



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาค่าความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ

An Investigation of Stiffness for Rubber Track

นามผู้วิจัย นางสาวชุตินา ศักดิ์ชินบุตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชนะ รักษศิริ, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาค่าความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ

An Investigation of Stiffness for Rubber Track

โดย

นางสาวชุตติมา ศักดิ์ชินบุตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชุตติมา ศักดิ์ชินบุตร 2556: การศึกษาค่าความแข็งดึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. 144 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาเชิงเปรียบเทียบความแข็งดึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจาก
การทดสอบกดจริงและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบยาง
ตีนตะขาบที่ทำจากยางธรรมชาติ กล่าวคือ การทดสอบกดจริงนั้นจะพิจารณาการกดภายใต้แรงกด
สถิต ในขณะที่การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะศึกษาผลการรับแรงกดและระยะยุบแบบทรงตัน 3 มิติ
ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา โดยนำข้อมูลการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์สูตร
เดียวกับผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา การทดสอบสมบัติวัสดุมี 3 ลักษณะ ได้แก่ การทดสอบ
สมบัติการรับแรงดึง การทดสอบสมบัติการกดอัด และการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน มาใช้
ในแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกของสมบัตินี้ทั้งสิ้น 5 แบบ ได้แก่ แบบจำลองฮ็อกเคน อันดับที่
1 2 และ 3 แบบจำลองมูนี่-รีฟลิน 2 เทอม และ 3 จากผลการศึกษาเชิงเปรียบเทียบพบว่า
ค่าความแข็งดึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจากการทดสอบกดจริงและการจำลองไฟไนต์
เอลิเมนต์ มีค่าเป็น 5,690 และ 8,276 kN/mm ตามลำดับ ส่วนการจำลองแรงกดจากแบบจำลอง
วัสดุไฮเปอร์อีลาสติกนั้นพบว่าแบบจำลองฮ็อกเคน อันดับที่ 1 ให้ผลการทำนายแรงกดที่แม่นยำมากที่สุด
และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 18 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าพลังงานความเครียด
หนาแน่นรวมและการกระจายตัวของความเค้นวอนมิสที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น
มีความสอดคล้องกัน ซึ่งมีการกระจุกตัว ณ บริเวณขอบของดอกยาง

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chutima Sakchinbud 2013: An Investigation of Stiffness for Rubber Track.
Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical
Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor:
Assistant Professor Supasit Rodkwan, Ph.D. 144 pages.

This research aims to compare the stiffness of rubber track obtained by ways of laboratory experiment and numerical analysis. The rubber track tested in laboratory was subjected to static compressive load using universal testing machine whereas three-dimensional finite element (FE) technique was used for the numerical analysis. The material properties assigned in the FE model were based on the three tests of rubber samples which are biaxial test, compression test, and planar shear test. The raw data from the test was used to predict the hyper-elastic model. In this study, five different hyper-elastic model, i.e. first order Ogden, second order Ogden, third order Ogden, two terms Mooney-Revlin, and three term Moony-Revlin, were calculated. According to the experiment, it can be observed that the first order Ogden produced the FE results close to the experimental result. The stiffness obtained by means of experiments and FE analysis were 5,690 kN/mm and 8,276 kN/mm, respectively. The difference between both values was approximately 18 percents. In addition, total strain energy density and von Mises stress results in FE analysis is concentrated around the edge of rubber track.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ซึ่งเป็นมากกว่าอาจารย์ที่ปรึกษา สิ่งที่ผู้วิจัยได้รับจากอาจารย์ไม่เพียงวิชาความรู้ ความใส่ใจ ความกรุณา คำชี้แนะ และคำกล่าวสอน แต่ยังให้โอกาสกับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ ดร.ชนะ รัชศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ขอขอบคุณความเอาใจใส่ การชี้แนะในด้านต่างๆ และการสละเวลาอันมีค่าให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ ดร. เจตวิทย์ ภัคร์ชพันธุ์ ประธานการสอบ ขอขอบคุณการการชี้แนะในด้านต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร. ชวสวน กาญจน์มัย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้แนวทางและการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง (CERM) สถาบันค้นคว้าและพัฒนา เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอขอบพระคุณ คุณสุรศักดิ์ มาริอนุเคราะห์ ผู้จัดการ บริษัท เอร่าวิชั่นรับเบอร์ จำกัด และ พนักงานในบริษัททุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ในการทำวิจัยนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วรรณ ทองสังข์ และเจ้าหน้าที่ในแผนกทุกคน ของสถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านคำแนะนำ เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อาทั้งสอง และครอบครัว ที่ให้ความรัก คอยเป็น กำลังใจ และแรงผลักดันให้ผู้วิจัย

ชุตติมา ศักดิ์ชินบุตร
มีนาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจสอบเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	97
สรุป	97
ข้อเสนอแนะ	98
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	99
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก เครื่องทดสอบเอนกประสงค์	104
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติยาง	106
ภาคผนวก ค ใบรับรองการสอบเทียบของเครื่องทดสอบแรงกด	126
ภาคผนวก ง แบบ 2D ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ	131
ภาคผนวก จ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมด้วยโปรแกรมMSC.Marc Mentat 2005	133
ภาคผนวก ฉ การทดสอบหาความเหมาะสมของ Incerment	139
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	144

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	วิธีมาตรฐานต่างๆ ที่นิยมใช้ในการทดสอบสมบัติของยาง	8
2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลของยาง	64
3	ค่าส.ป.ส.แรงเสียดทานของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระยะยวบ 5 มิลลิเมตร	66
4	แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	68
5	รูปแบบของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า	69
6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยวบของการทดสอบจริงกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	71
ตารางผนวกที่		
ฉ1	จำนวน Increment ต่างๆ	140
ฉ2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Increment กับเวลาในการคำนวณของระยะยวบ 0.5-9 มิลลิเมตร	143

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	2
2	ความเสียหายที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบกดจริง	3
3	พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของยาง	5
4	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	7
5	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก	11
6	ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก	17
7	ชิ้นส่วนยางขณะรับแรงกดอัด	21
8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	22
9	ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด	23
10	ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	24
11	ระนาบความเค้นวอนมิส	25
12	การเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นของทฤษฎีความเสียหายต่างๆ	26
13	ผังแสดงเหตุและผล	28
14	องค์ประกอบของการออกแบบการทดลอง	29
15	หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง	30
16	เอลิเมนต์มิติเดียว	34
17	เอลิเมนต์สองมิติ	34
18	เอลิเมนต์สามมิติ	35
19	เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน	35
20	ขั้นตอนการทำงานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	36
21	รถบรรทุกกึ่งล้อยางตีนตะขาบ	38
22	ภาพตัดขึ้นยางตีนตะขาบ	39
23	รถพาร์มแทรกเตอร์ที่ใช้ล้อตีนตะขาบในปัจจุบัน	40
24	ระบบการตั้งชื่อทางการควบคุม และทางกลศาสตร์ของยางล้อตีนตะขาบ	41
25	ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบสำหรับการทดสอบ	42
26	ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบสำหรับการทดสอบ	43
27	ยางคอมพาวด์ที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	45
28	เครื่องทดสอบเอนกประสงค์สำหรับการสมบัติทางกลของยางคอมพาวด์	45
29	เครื่องอัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	46
30	ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	46
31	เครื่องทดสอบเอนกประสงค์สำหรับทดสอบกดจริง	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ GT-7001-LS100	47
33	การดำเนินงานวิจัย	48
34	แบบ 2 มิติ ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	49
35	แผนผังกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	49
36	ทดสอบการรับแรงกดตั้งฉากที่กระทำบนผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจริง	50
37	ส่วนประกอบของแผ่นหัวกดทดสอบ	50
38	ชิ้นงานทดสอบสมบัติของยาง	51
39	พฤติกรรมเชิงกลของยางในการทดสอบสมบัติวัสดุ	52
40	ชิ้นงานทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	53
41	การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	53
42	ชิ้นงานการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด	54
43	การทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด	54
44	ชิ้นทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน	54
45	การทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน	55
46	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	57
47	การทำงานของกราคำนวณทางขนานของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	57
48	ผังแสดงเหตุและผล โดยปัจจัยที่อยู่ภายในสัญลักษณ์วงรีคือปัจจัยที่ต้องการควบคุม	58
49	แบบ 3 มิติทรงตันของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	59
50	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	59
51	ขั้นตอนในการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	60
52	กราฟแสดงค่าแรงกดที่กระทำและระยะยุบของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษา	61
53	กราฟแสดงค่าแรงกดที่กระทำและระยะยุบของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาจำนวน 5 ชิ้น	62
54	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นของการทดสอบสมบัติของยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	63
55	การกำหนดเงื่อนไขแรงกระทำในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบที่ขนานกับพื้นราบ	65
56	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	67
57	เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	67
58	การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองวัสดุ	68
59	การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบและขนาดของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบของการทดสอบจริงกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระยะยุบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร	72
61	บริเวณจุดต่อขอบบนดอกยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	73
62	บริเวณจุดต่อขอบล่างดอกยางตีนตะขาบกรณีศึกษา	74
63	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร	74
64	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร	75
65	กราฟความเค้นวอนนิสสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร	75
66	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร	76
67	กราฟความเค้นวอนนิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร	76
68	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร	77
69	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร	77
70	กราฟความเค้นวอนนิสสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร	78
71	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร	78
72	กราฟความเค้นวอนนิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร	79
73	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร	79
74	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร	80
75	กราฟความเค้นวอนนิสสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร	80
76	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร	81
77	กราฟความเค้นวอนนิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร	81
78	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร	82
79	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
80	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร	83
81	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยาง ที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร	83
82	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร	84
83	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร	84
84	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยาง ที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร	85
85	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร	85
86	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยาง ที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร	86
87	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร	86
88	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร	87
89	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยาง ที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร	87
90	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร	88
91	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยาง ที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร	88
92	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร	89
93	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร	89
94	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยาง ที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร	90
95	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร	90
96	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยาง ที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร	91
97	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร	91
98	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ที่ระยะยุบ 7.0 มิลลิเมตร	92
99	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยาง ที่ระยะยุบ 7.0 มิลลิเมตร	92

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
100	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยวบ 5.0 มิลลิเมตร	93
101	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยาง ที่ระยะยวบ 7.0 มิลลิเมตร	93
102	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยวบ 7.0 มิลลิเมตร	94
103	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยาง ที่ระยะยวบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร	94
104	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยวบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร	95
105	กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยาง ที่ระยะยวบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร	95
106	กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยวบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร	96
ภาพผนวกที่		
ก1	เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ รุ่น INSTRON 5566	105
ข1	รายงานผลการทดสอบ	107
ข2	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 1	108
ข3	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 2	109
ข4	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 3	110
ข5	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 4	111
ข6	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 5	112
ข7	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 1	113
ข8	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 2	114
ข9	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 3	115
ข10	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 4	116
ข11	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 5	117
ข12	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 1	118
ข13	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 2	119
ข14	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 3	120
ข15	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 4	121
ข16	ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 5	122

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข17	แสดงความเค้นทางวิศวกรรม-ความเครียดทางวิศวกรรม ในการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	123
ข18	แสดงความเค้นทางวิศวกรรม-ความเครียดทางวิศวกรรม ในการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด	124
ข19	แสดงความเค้นทางวิศวกรรม-ความเครียดทางวิศวกรรม ในการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน	125
ค1	ใบรับรองการสอบเทียบของเครื่องทดสอบแรงกด	127
ง1	แบบ 2 มิติ ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ	132
จ1	หน้าตาการกำหนดค่าสมบัติวัสดุ	134
จ2	หน้าตาการใส่ค่าสมบัติวัสดุที่ได้จากการทดสอบ	134
จ3	หน้าตาการกำหนดสมบัติของยาง	135
จ4	กำหนดการสัมผัสของชิ้นงานยาง	135
จ5	ระยະຍຸບຂອງຊີ້ນງານຍາງ	136

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
BR	=	ยางบิวตาไดอิน (Butadiene Rubber)
BS	=	British Standard
CAD	=	การออกแบบใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (Computer Aided Design)
cis-1,4-polyisoprene	=	โครงสร้างทางเคมีเหมือนยางพาราเป็น ซิส-1,4-โพลีไอโซพรีน
°C	=	องศาเซลเซียส
E	=	โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus)
DIN	=	Deutsches Institut für Normung e.V.
FEA	=	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)
ISO	=	International Standardization and Organization
J	=	อัตราส่วนเชิงปริมาตร
JIS	=	Japanese Industrial Standards
L_0	=	ความยาวเริ่มต้น
L	=	ความยาวสุดท้าย
ΔL	=	ความยาวที่เปลี่ยนไป
NR	=	ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)
SBR	=	ยางสไตรีนบิวตาไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber)
STR	=	มาตรฐานยางแท่ง (Standard Thai Rubber)
U	=	เทนเซอร์ระยะยืด (Stretch Tensor)
UTM	=	ทดสอบแรงกดด้วยเครื่องยูทีเอ็ม (Universal Testing Machine)
V	=	ปริมาตร
W	=	พลังงานความเครียด (Stain Energy Function)
λ	=	อัตราส่วนการยืดตัว
μ	=	โมดูลัสการเฉือน (Shear Modulus) ที่ความเครียดต่ำ
ν	=	อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio)
σ	=	ความเค้น (Stress)
ϵ	=	ความเครียด (Strain)

การศึกษาค่าความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ

An Investigation of Stiffness for Rubber Track

คำนำ

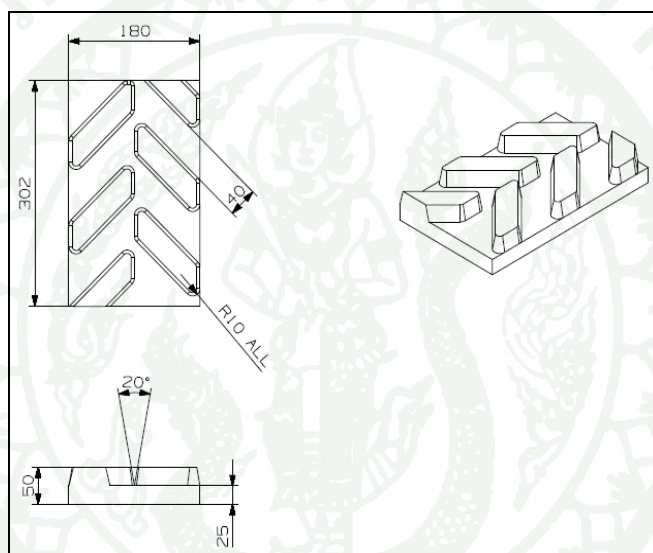
ด้วยปัญหาความต้องการอาหารและผลิตผลทางการเกษตรที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรที่นับวันจะเพิ่มขึ้น ทำให้การสร้างผลิตผลทางการเกษตรด้วยวิธีการดั้งเดิม โดยอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก จึงไม่ใช่ทางออกของการแก้ไขปัญหาอีกต่อไป ดังนั้นเกษตรกรเริ่มหันมาพึ่งเครื่องจักรกลการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถแทรกเตอร์ แต่การผลิตรถแทรกเตอร์เพื่อใช้ในการเกษตรกรรมดังกล่าว ก็ยังคงประสบปัญหาอยู่ดี กล่าวคือ ปริมาณการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ในประเทศ จึงจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ต้นทุนการผลิตจึงสูงขึ้น แม้ว่ารถแทรกเตอร์จะมีส่วนประกอบหลักสำคัญอยู่หลายส่วน แต่ส่วนที่สำคัญไม่น้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ก็คือ ล้อรถแทรกเตอร์ และหากจะพิจารณาเพียงเฉพาะล้อรถแทรกเตอร์ประเภทตีนตะขาบ ก็มีใช้อยู่เพียง 2 ประเภท ได้แก่ เหล็กตีนตะขาบและยางตีนตะขาบ สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งศึกษาเพียงล้อยางตีนตะขาบเท่านั้น ด้วยเหตุผลว่าปัจจุบันล้อยางประเภทนี้กำลังได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจาก ลดการสิ้นสละเทือนและลดเสียงดังได้ดีกว่าเหล็กตีนตะขาบ และสามารถวิ่งบนถนนได้โดยไม่ทำให้ผิวถนนเป็นรอยเสียหาย อีกทั้งการผลิตล้อเหล็กตีนตะขาบก็ยังมีต้นทุนสูง ประกอบกับยางธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตล้อยางตีนตะขาบก็สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ และมีราคาต่ำกว่าเหล็กอีกด้วย ปัญหาสำคัญที่กลุ่มผู้ประกอบการผลิตแทรกเตอร์ประสบอยู่คือ การขาดองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตล้อยางตีนตะขาบ เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดความเสียหายขณะใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมพบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับยางตีนตะขาบนั้นสามารถพิจารณาได้ 2 ส่วนคือ ความเสียหายในส่วนการรับภาระแบบสถิต (Static Load) และความเสียหายในส่วนการรับภาระแบบพลวัต (Dynamic Load) โดยทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวนี้ มีการศึกษาถึงความแข็งตึง ซึ่งถือได้ว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการต้านทานการเสีรูปหรือพังเสียหายของล้อยางตีนตะขาบได้ และเพื่อให้ขอบเขตของการศึกษาอยู่ในระดับที่เหมาะสม สำหรับการสร้างองค์ความรู้ที่เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบและผลิตในขั้นสูงต่อไป ผู้วิจัยจึงพิจารณาเพียงเฉพาะกรณีความเสียหายในส่วนการรับภาระแบบสถิตเท่านั้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความแข็งตึงของล้อยางตีนตะขาบกรณีศึกษา สำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดไม่เกิน 80 กำลังม้า ภายใต้การรับภาระแบบสถิต โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาเชิงการทดลอง และการศึกษาเชิงตัวเลขผ่านทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จากนั้นจะมีการเปรียบเทียบผลของความแข็งตึงที่ได้ ตลอดจนการศึกษาระบายตัวของความเครียดและการกระจายตัวความเค้นที่เกิดขึ้นในล้อยางตีนตะขาบอีกด้วย

วัตถุประสงค์

ศึกษาค่าความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

ขอบเขตงานวิจัย

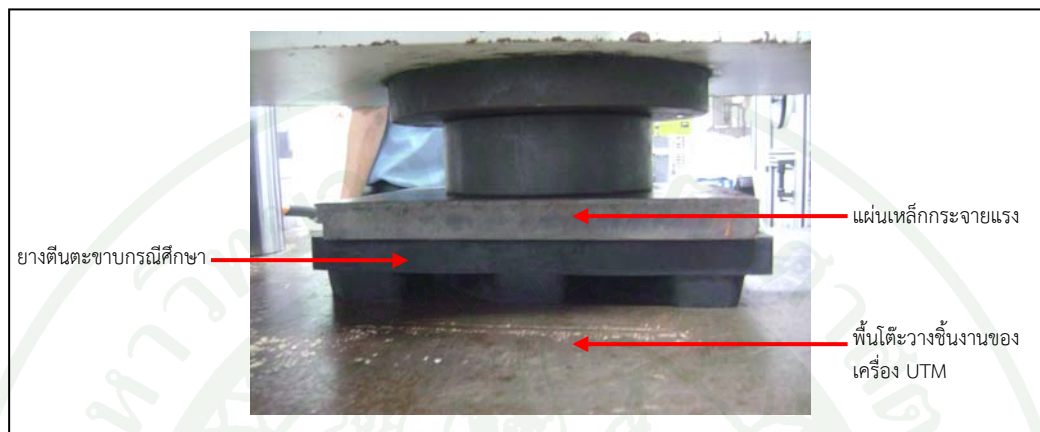
1. ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบสำหรับรถแทรกเตอร์ที่ทำจากยางธรรมชาติ และมีความแข็ง 70 Shore A



ภาพที่ 1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

2. แรงกดที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นแรงกดสถิตกระทำตั้งฉากบนผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาและจะมีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบขนาดของแรงกดดังกล่าวจากการทดสอบกดจริงและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ศึกษาเชิงเปรียบเทียบค่าความแข็งตึงของยางตีนตะขาบที่ได้รับการทดสอบจริงและการวิเคราะห์การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
4. แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ได้แก่ แบบจำลองมุนนี-รีฟลิน และแบบจำลองฮ็อกเคน

5. ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบกดจริง อยู่ 2 คู่ ผิวสัมผัสให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเท่ากับ 0.6 ได้แก่ แผ่นเหล็กกระจายแรงกับผลิตภัณฑ์ยางดินตะขาบกรณีศึกษา และพื้นเครื่องยูทีเอ็มกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบกดจริง

การตรวจสอบเอกสาร

การดำเนินงานวิจัยต้องอาศัยข้อมูลและทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ดังนี้

1. สมบัติเบื้องต้นของยางและยางธรรมชาติ
2. สมบัติไฮเปอร์อีลาสติก
3. ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก
4. พฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยาง
5. ความแข็งตึงของยาง
6. ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้น
7. ทฤษฎีความเสียหาย
8. ผังแสดงเหตุและผล
9. การออกแบบการทดลอง
10. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. สมบัติเบื้องต้นของยางและยางธรรมชาติ

สมบัติเบื้องต้นของยาง

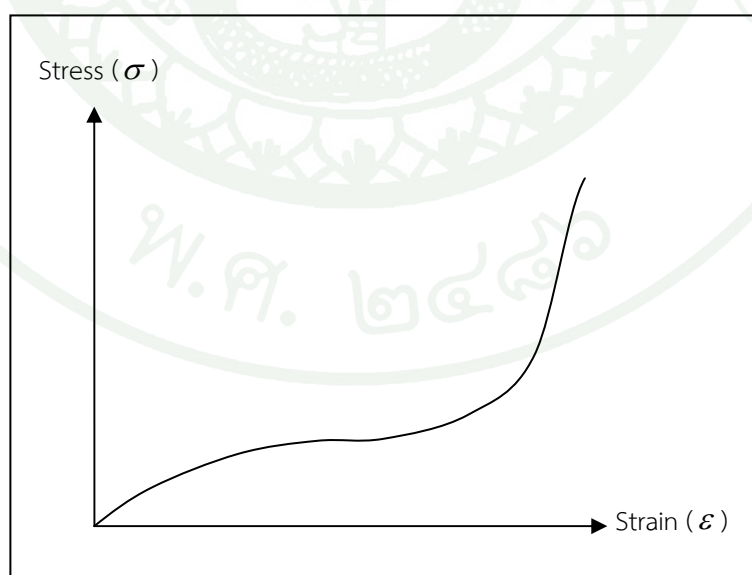
อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) เป็นโพลิเมอร์แบบอสัณฐาน (Amorphous Polymers) โดยอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมเซต (Thermosets) และ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยเทอร์โมเซตจะมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3D Network) มีสายโมเลกุลยาวซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี และสามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน ส่วนโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกนั้นจะแตกต่างกันออกไป เพราะแต่ละโมเลกุลจะเชื่อมกันทางกายภาพเท่านั้น และสามารถดูดซับสารละลายได้บางอย่างเท่านั้น นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกสามารถทำการขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน ทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกถูกนำไปใช้แตกต่างกันตามสมบัตินั้นๆ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วความต้องการที่จะนำไปใช้เป็นยางดินตะขาคกรณศึกษานั้น เทอร์โมเซตจะเหมาะสมกว่าเนื่องมาจากสมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elasticity) และความทนทาน (Durability) โดยหลังจากการเติมสารเคมีต่างๆ เข้าไปผสมกับอีลาสโตเมอร์ จะได้สิ่งที่เรียกว่า คอมพาวด์ (Compound) และเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) แล้วจะได้สิ่งที่เรียกว่า ยาง (Rubber) (Gent, 2001) นอกจากนี้ยังสามารถนิยามความหมายของอีลาสโตเมอร์และยางตามมาตรฐานของ ASTM (ASTM, 1990) ได้ดังนี้

อีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยที่อุณหภูมิห้องรูปร่างและขนาดสามารถคืนตัวได้หลังจากนำแรงที่มากกระทำออก ซึ่งยางที่ถือได้ว่าเป็นอีลาสโตเมอร์ประเภทหนึ่งจึงมีสมบัติเชิงกลลักษณะเดียวกันนี้ คือ สามารถคืนตัวจากการเสียรูปได้อย่างรวดเร็ว และสามารถปรับปรุงสภาพได้ แม้ว่าโดยพื้นฐานแล้วจะไม่สามารถละลายได้ (แต่สามารถเกิดการบวมได้) ในสารละลายที่เดือด เช่น

เบนซีน (Benzene) เมทิลเอทิลคีโตน (Methyl Ethylketone) หรือเอทานอล-โทลูอีน อะเซโอโทรป (Ethanol-Toluene Azeotrope) ยางในสถานะที่แปรสภาพแล้ว ซึ่งปราศจากการเจือจาง จะหดตัวเหลือเพียงไม่ถึง 1.5 เท่าของความยาวเริ่มต้นภายในเวลาหนึ่งนาทีก่อนที่จะได้รับการยืดออกเป็นสองเท่าที่อุณหภูมิห้อง และคงตัวเอาไว้หนึ่งนาทีก่อนที่จะปล่อย (ASTM, 1990)

สมบัติของยางธรรมชาติ

วารากรณ์ (2530) ได้กล่าวไว้ว่าสมบัติหลักๆ ของยางในทางวิศวกรรม คือ มีความยืดหยุ่นที่ค่าความเครียดสูง สมบัติการหน่วงทางพลศาสตร์ ความต้านทานการสึกหรอ และมีค่าพลังงานการแตกหักสัมพัทธ์สูง โดยปกติยางเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material) ซึ่งมีพฤติกรรมความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยรูปแบบความเสียหายที่แตกต่างกันจะทำให้พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดแตกต่างกันโดยรูปแบบความเสียหาย การเฉือนอย่างง่าย (Simple Shear) จะมีพฤติกรรมของความเครียดเป็นเชิงเส้นมากกว่ารูปแบบความเสียหายแบบกดอัด (Compression) และแบบแรงดึง (Tensile) นอกจากนี้ยางยังมีพฤติกรรมที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible) หมายถึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้เมื่อมีแรงกระทำ ยางจะมีค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) ต่ำกว่าค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus) อยู่มาก โดยค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรจะมีค่าประมาณ 1,000 ถึง 2,000 MPa แต่ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่าประมาณ 1 MPa ความสามารถในการอัดตัวของวัสดุสามารถอธิบายผ่านค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) หมายถึง ค่าอัตราส่วนระหว่างความเครียดที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางขนานกับแรงที่กระทำบนวัสดุสำหรับยางจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองอยู่ประมาณ 0.5



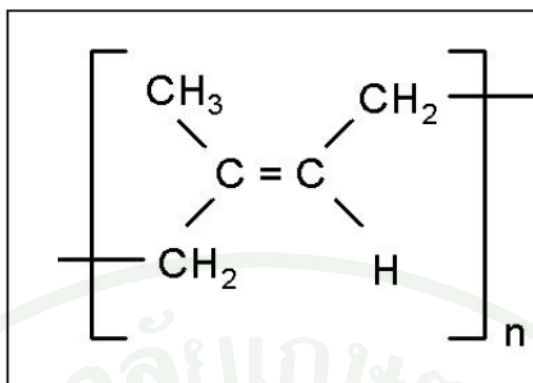
ภาพที่ 3 พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของยาง

ยางธรรมชาติ

ต้นยางพาราเป็นต้นกำเนิดหลักในการผลิตยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อเยื่อแห้ง (Dry Rubber) ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated Latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไป จะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยาง และถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีตได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็กรีตยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (Two-Roll Mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 70 °C เป็นเวลา 3 วัน เราก็จะได้ยางแผ่นรมควัน (พงษ์ธร, 2548)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นขึ้นอยู่กับการเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเงาปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยาก ต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ Cis-1,4-Polyisoprene กล่าวคือ มี Isoprene (C_5H_8) แสดงในภาพที่ 4 โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15 ถึง 20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) และความทนทานต่อการขีดสี (Abrasion Resistance) สูง



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ที่มา: พงษ์ธร (2548)

ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (Assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนและเหนียวเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการผสมยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanized) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มาก แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double Bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ Antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ผึ้ง น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารต่างๆ ดังกล่าว

การทดสอบสมบัติของยาง

สมบัติของยางขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง (พงษ์ธร และ ชาคริต, 2550) ดังนั้น การทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางด้วยวิธีมาตรฐานจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ผลการทดสอบเป็นที่ยอมรับในระดับสากลและสามารถนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากแหล่งอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้ว่าสมบัติทางกายภาพของยางที่วัดได้จากวิธีมาตรฐานอาจมีค่าไม่คงที่เนื่องจากสมบัติของยางขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตอย่างมาก (โดยเฉพาะในขั้นตอนของการผสมและการคงรูป) ซึ่งการควบคุมกระบวนการผลิตให้คงที่นั้นเป็นได้ค่อนข้างยากในเชิงปฏิบัติ ด้วยเหตุนี้สมบัติของยางที่วัดได้จึงอาจเกิดความแปรปรวนได้ในบางครั้ง

จุดประสงค์หลักของการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางก็เพื่อต้องการควบคุมคุณภาพและพัฒนาสูตรเคมียางให้ดียิ่งขึ้น สำหรับการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความร้อน แสงแดด โอโซน หรือน้ำมัน ส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในเชิงเปรียบเทียบเท่านั้น ผู้ทดสอบไม่ควรนำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไปใช้ในการทำนายอายุการใช้งานจริงของผลิตภัณฑ์ยางเพราะสภาพการใช้งานจริงของยางอาจแตกต่างจากสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ปัจจุบันการทดสอบสมบัติของยางสามารถทำได้โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานต่างๆ ที่ระบุอยู่ในตารางที่ 1 การตัดสินใจว่าจะเลือกใช้มาตรฐานใดในการทดสอบนั้นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก เช่น หากต้องการผลิตภัณฑ์เพื่อส่งไปจำหน่ายยังประเทศญี่ปุ่น การทดสอบส่วนใหญ่ก็ควรอ้างอิงตามมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าประเทศต่างๆ จะพัฒนาวิธีมาตรฐานสำหรับทดสอบสมบัติของยางจนกระทั่งมีจำนวนมาตรฐานให้เลือกใช้มากมายในปัจจุบัน แต่โดยภาพรวมแล้ว วิธีการทดสอบสมบัติของยางตามมาตรฐานต่างๆ เหล่านี้จะไม่แตกต่างกันมากนัก ด้วยเหตุนี้ ข้อมูลของการทดสอบที่จะกล่าวถึงส่วนใหญ่จึงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งเป็นมาตรฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยาง ยกเว้นการทดสอบสมบัติบางประการ เช่น การทดสอบสมบัติแรงเหวี่ยง สมบัติการคลายตัวของความเค้น รวมถึงการวัดการคืบซึ่งจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO ส่วนการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขีดถูและการทดสอบสมบัติเชิงพลวัตจะอ้างอิงตามมาตรฐาน DIN และ BS ตามลำดับ

ตารางที่ 1 วิธีมาตรฐานต่างๆ ที่นิยมใช้ในการทดสอบสมบัติของยาง

ชื่อย่อ	ชื่อเต็ม	ประเทศ
ASTM	American Society for Testing and Materials	สหรัฐอเมริกา
ISO	International Standardization and Organization	นานาชาติ
JIS	Japanese Industrial Standards	ญี่ปุ่น
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.	เยอรมัน
BS	British Standard	อังกฤษ

2. สมบัติไฮเปอร์อีลาสติก

วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก คือวัสดุที่สามารถนิยามความเค้นของวัสดุในรูปของฟังก์ชันพลังงาน ความเครียดและสมการสแกน (Constitutive Equation) (ABAQUS, 2004) ที่แสดงพฤติกรรมของ วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก คือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นรวมกับความเครียดรวม ที่สามารถหาค่า ความเค้นจากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันพลังงานความเครียด

2.1 แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function)

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมของวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองของวัสดุนี้จะแตกต่างจากแบบจำลองของวัสดุทั่วไป ซึ่งเรียก พฤติกรรมของวัสดุประเภทนี้ว่าไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic) วัสดุที่มีพฤติกรรมลักษณะนี้ จำเป็นต้องหาสมการความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการยืดหยุ่น แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันความหนาแน่นของ พลังงานความเครียด (Strain Energy Function, W) ดังสมการ

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

เมื่อ U คือ เทนเซอร์ระยะยืด (Stretch Tensor) มีลักษณะเป็นเมทริกซ์แนวทแยง (Diagonal Matrix) ซึ่งประกอบไปด้วย λ_1 , λ_2 และ λ_3 เป็นระยะยืดในทิศทางตามแนวแกนหลัก x , y และ z สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic Material) พลังงานความเครียดสามารถเขียนให้อยู่ ในรูปฟังก์ชันสมมาตร (Symmetric Function) ของ λ_1 , λ_2 และ λ_3 ได้ตามสมการ 2

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

ความสัมพันธ์ของระยะยืดตามแนวแกนหลักใด ๆ λ_i กับแรงต่อพื้นที่ f_i ในกรณีวัสดุ ไอโซโทรปิกฟังก์ชันพลังงานความเครียดแสดงได้ตามสมการ (3)

$$f_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (3)$$

โดยพลังงานความเครียด W อาจเขียนให้อยู่ในรูปของ Strain Invariants

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (6)$$

หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูป

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (7)$$

ในกรณีที่พิจารณาเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) ทำให้สามารถเขียนได้ว่า

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{(V + \Delta V)}{V} = 1 \quad (8)$$

เมื่อ J คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตร และ V คือ ปริมาตร จากสมการที่ (5) และ (6) พบว่า

$$I_3 = J^2 = 1 \quad (9)$$

ดังนั้นฟังก์ชันพลังงานความเครียดสามารถเขียนในรูป

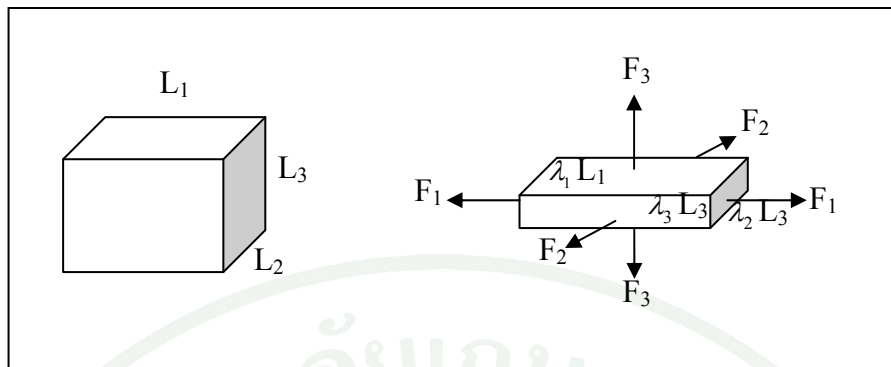
$$W = W(I_1, I_2) \quad (10)$$

ความเค้นหลักเคาซี (Cauchy Principle Stress) ซึ่งเป็นแรงต่อพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลง (Strained Area) สามารถอธิบายได้จากสมการ (9)

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \quad (11)$$

2.2 แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material Models)

แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียด (Nonlinear Stress-Strain Relation) ของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงวัสดุอีลาสโตเมอร์ หรือยาง แบบจำลองนี้จะอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Function) กับอัตราส่วนการยืดตัว (Stretch Ratios) หรือค่าอินยง (Invariants) โดยเมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังแสดงในภาพที่ 5 อัตราส่วนการยืดตัวและค่าอินยงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12) และสมการที่ (4) ถึง (6) (ไพโรจน์, 2552)



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบจำลองเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก

เมื่อ λ คือ อัตราส่วนการยืดตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = 1 + \frac{\Delta L}{L_0} = 1 + \varepsilon \quad (12)$$

เมื่อ L_0 คือ ความยาวเริ่มต้น

L คือ ความยาวสุดท้าย

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป

ε คือ ความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model) พัฒนามาจากความสัมพันธ์ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปเมื่อไม่พิจารณาถึงโครงสร้างภายในโมเลกุล กลุ่มที่สองเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพ (Physical Based Model) เป็นการพัฒนามาจากกลไกโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ทฤษฎีจลน์ศาสตร์ (Kinetic Theory) หรือทฤษฎีกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics Theory) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุพอลิเมอร์ประเภทยางจะเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงทางเอนโทรปี (Entropy) (ABAQUS, 2004)

2.2.1 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model)

เป็นแบบจำลองที่อ้างอิงกับข้อมูลทดสอบ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนี้ไม่มีความหมายทางกายภาพ แต่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการปรับแบบจำลองให้เข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหรือการทำนายพฤติกรรมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ การจำลองพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุในลักษณะนี้มีข้อดีคือ มีความแม่นยำในช่วงที่มีข้อมูลทดลอง แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้

สมการดังกล่าวทำนายพฤติกรรมในลักษณะที่มีการทดสอบเพียงอย่างเดียวได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบวัสดุในหลายๆ ลักษณะเพื่อใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมให้มีความถูกต้องมากที่สุด

แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model)

ฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function) สำหรับวัสดุที่มีสมบัติไอโซโทรปิกและไม่สามารถอัดตัวได้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมของค่าที่ไม่ผันแปรของเทนเซอร์การเสียรูปได้

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

โดยที่ C_{ijk} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

จากสมมติฐานที่กำหนดให้ยางเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ ดังนั้น $I_3 = 1$ แบบจำลองพหุนามจึงลดรูปเป็น

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

เมื่อ $N = 2$

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

สมการข้างต้นเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้เนื่องจากจำนวนเทอมที่ใช้มีความเหมาะสมประกอบด้วยเทอมของ First Invariant, I_1 และ Second Invariant, I_2

แบบจำลองมูนี-รีฟลิน (Mooney-Rivlin Model)

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

เป็นแบบจำลองที่ใช้รูปแบบสมการเดียวกับแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้เป็นอันดับที่ 1 ($N=1$) แบบจำลองชนิดนี้ทำนายพฤติกรรมของยางได้ไม่ชัดเจนนัก โดยสาเหตุที่แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 1 ทำนายพฤติกรรมของวัสดุผิดพลาดนั้น เนื่องจากจำนวนเทอมของ

แบบจำลองมีน้อยเกินไป ทำให้แบบจำลองนี้สามารถนำไปอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ในช่วงที่การยืดตัวไม่สูงมาก

แบบจำลองอ็อกเดน (Ogden Model)

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (17)$$

ข้อแตกต่างของแบบจำลองอ็อกเดนเมื่อเทียบกับแบบจำลองพหุนามคือ เลขยกกำลังไม่จำเป็นต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม จึงสามารถปรับให้เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูล และเนื่องจากเลขยกกำลังของแบบจำลองอ็อกเดนสามารถเป็นเลขจำนวนจริงใดๆ ก็ได้ ทำให้แบบจำลองนี้อาจจะเกิดการสั่นไหว (Oscillate) ได้เมื่อมีอันดับสูงขึ้น $N \geq 3$ แบบจำลองอ็อกเดน เขียนอยู่ในรูปแบบผลรวมของอัตราส่วนการยืดตัว ทำให้การใช้งานมีความยุ่งยาก และสามารถหาค่าโมดูลัสของการเฉือนได้เป็น

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

แบบจำลองอ็อกเดนที่นิยมใช้กันคือแบบจำลองอ็อกเดนอันดับที่ 3 ($N = 3$)

แบบจำลองของโยห์ (Yeoh Model)

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (19)$$

มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ C_{ij} บางตัวมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีที่ $j = 0$ จึงเรียกสมการนี้อีกลักษณะหนึ่งว่า สมการพหุนามลดรูป (Reduce Polynomial Model) โดยกำหนดเป็นแบบจำลองพหุนามลดรูปอันดับที่ 3 ($N = 3$) จะสังเกตได้ว่าจะมีแต่ค่า I_1 (First Invariant) เท่านั้น โดยโยห์ได้ให้เหตุผลของการลดรูปสมการว่า เทอมของ I_2 (Second Invariant) มีอิทธิพลน้อยไม่ส่งผลต่อการทำนายพฤติกรรมจึงสามารถตัดทิ้งไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ ถ้าสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางจะแสดงออกมาในลักษณะคล้ายรูปตัวอักษร S ดังนั้นในช่วงที่ใส่ภาระเข้าไปในช่วงแรก ค่าสัมประสิทธิ์ C_{10} แสดงถึงโมดูลัสของการเฉือน ค่า C_{20} จะแสดงถึงอิทธิพลต่อช่วงกลางของกราฟที่เป็นจุดเปลี่ยนซึ่งเป็นช่วงอ่อนตัวและค่า C_{30} จะแสดงอิทธิพลต่อกราฟช่วงปลาย ซึ่งเป็นช่วงที่มีการแข็งตัวขึ้น ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองของโยห์ใช้ได้ดีกับการวิเคราะห์หีสถูยางที่มีระยะยืดตัวมากๆ

แบบจำลองของโฟม (Foam Model) เป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรม การยืดหยุ่น มีรูปแบบดังนี้

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} [\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3] + \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\beta_n} (1 - J^{\beta_n}) \quad (20)$$

โดย μ_n , α_n และ β_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

2.2.2 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (Physical Based Model)

เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต ไม่สามารถทำนายพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปลักษณะอื่นๆ ที่ไม่ได้มีผลการทดลองมาก่อน เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจาก การสังเกตจะอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองมาทำนายพฤติกรรม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนา แบบจำลองที่นำความรู้ด้านกลไกการเสียรูปและการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นแม้ว่าข้อมูล จากการทดลองมีไม่เพียงพอ แต่แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพสามารถทำนายพฤติกรรม ในช่วงที่ไม่มีข้อมูลได้

แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (21)$$

แบบจำลองนี้มีค่าคงที่ C_{10} ซึ่งเป็นโมดูลัสของการเฉือน (Shear Modulus) สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดลองดึงแกนเดียวในช่วง 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และ ทำนายพฤติกรรมการเฉือนธรรมดา (Simple Shear) ได้ดีในช่วง 0 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์

แบบจำลองอรรูดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (22)$$

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

เมื่อ μ เป็นโมดูลัสการเฉือน (Shear Modulus) ที่ความเครียดต่ำ
 λ_m เป็นการลีดตัวของระยะยึด

แบบจำลองนี้เรียกอีกอย่างว่า แบบจำลอง Eight Chain Model เนื่องจากพิสูจน์มาจากทฤษฎี Non-Gaussian Network ที่กำหนดให้มีสปริง 8 อันเชื่อมต่อกันที่จุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์รูปลูกบาศก์ (Cubic Element) ค่าคงที่ได้มาจากการขยายอนุกรมของ Inverse Langevin Function จากรูปแบบของสมการในทฤษฎีข้างต้นสามารถนำค่าคงที่มาใช้ได้มากกว่า 5 เทอมที่กล่าวมาแต่นักวิจัยหลายคนพบว่าเทอมที่เหลือส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุอยู่น้อยมากจึงสามารถพิจารณาตัดออกได้

แบบจำลองวานเดอวาลส์ (Van Der Waals Model)

$$W = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta)\eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (23)$$

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

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

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

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

แบบจำลองวานเดอวาลส์มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แบบจำลองคิลเลียน (Kilian Model) แบบจำลองนี้แตกต่างจากแบบจำลองอื่นตรงที่มีค่า Locking Stretch (λ_m) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงข้อจำกัดในการยืดตัวของโครงข่ายต่อโยงแบบ Non-Gaussian จากโครงสร้างสมการจะเห็นว่าพลังงานความเครียดของวานเดอวาลส์ มีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าไม่จำกัด (Infinity) ดังนั้นแบบจำลองชนิดนี้จึงไม่สามารถอธิบายการดึงที่มีระยะยืดสูงกว่า λ_m ได้ ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน

3. ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก

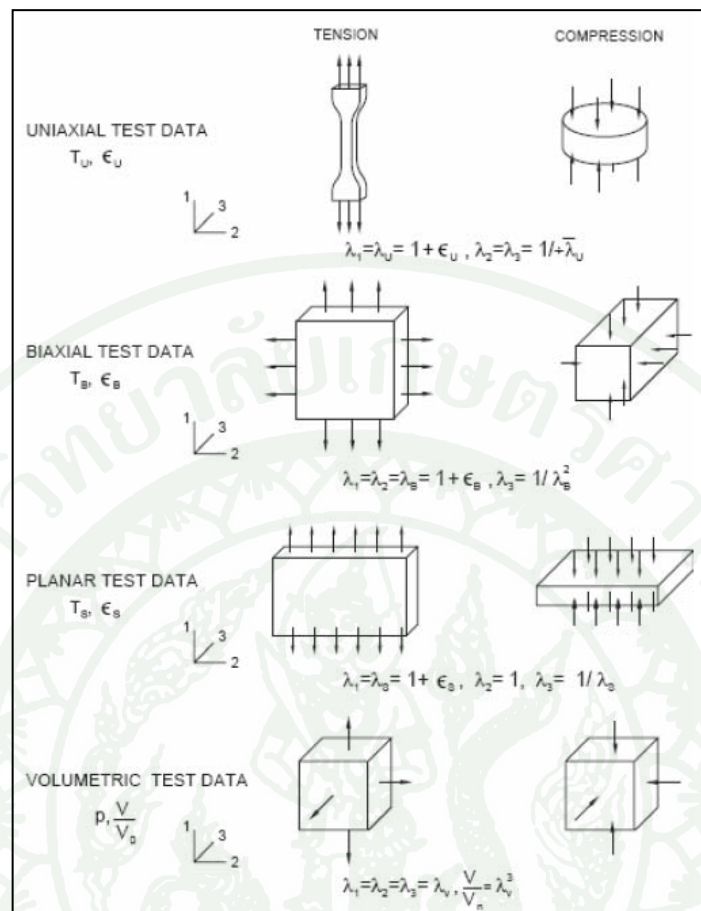
การทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกสามารถแบ่งออกเป็นการทดสอบในแนวแกนเดียว (Uniaxial Test) การทดสอบในสองแนวแกน (Biaxial Test) และการทดสอบแบบความกว้างคงที่ (Planer Test) และการทดสอบแบบปริมาตร (Volumetric Test) ดังแสดงในภาพที่ 6 การใช้ข้อมูลการทดสอบวัสดุหลายๆ ลักษณะมาหาค่าสัมประสิทธิ์ ทำให้เลือกแบบจำลองที่สามารถจำลองพฤติกรรมของวัสดุในขณะที่รับโหลดแบบซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ จากวิธีการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกทั้งหมด 8 วิธี แสดงดังภาพที่ 6 การทดสอบแบบปริมาตรเป็นการทดสอบเพื่อหาการอัดตัวได้ (Compressibility) ของวัสดุ แต่เนื่องจากในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานให้ยางเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ ดังนั้นการทดสอบแบบปริมาตรจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นจากสมบัตินี้ทำให้วิธีการทดสอบวัสดุลดลงเหลือเพียง 3 วิธี ดังนี้

3.1 การทดสอบแบบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test) ซึ่งสมมูลกับการทดสอบแบบการกดในแนวแกนเดียว (Uniaxial Compression Test)

3.2 การทดสอบแบบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equibiaxial Tensile Test) ซึ่งสมมูลกับการทดสอบแบบการกดเท่ากันในสองแนวแกน (Equibiaxial Compression Test)

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

โดยข้อมูลการทดสอบวัสดุทั้ง 3 แบบ ได้แก่ การทดสอบแบบการดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบแบบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน การทดสอบแบบการดึงแบบความกว้างคงที่ จะครอบคลุมพฤติกรรมของวัสดุอย่างต่อเนื่องนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยนำขึ้นยางทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และอัตราการยืดตัว (Stretch Ratio) ของยาง



ภาพที่ 6 ลักษณะการทดสอบวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก

ที่มา: Gent (2001)

4. พฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยาง

Turner and Brennan (1990) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมยืดหยุ่นหลายแนวแกนของยาง ซึ่งสามารถนำมาใช้กับวัสดุยางที่มีการยืดน้อยๆ เพราะที่การยืดตัวน้อยๆ พฤติกรรมยืดหยุ่นแนวแกนเดียวของยางเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางได้จากข้อมูลความสัมพันธ์ของความเค้นจริงกับอัตราส่วนการยืด โดยใช้วิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง ซึ่งจะพิจารณาให้อัตราส่วนปัวส์ซองเป็นค่าที่มีการผันแปร (Variable Value) ความสัมพันธ์ของความเค้น โมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนการยืดและอัตราส่วนปัวส์ซอง โดยนำข้อมูลการทดสอบยางแบบการดึงในแนวแกนเดียว และสามารถนำค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นไปทำนายพฤติกรรมเชิงกลของยาง การดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกน และการดึงแบบความกว้างคงที่ แต่มีเงื่อนไขว่าจะประยุกต์วิธีการอัตราส่วนปัวส์ซอง เพื่อทำนายข้อมูลของการทดสอบยางทั้งสามลักษณะได้ต้องมีการยืดตัวน้อยๆ ($\lambda \leq 1.8$) ถ้าเป็นการยืดตัวมากๆ ก็สามารถใช้ได้แต่ไม่สามารถรับรองผลได้ว่ามีความแม่นยำมากน้อยเพียงไร

เริ่มต้นจากสมการพื้นฐานทางวิศวกรรมอธิบายความเครียดในเทอมของโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ความเค้น และอัตราส่วนปัวส์ซอง

$$\sigma_1 = E[\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1)] / (1 - \nu^2) + \sigma_3 \quad (24)$$

$$\sigma_2 = E[\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1)] / (1 - \nu^2) + \sigma_3 \quad (25)$$

$$\nu = (\lambda_1 \lambda_2 - 1) / (\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 - 1) - 1) \quad (26)$$

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 (24) และ (25) สามารถเขียนเป็น

$$\sigma_1 = E[\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (27)$$

$$\sigma_2 = E[\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (28)$$

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงในแนวแกนเดียวดังแสดงในภาพที่ 6 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_u$ และ $\lambda_2 = \frac{1}{\lambda_u}$ แทนค่าลงในสมการที่ (26) (27) และ (28) จะได้ว่า

$$\nu = \frac{1}{(\lambda_u + \sqrt{\lambda_u})} \quad (29)$$

$$\sigma_u = \sigma_1 = E \left[\lambda_u - 1 + \nu \left(\frac{1 - \sqrt{\lambda_u}}{\sqrt{\lambda_u}} \right) \right] / (1 - \nu^2) \quad (30)$$

