาะชิ้นส่วนที่เป็นยาง ซึ่งยางที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นยางสูตรเดียวกับแบบจำลองที่ผ่านมา ในการวิเคราะห์จะแตกต่างกันตามขนาดและรูปร่างของยางรองแท่นเครื่อง ในขั้นตอนนี้เราจะทำการสร้างแบบจำลองยางรอง

แท่นเครื่อง มีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 43 มิลลิเมตร ความยาว 60 มิลลิเมตร งบประมาณเอียง 85 องศา และความสูง 45 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 40 และหลังจากนั้นจะพิจารณาการปรับเปลี่ยนขนาดรูปร่างของยางรองแท่นเครื่องที่ต้องการวิเคราะห์ โดยแสดงดังตารางที่ 4 ในการวิเคราะห์ จะกำหนดค่าต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับงานจริง



ภาพที่ 40 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางรองแท่นเครื่อง

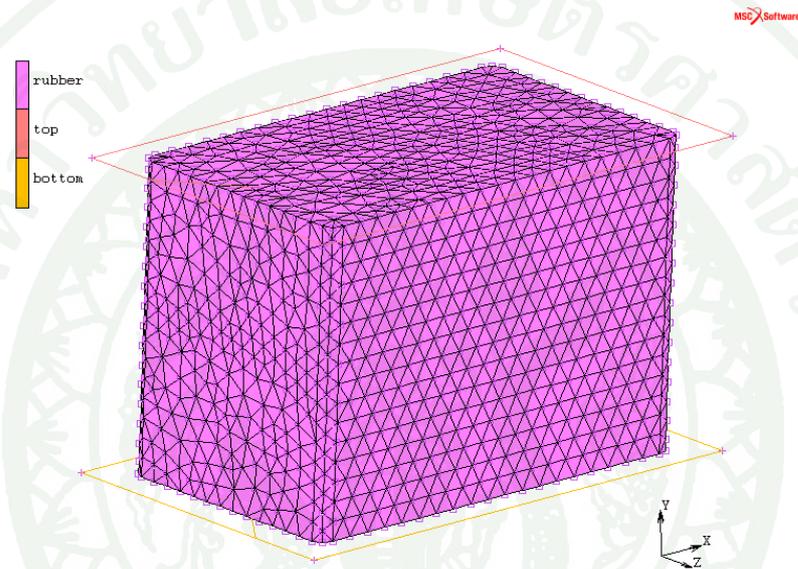
9.2 การกำหนดแบบจำลองวัสดุ

จากการหาแบบจำลองของวัสดุที่เหมาะสม โดยจำลองให้ยางเป็นวัสดุแบบอัดตัวไม่ได้และมีคุณสมบัติไอโซโทรปิก และแบบจำลองวัสดุประเภทวิสโคไฮเปอร์อีลาสติก ดังนั้นต้องหาค่าตัวแปรทั้ง 2 พฤติกรรม ได้แก่ พฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติก พฤติกรรมวิสโคอีลาสติก โดยจะกำหนดลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองที่ผ่านมา ส่วนแผ่นเหล็กนั้นกำหนดให้เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก (Rigid Body)

9.3 การกำหนดค่าของแบบจำลอง

การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นสามชั้นด้วยกันพบว่าการสัมผัสกันระหว่างแผ่นเหล็กกับผิวของยาง ดังนั้นจึงต้องกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสให้กับแบบจำลองเพื่อให้สอดคล้องกับความจริงของปัญหาที่

พิจารณา โดยการสร้างพื้นผิว (Surface) สัมผัสด้านบนของแบบจำลองโดยกำหนดให้เป็นแผ่นเหล็กที่เป็นวัสดุที่แข็งมากๆ (Rigid Body) ซึ่งเราจะไม่พิจารณาการเสีรูปของแผ่นเหล็กแสดงดังภาพที่ 41 ซึ่งผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กและผิวของยางในงานวิจัยนี้ได้ตั้งข้อสมมุติฐานกำหนดให้ผิวของวัสดุ ยางกับผิวของแผ่นเหล็กที่สัมผัสกันยึดติดกันตลอดเวลา ดังนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขการบังคับให้ผิวสัมผัสทั้งคู่เป็นแบบยึดติดกันตลอดเวลาจึงเลือกเงื่อนไขการสัมผัสแบบยึดติดกัน (Glued Contact) ที่เป็นฟังก์ชันภายในจาก โปรแกรม Marc Mentat 2005r1 แสดงดังภาพที่ 42



ภาพที่ 41 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง



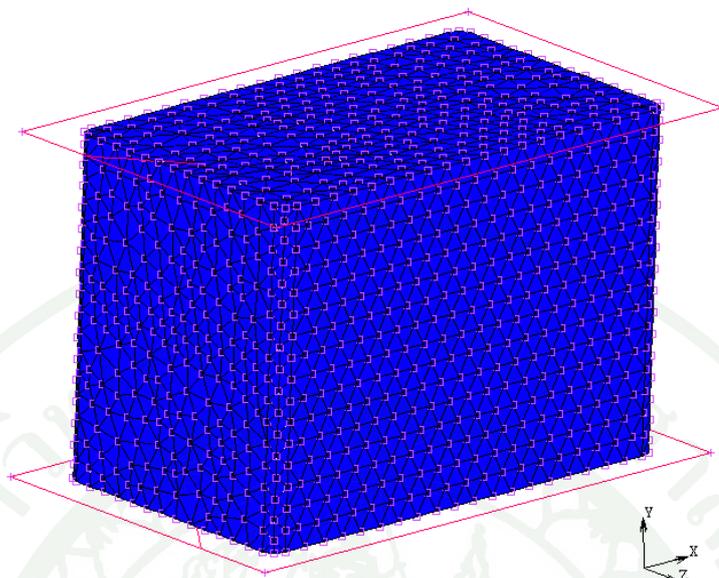
ภาพที่ 42 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลอง

9.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดการเคลื่อนที่ของยางรองแท่นเครื่องที่ผิวแผ่นเหล็กด้านล่างกำหนดให้ยึดแน่นอยู่กับที่ไม่เคลื่อนที่ทุกทิศทาง ส่วนผิวสัมผัสด้านบนกำหนดให้เคลื่อนที่ตามภาวะการกดที่แรงกระทำ (Kim, 2003) ด้วยแรง 1,200 นิวตัน โดยเคลื่อนที่เป็นแบบ Sinusoidal ซึ่งเป็นแรงที่อ้างอิงจากการทำงานจริงของเครื่องยนต์ เป็นการเคลื่อนที่แบบการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ ซึ่งพิจารณาการเคลื่อนที่ด้วยความถี่ 3 ระดับ คือ ความถี่ 20 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์, และ 50 เฮิรตซ์ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเสียรูป และค่าการดูดซับการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองขนาดต่างๆ

9.5 การกำหนดค่าของการแบ่งอิลิเมนต์

การเลือกอิลิเมนต์ที่เหมาะสมกับปัญหาเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์แบบจำลองวัสดุยาง แต่ในตัวอย่างนี้เลือกใช้โซลิดอิลิเมนต์ (Solid Element) ซึ่งเป็นอิลิเมนต์ที่มีรูปแบบการใช้งานกว้าง มีรูปแบบเหมือนกับการแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ หลายๆ ส่วนเหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นที่มีเงื่อนไขการสัมผัส ปัญหาการเสียรูปมาก เนื่องจากปัญหาที่วิเคราะห์เป็นปัญหาแบบสามมิติ แบบจำลองวัสดุยางนี้เมชโดยใช้อิลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedron Element) เนื่องจากให้ความแม่นยำสูง และลู่เข้าสู่ผลเฉลยเร็ว ซึ่งได้แสดงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 เอลิเมนต์ทรงสามหน้าของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง

10. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว จะนำผลที่ได้จากโปรแกรม Marc Mentat 2005r1 มาทำการวิเคราะห์ต่อไป โดยใช้หลักการการออกแบบการทดลอง

10.1 ทำการทดลองตามรูปแบบของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ออกแบบไว้และทำการบันทึกข้อมูล

10.2 วิเคราะห์โดยใช้วิธีการตรวจสอบด้วยกราฟ การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของผล (Normal Probability Plot of The Effect) แทนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เนื่องจากการทำซ้ำเพียงครั้งเดียว

10.3 วิเคราะห์โดยกราฟของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบอันตรกิริยา (Interaction Plot) ที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าปัจจัยใดมีผลต่อการดูดซับการสั่นสะเทือน

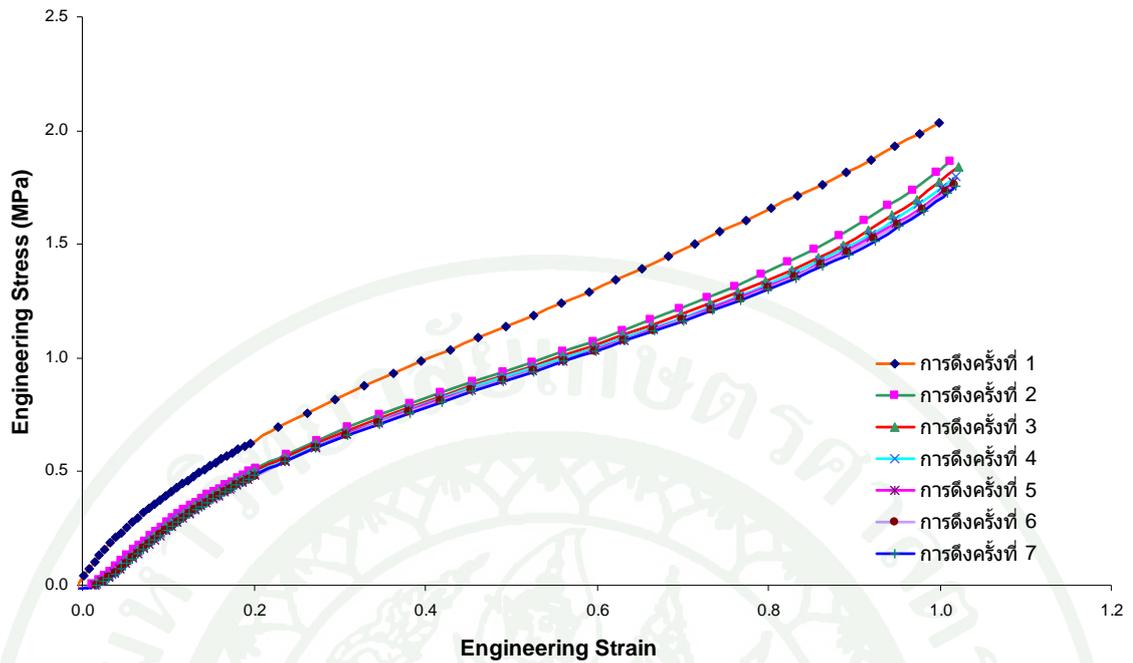
ผลและวิจารณ์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัย และการวิเคราะห์ผลการวิจัยที่เกี่ยวกับผลการทดสอบยาง และการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุยางของยางรองแท่นเครื่อง ของการทดสอบ การดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบการคลายความเค้น การทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ การทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาจากค่าความเค้นวิสกรรมและค่าความเครียดวิสกรรม รวมทั้งผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางรองแท่นเครื่องที่เราทำการพิจารณาตาม หลักการการออกแบบการทดลอง และผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เพื่อสรุปผลว่า ปัจจัยใดที่มีผลต่อการรองรับการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง

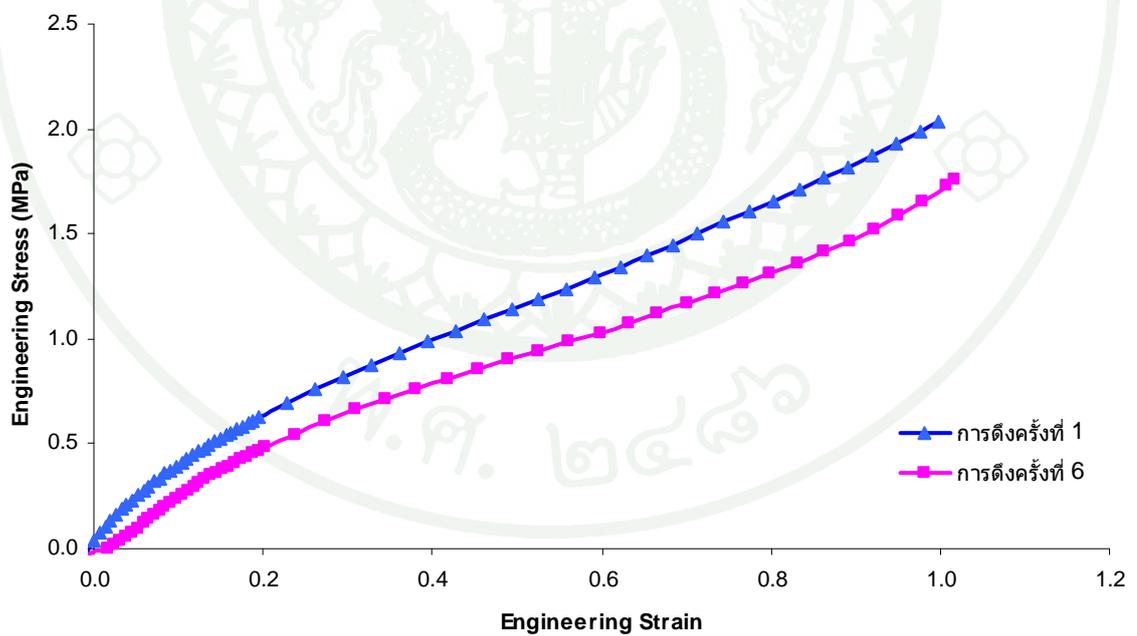
1. ผลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test)

โดยการทดสอบการดึงด้วยความเครียดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และอัตราความเร็วในการดึง 200 มิลลิเมตร/นาที ทำการดึงทั้งหมด 7 ครั้ง เพื่อกำจัดผลกระทบของมูนลิน (Mullins Effect) ซึ่งผลการทดลองที่นำไปใช้ คือการดึงครั้งที่ 6 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 44-45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิสกรรมกับความเครียดวิสกรรมดังภาพที่ 44 ซึ่งจะแสดงผลของมูนลินที่มีผลกระทบต่อความเค้นวิสกรรมและความเครียดวิสกรรมของยาง โดยทำการทดลองดึง 7 ครั้ง จากกราฟความสัมพันธ์ความเค้นวิสกรรมและความเครียดวิสกรรมของการดึงครั้งที่ 5-7 ผลการดึงแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลมูนลินได้ถูกกำจัดไปแล้ว

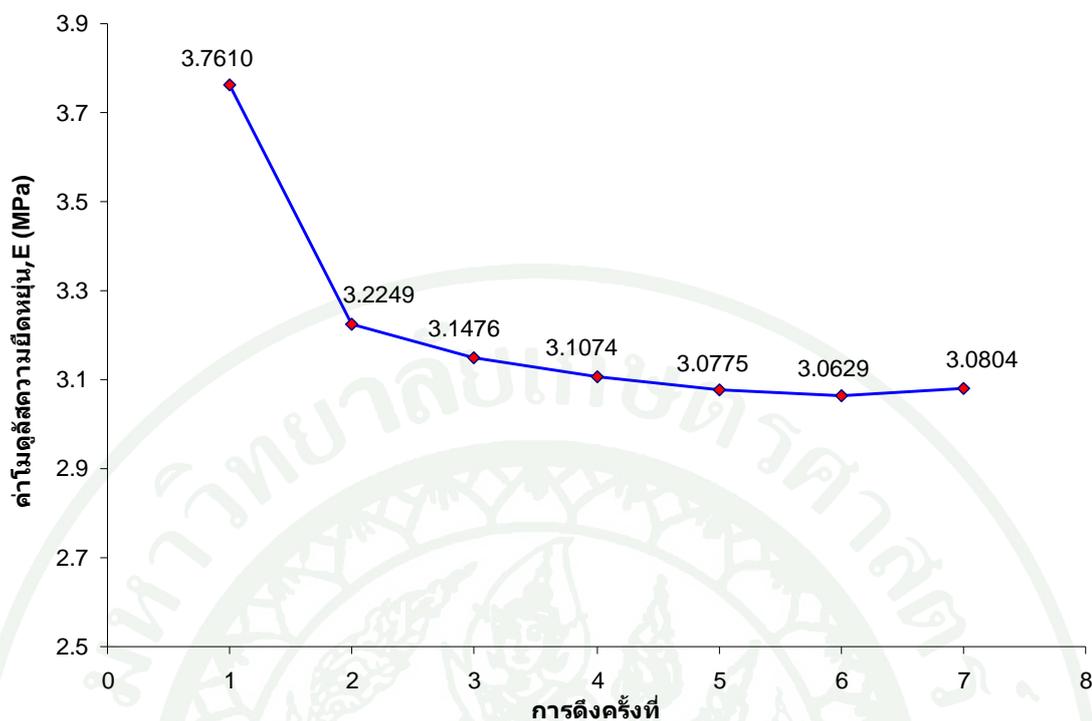
ดังนั้นข้อมูลที่เรานำมาพิจารณา คือข้อมูลจากการทดสอบการดึงยางครั้งที่ 6 ที่ไม่มีผลของมูนลินแล้ว ซึ่งความแตกต่างของการทดสอบการดึงยางครั้งที่ 1 กับ ครั้งที่ 6 แสดงดังภาพที่ 45 และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางจากการทดสอบการดึง สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (18) และพิจารณาในช่วงที่ $\lambda \leq 1.8$ แสดงดังภาพที่ 46



ภาพที่ 44 ผลกระทบของมูนดิน ต่อการทดสอบการดึง

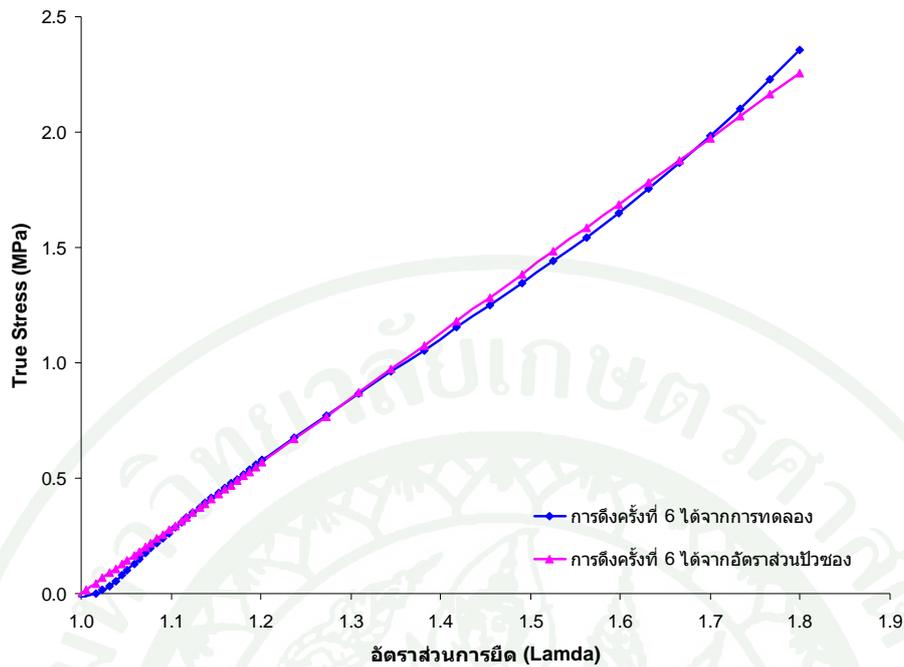


ภาพที่ 45 ผลการทดสอบการดึงครั้งที่ 1 และครั้งที่ 6

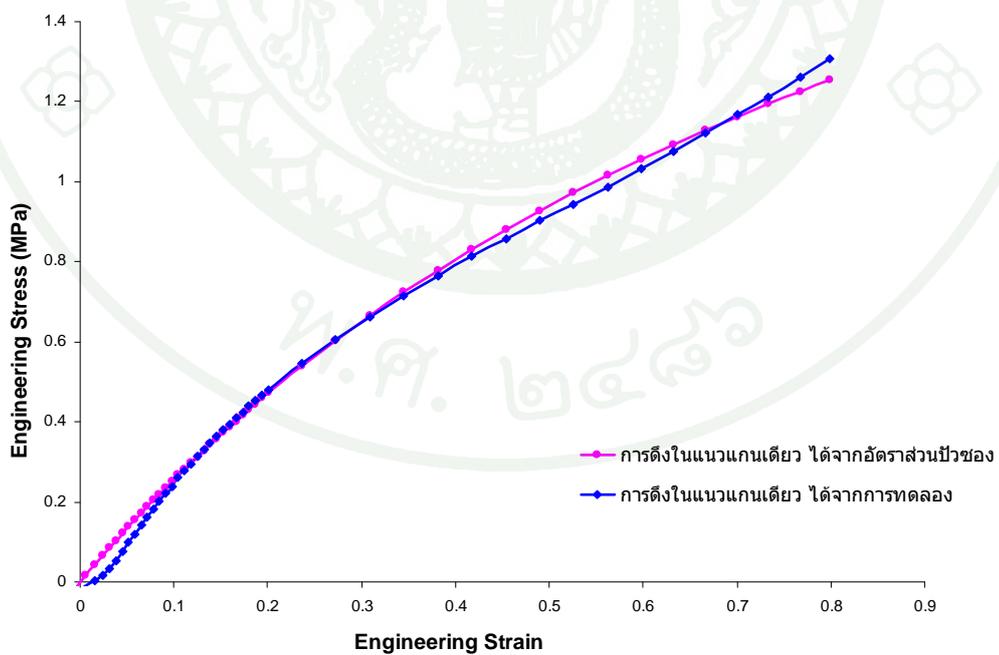


ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับการทดสอบการดึงข้างขึ้นทดสอบ

จากการคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นนั้น เพื่อต้องการนำไปใช้คำนวณหาค่าความเค้นจริงของการดึงในแนวแกนเดียวได้จากสมการที่ (10) แสดงดังภาพที่ 47 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าจากการทดสอบการดึงเท่ากันทั้งสองแนวแกน และค่าจากการทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ จากวิธีอัตราส่วนปัวส์ซองต่อไป จากนั้นค่าความเค้นจริงที่ได้จะนำมาแปลงเป็นค่าความเค้นวิศวกรรมที่ได้จากสมการที่ (16) และ (17) และนำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดึงขึ้นทดสอบข้างในแนวแกนเดียว กับข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดยวิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง แสดงดังภาพที่ 48 ซึ่งจะพบว่าค่าความเค้นวิศวกรรมกับอัตราส่วนการยืดตัวมีความใกล้เคียงกัน ที่มีค่าการยืดตัวน้อย มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.095587 จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการอัตราส่วนปัวส์ซองสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของยางได้จริง

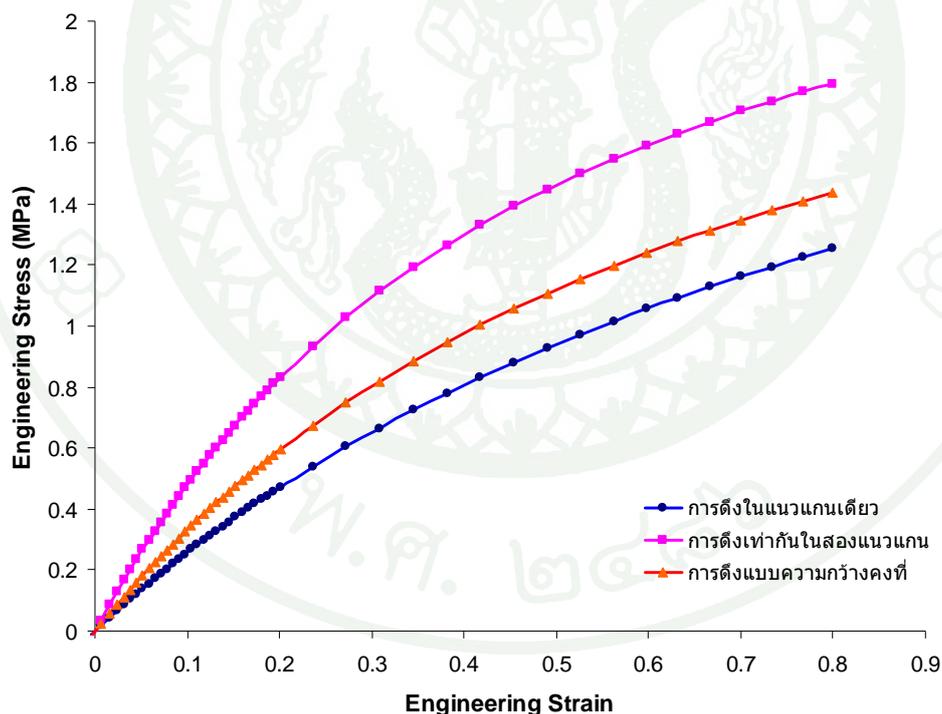


ภาพที่ 47- เปรียบเทียบค่าความเค้นจริงจากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว กับค่าความเค้นจริงที่ได้จากวิธีอัตราส่วนปัวซอง



ภาพที่ 48- เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว กับข้อมูลที่ได้จากวิธีอัตราส่วนปัวซอง

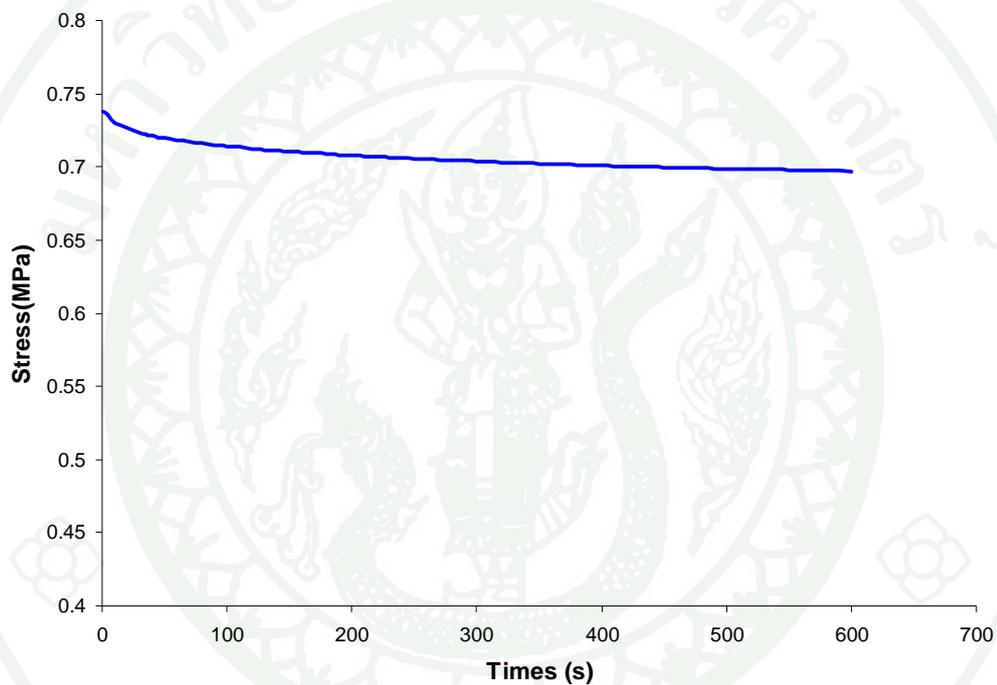
เนื่องจากการวิจัยนี้ทำการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และหาค่าพลังงานความเครียด จึงต้องการค่าจากการทดสอบทั้ง 3 แบบ เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมของวัสดุยาง คือ ข้อมูลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว ข้อมูลการทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน และข้อมูลการทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ ซึ่งในที่นี้เราจะใช้วิธีการอัตราส่วนปัวส์ซองในการหาค่าการทดลองทั้ง 3 แบบ ซึ่งนำค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว มาคำนวณหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น แล้วนำค่าอัตราส่วนการยืดมาแทนในสมการที่ (9) และ (10) จะได้ค่าความเค้นจริงจากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวที่ได้มาจากวิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง ค่าความเค้นจริงของการทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกนจะคำนวณมาจากสมการที่ (11) และ (12) และค่าความเค้นจริงของการทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่จะคำนวณมาจากสมการที่ (13) และ (14) จากนั้นต้องทำการแปลงค่าความเค้นจริงให้เป็นค่าความเค้นวิศวกรรมและความเครียดวิศวกรรมโดยใช้สมการที่ (16) และ (17) ซึ่งข้อมูลการทดสอบทั้ง 3 แบบ ที่ได้จากวิธีการอัตราส่วนปัวส์ซองแสดงดังภาพที่ 49



