

การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายของความเค้นดึงบนแผ่นวัสดุเลี้ยงเซลล์

กิตตินันท์ ไชจิศุภกร

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2557

NUMERICAL SIMULATION OF TENSILE STRESS DISTRIBUTION ON A HYPERELASTIC CELL  
CULTURE MEMBRANE

Kittinun Sojisuporn

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2014

หัวข้อวิทยานิพนธ์

Numerical Simulation of Tensile Stress Distribution  
on a Hyperelastic Cell Culture Membrane

โดย

กิตตินันท์ ไชยศิริ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ่มจีระจรัส

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ทันตแพทย์หญิง ดร. ชลิตา ลิ่มจีระจรัส)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาริฉัตร คงทอง)

.....กรรมการ

(ดร. เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ่มจีระจรัส)

กิตตินันท์ โคจิศุภกร : การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายของความเค้นดึงบนแผ่นวัสดุเลียงเซลล์. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส, 100 หน้า.

ในการวิจัยต่าง ๆ ก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการศึกษาถึงผลของการให้แรงทางกล อาทิเช่น แรงอัด แรงดึง หรือแรงเฉือน แก่เซลล์พบว่า มีผลกระทบต่อ การเจริญเติบโต การซ่อมแซม และการพัฒนาของเซลล์นั้นๆ ซึ่งในการวิจัยนั้นไม่สามารถที่จะให้แรงกระทำกับเซลล์ได้โดยตรง แต่จำเป็นต้องส่งผ่านทางตัวกลาง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวกลางเป็นเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นจาก 2,4,6,8-Tetramethyl-2,4,6,8-tetravinyl-cyclotetrasiloxane สำหรับเลียงเซลล์และส่งผ่านแรงดึงไปยังเซลล์ที่ถูกเลี้ยงอยู่บนผิวของเมมเบรน ซึ่งการกระจายตัวของแรงที่ส่งผ่านภายในตัวกลางนั้นมีความไม่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งชิ้นงาน จึงส่งผลให้การส่งผ่านแรงไปยังเซลล์นั้นมีความไม่สม่ำเสมอกัน จึงอาจส่งผลต่อผลการทดลองที่เกิดขึ้น

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษากการกระจายตัวของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อได้รับแรงดึง โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ช่วยในการคำนวณ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นจะช่วยให้สามารถเข้าใจแนวโน้มการกระจายตัวในบริเวณต่างๆบนพื้นผิวของเมมเบรนและสามารถเลือกขอบเขตบริเวณบนพื้นผิวของเมมเบรนที่ใช้สำหรับเลียงเซลล์ได้อย่างถูกต้องเพื่อที่จะทำให้เซลล์ได้รับแรงที่ส่งผ่านตัวกลางในปริมาณที่เท่ากันในทุกๆส่วน

KITTINUN SOJISUPORN : NUMERICAL SIMULATION OF TENSILE STRESS DISTRIBUTION ON A HYPERELASTIC CELL CULTURE MENBRANE. ADVISOR : ASSISTANCE PROFESSOR DR. NUTTAPOL LIMJEERAJARUS, 100 PP.

Previous studies have experimentally suggested that mechanical loads, e.g, compressive, tensile, and shear stress, affects biological cell growth, repair, and development. However, in a lab-scale experiment, such loads cannot be applied directly to the biological cell but to apply via a medium. In this case, a hyperelastic membrane synthesized from 2,4,6,8-Tetramethyl-2,4,6,8-tetravinyl-cyclotetrasiloxane which is a silicone rubber alike is used as a cell culture membrane by which tension force is transferred to the cell cultivated onto the membrane.

The aim of this study is to determine the tensile stress distribution across the surface of the membrane when it receives the tension force. The finite element analysis (FEA) was carried out in ANSYS software to simulate the membrane deformation and tensile stress. The results allow researchers to estimate the correct local tensile stress at different local points on the membrane. In addition, the simulation can be a very useful tool in suggesting an appropriate cell culture area at which the tensile stress is uniformly distributed.