เมื่อ λ_u คือ อัตราส่วนการยืดในแนวการดึง

σ_u คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงในแนวแกนเดียว

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงเท่ากันในสองแนวแกนดังแสดงในภาพที่ 6 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B$ แทนค่าลงในสมการที่ (29) และ (30) จะได้ว่า

$$\nu = (\lambda_B + 1) / (2\lambda_B^2 + \lambda_B + 1) \quad (31)$$

$$\sigma_B = \sigma_1 = \sigma_2 = E[\lambda_B - 1 + \nu(\lambda_B - 1)] / (1 - \nu^2) \quad (32)$$

เมื่อ λ_B คือ อัตราส่วนการยืดในแนวการดึง

σ_B คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงเท่ากันในสองแนวแกน

พิจารณาในกรณีที่เป็นการดึงแบบความกว้างคงที่ดังแสดงในภาพที่ 6 จะได้ว่า $\lambda_1 = \lambda_s$ และ $\lambda_2 = 1$ แทนค่าลงในสมการที่ (29) และ (30) จะได้ว่า

$$\nu = 1 / (\lambda_s + 1) \quad (33)$$

$$\sigma_s = E(\lambda_s - 1) / (1 - \nu^2) \quad (34)$$

เมื่อ λ_s คือ อัตราส่วนการยืดในแนวการดึง

σ_s คือ ความเค้นจริงในแนวการดึงของการดึงแบบความกว้างคงที่

จากสมการที่กล่าวมานี้สังเกตเห็นว่าความเค้นในกรณีที่รับภาระลักษณะต่างๆ จะเป็นฟังก์ชันของโมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวส์ซองและอัตราส่วนการยืดตัวในแนวการดึงของแต่ละกรณี ดังนั้นสามารถหาความเค้นได้ หากกำหนดค่าอัตราส่วนการยืดในแนวการดึง โดยใช้สมการที่ (29) (30) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของภาระที่กระทำส่วนโมดูลัสความยืดหยุ่นหาได้จากข้อมูลการทดสอบการดึงวัสดุในแนวแกนเดียว โดยมีรายละเอียดดังนี้พิจารณาการดึงในแนวแกนเดียวจากสมการที่ (30)

$$\sigma_U = \sigma_1 = E \left[\lambda_U - 1 + \nu \frac{(1 - \sqrt{\lambda_U})}{\sqrt{\lambda_U}} \right] / (1 - \nu^2) \quad (35)$$

สามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\sigma_U = EP(\lambda_U, \nu) \quad (36)$$

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

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

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและนำไปใช้คือค่าความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress) และค่าความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถนำไปใช้แปลงเป็นค่าความเค้นจริงและอัตราส่วนการยืดตามลำดับได้

$$\sigma_U = \sigma_{Eng} (\varepsilon_{Eng} + 1) \quad (37)$$

$$\lambda_U = \varepsilon_{Eng} + 1 \quad (38)$$

เมื่อ σ_{Eng} คือ ความเค้นวิศวกรรมในแนวการดึง
 ε_{Eng} คือ ความเครียดวิศวกรรมในแนวการดึง

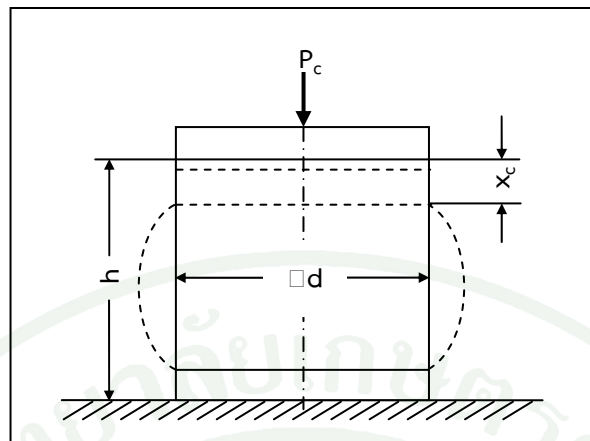
ดังนั้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของยางในสมการที่ (30) สามารถหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (39)

$$E = \sum_{i=1}^N \sigma_U P(\lambda_U, \nu_i) / \sum_{i=1}^N P^2(\lambda_U, \nu) \quad (39)$$

เมื่อ N คือ จำนวนจุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุ
 σ_{U_i} คือ ความเค้นจริงที่ได้จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่ i
 λ_{U_i} คือ อัตราส่วนการยืดที่ได้จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่ i
 ν^i คือ อัตราส่วนปัวส์ของค่าที่ i

5. ความแข็งดึงของวัสดุยาง

ความสามารถในการต้านทานการเสียรูป (Stiffness) ของวัสดุยาง (อุทิศ, 2554) จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยภายในของชิ้นส่วนยางนั้นหมายถึงรูปร่างของชิ้นส่วนและสมบัติเชิงกลของยาง ส่วนปัจจัยที่ 2 ลักษณะของโหลดที่กระทำกับชิ้นส่วน ซึ่งหาค่าได้เป็นอัตราส่วนของแรงเค้นต่อความเครียด เรียกว่า โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุยาง (Modulus of Elasticity) โดยรูปแบบของโหลดที่กระทำกับชิ้นส่วนยางแบบต่างๆ 6 รูปแบบพื้นฐาน คือ การรับแรงเฉือนอย่างง่ายที่ปลายชิ้น การรับแรงเฉือนตามแนวแกน การรับแรงเฉือนตามการหมุน การรับแรงบิด การรับแรงกดอัด และการรับแรงดึง ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงรูปแบบกดอัดที่ชิ้นส่วนยางแบบแผ่นยางที่ถูกออกแบบให้รับโหลดแบบกดอัด แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ชิ้นส่วนยางขณะรับแรงกดอัด

37 โดยจากความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด ค่าความแข็งตั้งของยางแสดงได้ดังสมการที่

$$K_c = \frac{P_c}{x_c} = \frac{AE_a}{h} \quad (40)$$

เมื่อ P_c คือ แรงกดอัด (N)

x_c คือ ระยะยุบตัวของชิ้นยาง (mm)

E_a คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นภายนอก (Apparent Elastic Modulus)

A คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่รับโหลด

h คือ ความสูงของชิ้นส่วนยาง

6. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

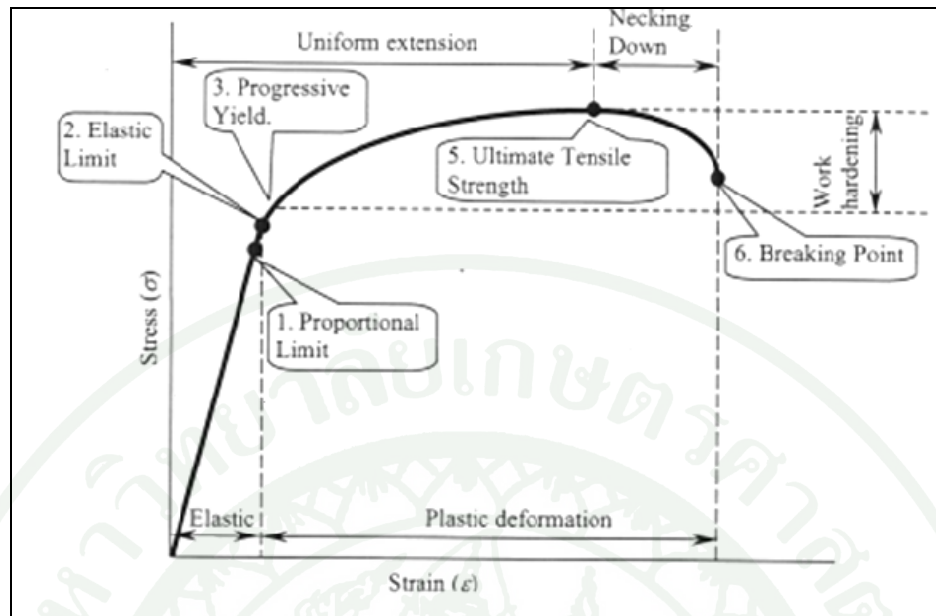
กฎของฮุก (Hook's Law) นั้น จะกล่าวไว้ในช่วงของขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งค่าความเค้นจะปฏิภาคตรงกับความเครียด โดยมีค่า “ยังส์โมดูลัส” เป็นค่าคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 8

$$\sigma = E\varepsilon \quad (41)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น (N/m^2 หรือ Pa)

ε คือ ความเครียด

E คือ ยังส์โมดูลัส (Young's Modulus, N/m^2)



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ที่มา: Wikidot (2013)

7. ทฤษฎีความเสียหาย

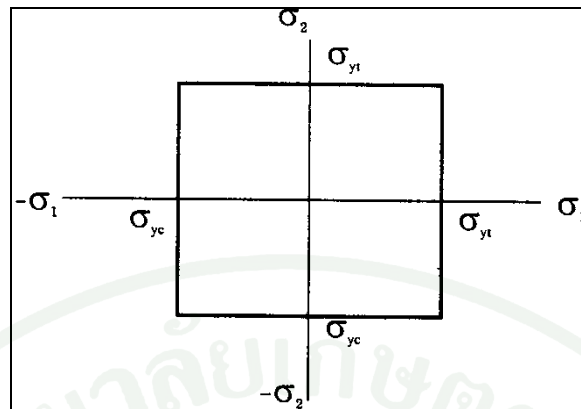
7.1 ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นหลักสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับ ความต้านแรงดึงครากของวัสดุนั้นพิจารณาจาก แสดงดังภาพที่ 9

$$\sigma_1 = \pm \frac{\sigma_y}{N} \quad \text{ถ้า} \quad |\sigma_1| > |\sigma_2| \quad (42)$$

หรือ

$$\sigma_2 = \pm \frac{\sigma_y}{N} \quad \text{ถ้า} \quad |\sigma_1| > |\sigma_2| \quad (43)$$



ภาพที่ 9 ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด

7.2 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

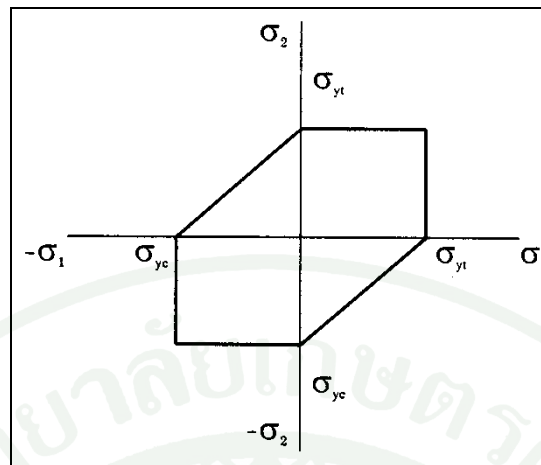
วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดในวัสดุมีค่าเท่ากับความต้านแรงเฉือนสูงสุดของวัสดุชนิดเดียวกันที่ได้จากการทดสอบแรงดึงเมื่อถึงจุดคราก จากกลศาสตร์วัสดุพบว่าความต้านแรงเฉือนสูงสุดเมื่อได้รับแรงดึงจนถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ $\frac{\sigma_y}{2}$ และเกิดบนระนาบเอียงทำมุม 45° กับแนวแรงดึงของชิ้นทดสอบ เพราะฉะนั้นสมการที่ต้องนำมาคิดในการออกแบบคือ

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \frac{\sigma_y}{2N} \quad (44)$$

ซึ่งจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \frac{\sigma_y}{N} \quad (45)$$

จากสมการ (45) สามารถนำมาสร้างรูปแสดงขอบเขตของความเค้นผสมที่เกิดขึ้นได้ โดยทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ขอบเขตของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำนวนมากจะมีสถานะของความเค้นเป็นกรณีพิเศษ ในกรณีนี้ถ้ายอมให้มีความเค้นเฉือนสูง

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_y}{N} \quad (46)$$

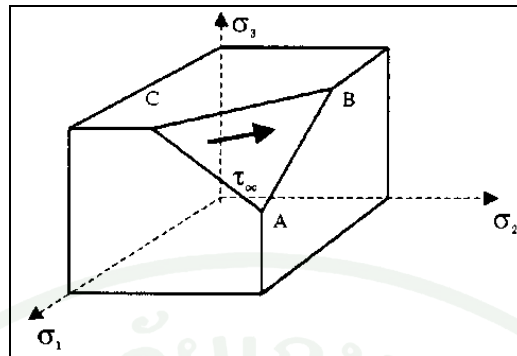
แล้วแทนค่า τ_{\max} ลง แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{1}{N} = \left[\left[\frac{\tau}{\tau_y} \right]^2 + \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (47)$$

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

7.3 ทฤษฎีความเค้นเฉือนวอนนิส

ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นเฉือนวอนนิสในวัสดุมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนวอนนิสที่ได้จากการทดสอบแรงดึงขึ้นทดลองขณะจุดคราก ระบายวอนนิส หมายถึง ระบายที่เอียงทำมุมกับทิศทางของความเค้นหลักทั้งสามเท่ากัน ทิศทางโคไซน์ (Directional Cosine) ของระนาบมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{3}$ และความเค้นเฉือนบนระนาบนี้เรียกว่า ความเค้นเฉือนวอนนิส τ_{oc} ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ระบายความเค้นวอนมิส

ในกรณีที่ชิ้นส่วนอยู่ภายใต้ความเค้นสามมิติ ค่าความเค้นวอนมิส คือ

$$\tau_{oc} = \frac{1}{3} \left((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right)^{1/2} \quad (48)$$

ในการทดสอบแรงดึง ความเค้นหลัก σ_2 และ σ_3 เท่ากับศูนย์ และเมื่อถึงจุดคราก ความเค้นหลัก $\sigma_1 = \sigma_y$ ดังนั้นความเค้นเฉือนวอนมิสจากสมการ (48) โดยให้ σ_2 และ σ_3 เท่ากับศูนย์ และ $\sigma_1 = \sigma_y$ นั่นคือ

$$\tau = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_y = 0.471 \sigma_y \quad (49)$$

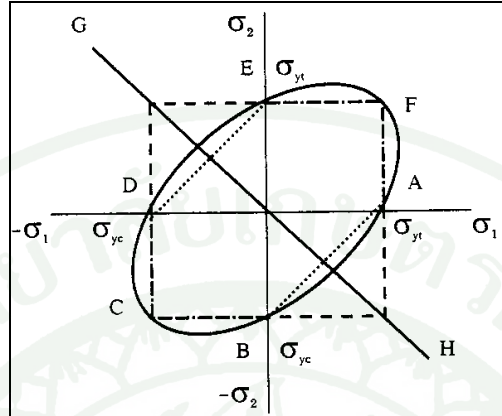
จากทฤษฎีนี้ความเสียหายหรือการคราก จะเกิดขึ้นเมื่อ $\tau_{oc} = \tau$ นั่นคือเมื่อ

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2} \quad (50)$$

ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไป มักพิจารณาความเค้นในระบบระนาบสองมิติ ซึ่ง $\sigma_3 = 0$ จะสามารถจัดรูปสมการ (50) ได้ใหม่ คือ

$$\left(\frac{\sigma_y}{N} \right)^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (51)$$

ซึ่งสมการ (51) เป็นสมการของรูปวงรี แสดงขอบเขตของความเค้นที่ยอมมีได้ในวัสดุ สำหรับชิ้นงานที่ออกแบบจึงเป็นรูปวงรี ดังแสดงภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบขอบเขตของความเค้นของทฤษฎีความเสียหายต่างๆ

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

เนื่องจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดล้อมรอบพื้นที่ที่น้อยที่สุด ดังนั้นชิ้นส่วนที่คำนวณหาขนาดโดยใช้ทฤษฎีนี้จะมีขนาดโตกว่าที่คำนวณโดยใช้อีกสองทฤษฎี (ยกเว้นที่จุดรวมกัน)

ถ้าสถานะของความเค้นในกรณีของเพลาส่งกำลังเมื่อแทนค่า σ ลงในสมการที่ (52) แล้วจัดรูปแบบใหม่จะได้

$$\frac{\sigma_y}{N} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2} \quad (52)$$

หรือ

$$\frac{1}{N} = \left[\left[\frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_y} \right]^2 + \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (53)$$

ถ้าให้ $\tau_y = \frac{1}{3}\sigma_y = 0.577\sigma_y$ แล้ว อาจจัดรูปสมการที่ (53) ได้ คือ

$$\frac{1}{N} = \left[\left[\frac{\tau}{\tau_y} \right]^2 + \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (54)$$

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

8. ผังแสดงเหตุและผล

8.1 แนวความคิดของผังเหตุและผล

ความหมายของผังแสดงเหตุและผล ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น คือผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง จากแนวความคิดเกี่ยวกับกระบวนการของ ชิวฮาร์ท (Shewhart) ที่ว่า กระบวนการสามารถแยกเป็นสาเหตุหลักๆ ได้ 4 ประการ กล่าวคือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัตถุดิบ (Material) นั้น ศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิกาวา (Kaoru Ishikawa) ได้นำแนวความคิดของชิวฮาร์ทมาพัฒนาโดยการสร้างเป็นผังแสดงสาเหตุของปัญหา ซึ่งมีลักษณะคล้ายก้างปลาหรือที่เรียกว่า ผังก้างปลา แสดงดังภาพที่ 13 โดยผังนี้มีส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูกของปลาที่รวบรวมปัจจัยที่เป็นสาเหตุของปัญหา และส่วนหัวปลาที่เป็นข้อสรุปสาเหตุที่กลายเป็นปัญหา

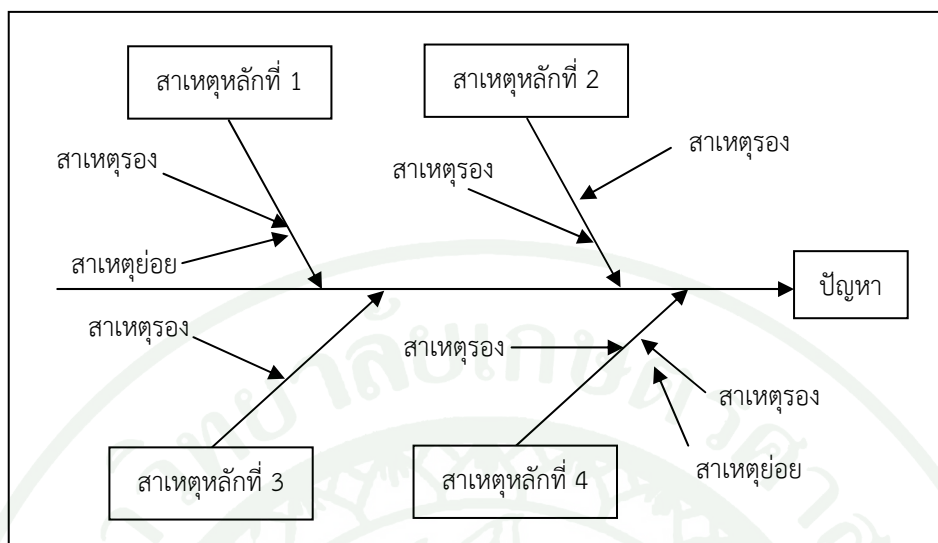
8.2 วิธีการสร้างผังแสดงเหตุและผล

8.2.1 ทำการเลือกปัญหาที่เราให้ความสนใจ และต้องการทราบที่มาของปัญหานั้น โดยทำการระบุในส่วนของหัวปลา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระบุปัญหา

8.2.2 ระบุสาเหตุหลักของปัญหา

8.2.3 ระบุสาเหตุรอง ซึ่งเป็นดังรายละเอียดปลีกย่อยของสาเหตุหลัก

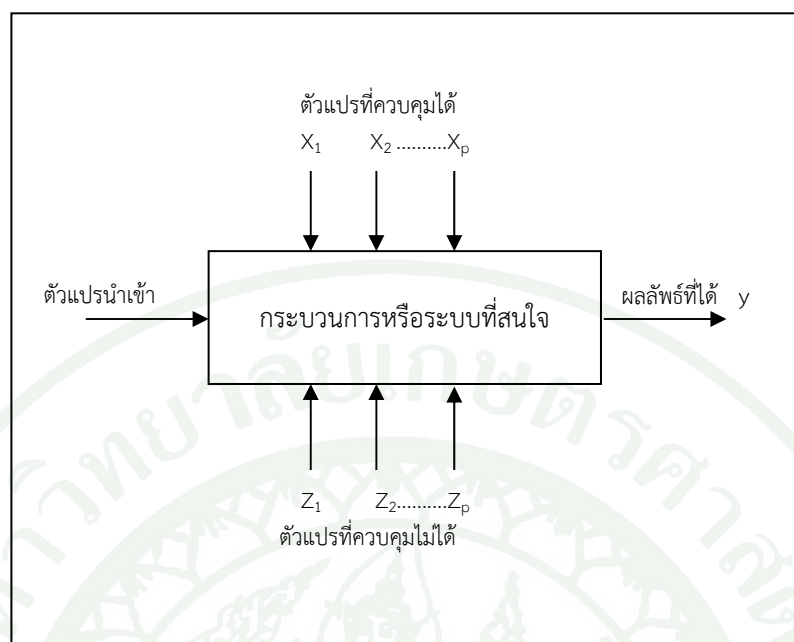
8.2.4 ระบุสาเหตุย่อย



ภาพที่ 13 ผังแสดงเหตุและผล

9. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Experimental Design of Experiments) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables Factors) แสดงดังภาพที่ 14 ซึ่งการทดลองสามารถทำได้ด้วยวิธีการทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) หรือการทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation) (ประไพศรี และ พงศ์ชนัน, 2551)



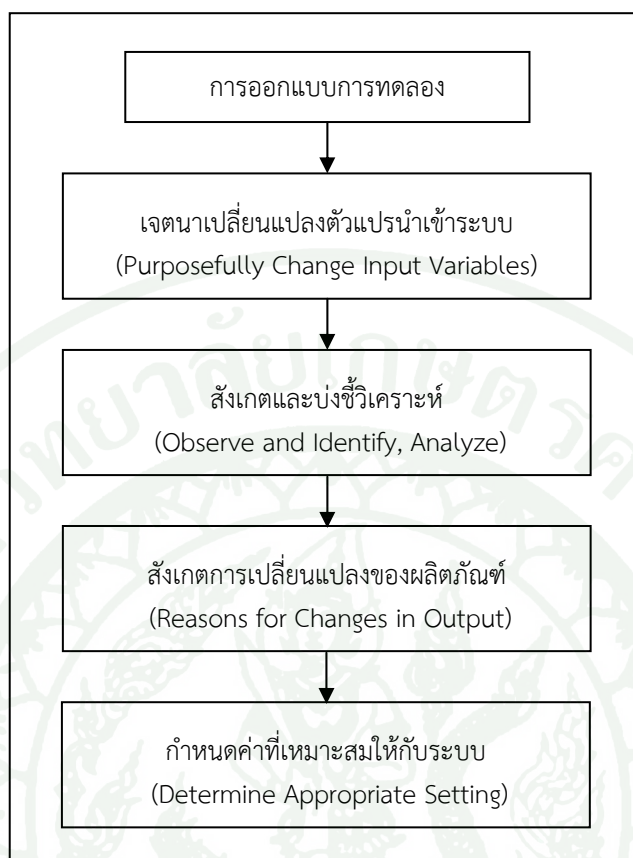
ภาพที่ 14 องค์ประกอบของการออกแบบการทดลอง

9.1 ปัจจัยในกระบวนการหรือระบบสามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ

9.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ

9.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ เนื่องจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย ต้นทุนในการควบคุมสูงมาก มีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบ ซึ่งโดยหลักการแล้ว ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน (Noise Variables) มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากในการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม (ซึ่งในบางระบบอาจพิจารณาให้เป็นตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้) อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ในทุกกระบวนการสามารถที่จะระบุและบันทึกไว้เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ ซึ่งหลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

ดังนั้นในภาพรวมของการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์ หรือค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบ หรือกระบวนการ เช่น ในการผลิตน้ำอัดลม การกำหนดส่วนผสมเพื่อให้ได้รสชาติที่เหมาะสม การกำหนดความเร็วของสายพานเพื่อประโยชน์ในการบรรจุจะทำให้สูญเสียน้ำอัดลมน้อยที่สุด เป็นต้น

9.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

9.2.1 การทำการทดลองซ้ำ (Repeat) มีสมบัติที่สำคัญสองประการ คือ ทำให้ผู้ทดลอง สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณ ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองแล้วการทดลองซ้ำ จะสามารถทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณที่ ถูกต้องมากยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบบนี้

9.2.2 การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึงการทดลองที่มีลำดับของการทดลองและการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องมีการกระจายอย่างอิสระ การที่เราได้ทำการทดลองแบบสุ่ม จะทำให้เราลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

9.2.3 การทำการทดลองแบบบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ

9.3 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

9.3.1 กำหนดและทำความเข้าใจปัญหา คือ การศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการหรือระบบ เพื่อกำหนดปัญหาในการออกแบบการทดลองให้แน่ชัด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

9.3.2 เลือกปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง คือ การเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง การกำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง

9.3.3 เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ โดยจะเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษา

9.3.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ในการเลือกการออกแบบการทดลองจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเสมอ โดยจะพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรปลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อก หรือการทดลองแบบสุ่มอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่

9.3.5 ทำการทดลองตามวิธีการที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้ว

9.3.6 วิเคราะห์ผลโดยใช้หลักการทางสถิติ คือ การนำวิธีทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทำการทดลองไว้ เพื่อช่วยในการหาข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่

9.3.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการสรุปผลของกระบวนการที่ทำการทดลอง ซึ่งอาจแสดงในรูปของตาราง กราฟ หรือแผนภูมิ

10. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) อีกวิธีหนึ่งซึ่งให้ผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ของปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ โดยปัญหาเหล่านี้อาจอธิบายอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หรืออยู่ในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น ซึ่งผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ของปัญหาเหล่านี้หาได้ยากหรืออาจจะหาไม่ได้เลย หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นต้น เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆ พื้นที่หรือเป็นปริมาตรหลายๆ ปริมาตรต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่าเอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ โดยผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์ต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขที่ขอบที่กำหนดให้ ซึ่งหมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ และทำการสร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์โดยสมการที่สร้างขึ้นมาต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายปัญหาเหล่านั้น จากนั้นนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ โดยสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาจะเป็นระบบสมการพีชคณิต จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขที่ขอบลงไปในระบบสมการรวม แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการดังกล่าวก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้นๆ ผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีนี้จะถูกต้องมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับ 2 ประการหลัก

การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างจริงของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด

การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) มีข้อดีเหนือกว่าการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีการอื่นดังนี้

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปวิเคราะห์ปัญหาได้หลายแขนง เช่น การวิเคราะห์ความเค้น การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การวิเคราะห์การไหล เป็นต้น

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่มีข้อจำกัดทางด้านรูปร่างของปัญหา นั่นคือสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้โดยง่าย และสะดวก

สามารถจำลองการกระทำของไหลในสภาพต่างๆ เช่น ไหลที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้ ใกล้เคียงกับสภาพเป็นจริง

ใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ประกอบไปด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มี ความยุ่งยาก

ไม่มีข้อจำกัดในด้านสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์

ไม่มีข้อจำกัดทางด้านของเงื่อนไขที่ขอบ เงื่อนไขบังคับ และจุดรองรับ

ในการออกแบบและผลิตชิ้นงานในงานวิศวกรรมมักนิยมใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์ก่อนที่จะผลิตชิ้นงานจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลา

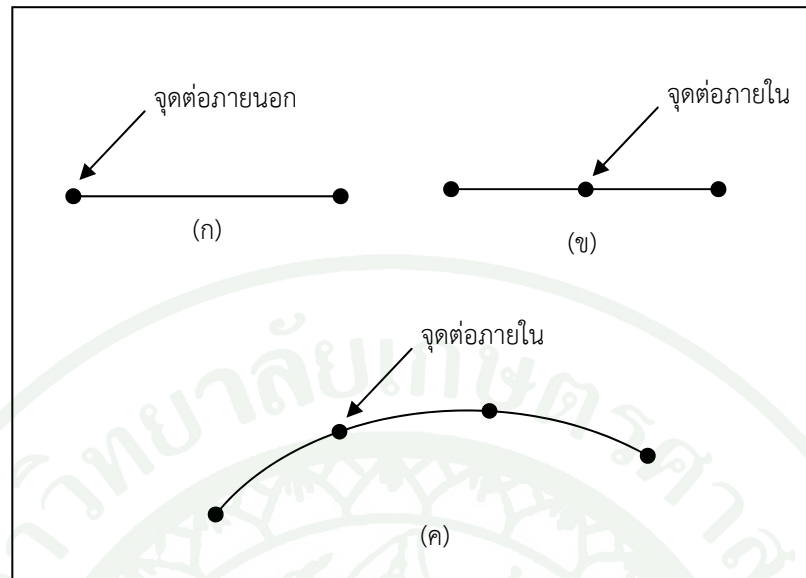
10.1 การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากรูปแบบของชิ้นงานต่างๆ ในทางวิศวกรรมโดยปกติจะมีความซับซ้อน วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์ ปัญหาต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมที่เป็นโครงสร้างและไม่เป็นโครงสร้าง โดยการวิเคราะห์ปัญหาที่ เกี่ยวข้องกับโครงสร้างนับตั้งแต่ปัญหาการยึดหยุ่นของแข็ง การถ่ายเทความร้อน ตลอดจนการไหลของ ของไหลและประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานชนิดต่างๆ ได้ หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆ ที่เราสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์โดยใน ขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จะใช้ในการทดลอง เป็นต้น

10.2 ชนิดของเอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การเลือกใช้ให้เหมาะสมกับรูปร่าง และลักษณะการกระทำของภาระ เอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับปัญหาเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างหนึ่งในการ วิเคราะห์ปัญหาความเค้น (Stress Analysis) มีเอลิเมนต์ให้เลือกหลายลักษณะขึ้นอยู่กับลักษณะ รูปร่างและภาระของปัญหาที่จะวิเคราะห์ เอลิเมนต์อาจจะแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ เอลิเมนต์มิติ เดียว เอลิเมนต์สองมิติ เอลิเมนต์สามมิติ และเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกน ในโปรแกรมที่คำนวณ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากมีเอลิเมนต์ให้เลือกหลายลักษณะแล้ว การเลือกลักษณะของ ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ที่คำนวณได้ โดยแบ่งออกเป็น เอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง (First Order Element) และเอลิเมนต์อันดับที่สอง (Second Order Element) มีความแตกต่างกันที่เอลิเมนต์อันดับที่สองจะมีจุดต่อ (Node) ต่อเอลิ เมนต์มากกว่าจึงให้ความแม่นยำกว่าเอลิเมนต์อันดับที่หนึ่ง เหมาะกับงานที่มีความโค้งมากๆ และ บริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) แต่ไม่เหมาะกับปัญหาที่มีเงื่อนไข การสัมผัส ปัญหาการกระแทก (Impact) และปัญหาที่เกิดการบิดตัว (Distort) ของเอลิเมนต์

10.2.1 เอลิเมนต์มิติเดียว เอลิเมนต์ชนิดนี้นิยมนำไปใช้วิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่เป็นเส้นลวด ท่อยาวชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน แสดงดังภาพที่ 16

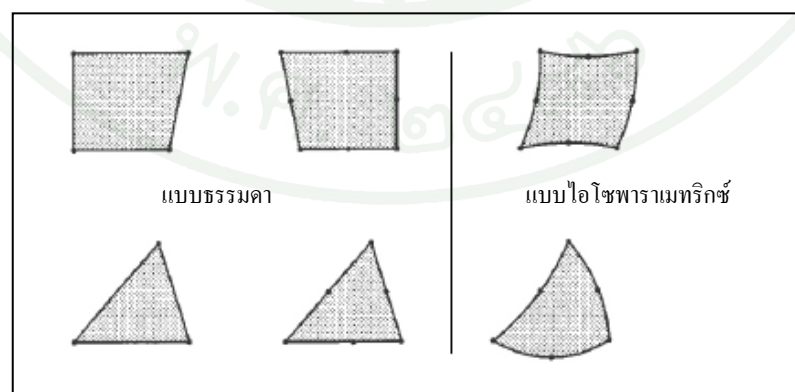


ภาพที่ 16 เอลิเมนต์มิติเดียว

ที่มา: เดช (2541)

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

10.2.2 เอลิเมนต์สองมิติ เอลิเมนต์ชนิดนี้มักใช้กับการวิเคราะห์ชิ้นงานในแนวระนาบ แกน $x-y$ โดยทั่วไปจะมีรูปทรงเป็นสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ประกอบเป็นด้านด้วยเส้นตรงหรือโค้ง แสดงดังภาพที่ 17

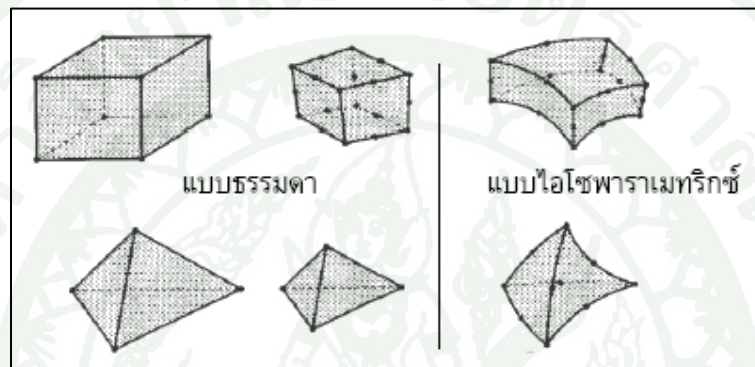


ภาพที่ 17 เอลิเมนต์สองมิติ

ที่มา: เดช (2541)

โดยทั่วไปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับการเลือกใช้มากกว่าเอลิเมนต์ชนิดอื่นๆ เพราะในระดับขั้นความอิสระที่เท่ากันเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า แต่ในบางกรณีที่ต้องกำหนดเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมมาใช้ เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์เหมาะกับการแบ่งโดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม

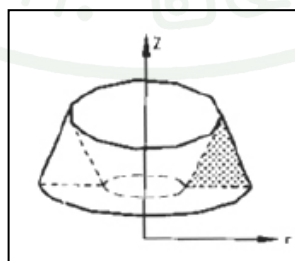
10.2.3 เอลิเมนต์สามมิติ รูปร่างในกรณีนี้จะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และรูปทรงสี่หน้า แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 เอลิเมนต์สามมิติ

ที่มา: เดช (2541)

10.2.4 เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Element) นอกจากเอลิเมนต์ทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมาแล้วยังมีเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกนซึ่งใช้วิเคราะห์กับรูปทรงที่มีความสมมาตรรอบแกน นอกจากการวิเคราะห์จะได้ผลเฉลยที่ถูกต้องเช่นเดิมแล้วยังลดภาระในการคำนวณลง เนื่องจากถ้าวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งชิ้นงานจะเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการและใช้เวลาในการคำนวณมาก แสดงดังภาพที่ 19

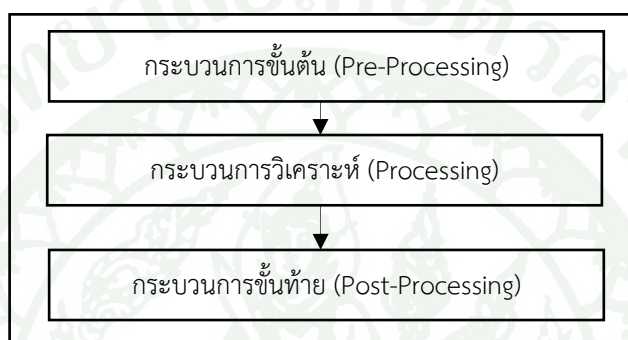


ภาพที่ 19 เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน

ที่มา: เดช (2541)

10.3 ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และเป็นที่ยอมรับใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีลักษณะรูปร่างและพฤติกรรมที่ซับซ้อน ไม่ว่าจะวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือสภาพยืดตัว (Plastic) ปัญหาที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการแก้ปัญหนี้ออกได้เป็น 3 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 20 ดังนี้



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการทำงานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

10.3.1 กระบวนการขั้นต้น (Pre Processing)

ขั้นตอนการเตรียมการประมวลผลเป็นขั้นตอนการจำลองปัญหาทางกายภาพ (Modeling) โดยเริ่มจากหาเอกลักษณ์ของปัญหาทางกายภาพที่จะวิเคราะห์ (Identify Problem) ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาที่วิเคราะห์เป็นปัญหาลักษณะใด ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์คืออะไร เป็นต้น คำตอบที่ได้เหล่านี้จะนำไปสู่การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาอันประกอบไปด้วย ลักษณะรูปร่างของแบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขที่ขอบและโหนดที่กระทำ (Boundary Condition) เงื่อนไขการสัมผัส (Contact Condition) การเลือกแบบจำลองของวัสดุ (Constitutive Equation) การเลือกสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์ (เลือกวิธีการที่จะวิเคราะห์ เช่น ปัญหาทางความร้อน การวิเคราะห์ความเค้น เป็นต้น) การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ และกระบวนการเมช (Meshing) ที่จะแบ่งรูปร่างของแบบจำลอง ออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ (Discretization) โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องสอดคล้องกับเอกลักษณ์ของปัญหาทางกายภาพที่วิเคราะห์ด้วย

10.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล (Processing)

เป็นขั้นตอนการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาซึ่งสร้างได้หลายวิธี เช่น วิธีการโดยตรง (Direct Methods) วิธีการแปรผัน (Variational Methods) และวิธีการถ่วง

น้ำหนักเศษตกค้าง (Weighted Residual Methods) โดยอาศัยข้อมูลและข้อกำหนดจากขั้นตอนก่อนการประมวลผล จากนั้นทำการแก้ระบบสมการเพื่อหาคำตอบที่ต้องการ

10.3.3 ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post Processing)

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

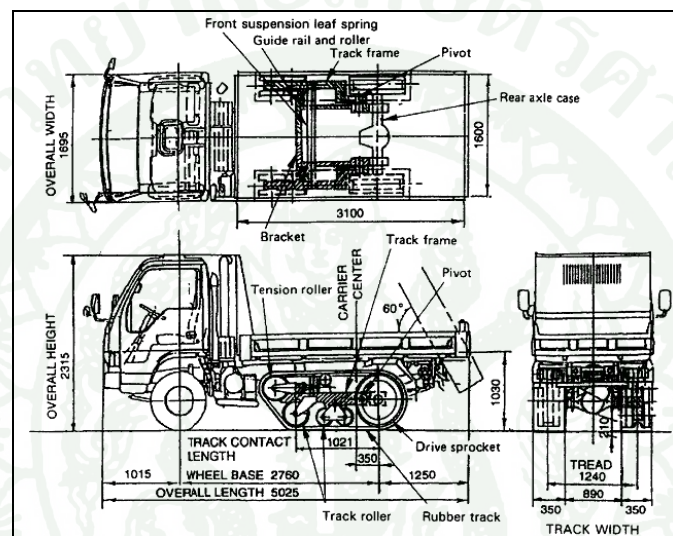
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Khuri (1993) แหวนยางกันซึมถูกวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ โดยใช้การวิเคราะห์เป็นแบบความเค้นระนาบเทียบกับการทดสอบจริง โดยคุณสมบัติของยางที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น กดอัดไม่ได้ โดยจะใช้แบบจำลองของมูนนี่-รีฟลินในการทำนายพฤติกรรมของยาง โดยจากทดสอบในห้องทดลองพบว่าโมเลกุลของยางในแหวนกันซึม 27.5 เปอร์เซ็นต์ จะเคลื่อนที่ในแนวที่มีการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ถึงแม้ว่ายางจะไม่มีการแตกแสดงให้เห็นเด่นชัด ดังนั้นการเปรียบเทียบระหว่างค่าทดสอบจริงและค่าที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงแนะนำให้ใช้ค่าความเค้นวอนมิสแทน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

Marsili (1996) ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบดินตะขาบของรถแทรกเตอร์บนสนามทดสอบซึ่งดินตะขาบมี 2 ประเภท คือ ประเภทยางและเหล็กดินตะขาบ เพื่อศึกษาผลกระทบการบดอัดบนพื้นดินทางการเกษตร ซึ่งพิจารณาความดันที่กระจายตัวบนพื้นดินโดยใช้กรวยวัดการแทงทะลุของดิน ในกรณีการบดอัดดินที่ 1 3 และ 4 คณะวิจัยพบว่าเหล็กดินตะขาบเกิดการบดอัดดินน้อยเมื่อเทียบกระจายความเค้นในการบดอัดดินของยางดินตะขาบ

Teramoto *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษารถบรรทุกกึ่งยางดินตะขาบที่มีความเร็วสูงสำหรับการเดินทางบนถนนที่ขรุขระและถนนแบบเรียบ แสดงดังภาพที่ 21 ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างแบบแรกได้ประยุกต์ใช้ยางดินตะขาบหุ้มเหล็ก และพบว่าไม่เหมาะกับโครงสร้างของโช้ล้อดินตะขาบ จึงได้ใช้แบบใหม่สำหรับแรงขับโดยตรงแกนโลหะที่ติดยางดินตะขาบนำมาเสริมแรงร่วมกับเกลียวสายเคเบิ้ล โดยเป็นการพัฒนาเพื่อตอบสนองทุกการทำงานที่ต้องการความต้านทานต่อการขี้อาหิ ความต้านทาน

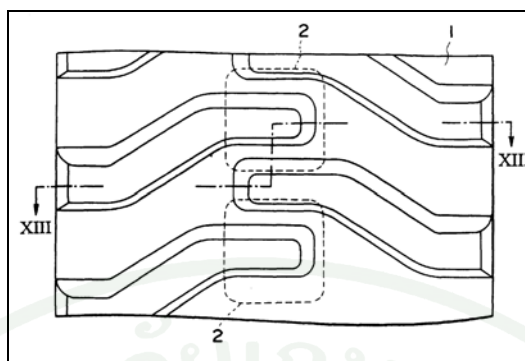
ต่อการขับเคลื่อนที่ต่ำ เกิดความร้อนต่ำในสายเคเบิล เกิดเสียงรบกวนต่ำ การสั่นสะเทือนต่ำ มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นที่ดี และอื่นๆ สำหรับการพัฒนารองล้อยางตีนตะขาบเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานที่ช่วงล่างมีการสั่นสะเทือน และยืดอายุการใช้งานของรถบรรทุกกึ่งล้อยางตีนตะขาบ โดยทั่วไปรถบรรทุกขุดดินหรือหินที่ขับเคลื่อน 4 ล้อ ซึ่งด้านหลังที่เปลี่ยนมาใช้ล้อยางตีนตะขาบจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุก 2 ตัน มีความคล่องตัวสูง และความเร็วในการขับเคลื่อนได้เร็วกว่า 60 กม./ชม. ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของรถล้อ แกนโลหะของล้อยางตีนตะขาบที่พัฒนาสำหรับการขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงซึ่งได้ผลจากการทดสอบ และการรายงานการตลาด



ภาพที่ 21 รถบรรทุกกึ่งล้อยางตีนตะขาบ

ที่มา: Teramoto *et al.* (1996)

Katsuhiko *et al.* (1999) ทำการศึกษาช่วงล่างของยานพาหนะที่ใช้ยางล้อตีนตะขาบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้มีการปรับปรุงการดูดกลืนที่ต่ออุปกรณ์ต่อพ่วง ในการดูดกลืนของยางล้อตีนตะขาบที่ต่ออุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอกซึ่งใช้สำหรับการส่งแรงขับเคลื่อนหรือแรงดัน ยางตีนตะขาบที่ต่ออุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอก โดยสมบัติของยางมีความยืดหยุ่นสูงและรางส่วนใหญ่จะอยู่บนอุปกรณ์ต่อพ่วงไว้สำหรับการส่งแรงขับเคลื่อนหรือเกิดการขัดระหว่งการดูดกลืน ร่องล้อ เพ็องหรือลูกกลิ้ง หน ต่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเกิดแรงเสียดทาน ซึ่งยางสังเคราะห์มีสมบัติแรงเสียดทานที่ต่ำหรือยางสังเคราะห์มีความแข็งของ Barcol (ประเภท A) 40 หรือน้อยกว่านั้นที่หนึ่งหรือพื้นผิวของแต่ละการดูดกลืน โดยเป็นที่ทราบกันว่าร่องรางที่สัมผัสพื้นผิวหรือพื้นผิวดัดกับชิ้นส่วนอื่นๆด้วยเช่นกัน แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ภาพตัดขึ้นยางตีนตะขาบ

ที่มา: Katsuhiko *et al.* (1999)

Entrekin (1999) การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนและประกอบด้วยเงื่อนไขที่มีความซับซ้อน เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้าแบบ 4 จุดต่อ เป็นลักษณะเอลิเมนต์ที่ซับซ้อนน้อยที่สุด และมักถูกใช้ในการวิเคราะห์ อันเนื่องมาจากว่าเอลิเมนต์รูปทรงดังกล่าวนี้สามารถถูกใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทุกรูปทรง อย่างไรก็ตามเอลิเมนต์ชนิดนี้มักต้องใช้จำนวนค่อนข้างมากจึงจะให้ผลเฉลยที่ถูกต้อง ดังนั้นการวิเคราะห์จึงต้องใช้ทรัพยากรค่อนข้างมาก แต่ในทางกลับกันการใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ จึงถูกนำมาใช้แทน ข้อดีของเอลิเมนต์ประเภทนี้ คือ การที่เส้นต่อเป็นรูปทรงสี่หน้านั้นสามารถบิดงอได้ จึงสามารถใช้จำนวนเอลิเมนต์น้อยกว่าในการสร้างแบบวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จากรูปทรงสามมิติเดียวกัน นอกจากนี้ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ จึงให้ผลเฉลยการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงอย่างมาก

Pust *et al.* (2001) ได้ศึกษาค่าความแข็งตึงของยางที่ใช้เข้ามาทำหมอนรองกระดูกไฟจำนวน 3 แบบ การทดสอบจะใช้ความเครียดเริ่มต้นสำหรับการสั่นสะเทือนคือ 0.03 0.06 และ 0.1 MPa ระหว่างความถี่ช่วง 10 ถึง 100 Hz จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งตึงนั้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.1 ถึง 0.23 Nmm⁻³ เมื่อมีความถี่เพิ่มขึ้น ในทางเดียวกันค่าความแข็งตึงของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดเริ่มต้นสำหรับการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น

Cheng and Chen (2003) ในงานวิจัยนี้การทดสอบการดึงยาง EPDM เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดจะถูกทดสอบด้วยอัตราการดึงที่ต่างๆ กัน เริ่มตั้งแต่การทดสอบที่มีการดึงเสมือนอยู่ในสภาพสถิตที่อัตราการความเครียดน้อยกว่า 0.4 1/s และการดึงเสมือนอยู่ในสภาพพลวัตที่อัตราการความเครียดในช่วง 2800-3200 1/s จากการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดจะขึ้นกับปัจจัยของอัตราการความเครียดที่ใช้ในการดึง

นัย (2544) ได้กล่าวถึงดอกยางที่เป็นส่วนนอกสุดของยางอยู่เหนือโครงยางที่สัมผัสกับพื้นผิว ดอกยางทำหน้าที่ยึดเกาะพื้นผิวและป้องกันโครงผ้าใบสึก เป็นส่วนที่เกิดการเสียดสีอยู่ตลอด ถ้ารถ

ฟาร์มแทรกเตอร์ทำงานบนถนนแห้งและเรียบแล้วดอกยางก็ไม่มีความจำเป็น แต่เนื่องจากรถฟาร์มแทรกเตอร์ต้องทำงานในไร่นาบนสภาพพื้นดินต่างๆ กัน แสดงดังภาพที่ 23 ดอกยางจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ยางของยานทุกประเภทจะต้องมีดอกยาง ยกเว้นยางของรถถนนและยางของรถแข่งที่ใช้ความเร็วสูงบนถนนเรียบแห้ง การเลือกใช้ดอกยางที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่มีความสำคัญที่จะทำให้ผู้ใช้ได้รับประโยชน์จากการใช้งานอย่างเต็มที่และจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย



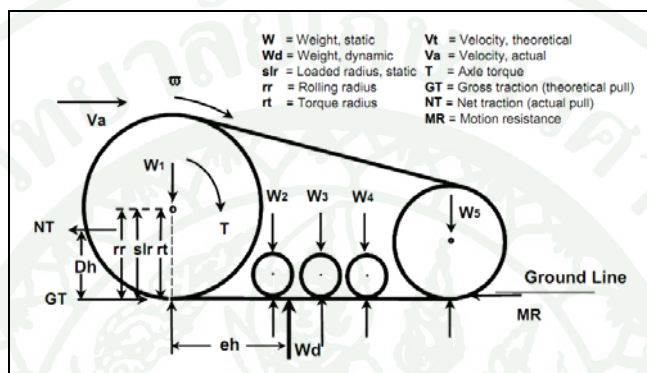
ภาพที่ 23 รถฟาร์มแทรกเตอร์ที่ใช้ล้อตีนตะขาบในปัจจุบัน

ที่มา: นัย (2544)

Rahman *et al.* (2005) งานวิจัยนี้จะเน้นเกี่ยวกับการออกแบบยางล้อของพาหนะแบบพิเศษสำหรับใช้งานบนทางขรุขระบนผิวดินเลน โดยการศึกษาของงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของดินเลนโดยใช้เครื่องมือวัดทางวิศวกรรมหลายตัวเข้าร่วมกัน การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง Wtkeham Farrance 25402 เพื่อที่จะใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการยึดเกาะระหว่างอนุภาค และค่าโมดูลัสแรงเฉือนของดินเลน สำหรับการทดสอบแรงกดตัวจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่องมือใช้กำลังแรงที่ถูกสร้างขึ้นเป็นพิเศษเพื่อที่จะทราบถึงค่าความแข็งดิ่งของตำแหน่งพื้นผิว และชั้นในของดินเลน จากนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบไปด้วยยางล้อที่ออกแบบมาพิเศษและดินเลนที่มีคุณสมบัติที่วัดได้ข้างต้นได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะใช้ในกระบวนการปรับแบบของล้อยางให้มีความเหมาะสมที่สุด