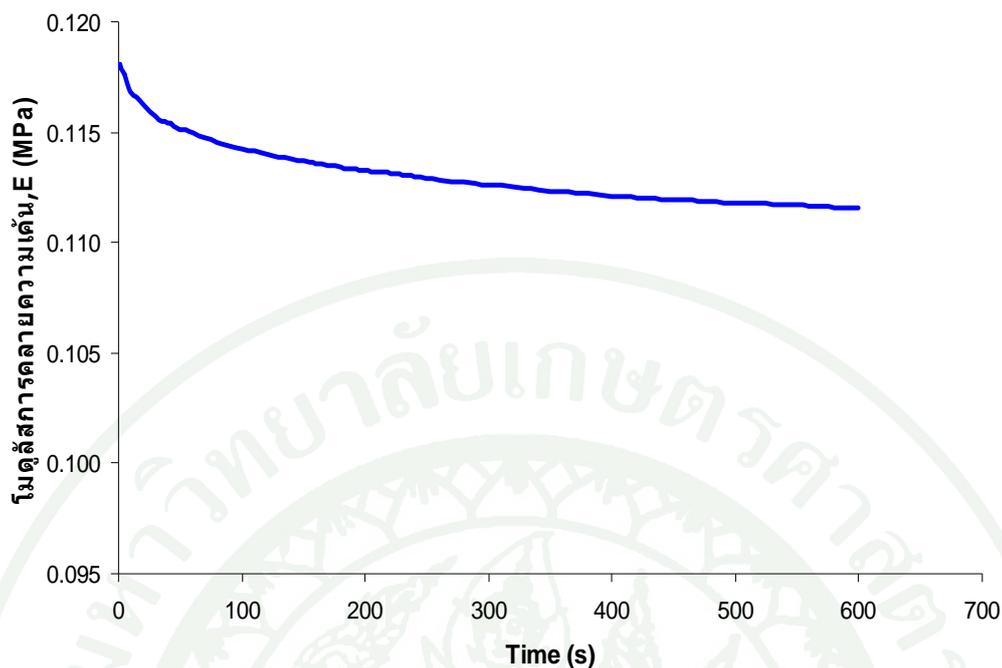
ภาพที่ 49 เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดสอบดึงยางทั้งสามลักษณะ โดยใช้วิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง

2. ผลการทดสอบการคลายความเค้น (Stress Relaxation)

ทำการทดสอบโดยการดึงที่ความเครียดเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำการกำจัดผลมูโนลินโดยการดึงแล้วปล่อยกลับจำนวน 5 ครั้งก่อน และจากนั้นดึงคงที่ความเครียดเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ไว้เป็นเวลา 600 วินาที จากการทดสอบการคลายความเค้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิสวกรรมกับเวลาดังภาพที่ 50 และค่าโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลาแสดงดังภาพที่ 51 ซึ่งได้มาจากสมการที่ (20)



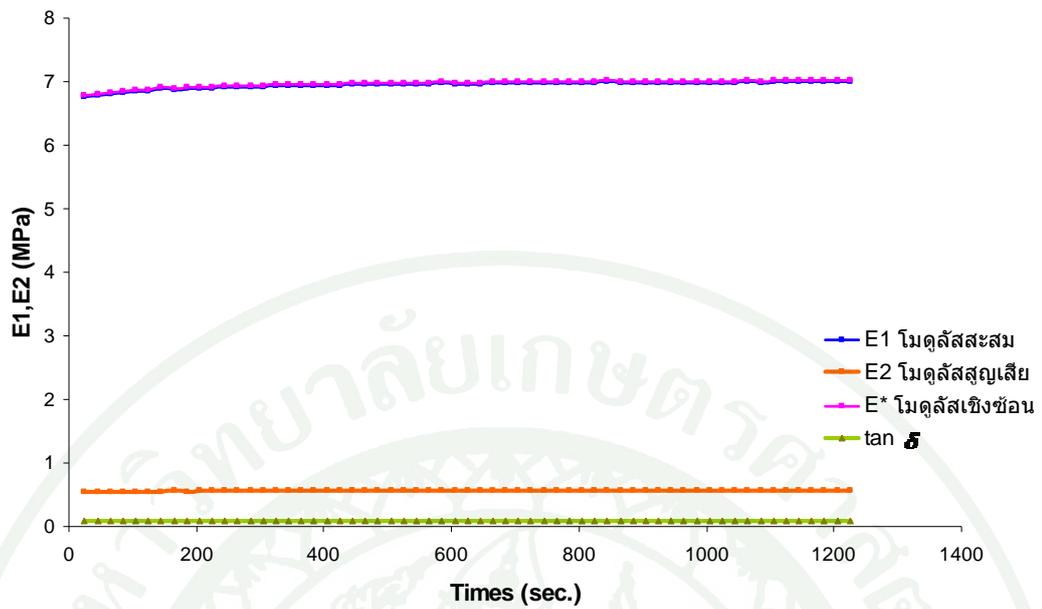
ภาพที่ 50 ผลการทดสอบการคลายความเค้นกับเวลา



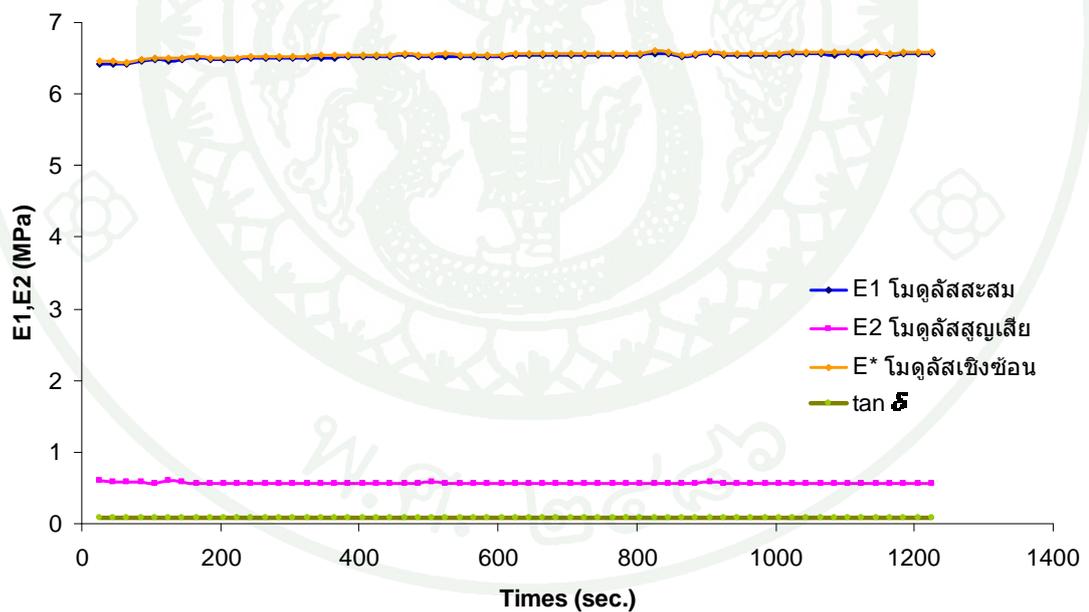
ภาพที่ 51 ผลการทดสอบระหว่างค่าโมดูลัสการผ่อนคลายกับเวลา

3. ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamics Mechanical Analysis)

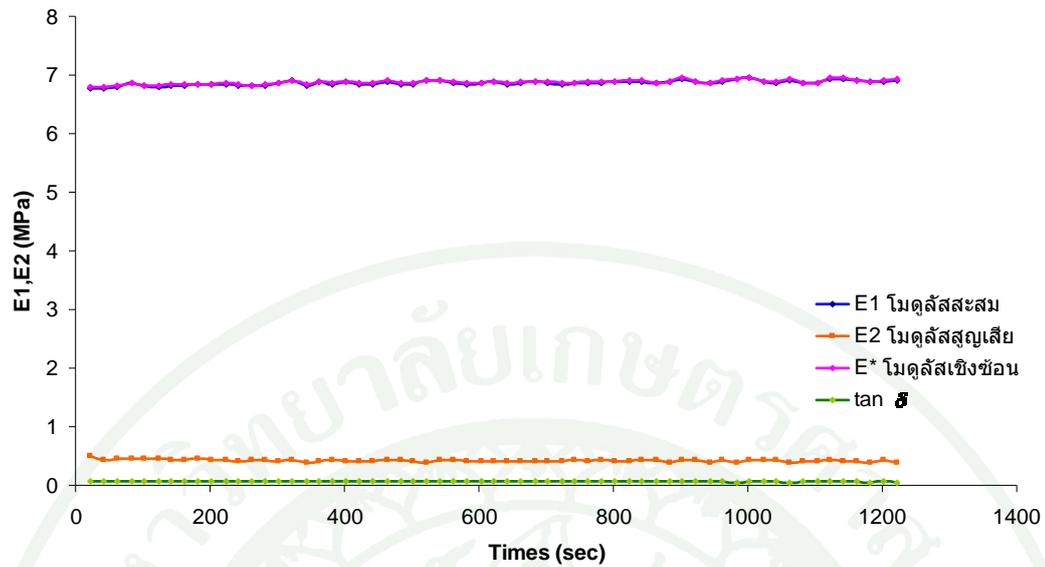
โดยทำการทดสอบในโหมดการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะเดียวกันกับการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ที่ความถี่เริ่มต้น 25 เฮิรตซ์ และสั่นด้วยความถี่ไดนามิกส์ 0.5 เฮิรตซ์ มีค่าความถี่ 50 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์ และ 20 เฮิรตซ์ ทดลองภายในอุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส โดยจะทำการทดสอบที่ความถี่ 3 ระดับ คือ 20 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์ และ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งการทดสอบนี้เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 52-53 และตารางที่ 5 ค่าการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตที่ความถี่ 3 ระดับ



ภาพที่ 52 ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต ที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์



ภาพที่ 53 ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต ที่ความถี่ 35 เฮิรตซ์



ภาพที่ 54 ผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์

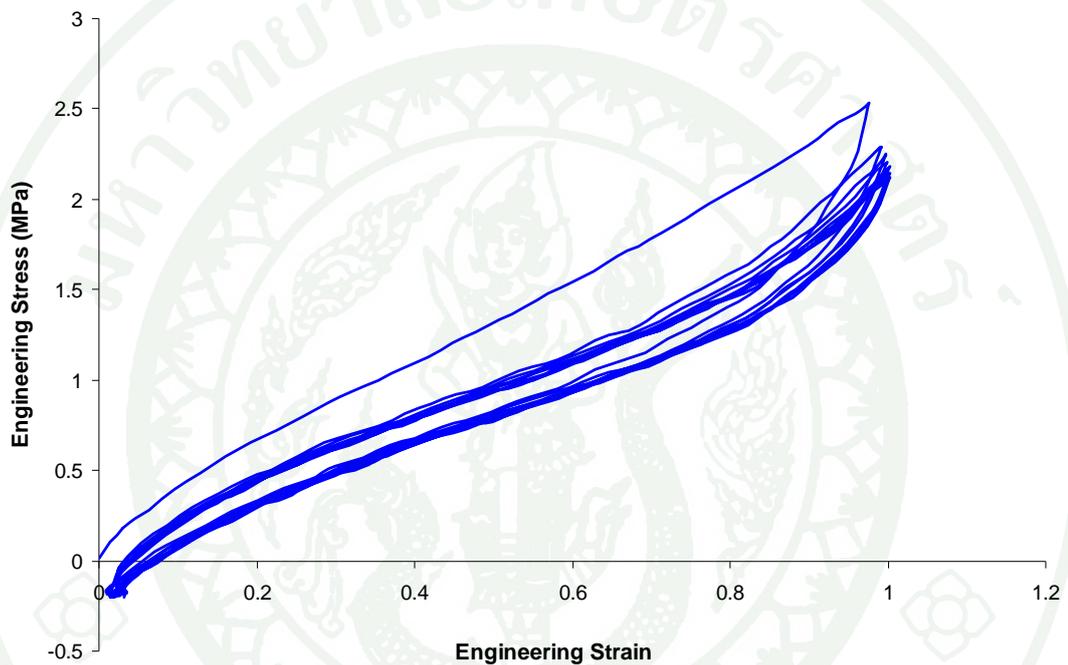
ตารางที่ 5 ค่าการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตที่ความถี่ 3 ระดับ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความเครียด เริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความเค้น เริ่มต้น (MPa)	ค่าเฉลี่ย ความเครียด ไดนามิกส์ (เปอร์เซ็นต์)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน ความเครียด ไดนามิกส์	ค่าเฉลี่ย ความเค้น ไดนามิกส์ (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน ความเค้น ไดนามิกส์
20	24.96	0.6667	0.505699934	0.004119374	0.022565538	0.000248604
35	24.96	0.6667	0.513809361	0.01214284	0.021544856	0.000487577
50	24.96	0.6667	0.516524510	0.02250891	0.022751993	0.000919652

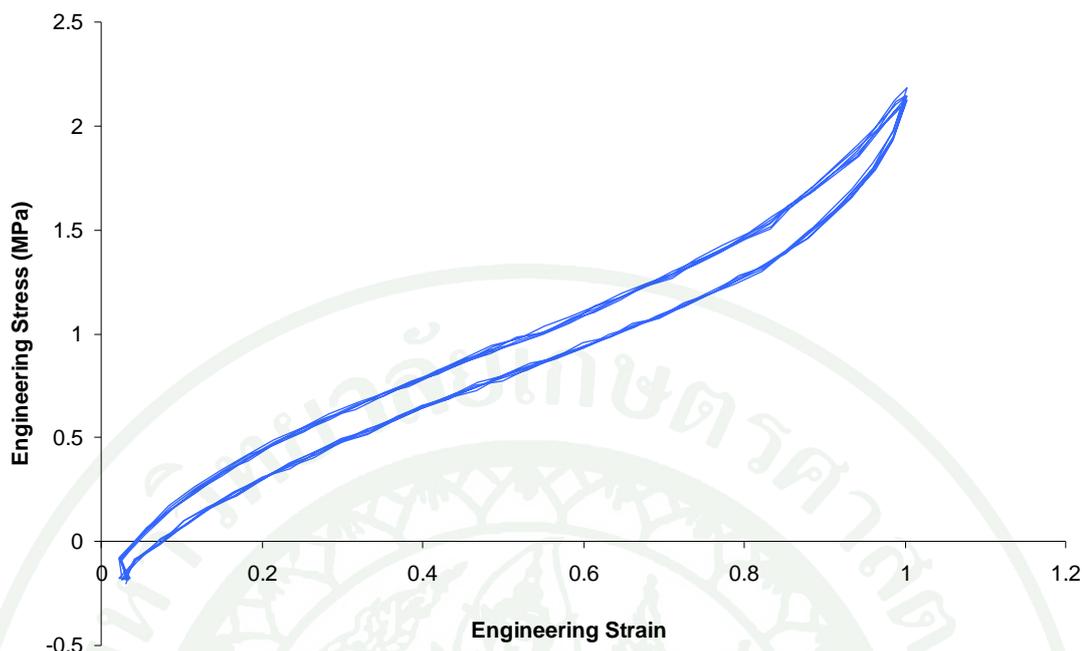
จากตารางที่ 5 ค่าการทดสอบจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตที่ความถี่ทั้ง 3 ค่าที่ได้ คือ ค่าเฉลี่ยของความเครียดไดนามิกส์ และค่าเฉลี่ยของความเค้นไดนามิกส์ เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยจากการคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเครียดไดนามิกส์ และค่าความเค้นไดนามิกส์มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4. ผลการทดลองการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ

ทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงดังในภาพที่ 28 ด้วยอัตราความเร็วในการดึง 200 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ความเครียดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 10 รอบ ภายในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 55 ซึ่งขณะที่มีภาระแรงมากกระทำกับวัสดุขาง ในกรณีที่มีการกินตัวของขางพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะไม่ซ้ำแนวเดิม



ภาพที่ 55 การทดลองดึงที่รับภาระแบบวงรอบ



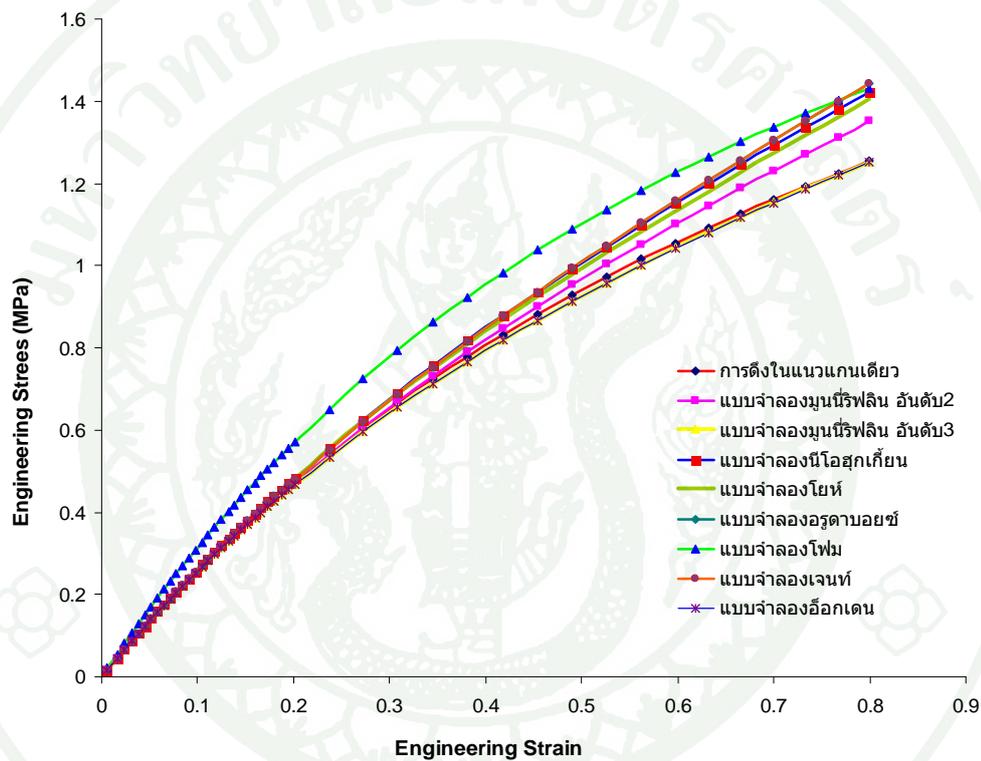
ภาพที่ 56 ผลการทดลองดึงที่รับภาระแบบวงรอบ ที่กำจัดผลกระทบของมูนลิน

จากผลการทดลองการดึงที่รับภาระแบบวงรอบดังภาพที่ 55 จะสังเกตเห็นว่าการดึงในรอบแรก จะมีค่าความเค้นวิศวกรรมสูงกว่าในการดึงรอบต่อไป ซึ่งเป็นผลกระทบของมูนลิน ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองการดึงในรอบที่ 1-4 ไม่คงที่ เนื่องจากมีค่าความเค้นวิศวกรรมมีค่าที่ต่างกันมาก จนกระทั่งการทดลองการดึงในรอบที่ 5-10 มีค่าความเค้นวิศวกรรมที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด แสดงดังภาพที่ 56 และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความเค้นวิศวกรรม และความเครียดวิศวกรรมที่เกิดขึ้น ผลที่ได้จะมีลักษณะเป็นวงรอบเรียกว่า วงรอบฮิสเตอร์ีซีสบังคับถึงค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียในแต่ละรอบของการเคลื่อนตัว ซึ่งในรอบแรกๆ จะสูญเสียพลังงานมากกว่าในรอบต่อไป โดยพลังงานที่สูญเสียนี้คือพลังงานที่ไม่สามารถย้อนกลับได้หมด

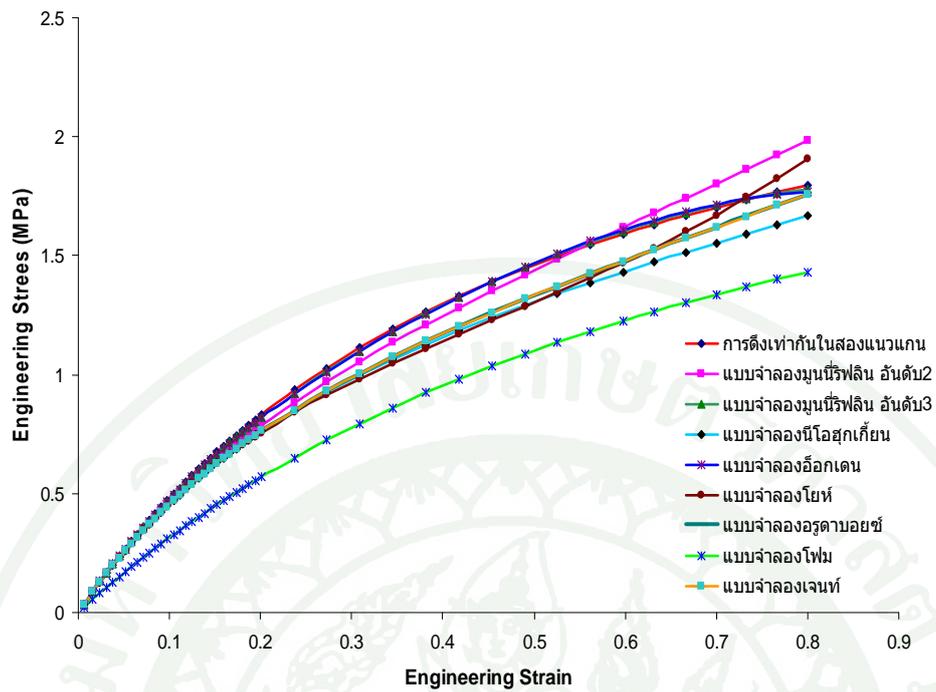
5. การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองพลังงานความเครียดทั้งหมด 8 แบบ ได้แก่ แบบจำลองมูนนี่รีฟลิน อันดับที่ 2 แบบจำลองมูนนี่รีฟลิน อันดับที่ 3 แบบจำลองฮ็อกเคน แบบจำลองนีโอฮุกเกียน แบบจำลองอูราบายซ์ แบบจำลองโยห์ แบบจำลองโฟม แบบจำลองเจนท์ ซึ่งนำแบบจำลองทั้ง 8 แบบนี้ มาหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลการทดสอบยาง

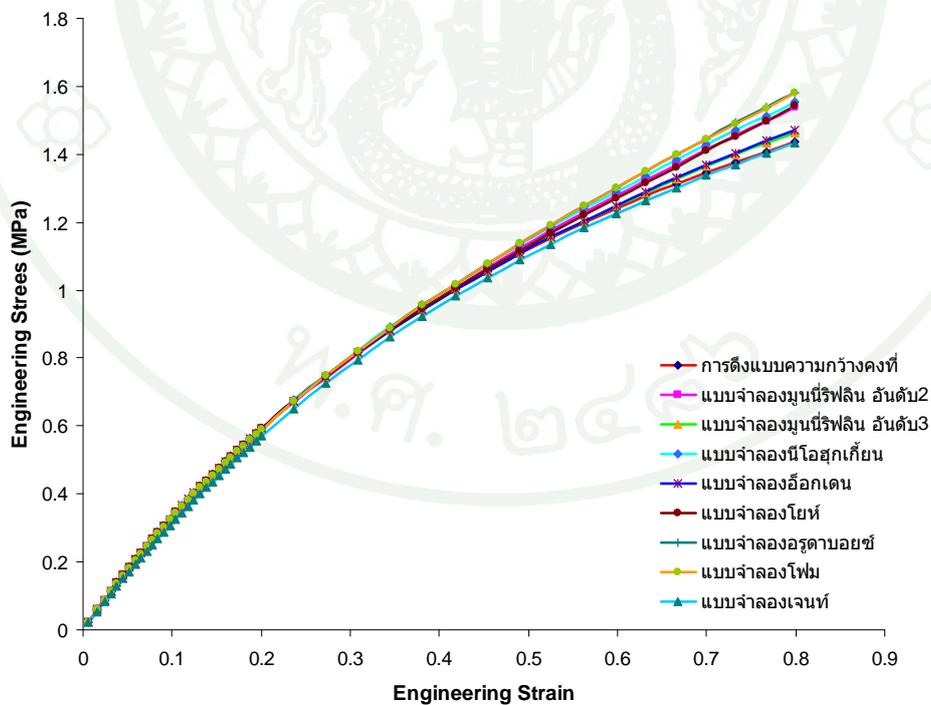
ดังนั้นต้องทำการตรวจสอบความใกล้เคียงของแบบจำลองกับพฤติกรรมของวัสดุว่าสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้อย่างแม่นยำหรือไม่ เพื่อหาค่าพลังงานความเครียดที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมมากที่สุด โดยนำค่าความเค้นวิสกรรมและความเครียดวิสกรรมที่ได้จากวิธีอัตราส่วนปัวส์ของเปรียบเทียบกับ ความสัมพันธ์ของความเค้นวิสกรรมกับความเครียดวิสกรรม ในขณะรับภาระแบบการดึงและกดของแบบจำลอง และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพลังงานความเครียด



ภาพที่ 57 ผลการทำนายการดึงในแนวแกนเดียวโดยใช้แบบจำลองทั้ง 8 แบบ



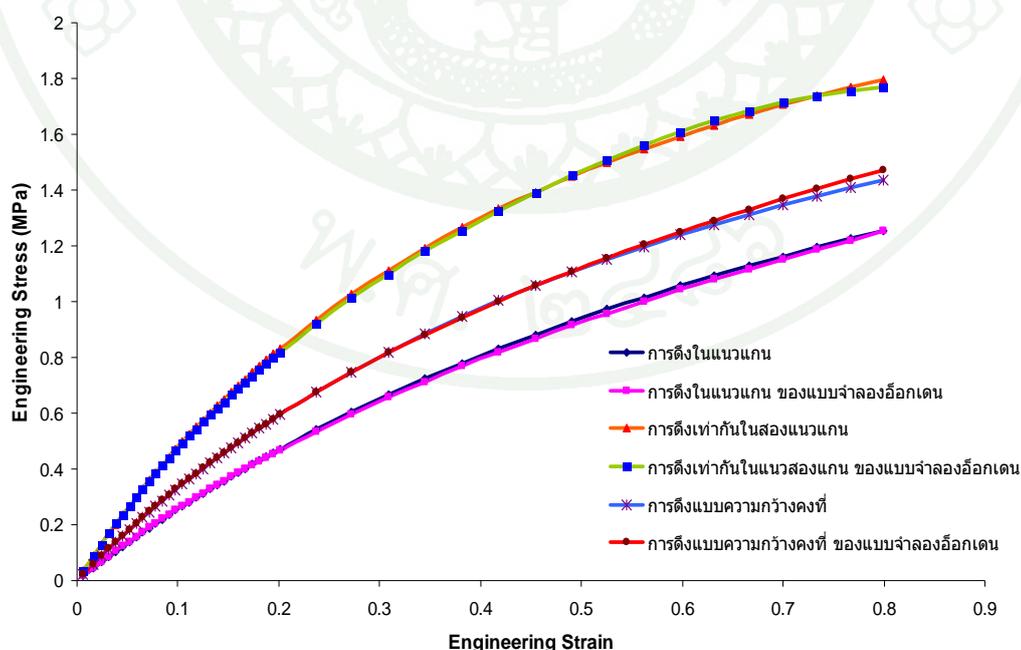
ภาพที่ 58 ผลการทำนายการดึงเท่ากันในสองแนวแกน โดยใช้แบบจำลองทั้ง 8 แบบ



ภาพที่ 59 ผลการทำนายการดึงแบบความกว้างคงที่โดยใช้แบบจำลองทั้ง 8 แบบ

เมื่อเราพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมเชิงกลของการทดสอบการดึงในแนวแกนดังแสดงในภาพที่ 57 การทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกนแสดงดังภาพที่ 58 และการทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 59 พบว่าแบบจำลองที่ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมได้แก่ แบบจำลองมุนีรีฟลิน อันดับ 2 แบบจำลองนีโอฮุกเกียน แบบจำลองอูรูคาบอยซ์ แบบจำลองเจนท์ แบบจำลองโยห์ แบบจำลองโพน