TNI

Graduate School

Field of Engineering of Technology

Academic Year 2014

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีอันเนื่องมาจากความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์กรุณาเสียเวลาอันมีค่าของท่านมาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัยตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ทพ.ดร.ชลิดา ลิ้มจิระจรัส (หน่วยปฏิบัติการวิจัยเนื้อเยื่ออินทรีย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นประธานคณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาริฉัตร คงทอง หัวหน้ากลุ่มวิชาพื้นฐานคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ และ ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ ที่กรุณาให้แนวคิด ข้อคิดเห็นต่างๆ และตรวจสอบข้อบกพร่อง อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยในครั้งนี้จนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่และครอบครัวที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณอาจารย์เพื่อนๆ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

กิตตินันท์ ไชจิศุภกร

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## สารบัญ

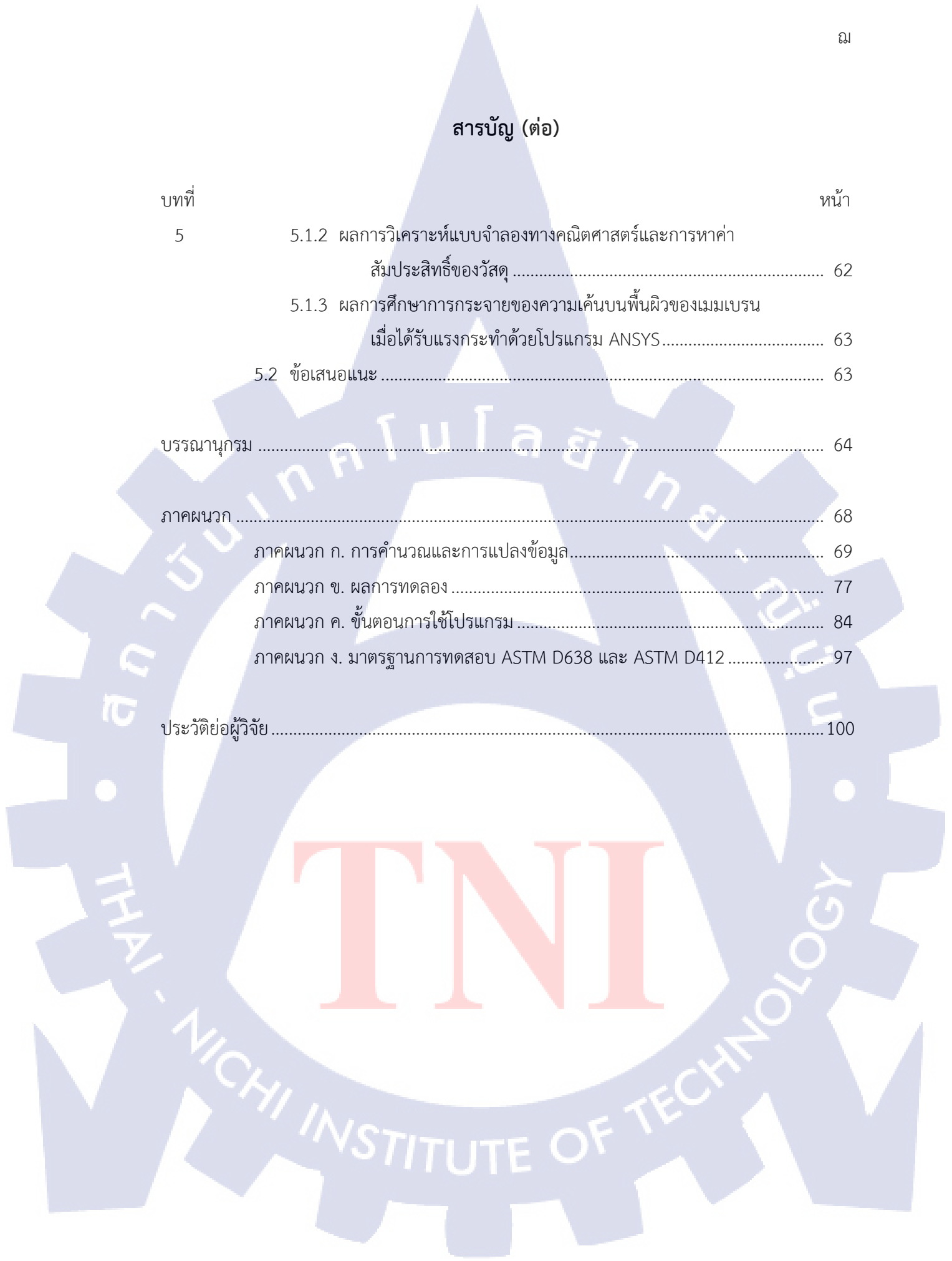
|                                                                                                         | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                                                    | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                                                 | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                                                    | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                                                             | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                                                                        | ญ    |
| สารบัญรูป.....                                                                                          | ฎ    |
| สัญลักษณ์.....                                                                                          | ณ    |
| <br>บทที่                                                                                               |      |
| 1 บทนำ.....                                                                                             | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาแนวทางเหตุผลและปัญหา.....                                                                 | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....                                                                       | 2    |
| 1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....                                                                            | 2    |
| 1.4 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย .....                                                                        | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                                                      | 3    |
| 1.6 แผนการดำเนินงาน .....                                                                               | 3    |
| 2 หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                                   | 4    |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                                                                             | 4    |
| 2.1.1 ศาสตร์ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อทดแทน .....                                                           | 4    |
| 2.1.2 คุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก.....                                                                     | 5    |
| 2.1.3 วงรอบฮิสเตอเรซิส (Hysteresis).....                                                                | 6    |
| 2.1.4 การทดสอบวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก.....                                                                 | 8    |
| 2.1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก<br>(Constitutive Laws of Hyperelasticity)..... | 8    |
| 2.1.6 วิธี Constant true Young's Modulus with Varying Poisson's<br>Ratio.....                           | 15   |
| 2.1.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM).....                                      | 18   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ |                                                                                                     | หน้า |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2     | 2.2 งานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                                                  | 21   |