Grisso *et al.* (2006) ได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์การลากและดิน ในการทำนายประสิทธิภาพการทำงานของยานพาหนะออฟโรด ตัวอย่างเช่น ผลการดำเนินงานของยางที่ใช้ในพื้นที่การเกษตรได้รับการพัฒนาเป็นครั้งแรกโดย Brixius ซึ่งการทำนายประสิทธิภาพการฉุดลากและความต้านทานการเคลื่อนไหวย ต่อมา Al-Hamad และคณะ ได้ทำการปรับปรุงสมการ Brixius ที่ใช้ทำนายประสิทธิภาพของยางเรเดียล Zoz and

Grisso ได้แสดงให้เห็นถึงการคำนวณที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการทำซ้ำสำหรับการทำนายประสิทธิภาพการทำงานขับเคลื่อน 2 และ 4 ล้อของรถแทรกเตอร์ โดยรถแทรกเตอร์และยางตีนตะขาบจะกลายเป็นที่นิยมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่เราจะการทำนายความสามารถในการดำเนินงานของยานพาหนะพร้อมกับยางล้อตีนตะขาบสำหรับใช้ทางการเกษตร บทความนี้กล่าวถึงการพัฒนาของรูปแบบการทดลองและความถูกต้องของมันโดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คาดการณ์ที่มีการเผยแพร่ผลการทดลองดังที่ได้กล่าวข้างต้น แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ระบบการตั้งชื่อทางการควบคุม และทางกลศาสตร์ของยางล้อตีนตะขาบ

ที่มา: Robert *et al.* (2006)

YU (2006) ทำการศึกษายางตีนตะขาบต้นแบบที่ทำนายความดันและความเครียดของยางตีนตะขาบต้นแบบสามารถยืนยันการทำนายกับการทดลองระหว่างยางตีนตะขาบกับสภาพดิน และพื้นคอนกรีตได้ โดยก่อนจะนำมาเปรียบเทียบได้พิจารณาที่ผิวดอกยางและร่องดอกยางตลอดสายพานของล้อยางตีนตะขาบเคลื่อนที่บนพื้นแข็งที่ราบ

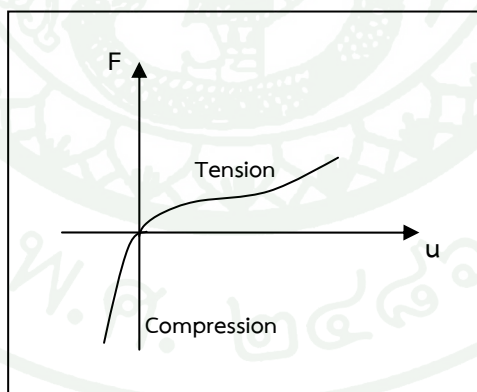
Ladislav *et al.* (2007) ทำขึ้นทดสอบยางที่ถูกออกแบบมาใช้สำหรับนำมาลดเสียงและการสั่นสะเทือนของล้อรถรางถูกทำให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยแรงแบบฮาร์โมนิกในห้องปฏิบัติการด้วยความถี่ 10 20 และ 30 Hz และมีแอมพลิจูดระหว่าง 0.25 ถึง 2.25 กิโลนิวตัน และมีแรงเริ่มต้นสำหรับให้เกิดการสั่นสะเทือน 6 กิโลกรัม การวัดแรงและการเสียรูปที่เกิดขึ้นถูกวัดด้วยเครื่องมือแต่ละประเภท ผลของการทดสอบจะถูกนำเสนอในลักษณะของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแอมพลิจูด และมุมเฟสกับแอมพลิจูด

Michelle and Ouyang (2007) การทดสอบการดึงของยางสไตรีนบิวตาไดอีนพบว่ายางจะมีค่าโมดูลัสหรือค่าความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อความเร็วของการดึงขึ้นงานทดสอบนั้นสูงขึ้น แต่ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะซ้อนทับกันเมื่อมีการดึงด้วยค่าอัตราความเครียดที่เร็วกว่า 280 1/s แต่สำหรับค่าตัวแปรการทดสอบการดึงอื่นๆ เช่น ค่าความเค้นแตกหัก ความแข็งแรง และความทนของยางนั้นจะลดลงเมื่อความเร็วของการดึงขึ้นงานทดสอบนั้นสูงขึ้น

Heinrich and Kluppel (2008) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษายานพาหนะของแรงเสียดทานของล้อ ยางบนถนนที่เกิดจากแรงที่กระทำบนล้อ ความเร็วของยานยนต์ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดย การศึกษาได้แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การวิเคราะห์ในส่วนของการสัมผัสของการลื่นไถลของยาง โดยจะดูลักษณะ การกระจายตัวของพลังงาน จากนั้นจึงวิเคราะห์ส่วนของแรงที่กระทำต่อล้อเป็นช่วงๆ และส่วนสุดท้าย วิเคราะห์ผลกระทบของแรงที่ไม่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ที่มีต่อแรงเสียดทานระหว่าง ยางล้อและพื้นถนน

Mohsenimanesh *et al.* (2009) ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการ กระจายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนล้อเมื่ออยู่ในสภาวะสถิตขณะอยู่บนถนน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่ เชิงเส้นจะถูกประยุกต์ใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ แบบจำลองของวัสดุที่ใช้จะ เป็นแบบไม่เนื้อเดียวกันจะถูกใช้เพื่อเป็นแบบวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุ จากการวิเคราะห์พบว่า ขณะที่ล้อสัมผัสกับพื้นผิวนั้นจะมีการกระจายตัวของหน่วยแรงกระทำตรงกลางของล้อมากกว่าส่วน อื่นๆ ของล้อ ค่าของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เทียบกับค่าจากการทดสอบเชิงกลพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวนี้มีความ น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ยางล้อประเภทอื่นได้

อุทิศ (2553) การเลือกใช้แบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดสำหรับการจำลอง พฤติกรรมของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก สิ่งที่ต้องพิจารณาคือลักษณะข้อมูลการทดสอบวัสดุ ดังกล่าว ช่วงของความเครียดที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ขณะใช้งาน รวมถึงลักษณะของโหลดที่กระทำเพื่อ ทราบถึงรูปแบบการเสียรูปของผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 25

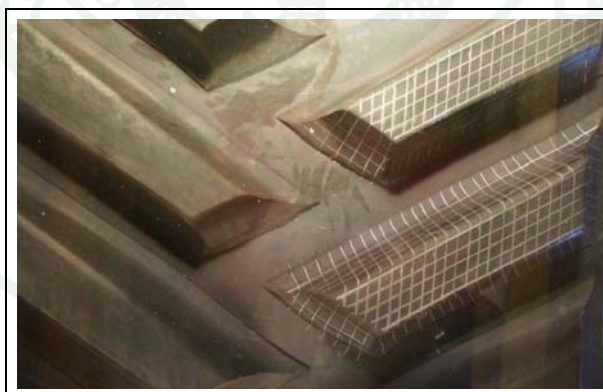


ภาพที่ 25 ผลลัพธ์การขึ้นตราบสำหรับทดสอบ

Wei (2011) ทำการทดสอบหาค่าอัตราส่วนของแรงหารด้วยความกว้างของชิ้นงานทดสอบ และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานขึ้นตราบ จากการทำทดสอบการขัดถูนั้นพบว่า ความเครียดสูงสุดและความเครียดเฉือนสูงสุดเกิดที่ตำแหน่งบริเวณขอบชิ้นงานขึ้นตราบทั้งในการ วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ ซึ่งจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้เป็น การยืนยันการวิเคราะห์โมเดลของโครงสร้างที่ซับซ้อน

Liu *et al.* (2012) แหวนยางกันซึมถูกวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยคุณสมบัติของยางจะได้จากการทดสอบการดึงแล้วนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองมูนีร์เฟลีน จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นวอนมิสสูงสุดจะพบบริเวณที่แหวนยางกันซึมนั้นสัมผัสกับแกนลูกสูบ โดยค่าความเค้นวอนมิสจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของแรงดันน้ำมันภายในกระบอกสูบนั้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความเค้นวอนมิสสูงสุดนั้นยังมีค่าน้อยกว่าค่าของแรงดันน้ำมันภายในกระบอกสูบในสถานะที่ใช้งานตามปกติซึ่งเป็นผลให้สามารถป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันออกด้านนอกกระบอกได้

Sergio *et al.* (2012) โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่บริษัท Camoplast Solideal ถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของยางตีนตะขาบ โดยการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลขต่างๆ ที่ผ่านมานั้นทำให้ทราบถึงลักษณะกลศาสตร์และข้อจำกัดเชิงกล อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญในการศึกษายางตีนตะขาบในปัจจุบันนั้นคือการพัฒนาเครื่องมือการวิเคราะห์เพื่อให้สามารถศึกษาลักษณะการสึกของยางตีนตะขาบ ยางตีนตะขาบมักใช้ในงานเกษตรกรรม และการทำนากการสีกและอายุการใช้งานนั้นค่อนข้างยาก ซึ่งการได้มาซึ่งข้อมูลสำหรับเพื่อใช้ทำนายการสีกนั้นก็ค่อนข้างยากเช่นกัน เนื่องจากการนำข้อมูลการสัมผัสระหว่างผิวยางกับพื้นดินในการปฏิบัติการณ์นั้นค่อนข้างจะจำลองค่อนข้างยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นการอธิบายถึงกระบวนการจำลองการสีกของล้อยางตีนตะขาบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการหมุนของล้อ โดยจุดมุ่งหมายหลักจะเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยนำผลของการจำลองในคอมพิวเตอร์มาเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งผลที่ได้จะช่วยให้สามารถทราบถึงเงื่อนไขทางกลศาสตร์ที่ส่งผลต่อการกร่อนของยางล้อตีนตะขาบ เพื่อช่วยในการออกแบบต่อไปได้ แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบสำหรับการทดสอบ

ที่มา: Sergio *et al.* (2012)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์

- 1.1.1 CPU Intel ® Xeon ® W3503 ที่ความถี่ 2.4 GHz
- 1.1.2 ฮาร์ดดิสก์ Seagate ST3500418AS ที่ความจุ 500 GB
- 1.1.3 RAM ที่ความจุ 12 GB
- 1.1.4 การ์ดแสดงผล NVIDIA Quadro FX 580 ที่ความจุ 512 M
- 1.1.5 ระบบปฏิบัติการ Window XP Professional

1.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

ใช้โปรแกรม VISI ในการสร้างแบบ 3 มิติของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาด้วยการออกแบบใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (Computer Aided Design, CAD)

1.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์

ใช้โปรแกรม MSC ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และสำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาผลคำตอบของการวิเคราะห์

2. อุปกรณ์ในการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

2.1 ยางคอมพาวด์ที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา โดยเป็นยางธรรมชาติ (NR) มีความแข็ง 70 Shore A แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ยางคอมพาวด์ที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

2.2 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ INSTRON 5566 สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลของยางคอมพาวด์ โดยสามารถทำการทดสอบได้ถึง 3 การทดสอบ คือ การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง การทดสอบสมบัติการกดอัด และการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน ซึ่งลักษณะเครื่องทดสอบแสดงดังภาพที่ 28 โดยสมบัติเครื่องแสดงดังภาคผนวก ก



ภาพที่ 28 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์สำหรับการสมบัติทางกลของยางคอมพาวด์

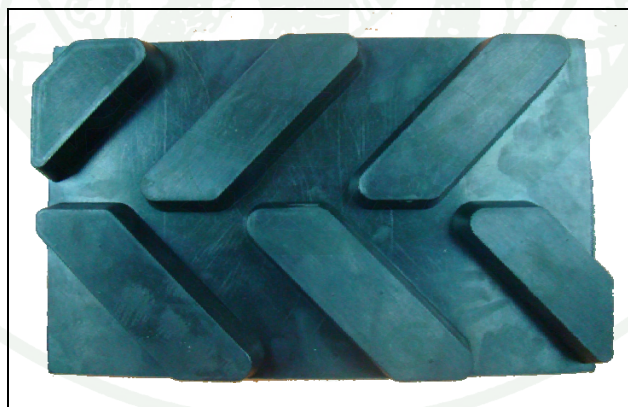
3. อุปกรณ์ในการทดสอบกดจริงของยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

3.1 ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาสำหรับการทดสอบแรงกดนั้น จะต้องทำการผลิตผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป และทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด

ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางระบบสูญญากาศ รุ่น NHV-200 แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) 200 ตัน ระบบแรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ กำลังเครื่องจักร 39.3 กิโลวัตต์ ความดันอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Pressure) 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ



ภาพที่ 29 เครื่องอัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

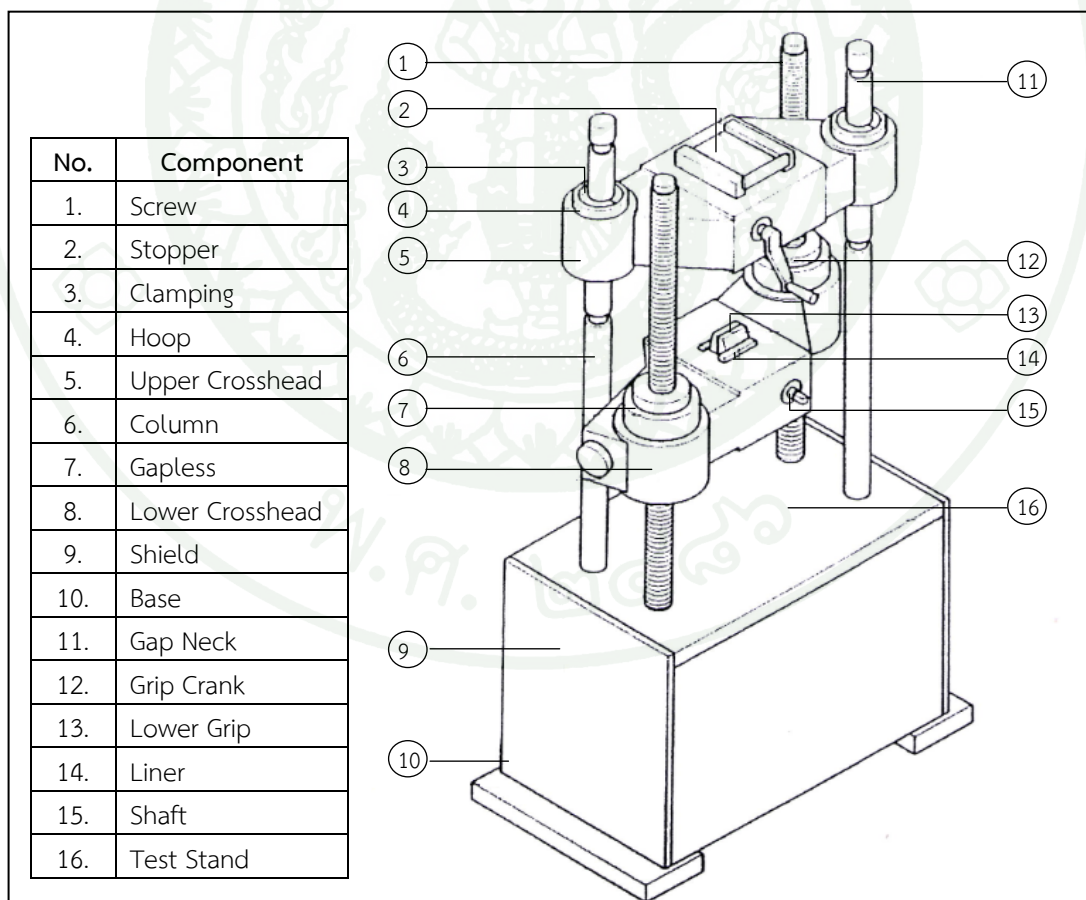


ภาพที่ 30 ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

3.2 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT-7001-LS100 สามารถทดสอบแรงกด ภาระสูงสุด 1,000 กิโลนิวตัน โดยมีค่าความผิดพลาดของการทดสอบไม่เกิน ± 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 31 และ 32 ตามลำดับ



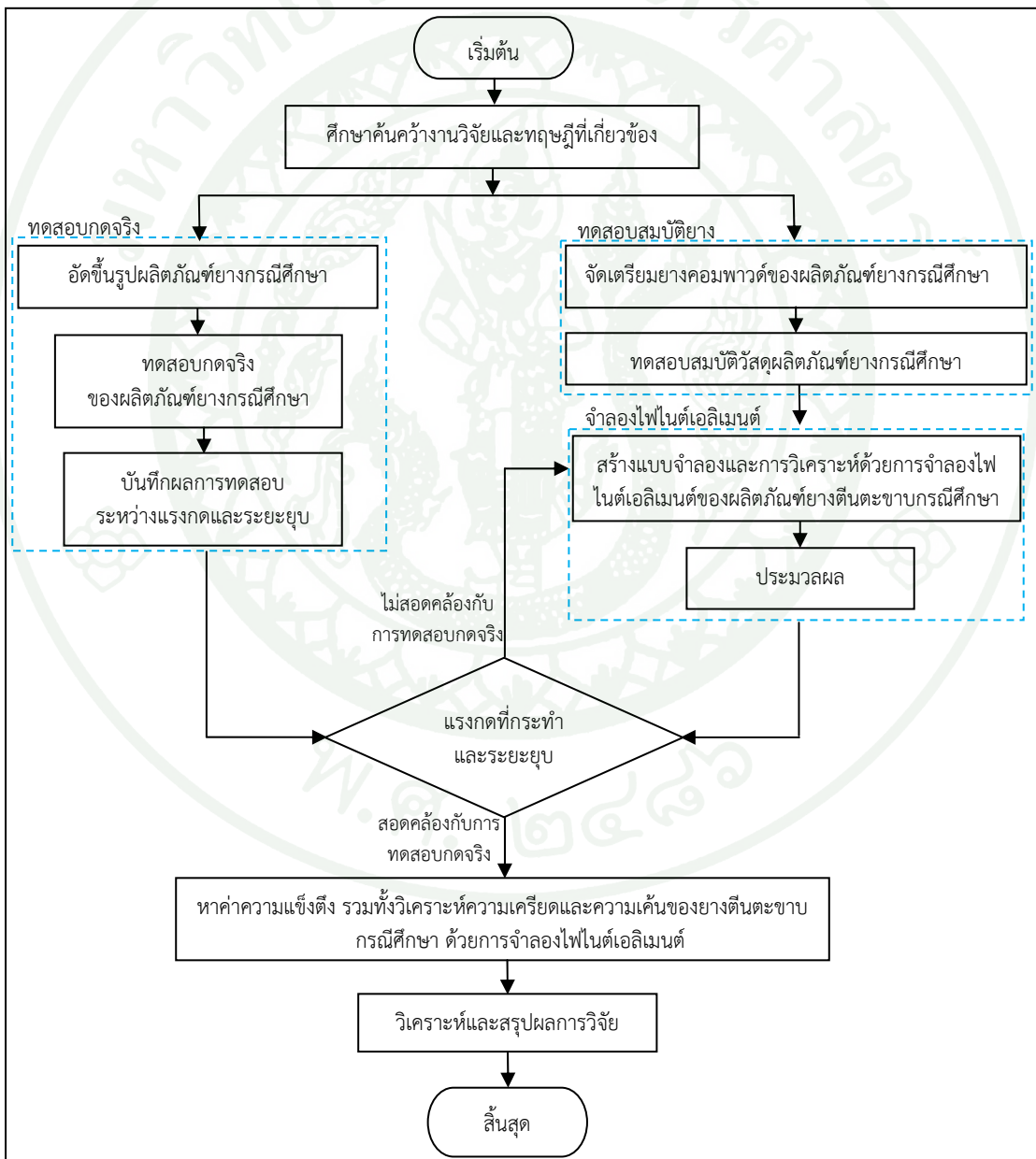
ภาพที่ 31 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์สำหรับทดสอบกดจริง



ภาพที่ 32 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ GT-7001-LS100

วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาเชิงเปรียบเทียบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจากการทดสอบกดจริงและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะพิจารณาการกดยางใต้แรงกด โดยนำข้อมูลการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์มาใช้ในแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกของสมบัติยาง และทำการหาค่าความแข็งแรงระหว่างทดสอบจริงและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมทั้งวิเคราะห์ความเครียดและความเค้นด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และสรุปผลการวิจัย แสดงดังภาพที่ 33

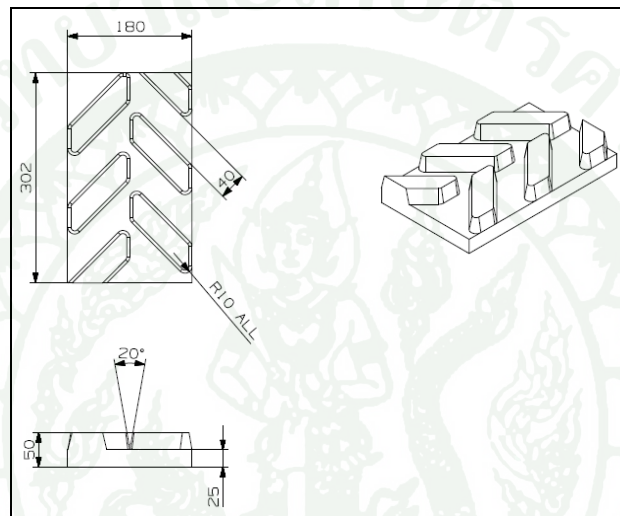


ภาพที่ 33 การดำเนินงานวิจัย

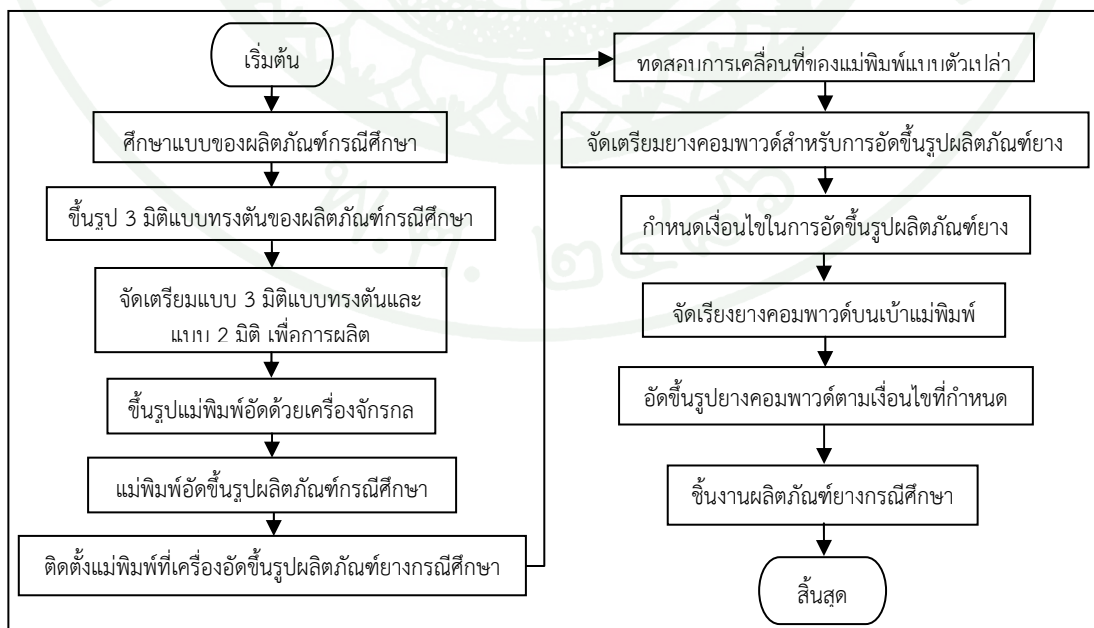
1. การทดสอบกดจริง

1.1 การผลิตผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

งานวิจัยนี้ได้เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา คือ ยางตีนตะขาบ แสดงดังภาพที่ 34 ใช้วัสดุยางธรรมชาติ มีความแข็ง 70 Shore A โดยจะทำการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัด ซึ่งขั้นตอนในการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา แสดงดังภาพที่ 35



ภาพที่ 34 แบบ 2 มิติ ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา



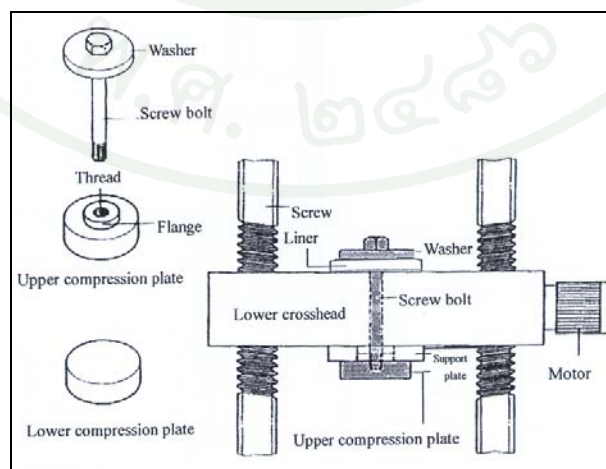
ภาพที่ 35 แผนผังกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

1.2 การทดสอบการรับแรงกด

นำผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษามาทดสอบแรงกดด้วยเครื่องยูทีเอ็ม แสดงดังภาพที่ 36 ยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT-7001-LS100 ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยส่วนแผ่นหัวกดด้านบน (Upper Compression Plate) มีลักษณะเป็นวงกลม แสดงดังภาพที่ 37 ซึ่งอาจทำให้การกระจายแรงกดไม่ทั่วถึงบนผลิตภัณฑ์กรณีศึกษา จึงจำเป็นต้องมีการนำแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมที่มีขนาดใกล้เคียงหรือเท่ากับผลิตภัณฑ์กรณีศึกษามาวางรองคั่นกลางระหว่างแผ่นหัวกดด้านบนกับผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาก่อนเดินเครื่องการทดสอบแรงกด ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 5 ชิ้น โดยการทดสอบจะเก็บข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดตั้งฉากที่กระทำกับระยะยุบของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาแล้วนำมาเขียนเปรียบเทียบกันเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของการทดสอบแต่ละครั้งว่าเหมือนหรือแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด จากนั้นทำการบันทึกค่าแรงกดและระยะยุบของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษา



ภาพที่ 36 ทดสอบการรับแรงกดตั้งฉากที่กระทำบนผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจริง



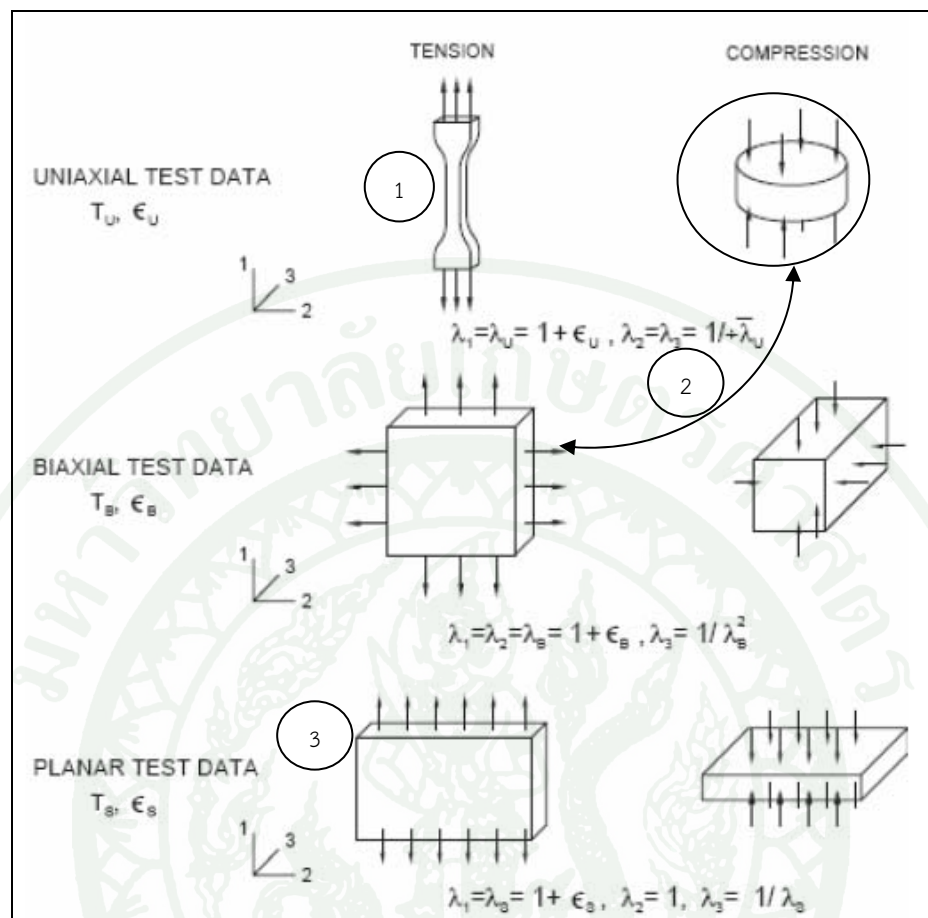
ภาพที่ 37 ส่วนประกอบของแผ่นหัวกดทดสอบ

2. การทดสอบสมบัติของยาง

ในงานวิจัยนี้ยางกรณีศึกษาเป็นยางธรรมชาติ มีความแข็ง 70 Shore A ซึ่งในการทดสอบสมบัติของยางสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่สามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของยางเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการทดสอบสมบัติวัสดุมี 3 ลักษณะ ได้แก่ การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง การทดสอบสมบัติการกดอัด และการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน ซึ่งชิ้นงานทดสอบสมบัติของยางแสดงดังภาพที่ 38 และ 39 ตามลำดับ



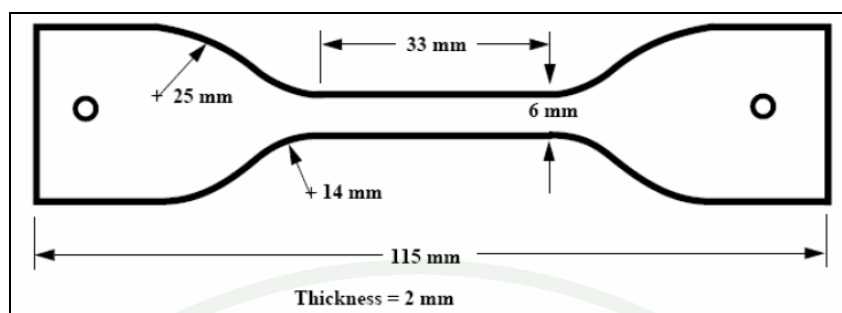
ภาพที่ 38 ชิ้นงานทดสอบสมบัติของยาง



ภาพที่ 39 พฤติกรรมเชิงกลของยางในการทดสอบสมบัติวัสดุ

2.1 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

ในการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงนั้น จะเริ่มต้นด้วยการนำชิ้นยางทดสอบมาผ่านการทำให้คงรูป จากนั้นตัดเป็นรูปดัมเบล (Dumbbell) ตามมาตรฐาน ASTM D412 Die C โดยมีขนาดของชิ้นทดสอบแสดงดังภาพที่ 40 จำนวน 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 5 ชิ้นทดสอบ ทำการทดสอบซ้ำชิ้นละ 10 ครั้ง และทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง แสดงดังภาพที่ 41 ในการทดสอบชิ้นนั้นเป็นการกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืด (Mullins Effect) ให้หมดไป โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบคือ Crosshead Speed: 50 mm/min, Video Extensometer: STANDARD



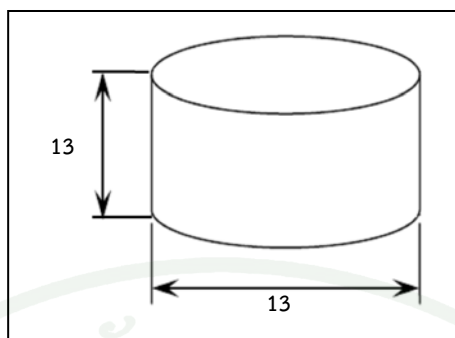
ภาพที่ 40 ชิ้นงานทดสอบสมบัติการรับแรงดึง



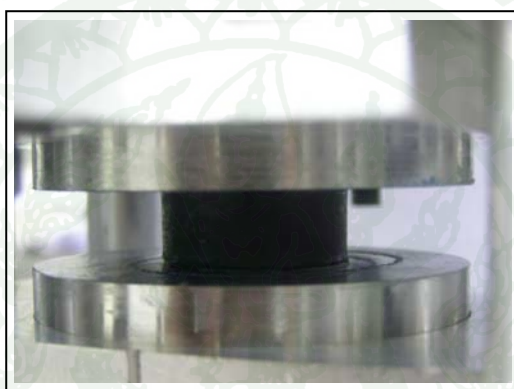
ภาพที่ 41 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

2.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด

ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด ที่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของความเครียดทางวิศวกรรม โดยขึ้นยางทดสอบผ่านการทำให้คงรูป มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตามมาตรฐาน ASTM D575 โดยมีขนาดของชิ้นงานทดสอบแสดงดังภาพที่ 42 และ 43 จำนวน 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 5 ชิ้นทดสอบ ทำการทดสอบซ้ำขึ้นละ 10 ครั้ง เพื่อกำจัดผลกระทบของเหลวหนืด (Viscous Effect) ให้หมดไป โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ คือ Crosshead Speed: 12 mm/min, Extension Strain: STANDARD



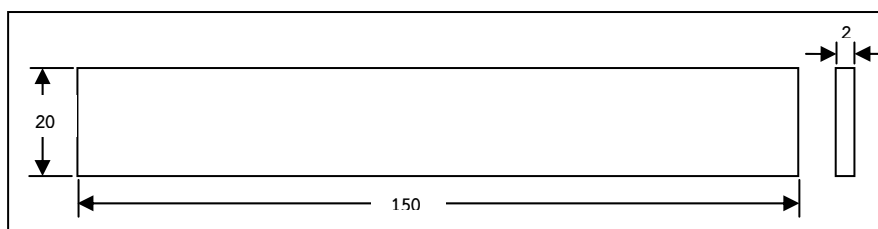
ภาพที่ 42 ชั้นงานการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด



ภาพที่ 43 การทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด

2.3 การทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน

ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนที่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของความเครียดทางวิศวกรรม โดยขึ้นยางทดสอบผ่านการทำให้คงรูป มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดยาว 150 มิลลิเมตร กว้าง 20 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 44 และ 45 จำนวน 1 ตัวอย่าง ละ 5 ชิ้นทดสอบ ทำการทดสอบซ้ำขึ้นละ 10 ครั้ง เพื่อกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืด (Viscous Effect) ให้หมดไป โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบ คือ Crosshead Speed: 50 mm/min, Video Extensometer: STANDARD



ภาพที่ 44 ชั้นทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน



ภาพที่ 45 การทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน

ที่มา: MSC (2005)

จากการทดสอบสมบัติวัสดุดังกล่าวข้างต้นนั้นจะนำมาสร้างเป็นแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลของยาง โดยแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้ทั้งหมด 4 แบบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองมูนนี่-รีฟลิน (Mooney-Rivlin Model) 2 และ 3 เทอม และแบบจำลองอ็อกเดน (Ogden Model) มีอันดับที่ 1 2 และ 3

3. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ดีจำเป็นต้องมีส่วนประกอบ 3 อย่างที่ถูกต้อง คือ รูปทรงผลิตภัณฑ์ (Geometry) สมบัติวัสดุ (Material Property) และเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Condition) โดยแบบ 3 มิติทรงตัน (Solid Model) ของผลิตภัณฑ์ยางต้นตะขาบกรณีศึกษาถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ VISI 19 ก่อนที่จะนำมาแบ่งเป็นเอลิเมนต์ และจุดต่อ (Node) ในรูปแบบของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedron) ประเภทเอลิเมนต์ใช้ Full & Herrmann Formulation ซึ่งรูปแบบของเอลิเมนต์นี้สามารถมีการคำนวณเป็นสมการเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งคือเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดต่อชนิด 4 จุด (4-Node Tetrahedron) และจุดต่อชนิด 10 จุด (10-Node Tetrahedron) โดยในการศึกษานี้จะทำการทดสอบความสามารถเชิงคณิตศาสตร์ของเอลิเมนต์ทั้ง 2 แบบ ที่ให้ผลเฉลยของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ดี รวมไปถึงขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สามารถให้ความถูกต้องของผลของการวิเคราะห์ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดีและใช้เวลาน้อยที่สุด โดยขนาดของเอลิเมนต์จะประกอบด้วยขนาด 30, 25, 20, 15, 10 และ 5 มิลลิเมตร

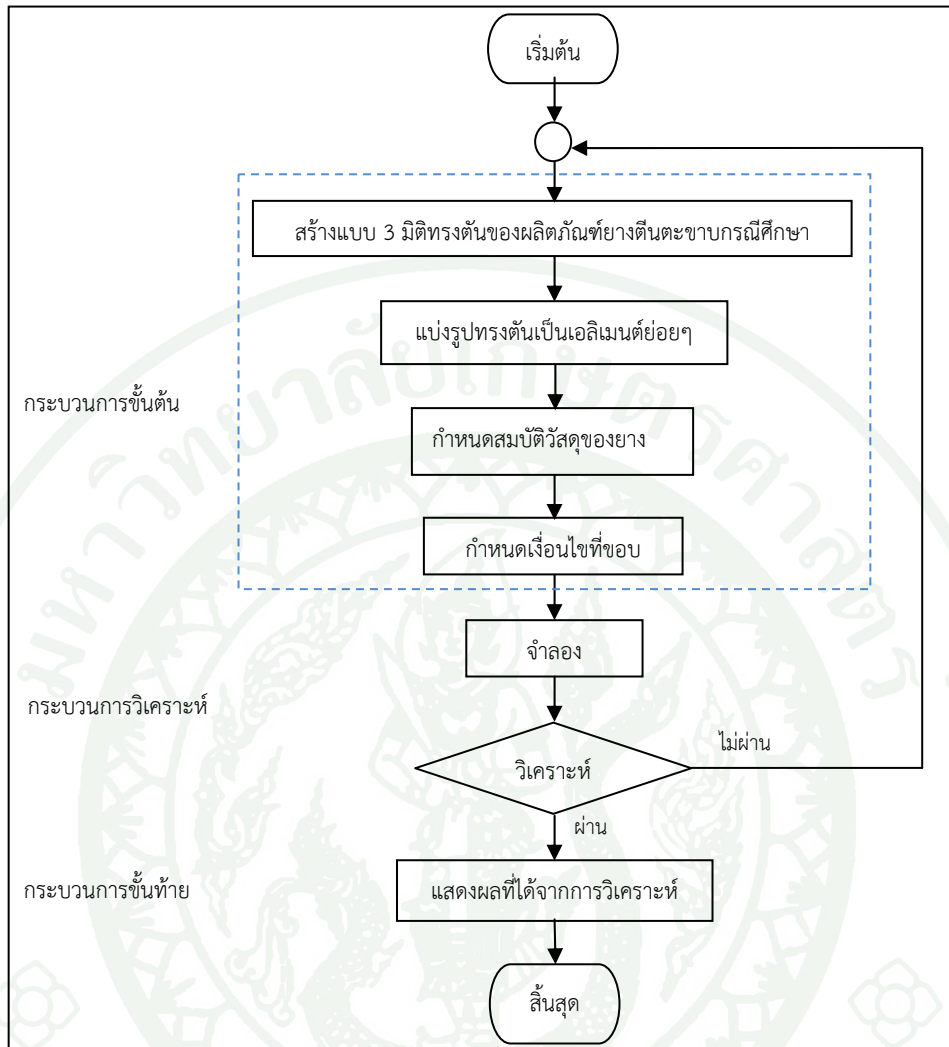
แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของยางข้างต้นมาทำการป้อนเข้าสู่แต่ละเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่จำลองพฤติกรรมของยางแต่ละแบบนี้มีช่วงของพลังงานความเครียดของการใช้งานที่เหมาะสมแตกต่างกันไป จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาว่าแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกใดที่สามารถให้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากที่สุด สำหรับการกำหนดเงื่อนไขที่ขอบอยู่ภายใต้สภาวะที่รับภาระสถิต จะทำการแปลงลักษณะสภาพการทดสอบจริงที่ระยะยุบของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจริงมาเป็นเงื่อนไขที่ขอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยแบบจำลองของแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Plate) ประกอบบน และล่างผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ ซึ่งเปรียบเสมือนแผ่นหัวกดด้านบน และพื้นโต๊ะวางชิ้นงานของเครื่อง UTM

การสร้างเอลิเมนต์ และจุดต่อของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมดจะใช้โปรแกรม MSC. Patran ขณะที่ส่วนของการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยนั้นจะใช้โปรแกรม MSC.Marc Mentat ในการวิเคราะห์ของทุกแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การคำนวณทางขนาน (Parallel Computing) ยังถูกใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณ ตัวแปรที่สนใจในการศึกษาพฤติกรรมทางกลของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาสำหรับการเทียบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นคือ ค่าแรงกดที่กระทำต่อชิ้นงาน ณ ระยะยุบที่เท่ากัน โดยการศึกษาข้อผิดพลาดของแบบจำลองทางวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกของพฤติกรรมยาง และชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ จะถูกหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้มีผลค่าตอบของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากที่สุด ซึ่งสามารถหาค่าความคาดเคลื่อนได้ดังสมการที่ 55 โดยกระบวนการวิเคราะห์ยางตีนตะขาบด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงดังภาพที่ 46 และผังการทำงานของการคำนวณทางขนานสามารถแสดงดังภาพที่ 47

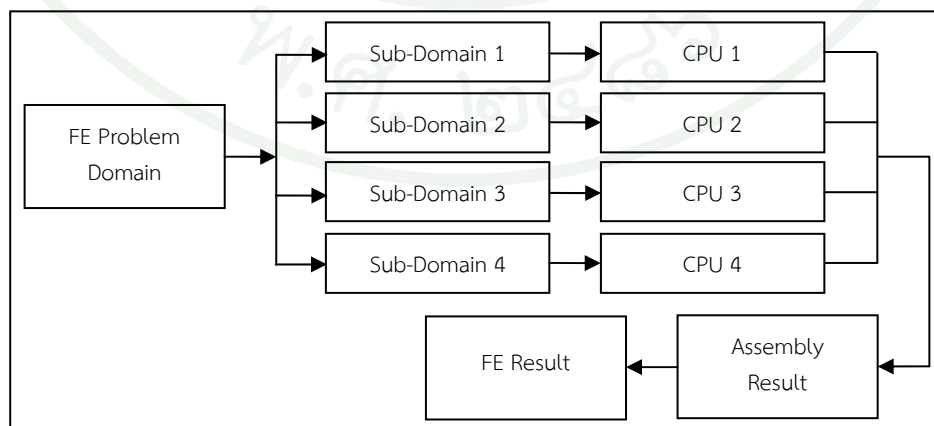
$$\left| \frac{F_{FEA} - F_{EXP}}{F_{EXP}} \right| \times 100 \quad (55)$$

เมื่อ F_{FEA} คือ แรงกดที่กระทำจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (N)

F_{EXP} คือ แรงกดที่กระทำจากการทดสอบจริง (N)



ภาพที่ 46 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

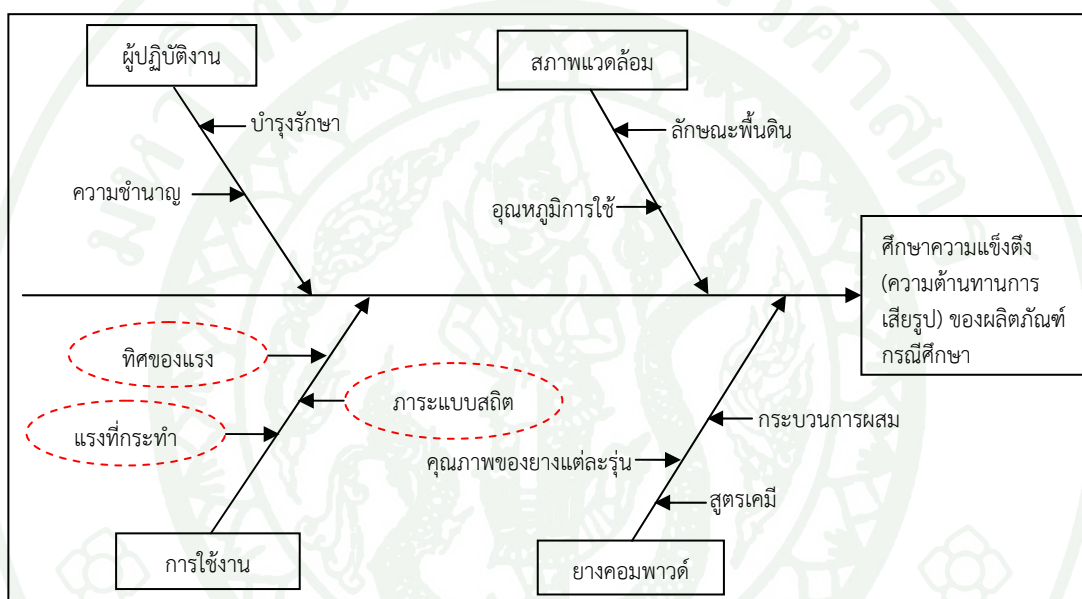


ภาพที่ 47 การทำงานของการคำนวณทางขนานของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4. การเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

4.1 ปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่จะนำมาพิจารณา

เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ผังแสดงเหตุและผล ได้ถูกกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุมเพื่อศึกษาความแข็งตึง (ความต้านทานการเสียรูป) ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ แรงกดตั้งฉากที่กระทำภายใต้ภาระสถิตที่ขึ้นกับระยะยุบตัว แสดงดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 ผังแสดงเหตุและผล โดยปัจจัยที่อยู่ภายในสัญลักษณ์วงรีคือปัจจัยที่ต้องการควบคุม

1.2 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรที่ใช้ในการวัดผล ได้แก่ แรงกดตั้งฉากที่กระทำภายใต้การรับภาระสถิต และความแข็งตึง (Stiffness) ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

1.3 การวางแผนและการออกแบบการเก็บข้อมูล

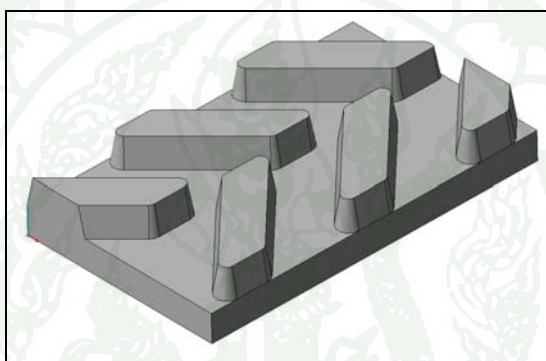
ปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะมีผลกระทบ ได้แก่ ระยะยุบตัวของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

ผลและวิจารณ์

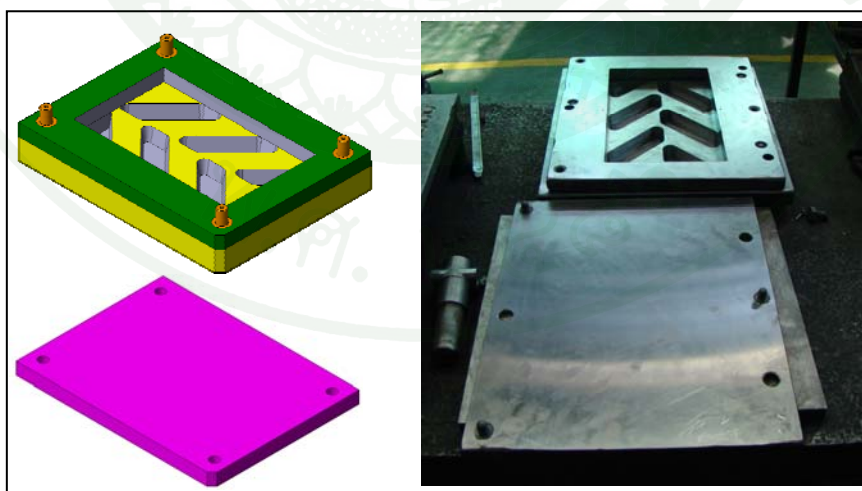
1. ผลการทดสอบกดจริง

1.1 ผลการผลิตผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

ทำการขึ้นรูป 3 มิติแบบทรงตัน แสดงดังภาพที่ 49 เพื่อนำไปออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา แสดงดังภาพที่ 50 จากนั้นอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางกรณีศึกษา มีความแข็ง 70 Shore A ที่อุณหภูมิคงรูป 150 องศาเซลเซียส และเวลาในการคงรูป 20 นาที แสดงดังภาพที่ 51



ภาพที่ 49 แบบ 3 มิติทรงตันของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา



ภาพที่ 50 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

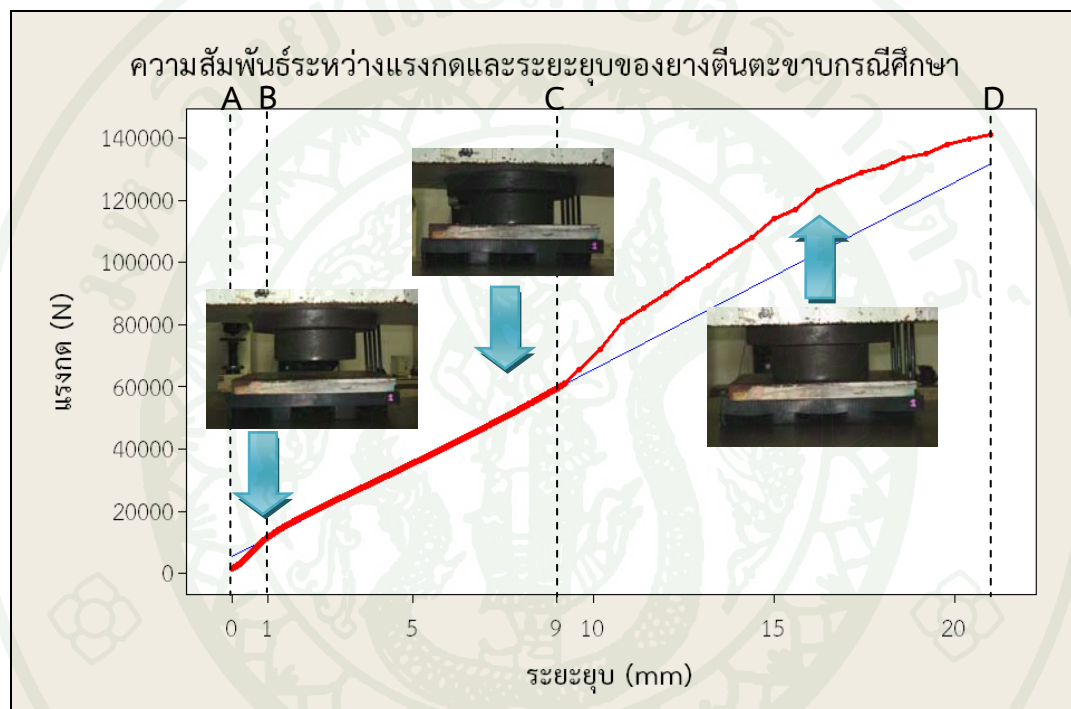


ภาพที่ 51 ขั้นตอนในการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขากรณีศึกษา

1.2 ผลการทดสอบการรับแรงกด

1.2.1 ผลการทดสอบเบื้องต้น

การทดสอบการรับแรงกดที่กระทำต่อพื้นที่ของผลิตภัณฑ์ยางดินตะขาบ ภูมิศึกษาด้วยเครื่องทดสอบ UTM ซึ่งสามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำกับระยะยุบของผลิตภัณฑ์ภูมิศึกษา แสดงดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 กราฟแสดงค่าแรงกดที่กระทำและระยะยุบของผลิตภัณฑ์ภูมิศึกษา

จากภาพที่ 52 จะเห็นว่าเส้นกราฟในช่วง A-B และ C-D มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear) โดยในช่วง A-B นั้นเป็นช่วงที่เครื่อง UTM กำลังอยู่ในช่วงปรับสถานะสมดุลในการถ่ายแรงมาสู่แผ่นเหล็กจึงเกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงของแรง (Transient State) ช่วง C-D นั้นจะเป็นช่วงที่แผ่นเหล็กช่วยกระจายแรงกดบนผลิตภัณฑ์ยางดินตะขาบภูมิศึกษาเกิดการโค้งงอ ทำให้ระนาบสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กกับผลิตภัณฑ์ยางดินตะขาบไม่สมบูรณ์ และช่วง B-C ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) มีค่า $R^2 = 0.998$ แสดงดังภาพที่ 53 และจากเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้นถือว่าช่วง B-C นี้ไม่ได้รับผลกระทบจากการโค้งตัวของแผ่นเหล็กช่วยกระจายแรง ดังนั้นจึงสามารถนำผลที่แรงกดและระยะยุบไปใช้เป็นข้อมูลในทดสอบจริงของผลิตภัณฑ์ยางดินตะขาบภูมิศึกษาและวิเคราะห์ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไปได้

1.2.2 ผลทดสอบจริงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

สำหรับการทดสอบการรับแรงกดจริงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ในที่นี้ จะมีการทำซ้ำการทดสอบโดยใช้ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 5 ชั้น แล้วนำข้อมูลไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดและระยะยุบ จากภาพที่ 53 พบว่าผลการทดสอบกดทั้ง 5 ชั้นนั้น ให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกันมาก นั้นแสดงว่าการทดสอบมีความน่าเชื่อถือพอสมควร

เมื่อพิจารณากราฟผลการทดสอบตามภาพที่ 52 และ 53 พบว่า ช่วงที่น่าสนใจในที่นี้คือ ช่วง B-C (ดังได้กล่าวแล้วก่อนหน้านี้) เนื่องจากค่าแรงกดและระยะยุบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยมีรูปของสมการเป็นไปตามสมการ (56) แต่เนื่องจากการทดสอบการรับแรงกดจริงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาแต่ละชั้นนั้นมีชุดข้อมูลหลายชุด จึงจำเป็นต้องประยุกต์เอาเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อแสดงผลของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, R^2) สำหรับการตรวจสอบว่าสมการที่ได้การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นนั้น สามารถใช้เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลการทดลองได้หรือไม่

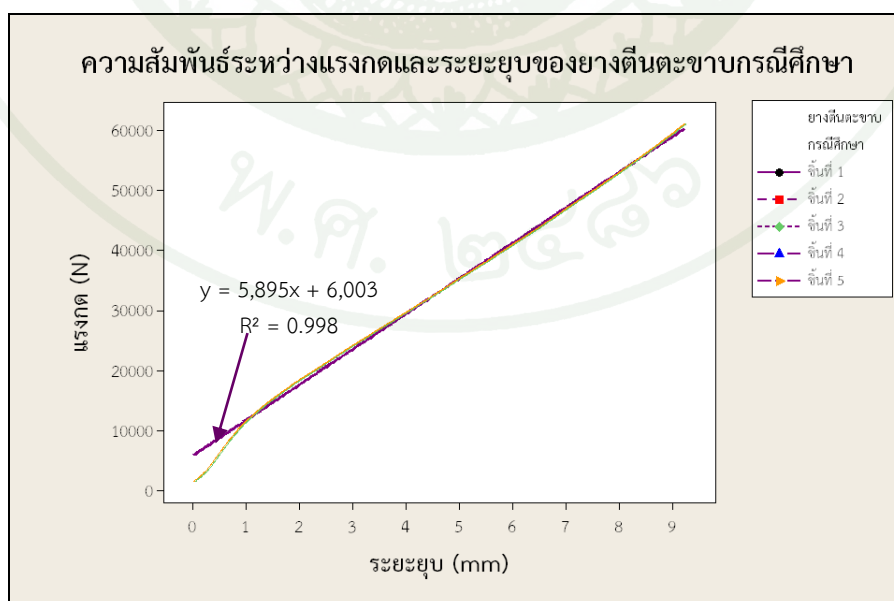
$$F = ax + b \quad (56)$$

เมื่อ F คือ ชุดข้อมูลแรงกด (ค่าตัวแปรตามแนวแกน y)

x คือ ชุดข้อมูลระยะยุบ (ค่าตัวแปรอิสระตามแนวแกน x)

a คือ ความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ ซึ่งคือ ค่าความแข็งดึง

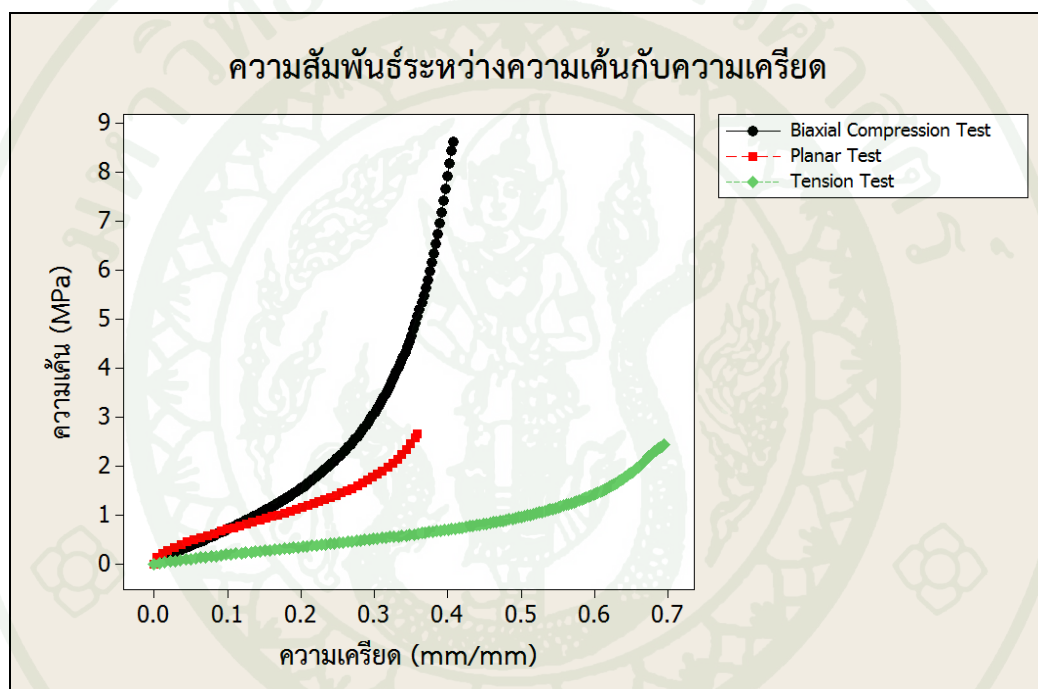
b คือ จุดตัดกันแกน y



ภาพที่ 53 กราฟแสดงค่าแรงกดที่กระทำและระยะยุบของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาจำนวน 5 ชั้น

2. ผลการทดสอบสมบัติของยาง

ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง การทดสอบสมบัติการกดอัด และการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นได้ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง จนนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว แสดงว่าผลของมุนลินได้ถูกจำกัดออกไปหมดแล้ว โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นที่ได้จากการทดสอบยางในแต่ละลักษณะที่เสถียรแล้วสามารถแสดงได้ในภาพที่ 54



ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นของการทดสอบสมบัติของยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

ซึ่งจากการทดสอบสมบัติของยางดังกล่าวข้างต้นนั้นได้นำมาสร้างเป็นแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลของยาง โดยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 2 แบบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองมุนนี่-รีฟลิน 2 และ 3 เทอม แสดงดังสมการที่ (57) และแบบจำลองอ็อกเดน อันดับที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ แสดงดังสมการที่ (58) ซึ่งสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์คิงที่ของแบบจำลองวัสดุต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 + 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (57)$$

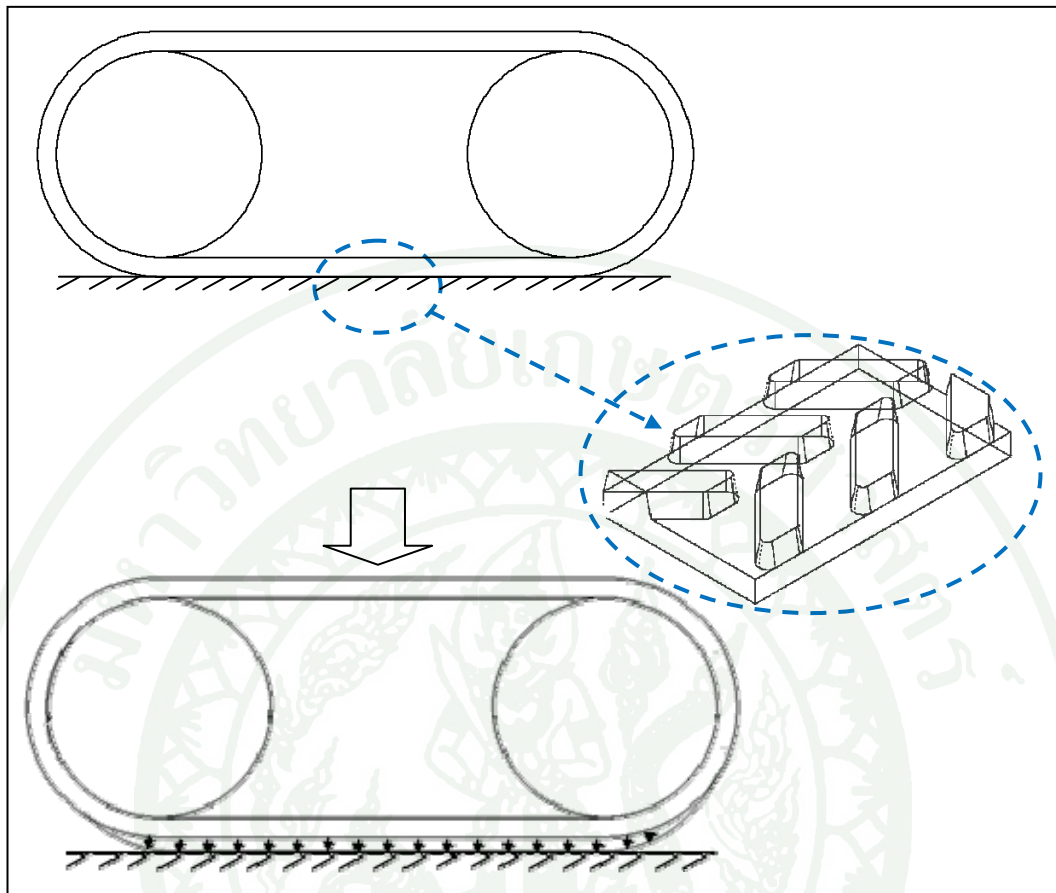
$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (58)$$

ตารางที่ 2 แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลของยาง

แบบจำลองวัสดุ	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง	
มูนนี่-รีฟลิน (2)	$C_{10} = 0.646256$	$C_{01} = -0.000702586$
มูนนี่-รีฟลิน (3)	$C_{10} = 0.63299$ $C_{11} = -6.39145e-006$	$C_{01} = 0.00205077$
อีออกเดน อันดับที่ 1	$\mu_1 = 5.60642$	$\alpha_1 = 1.37797$
อีออกเดน อันดับที่ 2	$\mu_1 = 0.0053432$ $\mu_2 = 6.27138$	$\alpha_1 = -1.78146$ $\alpha_2 = 1.36256$
อีออกเดน อันดับที่ 3	$\mu_1 = 947.575$ $\mu_2 = 117.969$ $\mu_3 = 0.183204$	$\alpha_1 = 0.0490832$ $\alpha_2 = -0.209135$ $\alpha_3 = 2.45324$

3. ผลการวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกกรณีศึกษาด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยแบบ 3 มิติทรงตัน (Solid Model) ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบนั้น เป็นแบบจำลองของผลผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาที่มีความเหมือนกันในด้านรูปร่าง โดยแรงที่กระทำในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบที่ขนานกับพื้นราบเป็นแรง Uniform Compression Load และ Maximum Pressure ดังนั้นจึงสนใจศึกษาวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกกรณีศึกษาในบริเวณที่ได้รับแรงที่กระทำดังกล่าวข้างต้น แสดงดังภาพที่ 55

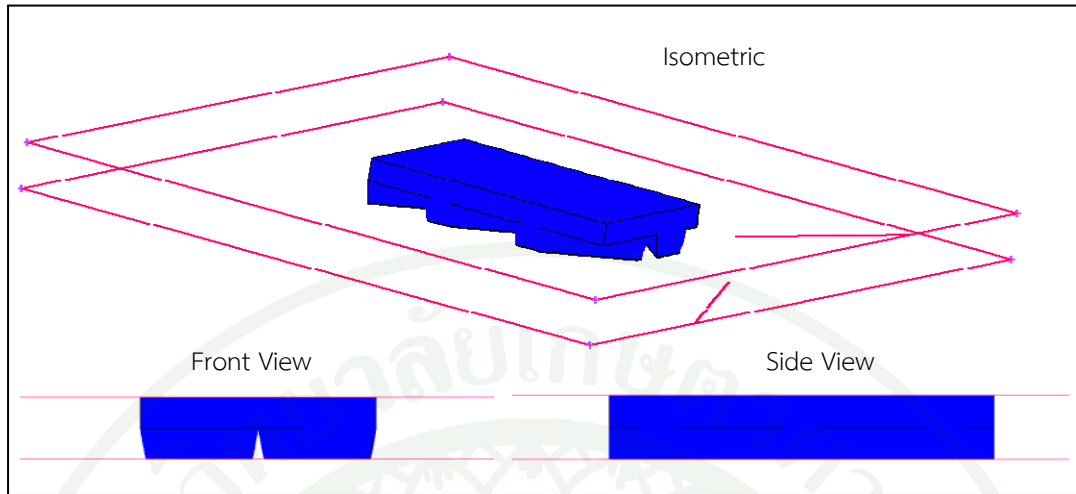


ภาพที่ 55 การกำหนดเงื่อนไขแรงกระทำในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบที่ขนานกับพื้นราบ

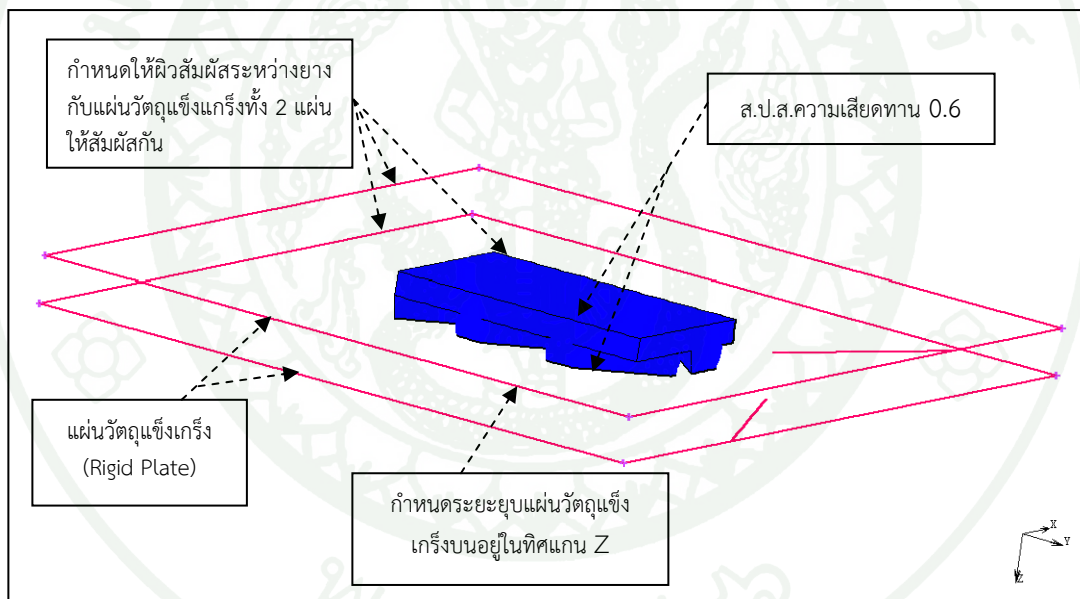
จากนั้นทำการแบ่งเป็นเอลิเมนต์ และจุดต่อ (Node) ในรูปแบบของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดต่อชนิด 4 จุดต่อ และจุดต่อชนิด 10 จุด สำหรับในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะกำหนดเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Condition) อยู่ภายใต้สภาวะที่รับภาระสถิต จะทำการแปลงลักษณะสภาพการทดสอบจริงที่ระยะยุบของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาจริงมาเป็นเงื่อนไขที่ขอบทางแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยแบบจำลองของแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Plate) ประกบบนและล่างผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบแสดงดังภาพที่ 56 และ 57 ซึ่งเปรียบเสมือนแผ่นหัวกดด้านบน และพื้นโต๊ะวางชิ้นงานเครื่อง UTM โดยระหว่างวางกับเหล็กกำหนดให้ผิวสัมผัสกัน ซึ่งมีค่าส.ป.ส.แรงเสียดทานช่วง 0.6 - 0.9 (Dirac Delta Consultants, 2012) แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งจากตาราง จะเห็นว่าค่าส.ป.ส.แรงเสียดทานแต่ละค่าให้ผลของแรงกดใกล้เคียงกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าส.ป.ส.แรงเสียดทานเท่ากับ 0.6 ที่ระยะยุบช่วง 4.0 ถึง 5.0 มิลลิเมตร และตัวแปรที่สนใจในการศึกษาพฤติกรรมทางกลของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบสำหรับการเทียบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นคือค่าแรงกดที่กระทำต่อชิ้นงานที่ระยะยุบช่วง 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3 ค่าส.ป.ส.แรงเสียดทานของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระยะยุบ 5 มิลลิเมตร

ระยะยุบ (mm)	ค่าส.ป.ส.แรงเสียดทาน	แรงกดการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (N)	แรงกดการทดสอบจริง (N)
4.0	0.2	27,620	29,769
	0.5	27,740	
	0.6	27,880	
	0.7	28,020	
	0.8	28,160	
	0.9	28,150	
5.0	0.2	35,450	35,396
	0.5	35,620	
	0.6	35,820	
	0.7	36,010	
	0.8	36,180	
	0.9	36,200	
6.0	0.2	43,710	41,046
	0.5	43,930	
	0.6	44,200	
	0.7	44,450	
	0.8	44,690	
	0.9	44,670	
7.0	0.2	52,430	46,991
	0.5	52,710	
	0.6	53,050	
	0.7	53,370	
	0.8	53,680	
	0.9	53,650	



ภาพที่ 56 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

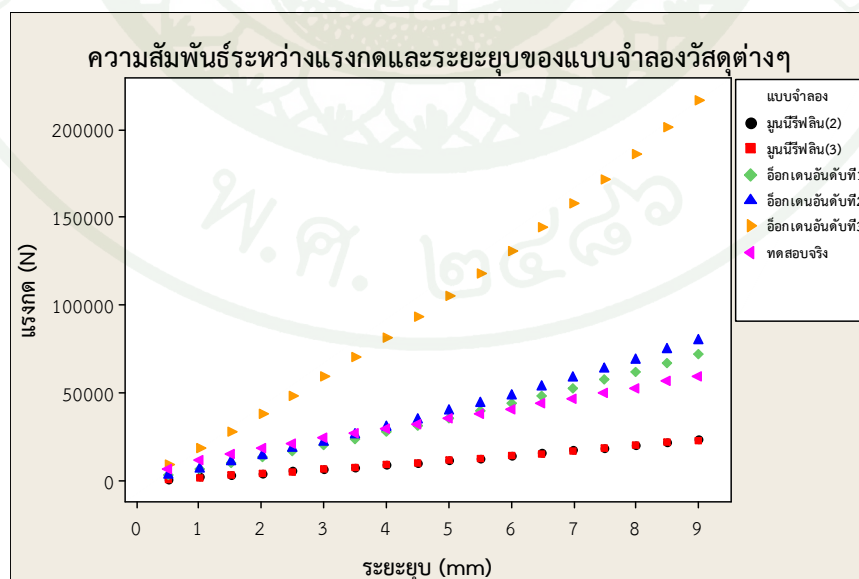


ภาพที่ 57 เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองวัสดุที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ผลการทดสอบได้ว่าเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่อธิบายพฤติกรรมเชิงกลของยางมาป้อนเข้าสู่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแต่ละแบบจำลองให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4 แบบจำลอง อ็อกเดน อันดับที่ 1 สามารถให้พฤติกรรมที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมากที่สุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 18 และที่ระยะยุบ 5 มิลลิเมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 1 ดังนั้นจึงเลือกใช้ใช้ออกเดน อันดับ 1 เป็นแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกของยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ดังภาพที่ 58

ตารางที่ 4 แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ระยะ ยวบ (mm)	แรงกดไฟไนต์เอลิเมนต์ (N)					แรงกด ทดสอบ จริง	ความคาดเคลื่อน (ร้อยละ)				
	มุนนี่- รีฟลิน (2)	มุนนี่- รีฟลิน (3)	อ็อก เดน อันดับ 1	อ็อก เดน อันดับ 2	อ็อกเดน อันดับ 3		มุนนี่- รีฟลิน (2)	มุนนี่- รีฟลิน (3)	อ็อก เดน อันดับ 1	อ็อก เดน อันดับ 2	อ็อก เดน อันดับ 3
0.5	1,061	1,044	3,178	3,512	9,330	6,502	84	84	51	46	43
1.0	2,147	2,112	6,442	7,118	18,670	11,689	82	82	45	39	59
1.5	3,258	3,205	9,788	10,820	28,440	15,385	79	79	36	30	85
2.0	4,395	4,324	13,220	14,610	38,500	18,537	76	77	29	21	108
2.5	5,559	5,469	16,740	18,510	48,870	21,390	74	74	22	13	128
3.0	6,751	6,642	20,360	22,500	59,560	24,265	72	72	16	7	145
3.5	7,972	7,844	24,070	26,661	70,570	27,010	70	71	11	1	161
4.0	9,223	9,076	27,880	30,820	81,920	29,769	69	69	6	3	175
4.5	10,510	10,340	31,800	35,150	93,610	32,529	68	68	2	8	188
5.0	11,820	11,630	35,820	39,590	105,700	35,396	67	67	1	12	199
5.5	13,170	12,960	39,950	44,160	118,100	38,141	65	66	5	16	210
6.0	14,560	14,330	44,200	48,850	130,900	41,046	64	65	8	19	219
6.5	15,980	15,730	48,560	53,670	144,100	43,935	63	64	10	22	228
7.0	17,440	17,170	53,050	58,630	157,700	46,991	63	63	13	25	235
7.5	18,940	18,640	57,660	63,730	171,700	49,995	62	62	15	27	243
8.0	20,480	20,160	62,400	68,980	186,200	53,076	61	62	17	30	251
8.5	22,070	21,730	67,280	74,370	201,100	56,567	61	61	19	31	255
9.0	23,700	23,330	72,300	79,920	216,500	59,567	60	61	21	34	263
ความคาดเคลื่อนเฉลี่ย (ร้อยละ)							69	69	18	21	177

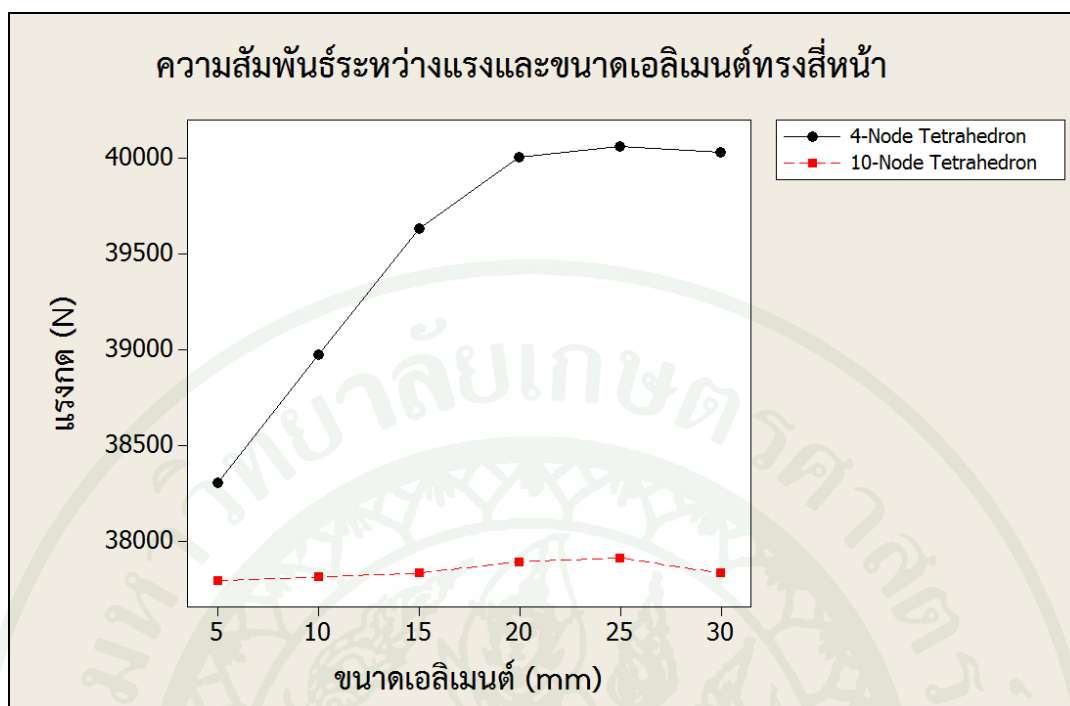


ภาพที่ 58 การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองวัสดุ

ตารางที่ 5 และภาพที่ 59 แสดงผลการทดสอบความเหมาะสมของลักษณะ และขนาดของอิเล็กโทรดที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดสอบได้ว่าในการคำนวณโดยใช้อิเล็กโทรดทรงสี่หน้าประเภท 4 จุดต่อจะน้อยกว่าอิเล็กโทรดทรงสี่หน้าประเภท 10 จุดต่อ นอกจากนี้แล้วอิเล็กโทรดทรงสี่หน้าประเภท 4 จุดต่อจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลคำตอบจริงมากขึ้นหากขนาดของอิเล็กโทรดมีขนาดเล็กลง ในทางกลับกันอิเล็กโทรดทรงสี่หน้าประเภท 10 จุดต่อจะให้ผลคำตอบที่มีขนาดใกล้เคียงในทุกขนาดอิเล็กโทรด แต่คำตอบนั้นจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่อิเล็กโทรดขนาด 15 มิลลิเมตรเป็นต้นไป ดังนั้นแล้วเพื่อให้ผลการทดสอบด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นออกมาอย่างถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงเลือกให้อิเล็กโทรดทรงสี่หน้าประเภท 10 จุดต่อขนาด 10 มิลลิเมตรในทุกการทดลอง และใช้ Increment เพิ่มขึ้นทีละ 20 แสดงดังภาคผนวก อีกรั้งการใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดละเอียดกว่าจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคำตอบแต่จะส่งผลให้เวลาคำนวณที่นานกว่าถึงประมาณ 38 เท่า

ตารางที่ 5 รูปแบบของอิเล็กโทรดทรงสี่หน้า

รูปแบบอิเล็กโทรดทรงสี่หน้า	ขนาดอิเล็กโทรด (mm)	จำนวนอิเล็กโทรด	แรงกด (N)	เวลาการคำนวณ (sec)
จุดต่อชนิด 4 จุด	30	6,207	41,030	29.11
	25	6,316	41,060	32.00
	20	6,454	41,000	40.00
	15	8,147	40,630	44.74
	10	18,347	36,970	150.37
	5	121,620	36,300	1337.00
จุดต่อชนิด 10 จุด	30	5,850	35,530	50.61
	25	5,968	35,710	53.24
	20	6,456	35,780	55.68
	15	8,147	35,800	89.00
	10	18,349	35,820	233.00
	5	121,629	35,890	8,874.00



ภาพที่ 59 การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบและขนาดของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า

4. ผลการเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3 ว่าค่าแรงกดกับระยะยุบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น นั้นอยู่ในช่วงระยะยุบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร ดังนั้นที่ระยะนี้จะมีการตรวจสอบค่าความแข็งดึงที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 2 และค่าความแข็งดึงที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองที่พิจารณามีทั้งสิ้น 5 แบบจำลอง และในที่นี้เลือกแบบจำลองอีกเด่น อันดับ 1 เนื่องจากในช่วงระยะยุบตัว 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตรนั้นให้ผลของแรงกดที่คำนวณได้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดในบรรดาแบบจำลองอื่นๆ กล่าวคือ มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเป็นร้อยละ 1 และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 13 เมื่อเปรียบเทียบผลของแรงที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 2 ที่ระยะยุบตัวเดียวกัน ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบของการทดสอบจริงกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

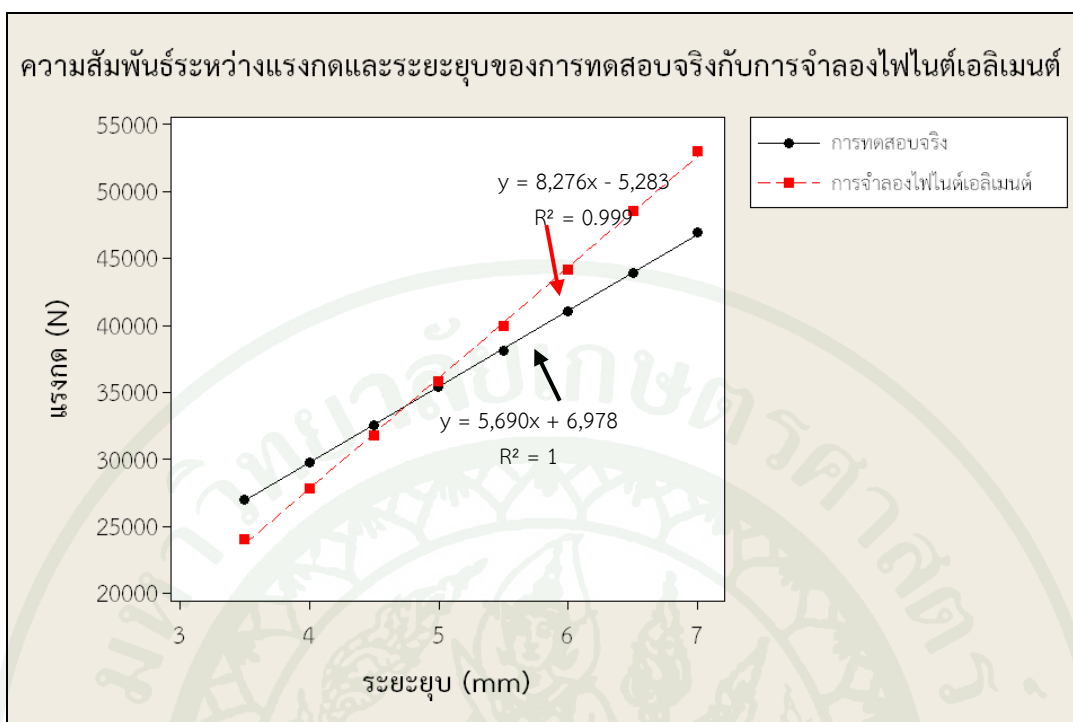
ระยะยุบ (mm)	แรงกด (N)		ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
	ทดสอบจริง	จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	
3.5	27,010	24,070	11
4.0	29,769	27,880	6
4.5	32,529	31,800	2
5.0	35,396	35,820	1
5.5	38,141	39,950	5
6.0	41,046	44,200	8
6.5	43,935	48,560	10
7.0	46,991	53,050	13

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแรงกดกับระยะยุบที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับการทดสอบจริง และทั้งสองปริมาณดังกล่าวเป็นปฏิภาคตรงกันด้วย ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และข้อมูลการทดสอบจริง จึงจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นดังสมการที่ (59) และ (60) ตามลำดับ

$$F = kx + b \quad (59)$$

$$k = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (60)$$

- เมื่อ F คือ ชุดข้อมูลแรงกด (ค่าตัวแปรตามแนวแกน y)
 x คือ ชุดข้อมูลระยะยุบ (ค่าตัวแปรอิสระตามแนวแกน x)
 k คือ ความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ หรือค่าความแข็งตึง
 b คือ ระยะตัดกันแกน y



ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบของการทดสอบจริงกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระยะยุบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 60 และสมการที่ (60) พบว่าความแข็งตึงที่ได้จากการทดสอบจริงกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเป็น 5,690 N/mm และ 8,276 N/mm ตามลำดับ คิดเป็นความคลาดเคลื่อนร้อยละ 45 ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอาจจะเกิดได้จากหลายสาเหตุต่อไปนี้เช่น

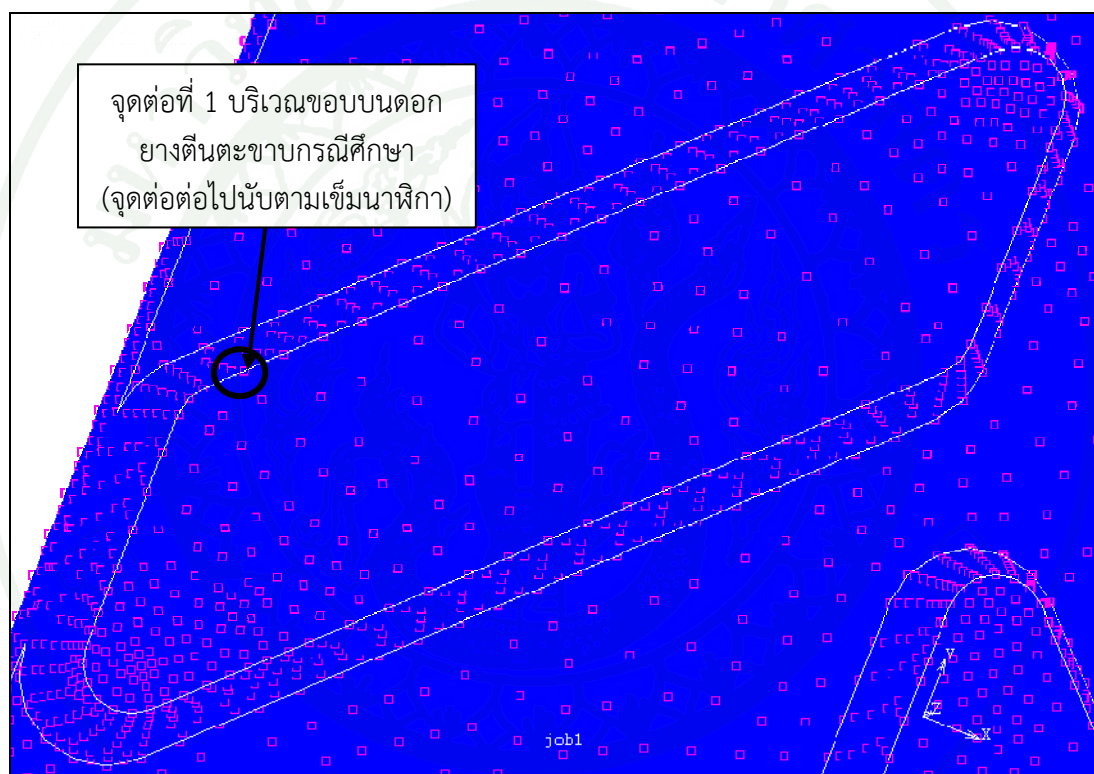
สมบัติวัสดุของคอมพาวด์ ได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอของสมบัติวัสดุของคอมพาวด์ที่ผสมในแต่ละครั้ง ลำดับก่อนหลังของการเติมสารประกอบในสูตรยางที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางดินตะขาบกรณีศึกษา สภาวะในการคงรูป สภาวะการเก็บรักษาของคงรูปก่อนทำการทดสอบ

อัตราการเคลื่อนที่ของการทดสอบที่ใช้ในการทดสอบสมบัติยางเพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนให้กับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าต่างจากอัตราการเคลื่อนที่ของการทดสอบจริง

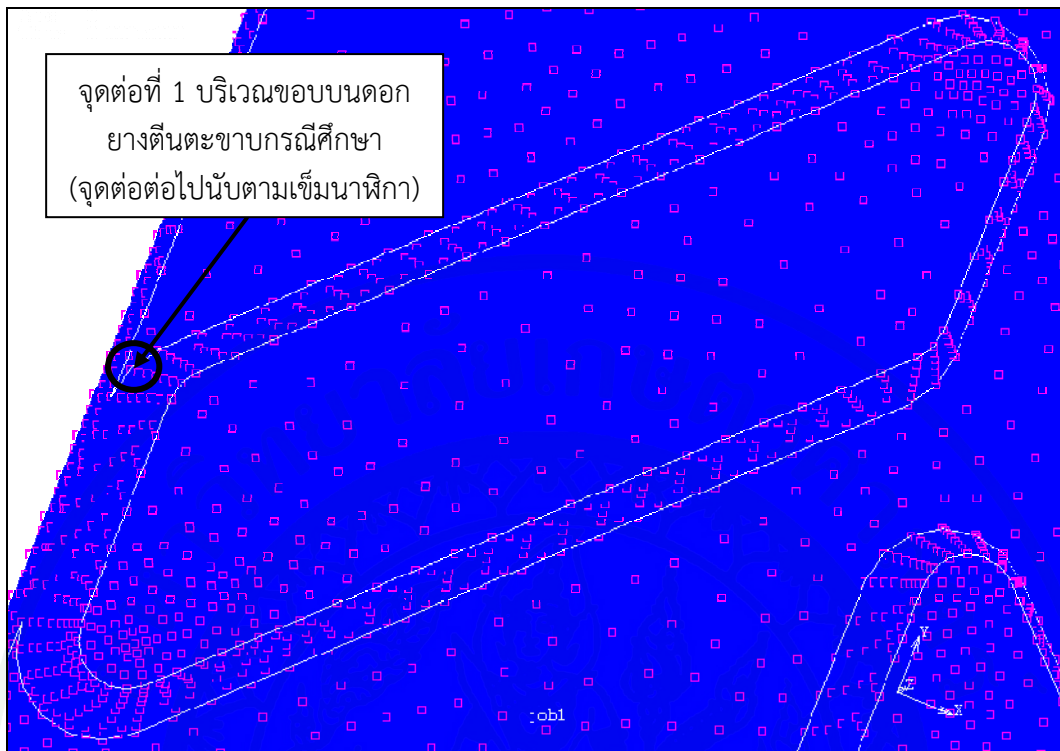
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใช้เป็นข้อมูลป้อนให้กับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อาจมีค่าแตกต่างจากอัตราการเคลื่อนที่ของการทดสอบจริง

ในงานวิจัยนี้นอกจากจะศึกษาหาค่าความแข็งตึงที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ยังได้ศึกษาการกระจายตัวของพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมและการกระจายตัวของความเค้นวอนมิสตลอดทั่วทั้งหน้าของดอกยางผลิตภัณฑ์ยางดินตะขาบกรณีศึกษา พบว่าทั้งสองปริมาณมีการกระจายตัวไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ มีการกระจายตัวสม่ำเสมอในบริเวณด้านในของดอกยาง และมีค่าสูงขึ้น

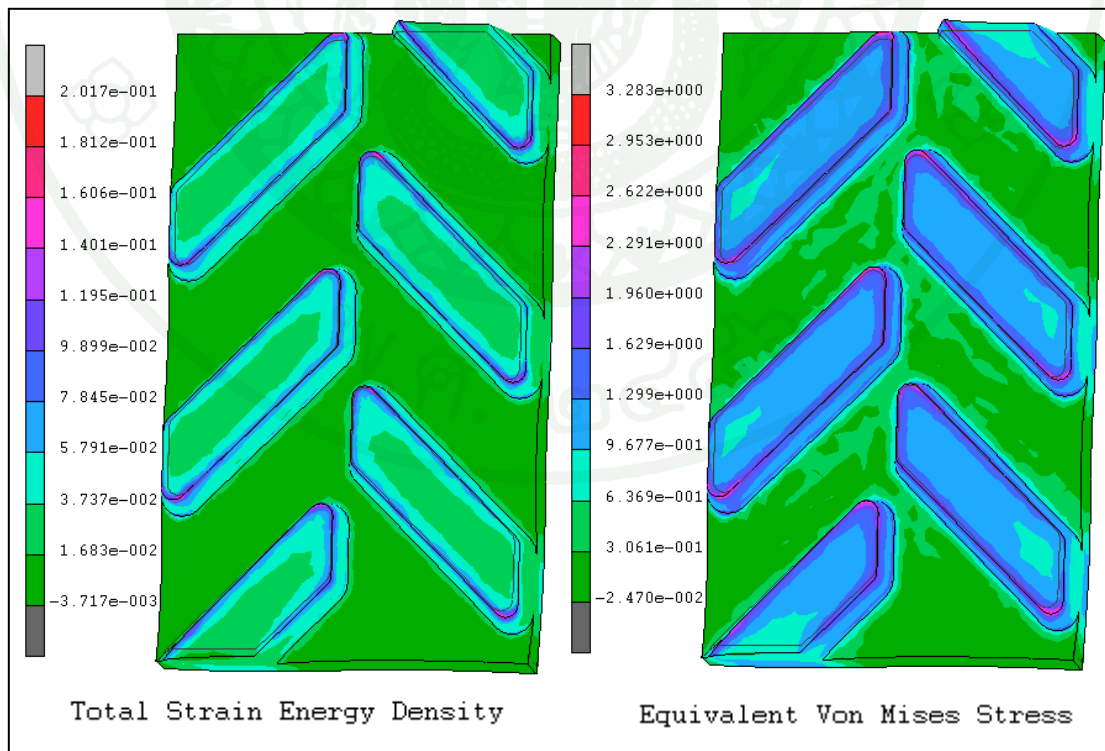
และกระจุกตัวมาก ณ บริเวณขอบของดอกยาง ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจาก ขอบของดอกยางไม่มีการ
 ลบมุม จึงเกิดความเค้นหนาแน่นขึ้น นอกจากนี้จากการพิจารณาพบว่าหน้าของดอกยางที่สัมผัสกับ
 แผ่นโลหะกระจายแรงถือได้ว่าเป็นตำแหน่งที่ชิดกับแรงกระทำ จึงอาจจะเกิดปรากฏการณ์ที่
 สอดคล้องกับหลักของเซนต์วินองต์ที่ว่า ความเค้นที่ตำแหน่งใกล้กับแรงกระทำจะมีค่าไม่สม่ำเสมอทั่ว
 ทั้งหน้าตัดของชิ้นงานที่รับแรงตั้งฉาก จากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าความเค้นวอนมีสูงสุดมีค่า
 เท่ากับ 10 MPa ซึ่งจะเกิดที่ระยะยวบตัวสูงสุดตลอดช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งขนาดของความเค้นที่
 เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขากรณีศึกษาถือว่ายังไม่เกิดความเสียหายใดๆ (สถาบันวิจัยยาง,
 2554) แสดงดังภาพที่ 61 ถึง 106



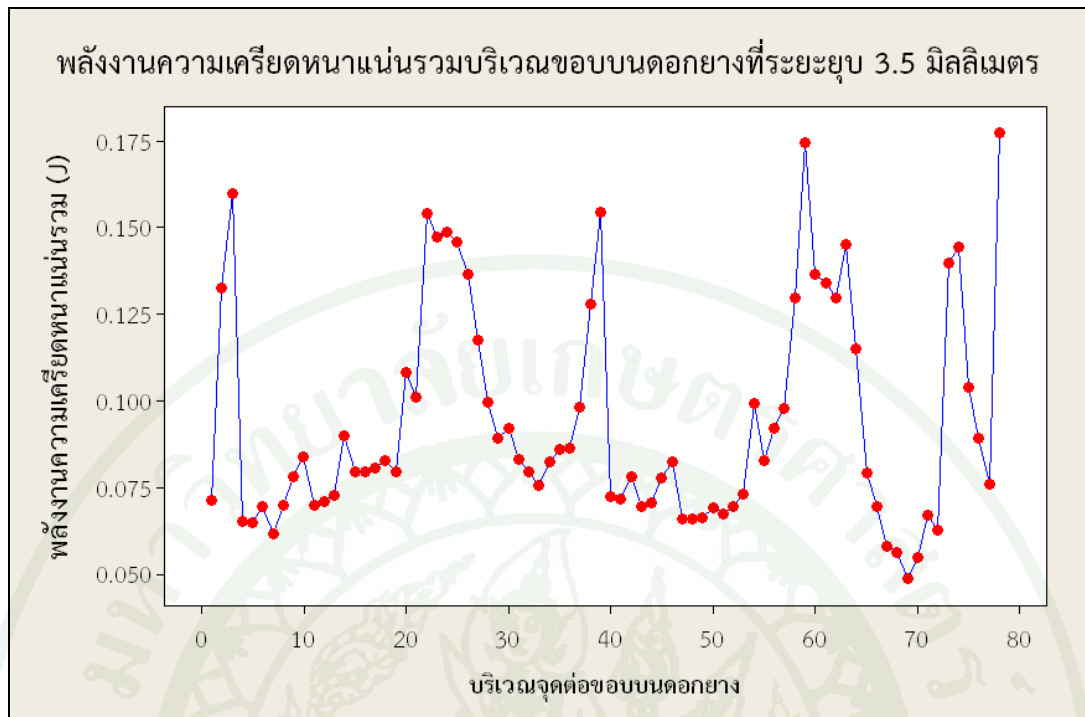
ภาพที่ 61 บริเวณจุดต่อขอบบนดอกยางตีนตะขากรณีศึกษา



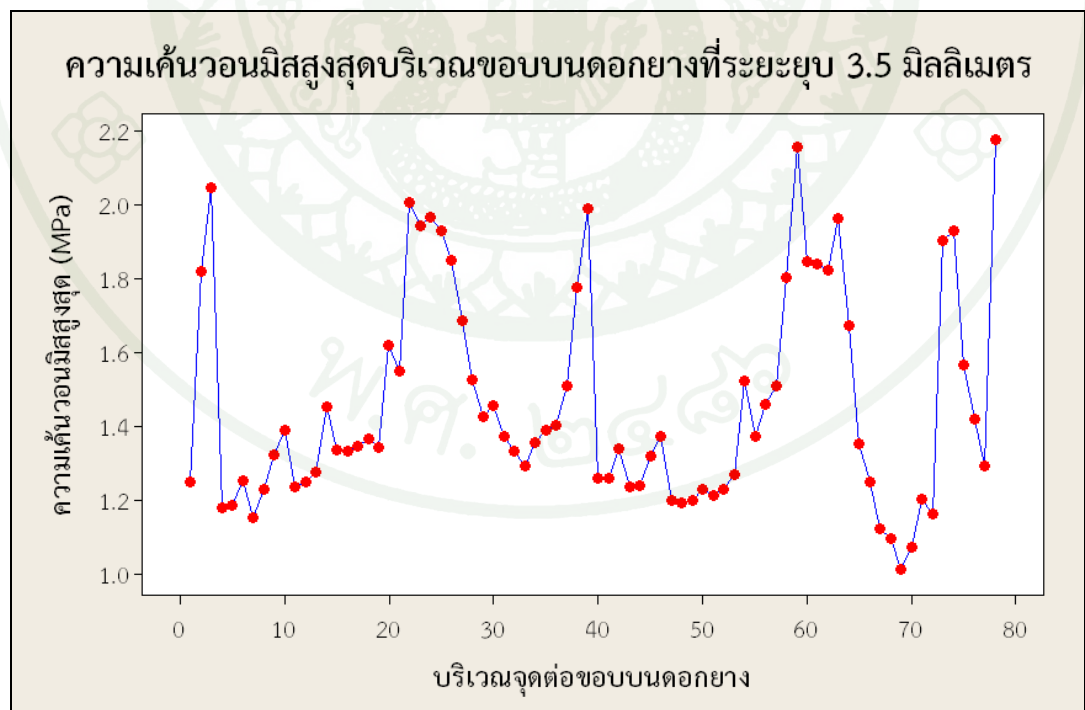
ภาพที่ 62 บริเวณจุดต่อขอบล่างดอกยางตีนตะขาบกรณีศึกษา