ดังนั้นเหลือแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงอีกสองแบบจำลองคือแบบจำลองมุนีรีฟลิน อันดับที่ 3 และแบบจำลองอ็อกเดน พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพลังงานความเครียดทั้งสองแบบ มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมของวัสดุจากนั้นพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้จาก โปรแกรม Marc Mentat 2005r1 แสดงในตารางที่ 6 พบว่าแบบจำลองอ็อกเดน สามารถที่จะทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงมากกว่าแบบจำลองมุนีรีฟลิน อันดับที่ 3 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแบบจำลองอ็อกเดน ค่า μ และ α มีค่าเป็นบวก แต่ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแบบจำลองมุนีรีฟลิน อันดับที่ 3 ค่า C01, C10 มีค่าเป็นบวก แต่ค่า C11 มีค่าเป็นลบ จึงสรุปได้ว่างานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองอ็อกเดนเป็นแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดของวัสดุ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ได้ไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยาง ในการรับภาระทั้งสามลักษณะ แสดงดังภาพที่ 60 และค่าความผิดพลาดจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองอ็อกเดนเท่ากับ 0.015947 จากภาพที่ 61



ภาพที่ 60 ผลการทำนายการทดสอบการดึงทั้ง 3 แบบ โดยใช้แบบจำลองอ็อกเดน

OGDEN CONTROL PARAMETERS

UNIAXIAL \blacktriangleright A/A0 \blacktriangleleft V/V0
 BIAXIAL \blacktriangleright t/t0 \blacktriangleleft V/V0
 PLANAR SHEAR \blacktriangleright t/t0 \blacktriangleleft V/V0
 SIMPLE SHEAR
 VOLUMETRIC
 USE ALL DATA

NUMBER OF TERMS: 2
 POSITIVE COEFFICIENTS
 MATHEMATICAL CHECKS
 EXTRAPOLATION

\blacktriangledown RELATIVE ERROR
 ERROR LIMIT: 0.001
 NUMBER OF ITERATIONS: 20
 CONVERGENCE TOLERANCE: 1e-006

COMPUTE APPLY RESET OK EVALUATE

COEFFICIENTS

	MODULI	EXPONENTS
1	0.293486	2.61084
2	7.46412	0.154376
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0

BULK MODULUS: 4796.32
ERROR: 0.015947

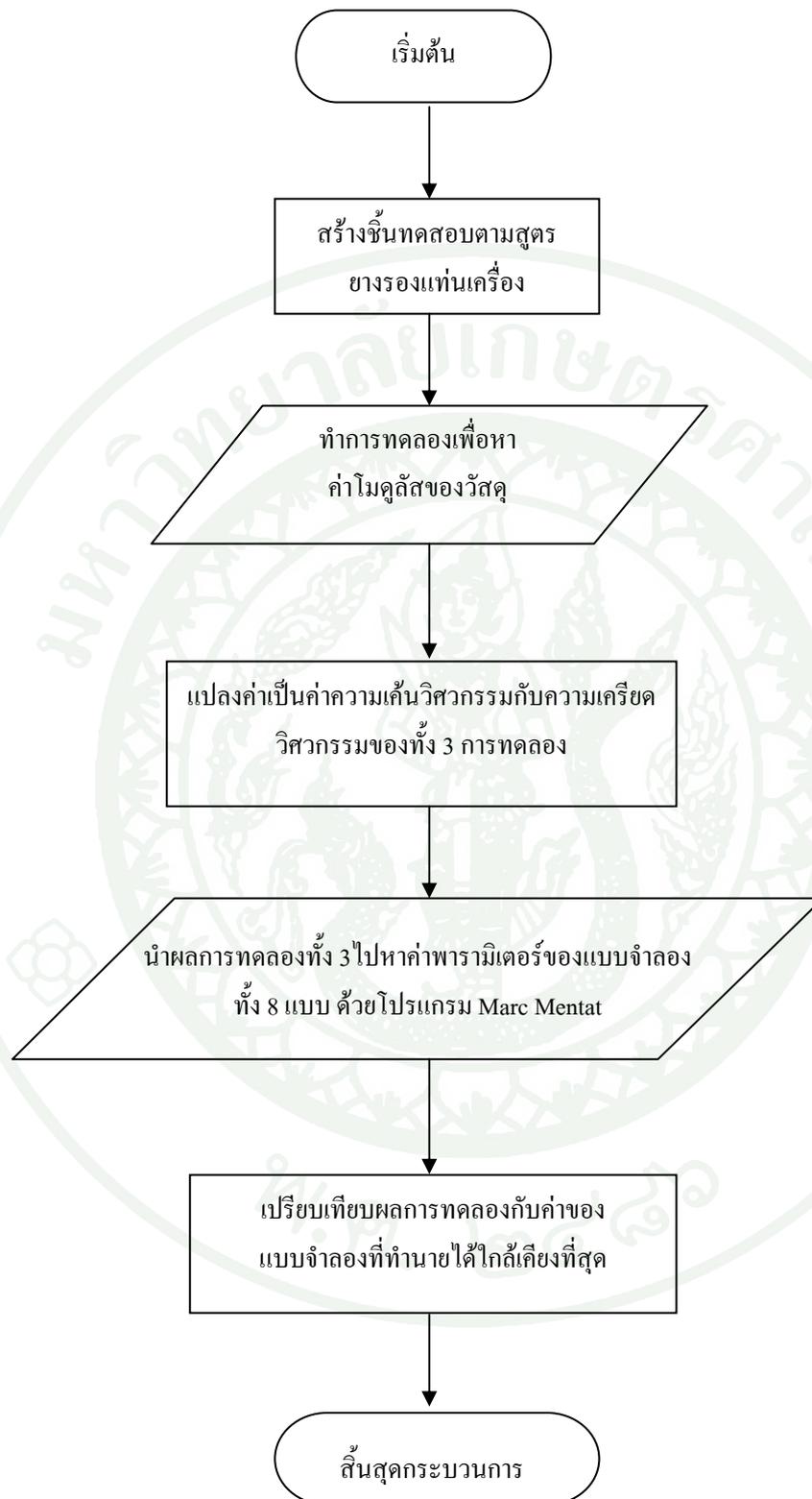
ภาพที่ 61 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองอ็อกเดน

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ ซึ่งคำนวณได้จากโปรแกรม Marc Mentat

แบบจำลองมูนีรีฟลิน (Mooney-Rivlin Model) เมื่อ N=2		
C01	C10	
0.429232	0.0429614	
แบบจำลองมูนีรีฟลิน (Mooney-Rivlin Model) เมื่อ N=3		
C01	C10	C11
0.382344	0.0966276	-0.00945687
แบบจำลองอ็อกเดน (Ogden Model) เมื่อ N=2		
MODULI, μ	EXPONENTS, α	
0.293486	2.61084	
7.46412	0.154376	
แบบจำลองโยห์ (Yeoh Model)		
C10	C20	C30
0.478312	-0.00979237	0.00360674

ตารางที่ 6 (ต่อ)

แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)		
C10		
0.476901		
แบบจำลองอรรูดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)		
NKT	N	
0.903756	13.5933	
แบบจำลองโฟม (Foam Model)		
MODULI, μ_n	ALPHAS, α_n	BETAS, β_n
4.02653	0.818278	2.50836
-0.204244	-1.01039	1.39034
แบบจำลองเจนท์ (Gent Model)		
E	I_M	
2.84019	64.5511	



ภาพที่ 62 ขั้นตอนการทำนายผลการทดสอบยาง

6. การหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมพรีนีย์ (Prony Series)

การหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมพรีนีย์ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ จากโปรแกรม MarcMentat 2005r1 ช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์ โดยการนำข้อมูลค่าความเค้นกับเวลา จากการทดสอบการคลายความเค้น โดยการป้อนค่าเข้าไปในโปรแกรม Marc Mentat 2005r1 เพื่อหาค่าสเป็คตรัมของการคลายความเค้นที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการคลายความเค้นมากที่สุด ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมพรีนีย์ แสดงดังภาพที่ 63 ค่าสเป็คตรัมของการผ่อนคลายความเค้น แสดงในตารางที่ 7 ซึ่งจะแสดงค่าสเป็คตรัมการผ่อนคลายความเค้นอันดับ 3

ตารางที่ 7 ค่าสเป็คตรัมการผ่อนคลายความเค้น

สเป็คตรัมของการผ่อนคลายความเค้น (Relaxation Spectrum)	
g_i	τ_i (sec)
0.0112521	10.4591
0.0127905	42.9802
0.0373549	316.604

VISCO-ELASTICITY FREE ENERGY RELAXATION CONTROL PARAMETERS

RELAXATION

NUMBER OF TERMS: 3

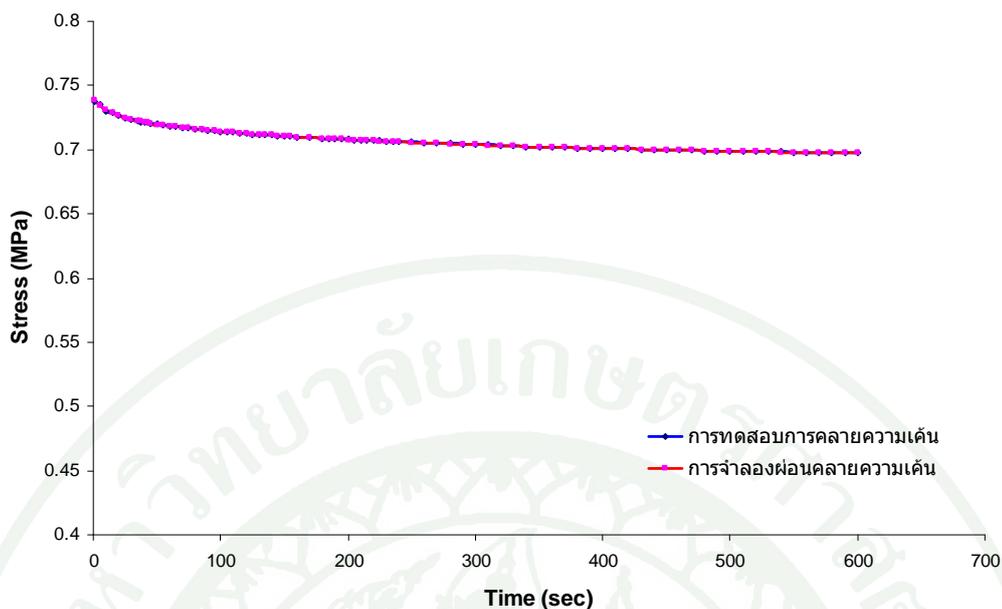
	LINEAR	RELAXATION TIME
1	0.0112521	10.4591
2	0.0127905	42.9802
3	0.0373549	316.604
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0

LONG: 0.692939
SHORT: 0.738267

ERROR: 5.77937e-006

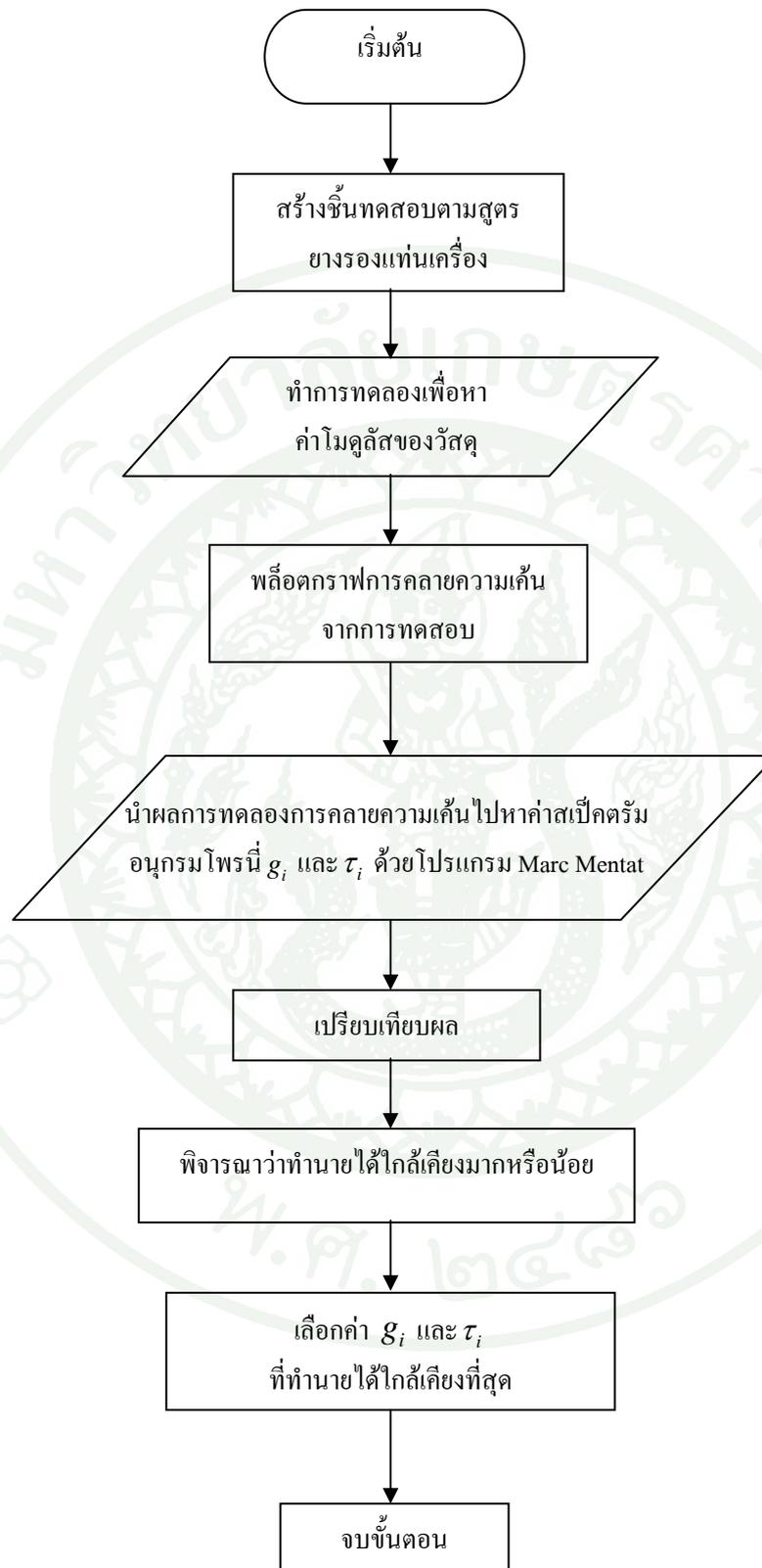
COMPUTE APPLY RESET OK

ภาพที่ 63 ค่าสเป็คตรัมของอนุกรมพรีนีย์ อันดับ 3 และค่าความผิดพลาดจากการทำนาย



ภาพที่ 64 การหาค่าสเป็คตรัมอนุกรมโพรนีจากการคลายความเค้น

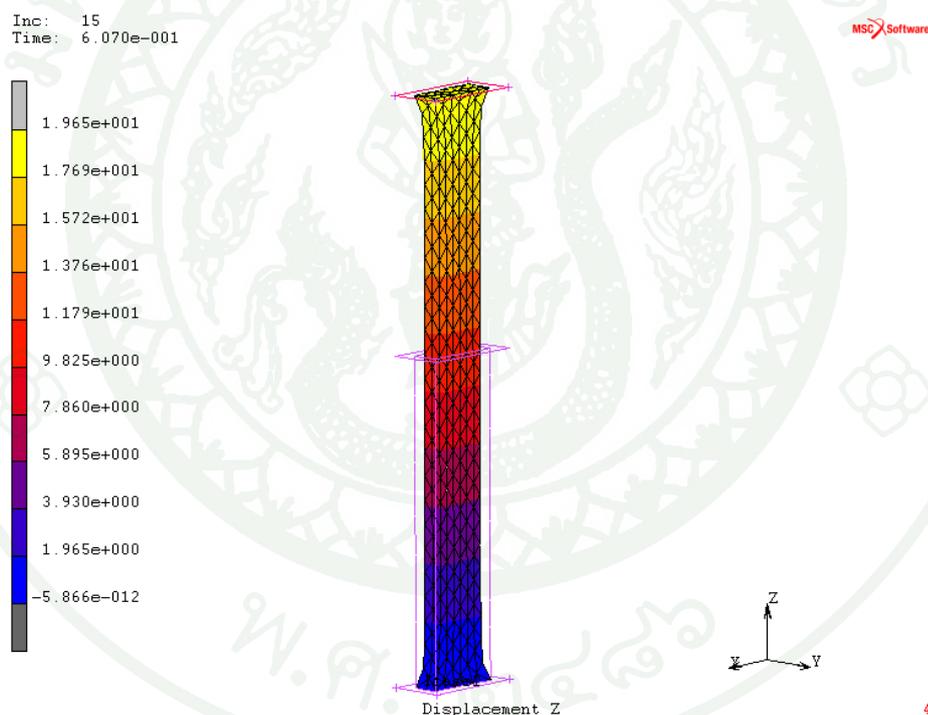
จากกราฟในภาพที่ 64 เป็นกราฟที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมโพรนี อันดับ 3 ที่เหมาะสม ที่ได้จากโปรแกรม Marc Mentat 2005r1 ซึ่งจากกราฟที่ได้จะเป็นการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบการคลายความเค้น กับค่าที่ได้จากการหาค่าสเป็คตรัมอนุกรมโพรนี สามารถสรุปได้ว่าค่าสเป็คอนุกรมโพรนี อันดับ 3 ที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม Marc Mentat 2005r1 นั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมของการทดสอบการคลายความเค้นได้ดี โดยจะมีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมแสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนายมีค่าเท่ากับ 0.00000577937 แสดงดังภาพที่ 63



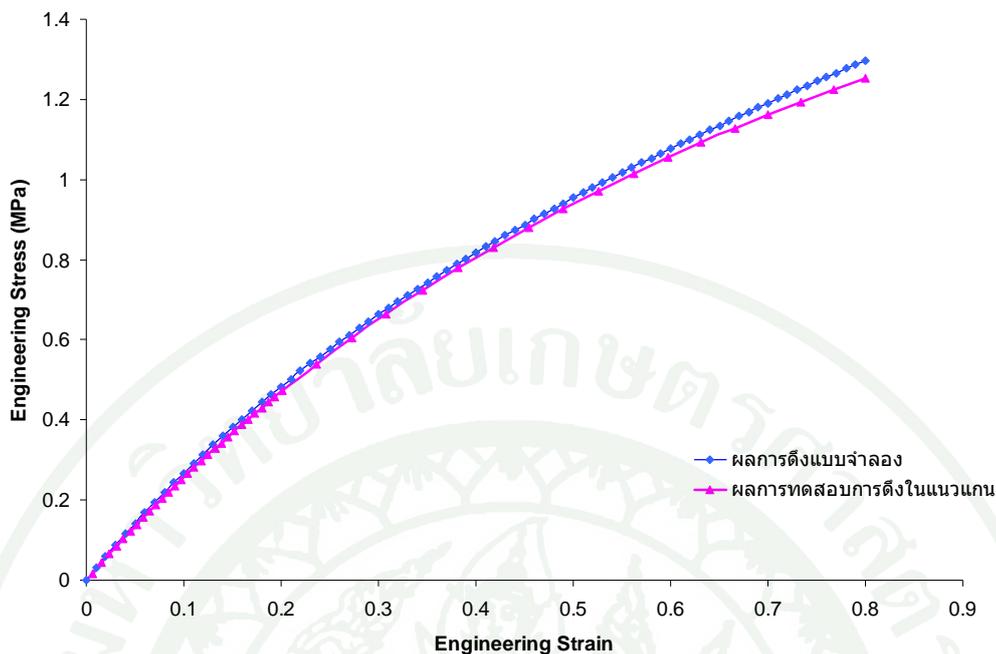
ภาพที่ 65 ขั้นตอนการวิเคราะห์การหาค่าตัวแปรวิสโคอีลาสติก

7. การเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองวัสดุขงที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เรา จะทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเราจะนำ แบบจำลองของวัสดุขงที่ได้มาทำนายพฤติกรรมการดึง แล้วมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการดึง ซึ่ง จะทำการเปรียบเทียบกับการผลทดสอบการดึงที่กำจัดผลของมูลินออกไปแล้ว ค่าที่นำมา เปรียบเทียบคือค่าความเค้นวิศวกรรมกับค่าความเครียดวิศวกรรม เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้อง ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ว่าค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดของ แบบจำลองอีกเดนนั้น สามารถทำนายพฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติก ของวัสดุขงได้แม่นยำหรือไม่ ดังแสดงดังภาพที่ 67 และลักษณะการรับภาระแรงดึงของแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 66



ภาพที่ 66 ลักษณะการรับภาระแรงดึงของแบบจำลอง



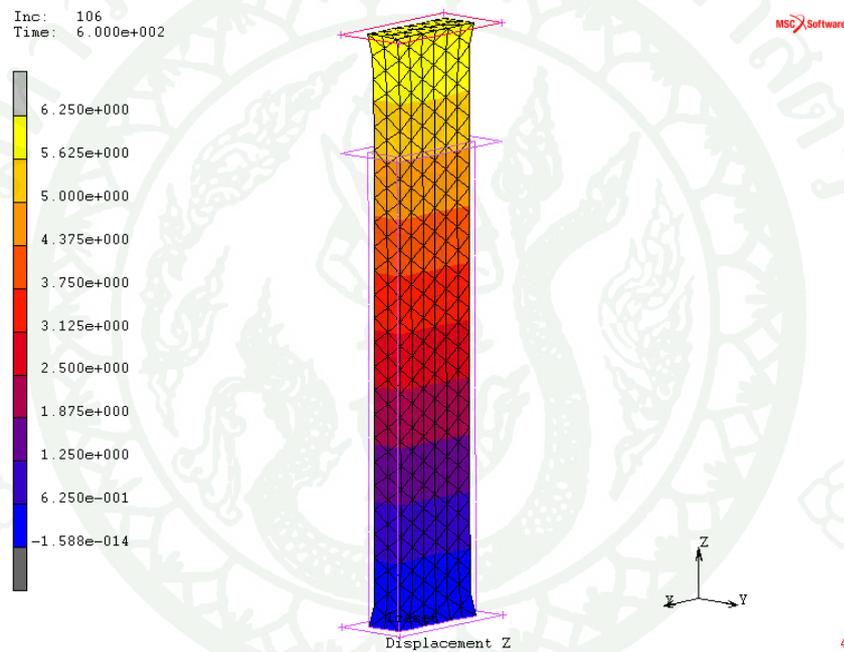
ภาพที่ 67 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงกับแบบจำลองการดึง

จากผลของการเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น กับผลการทดสอบการดึงในแนวแกน จากภาพที่ 68 คือค่าความเครียดวิศวกรรมกับค่าความเค้นวิศวกรรม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะสามารถคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยการคำนวณ โดยการคำนวณจากสมการ (59) โดยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.023088011 ซึ่งมีค่าน้อย จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายผลการทดสอบการดึงในแนวแกนได้ดีได้ดี และแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดของอ็อกเคนนั้น สามารถทำนายพฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติก สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยางได้ดี

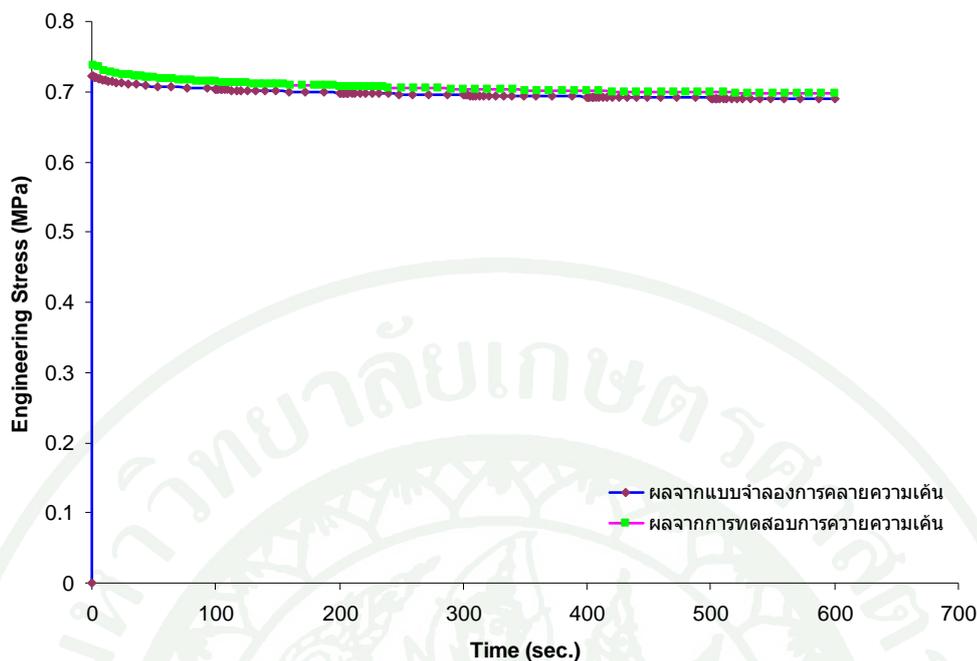
8. การเปรียบเทียบผลการทดสอบการคลายความเค้นกับผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองวัสดุยางของการคลายความเค้น โดยแบบจำลองกำหนดให้ดึงแบบจำลองให้มีการยืดตัวออกไป 25 เปอร์เซ็นต์ แล้วคงที่ความเครียดไว้ 600 วินาที แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุยาง

จากผลการทดสอบการคลายความเค้น ขณะดึงขึ้นทดสอบให้ยืดออก 25 เปอร์เซ็นต์ ความเค้น จะมีค่าสูงในช่วงแรกของการดึงและจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วความเค้นจึงคลายตัวลงสู่ความเค้น สมดุลจะเริ่มคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 200 วินาที ซึ่งเป็นผลจากการคลายตัวของวัสดุยาง ดังนั้นเราต้อง ทำการเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น ซึ่งค่าที่นำมาเปรียบเทียบ คือ ค่าความเค้นกับเวลา เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ว่าค่าสเป็คตรัม ของอนุกรมฟูริเยร์ อันดับ 3 นั้น สามารถทำนายพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกของวัสดุยางได้แม่นยำ หรือไม่ แสดงดังภาพที่ 69 และลักษณะการรับภาระแรงดึงแบบคงที่ ของการทดสอบการคลาย ความเค้น แสดงดังภาพที่ 68



ภาพที่ 68 ลักษณะการรับภาระแรงดึงแบบคงที่ ของการทดสอบการคลายความเค้น



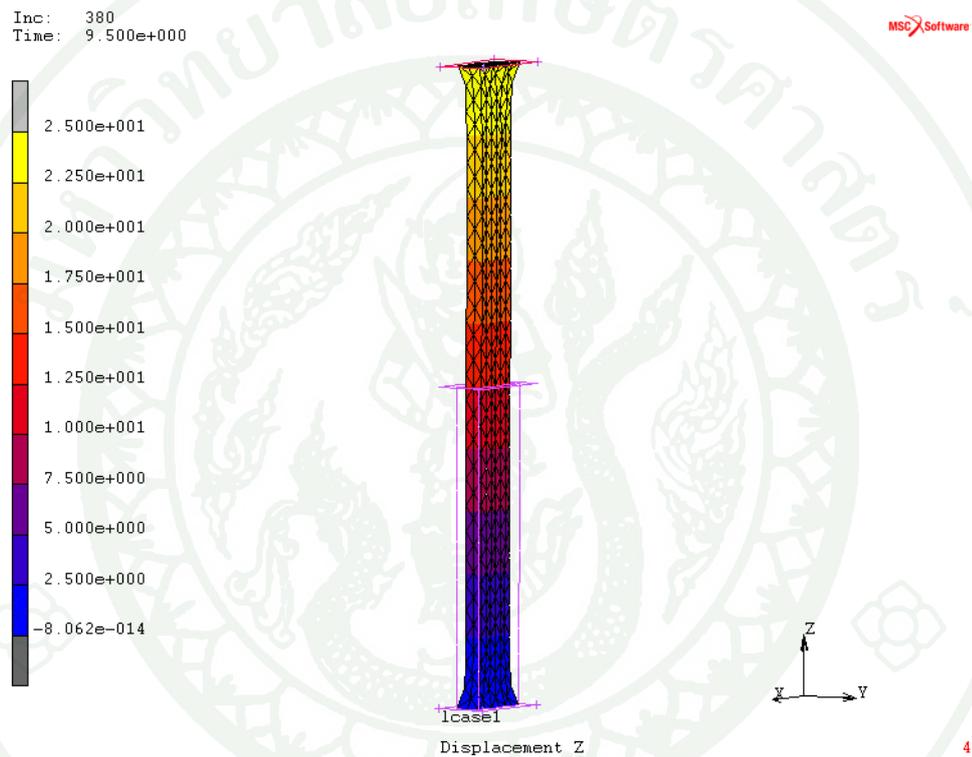
ภาพที่ 69 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการคลายความเค้นกับผลจากแบบจำลอง