| 3     | ระเบียบวิธีวิจัย .....                                                                              | 27   |
|       | 3.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูล .....                                        | 27   |
|       | 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....                                                                   | 27   |
|       | 3.2.1 การเตรียมชิ้นงาน .....                                                                        | 27   |
|       | 3.2.2 ตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) ของชิ้นงาน .....                                   | 28   |
|       | 3.2.3 การทดลองคุณสมบัติเชิงกลแบบการดึงแกนเดียว.....                                                 | 28   |
|       | 3.2.4 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุจากข้อมูลการทดลอง .....                                               | 29   |
|       | 3.2.5 การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้น .....                                     | 30   |
| 4     | การวิเคราะห์ผลการวิจัย.....                                                                         | 37   |
|       | 4.1 ผลการตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์ของชิ้นงาน .....                                               | 37   |
|       | 4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลแบบการดึงแกนเดียว .....                                    | 38   |
|       | 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์<br>ของวัสดุ.....                     | 40   |
|       | 4.3.1 การเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....                                                        | 41   |
|       | 4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์จากผลการทดลองการดึงแกนเดียว .....                                         | 48   |
|       | 4.4 ผลการศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรน<br>เมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS ..... | 48   |
|       | 4.4.1 ผลการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวชิ้นงาน Original membrane...                                   | 49   |
|       | 4.4.2 ผลการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวชิ้นงาน Finally membrane.....                                  | 54   |
| 5     | สรุปผลการวิจัย .....                                                                                | 61   |
|       | 5.1 สรุปผลการวิจัย .....                                                                            | 61   |
|       | 5.1.1 ผลการตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์และวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล<br>ของแผ่นเมมเบรน .....          | 61   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ |                                                                                                      | หน้า |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5     | 5.1.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่า<br>สัมประสิทธิ์ของวัสดุ .....                   | 62   |
|       | 5.1.3 ผลการศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรน<br>เมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS..... | 63   |
|       | 5.2 ข้อเสนอแนะ .....                                                                                 | 63   |
|       | บรรณานุกรม .....                                                                                     | 64   |
|       | ภาคผนวก .....                                                                                        | 68   |
|       | ภาคผนวก ก. การคำนวณและการแปลงข้อมูล.....                                                             | 69   |
|       | ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง .....                                                                          | 77   |
|       | ภาคผนวก ค. ขั้นตอนการใช้โปรแกรม .....                                                                | 84   |
|       | ภาคผนวก ง. มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 และ ASTM D412 .....                                             | 97   |
|       | ประวัติย่อผู้วิจัย .....                                                                             | 100  |