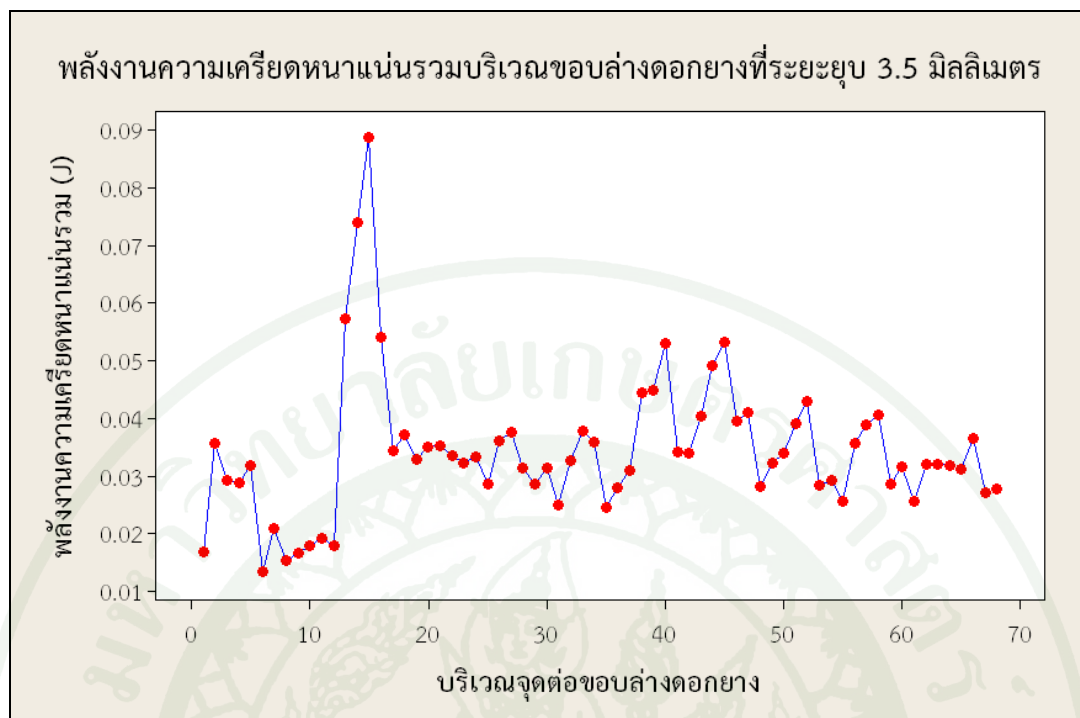
ภาพที่ 63 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร



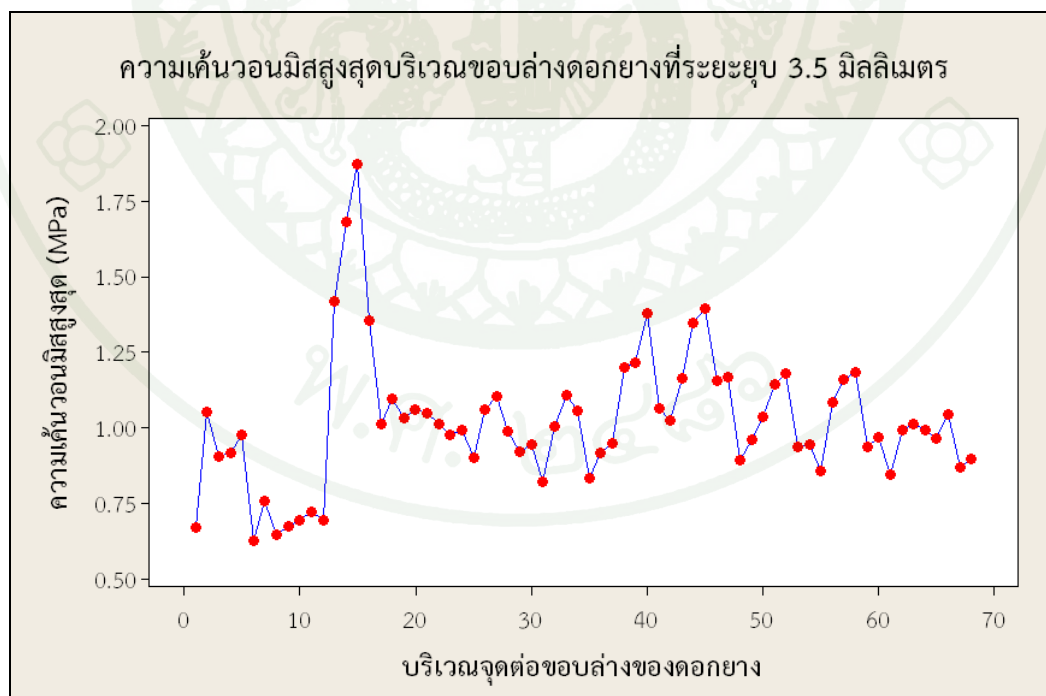
ภาพที่ 64 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร



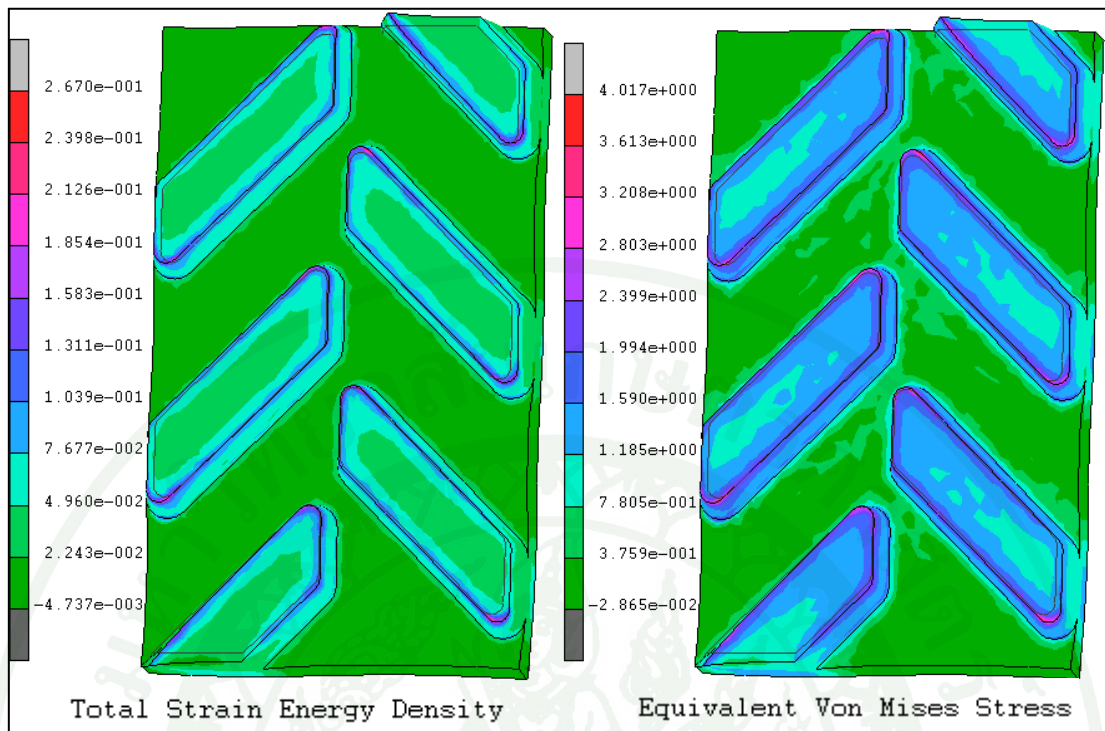
ภาพที่ 65 กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร



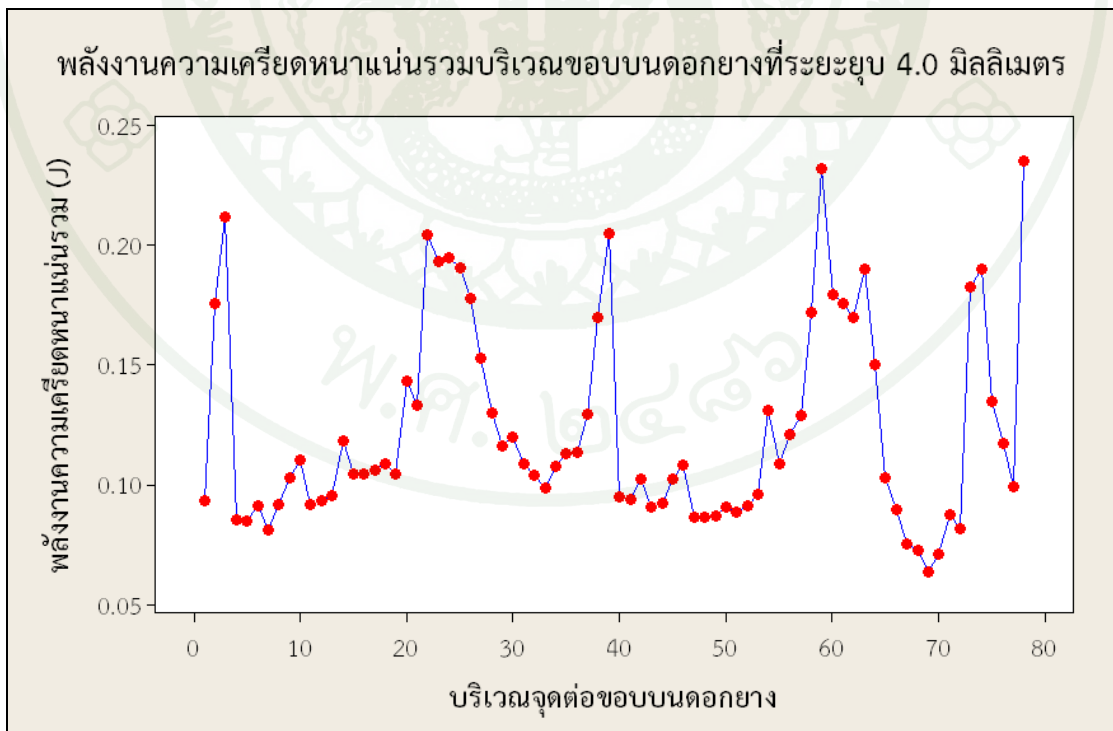
ภาพที่ 66 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร



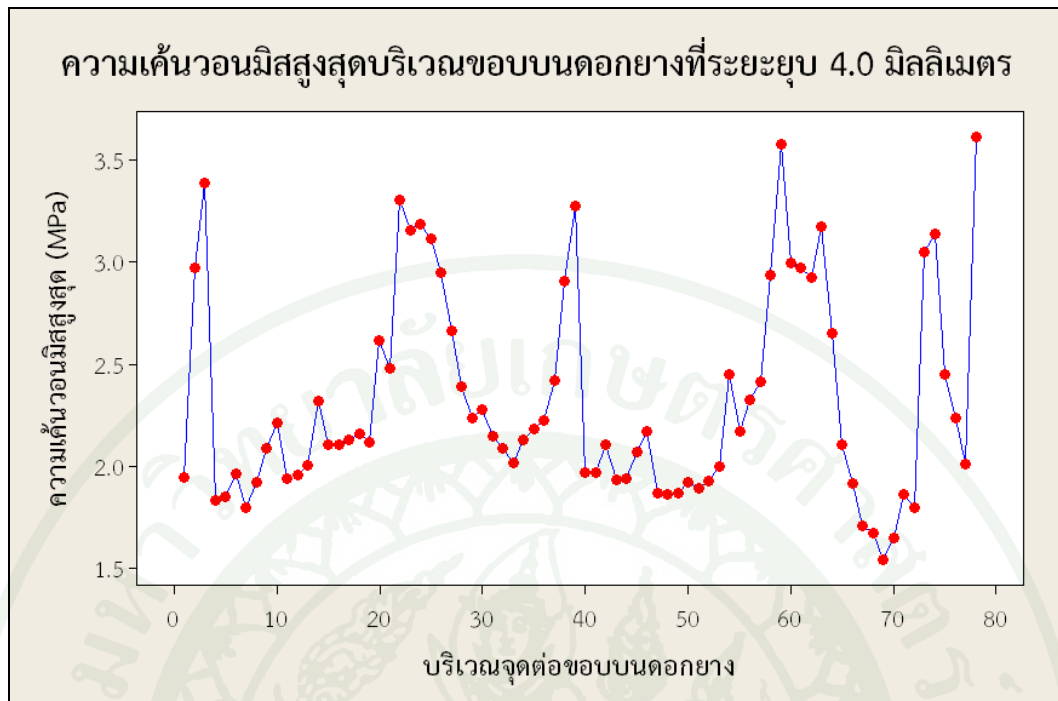
ภาพที่ 67 กราฟความเค้นวอนมีสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 มิลลิเมตร



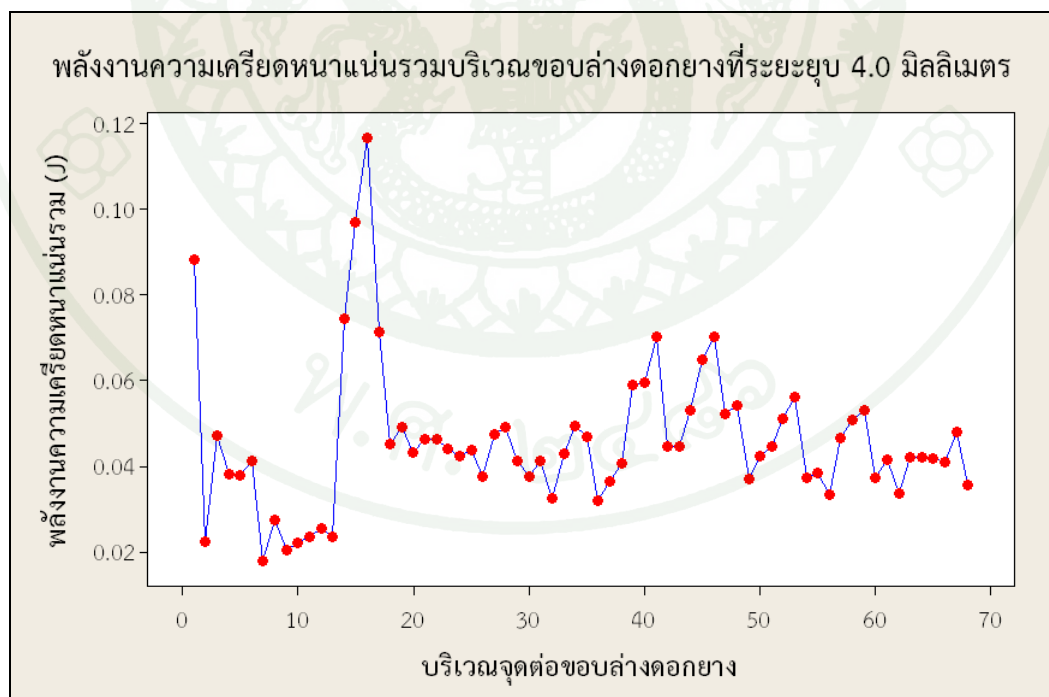
ภาพที่ 68 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร



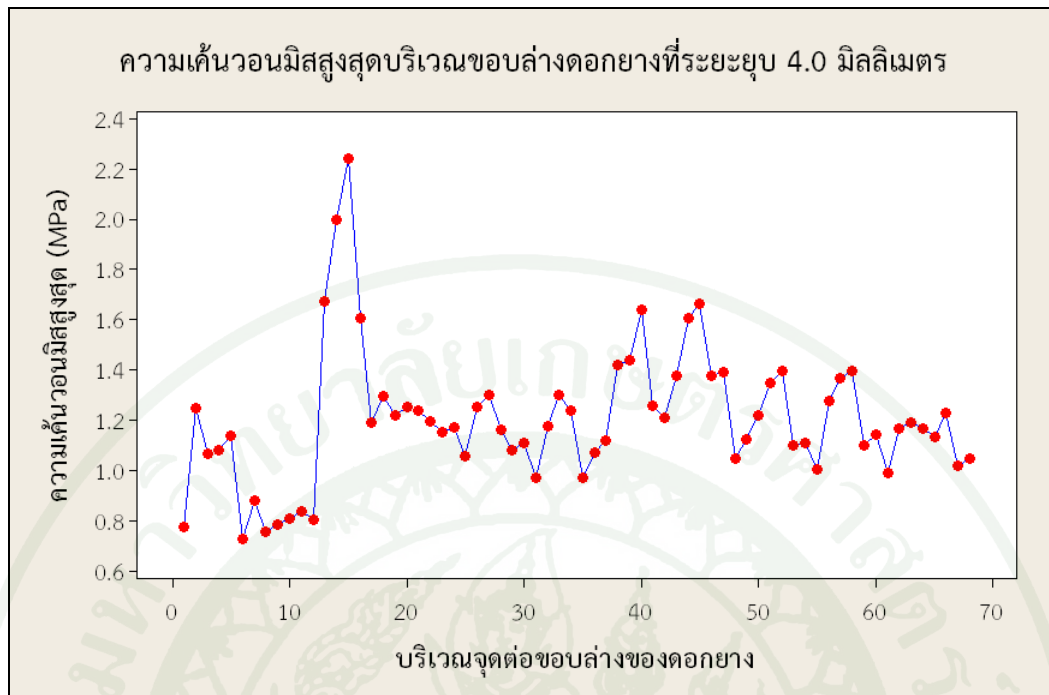
ภาพที่ 69 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร



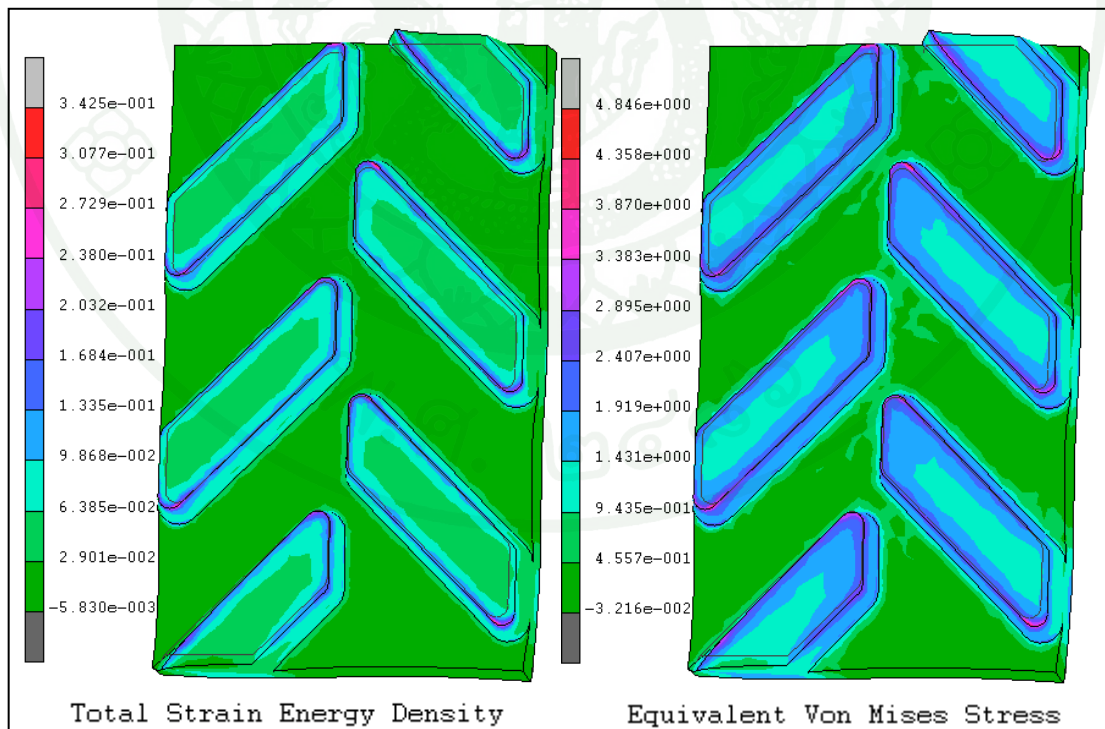
ภาพที่ 70 กราฟความเค้นวอนมีสสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร



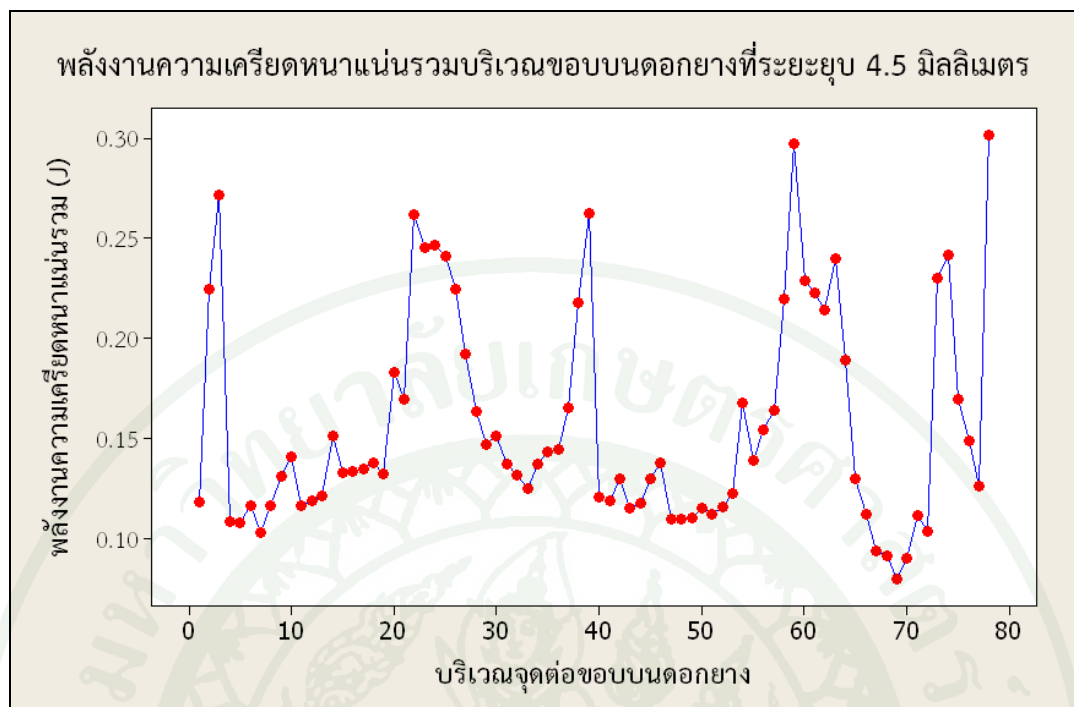
ภาพที่ 71 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร



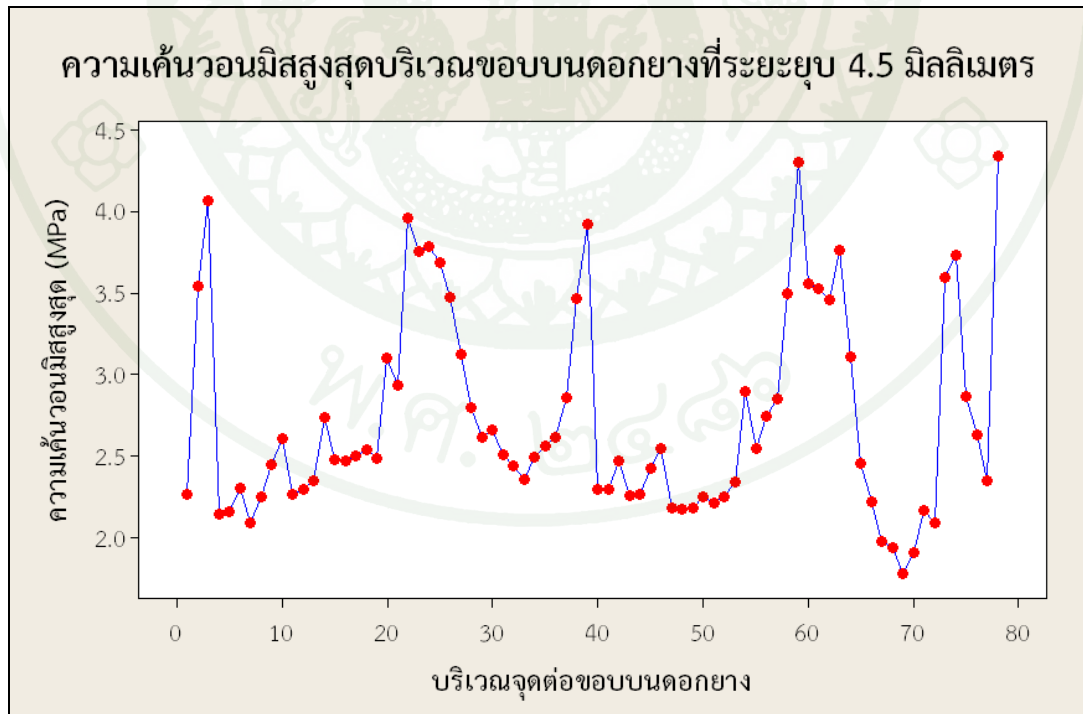
ภาพที่ 72 กราฟความเค้นวอนมิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.0 มิลลิเมตร



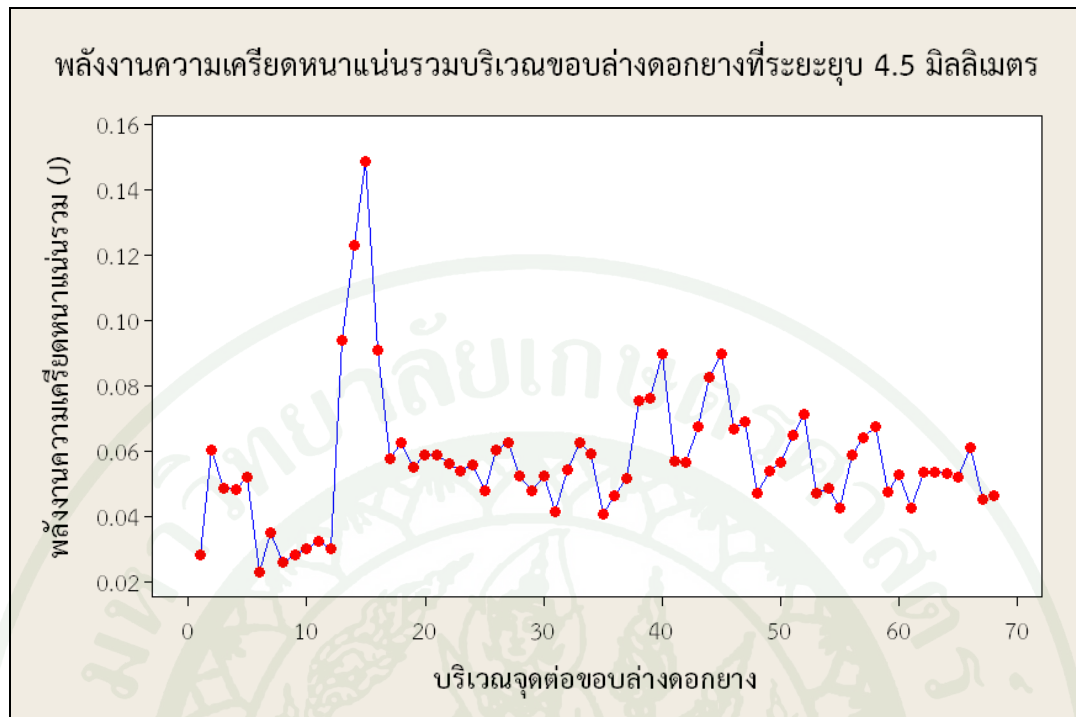
ภาพที่ 73 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร



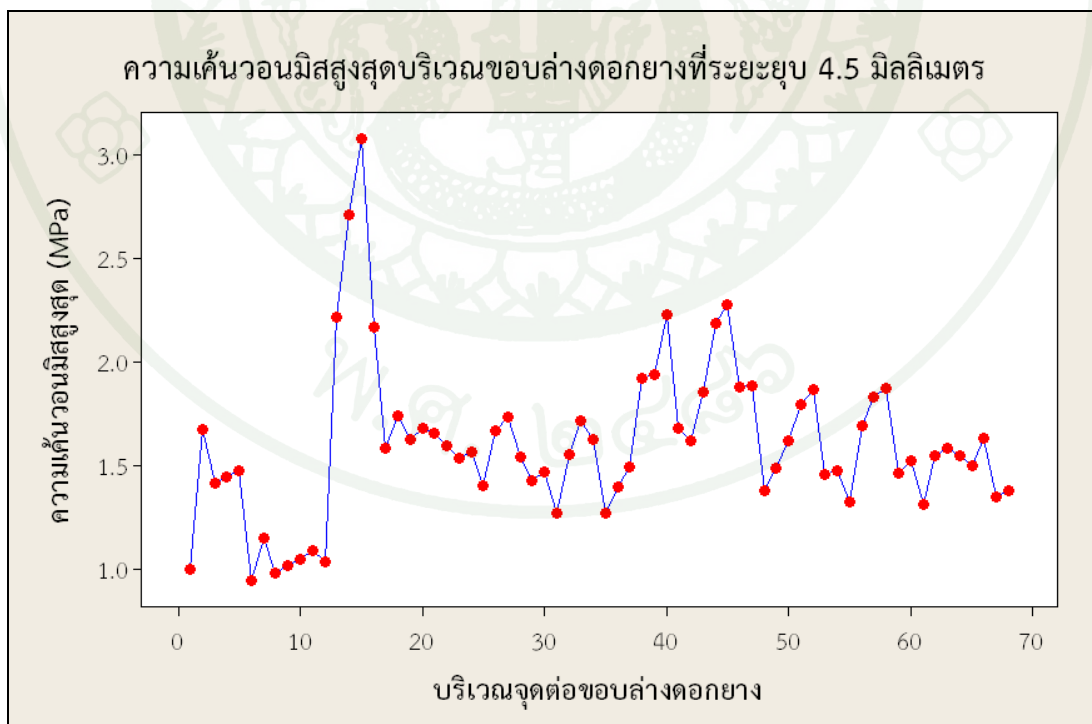
ภาพที่ 74 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร



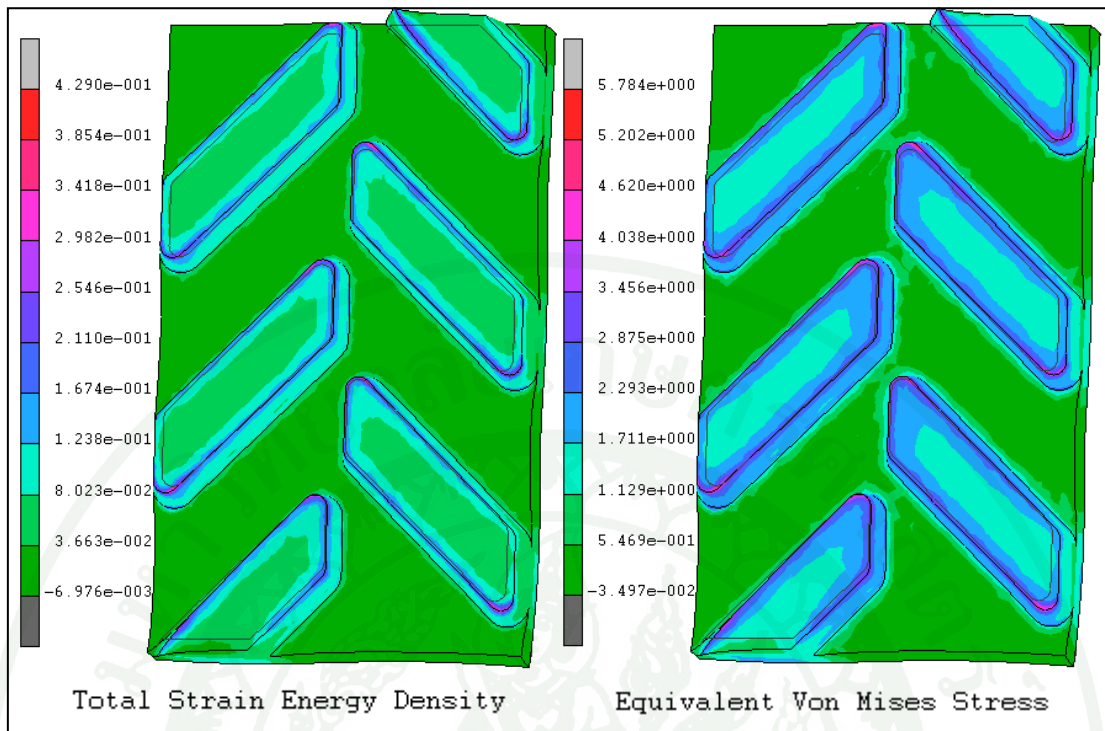
ภาพที่ 75 กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร



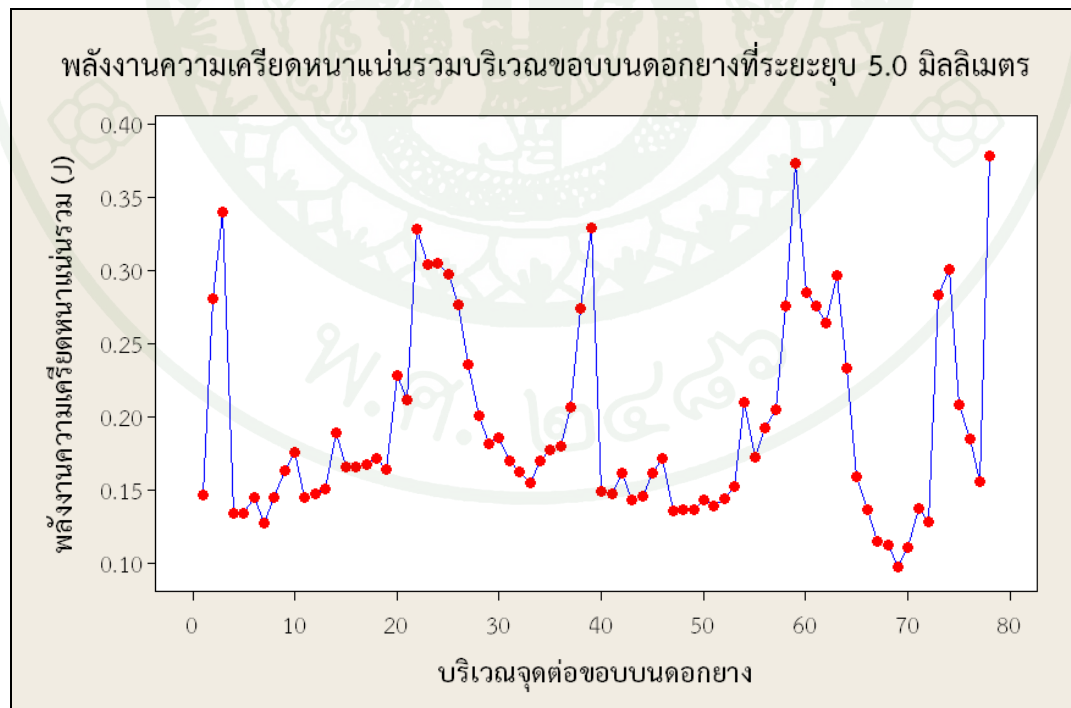
ภาพที่ 76 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร



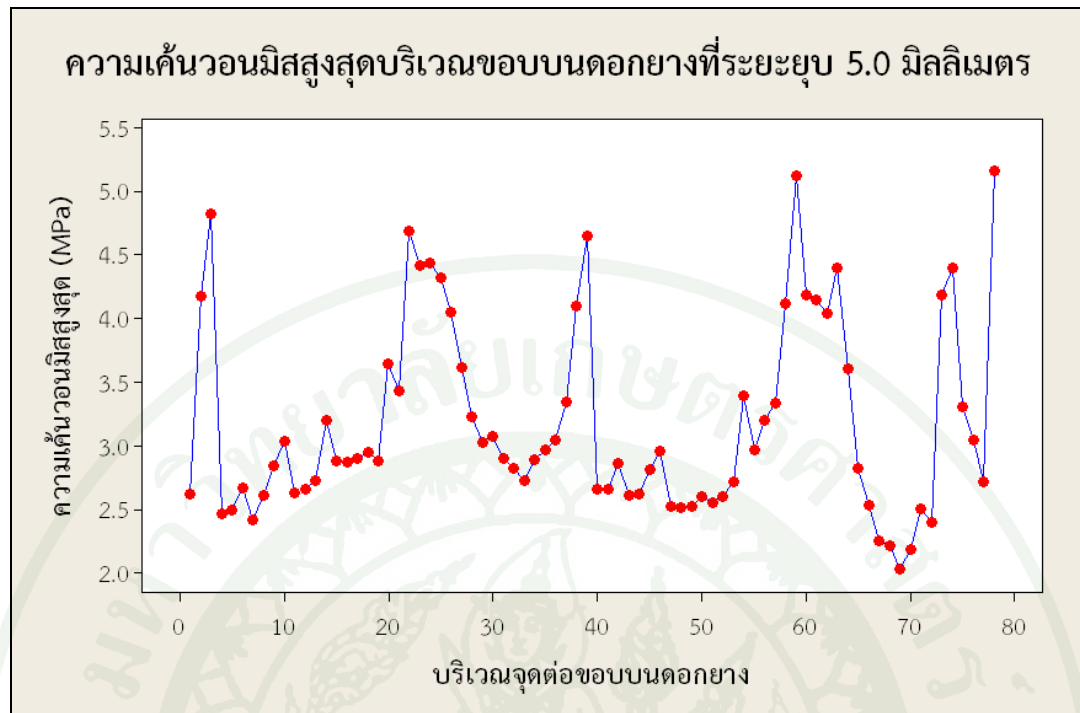
ภาพที่ 77 กราฟความเค้นวอนมิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 4.5 มิลลิเมตร



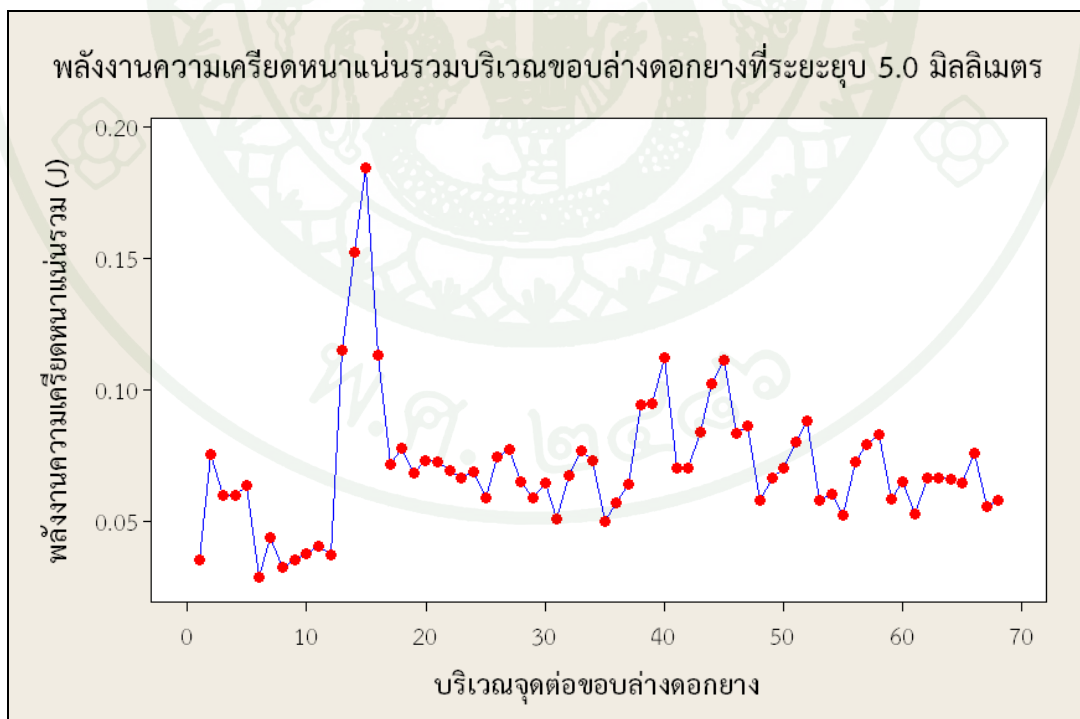
ภาพที่ 78 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร



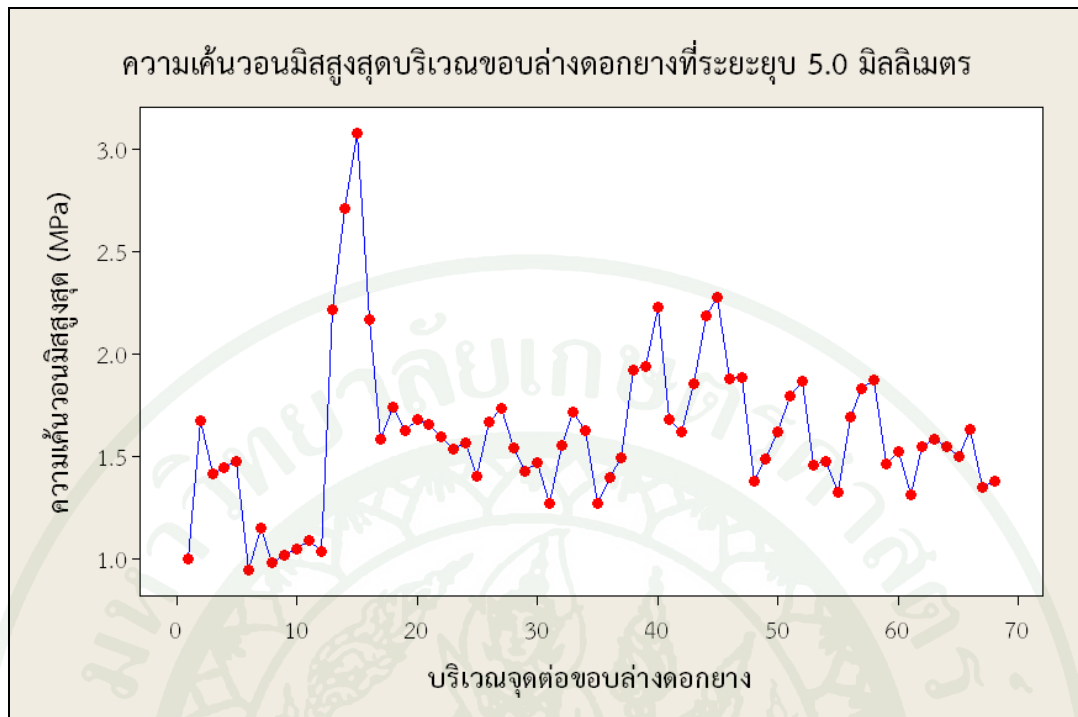
ภาพที่ 79 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร



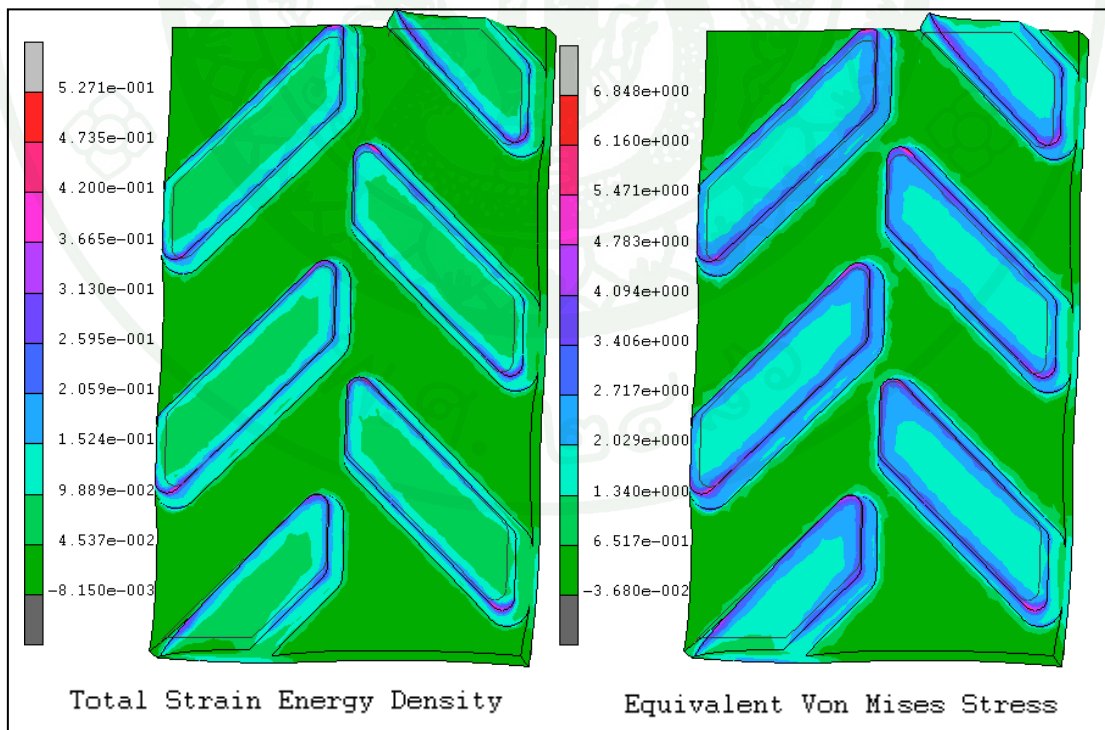
ภาพที่ 80 กราฟความเค้นวอนมีสสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร



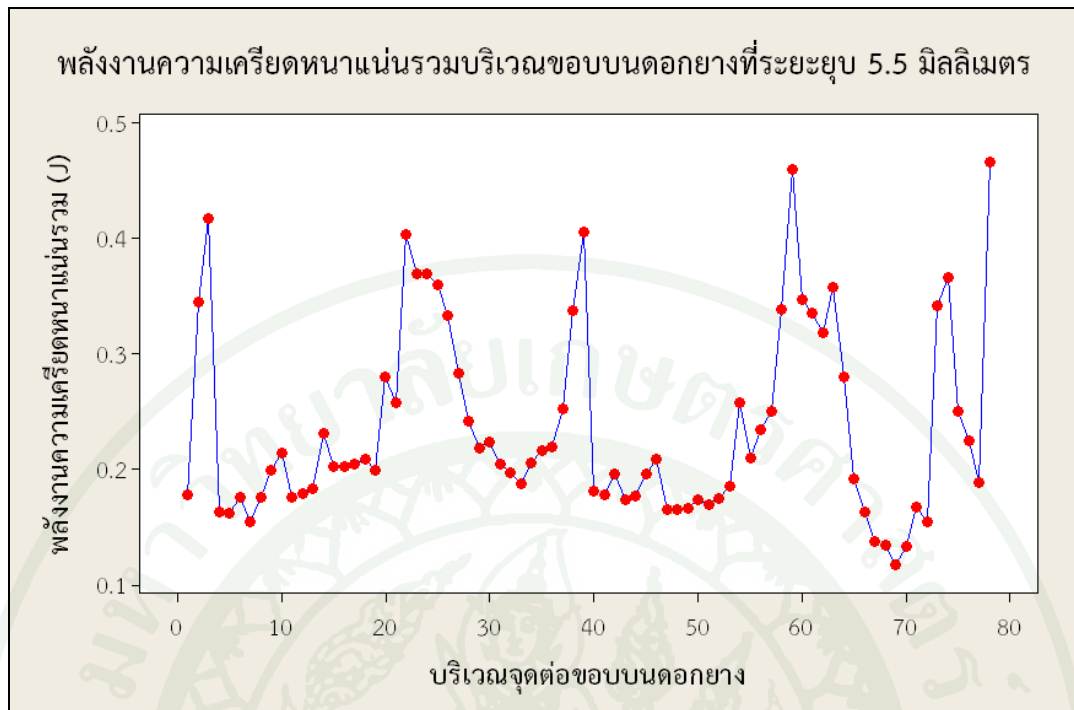
ภาพที่ 81 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 5.0 มิลลิเมตร



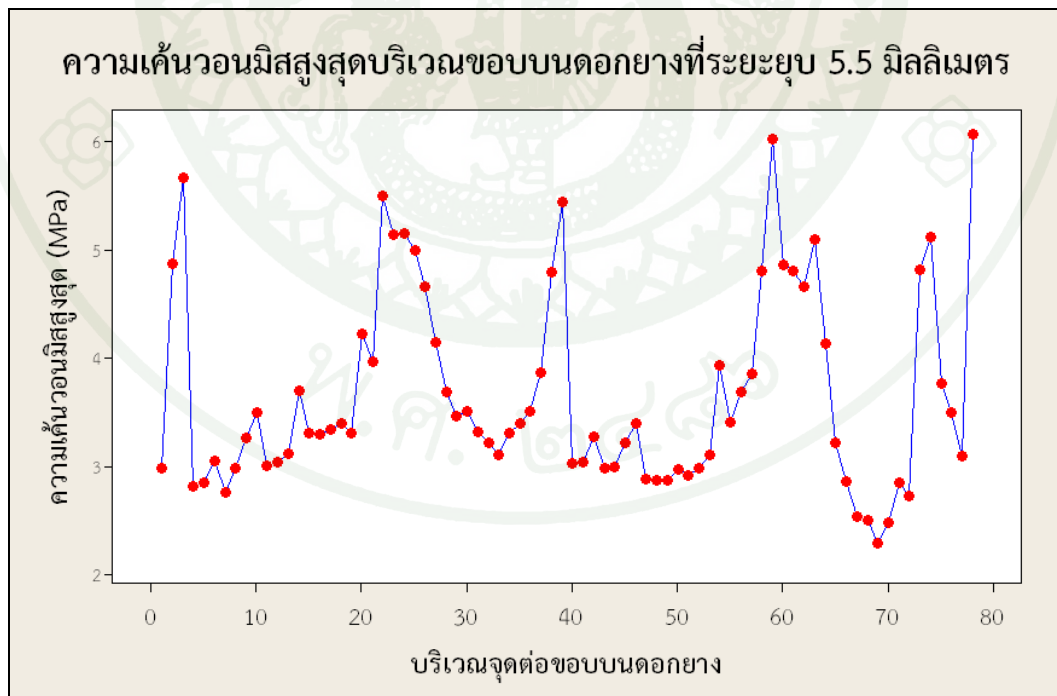
ภาพที่ 82 กราฟความเค้นวอนมิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกลายที่ระยะยวบ 5.0 มิลลิเมตร



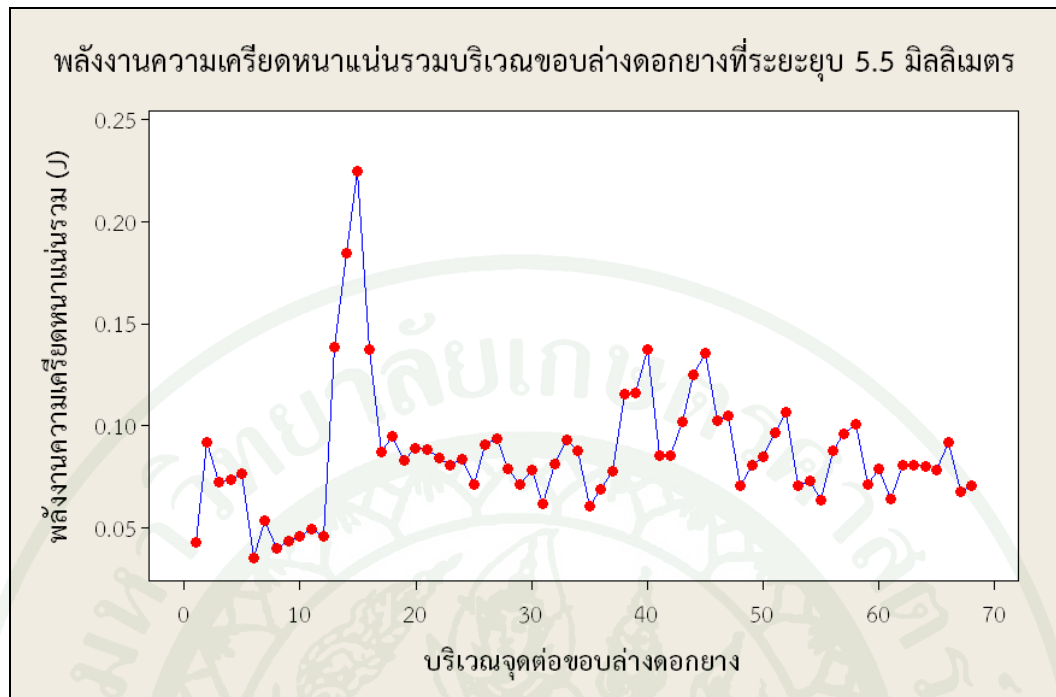
ภาพที่ 83 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยวบ 5.5 มิลลิเมตร