จากผลของการเปรียบเทียบที่ผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น กับผลการทดสอบการคลายความเค้นจากภาพที่ 69 คือค่าความเค้นกับเวลา เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะสามารถคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองโดยการคำนวณได้จากสมการที่ (59) โดยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.010665 ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายผลการทดสอบการคลายความเค้นได้ดี และค่าสเป็คตรัมของอนุกรม โพรนี้ อันดับ 3 นั้น สามารถทำนายพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกของวัสดุยางได้แม่นยำ

9. การเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

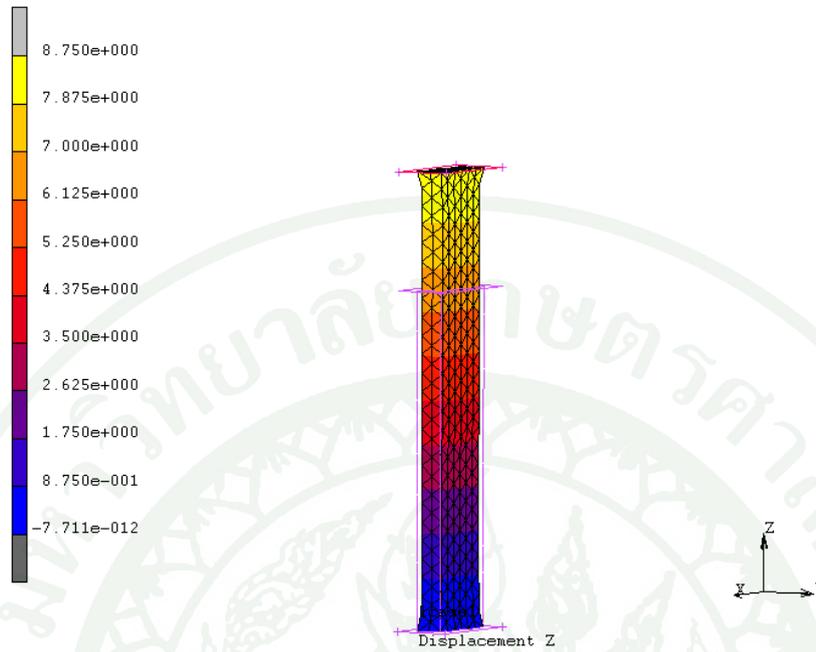
จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ โดยทำการจำลองการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ ให้ขึ้นทดสอบมีการยืดตัวมีความเครียด 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วปล่อยกลับสู่จุดเริ่มต้น เป็นจำนวน 10 รอบ จากการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ และผลการทดสอบดึงที่รับภาระแบบวงรอบที่กำจัดผลของมูลินออกไปแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 56 จากการทดลองสังเกตได้ว่าขณะดึงขึ้นและปล่อยกลับ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

จะไม่ซ้ำแนวเดิม ซึ่งพลังงานไม่สามารถย้อนกลับได้หมด จะเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส แสดงว่ายังมี การสูญเสียพลังงานบางส่วนโดยเปลี่ยนรูปจากพลังงานกลเป็นพลังงานรูปแบบ พิจารณาการ เปรียบเทียบผลของการทดสอบกับผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ที่ นำมาเปรียบเทียบคือค่าความเค้นวิศวกรรมกับค่าความเครียดวิศวกรรม เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ของแบบจำลองที่สร้างขึ้น แสดงดังภาพที่ 72 และลักษณะการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ ของแบบจำลอง แสดงดังภาพที่ 70-71

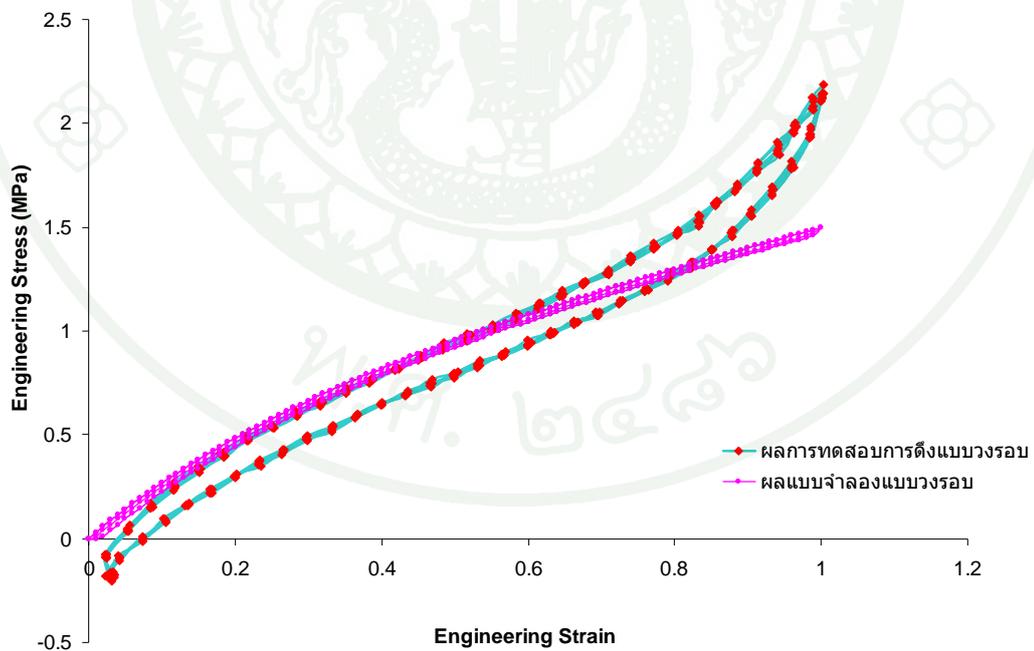


ภาพที่ 70 ลักษณะการรับภาระแรงดึง ของการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ

Inc: 393
Time: 9.825e+000



ภาพที่ 71 ลักษณะการปล่อยกลับ ของการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ



ภาพที่ 72 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลของการเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น กับผลการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบจากภาพที่ 72 คือค่าความเครียดวิศวกรรมกับค่าความเค้นวิศวกรรม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ แต่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถทำนายผลได้ดีในช่วงค่าความเครียดวิศวกรรมที่ 10-60 เปอร์เซ็นต์

10. การเปรียบเทียบผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดลองด้วยเครื่องทดสอบ Dynamics Mechanical Analyzer (DMA) ซึ่งทำการทดสอบในโหมดการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะเดียวกันกับการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ที่ความถี่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความถี่ 50 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์ และ 20 เฮิรตซ์ ทดลองภายในอุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพิจารณาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องยนต์ คือรอบของเครื่องยนต์ที่ระดับสูง 3,000 รอบ/นาที หรือ 50 เฮิรตซ์ รอบเครื่องยนต์ระดับปกติ 2,100 รอบ/นาที หรือ 35 เฮิรตซ์ และรอบเครื่องยนต์ระดับเบา 1,200 รอบ/นาที หรือ 20 เฮิรตซ์ ซึ่งการทดสอบนี้เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นของการสั่นสะเทือนที่ระดับต่างๆ กัน ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความถี่ 3 ระดับ

การทดสอบที่ ระดับความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าความเครียด เริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความเค้น เริ่มต้น (MPa)	ค่าความเครียด ไดนามิกส์ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความเค้น ไดนามิกส์ (MPa)
20	25	0.567129	0.5	0.018119
35	25	0.567129	0.5	0.018244
50	25	0.567129	0.5	0.016078

จากผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุอย่างที่มีความถี่ 3 ระดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตจากตารางที่ 5 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเริ่มต้น และค่าความเค้นไดนามิกส์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ เนื่องมาจากค่าที่ได้จากการทดสอบนั้น ค่าความเครียดเริ่มต้นและค่าความเครียดไดนามิกส์นั้นมีเกิดขึ้นนั้น ไม่เป็นไปตามค่าที่เรากำหนดไว้ในขั้นตอนการตั้งค่าการทดสอบ ซึ่งเป็นข้อผิดพลาดที่เกิดจากการทดสอบ

11. ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางรองแท่นเครื่อง ซึ่งใช้แผนการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้การออกแบบ 2^3 แฟคทอเรียล โดยการพิจารณาที่ความถี่ 3 ระดับ ใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จำนวน 24 ตัวอย่าง ปัจจัยควบคุม 3 ปัจจัย ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยละ 2 ระดับคือต่ำและสูง โดยระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลอง 2^3 แฟคทอเรียล แสดงดังตารางที่ 4 และสามารถนำมาเขียนแทนสัญลักษณ์ได้ดังแสดงตารางที่ 9

ตารางที่ 9 สัญลักษณ์แทนขนาดยางรองแท่นเครื่อง

สัญลักษณ์		ความกว้าง (A) มิลลิเมตร	ความยาว (B) มิลลิเมตร	องสามมเอียง (C)	ความสูงคงที่ มิลลิเมตร
M00		43	60	85	45
M01	(1)	43	60	70	45
M02	a	58	60	70	45
M03	b	43	73	70	45
M04	ab	58	73	70	45
M05	c	43	60	90	45
M06	ac	58	60	90	45
M07	bc	43	73	90	45
M08	abc	58	73	90	45

หมายเหตุ M00 คือขนาดของผลิตภัณฑ์ยางรองแท่นเครื่องชิ้นงานจริง

11.1 พิจารณาเปรียบเทียบค่าความแข็งแกร่งของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง

โดยจะทำการพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของแบบจำลองขนาดของยางรองแท่นเครื่อง โดยจะพิจารณาจากแบบจำลองโดยการกำหนดให้มีแรงกระทำต่อแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องมีค่าตั้งแต่ 100 – 1,200 นิวตัน โดยแรงกระทำแบบคงที่ (Static Load) ซึ่งแบบจำลองจะให้แรงกระทำคงที่กับแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง จากสมการที่ (2)

$$\{F\} = [K]\{X\} + [C]\{\dot{X}\} + [M]\{\ddot{X}\}$$

ทำการวัดระยะการเคลื่อนที่ที่สถานะ Steady State แล้ว คือวัดที่ระยะสุดท้ายของการเคลื่อนที่ขณะหยุดนิ่งแล้ว คือ สถานะที่ $\{\dot{X}\}$ และ $\{\ddot{X}\}$ มีค่าเท่ากับ 0

ดังนั้นจากสมการที่ (2) จะสรุปได้ว่า

$$\{F\} = [K]\{X\} \quad (62)$$

ซึ่งค่าที่ได้จะสามารถคำนวณได้จากสมการ $F = kx$ โดยค่าความแข็งแกร่งของแต่ละแบบจำลองนั้น (JIS K 6385, 2001) สามารถหาได้โดยการพิจารณาจากสมการการถดถอยที่ได้จากกราฟ ซึ่งค่าความแข็งแกร่ง คือค่าความชันของกราฟ

$$K = \frac{F_2 - F_1}{x_2 - x_1} \quad (63)$$

และพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เมื่อมีค่าสูง และมีค่าใกล้ 1 จะสามารถสรุปได้ว่าค่าความแข็งแกร่งที่ได้จากกราฟสมการถดถอยนั้น สามารถแทนค่าความแข็งแกร่งของแบบจำลองได้ดี โดยกราฟแสดงไว้ในภาคผนวก และสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง

สัญลักษณ์	ค่าความแข็งแรง (Stiffness), (N/mm)	ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2)
M00	246.3	0.9957
M01	213.17	0.9973
M02	287.15	0.9987
M03	270.94	0.9979
M04	375.63	0.9989
M05	246.04	0.9959
M06	339.12	0.9977
M07	303.83	0.9971
M08	421.87	0.9985

จากตารางที่ 7 ค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) นั้น ค่า R^2 ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องทุกขนาดที่แสดงในตารางนั้นมีค่าใกล้ค่า 1 มาก แสดงว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จากค่าความชันของสมการการถดถอยนั้นสามารถใช้อธิบายค่าความแข็งแรงของแต่ละขนาดของแบบจำลองได้ดี จากตารางจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแข็งแรงที่มีค่ามากที่สุดคือ แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08 ที่ความกว้าง A ระดับสูง ความยาว B ระดับสูง และองศามุมเอียง C ระดับสูง มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 421.87 N/mm

11.2 พิจารณาเปรียบเทียบค่าการดูดซับแรงสั่นสะเทือนของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง

ในขั้นตอนนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าการดูดซับแรงสั่นสะเทือนของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองขนาดต่างนั้นได้กล่าวแล้วข้างต้น มีขนาดดังตารางที่ 9 ซึ่งจากการวิเคราะห์นั้นกำหนดให้แบบจำลองนั้นรับภาระการกดที่แรงเท่ากับ 1,200 นิวตัน โดยเคลื่อนที่เป็นแบบ Sinusoidal ซึ่งเป็นแรงที่อ้างอิงจากการทำงานจริงของเครื่องยนต์ เป็นการเคลื่อนที่แบบการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ ซึ่งพิจารณาการเคลื่อนที่ด้วยความถี่ 3 ระดับ คือ ความถี่ 20 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์, และ 50 เฮิรตซ์ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเสียรูป และค่าการดูดซับการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองขนาดต่างๆ ซึ่งค่าที่จะ

นำมาพิจารณาจากแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง คือ ระยะเวลาเคลื่อนที่ของพื้นผิวด้านล่างของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง (Bottom Surface) ซึ่งก็คือระยะการสั่นที่สามารถส่งผ่านไปยังโครงสร้างรถยนต์ เมื่อมีระยะเวลาเคลื่อนที่น้อยแสดงว่ายางรองแท่นเครื่องสามารถดูดซับการสั่นสะเทือนได้ดี

ตารางที่ 11 แสดงค่าการดูดซับแรงสั่นสะเทือนของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง

สัญลักษณ์	ความถี่ 20 เฮิรตซ์		ความถี่ 35 เฮิรตซ์		ความถี่ 50 เฮิรตซ์	
	การเคลื่อนที่	การเคลื่อนที่	การเคลื่อนที่	การเคลื่อนที่	การเคลื่อนที่	การเคลื่อนที่
	ขณะยึดตัว (มิลลิเมตร)	ขณะยุบตัว (มิลลิเมตร)	ขณะยึดตัว (มิลลิเมตร)	ขณะยุบตัว (มิลลิเมตร)	ขณะยึดตัว (มิลลิเมตร)	ขณะยุบตัว (มิลลิเมตร)
M00	0.261713	-0.15765	0.262348	-0.15789	0.262353	-0.15789
M01	0.772014	-0.43055	0.777265	-0.44239	0.773648	-0.43404
M02	0.949347	-1.24678	0.950964	-1.24873	0.950969	-1.2495
M03	0.606185	-0.42322	0.607354	-0.42361	0.607745	-0.42366
M04	0.81484	-0.94655	0.816319	-0.94852	0.816322	-0.94852
M05	0.326021	-0.42315	0.326996	-0.42434	0.327034	-0.42457
M06	0.195076	-0.20374	0.195445	-0.20411	0.195446	-0.20411
M07	0.243208	-0.24935	0.243673	-0.24977	0.243675	-0.24977
M08	0.182264	-0.19744	0.182605	-0.19782	0.182606	-0.19782

ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง จากตารางที่ 11 จากค่าที่ได้เมื่อสังเกตจะพบว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ที่มีช่วงขนาดน้อยๆ จะดี เนื่องจากสามารถดูดซับการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นได้ดี แต่เพื่อความถูกต้องเราจะนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปของยางรองแท่นเครื่อง และการดูดซับการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่องต่อไป โดยวิเคราะห์ด้วยการตรวจสอบด้วยกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัย (Normal Probability Plots of The Effects) ของแต่ละปัจจัย และวิเคราะห์ต่อไปด้วยกราฟผลกระทบหลักและอันตรกิริยา เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลจากปัจจัยร่วม โดยค่าผลตอบแทนของงานวิจัยนี้คือช่วงของการเคลื่อนที่ ที่ได้จาก ตารางที่ 11 โดยผลตอบแทนที่ดี คือค่าช่วงการเคลื่อนที่น้อย โดยแสดงช่วงการเคลื่อนที่ของข้อมูลดังตารางที่ 12-14

11.2.1 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของแบบจำลองทางตรงแทนเครื่องที่ระดับความถี่ 20 เฮิรตซ์

ตารางที่ 12 แสดงปัจจัยและผลตอบสนองของการสั้นสะท้อนที่ระดับความถี่ 20 เฮิรตซ์

สัญลักษณ์		ความกว้าง (A) (มิลลิเมตร)	ความยาว (B) (มิลลิเมตร)	องศามุมเอียง (C)	ช่วงการเคลื่อนที่ ของแบบจำลอง (มิลลิเมตร)
M00		43	60	85	0.419363
M01	(1)	43	60	70	1.202564
M02	a	58	60	70	2.196127
M03	b	43	73	70	1.029405
M04	ab	58	73	70	1.76139
M05	c	43	60	90	0.749171
M06	ac	58	60	90	0.398816
M07	bc	43	73	90	0.492558
M08	abc	58	73	90	0.379704

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย A

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (63)$$

$$A = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} 0.419363 + 1.76139 + 0.398816 + 0.379704 \\ -1.202564 - 1.029405 - 0.749171 - 0.492558 \end{array} \right] = 0.3155848$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย B

$$B = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (64)$$

$$B = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1.029405 + 1.76139 + 0.492558 + 0.379704 \\ -1.202564 - 2.196127 - 0.749171 - 0.398816 \end{bmatrix} = -0.220905$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบบจากปัจจัย C

$$C = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (65)$$

$$C = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0.749171 + 0.398816 + 0.492558 + 0.379704 \\ -1.202564 - 2.196127 - 1.029405 - 1.76139 \end{bmatrix} = -1.042309$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบบของอันตรกิริยา AB

$$AB = \frac{1}{4n} [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (66)$$

$$AB = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0.379704 - 0.492558 + 1.76139 - 1.029405 \\ -0.398816 + 0.749171 - 2.196127 + 1.202564 \end{bmatrix} = -0.006019$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบบของอันตรกิริยา AC

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (67)$$

$$AC = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1.202564 - 2.196127 + 1.029405 - 1.76139 \\ -0.749171 + 0.398816 - 0.492558 + 0.379704 \end{bmatrix} = -0.547189$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบบของอันตรกิริยา BC

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (68)$$

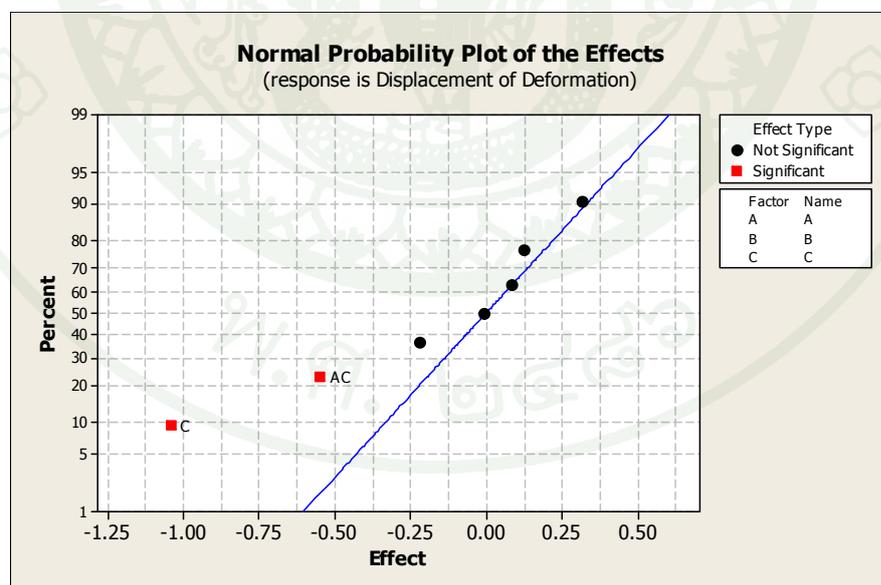
$$BC = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} 1.202564 + 2.196127 - 1.029405 - 1.76139 \\ -0.749171 - 0.398816 + 0.492558 + 0.379704 \end{array} \right] = 0.0830428$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา ABC

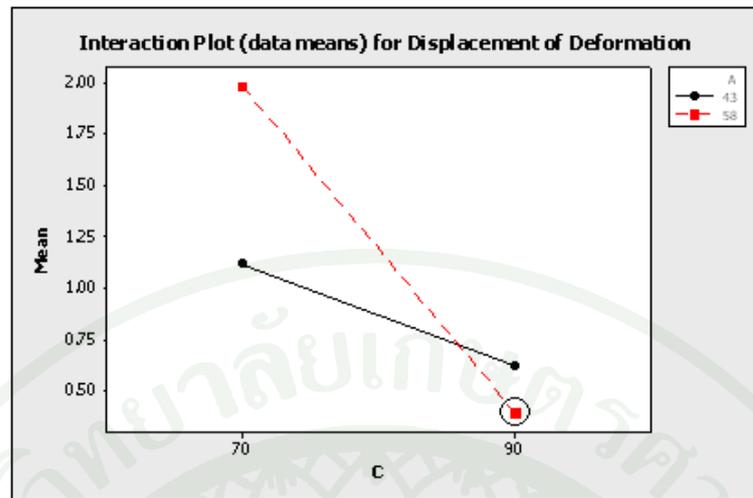
$$ABC = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (69)$$

$$ABC = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} 0.379704 - 0.492558 - 0.398816 + 0.749171 \\ -1.76139 + 1.029405 + 2.196127 - 1.202564 \end{array} \right] = 0.1247698$$

จากการประมาณผลกระทบของปัจจัยที่คำนวณได้นั้นสามารถนำมาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัย ดังแสดงดังภาพที่ 73 ผลกระทบทั้งหมดของปัจจัยที่อยู่บนเส้นตรงจะถือว่าตัดทิ้งได้ แต่ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลมากๆ คือผลกระทบที่อยู่ห่างจากเส้นตรง จะพบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก C และผลกระทบของอันตรกิริยา AC มีผลต่อผลตอบสนองของการทดลอง คือ ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง



ภาพที่ 73 การพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบที่ระดับความถี่ 20 เฮิรตซ์



ภาพที่ 74 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียงที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์

จากกราฟผลกระทบของอันตรกิริยา AC การภาพที่ 74 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียง สามารถสรุปได้ว่าการกำหนดค่าที่ความกว้างอยู่ที่ระดับสูง A เท่ากับ 58 มิลลิเมตร และองศามุมเอียงอยู่ที่ระดับสูง C เท่ากับ 90 องศา จะทำให้ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลองน้อยที่สุด

11.2.2 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องที่ระดับความถี่ 35 เฮิรตซ์

ตารางที่ 13 แสดงปัจจัยและผลตอบสนองของการสันสะท้อนที่ระดับความถี่ 35 เฮิรตซ์

สัญลักษณ์		ความกว้าง (A) (มิลลิเมตร)	ความยาว (B) (มิลลิเมตร)	องศาแนวเอียง (C)	ช่วงการเคลื่อนที่ ของแบบจำลอง (มิลลิเมตร)
M00		43	60	85	0.420238
M01	(1)	43	60	70	1.219655
M02	a	58	60	70	2.199694
M03	b	43	73	70	1.030964
M04	ab	58	73	70	1.764839
M05	c	43	60	90	0.751336
M06	ac	58	60	90	0.399555
M07	bc	43	73	90	0.493443
M08	abc	58	73	90	0.380425

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย A จากสมการ (63)

$$A = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2.19969 + 1.76484 + 0.39956 + 0.38043 \\ -1.21966 - 1.03096 - 0.75134 - 0.49344 \end{bmatrix} = 0.3123$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย B จากสมการ (64)

$$B = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1.03096 + 1.76484 + 0.49344 + 0.38043 \\ -1.21966 - 2.19969 - 0.075134 - 0.39956 \end{bmatrix} = -0.2251$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย C จากสมการ (65)

$$C = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0.75134 + 0.39956 + 0.49344 + 0.38043 \\ -1.21966 - 2.19969 - 1.03096 - 1.76484 \end{bmatrix} = -1.0476$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา AB จากสมการ (66)

$$AB = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0.38043 - 0.49344 + 1.76484 - 1.03096 \\ -0.39956 + 0.75134 - 2.19969 + 1.21966 \end{bmatrix} = -0.0019$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา AC จากสมการ (67)

$$AC = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1.21966 - 2.19969 + 1.03096 - 1.76484 \\ -0.75134 + 0.39956 - 0.49344 + 0.38043 \end{bmatrix} = -0.5447$$

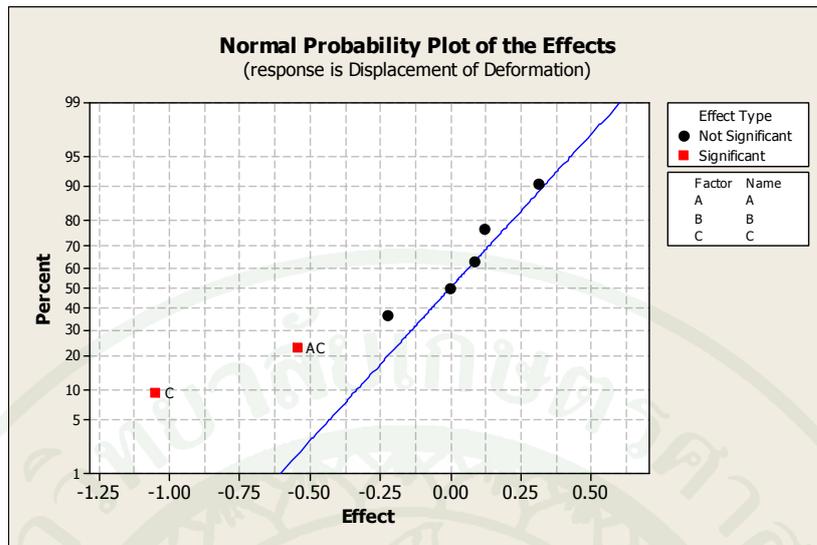
พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา BC จากสมการ (68)

$$BC = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1.21966 + 2.19969 - 1.03096 - 1.76484 \\ -0.75134 - 0.39956 + 0.49344 + 0.38043 \end{bmatrix} = 0.0866$$

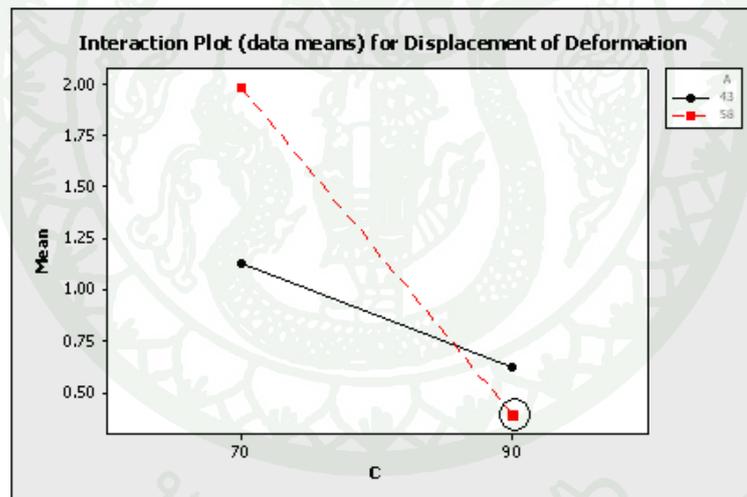
พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา ABC จากสมการ (69)

$$ABC = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0.38043 - 0.49344 - 0.39956 + 0.75134 \\ -1.76484 + 1.03096 + 2.19969 - 1.21966 \end{bmatrix} = 0.1212$$

จากการประมาณผลกระทบของปัจจัยที่คำนวณได้นั้นสามารถนำมาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัย ดังแสดงดังภาพที่ 75 ผลกระทบทั้งหมดของปัจจัยที่อยู่บนเส้นตรงจะถือว่าตัดทิ้งได้ แต่ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลมากๆ คือผลกระทบที่อยู่ห่างจากเส้นตรง จะพบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก C และผลกระทบของอันตรกิริยา AC มีผลต่อผลตอบแทนของ ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง ซึ่งผลจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสั้นสะเทือนที่ระดับความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น



ภาพที่ 75 การพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบที่ระดับความถี่ 35 เฮิร์ตซ์



ภาพที่ 76 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียงที่ความถี่ 35 เฮิร์ตซ์

จากกราฟผลกระทบของอันตรกิริยา AC การภาพที่ 76 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียง สามารถสรุปได้ว่าการกำหนดค่าที่ความกว้างอยู่ที่ระดับสูง A เท่ากับ 58 มิลลิเมตร และองศามุมเอียงอยู่ที่ระดับสูง C เท่ากับ 90 องศา จะทำให้ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลองน้อยที่สุด ซึ่งผลจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสันสะเทือนที่ระดับความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

11.2.3 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของแบบจำลองทางตรงแทนเครื่องที่ระดับความถี่ 50 เฮิรตซ์