TNI

TAH - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## สารบัญตาราง

| ตาราง                                                                                                                                                | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน .....                                                                                                                 | 3    |
| 2.1 เปรียบเทียบค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Elasticity Modulus) และ ความเค้นแรงดึงที่จุดสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) จากการทดลองดัดเป็นเวลา 7 วัน ..... | 21   |
| 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                                                                                                  | 25   |
| 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ตามภาพที่ 4.12 ของชิ้นงาน Original membrane .....                                                    | 48   |
| 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ตามภาพที่ 4.12 ของชิ้นงาน Finalized membrane .....                                                   | 48   |
| 4.3 ช่วงของขนาดความเค้นทางวิศวกรรมและพื้นที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน Original membrane .....                                                            | 54   |
| 4.4 ช่วงของขนาดความเค้นทางวิศวกรรมและพื้นที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน Finalized membrane .....                                                           | 60   |
| 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ของชิ้นงาน Original membrane .....                                                                   | 62   |
| 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ของชิ้นงาน Finalized membrane .....                                                                  | 62   |
| ก.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 .....                                                                                                | 76   |
| ง.1 สัดส่วนของชิ้นงานทดสอบ Type IV .....                                                                                                             | 98   |

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## สารบัญรูป

| รูป                                                                                                                                           | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 กระบวนการทำเนื้อเยื่อเทียม.....                                                                                                           | 5    |
| 2.2 กฎความสัมพันธ์ของฮุก.....                                                                                                                 | 5    |
| 2.3 พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของยาง.....                                                                                                     | 6    |
| 2.4 พฤติกรรมความเสียหายของพอลิเมอร์.....                                                                                                      | 6    |
| 2.5 ผลของ Mullins effect .....                                                                                                                | 7    |
| 2.6 เอลิเมนต์มิติเดียว .....                                                                                                                  | 19   |
| 2.7 เอลิเมนต์สองมิติ.....                                                                                                                     | 19   |
| 2.8 เอลิเมนต์สามมิติ.....                                                                                                                     | 20   |
| 2.9 เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน.....                                                                                                                | 20   |
| 2.10 ลักษณะBioartificial Tendons (BATs) เมื่อทำการทดลองในเวลาต่างๆ.....                                                                       | 22   |
| 2.11 กราฟแสดงค่า $\alpha$ ของการดึงยืด (Tensile) และ การกดอัด (Compressive) จากการทดสอบการเปลี่ยนรูปที่ความถี่ 1 Hz กับตำแหน่งของชิ้นงาน..... | 22   |
| 2.12 แสดงลักษณะของ fibroblasts .....                                                                                                          | 23   |
| 2.13 ทำนายการดึงแกนเดียวด้วยอัตราเร็ว 500 mm/min ยังไม่กำจัดผลของมูลทิน.....                                                                  | 24   |
| 3.1 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 type IV.....                                                                                       | 27   |
| 3.2 ชิ้นงานสำหรับทดสอบ .....                                                                                                                  | 28   |
| 3.3 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine .....                                                                                   | 29   |
| 3.4 ชุดข้อมูลการทดลองทั้งสามแบบ .....                                                                                                         | 30   |
| 3.5 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับป้อนข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....                                                                               | 31   |
| 3.6 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับป้อนข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....                                                                               | 32   |
| 3.7 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับคำนวณสมการและค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ .....                                                                           | 33   |
| 3.8 แผนผังขั้นตอนการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ....                                                             | 33   |