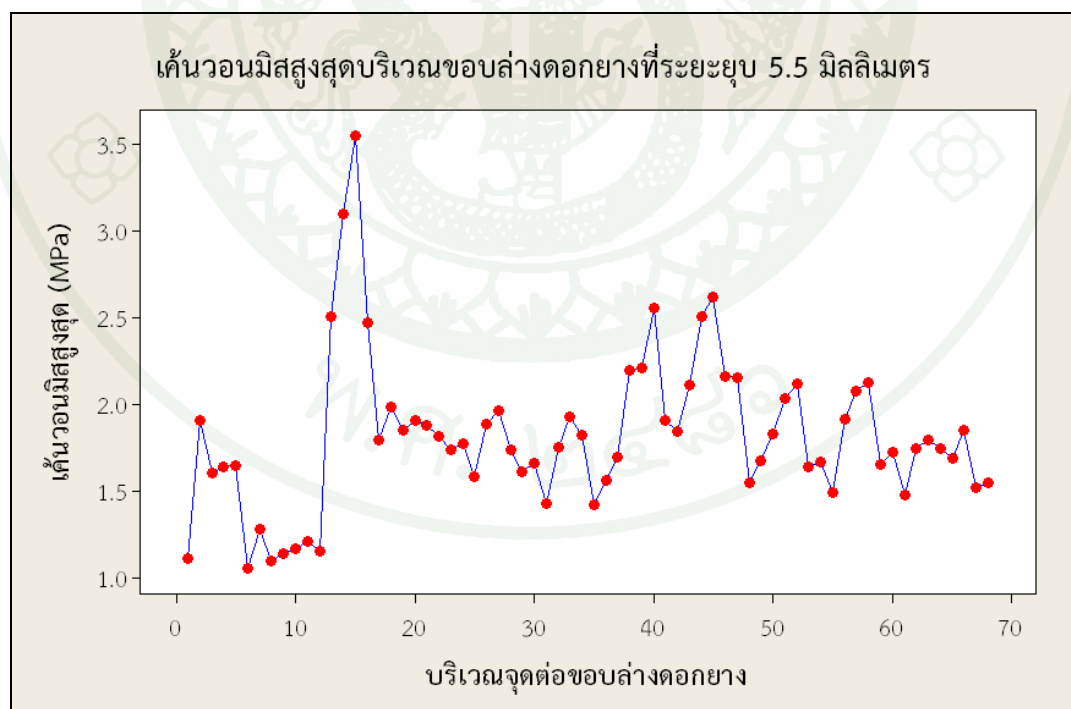
ภาพที่ 84 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร



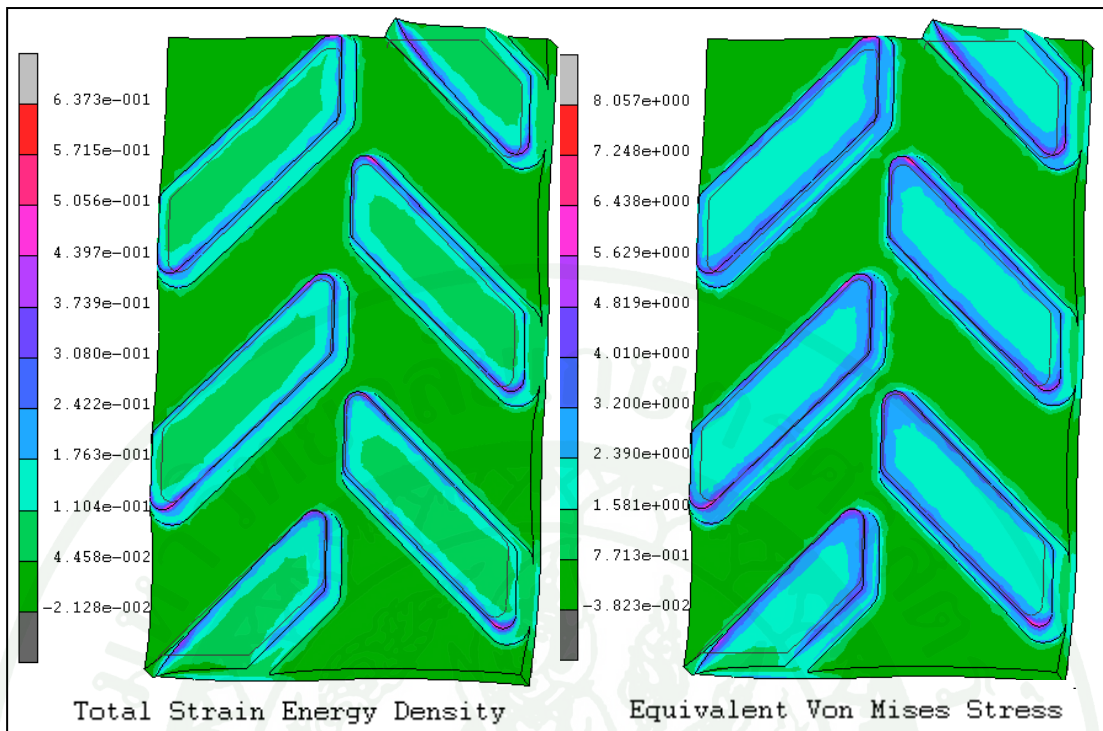
ภาพที่ 85 กราฟความเค้นวอนมึสสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร



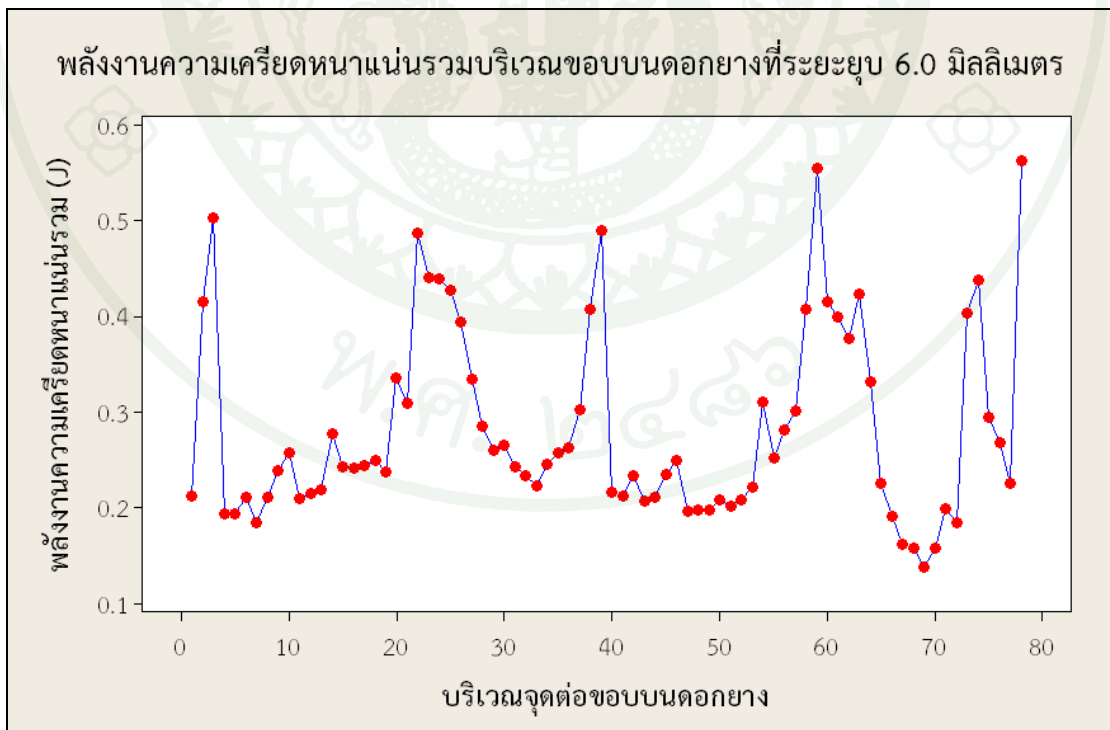
ภาพที่ 86 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร



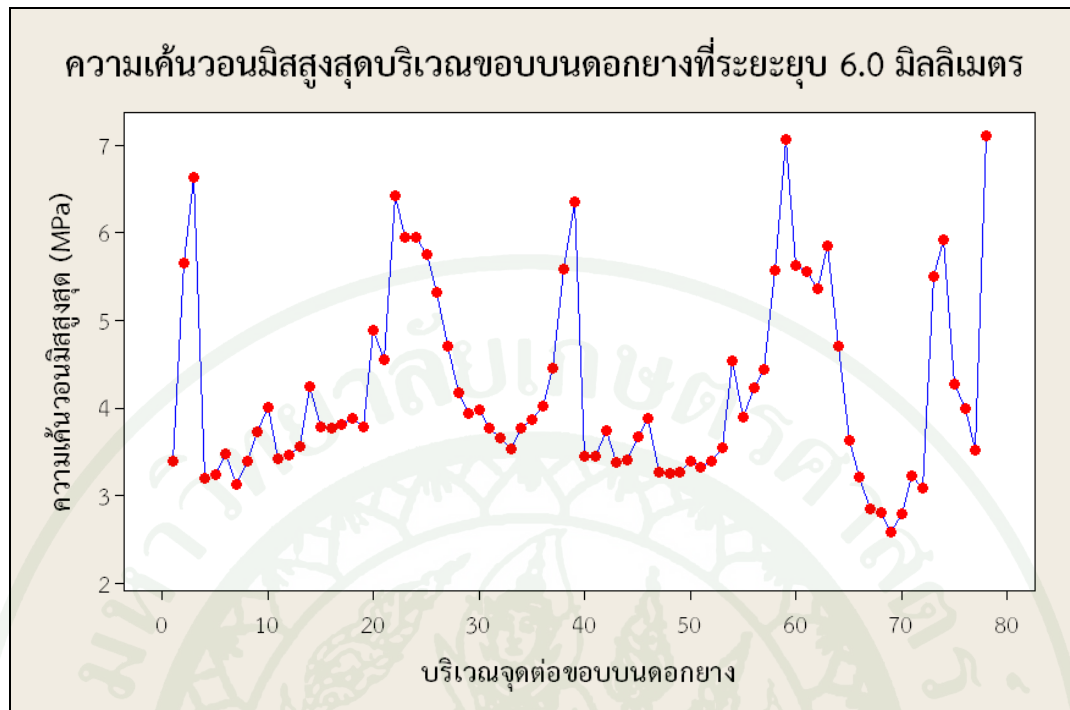
ภาพที่ 87 กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 5.5 มิลลิเมตร



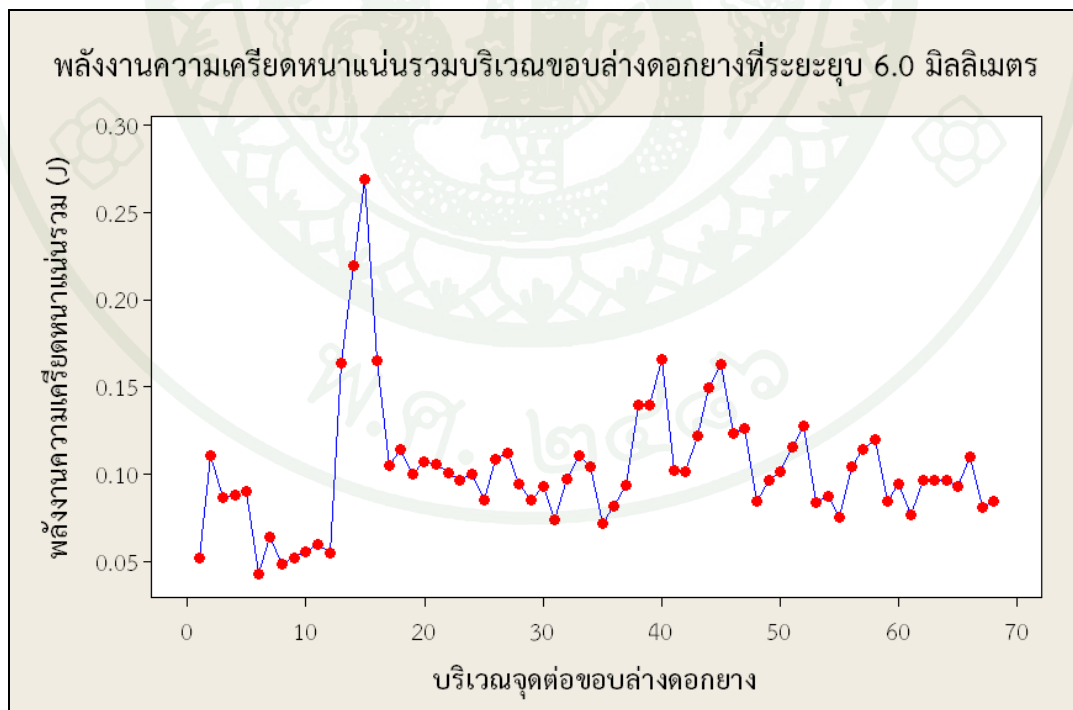
ภาพที่ 88 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยูป 6.0 มิลลิเมตร



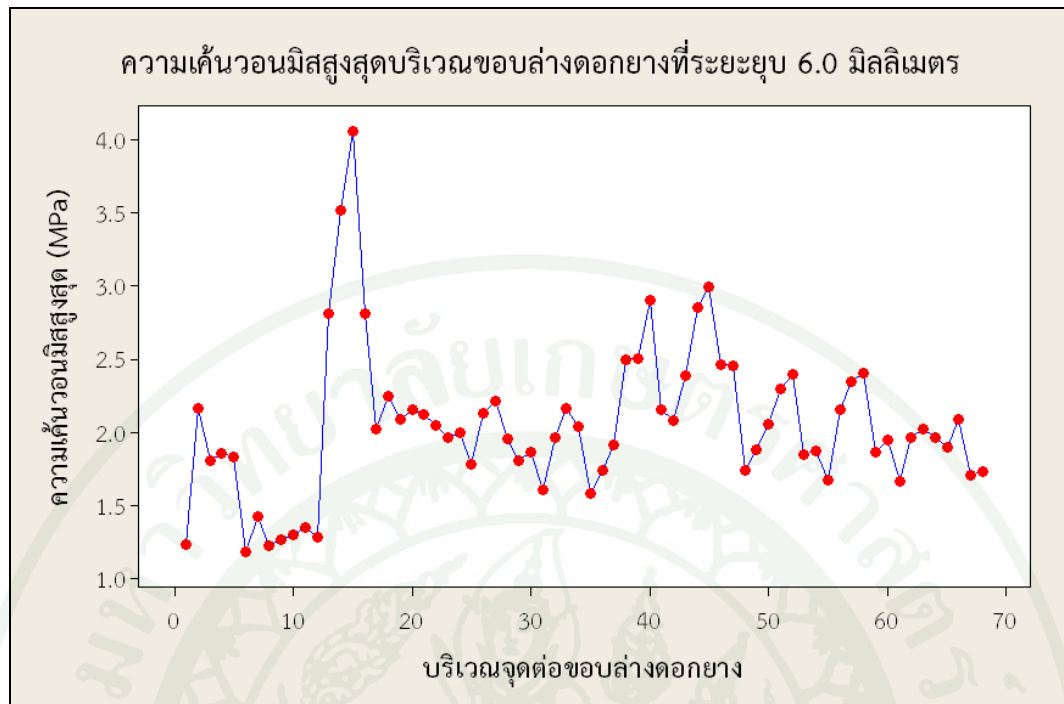
ภาพที่ 89 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยูป 6.0 มิลลิเมตร



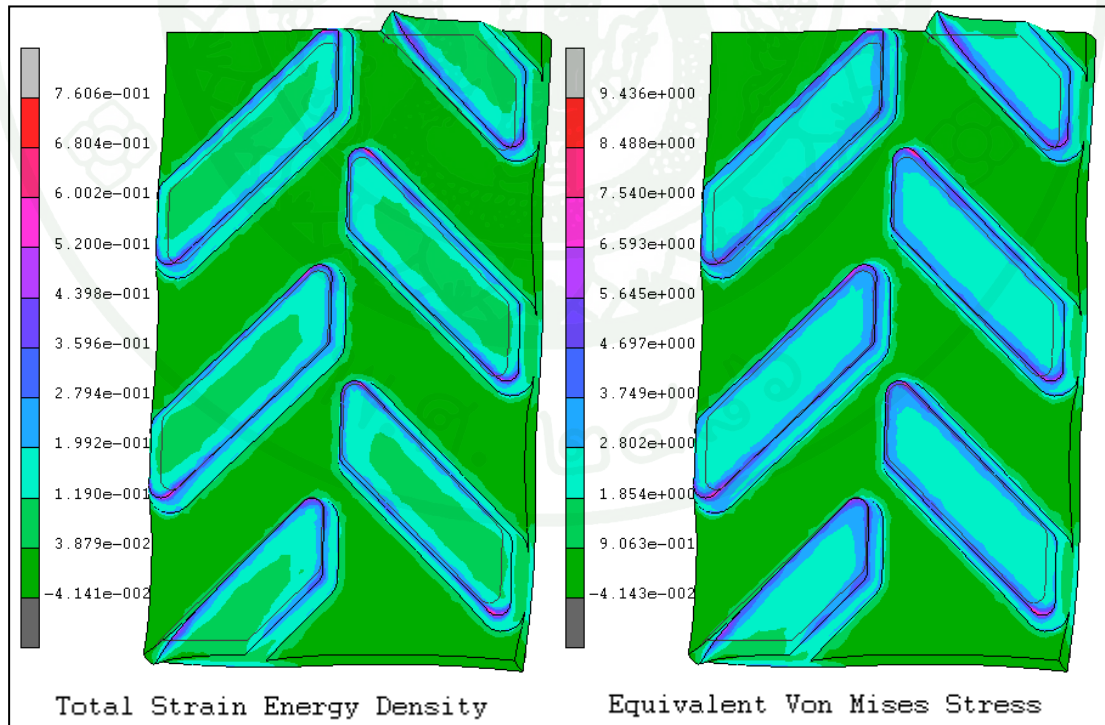
ภาพที่ 90 กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร



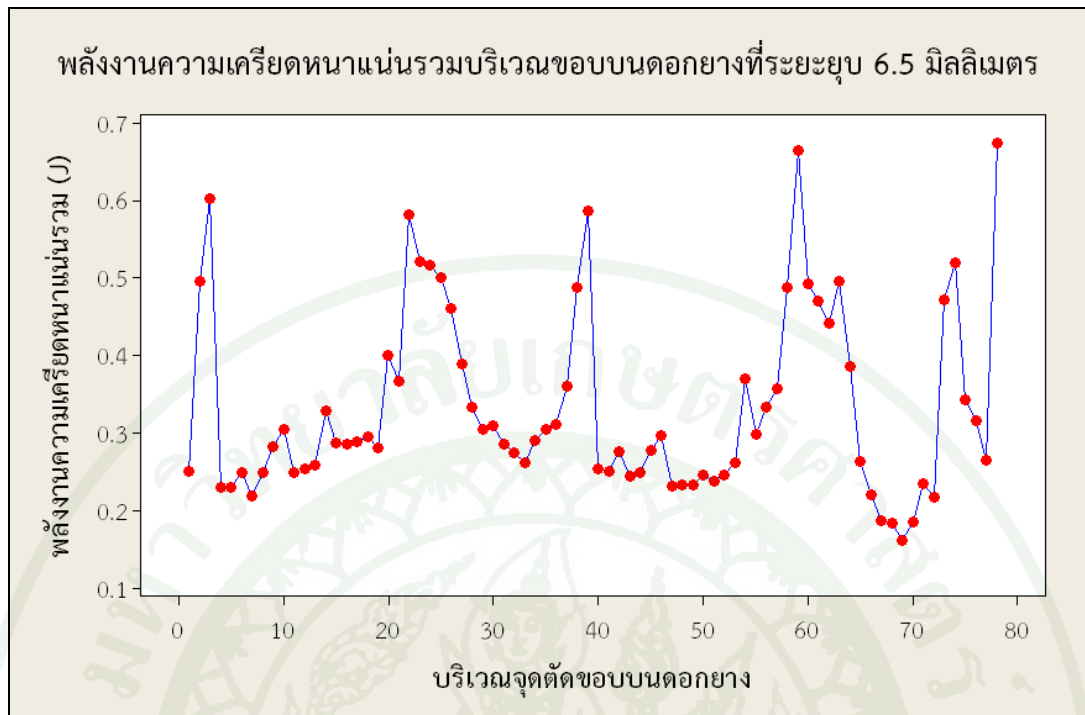
ภาพที่ 91 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร



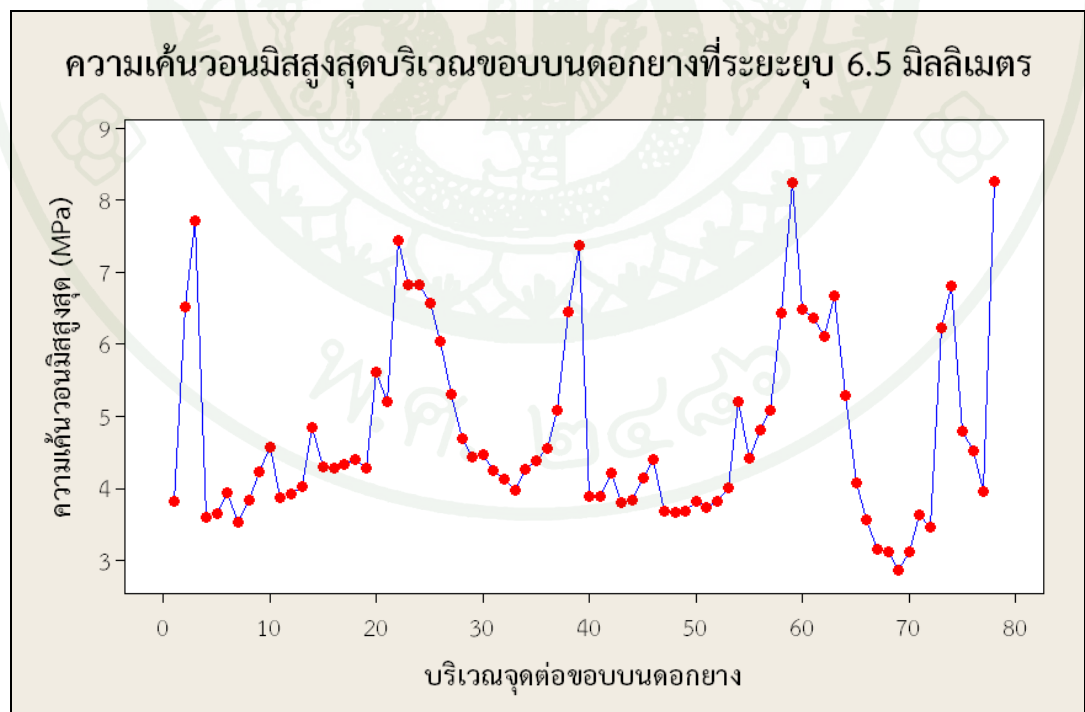
ภาพที่ 92 กราฟความเค้นวอนมิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 6.0 มิลลิเมตร



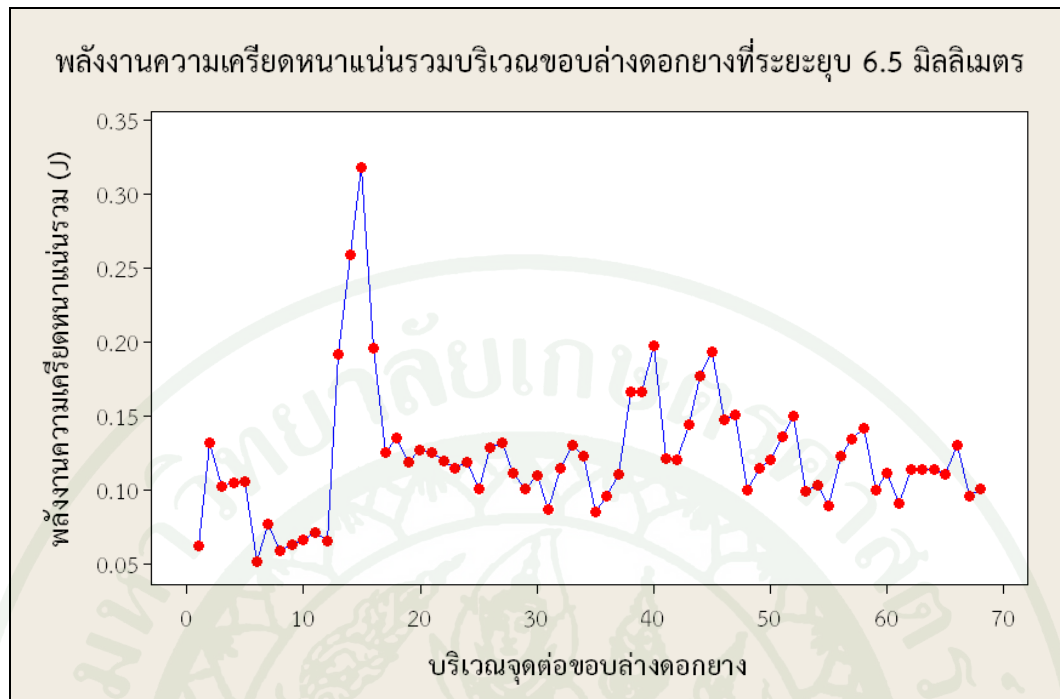
ภาพที่ 93 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร



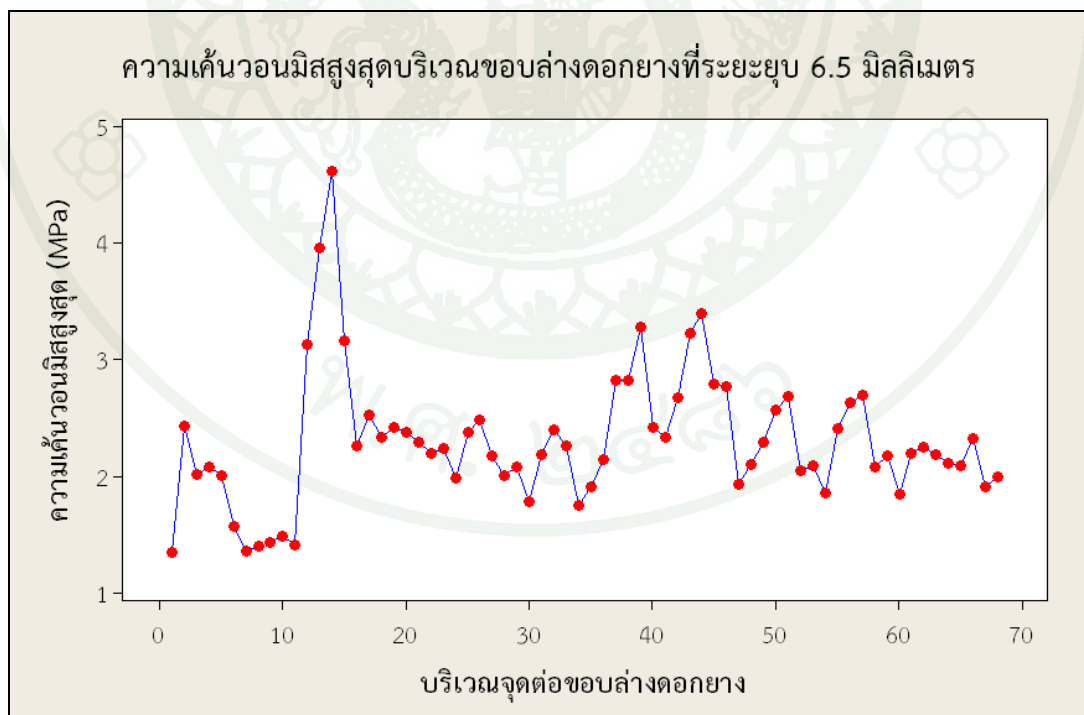
ภาพที่ 94 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร



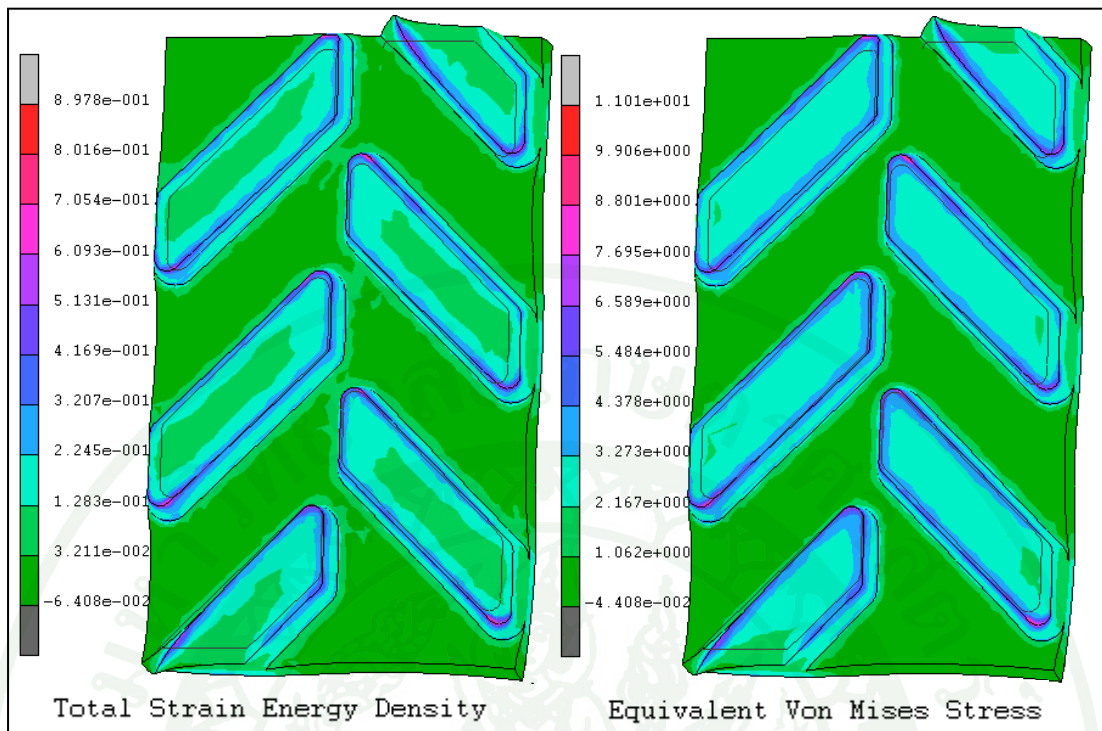
ภาพที่ 95 กราฟความเค้นวอนมึสสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร



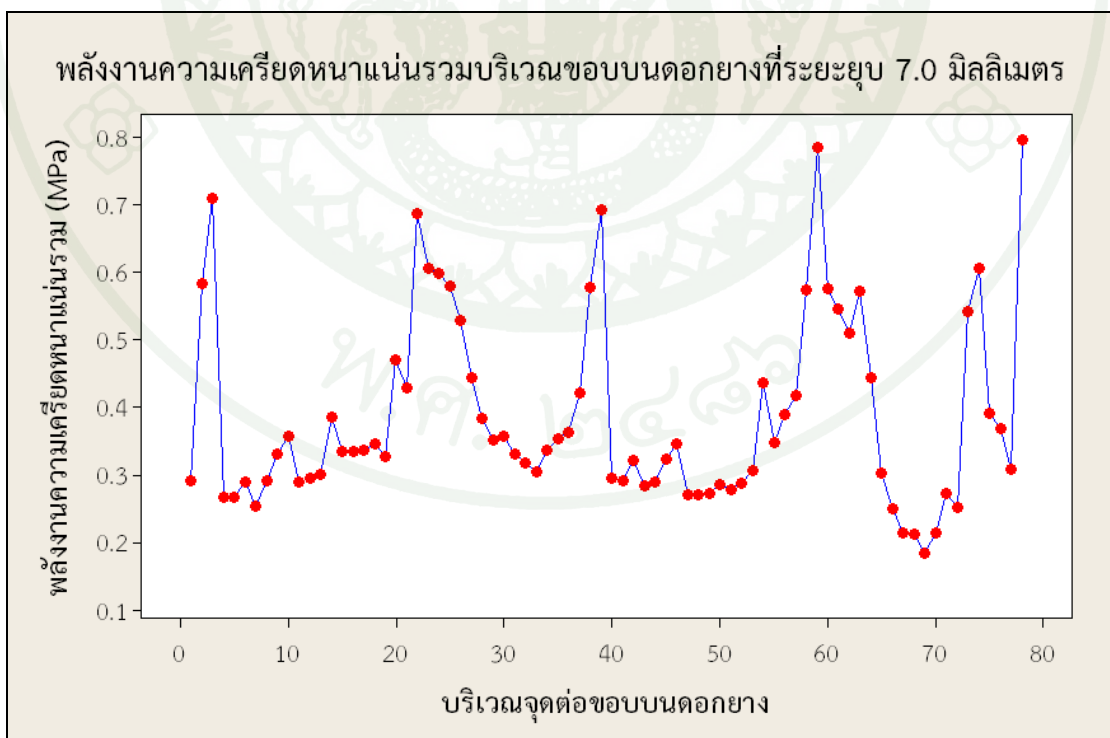
ภาพที่ 96 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร



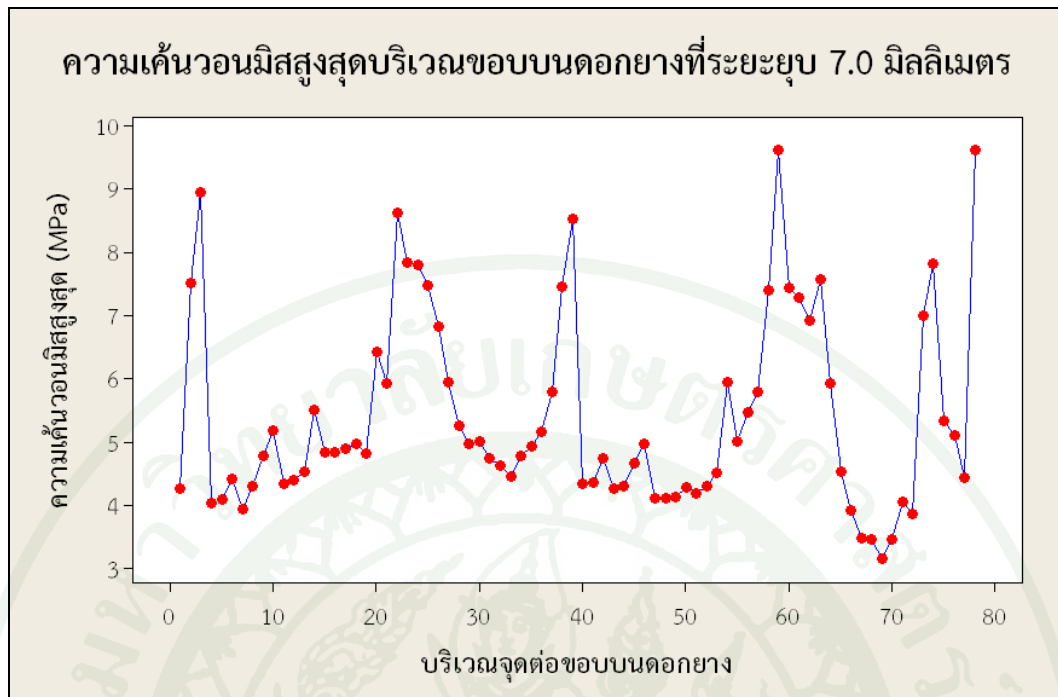
ภาพที่ 97 กราฟความเค้นวอนมิสสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 6.5 มิลลิเมตร



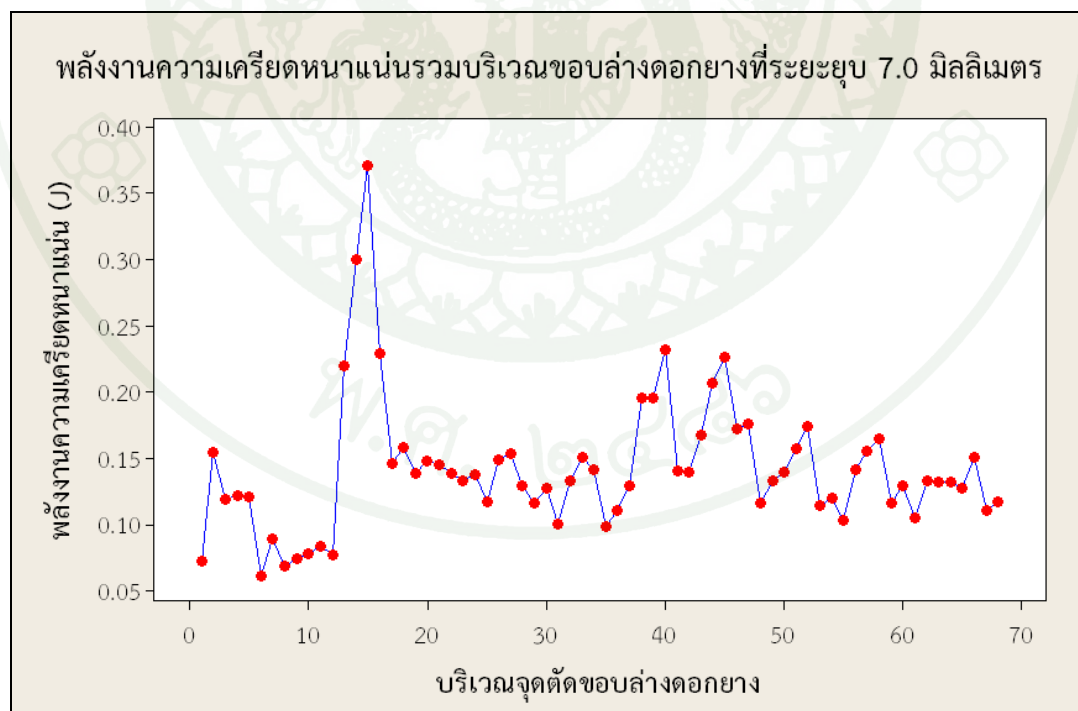
ภาพที่ 98 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาที่ระยะยูน 7.0 มิลลิเมตร



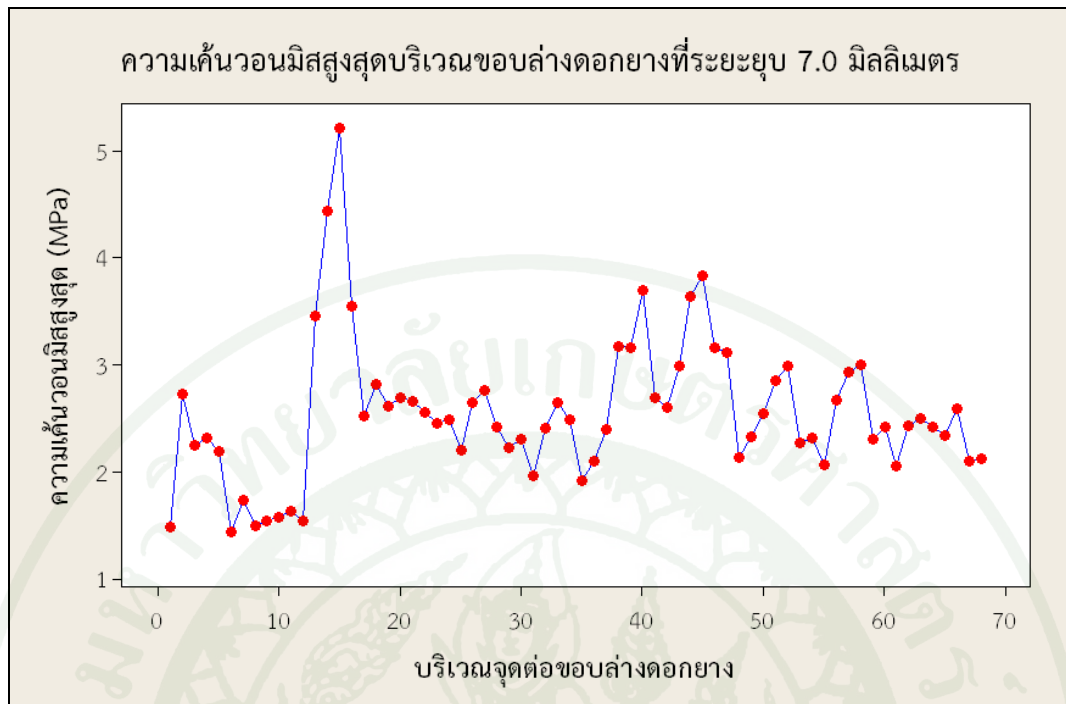
ภาพที่ 99 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยูน 7.0 มิลลิเมตร



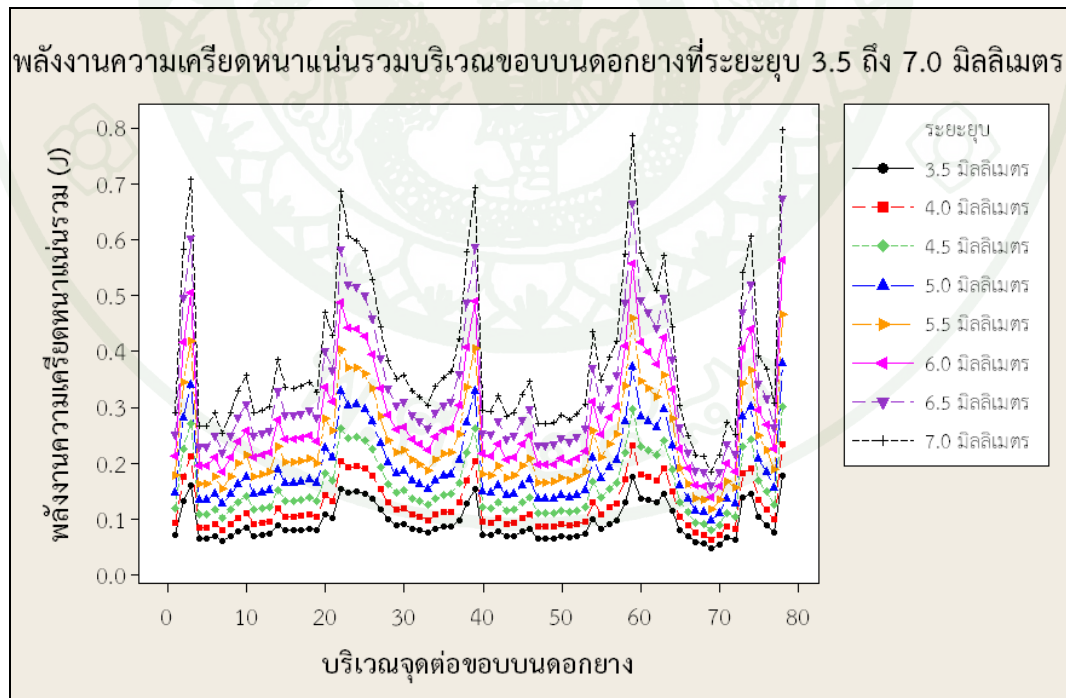
ภาพที่ 100 กราฟความเค้นวอนมีสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 7.0 มิลลิเมตร



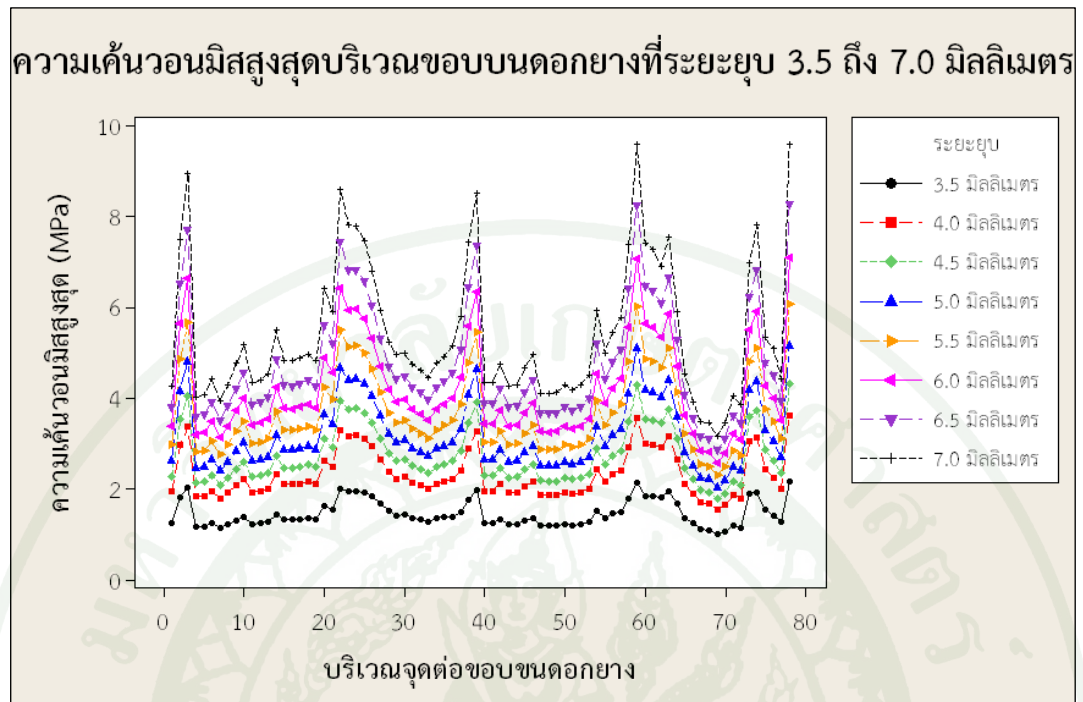
ภาพที่ 101 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 7.0 มิลลิเมตร



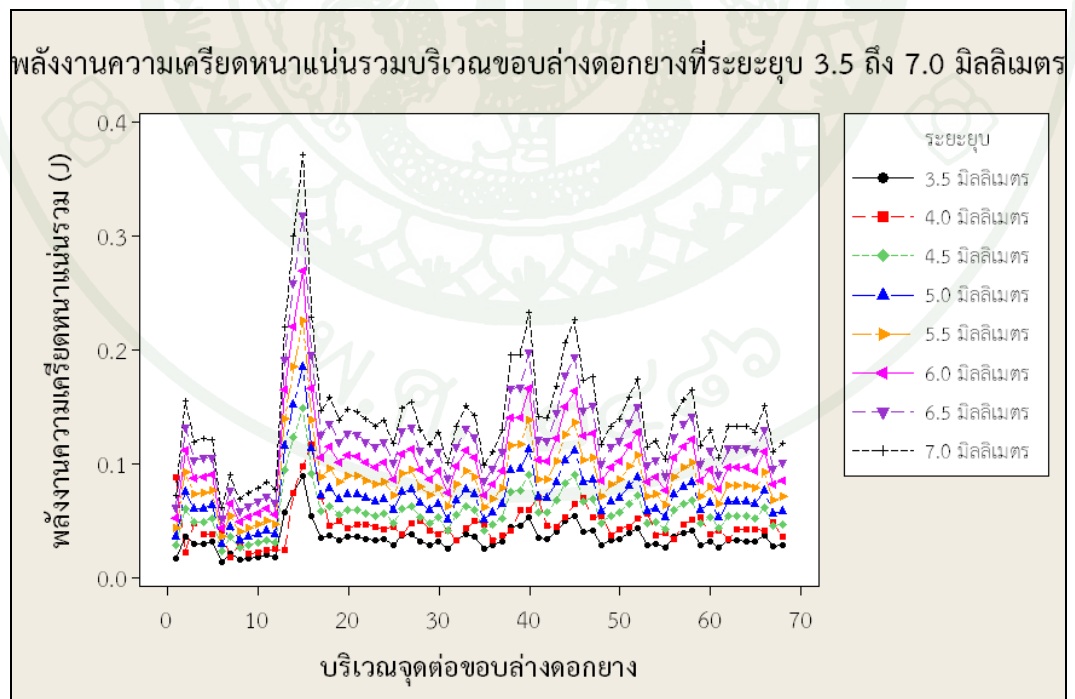
ภาพที่ 102 กราฟความเค้นวอนมืสูงสุดบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะยุบ 7.0 มิลลิเมตร



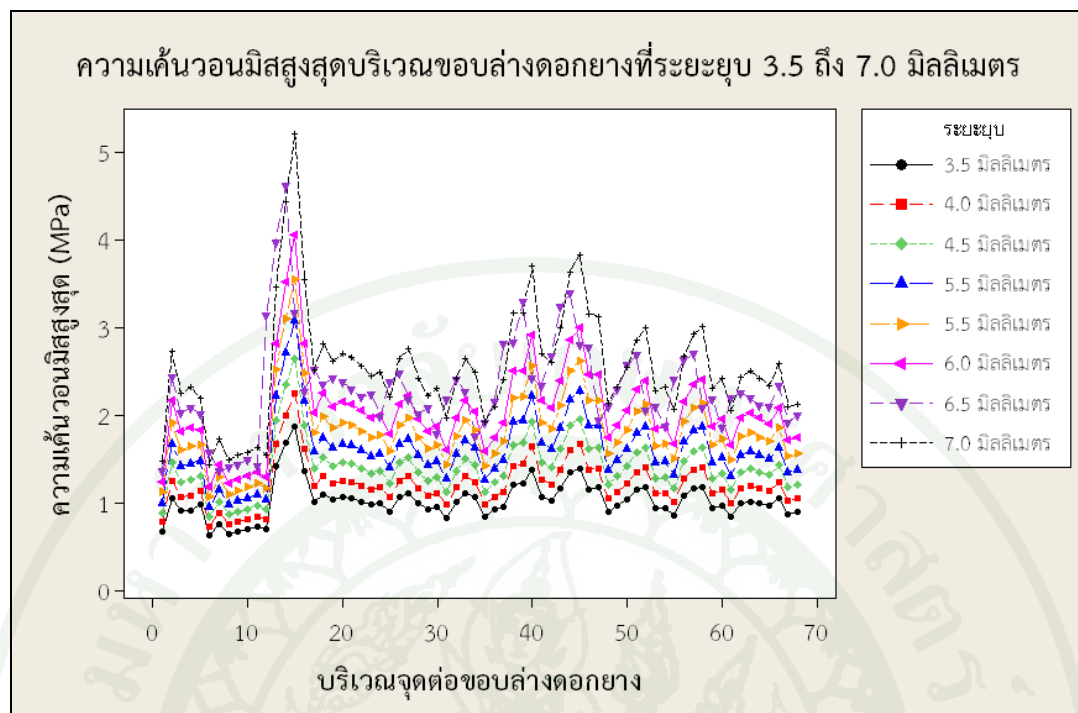
ภาพที่ 103 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะยุบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร



ภาพที่ 104 กราฟความเค้นวอนมิตสูงสุดบริเวณขอบบนดอกยางที่ระยะเย็บ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร



ภาพที่ 105 กราฟพลังงานความเครียดหนาแน่นรวมบริเวณขอบล่างดอกยางที่ระยะเย็บ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร



ภาพที่ 106 กราฟความเค้นวอนมืสูงสุดบริเวณขอบล่างตอกยางที่ระยะยุบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนายางตีนตะขาบที่ทำจากยางธรรมชาติ รวมถึงความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาและที่มีผลิตในปัจจุบัน โดยแบ่งงานวิจัยเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกคือการทดสอบแรงกดของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ส่วนที่สองทำการทดสอบสมบัติของยาง ส่วนที่สามเป็นการประยุกต์การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการจำลองระยะยุบของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาภายใต้แรงกดแบบสถิต แล้วนำมาศึกษาเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลการทดสอบจริง เพื่อให้ทราบว่าแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกของสมบัติยาง และชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้แบบใดให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกันมากที่สุด และส่วนสุดท้ายคือการศึกษาเชิงเปรียบเทียบการรับแรงกดและความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษา ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. จากการทดสอบแรงกดจริง ผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบกรณีศึกษาทั้ง 5 ชิ้นงานทดสอบพบว่าเป็นไปในทางเดียวกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าการทดสอบน่าเชื่อถือ
2. แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่สามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของยาง มีความสำคัญต่อวิเคราะห์ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองที่ถูกต้องในการวิเคราะห์วัสดุยางจึงจะช่วยให้กระบวนการออกแบบถูกต้อง โดยเรียงลำดับความถูกต้องจากมากไปหาน้อย คือ อ็อกเดน อันดับที่ 1 > อ็อกเดน อันดับที่ 2 > มูนิร์ฟลิน 2 และ 3 เทอม > อ็อกเดน อันดับที่ 3
3. รูปแบบและขนาดของเอลิเมนต์มีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรจะต้องหาค่าที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงผลเฉลยของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบจุดต่อชนิด 10 จุด ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับการทดสอบแรงกดมากที่สุด อีกทั้งการใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดละเอียดกว่าจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคำตอบแต่จะส่งผลให้เวลาคำนวณนานกว่าถึงประมาณ 38 เท่า
4. การยืนยันความถูกต้องของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางตีนตะขาบกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดและระยะยุบตัวที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดสอบจริง พบว่าค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ดังกล่าวของแบบจำลองและจากการทดสอบจริงที่ระยะยุบ 3.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีค่าสูงสุดไม่เกินสิบห้าเปอร์เซ็นต์

5. ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นวอนมืสูงสุดและพลังงานความเคียดหนาแน่นรวมเกิดจากความเค้นตึงฉาก (Normal Stress) และความเค้นตึงฉาก (Normal Strain) ตามลำดับ ที่แรงกดกระทำบนของผลิตภณั้ยงตึนตะขาบกรณั้ศึกษากึนอึนอึนในแนวตึงฉาก โดยเกิดการกระจายตัวบริเวณดอกยงที่สั้มผั้สั้กับพื้นซึ้งเป็นบริเวณที่มึกจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากการใช้งาน

6. จากผลการทดสอบจริงและการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงกดกับระยะยุดยงตึนตะขาบกรณั้ศึกษาแปรผั้นตรงต้งอกัน และอัตราส่วนของแรงต่อระยะยุดยงผลิตภณั้ยงตึนตะขาบกรณั้ศึกษา คึอ ค่าความซึ้งตึง

7. ค่าความซึ้งตึงที่ได้จากการทดสอบจริงเท่ากับ 5,690 kN/mm และการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 8,276 kN/mm

ข้อเสนอนณะ

1. สามารถน่านไปใช้ออกแบบยงตึนตะขาบรูปทรงอึน เพื่อเป็นข้อพิจารณาในการเลือกรูปทรงที่เหมะสมในด้า้นความด้า้นทานการเสึยรูปและพัฒนายงตึนตะขาบต้งอกัน

2. พิจารณาการออกแบบยงตึนตะขาบภายใต้ภาวะแบบพลวัต แต่ทึ้งนี้จะต้องเปลี่นส.ป.ส.ความเสึยทานสถิตเป็น ส.ป.ส.ความเสึยทานจลนั้ เพื่อน่านไปใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3. ควรศึกษาความเป็นไปได้ของวัสดุยงธรรมชาตึ้ที่สั้มกับสารตัวเติมอึน นอกจากการใช้ยงธรรมชาตึ้ 100 เปอร์เซ้นต์ ที่สามารถน่านมาประกยุกตึ้ใช้เป็นผลิตภณั้ยงตึนตะขาบได้ในอนาคตต้งอกัน

4. ในอนาคตซึ้งประเทศไทยก้าลึงจะซึ้ร่วมในสมาคมประชาชาติอาเซียน โดยมีเกษตรกรรมเป็นอุตสาหกรรมหลัก ดั้งนั้้นการออกแบบในอนาคตควรจะน่านสมบัติของดินในแต่ละประเทศสมาชิกมาพิจารณาเพื่อปรับให้เหมะสมกับการใช้งาน อันจะส่งผลให้เกิดผลผลิตเกษตรกรรมสูงสุด ซึ้งจะเป็นปัจจัยให้ประชาคมประชาชาติอาเซียนยึนยั้ดอยงซึ้งแกร่งและยึนยั้ดต้งอกัน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- เดช พุทธเจริญทอง. 2541. **การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- นัย บำรุงเวช. 2544. **รถพาร์มแทรกเตอร์ล้อและยาง**. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองโพบูลย์. 2551. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2548. **ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- _____. และ ชาศริต สิริสิงห์. 2550. **ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- ไพโรจน์ จิตรธรรม. 2552. **โมเดลวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยางในเชิงโครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์**. เทคโนโลยีวัสดุ. ฉบับที่ 57.
- วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2530. **กระบวนการผลิตยาง: กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง**. ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2554. **รายงานผลการวิจัยเรื่องเต็ม ประจำปี 2554 สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร**. ม.ป.ท.
- สมาคมยางพาราไทย. 2555. **พระราชบัญญัติการยางแห่งประเทศไทย**. แหล่งที่มา: http://www.thainr.com/th/message_detail.php?MID=176, 15 กันยายน 2555.
- อุทิศ สุริภา. 2553. **แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของวัสดุยาง (ตอนที่ 3)**. *Mechanical Technology Magazine*. 2010 (112): 41-46.
- _____. 2554. **ความแข็งตึง (Stiffness) ของชิ้นส่วนยาง**. *Mechanical Technology Magazine*. 2011 (119): 42-50.
- ABAQUS Inc. 2004. **ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.4**. The United States of America.

American Society for Testing and Materials Standard. 1990. **Standard Terminology Relating to Rubber**, ASTM 1566.

Cheng, M. and W. Chen. 2003. Experimental Investigation of the Stress–Stretch Behavior of EPDM Rubber with Loading Rate Effects. **International Journal of Solids and Structures** 40: 4749–4768.

Dirac Delta Consultants Ltd. n.d. **Mechanical Engineering: Friction**. Source: <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/m/e/mechanical%20engineering/source.html>, November 19, 2012.

Entrekin, A. 1999. **Accuracy of MSC/NASTRAN First- and Second-Order Tetrahedral**. Elements in Solid Modeling for Stress Analysis.

Gent, A. N. 2001. **Engineering with Rubber**. Oxford University Press, New York, NY.

Heinrich, G. and M. Kluppel. 2008. Rubber Friction, Tread Deformation and Tire Traction. **Wear**. 265: 1052-1060.

Katsuhiko, T. 1997. **Rubber Track**. U.S.Patents 5,984,438.

Khuri, M. F. 1993. Design of Rectangular Rubber Seals on the Basis of von Mises Stress. **Transportation Research Board**. 0361-1981: 53-63.

Lapcik L., Jr., Augustin, A. Pistek and L. Bujnoch. 2001. Measurement of the Dynamic Stiffness of Recycled Rubber Based Railwat Track Mats According to the DB-TL 918.071 Standard. **Applied Acoustics**. 62 (2001): 1123-1128.

Sang, J.B., L.F. Sun, S.F. Xing and D.L. Zhang. 2012. Computational Analysis of Stress Field and Contact Pressure for Rubber Seal Based on Non-Linear Finite Element. **Applied Mechanics and Materials**. 268 – 270: 1080-1083.

Marsili, A. and P. Servadio. 1996. Compaction Effects of Rubber or Metal-Tracked Tractor Passes on Agricultural Soils. **Soil and Tillage Research**. 37 (1): 37-45.

- Michelle S. Hoo Fatt and X. Ouyang. 2007. Integral-Based Constitutive Equation for Rubber at High Strain Rates. **International Journal of Solids and Structures** 44: 6491–6506.
- Mohsenimanesh, A., S.M. Ward and M.D. Gilchrist. 2009. Stress Analysis of a Multi-Laminated Tractor Tyre using Non-Linear 3D Finite Element Analysis. **Materials and Design**. 30: 1124-1132.
- Pust, L., L. Pesek, F. Vanek and J. Cibulka. 2007. Laboratory Measurement of Stiffness and Damping of Rubber Element. **Engineering MECHANICS**. 14 (1/2): 13-22.
- Wikidot Inc. 2007. **Yield stress**. Source: <http://nsb.wikidot.com/ea-1-2-1-4>, February 05, 2013.
- Rahman A., A. Yahaya, M. Zohadie, D. Ahmad and W. Ishak. 2005. Designing Framework of a Segmented Rubber Tracked Vehicle for Sepang Peat Terrain in Malaysia. **IIUM Engineering Journal** 6 (2005).
- Robert Grisso, John Perumpral, Frank Zoz. 2006. An Empirical Model for Tractive Performance of Rubber-Track in Agricultural Soils. **Journal of Terramechanics**. 43: 225-236.
- Sergio G. Arias, Ph.D. 2012. **Finite Element Analysis of Rubber Treads on Tracks to Simulate Wear Development**. Advanced Technology Group, Camoplast Solideal Inc.
- Teramoto, E., F. Yabe, K. Fukushima, H. Narahara, Y. Kiyono, S. Togasi, M. Kadono, N. Nishimura, and T. Muramatsu. 1996. Development of a High-Speed, Half-Tracked Truck with Metal-Coreless Rubber Track. **Journal of Terramechanics** 33: 113–123.
- Turner, D.M. and M. Brennan. 1990. The Multiaxial Behaviour of Rubber, **Plastics and Rubber Processing and Application**. 14: 183 – 188.

Wei, Li. 2011. **Experimental Test and Slide Analysis of Rubber Track.** Yantai University.

Yu, T. 2006. **Development of the Traction Model for the Prototype Track.** University of Pretoria etd.










ภาพผนวกที่ ก1 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ รุ่น INSTRON 5566

Specifications:

Capacity	5 ton
Max Load	10 ton
Accuracy of Load	$\pm 1\%$
Resolution	1/50,000
Testing Speed	50 – 350 mm/min
Machine Size	80 x 48 x 215 cm
Displacement	800 mm





ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย
RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTRE FOR THAI RUBBER INDUSTRY

เลขที่ : 3-008-2554

รายงานผลการทดสอบ


ออกให้เมื่อ	21 มิถุนายน 2554
ออกให้แก่	ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 หมู่ 5 อ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จ. กรุงเทพมหานคร 10900

ลักษณะตัวอย่าง :

1. ยางผ่านการทำให้คงรูป ตัดเป็นรูป dumbbell (ตามมาตรฐาน ASTM D412 Die C) สำหรับการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง (Uniaxial tension) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำนวน 1 ตัวอย่าง (5 ชั้นทดสอบ)
2. ยางผ่านการทำให้คงรูป มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (ตามมาตรฐาน ASTM D575) สำหรับการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทาน (Frictionless compression) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำนวน 1 ตัวอย่าง (5 ชั้นทดสอบ)
3. ยางผ่านการทำให้คงรูป มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ขนาด ยาว 150 มม. กว้าง 20 มม. และหนา 2 มม.) สำหรับการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบ (Planar shear) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำนวน 1 ตัวอย่าง (5 ชั้นทดสอบ)

ชื่อตัวอย่าง : Rubber product A

การทดสอบ : ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial tension), สมบัติการรับแรงกดอัดแบบขจัดแรงเสียดทาน (Frictionless compression) และสมบัติการรับแรงเฉือนในแนวระนาบ (Planar shear) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON 5566) เพื่อที่จะนำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมและความเครียดทางวิศวกรรมไปหาค่าคงที่ความยืดหยุ่นของยาง (Elastic constants) สำหรับการทดสอบนั้นจะต้องทำการขจัดผลของเหลวหนืด (Viscous Effect) ให้หมดไป ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของยางอยู่ในภาวะสมดุล



1/20

ใบรายงานผล (REPORT)
F.001 REV.2/2551

พ.ศ. ๒๕

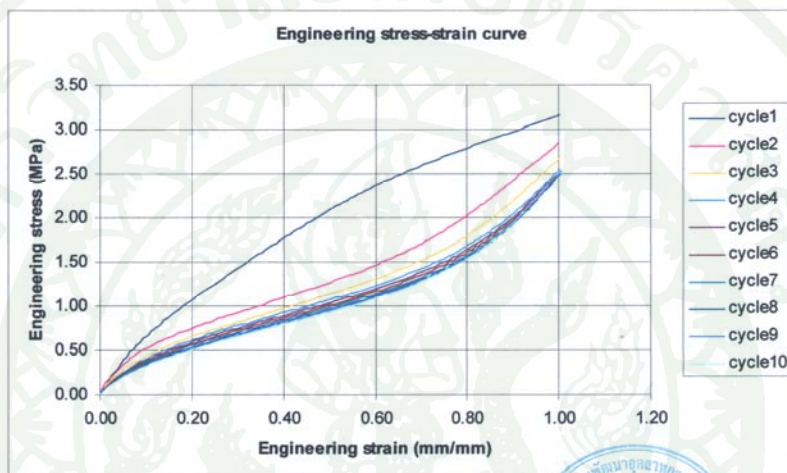
อาคารวิทยาศาสตร์ 3 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อ.พหลโยธินเขตสาย 4 อ.ลาดยาว อ.พหลโยธิน จ.นครปฐม 73170
โทรศัพท์/โทรสาร 0 2441 9816-20 ต่อ 1115 หรือ 0 2441 0511
Science Building 3, Faculty of Science, Mahidol University, Phuttamonthon 4 Rd., Salaya, Nakhon Pathom 73170
Tel./Fax. 0 2441 9816-20 ext. 1115 or 0 2441 0511 Website : <http://www.rubbercenter.org>

ภาพผนวกที่ ๑1 รายงานผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ : การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง (Uniaxial tension)

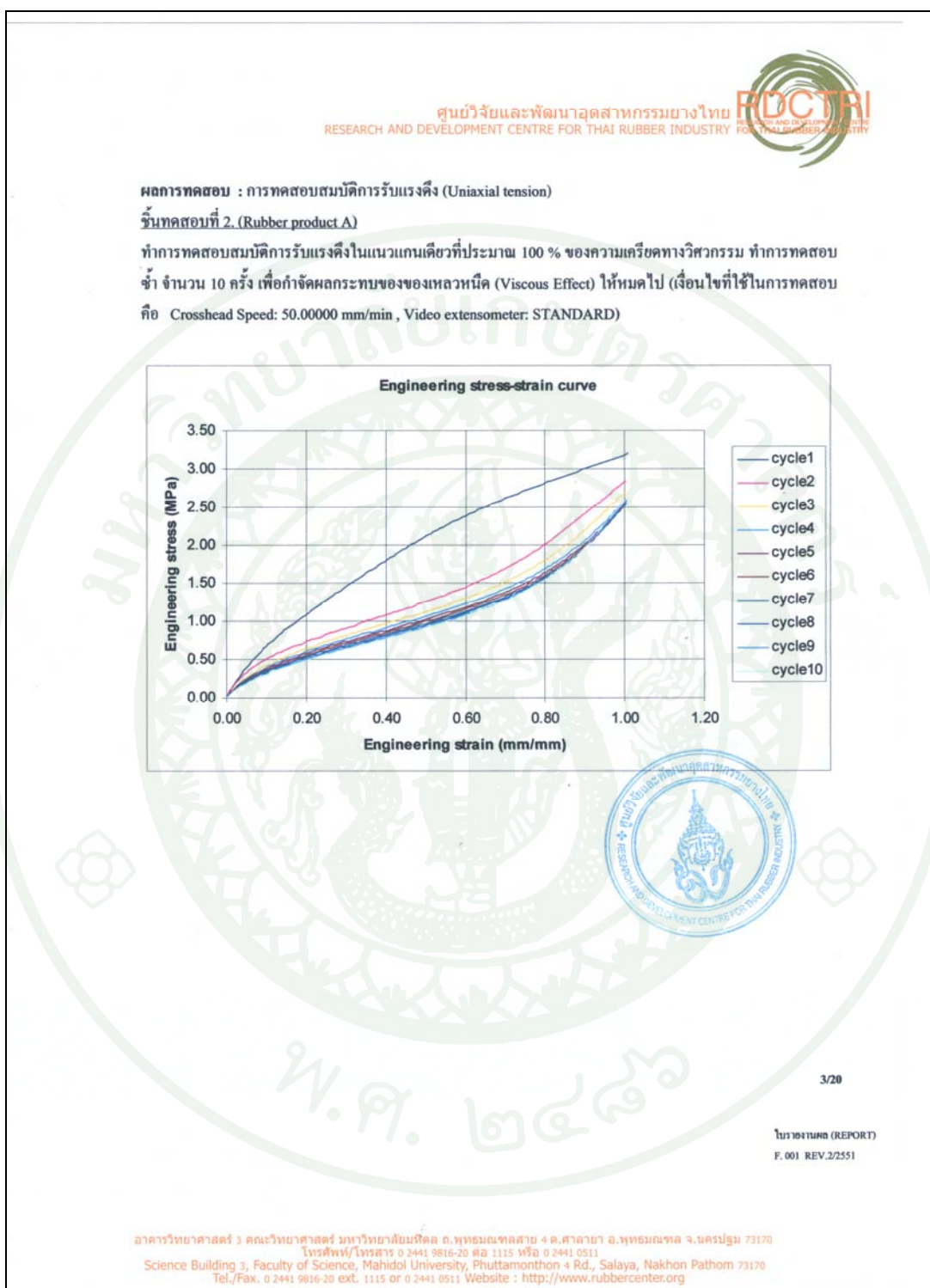
ชิ้นทดสอบที่ 1. (Rubber product A)

ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงในแนวแกนเดียวที่ประมาณ 100 % ของความเครียดทางวิศวกรรม ทำการทดสอบซ้ำ จำนวน 10 ครั้ง เพื่อกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืด (Viscous Effect) ให้หมดไป (เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ คือ Crosshead Speed: 50.00000 mm/min , Video extensometer: STANDARD)

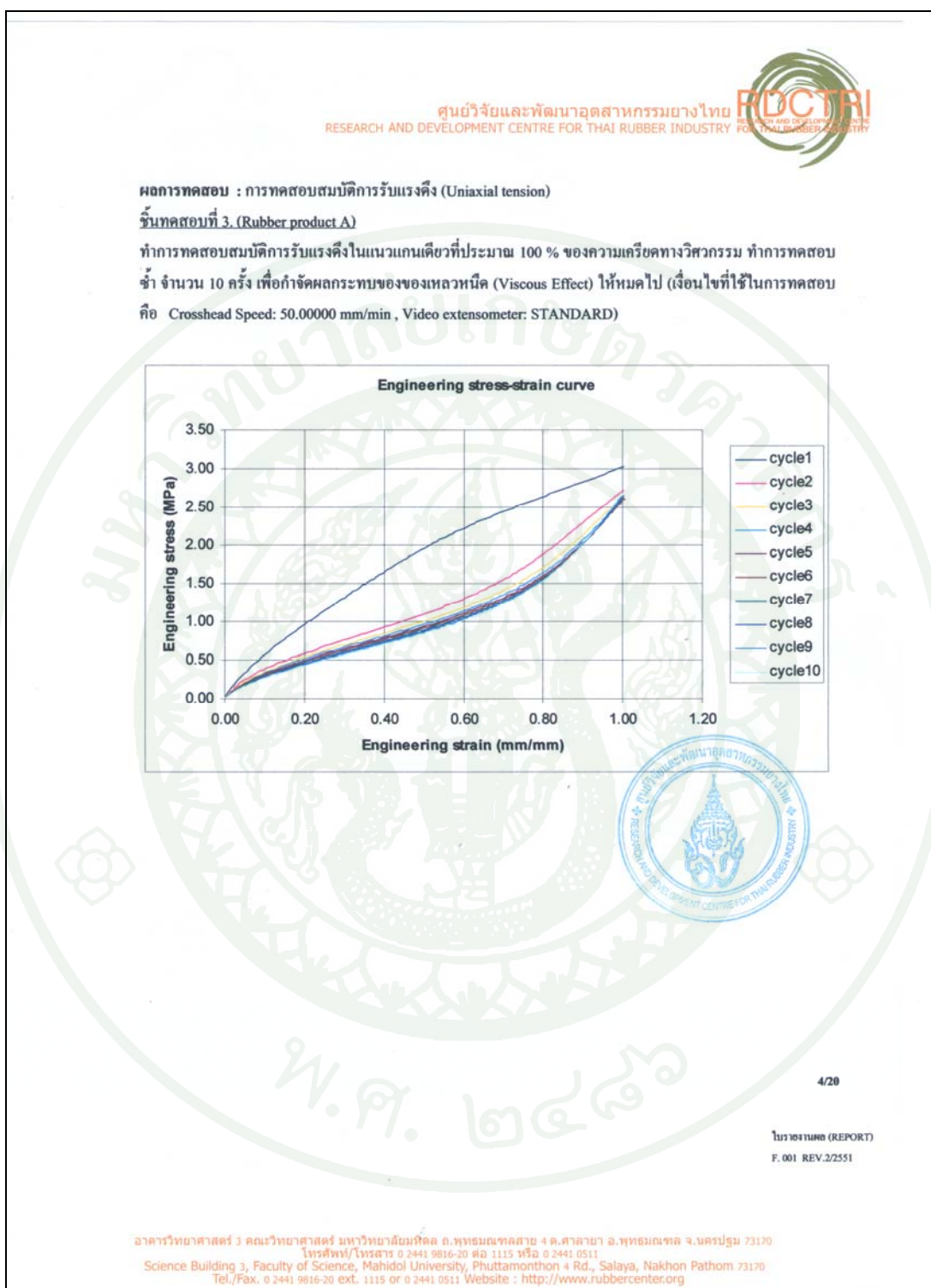


พ.ศ. ๒๕๖๖

ภาพผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 1



ภาพผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชั้นทดสอบที่ 2

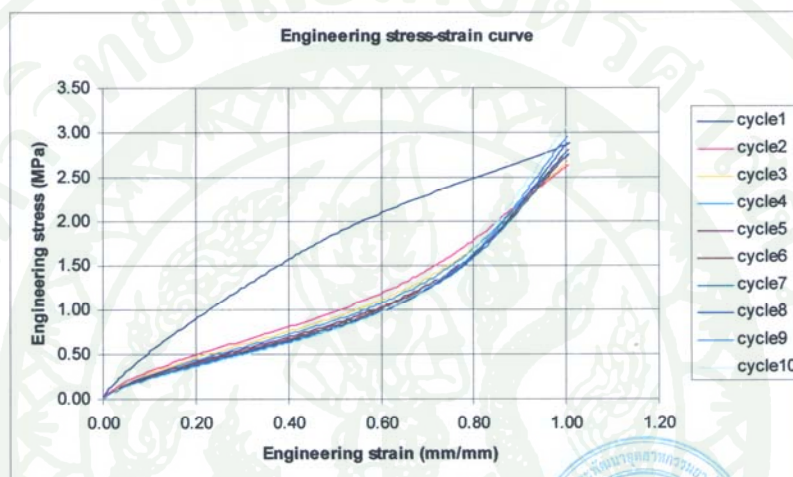


ภาพผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 3

ผลการทดสอบ : การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง (Uniaxial tension)

ชิ้นทดสอบที่ 4. (Rubber product A)

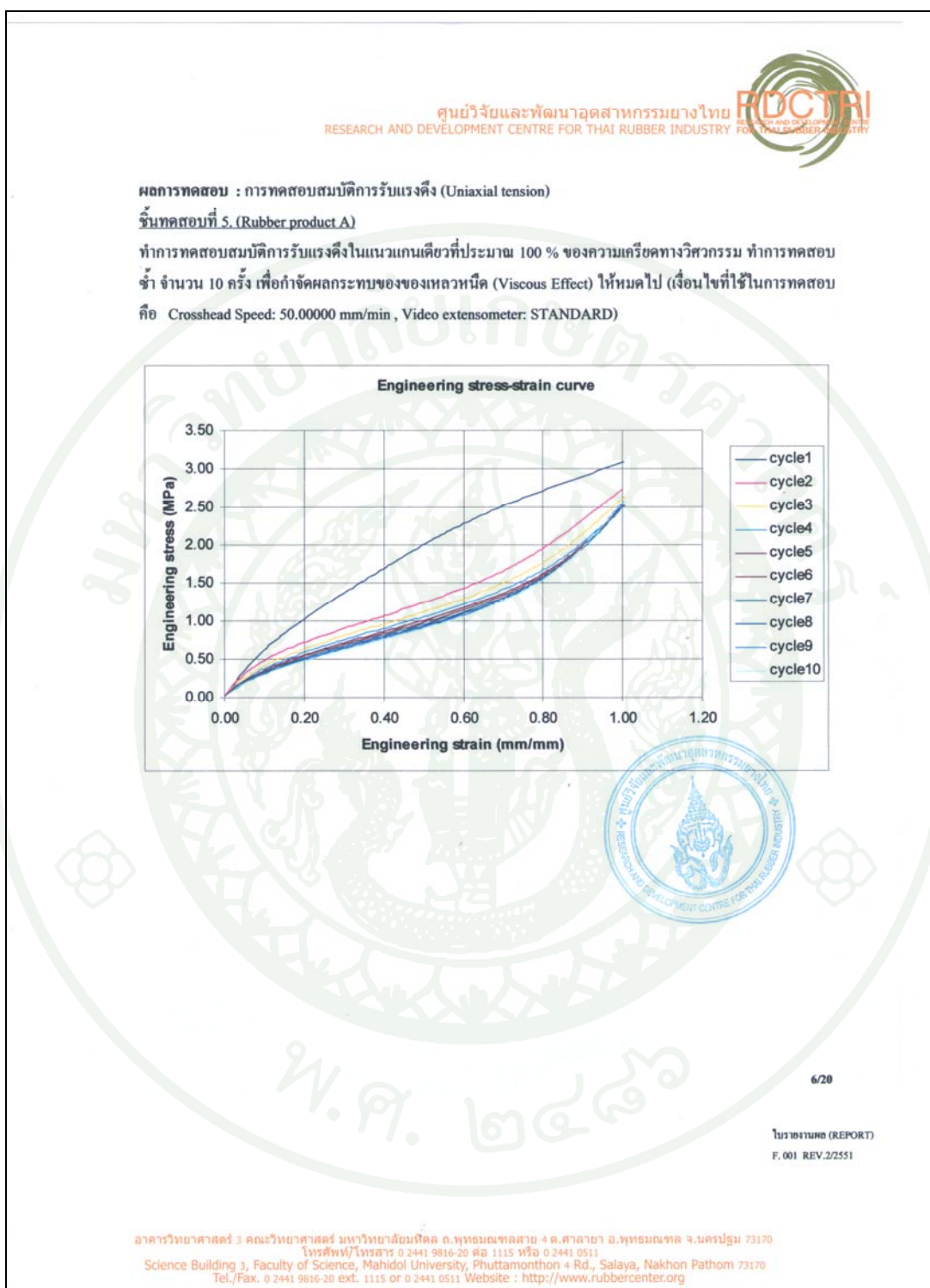
ทำการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงในแนวแกนเดียวที่ประมาณ 100 % ของความเครียดทางวิศวกรรม ทำการทดสอบซ้ำ จำนวน 10 ครั้ง เพื่อกำจัดผลกระทบของของเหลวหนืด (Viscous Effect) ให้หมดไป (เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ คือ Crosshead Speed: 50.00000 mm/min , Video extensometer: STANDARD)



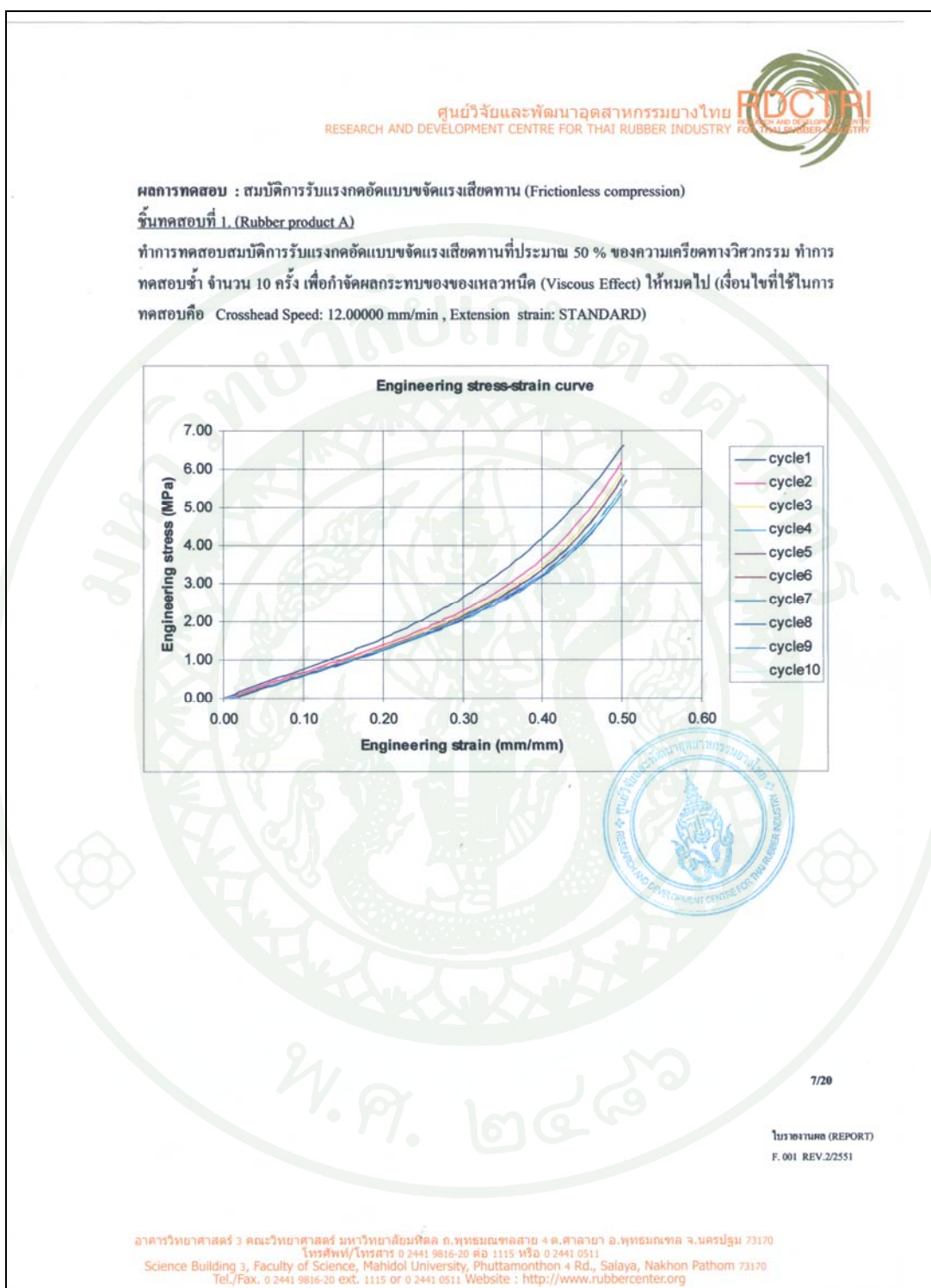
5/20

ใบรายงานผล (REPORT)
F.001 REV.2/2551

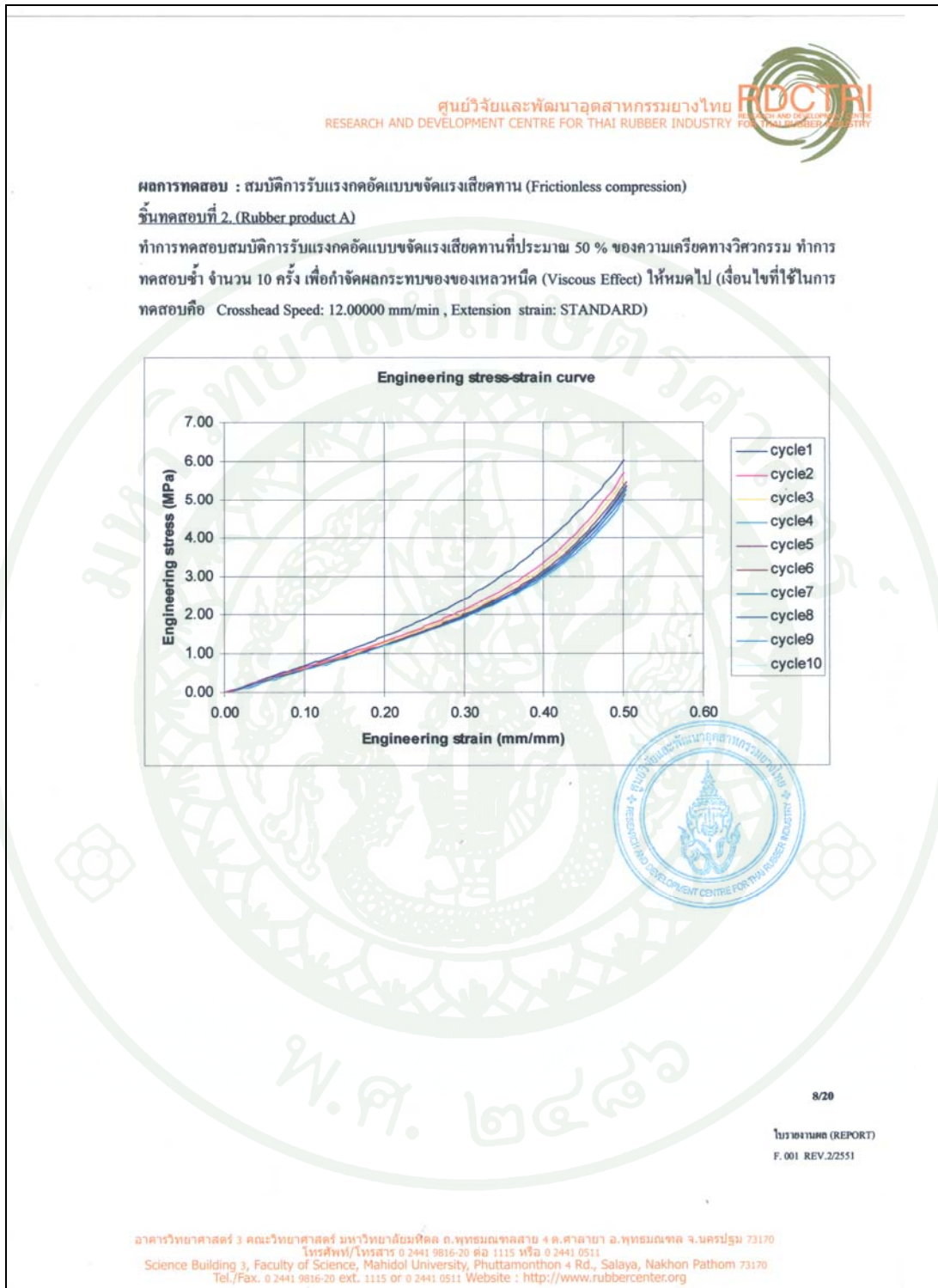
ภาพผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ 4



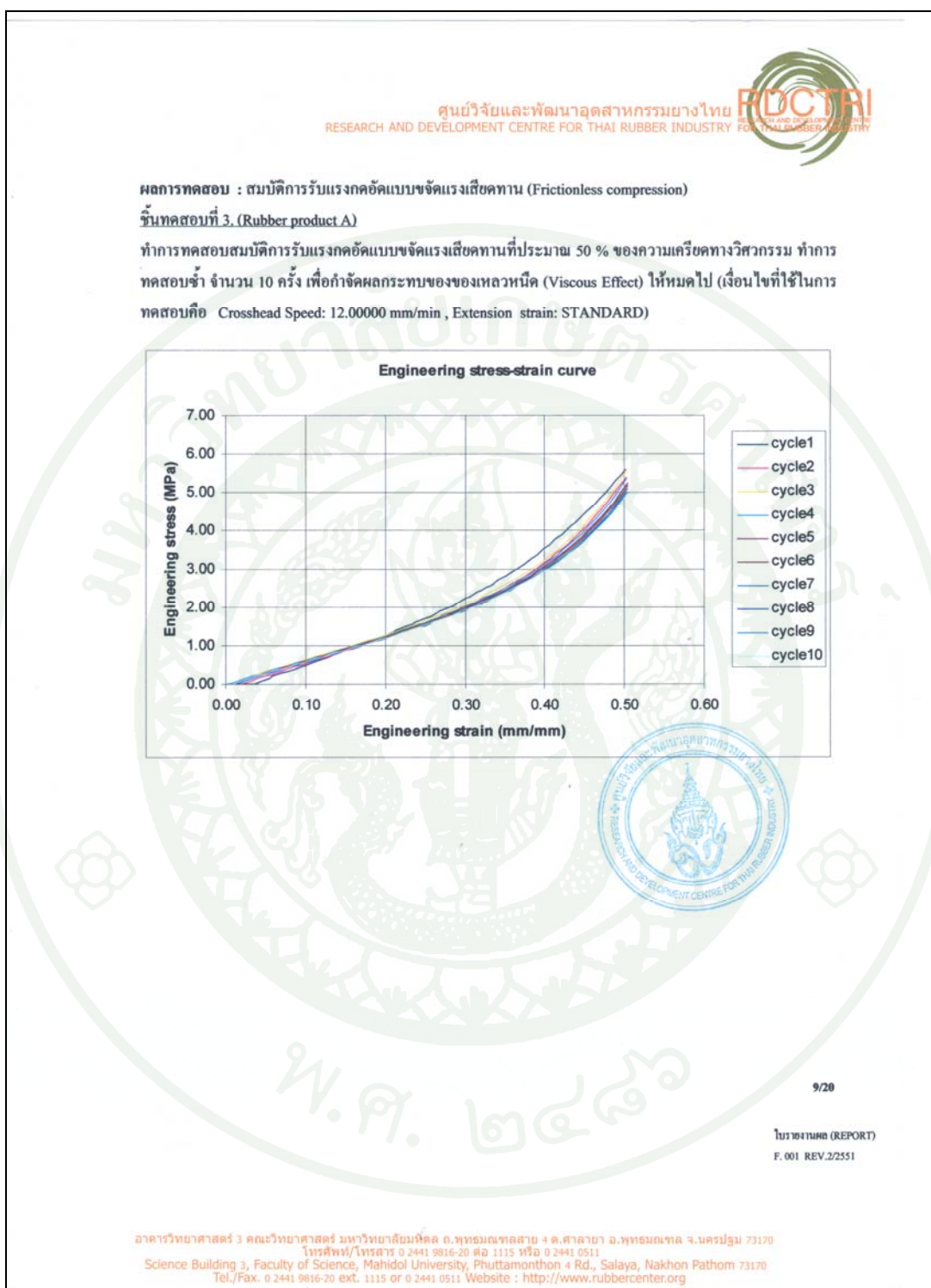
ภาพผนวกที่ ข6 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของขั้นตอนทดสอบที่ 5



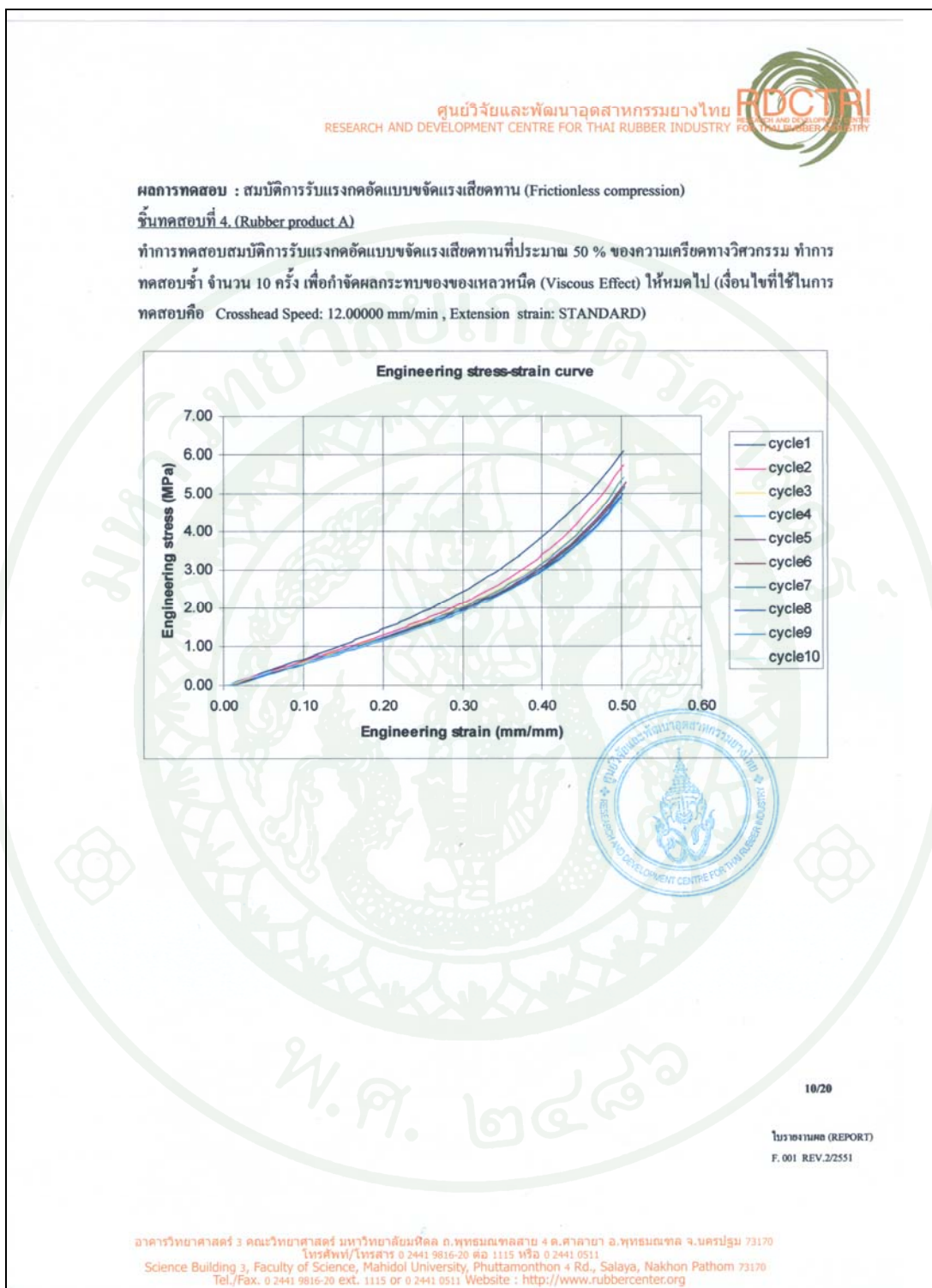
ภาพผนวกที่ ข7 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 1



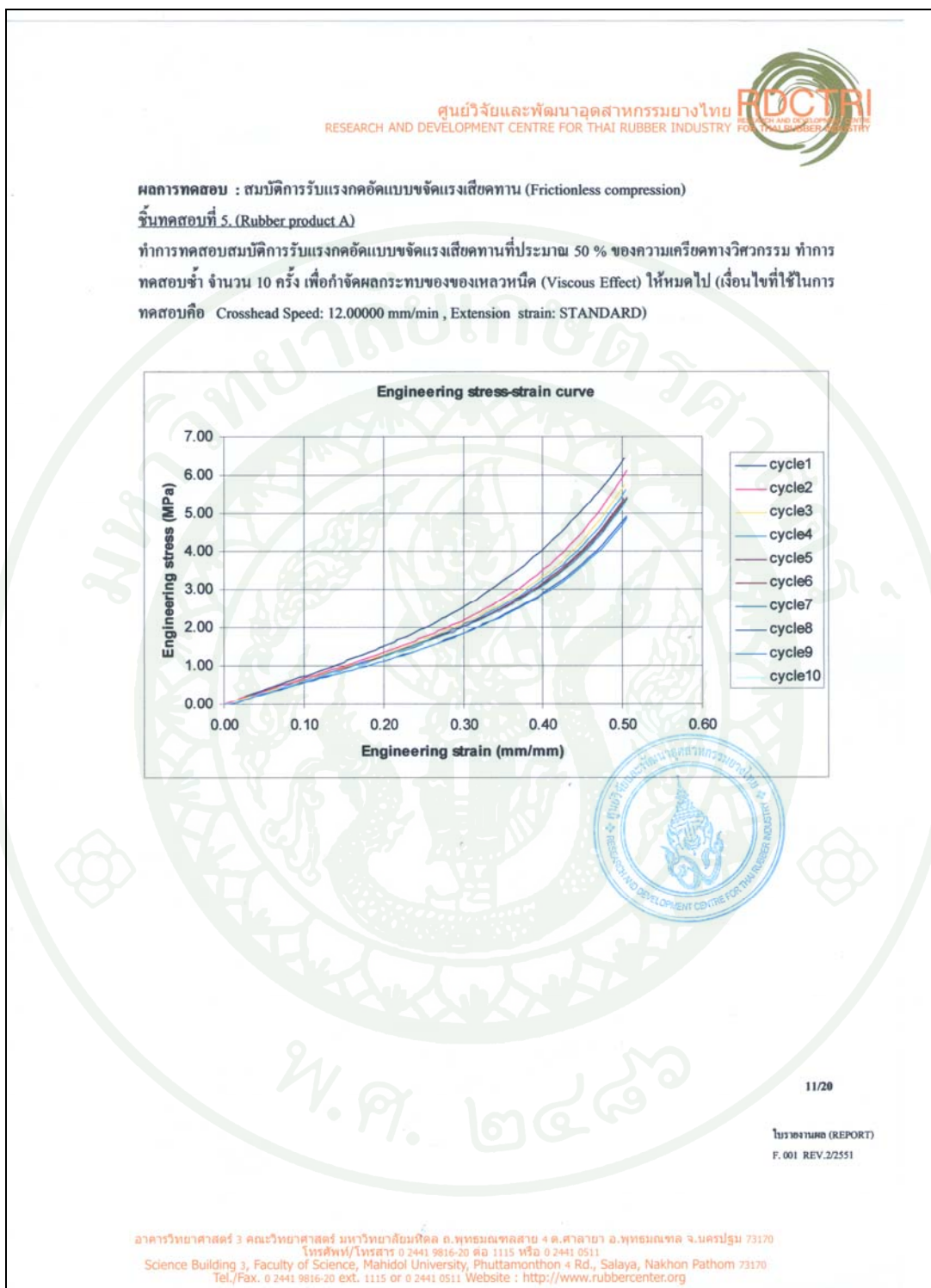
ภาพผนวกที่ ข8 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 2



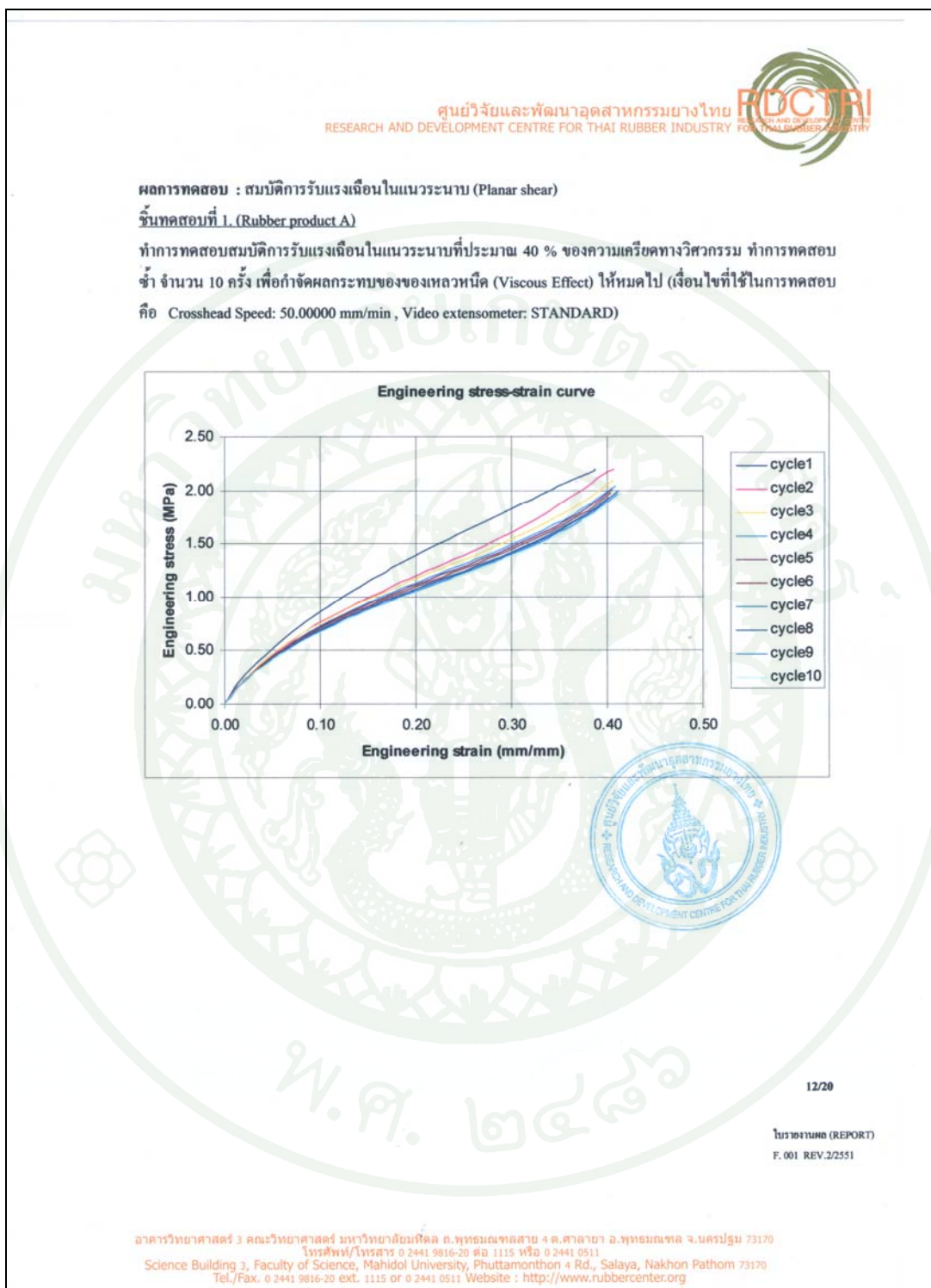
ภาพผนวกที่ ข9 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของขั้นตอนที่ 3