ตารางที่ 14 แสดงปัจจัยและผลตอบสนองของการสั้นสะเทือนที่ระดับความถี่ 50 เฮิรตซ์

สัญลักษณ์	ความกว้าง (A) (มิลลิเมตร)	ความยาว (B) (มิลลิเมตร)	องศามุมเอียง (C)	ช่วงการเคลื่อนที่ ของแบบจำลอง (มิลลิเมตร)
M00	43	60	85	0.420243
M01 (1)	43	60	70	1.207688
M02 a	58	60	70	2.200469
M03 b	43	73	70	1.031405
M04 ab	58	73	70	1.764842
M05 c	43	60	90	0.751604
M06 ac	58	60	90	0.399556
M07 bc	43	73	90	0.493445
M08 abc	58	73	90	0.380426

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย A จากสมการ (63)

$$A = \frac{1}{4n} \begin{bmatrix} 2.200469 + 1.764842 + 0.399556 + 0.380426 \\ -1.207688 - 1.031405 - 0.751604 - 0.493445 \end{bmatrix} = 0.3153$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย B จากสมการ (64)

$$B = \frac{1}{4n} \begin{bmatrix} 1.031405 + 1.764842 + 0.493445 + 0.380426 \\ -1.207688 - 2.200469 - 0.751604 - 0.399556 \end{bmatrix} = -0.2223$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบจากปัจจัย C จากสมการ (65)

$$C = \frac{1}{4n} \begin{bmatrix} 0.754604 + 0.399556 + 0.493445 + 0.380426 \\ -1.207688 - 2.200469 - 1.031405 - 1.764842 \end{bmatrix} = -1.0448$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา AB จากสมการ (66)

$$AB = \frac{1}{4n} \begin{bmatrix} 0.380426 - 0.493445 + 1.764842 - 1.031405 \\ -0.399556 + 0.751604 - 2.200469 + 1.207688 \end{bmatrix} = -0.0051$$

พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา AC จากสมการ (67)

$$AC = \frac{1}{4n} \begin{bmatrix} 1.207688 - 2.200469 + 1.031405 - 1.764842 \\ -0.754604 + 0.399556 - 0.493445 + 0.380426 \end{bmatrix} = -0.5478$$

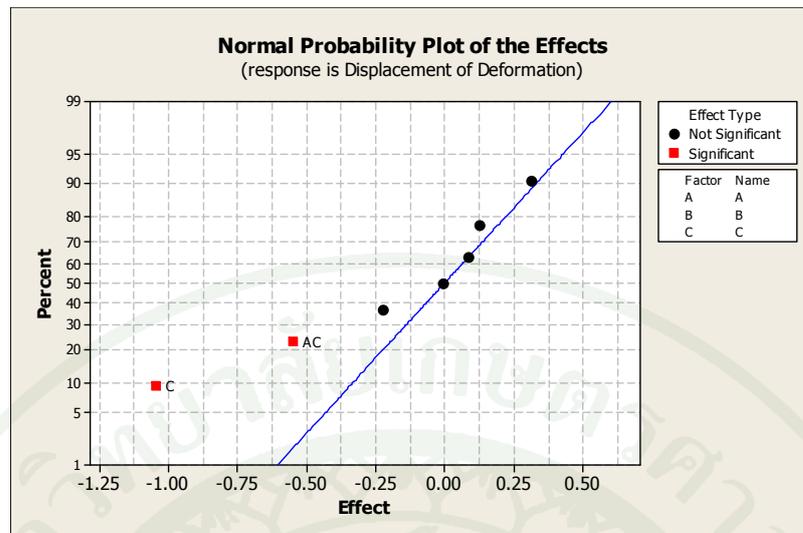
พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา BC จากสมการ (68)

$$BC = \frac{1}{4n} \begin{bmatrix} 1.207688 + 2.200469 - 1.031405 - 1.764842 \\ -0.751604 - 0.399556 + 0.493445 + 0.380426 \end{bmatrix} = 0.0837$$

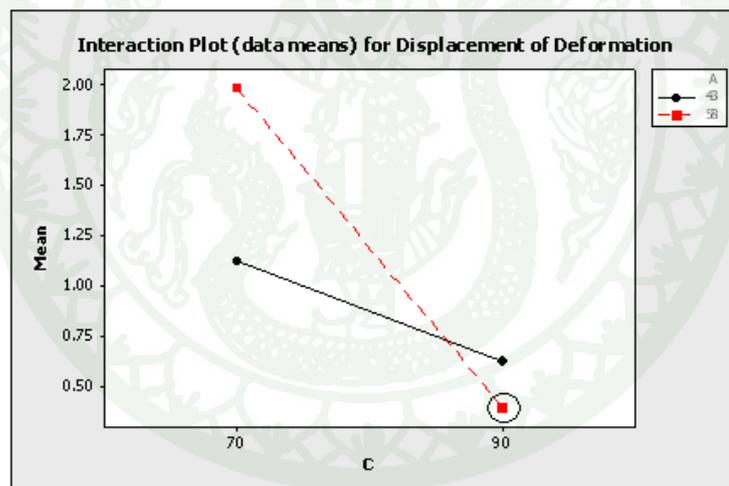
พิจารณาการประมาณผลกระทบของอันตรกิริยา ABC จากสมการ (69)

$$ABC = \frac{1}{4n} \begin{bmatrix} 0.380426 - 0.493445 - 0.399556 + 0.751604 \\ -1.764842 + 1.031405 + 2.200469 - 1.207688 \end{bmatrix} = 0.1246$$

จากการประมาณผลกระทบของปัจจัยที่คำนวณได้นั้นสามารถนำมาพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัย ดังแสดงดังภาพที่ 77 ผลกระทบทั้งหมดของปัจจัยที่อยู่บนเส้นตรงจะถือว่าตัดทิ้งได้ แต่ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลหลายๆ คือผลกระทบที่อยู่ห่างจากเส้นตรง จะพบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก C และผลกระทบของอันตรกิริยา AC มีผลต่อผลตอบสนองของ ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง ซึ่งผลจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสั้นสะเทือนที่ระดับความถี่ 20 เฮิรตซ์ และ 35 เฮิรตซ์ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น



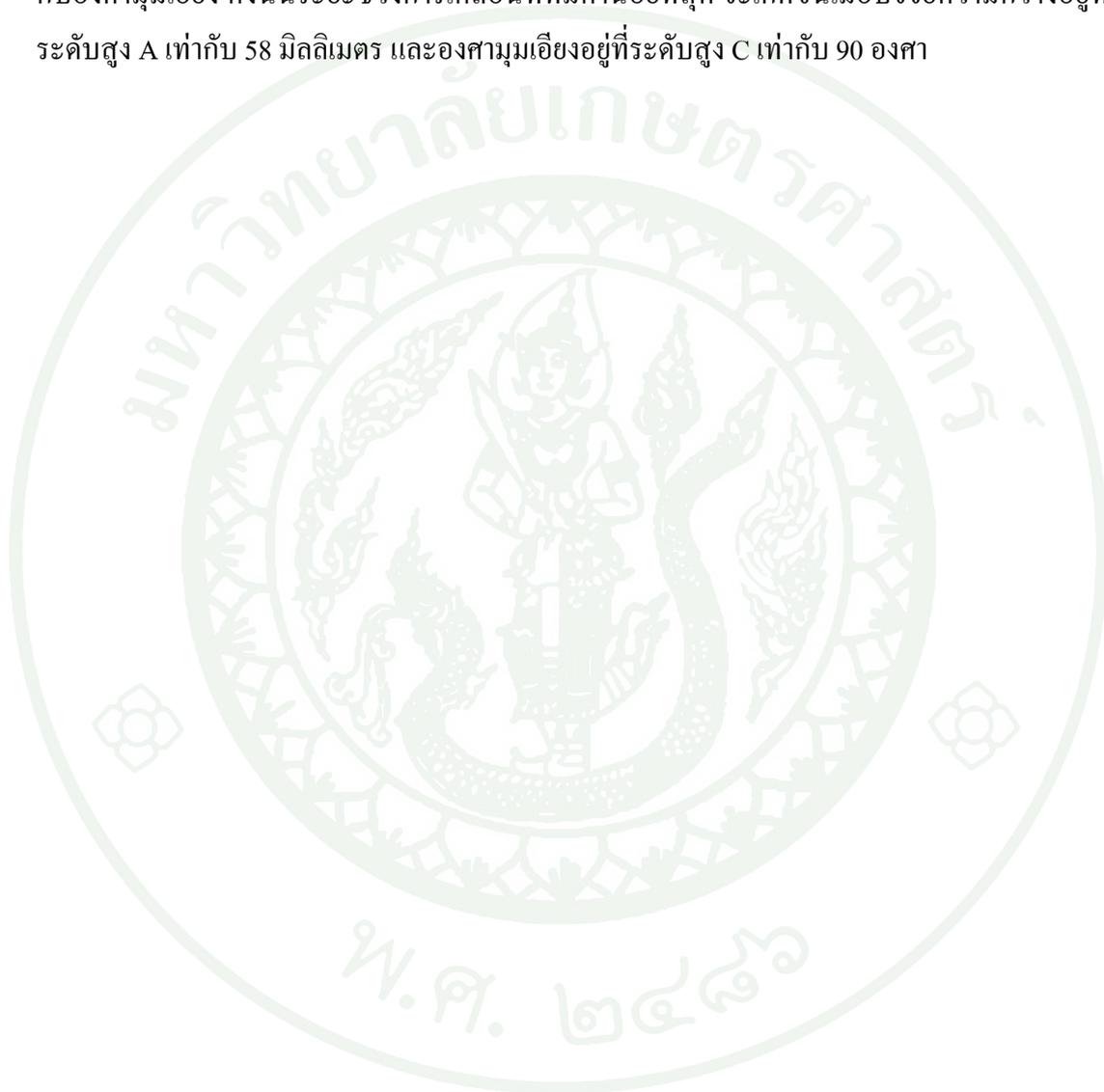
ภาพที่ 77 การพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบที่ระดับความถี่ 50 เฮิรตซ์



ภาพที่ 78 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียงที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์

จากกราฟผลกระทบของอันตรกิริยา AC การภาพที่ 78 กราฟผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้าง และองศามุมเอียง สามารถสรุปได้ว่าการกำหนดค่าที่ความกว้างอยู่ที่ระดับสูง A เท่ากับ 58 มิลลิเมตร และองศามุมเอียงอยู่ที่ระดับสูง C เท่ากับ 90 องศา จะทำให้ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลองน้อยที่สุด ซึ่งผลจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสันสะท้อนที่ระดับความถี่ 20 เฮิรตซ์ และ 35 เฮิรตซ์ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

ดังนั้นจากการวิเคราะห์การดูดซับการสั่นสะเทือนของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาดต่างๆ ที่ระดับความถี่ทั้ง 3 ระดับ จากผลการวิเคราะห์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง หรือ ระยะเวลาการเคลื่อนที่มีค่าน้อย คือ ผลกระทบหลักปัจจัยความกว้าง และผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างความกว้างกับองศามุมเอียง ดังนั้นระยะเวลาการเคลื่อนที่มีค่าน้อยที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อปัจจัยความกว้างอยู่ที่ระดับสูง A เท่ากับ 58 มิลลิเมตร และองศามุมเอียงอยู่ที่ระดับสูง C เท่ากับ 90 องศา



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการศึกษาการจำลองการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง และศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของยางรองแท่นเครื่องภายใต้สภาวะที่รับโหลดแบบพลวัต เพื่อศึกษาการเสถียรของยางรองแท่นเครื่อง และความสามารถในการดูดซับแรงสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง และศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับขนาดรูปร่างของยางรองแท่นเครื่อง เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการรับการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง โดยได้แบ่งการวิจัยได้ดังนี้

1. สมบัติทางกลของยาง และการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด

1.1 การทดสอบสมบัติของยางที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ การทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ และการทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน โดยค่าที่นำไปใช้ คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด ซึ่งค่าจากการทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ และการทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน เป็นค่าที่สามารถคำนวณด้วยวิธีอัตราส่วนปัวส์ซองจากผลการทดสอบค่าความเค้นและความเครียดจากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว ซึ่งผลการทดลองที่นำไปใช้ คือ การดึงครั้งที่ 6 เป็นผลที่กำจัดผลกระทบของมุลลิน (Mullins Effect) ออกไปแล้ว เพื่อให้ได้ผลการทดสอบทั้ง 3 แบบ คือ การทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ และการทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน ดังนั้นเมื่อได้ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของการทดสอบทั้ง 3 แบบ แล้วจึงนำผลการทดสอบที่ได้มาประมวลผลด้วย โปรแกรม Marc Mentat 2005 r1 เพื่อพิจารณาเลือกแบบจำลองพลังงานความเครียด ที่สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยางได้แม่นยำมากที่สุด โดยแบบจำลองฮ็อกเคน สามารถที่จะทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ MODULI, $\mu = 0.293486, 7.46412$ และ EXPONENTS, $\alpha = 2.61084, 0.154376$

1.2 คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก และการหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมโพร์นี ยางมีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานเมื่อได้รับความเค้นรับภาระเป็นวงรอบ (Cycle Load) ดังนั้นการทำนายพฤติกรรมนี้จึงต้องศึกษาพฤติกรรมการคลายความเค้น ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบ คือค่า

ความเค้นกับเวลา เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมโพร์นี โดยใช้โปรแกรม Marc Mentat 2005r1 เพื่อหาค่าสเปคตรัมของการผ่อนคลายความเค้นที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการคลายความเค้นมากที่สุด ผลที่ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมโพร์นี จะได้ค่า สเปคตรัมการผ่อนคลายความเค้นอันดับ 3 ซึ่งค่าจะแสดงในตารางที่ 7

2. การยืนยันผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดสอบชิ้นทดสอบ ซึ่งจะแบ่งออกได้ดังนี้ คือ เปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงในแนวแกน การทดสอบการคลายความเค้น การทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบ และการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

2.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวกับผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีขนาดเท่ากับกับชิ้นทดสอบ โดยการทดสอบการดึงด้วยความเครียดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ค่าที่นำมาเปรียบเทียบคือ ค่าความเค้นและค่าความเครียดจากการทดสอบ ซึ่งผลการทดลองที่นำไปใช้ คือการดึงครั้งที่ 6 และจากแบบจำลอง พบว่าสามารถทำนายพฤติกรรมได้ดี แสดงดังภาพที่ 67 โดยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.023088011 ซึ่งมีค่าน้อย จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายผลการทดสอบการดึงในแนวแกนได้ดีได้ดี และแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดของอ็อกเดนนั้น สามารถทำนายพฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติก สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยางได้ดี

2.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการคลายความเค้นกับผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองกำหนดให้ดึงแบบจำลองให้มีการยืดตัวออกไป 25 เปอร์เซ็นต์ แล้วคงที่ความเครียดไว้ 600 วินาที ซึ่งค่าที่นำมาเปรียบเทียบคือค่าความเค้นกับเวลา จากผลของการเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น กับผลการทดสอบการคลายความเค้นจากภาพที่ 69 ความเค้นของแบบจำลองในช่วงแรกจะมีค่าน้อยกว่าค่าจากการทดสอบ แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.010665 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายผลการทดสอบการคลายความเค้นได้ดี

2.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบกับแบบจำลอง โดยการทดสอบการดึงด้วยความเครียดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 10 รอบ โดยจะนำผลการทดสอบการดึงที่รับภาระแบบวงรอบที่กำจัดผลของมูโนลินออกไปแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 56 นำมาเปรียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง สังเกตได้ว่าขณะดึงขึ้นและปล่อยกลับ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะไม่ซ้ำแนวเดิม จากผลของการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 72 พบว่า แบบจำลองไฟไนต์

เอลิเมนต์จะสามารถทำนายผลได้ดีในช่วงค่าความเครียดวิศวกรรมที่ 10-60 เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากความผิดพลาดของตัวโปรแกรมเองที่ไม่สามารถทำนายพฤติกรรม การรับภาระแบบวงได้ เนื่องจากในสภาวะการทำงานจริงเมื่อรับภาระแบบวงรอบจะทำให้พลังงานบางส่วนที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนสะสมในยาง ซึ่ง โปรแกรม Marc Mentat 2005r1 ไม่สามารถทำนายได้

2.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตกับแบบจำลอง โดยดึงให้มีระยะยืดที่ความเครียดคงที่ 25 เปอร์เซ็นต์ และ โหมดการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะเดียวกันกับการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ที่ความเครียดไดนามิกส์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความถี่ 50 เฮิร์ตซ์, 35 เฮิร์ตซ์ และ 20 เฮิร์ตซ์ โดยค่าที่นำมาเปรียบเทียบนั้นแสดงดังตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเริ่มต้น และค่าความเค้นไดนามิกส์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ เนื่องมาจากค่าที่ได้จากการทดสอบค่าความเครียดเริ่มต้นและค่าความเครียดไดนามิกส์ที่มีเกิดขึ้นนั้นมีค่าเบี่ยงเบน ไม่เป็นไปตามค่าที่เรากำหนดไว้ในขั้นตอนการตั้งค่าการทดสอบ ซึ่งเป็นข้อผิดพลาดที่เกิดจากการทดสอบ

3. ทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางรองแท่นเครื่อง ตามขนาดที่ได้โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล เพื่อศึกษาการเสถียรของยางรองแท่นเครื่อง และความสามารถในการดูดซับแรงสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง และศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับขนาดรูปร่างของยางรองแท่นเครื่อง เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการรับการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นเครื่อง โดยจะพิจารณาขนาดต่างๆ ดังแสดงค่าในตารางที่ 9 โดยจะแบ่งการพิจารณา 2 ส่วน คือ

3.1 พิจารณาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องตามขนาดที่ต้องการศึกษา โดยกำหนดให้มีแรงกระทำต่อแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องมีค่าตั้งแต่ 100-1,200 นิวตัน โดยแรงกระทำแบบคงที่ (Static Load) แล้ววัดระยะสุดท้ายของการเคลื่อนที่ และนำมาพิจารณาต่อด้วยการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งค่าความชันของกราฟสมการการถดถอย คือค่าความแข็งแรงจะแสดงดังภาพผนวกที่ โดยค่าความแข็งแรงของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 10 ซึ่งจากตารางค่าความแข็งแรงที่มีค่ามากที่สุดนั้นคือ แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08 ซึ่งมีขนาดความกว้าง 58 มิลลิเมตร ความยาว 73 มิลลิเมตร และมุมเอียง 90 องศา มีค่าเท่ากับ 421.87 N/mm จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08 ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด จะมีความแข็งแรงมากกว่าแบบจำลองขนาดอื่นๆ

3.2 พิจารณาเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดูดซับแรงสั่นสะเทือนของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดดังตารางที่ 9 การวิเคราะห์กำหนดให้แบบจำลองรับภาระการกดเท่ากับ 1,200 นิวตัน กระทำในแนวตั้งฉากกับแบบจำลอง โดยกำหนดให้แรงกระทำเป็นแบบไซน์ซอยดัล พิจารณาการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 3 ระดับ คือ ความถี่ 20 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์, และ 50 เฮิรตซ์ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเสียรูป และค่าการดูดซับการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองขนาดต่าง ๆ ซึ่งผลตอบสนองคือ ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่มีช่วงแคบจะดี เนื่องจากสามารถดูดซับการสั่นสะเทือนของยางรองแท่นได้ดี ซึ่งการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการดูดซับแรงสั่นสะเทือน จะวิเคราะห์ด้วยการตรวจสอบด้วยกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัย (Normal Probability Plots of The Effects) ของแต่ละปัจจัย และวิเคราะห์ด้วยกราฟผลกระทบหลักและอันตรกิริยา เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลจากปัจจัยร่วม ที่มีต่อผลตอบสนองของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีปัจจัยควบคุมที่ทำการศึกษาคือ 3 ปัจจัยดังนี้

ความกว้าง (A) คือ ความกว้างของเนื้อยางของยางรองแท่นเครื่อง หน่วย มิลลิเมตร
 ความยาว (B) คือ ความยาวของเนื้อยางของยางรองแท่นเครื่อง หน่วย มิลลิเมตร
 มุมเอียง (C) คือ มุมองศาเอียงของเนื้อยางกับฐานของยางรองแท่นเครื่อง หน่วย องศา

จากกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบจากปัจจัย จะพบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก C คือ องศาเอียง และผลกระทบของอันตรกิริยา AC คือ อันตรกิริยาระหว่างความกว้างและองศาเอียง มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองของการทดลอง คือ ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง ซึ่งผลจากการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 3 ระดับ คือ ความถี่ 20 เฮิรตซ์, 35 เฮิรตซ์, และ 50 เฮิรตซ์ จะมีผลไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 3 ความถี่ และจากกราฟผลกระทบของอันตรกิริยา สามารถสรุปได้ว่าการกำหนดค่าที่ความกว้างอยู่ที่ระดับสูง A เท่ากับ 58 มิลลิเมตร และองศาเอียงอยู่ที่ระดับสูง C เท่ากับ 90 องศา จะทำให้ช่วงการเคลื่อนที่ของแบบจำลองน้อยที่สุด คือยางรองแท่นเครื่องจะสามารถดูดซับการสั่นสะเทือนได้มาก

ดังนั้นจากการวิเคราะห์จึงเลือกแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องที่มีความกว้าง A ที่ระดับสูง เท่ากับ 58 มิลลิเมตร องศาเอียงอยู่ที่ระดับสูง C เท่ากับ 90 องศา และความยาว B ที่ระดับสูง เท่ากับ 73 มิลลิเมตร ทำให้ช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ของแบบจำลองมีค่า 0.38 มิลลิเมตร ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับแรงสั่นสะเทือนได้มากที่สุด และมีค่าความแข็งแรง เท่ากับ 421.87 N/mm

ข้อเสนอแนะ

1. กระบวนการผลิตชิ้นทดสอบวัสดุอย่างขั้นตอนการอบคงรูปขงนั้น แม่พิมพ์ในการอบคงรูปนั้นจะมีลักษณะของความหนาของชิ้นงานไม่เท่ากันทั้งแผ่น ถ้าหากวัสดุมีความหนาเท่ากันทั้งแผ่นอาจจะสามารถเปรียบเทียบขนาดชิ้นทดสอบจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

2. แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้ดีเฉพาะวัสดุที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้เท่านั้น ถ้ามีการเปลี่ยนส่วนผสมหรือวัสดุขงใหม่ ต้องทำการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่เหมาะสม ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุขงได้แม่นยำมากที่สุด

3. การวิจัยครั้งต่อไปอาจศึกษาวัสดุขงที่ต่างชนิดกัน หรือมีส่วนผสมของเนื้อขงที่ต่างกัน และควรพิจารณารูปร่างขงแทนเครื่องที่มีหลายรูปแบบ

4. การทดสอบการดึงเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุขง โดยการหาความสัมพันธ์ของความเค้นวิศวกรรมกับความเครียดวิศวกรรมของการดึงเท่ากันทั้งสองแนวแกน และการดึงแบบความกว้างคงที่ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีอัตราส่วนปัวส์ซงขงซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงควรใช้ผลการทดสอบจริงในกรณีที่มีเครื่องมือในการทดสอบ

5. ในการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรทำการเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากเครื่องทดสอบการสั้นสะเทือนที่สามารถใช้ทดสอบกับขงแบบขงแทนเครื่องได้โดยตรง ในกรณีที่มีเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กนัศัร ชำนิประศาสน์. 2545. การสั่นทางกล. เพียร์สัน เอ็ดดูเคชัน อินโดไชน่า, กรุงเทพฯ.
แปลจาก S.R. Singiresu. 2002. **Mechanical vibrations**. Pearson Education Indochaina.
- จารุธรรม สังขปาน. 2550. การวิเคราะห์สมบัติวิโคไฮเปอร์อีลาสติกของยางคงรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เดช พุทธเจริญทอง. 2541. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ธนู นุชฉาย. 2541. การสั่นสะเทือนเชิงกล. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- ปารเมศ ชุติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2550. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ชาคริต สิริสิงห. 2550. ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). บริษัท ซีเอ็ดดูเคชัน จำกัด, กรุงเทพฯ.
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2530. กระบวนการผลิตยาง: กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง. ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- _____. 2541. เทคโนโลยียาง. ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- _____. 2542. การออกแบบสูตรยาง และกระบวนการผลิต. ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

- Anthony, E.S. 2005. **Total Automotive Technology**. 4th ed. Thomson Delmor Learning, America.
- Bergstrom, J.S. and M.C. Boyce. 1998. Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomer. **Journal of the Mechanical and Physics of Solid** (46): 931-954.
- Christopherson, J. and G. Nakhaie Jazar. 2006. Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 2: Finite element analysis. **Journal of Sound and Vibration** (290): 1071-1090.
- Chong-Won, L., L. Yong-Wook and C. Byung-Ryul. 2000. Performance Test of Active Engine Mount System in Passenger Car. **Seventh International Congress on Sound and Vibration**.
- Experimental Elastomer Analysis**. 2007. MSC.Software Corporation, n.p.
- Ferry, J.D. 1980. **Viscoelastic Properties of Polymers**. 3rd ed. John Wiley & Sons, London.
- Gent, N.A. 2001. **Engineering with Rubber How to Design Rubber Components**. 2nd ed. Hanser, Munich.
- Imbimbo, M. and A. De Luca. 1998. F.E. Stress Analysis of Rubber Bearing under Axial Loads. **Computers and Structure** (68): 31-39.
- Japanese Standards Association. 2001. **Testing methods for rubber vibration isolators**. JIS: K 6385, n.p.
- Johson, A.R. 1997. Large Strain Viscoelastic Constitutive Models for Rubber. **Part I: Formulations** (67): 904-917.

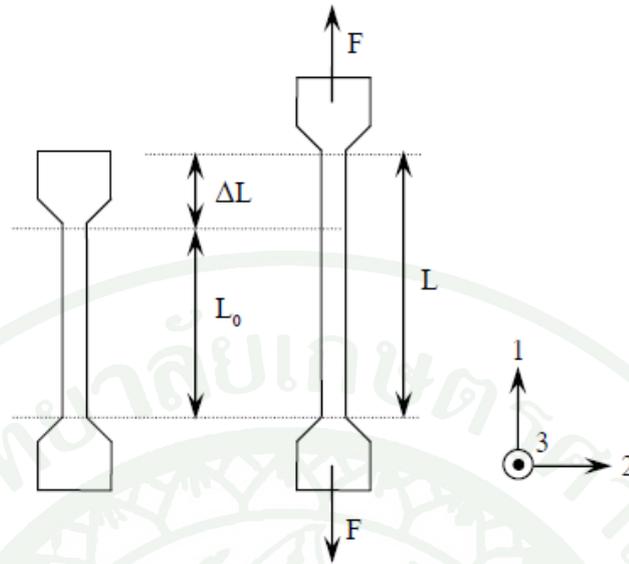
- Kim, J.J. and H.Y. Kim. 1997. Shape Design of an Engine Mount by a Method of Parameter Optimization. **Computers and Structures** (65): 725-731.
- Kim, W.D., H.J. Lee, J.Y. Kim and S.K. Koh. 2004. Fatigue life estimation of an engine rubber mount. **International Journal of Fatigue** 26: 553-560.
- Marc 2007 r1 User's Guide**. 2007. MSC.Software Corporation, n.p.
- McCrum, N.G. and C.P. Buckley. 1988. **Principles of Polymer Engineering**. Oxford University Press, Oxford.
- Montgomery, D.C. 2001. **Design and Analysis of Experiment**. 5th ed. John Wiley and Sons (Asia) Pte, New York.
- Ronald, J. 1994. Dynamics Properties of Rubber. **Rubber World** Vol.2 : 43-45.
- Su, H. 2006. **Vibration Test Specification for Automotive Products Based on Measured Vehicle Load Data**. SEA World Congress, n.p.
- Turner, D.M. and M. Brennan. 1990. **The Multiaxial Behaviour of Rubber, Plastics and Rubber Processing and Applications** 14: 183 -188.
- Vahdati, N. and L.K.L. Saunders. 2002. High frequency testing of rubber mounts. **ISA Transaction** 41: 145-154.
- Yu, Y., N.G. Naganathan and R.V. Dukkupati. 2001. A literature review of automotive vehicle engine mounting systems. **Mechanism and Machine Theory** 36:123 – 142.