| 3.9 ขนาดและรูปร่างของแบบจำลอง 3 มิติของแผ่นเมมเบรน .....                                                                                      | 34   |
| 3.10 หน้าต่างแสดงการกำหนดขนาดและประเภทของ mesh.....                                                                                           | 35   |
| 3.11 หน้าต่างแสดงการกำหนดสถานะจำลองกับชิ้นงาน .....                                                                                           | 36   |
| 3.12 สถานะที่กำหนดในการจำลองลักษณะการดึงยืด.....                                                                                              | 36   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป  | หน้า                                                                                                                                                                       |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.1  | พื้นผิวชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง : (a) Original, (b) UV, (c) UV/Plasma, (d) UV/Plasma/Coat..... 37                                                                       |
| 4.2  | กราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง : (a) Original, (b) UV, (c) UV/Plasma, (d) UV/Plasma/Coat..... 38                                                    |
| 4.3  | เปรียบเทียบความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง ..... 39                                                                                                      |
| 4.4  | เปรียบเทียบความเค้น-ความเครียดของชิ้นงาน Original membrane กับ Finalized membrane ..... 40                                                                                 |
| 4.5  | เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกับคำนวณตามวิธีการ Constant true Young's modulus with varying Poisson's ration : (a) Original membrane , (b) Finalized membrane ..... 41 |
| 4.6  | การทำนายพฤติกรรมของวัสดุจากผลการทดสอบทั้ง 3 ลักษณะจากการคำนวณโดยใช้อัตราส่วนปัวซอง (a) Original membrane , (b) Finalized membrane..... 42                                  |
| 4.7  | ทำนายพฤติกรรมการดัดแบบแกนเดียวของชิ้นงาน Original membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ..... 43                                                                                    |
| 4.8  | ทำนายพฤติกรรมการดัดแบบเท่ากันในสองแนวแกนของชิ้นงาน Original membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ..... 43                                                                          |
| 4.9  | ทำนายพฤติกรรมการดัดแบบความกว้างคงที่ของชิ้นงาน Original membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ..... 44                                                                              |
| 4.10 | ทำนายพฤติกรรมการดัดแบบแกนเดียวของชิ้นงาน Finalized membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ..... 45                                                                                   |
| 4.11 | ทำนายพฤติกรรมการดัดแบบเท่ากันในสองแนวแกนของชิ้นงาน Finalized membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ..... 45                                                                         |
| 4.12 | ทำนายพฤติกรรมการดัดแบบความกว้างคงที่ของชิ้นงาน Finalized membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ..... 46                                                                             |
| 4.13 | ทำนายพฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะของชิ้นงาน Original membrane โดยแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2..... 47                                                                                |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป                                                                                                            | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.14 ทำนายพฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะของชิ้นงาน Finalized membrane<br>โดยแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 .....             | 47   |
| 4.15 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original membrane<br>ที่ระยะการดึง 5.8 มม. (20%strain).....       | 49   |
| 4.16 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original membrane<br>ที่ระยะการดึง 2.9 มม. (10%strain).....       | 49   |
| 4.17 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original membrane<br>ที่ระยะการดึง 2.03 มม. (7%strain).....       | 50   |
| 4.18 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original membrane<br>ที่ระยะการดึง 1.45 มม. (5%strain).....       | 50   |
| 4.19 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original membrane<br>ที่ระยะการดึง 0.87 มม. (3%strain).....       | 51   |
| 4.20 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original membrane<br>ที่ระยะการดึง 0.29 มม. (1%strain).....       | 51   |
| 4.21 การกระจายของความเครียดบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original membrane<br>ที่ระยะการดึง 5.8 มม. (20%strain).....     | 52   |
| 4.22 เปรียบเทียบพื้นที่กลางชิ้นงานที่มีขนาดของความเค้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน<br>ของระยะการดึงยึดต่างๆ ..... | 53   |
| 4.23 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized membrane<br>ที่ระยะการดึง 5.8 มม. (20%strain).....      | 55   |
| 4.24 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized membrane<br>ที่ระยะการดึง 2.9 มม. (10%strain).....      | 55   |
| 4.25 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized membrane<br>ที่ระยะการดึง 2.03 มม. (7%strain).....      | 56   |