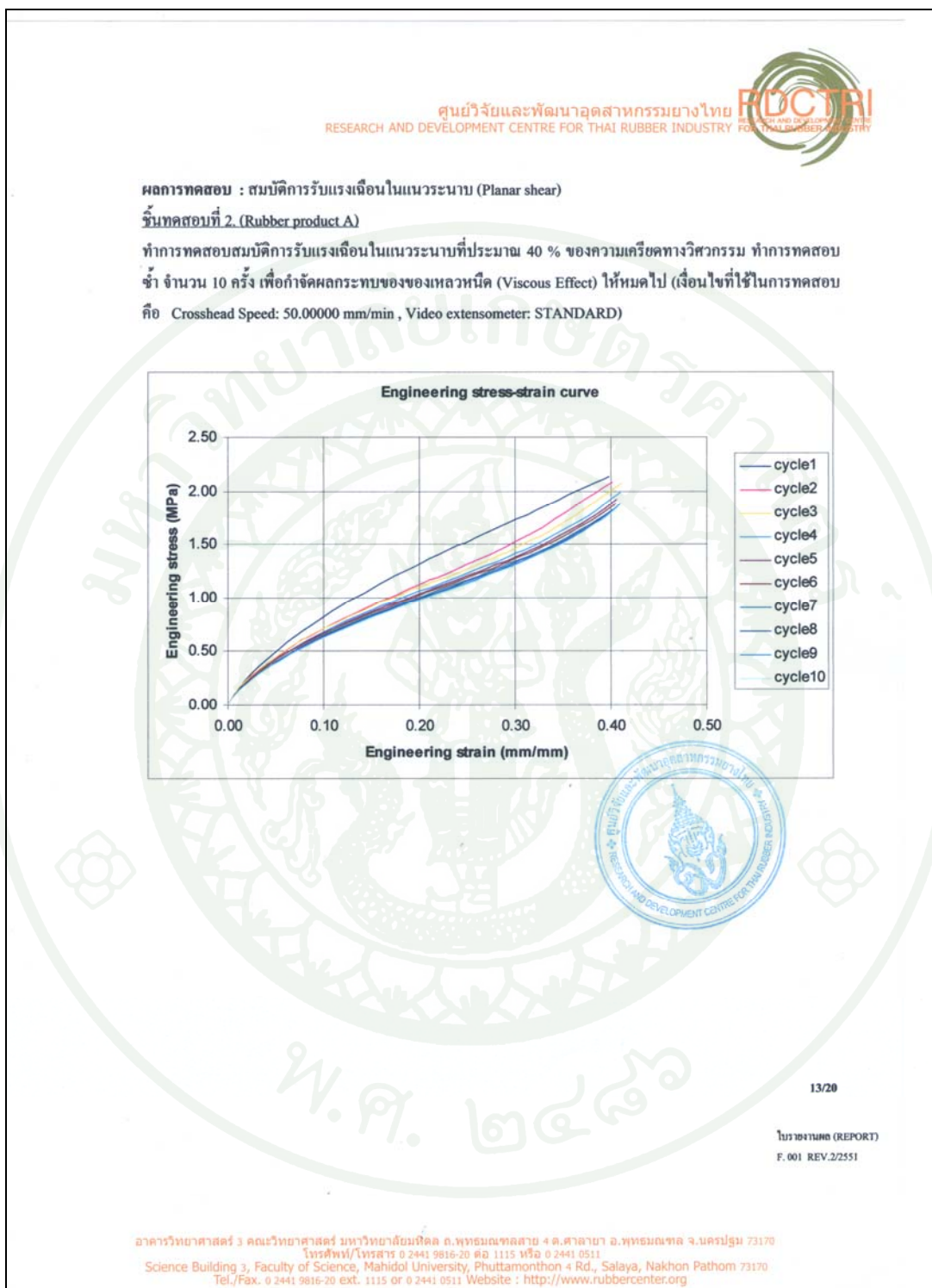
ภาพผนวกที่ ข10 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของชิ้นทดสอบที่ 4



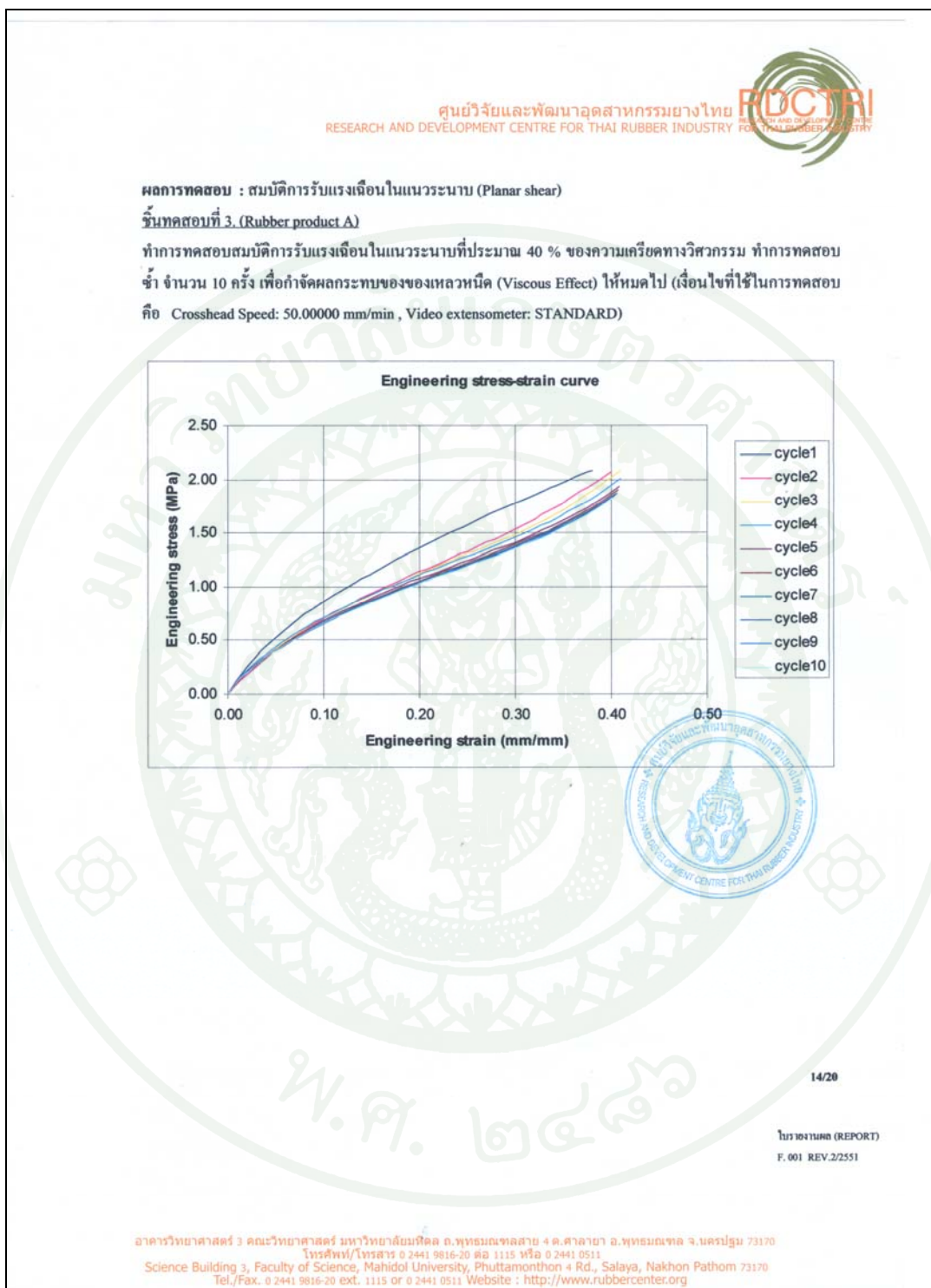
ภาพผนวกที่ ข11 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัดของขั้นตอนที่ 5



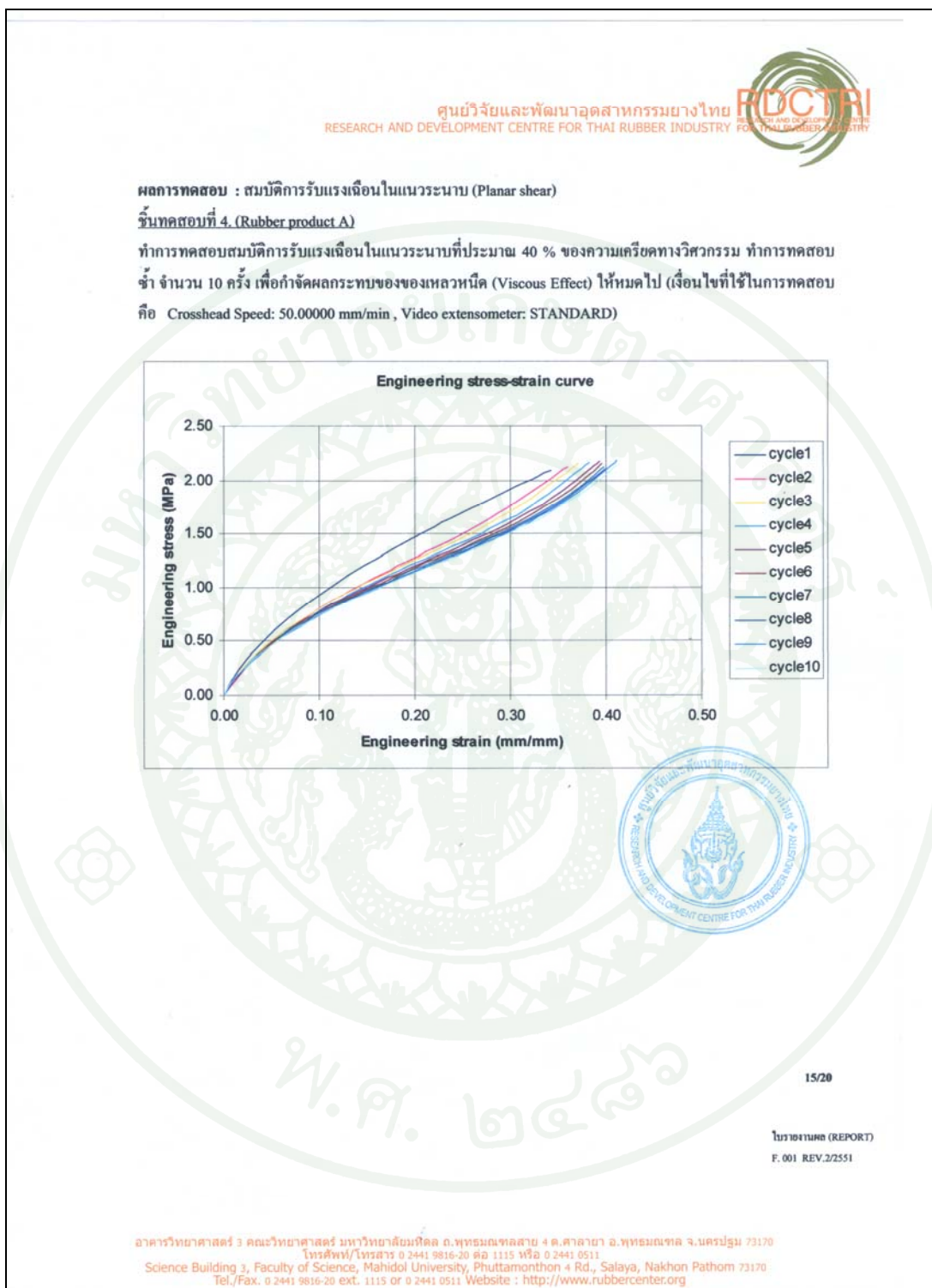
ภาพผนวกที่ ข12 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของขั้นตอนที่ 1



ภาพผนวกที่ ข13 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 2



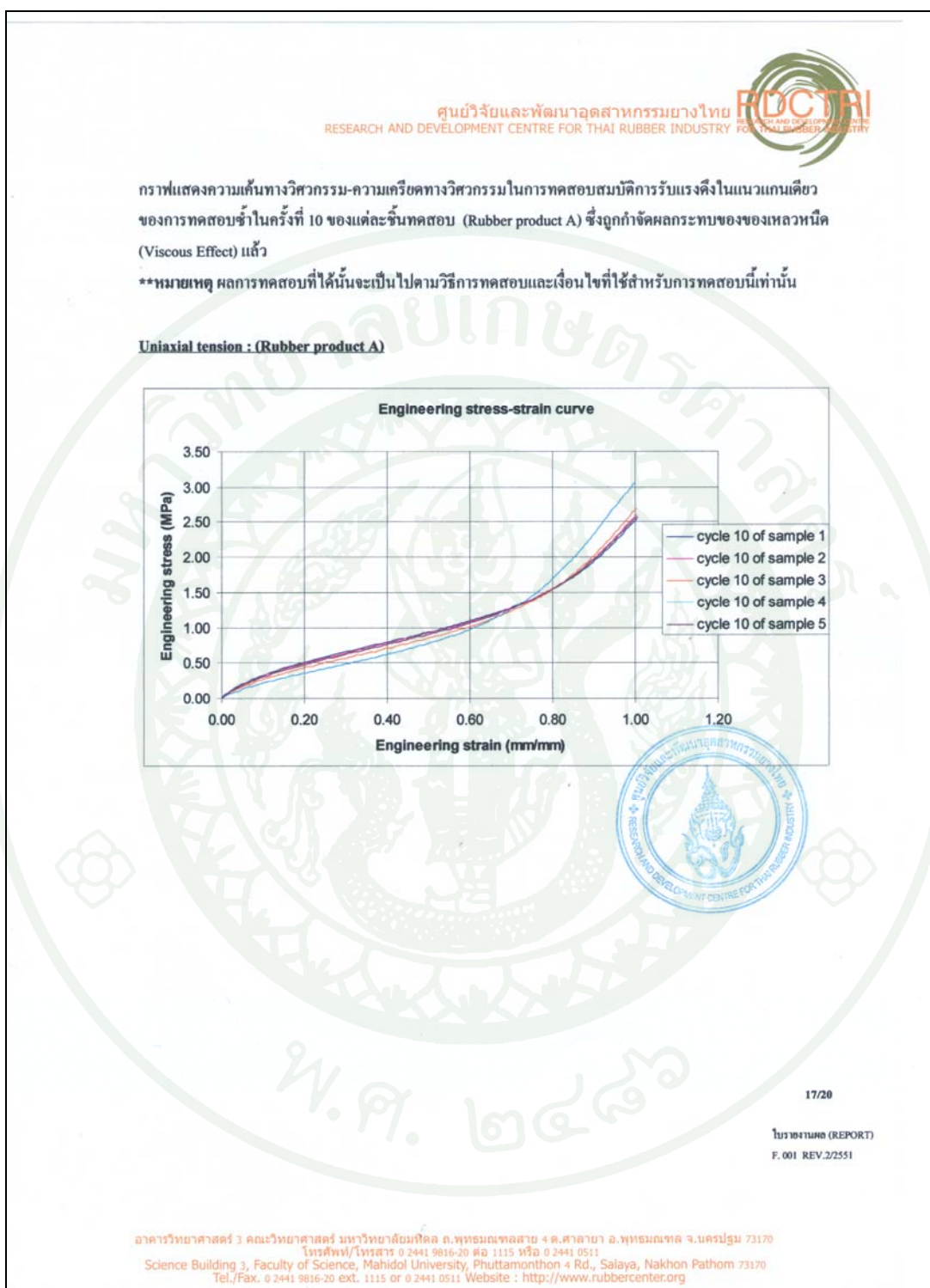
ภาพผนวกที่ ข14 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 3



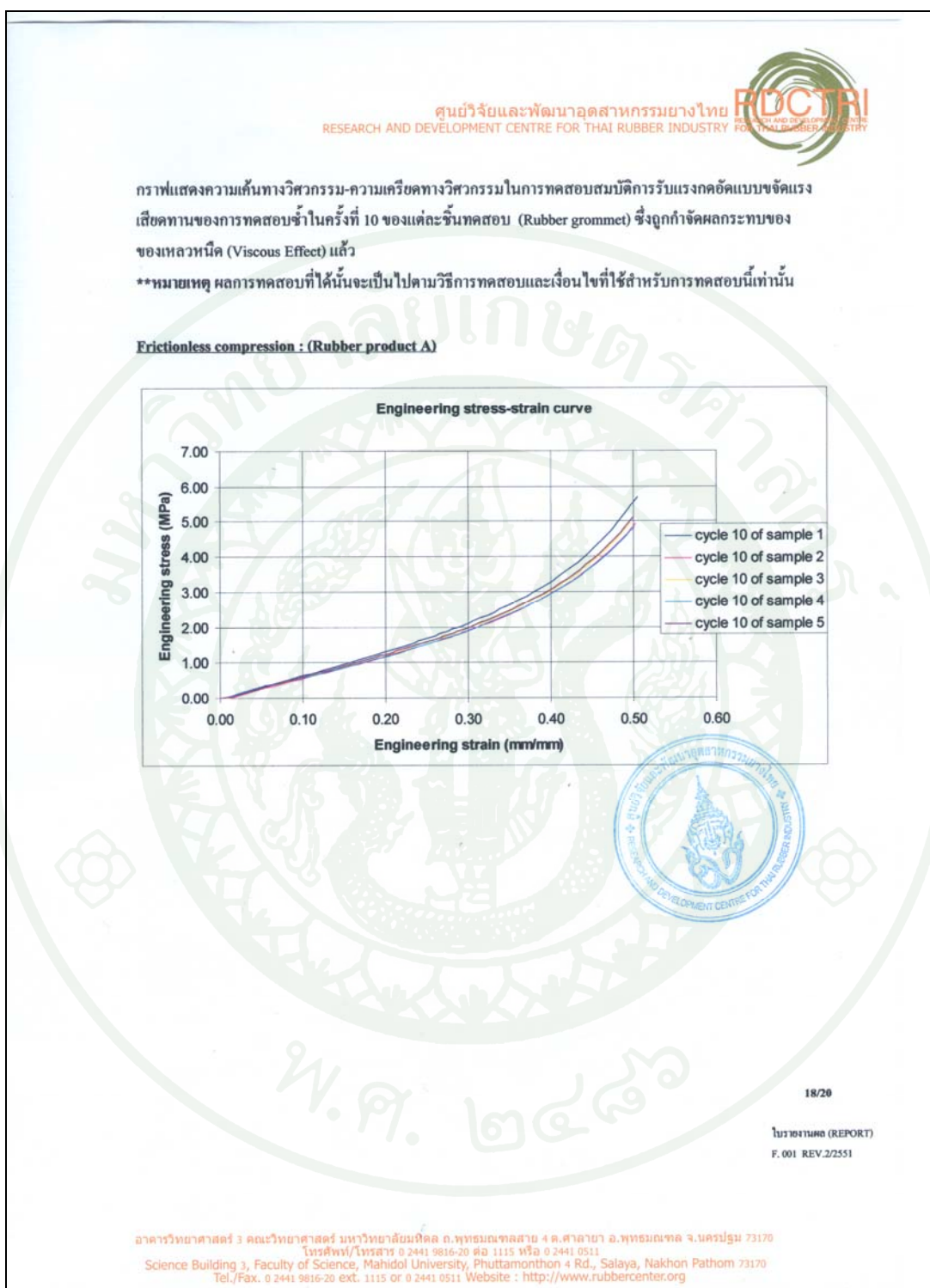
ภาพผนวกที่ ข15 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 4



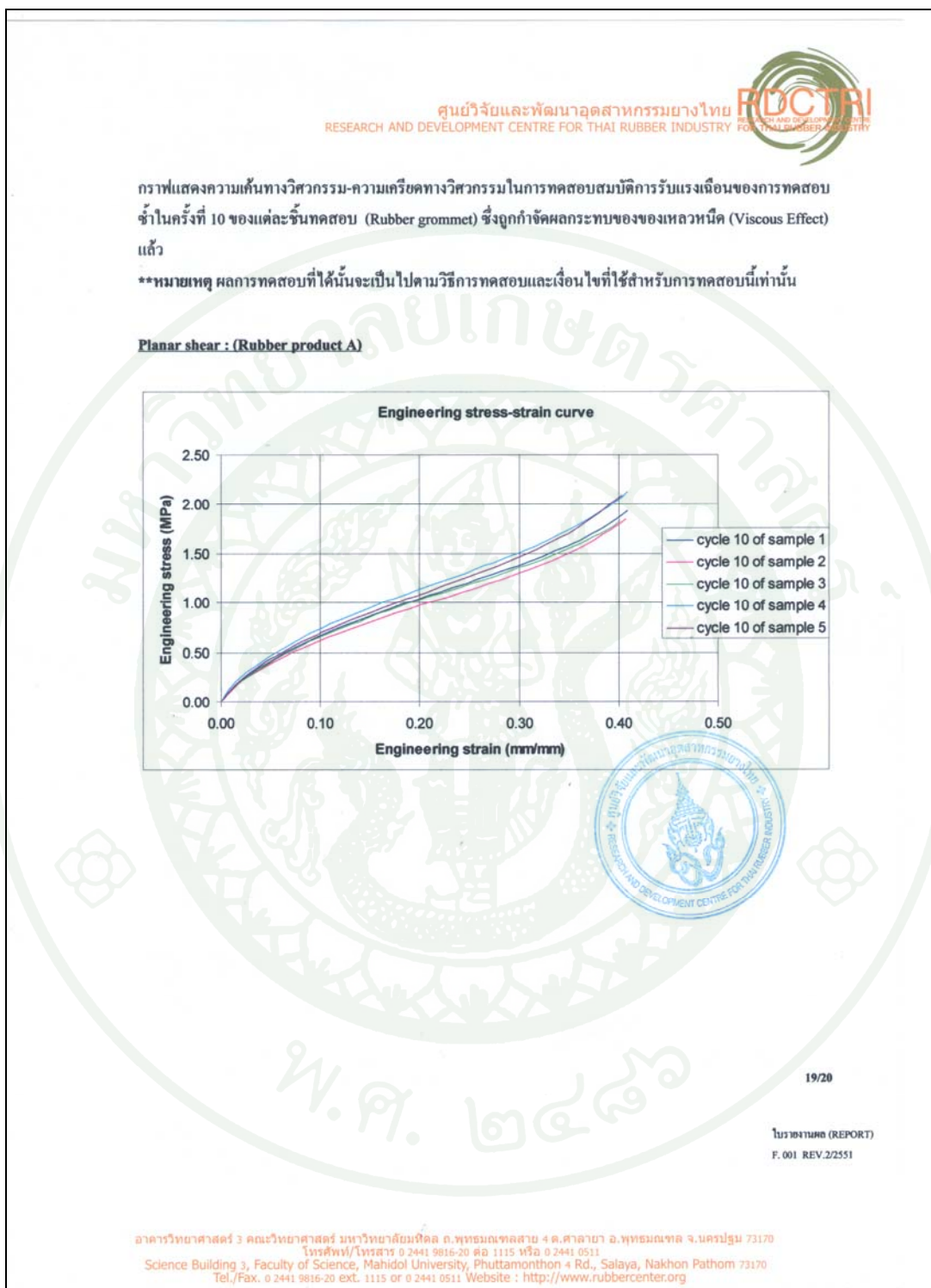
ภาพผนวกที่ ข16 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นทดสอบที่ 5



ภาพผนวกที่ ข17 แสดงความเค้นทางวิศวกรรม-ความเครียดทางวิศวกรรมในการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง



ภาพผนวกที่ ข18 แสดงความเค้นทางวิศวกรรม-ความเครียดทางวิศวกรรมในการทดสอบสมบัติการรับแรงกดอัด





ภาพผนวกที่ 19 แสดงความเค้นทางวิศวกรรม-ความเครียดทางวิศวกรรมในการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือน



ภาคผนวก ค
ใบรับรองการสอบเทียบของเครื่องทดสอบแรงกด

 <p>MECHANICAL ENGINEERING STANDARDS LABORATORY CALIBRATION No. 0000 MTC.No. 13-54/0054-03 SERIAL NO. TC 0501001 CALIBRATED BY: SA. DATE: 12 May 11 DATE REC.</p>		 <p>TISTR</p>		 <p>LABORATORY ACCREDITATION CALIBRATION No. 0000</p>	
Request No. 13-54/0054			MTC.No. 13-54/0054-03		
			Number of Page(s) 4		
CALIBRATION CERTIFICATE					
Nomenclature	: * GOTECH * UNIVERSAL TESTING MACHINE				
	: Capacity	100 If	Model	GT-7001-LS100	Serial No. TC 0501001
Submitted by	: THAI-GERMAN INSTITUTE				
	: 700/1 Moo 1, Amata Nakorn Industrial Estate, Bangna-Trad Rd. Km 57, Klonglamnu, Muang Chonburi 20000, Thailand.				
Calibration location	: Customer's Material Laboratory.				
Calibration range	: As specified in each measurement data				
	: Reading by computer				
Calibration mode	: Compression (Increasing only)				
Received date	: 12 May 2011				
Calibration date	: 12 May 2011				
Condition of item	: Normal				
Calibration method	: BS EN ISO 7500-1:2004				
Standards	: As remarked in each measurement data				
CALIBRATED BY : 1. 			APPROVED BY: 		
(Mr. Samreng Kerchaly)			(Ms. Sirat Thavornrat)		
2. 			Acting Director		
(Mr. Piamsak Athan)			MECHANICAL ENGINEERING STANDARDS LABORATORY		
			Ref. 1073254050300687003		
			Issued Date : 23 May 2011		
Mechanical Engineering Standards Laboratory: Soi 1, Bangpoo Industrial Estate, Muang, Samutprakan 10280, Thailand.					
<small>The above results are valid exclusively for the tested/analysed sample(s) calibrated item(s) as mentioned in this report/certificate. Advertising the Report/Certificate and publicity of the results except in full are prohibited unless written permission is obtained from the governor of TISTR.</small>					
THAILAND INSTITUTE OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH (TISTR)			FM/BLMTC.002 Rev.2		
INDUSTRIAL METROLOGY AND TESTING SERVICE CENTRE					
196 Phahonyothin Road, Chulachak, Bangkok 10900 Tel. (66) 0 2579 1121-30, 0 2579 5515 ext. 5225, 5226 Fax. (66) 0 2561 4771, 0 2579 8592 URL : http://www.tistr.or.th			Soi 1, Bangpoo Industrial Estate, Sukhumvit Road, Amphoe Muang, Samutprakan 10280 Tel. (66) 0 2323 1672-80, 0 2709 4147 ext. 115, 116 Fax. (66) 0 2323 9165		

ภาพผนวกที่ ๑1 ใบรับรองการสอบเทียบของเครื่องทดสอบแรงกด

Request No. 13-54/0054 3/4 MTC.No. 13-54/0054-03

Calibration range : 50 kN to 400 kN
 Resolution : 0.1 kN
 Ambient condition : Temperature 22.3 °C ± 2 °C , Relative Humidity 59.6 % ± 10 %

Measurement data :

Unit : kN

Machine Reading (Fi)	Standard Reading (F)	Uncertainty (±) %	% Error	Class
50.0	50.09	0.33	-0.18	0.5
100.0	100.30	0.34	-0.30	0.5
150.0	150.74	0.56	-0.49	0.5
200.0	200.55	0.39	-0.27	0.5
250.0	250.87	0.37	-0.35	0.5
300.0	301.50	0.23	-0.50	0.5
350.0	350.65	0.25	-0.19	0.5
400.0	400.49	0.22	-0.12	0.5

Remark : The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k=2, providing a level of confidence of approximately 95 %
 : Standard Proving Ring, capacity 500 kN, S/N4296/180006, calibration dated 22 July 2009, Certificate No. MF - 045/09, Due date 21 October 2011,
 used for the measurement is/are traceable to the National Institute of Metrology (Thailand).

SA.

The above results are valid exclusively for the tested/analysed sample(s)/calibrated item(s) as mentioned in this report/certificate.
 Advertising the Report/Certificate and publicity of the results except in full are prohibited unless written permission is obtained from the governor of TISTR.

THAILAND INSTITUTE OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH (TISTR)
 INDUSTRIAL METROLOGY AND TESTING SERVICE CENTRE

FM/BL/MTC/002 Rev 2

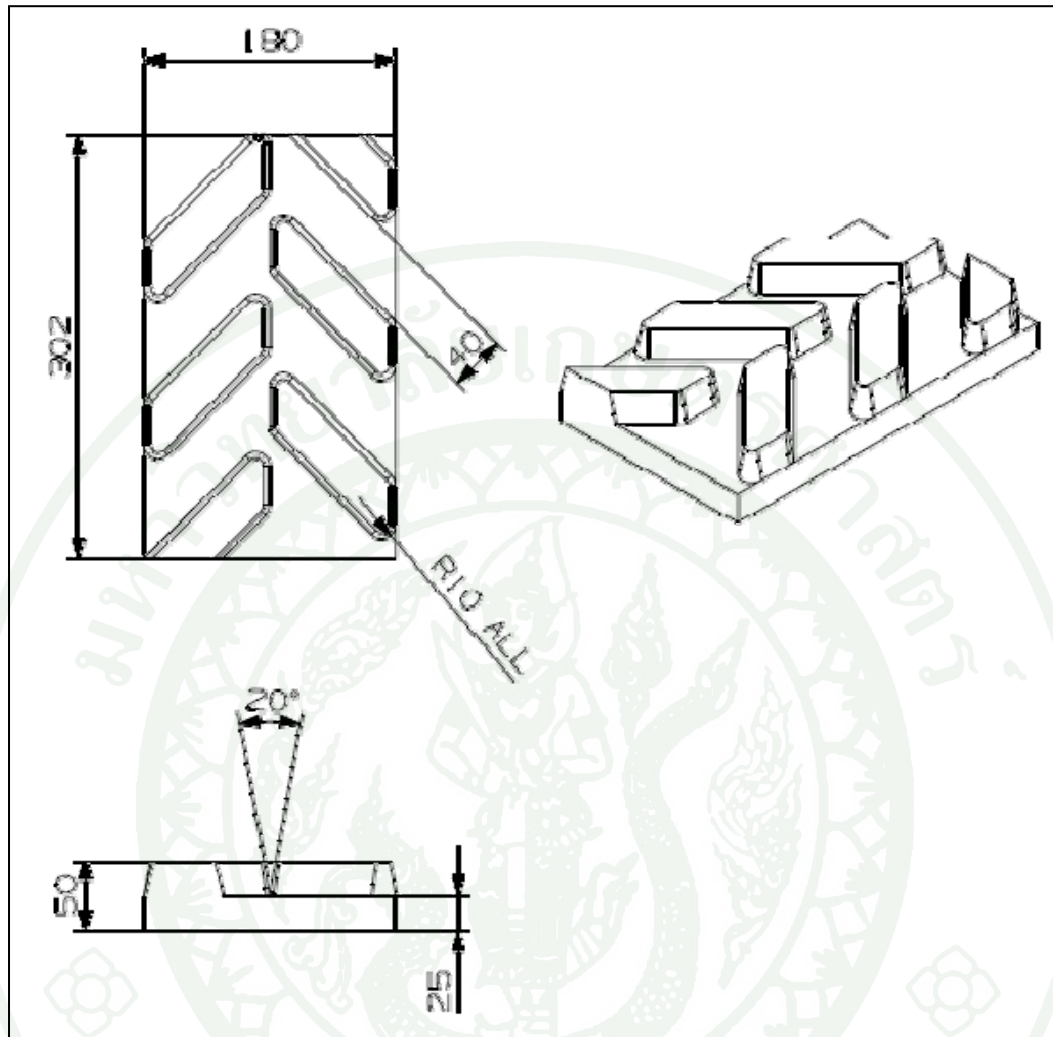
196 Phahonyothin Road, Chatuchak, Bangkok 10900
 Tel. (661) 0 2579 1121-30, 0 2579 5515 ext. 5225, 5226
 Fax. (661) 0 2561 4771, 0 2579 8592
 URL : <http://www.tistr.or.th>

Soi 1, Bangpoo Industrial Estate, Sukhumvit Road,
 Amphoe Muang, Samutprakarn 10280
 Tel. (66) 0 2323 1672-80, 0 2709 4147 ext. 115, 116
 Fax. (66) 0 2323 9165

ภาพผนวกที่ ค1 (ต่อ)



ภาคผนวก ง
แบบ 2D ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ



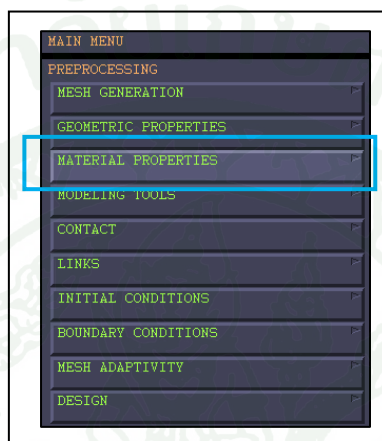
ภาพผนวกที่ ง1 แบบ 2D ของผลิตภัณฑ์ยางตีนตะขาบ



การใช้การใช้อคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมด้วยโปรแกรม MSC. Marc Mentat 2005

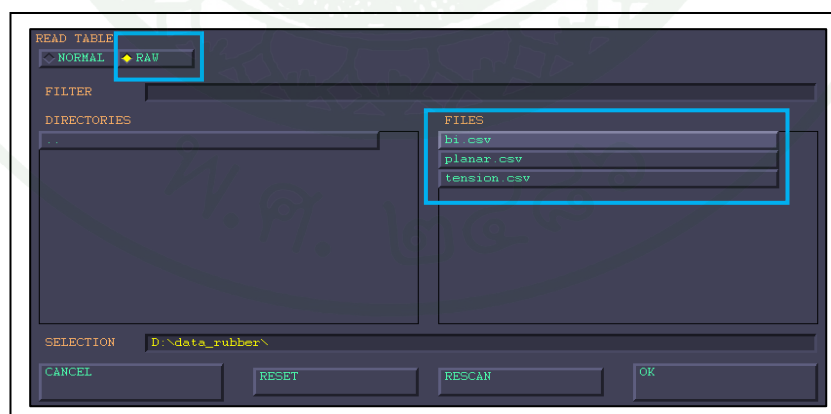
ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Preprocessing)

1. ทำการเปิดโปรแกรม MSC. Marc Mentat -> MAIN MENU -> MATERIAL PROPERTIES แสดงดังภาพผนวกที่ จ1



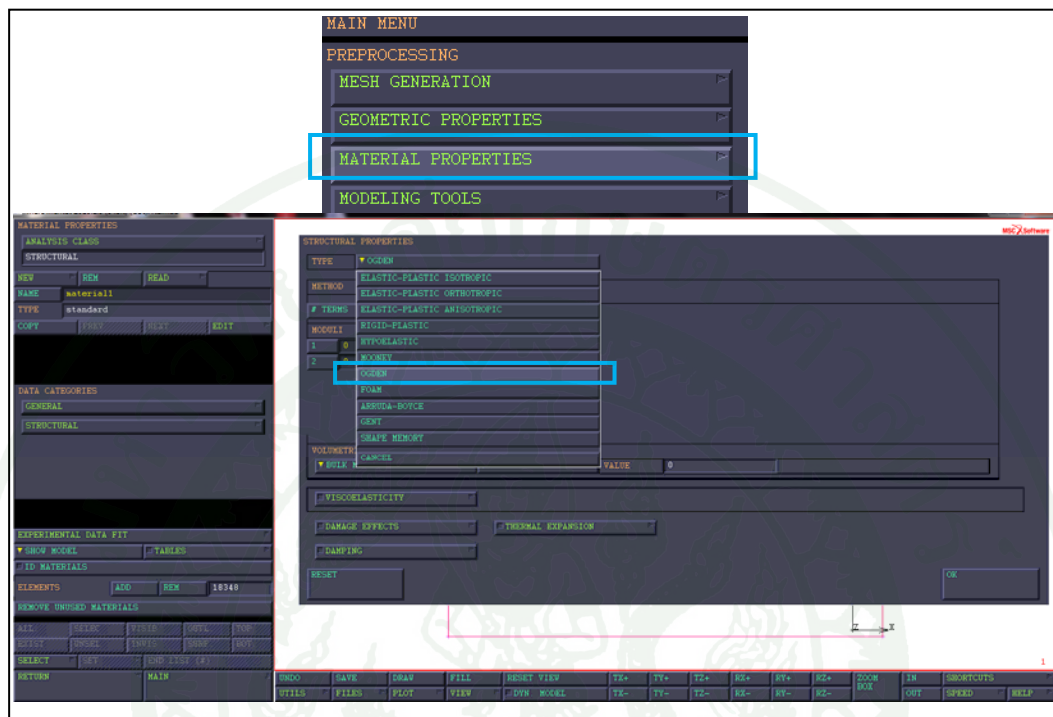
ภาพผนวกที่ จ1 หน้าต่างการกำหนดค่าสมบัติวัสดุ

2. หน้าต่างของ READ TABLE -> RAW จากนั้นให้เลือกข้อมูลจากการทดสอบสมบัติยางของงานวิจัยนี้ ดังแสดงภาพผนวกที่ จ2 และเลือก OK



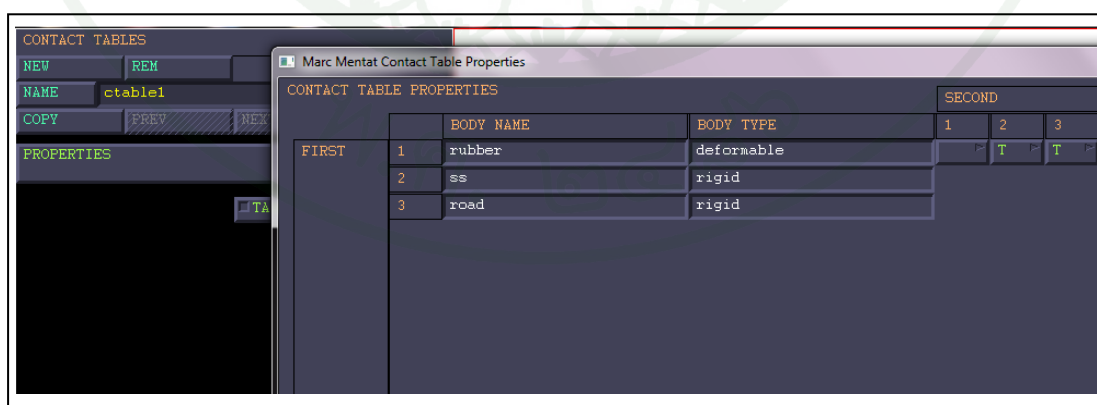
ภาพผนวกที่ จ2 หน้าต่างการใส่ค่าสมบัติวัสดุที่ได้จากการทดสอบ

3. จากนั้นนำค่าที่ได้มาใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ (Defined Parameter): ข้อมูลสมบัติของรายการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุภายในการวิเคราะห์ แสดงดังภาพผนวกที่ จ3

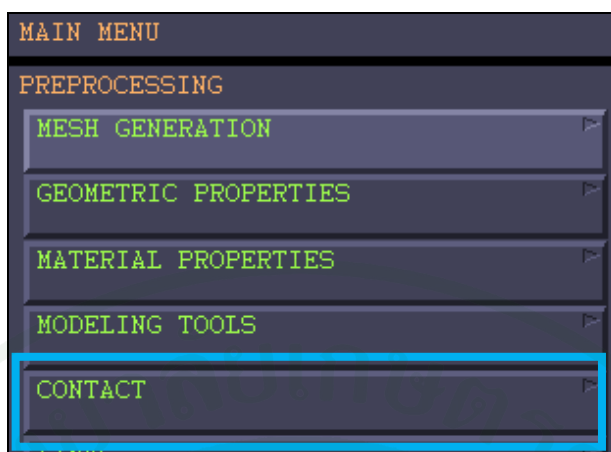


ภาพผนวกที่ จ3 หน้าต่างการกำหนดสมบัติของยาง

4. กำหนดการสัมผัส (Contact) และระยะยุบของชิ้นงานยางด้วย และมีการกำหนดชิ้นงานยางให้ยึดติดแนวแกน X และ Y แสดงดังภาพผนวกที่ จ4 ถึง จ5 ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ จ4 กำหนดการสัมผัสของชิ้นงานยาง



(ก)

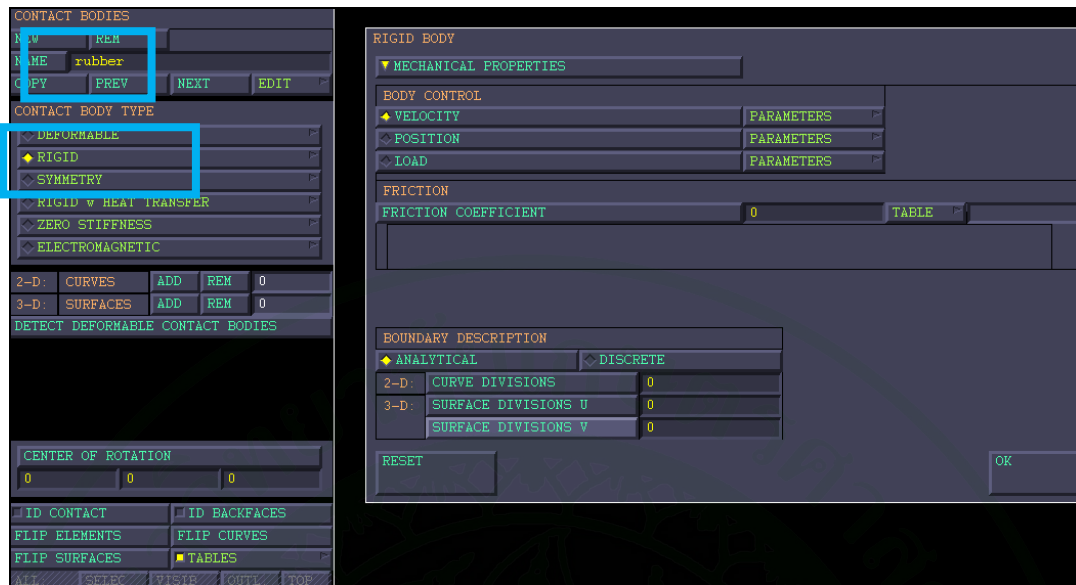


(ข)



(ค)

ภาพผนวกที่ จ5 ระยะเวลาของชิ้นงานยาง

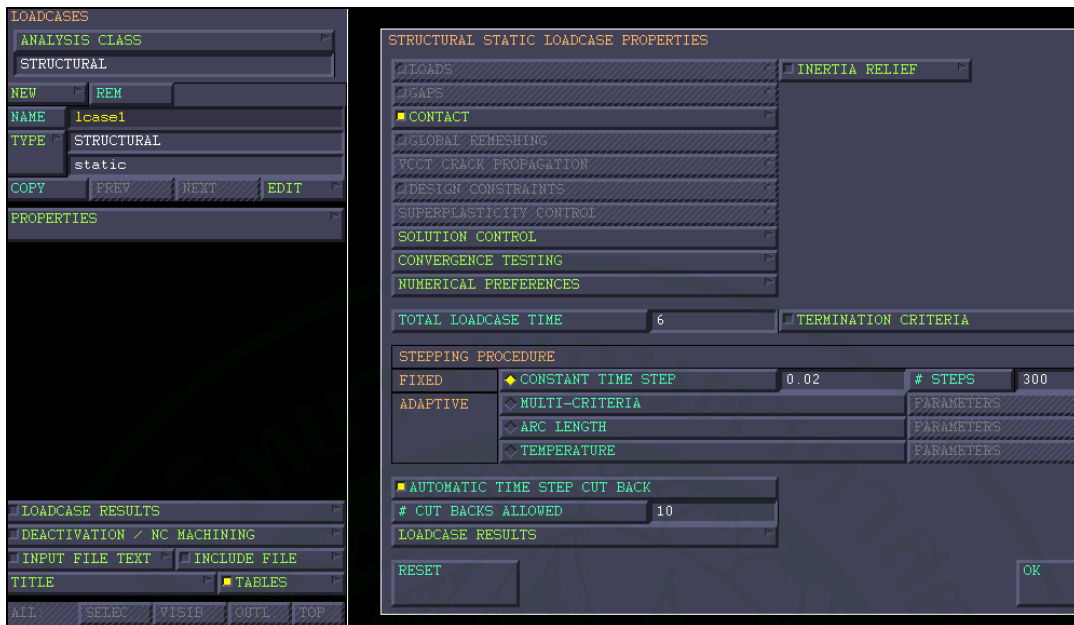


(ง)



(จ)

ภาพผนวกที่ ๖5 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ จ5 (ต่อ)



ภาคผนวก ฉ
การทดสอบหาความเหมาะสมของ Incerment

ทำการทดสอบหาความเหมาะสมของ Incerment ซึ่งจะพิจารณาการเพิ่มจำนวนของ Increment 20 30 40 50 60 และ 70 ตามลำดับ ผลจากการทดสอบนั้นจะเห็นได้ว่า Incerment ที่เพิ่มขึ้น และค่าของแรงกดที่ได้นั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบจริงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เวลาในการคำนวณนั้น Incerment ที่เพิ่มขึ้น จะมีเวลาที่นานกว่า 3 เท่า ดังตารางที่ ฉ1 และ ฉ2 งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การเพิ่มขึ้นของจำนวน Increment ที่เพิ่มขึ้นทีละ 20

ตารางผนวกที่ ฉ1 จำนวน Increment ต่างๆ

ระยะยุบ (mm)	Incerment	แรงกด (N)	
		การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	การทดสอบจริง
0.5	20	3,178	6,502
	30	3,180	
	40	3,180	
	50	3,181	
	60	3,181	
	70	3,181	
1.0	40	6,442	11,689
	60	6,443	
	80	6,444	
	100	6,444	
	120	6,444	
	140	6,445	
1.5	60	9,788	15,385
	90	9,790	
	120	9,791	
	150	9,791	
	180	9,791	
	210	9,792	
2.0	80	13,220	18,537
	120	13,220	
	160	13,220	
	200	13,220	
	240	13,230	
	280	13,230	

ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

ระยะยวบ (mm)	Incerment	แรงกด (N)	
		การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	การทดสอบจริง
2.5	100	16,740	
	150	16,750	
	200	16,750	
	250	16,750	21,390
	300	16,750	
	350	16,750	
3.0	120	20,360	
	180	20,360	
	240	20,360	
	300	20,360	24,265
	360	20,360	
	420	20,370	
3.5	140	24,070	
	210	24,070	
	280	24,080	
	350	24,080	27,010
	420	24,080	
	490	24,080	
4.0	160	27,880	
	240	27,890	
	320	27,890	
	400	27,890	29,769
	480	27,890	
	560	27,890	
4.5	180	31,800	
	270	31,800	
	360	31,800	
	450	31,800	32,529
	540	31,800	
	630	31,800	

ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

ระยะยวบ (mm)	Incerment	แรงกด (N)	
		การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	การทดสอบจริง
5.0	200	35,820	
	300	35,820	
	400	35,820	
	500	35,820	35,396
	600	35,830	
	700	35,830	
	5.5	220	39,950
330		39,950	
440		39,960	
550		39,960	38,141
660		39,960	
770		39,960	
6.0		240	44,200
	360	44,200	
	480	44,200	
	600	44,200	41,046
	720	44,200	
	840	44,200	
	6.5	260	48,560
390		48,560	
520		48,570	
650		48,570	43,935
780		48,570	
910		48,570	
7.0		280	53,050
	420	53,050	
	560	53,050	
	700	53,050	46,991
	840	53,050	
	980	53,050	

ตารางผนวกที่ ฉ1 (ต่อ)

ระยะยุบ (mm)	Incerment	แรงกด (N)	
		การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	การทดสอบจริง
7.5	300	57,660	
	450	57,660	
	600	57,660	49,995
	750	57,670	
	900	57,670	
	1,050	57,670	
8.0	320	62,400	
	480	62,410	
	640	62,410	53,076
	800	62,410	
	960	62,410	
	1,120	62,410	
8.5	340	67,280	
	510	67,290	
	680	67,290	56,567
	850	67,290	
	1,020	67,290	
	1,190	67,290	

ตารางผนวกที่ ฉ2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Increment กับเวลาในการคำนวณของระยะยุบ 0.5-9 มิลลิเมตร

ระยะยุบ (mm)	Incerment	แรงกด (N)		เวลาคำนวณ (min)
		การจำลองไฟไนต์ เอลิเมนต์	การทดสอบจริง	
0.5-9.0	360	72,300		104
	540	72,310		173
	720	72,310	59,567	216
	900	72,310		260
	1,080	72,310		309
	1,260	72,310		380

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวชุตินา ศักดิ์ชินบุตร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	3 มิถุนายน พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	B.Eng. (Electrical-Mechanical Manufacturing Engineering) Kasetsart University
ตำแหน่งปัจจุบัน	- ผู้ช่วยสอนปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ - วิศวกรวิจัยและพัฒนา ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์