ภาคผนวก ก

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะยืดจากการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว



ภาพผนวกที่ ก1 ลักษณะการทดสอบการดึงของชิ้นทดสอบยาง

จากภาพที่ 1 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และอัตราส่วนการยืดตัว (Stretch Ratio) ได้ดังสมการ

ความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

ความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

อัตราส่วนการยืดตัว (Stretch Ratio)

$$\lambda_1 = \frac{L}{L_0} = \frac{(L_0 + \Delta L)}{L_0} = (1 + \varepsilon)$$

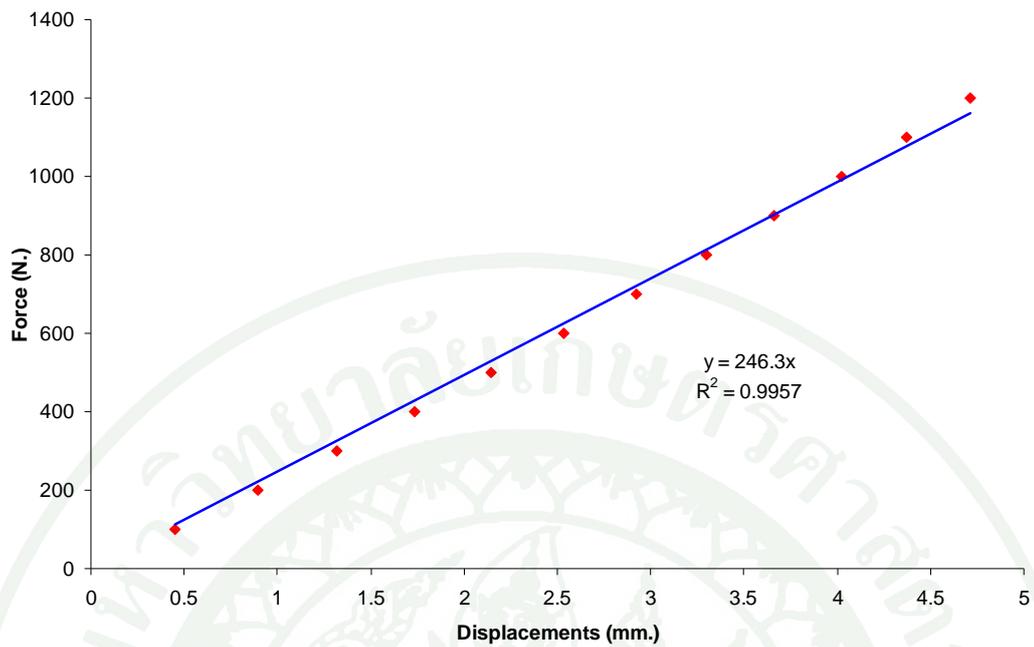
$$\lambda_2 = \lambda_3 = \sqrt{A/A_0}$$

- เมื่อ F คือ แรงดึง
 A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะที่ไม่มีความกระทำ
 ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป
 L คือ ความยาวขณะที่ได้รับแรงดึง
 L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ ขณะที่ไม่มีความกระทำ
 $\lambda_{1,2,3}$ คือ อัตราส่วนการยืดตัวในแนวแกนใด ๆ

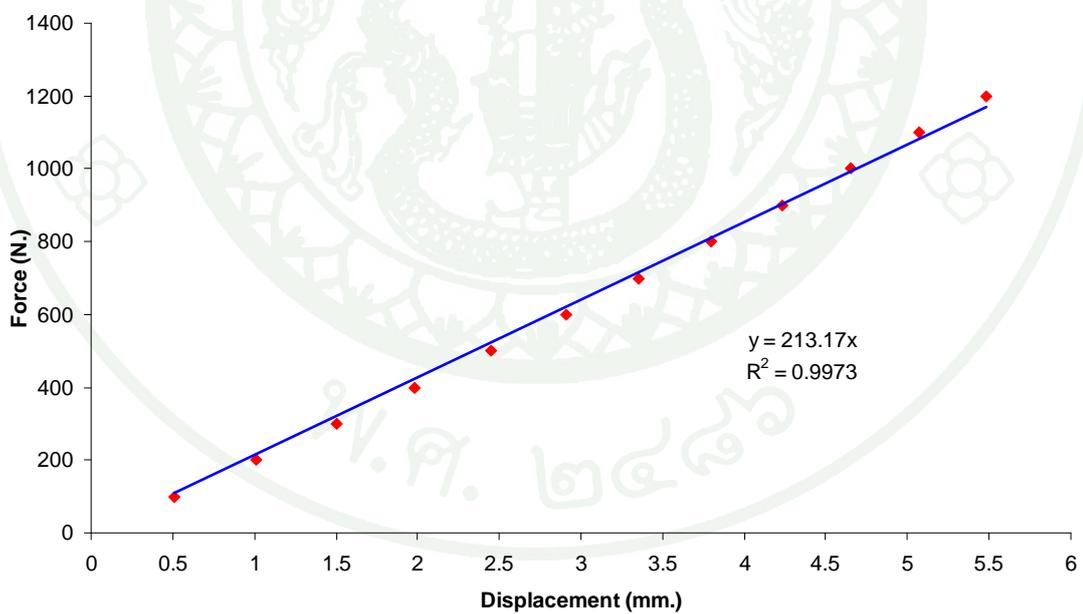


ภาคผนวก ข

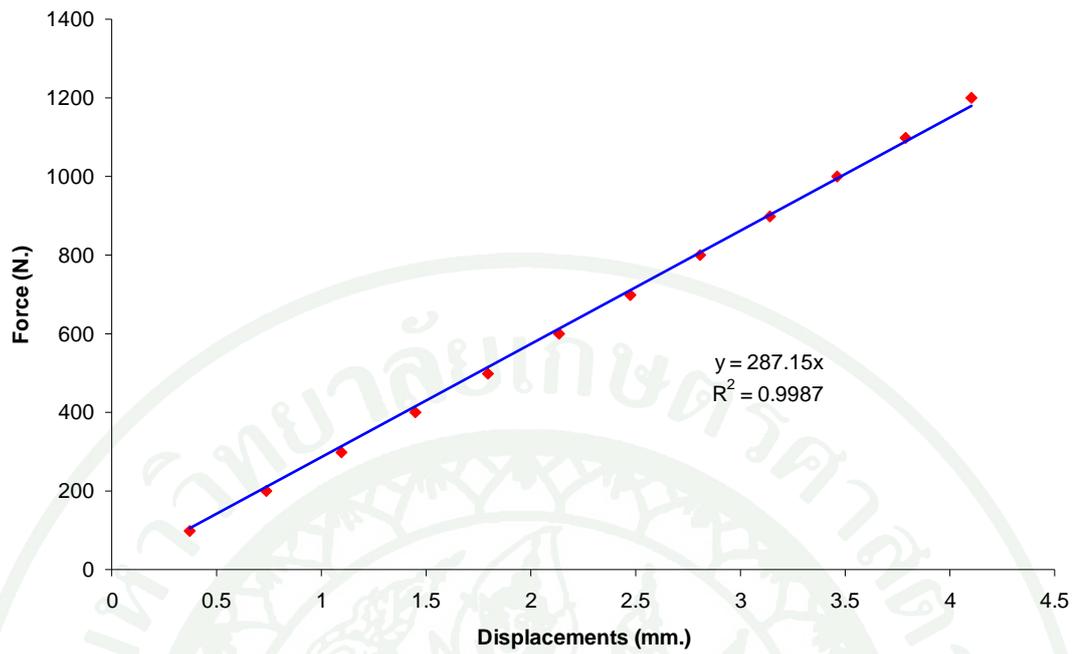
ภาพแสดงข้อมูลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่อง



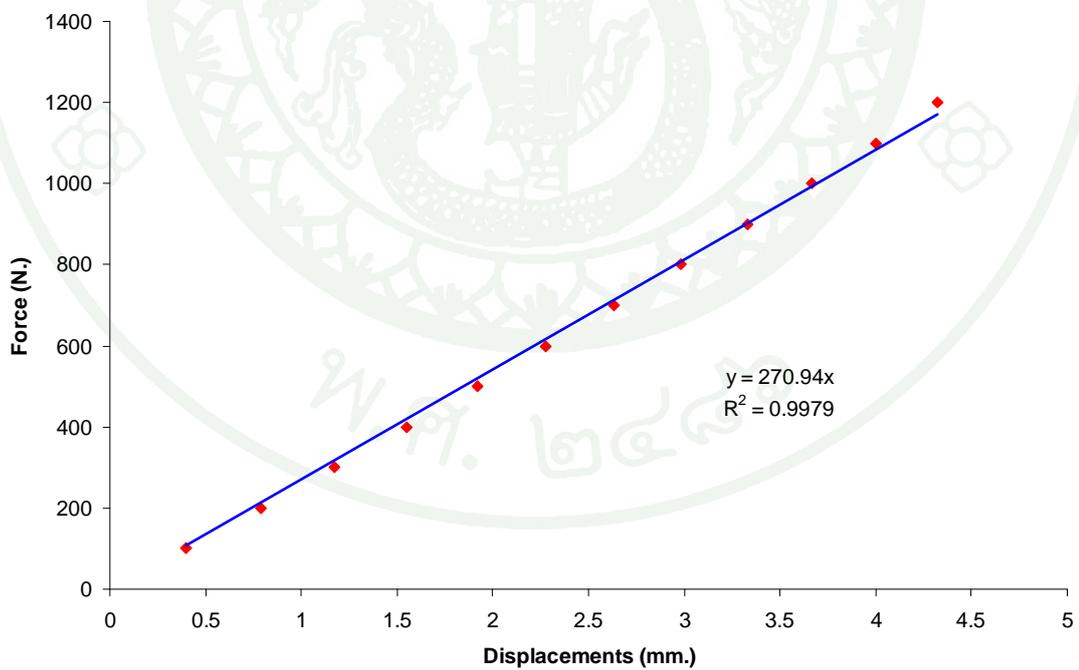
ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00



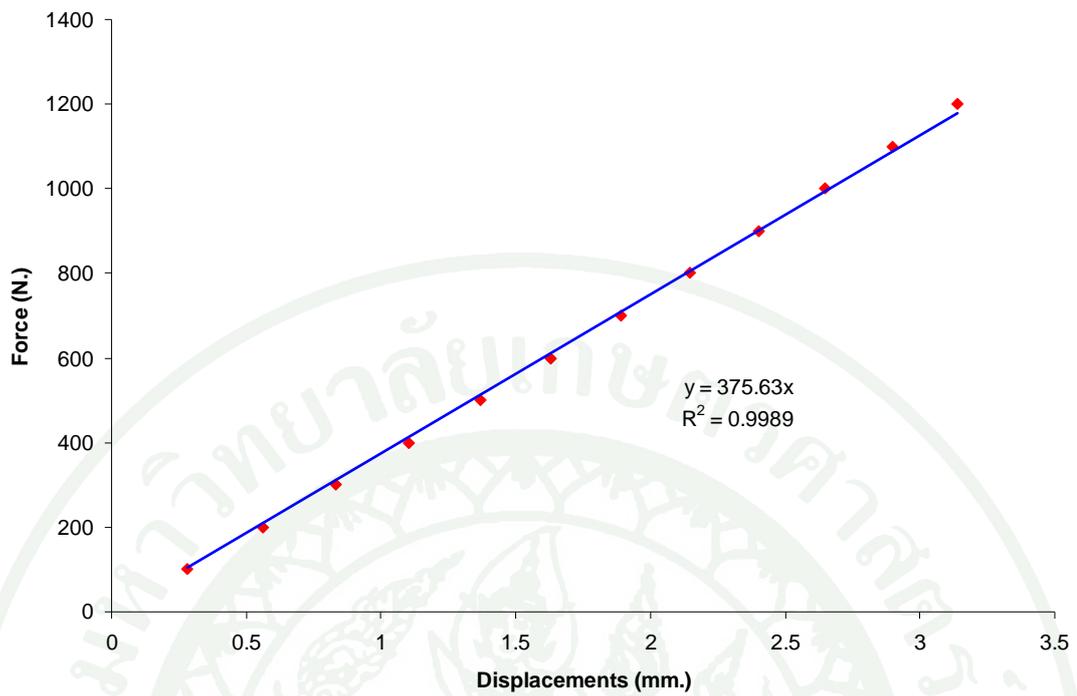
ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01



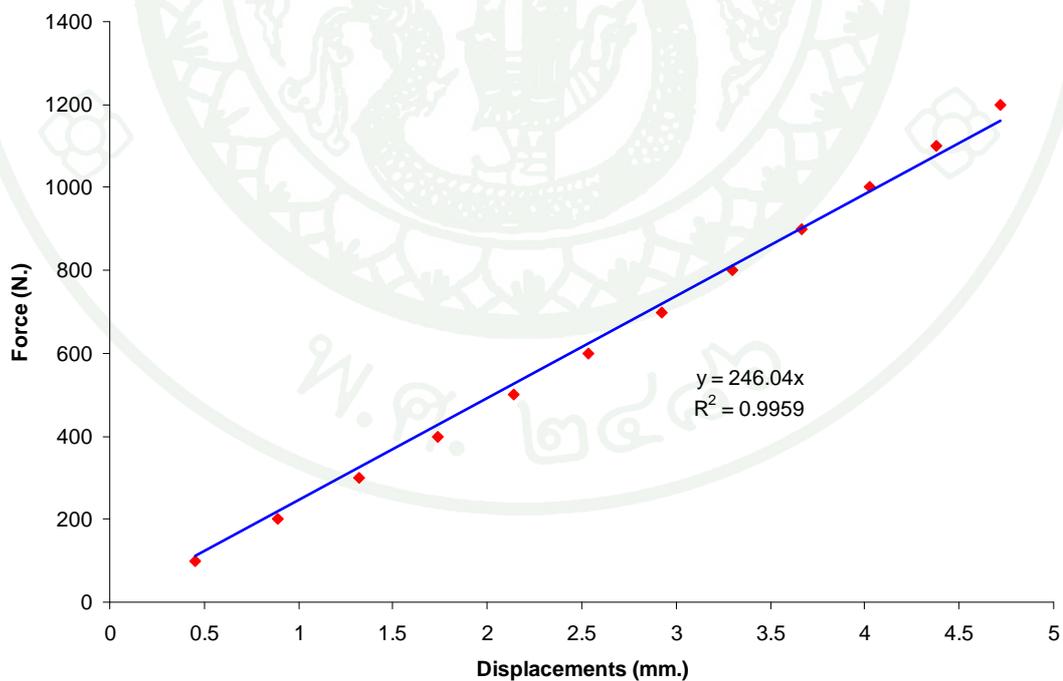
ภาพผนวกที่ ๓ กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02



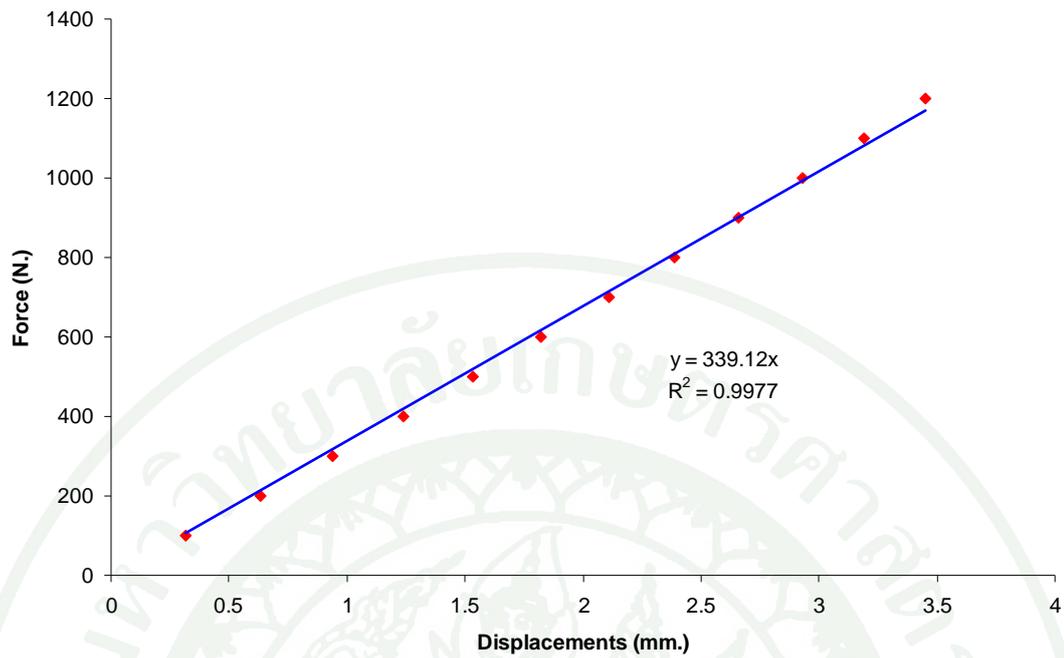
ภาพผนวกที่ ๔ กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03



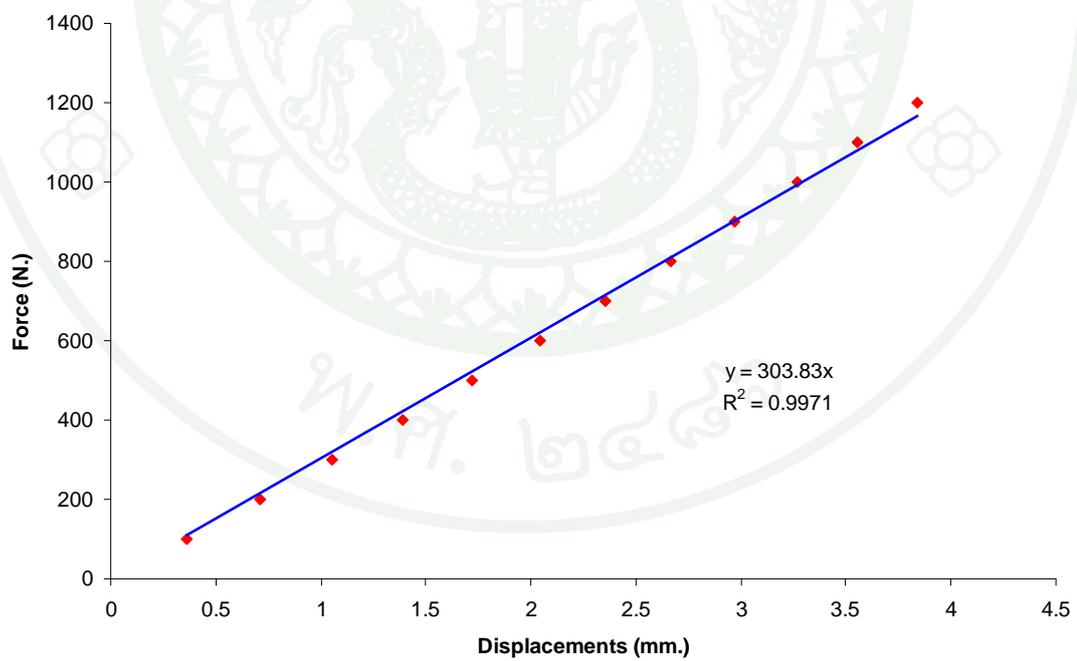
ภาพผนวกที่ ข5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04



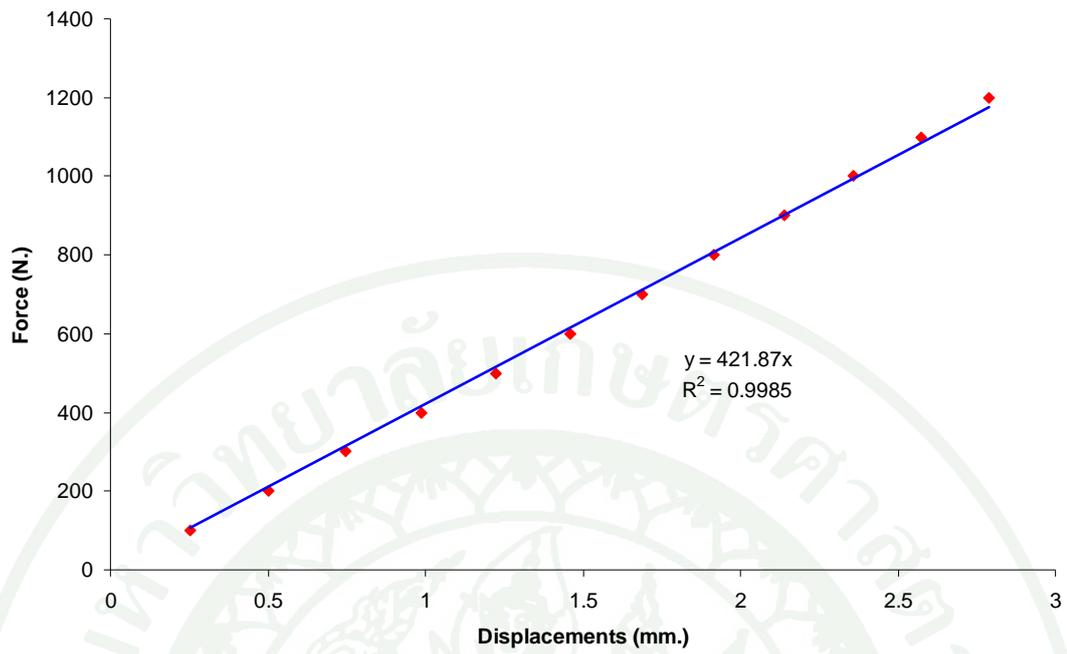
ภาพผนวกที่ ข6 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05



ภาพผนวกที่ ข7 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06

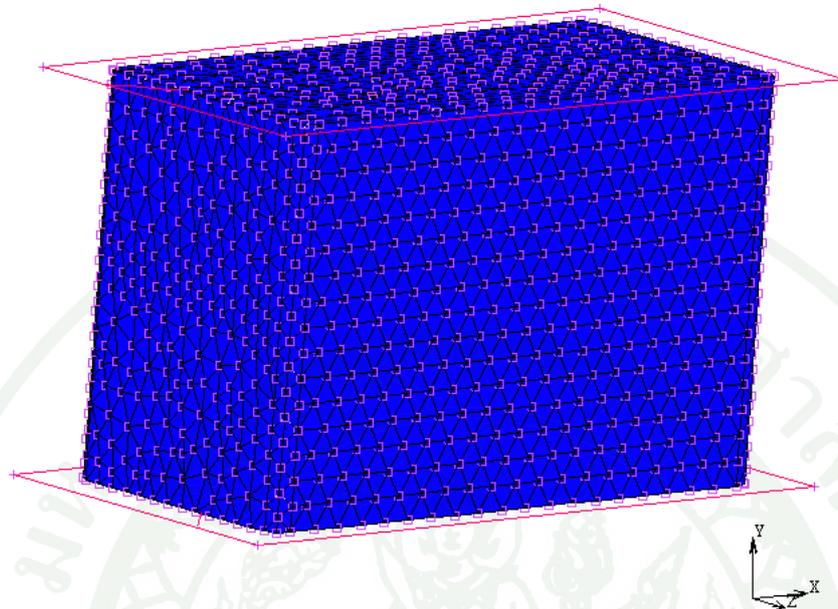


ภาพผนวกที่ ข8 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07

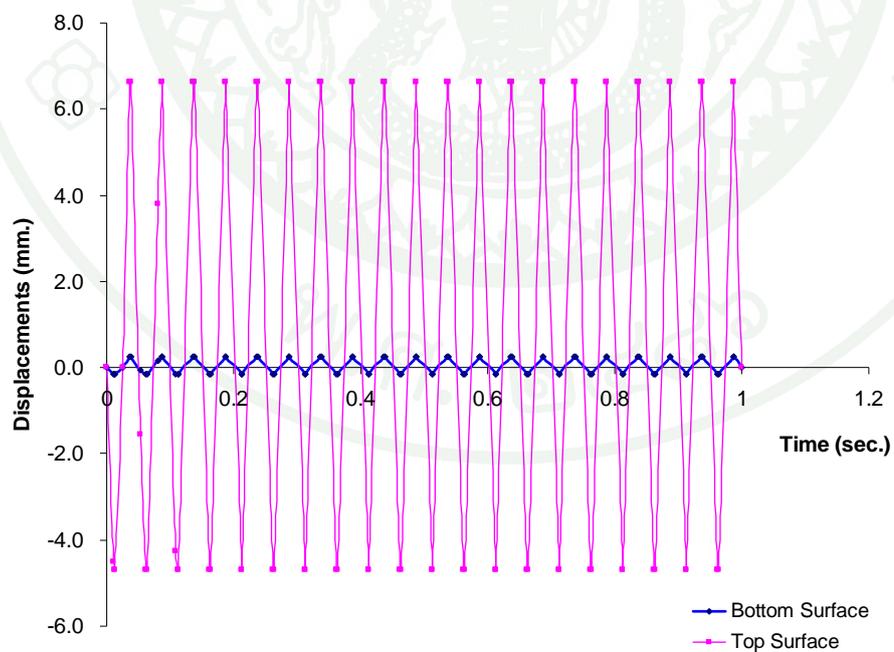


ภาพผนวกที่ ข9 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08

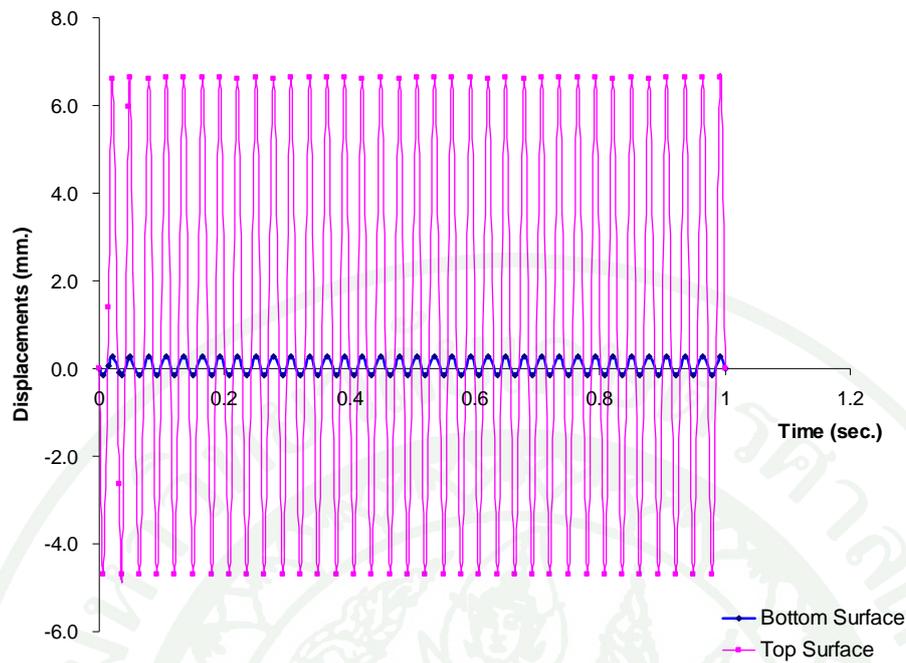




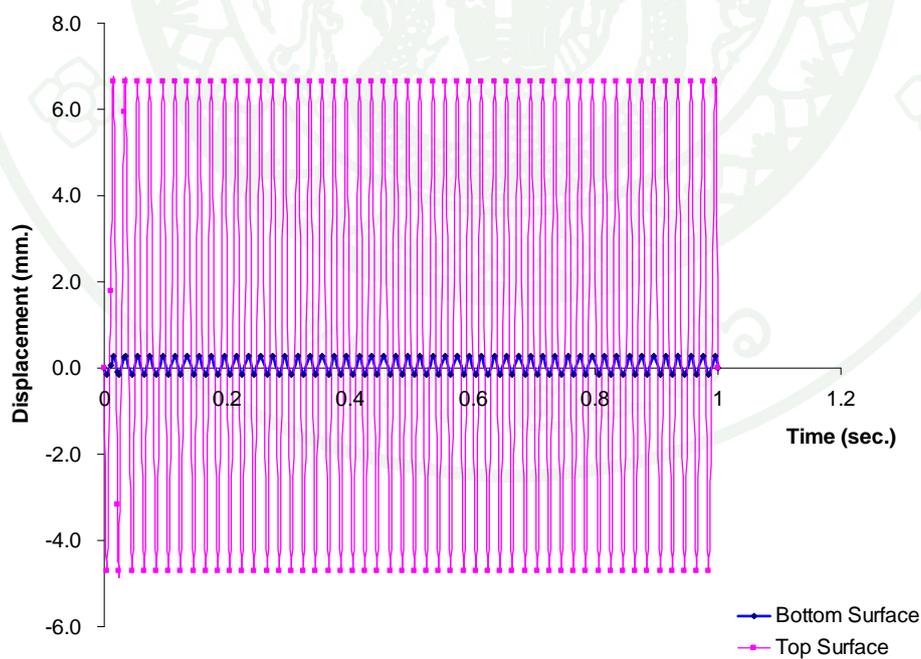
ภาพผนวกที่ ค1 แบบจำลองขางรอนแทนเครื่องขนาด M00



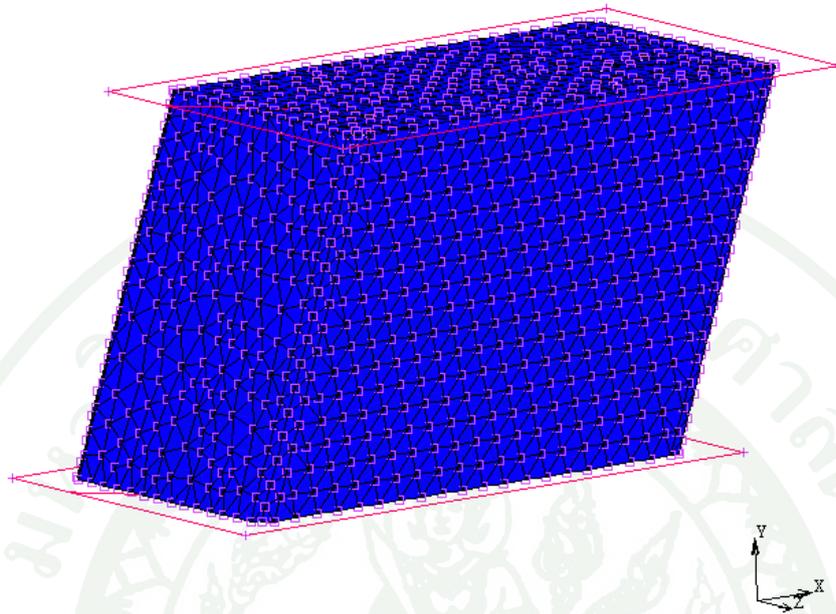
ภาพผนวกที่ ค2 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองขางรอนแทนเครื่องขนาด M00 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



ภาพผนวกที่ ค3 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์

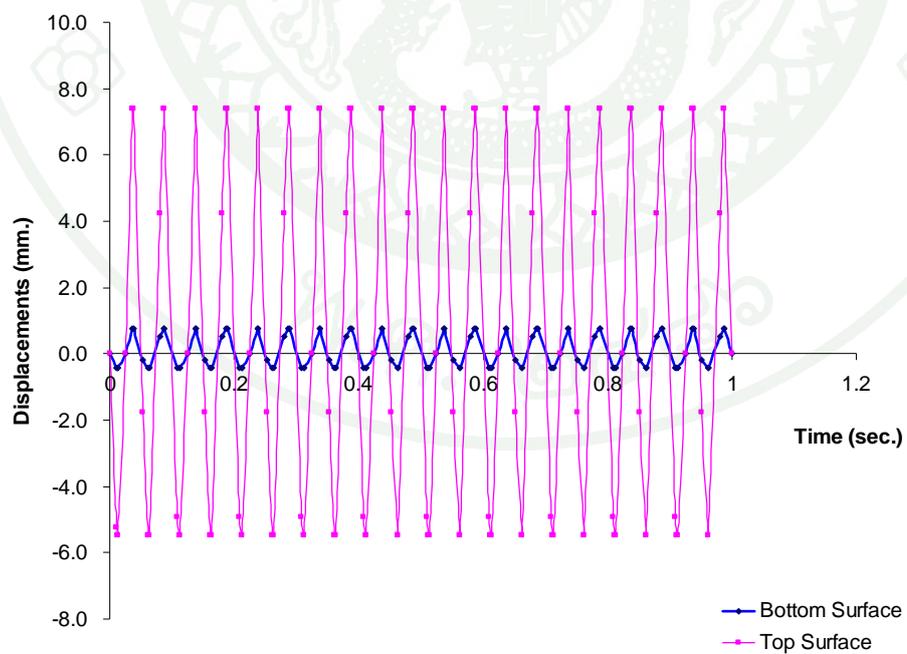


ภาพผนวกที่ ค4 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M00 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์

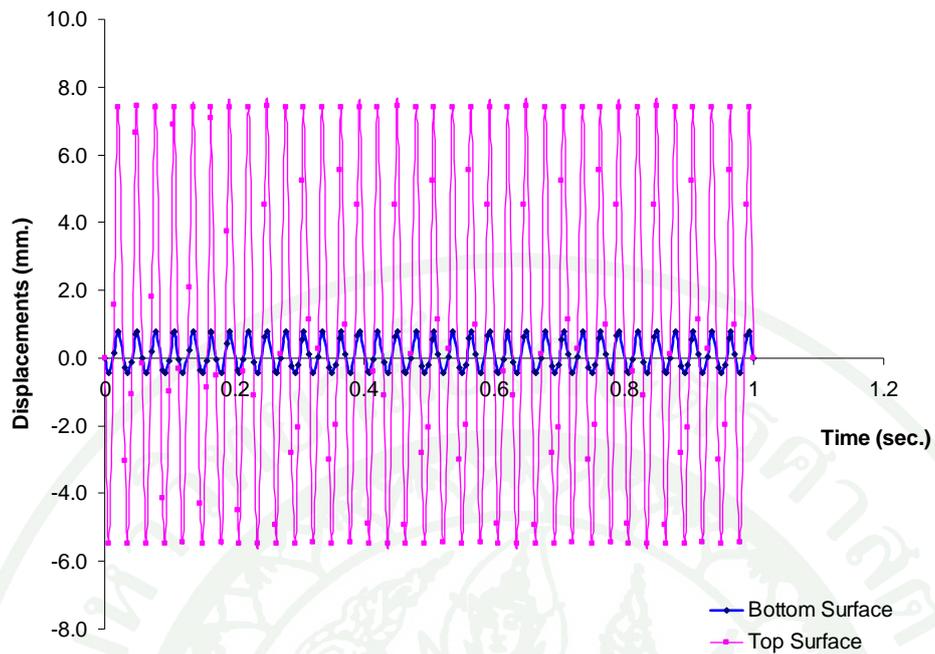


1

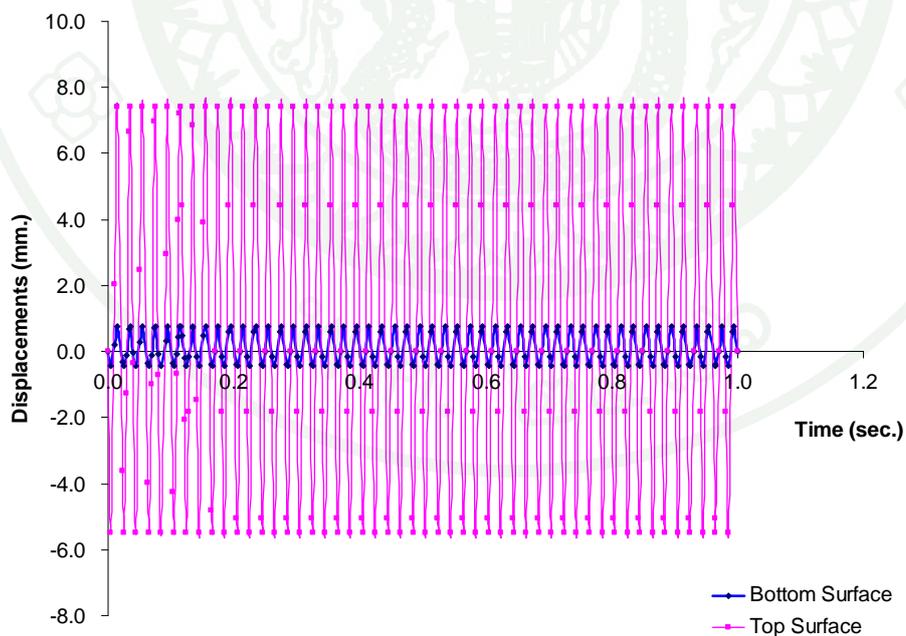
ภาพผนวกที่ ค5 แบบจำลองขางรอนแทนเครื่องขนาด M01



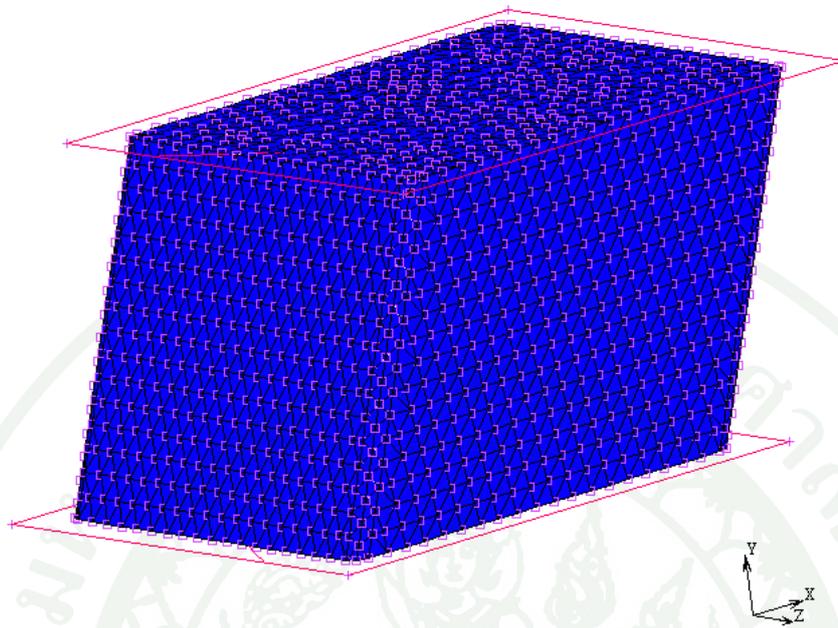
ภาพผนวกที่ ค6 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองขางรอนแทนเครื่องขนาด M01 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



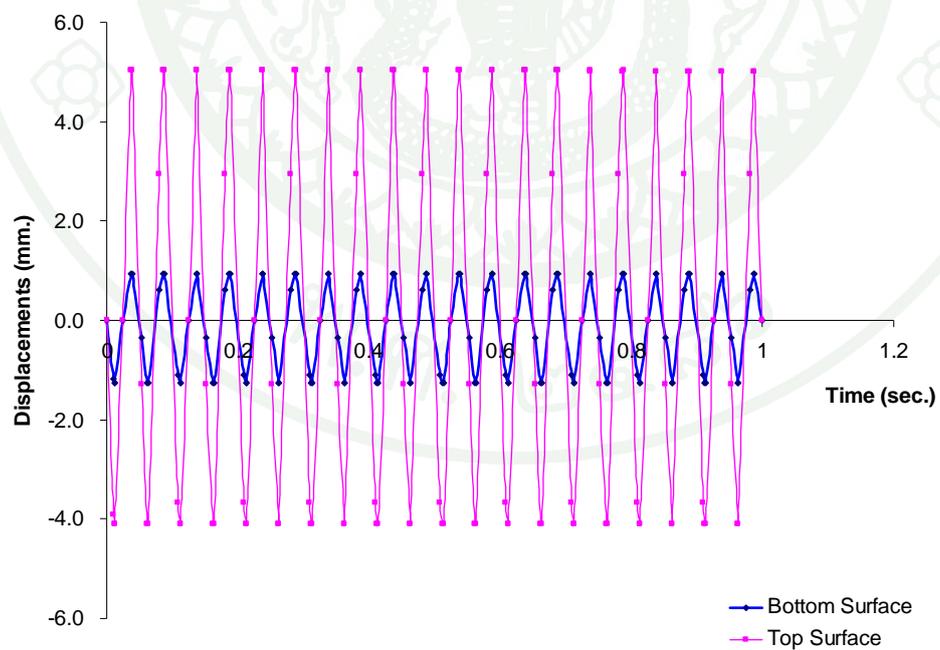
ภาพผนวกที่ ค7 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิร์ตซ์



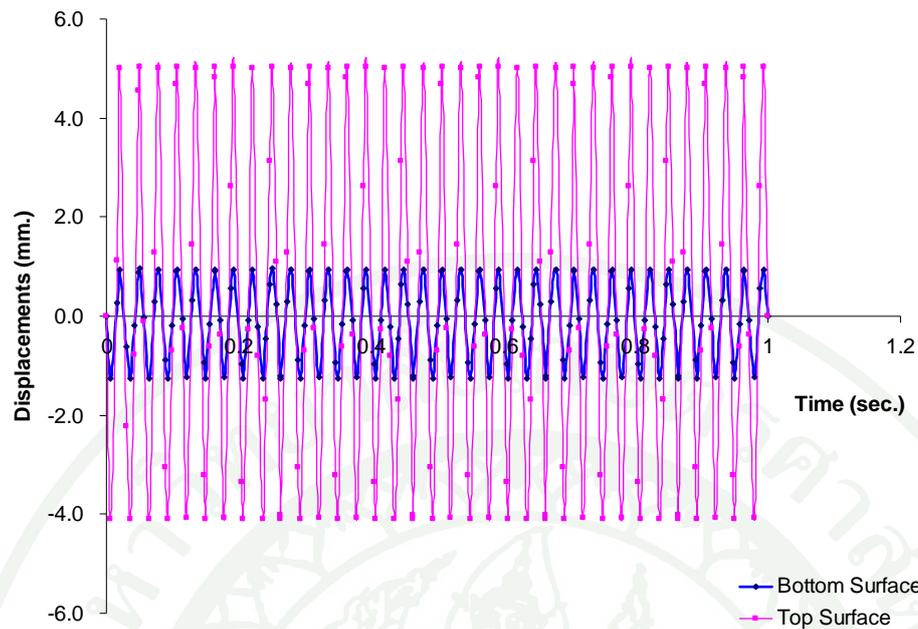
ภาพผนวกที่ ค8 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M01 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิร์ตซ์



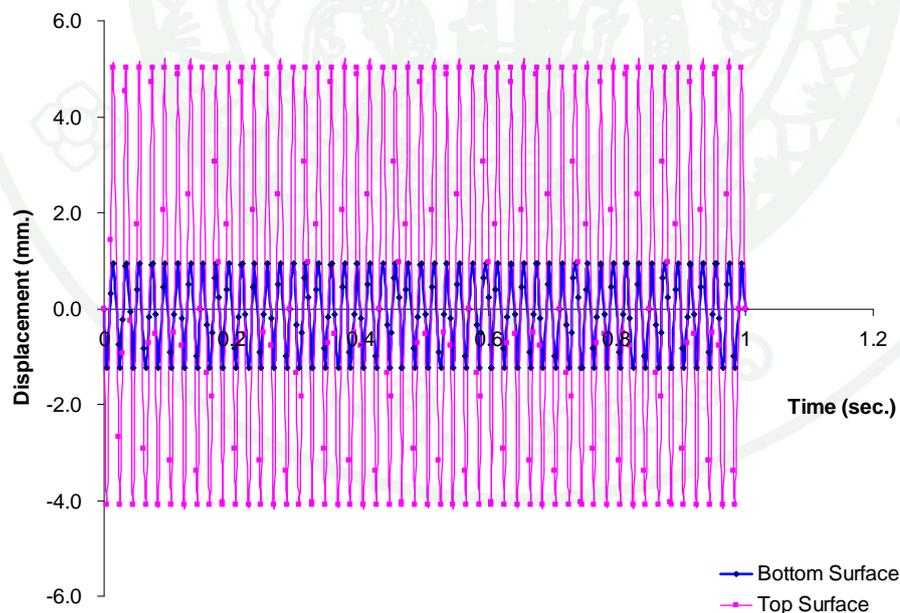
ภาพผนวกที่ ค9 แบบจำลองขางรอนแทนเครื่องขนาด M02



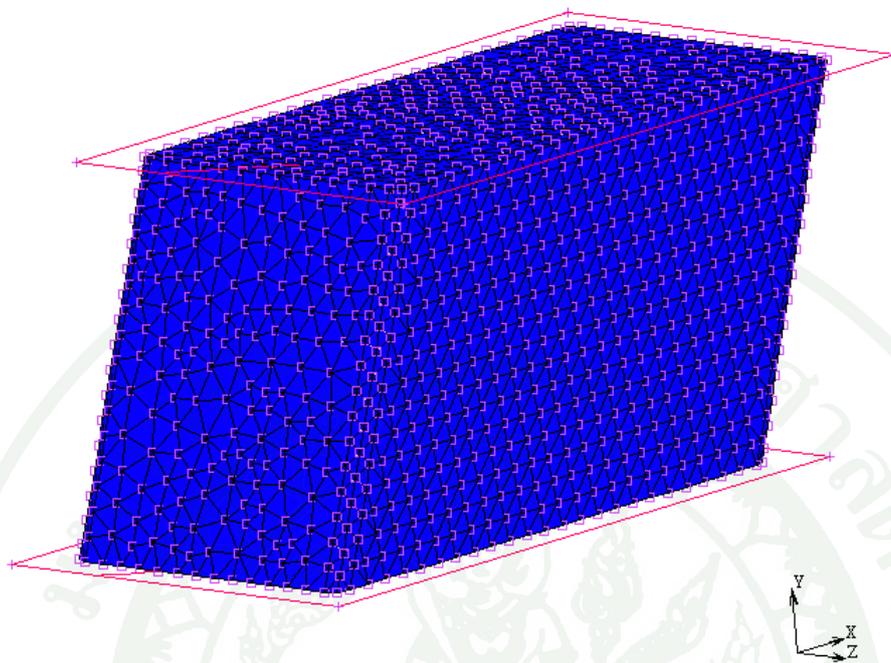
ภาพผนวกที่ ค10 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองขางรอนแทนเครื่องขนาด M02 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิร์ตซ์



ภาพผนวกที่ ค11 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์

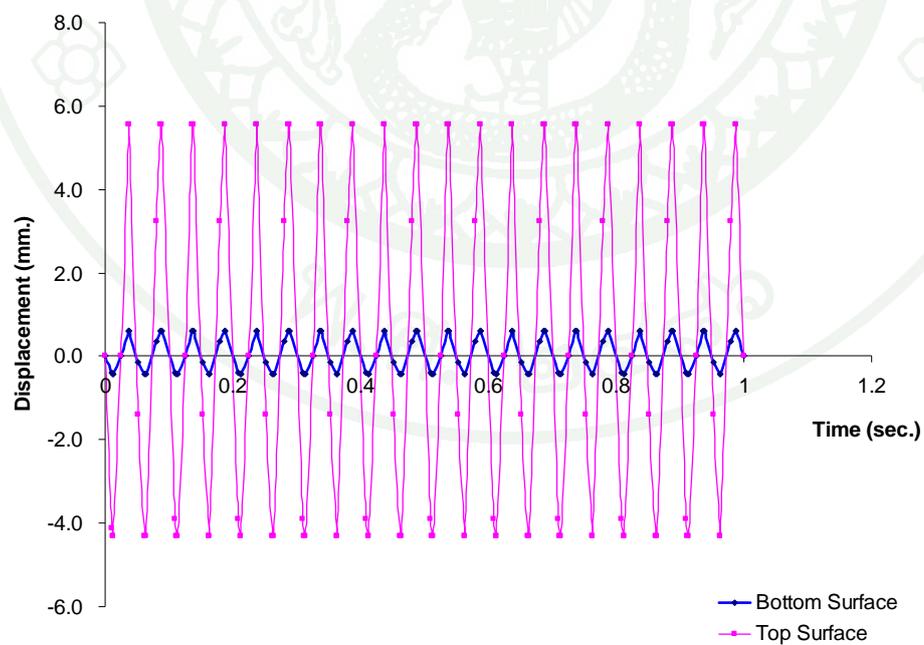


ภาพผนวกที่ ค12 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M02 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์

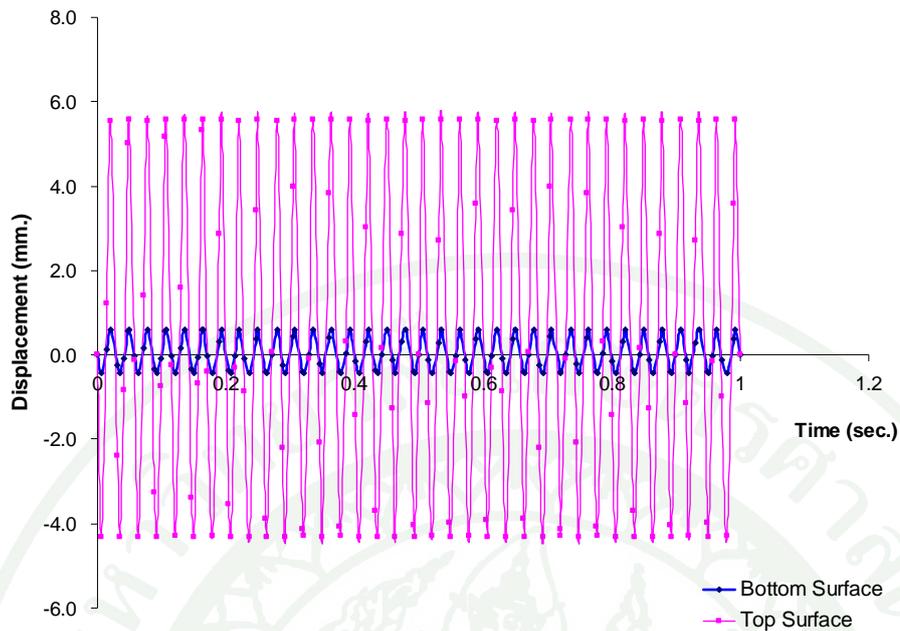


1

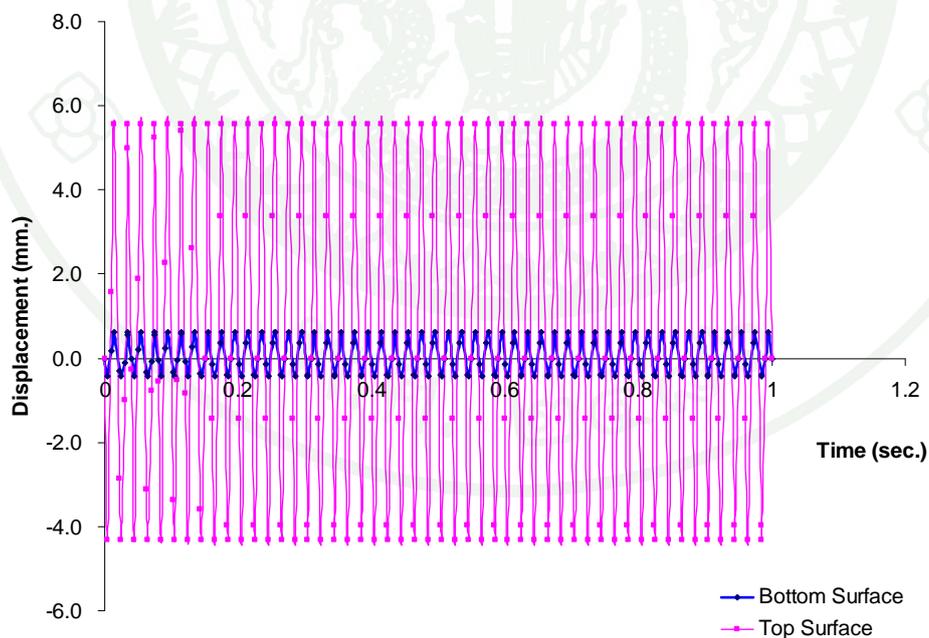
ภาพผนวกที่ ค13 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03



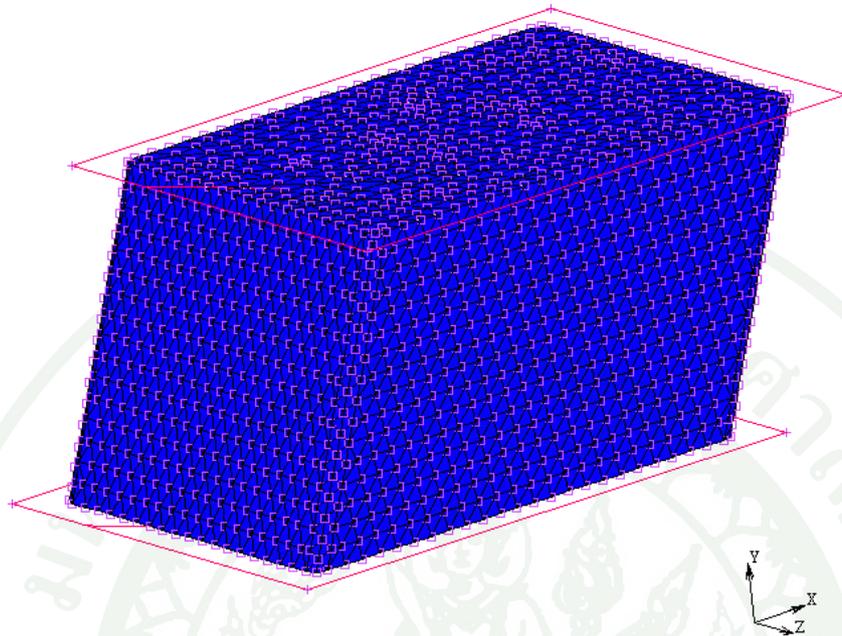
ภาพผนวกที่ ค14 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



ภาพผนวกที่ ค15 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิร์ตซ์

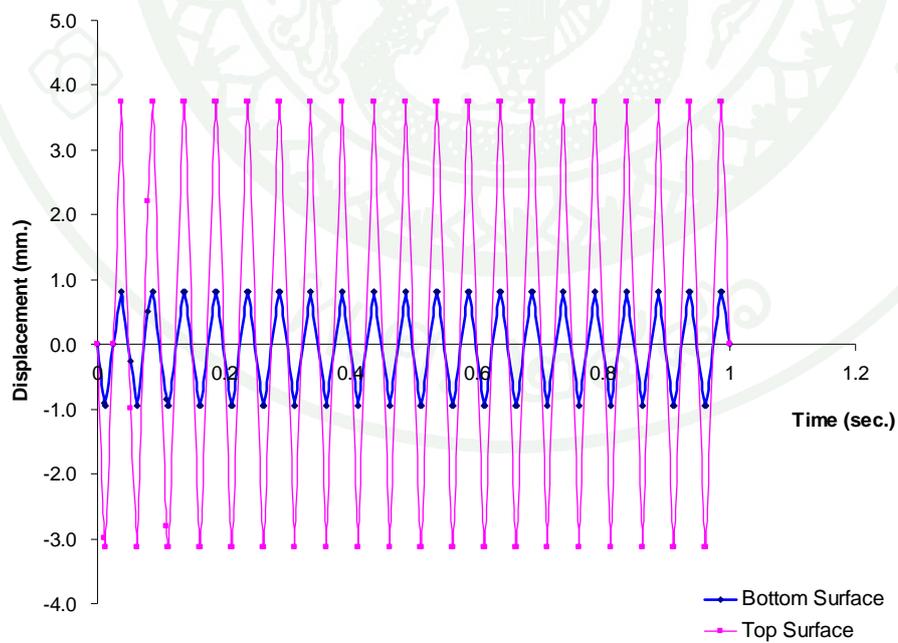


ภาพผนวกที่ ค16 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M03 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิร์ตซ์

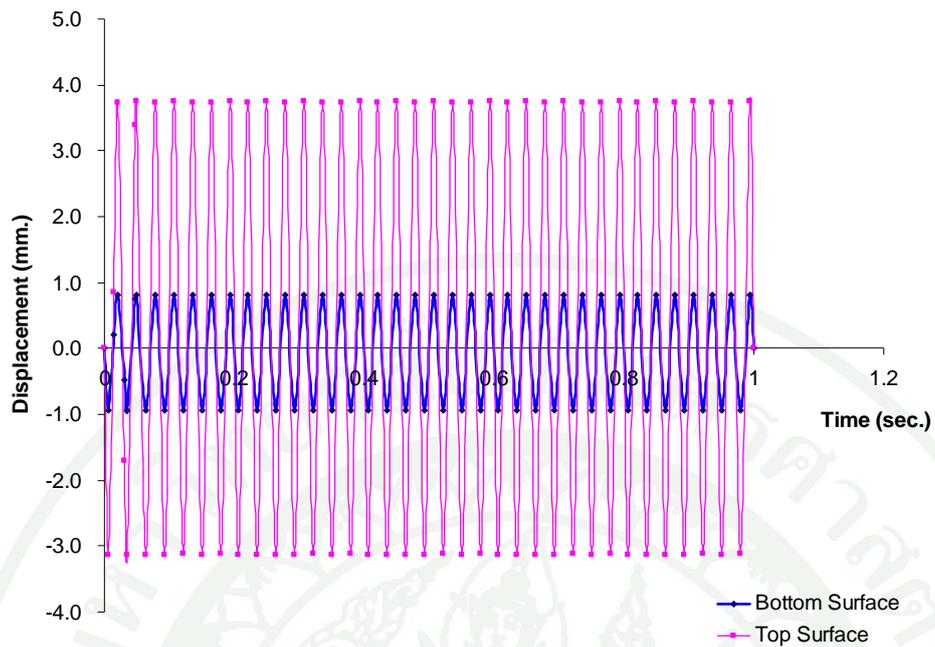


1

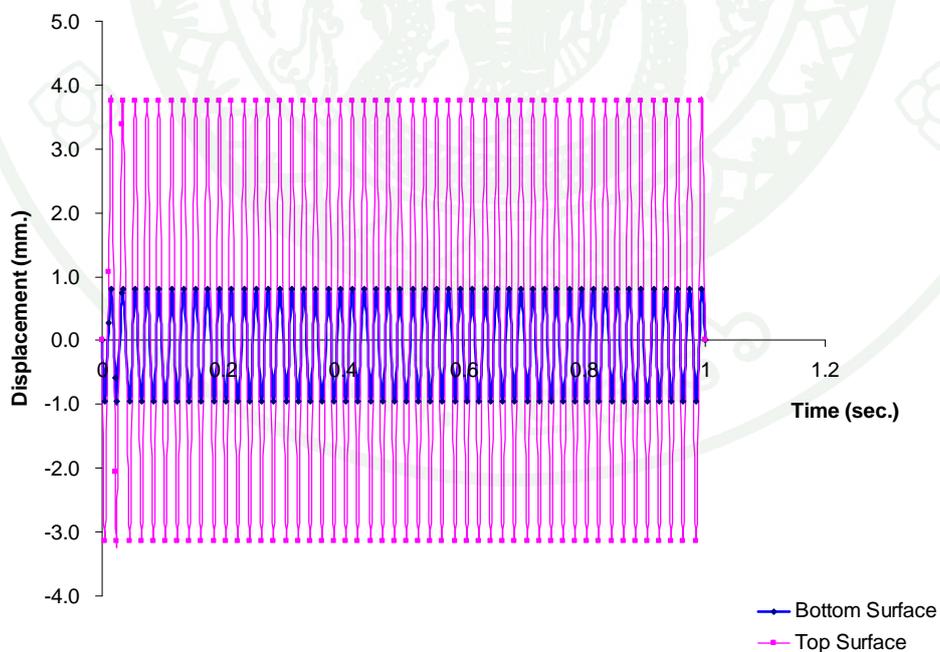
ภาพผนวกที่ ค17 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04



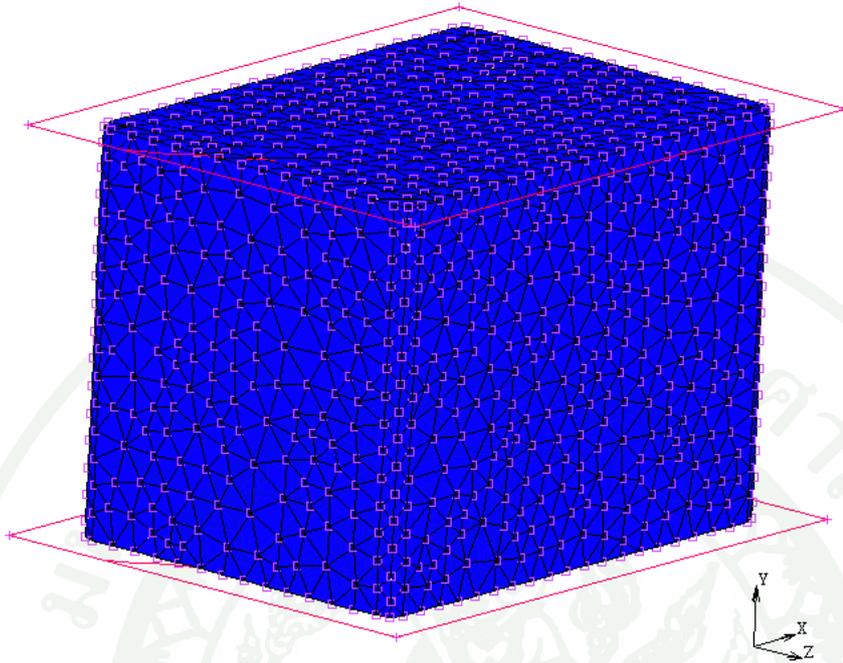
ภาพผนวกที่ ค18 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



ภาพผนวกที่ ค19 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์



ภาพผนวกที่ ค20 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M04 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์

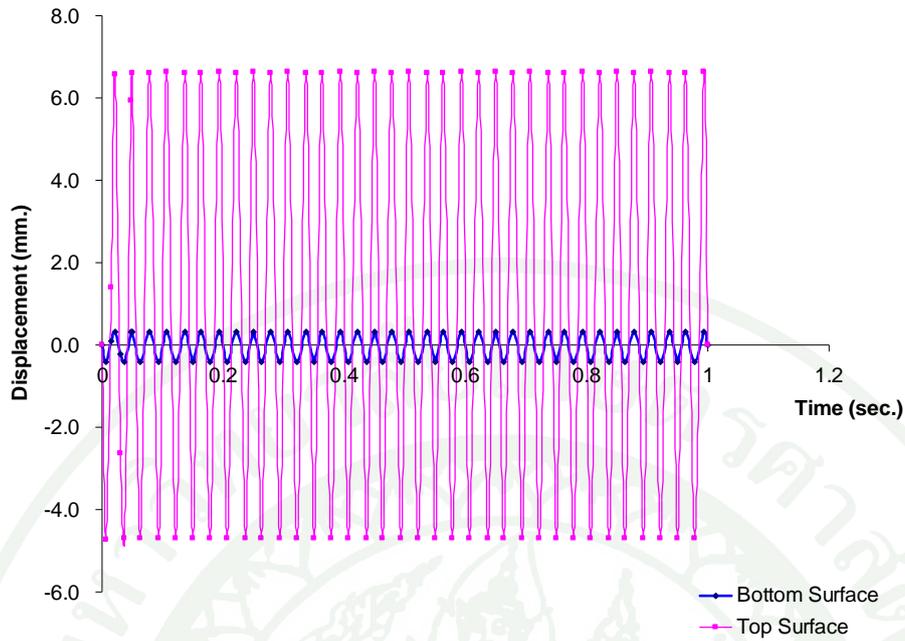


1

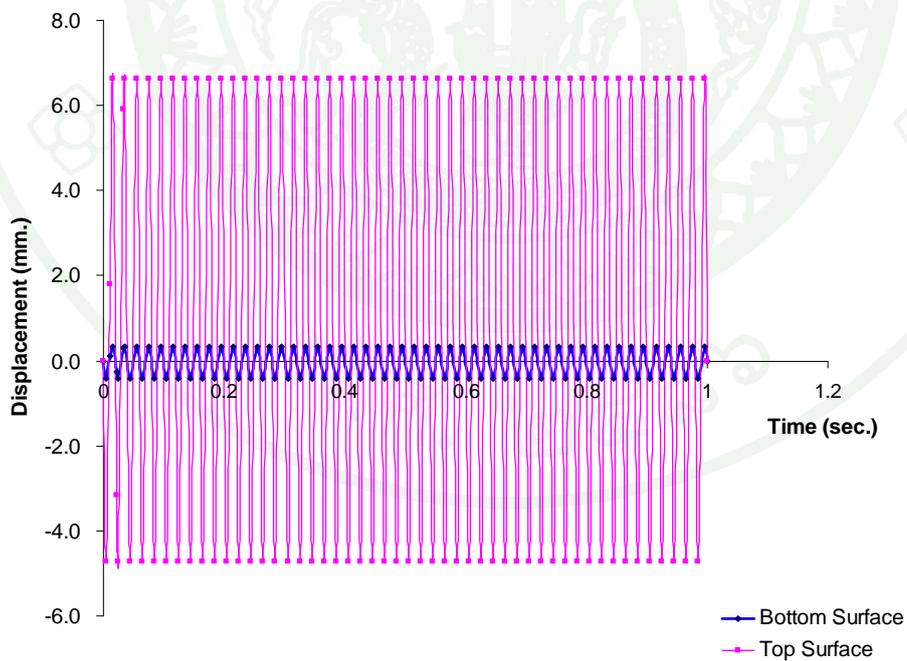
ภาพผนวกที่ ค21 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05



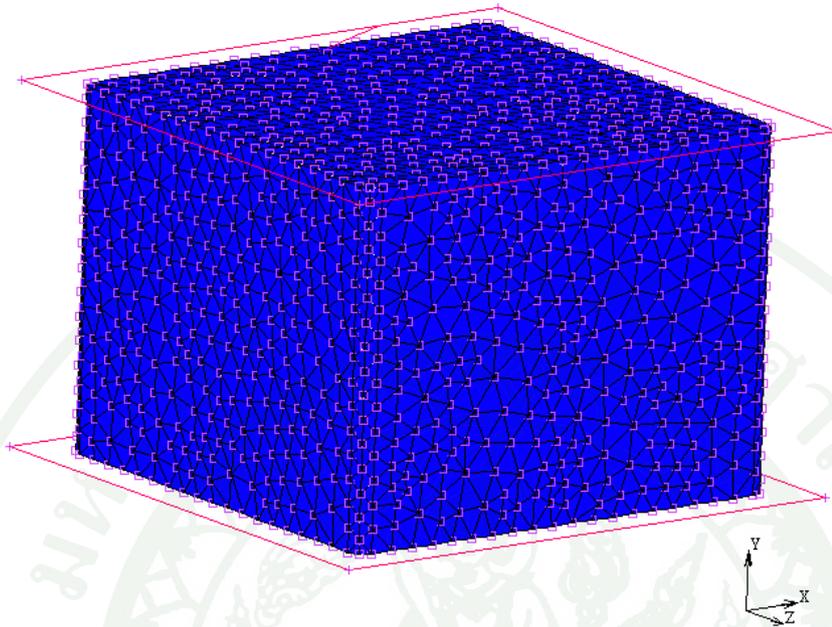
ภาพผนวกที่ ค22 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



ภาพผนวกที่ ค23 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์

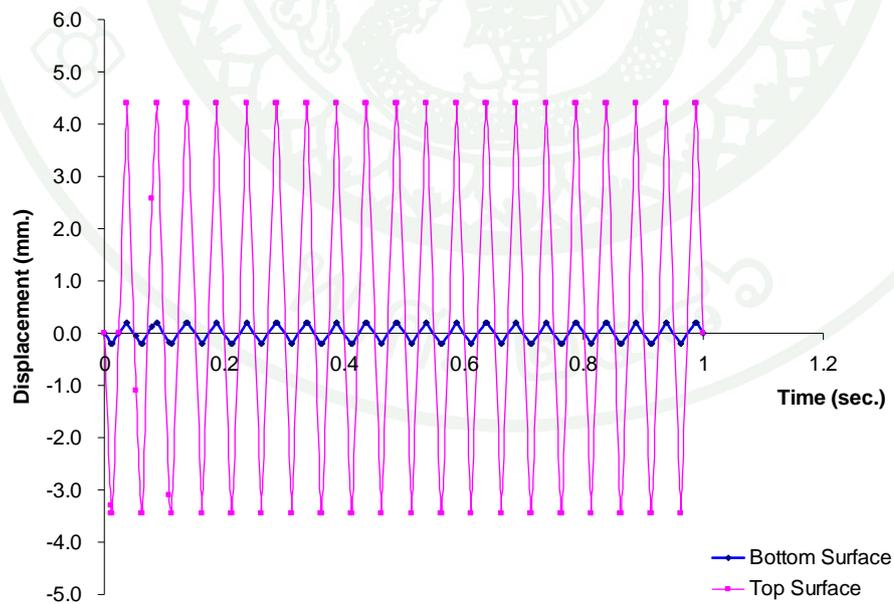


ภาพผนวกที่ ค24 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M05 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์

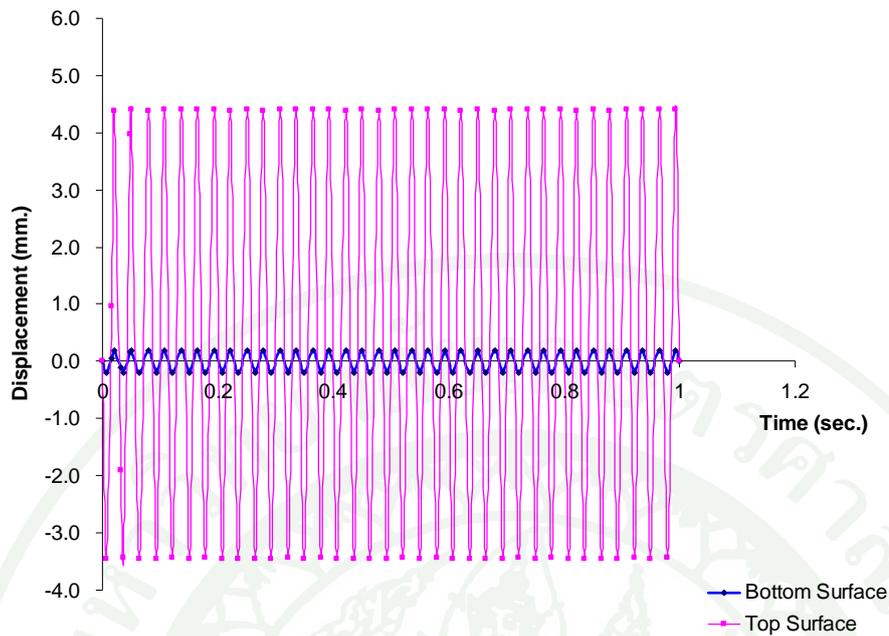


1

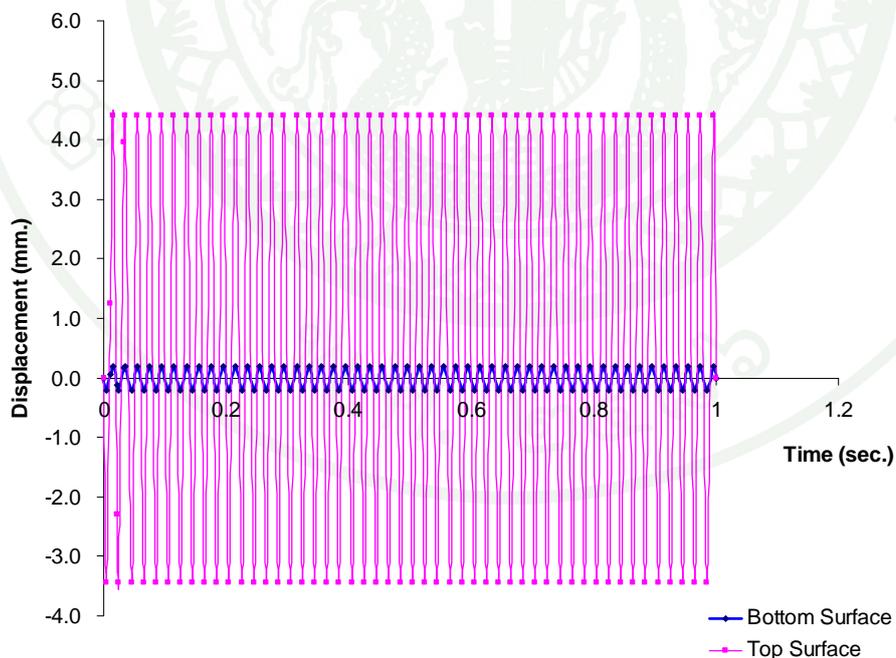
ภาพผนวกที่ ค25 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06



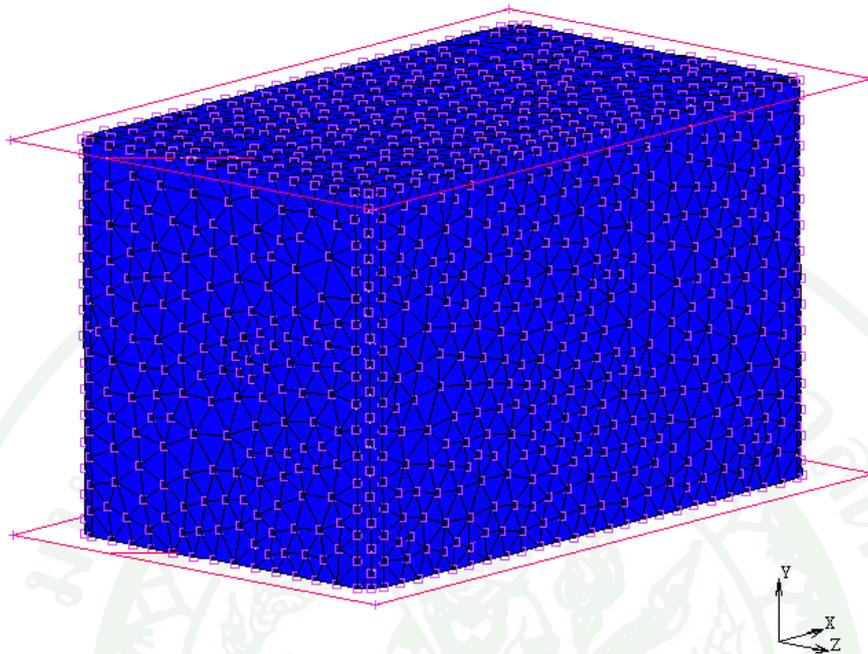
ภาพผนวกที่ ค26 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



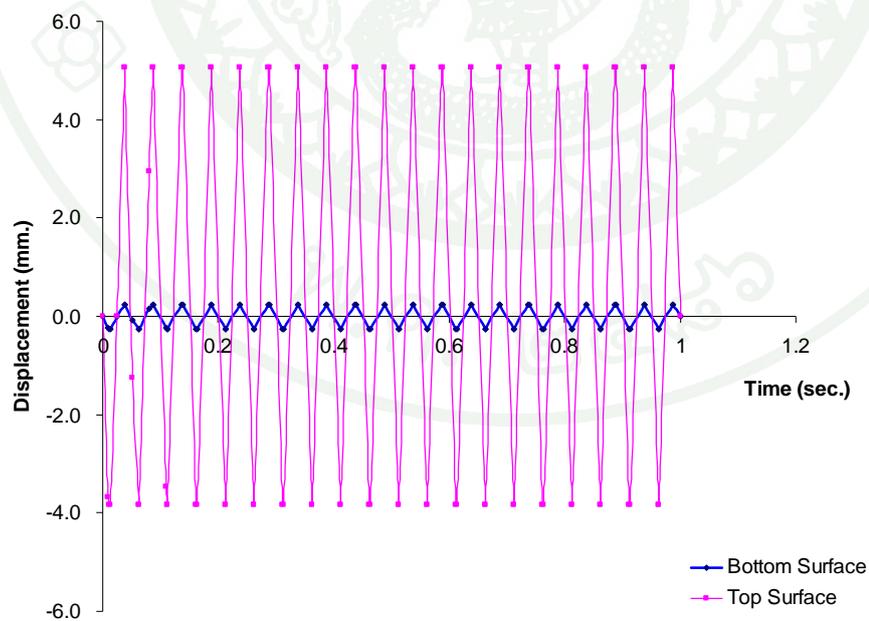
ภาพผนวกที่ ค27 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์



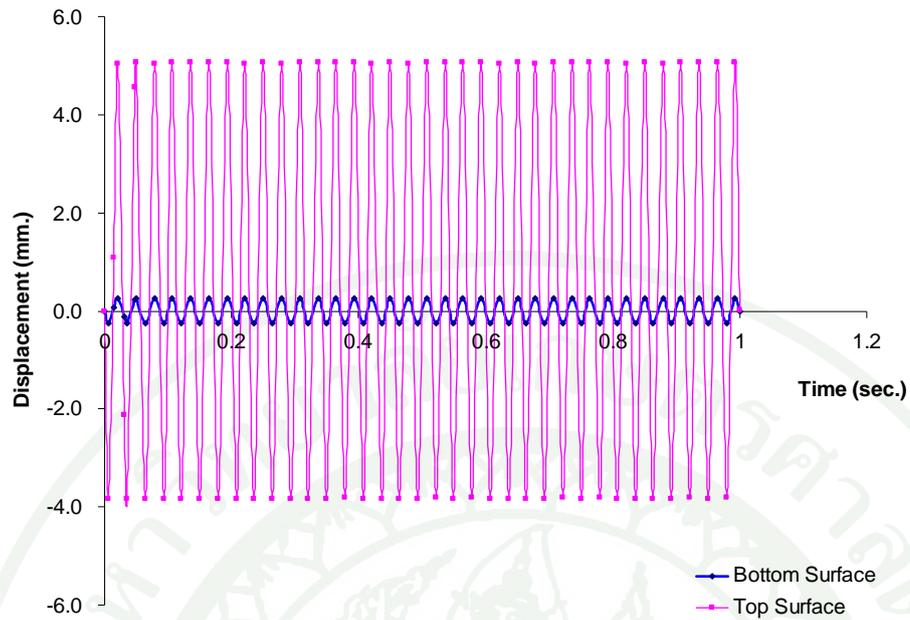
ภาพผนวกที่ ค28 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M06 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์



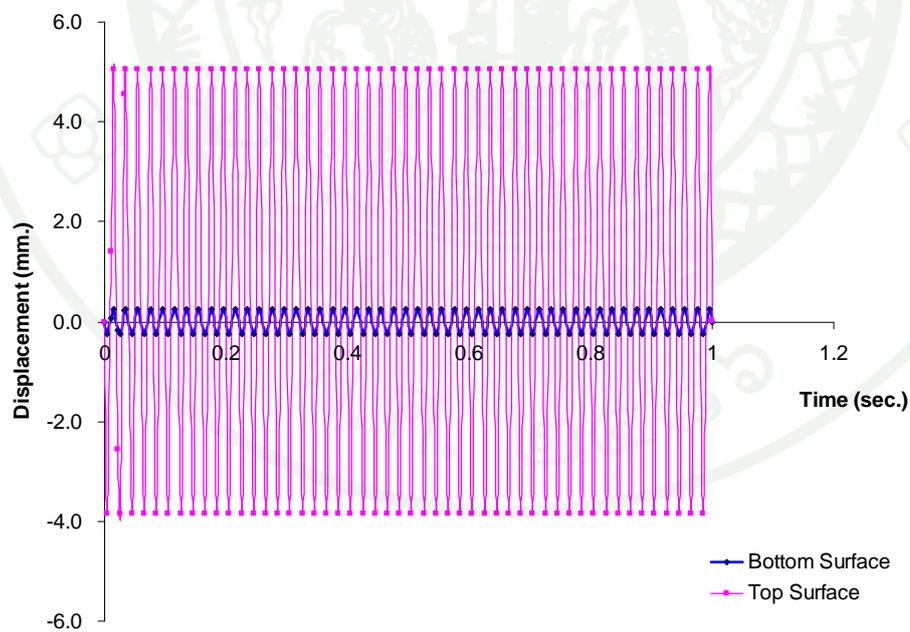
ภาพผนวกที่ ค29 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07



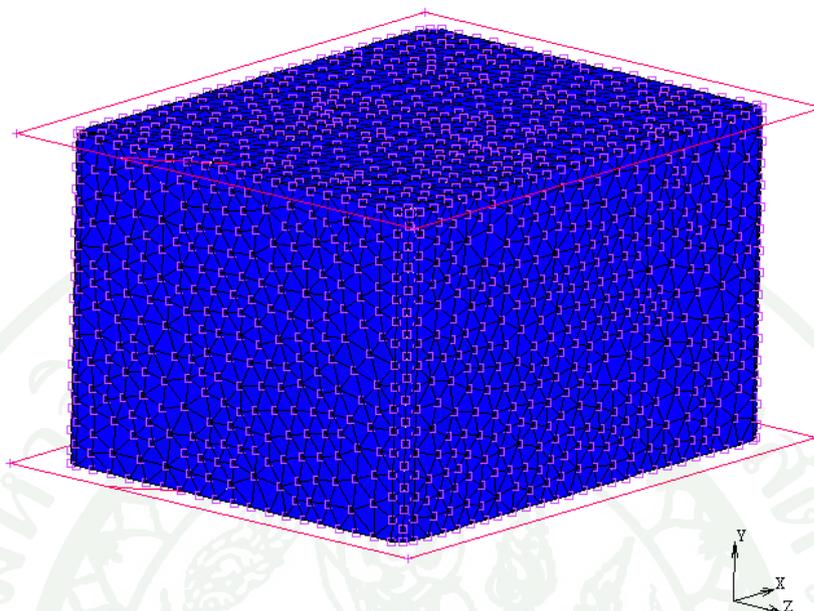
ภาพผนวกที่ ค30 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



ภาพผนวกที่ ค31 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิรตซ์



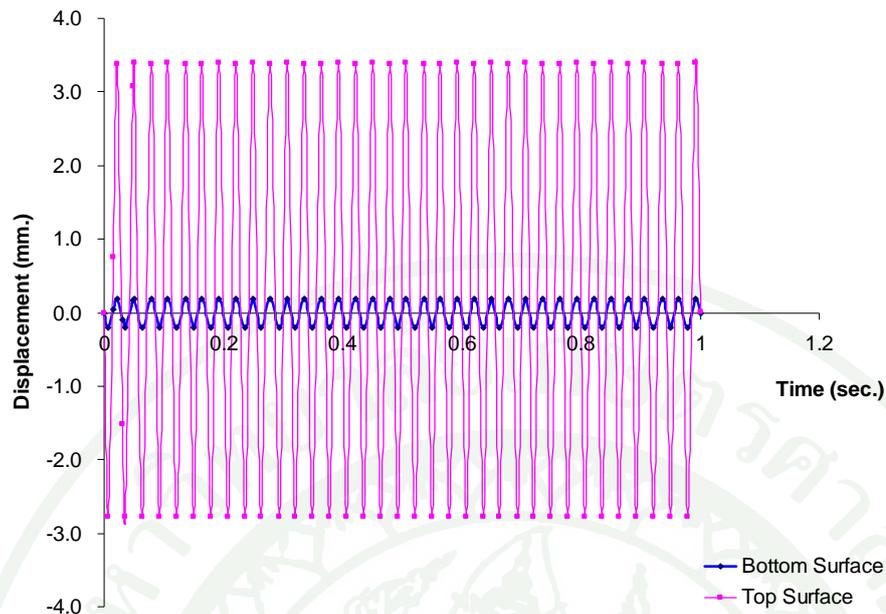
ภาพผนวกที่ ค32 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M07 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิรตซ์



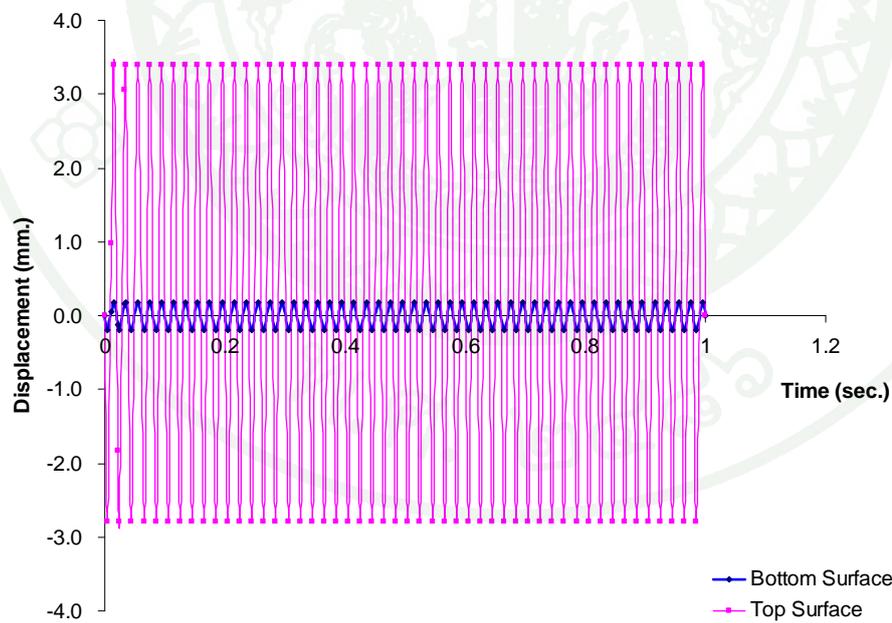
ภาพผนวกที่ ค33 แบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08



ภาพผนวกที่ ค34 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08 ที่ระดับการสั่นสะเทือน 20 เฮิรตซ์



ภาพผนวกที่ ค35 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08
ที่ระดับการสั่นสะเทือน 35 เฮิร์ตซ์



ภาพผนวกที่ ค36 กราฟแสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองยางรองแท่นเครื่องขนาด M08
ที่ระดับการสั่นสะเทือน 50 เฮิร์ตซ์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นางสาวยุพา ตาวัน
เกิดวันที่	13 กันยายน 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงราย
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมการผลิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	- ทุนสนับสนุนงานวิจัย แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ - ทุนมูลนิธิโทเร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย (TTSF)