| 4.26 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized membrane<br>ที่ระยะการดึง 1.45 มม. (5%strain).....      | 56   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป                                                                                                                                                                       | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.27 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized membrane<br>ที่ระยะการดึง 0.87 มม. (3%strain).....                                                                 | 57   |
| 4.28 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized membrane<br>ที่ระยะการดึง 0.29 มม. (1%strain).....                                                                 | 57   |
| 4.29 การกระจายของความเครียดทางวิศวกรรมบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized membrane<br>ที่ระยะการดึง 5.8 มม. (20%strain).....                                                    | 58   |
| 4.30 เปรียบเทียบพื้นที่กลางชิ้นงานที่มีขนาดของความเค้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน<br>ของระยะการดึงยึดต่างๆ .....                                                            | 59   |
| ก.1 กราฟความเค้นจริงและอัตราส่วนการยืดตัวเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกับ<br>คำนวณจากตามวิธีการ Constant true Young's modulus with<br>varying Poisson's ration ..... | 71   |
| ก.2 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุจากผลการทดลองการดึงแกนเดียว<br>คำนวณโดยใช้อัตราส่วนปัวซอง .....                                                                               | 72   |
| ก.3 แสดงการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกระทำตามแนวแกน .....                                                                                                         | 73   |
| ก.4 ทำนายพฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะของชิ้นงาน Original membrane โดย<br>แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2.....                                                                          | 76   |
| ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน original ชิ้นที่ 1.....                                                                                       | 78   |
| ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน original ชิ้นที่ 2.....                                                                                       | 78   |
| ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน original ชิ้นที่ 3.....                                                                                       | 79   |
| ข.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV ชิ้นที่ 1 .....                                                                                            | 79   |
| ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV ชิ้นที่ 2 .....                                                                                            | 80   |
| ข.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma ชิ้นที่ 1...                                                                                        | 80   |
| ข.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma ชิ้นที่ 2...                                                                                        | 81   |
| ข.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma ชิ้นที่ 3...                                                                                        | 81   |
| ข.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma/Coat<br>ชิ้นที่ 1.....                                                                              | 82   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูป                                                                                            | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ข.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma/Coat<br>ชั้นที่ 2.....  | 82   |
| ข.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma/Coat<br>ชั้นที่ 3 ..... | 83   |
| ค.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม ANSYS.....                                                          | 85   |
| ค.2 หน้าต่างหลักของโหมด Static Structural.....                                                 | 86   |
| ค.3 หน้าต่างหลักของ Engineering Data .....                                                     | 86   |
| ค.4 แสดงสารบัญข้อมูลของ Engineering Data.....                                                  | 87   |
| ค.5 แสดงการเลือกคำสั่ง Geometry จากหน้าต่างหลักของโปรแกรม .....                                | 88   |
| ค.6 หน้าต่างแสดงส่วนคำสั่งใน Geometry.....                                                     | 88   |
| ค.7 แสดงการเลือกกระนาบในการวาดแบบจำลอง.....                                                    | 89   |
| ค.8 แสดงการวาดแบบจำลอง .....                                                                   | 89   |
| ค.9 ขั้นตอนการสร้างรูป 3 มิติของแบบจำลอง.....                                                  | 90   |
| ค.10 แสดงการเลือกวัสดุให้กับแบบจำลอง.....                                                      | 91   |
| ค.11 แสดงการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์.....                                                         | 91   |
| ค.12 แบบจำลองหลังทำการสร้าง Mesh .....                                                         | 92   |
| ค.13 ขั้นตอนการกำหนดสภาวะ .....                                                                | 93   |
| ค.14 ขั้นตอนการกำหนดบริเวณของ Fix Support และ Displacement.....                                | 93   |
| ค.15 ขั้นตอนการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์.....                                        | 94   |
| ค.16 ขั้นตอนการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์.....                                        | 95   |
| ค.17 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS.....                                                  | 96   |
| ง.1 สัดส่วนชิ้นงานทดสอบ Type IV.....                                                           | 98   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาแนวทางเหตุผลและปัญหา

การปลูกถ่ายเซลล์เนื้อเยื่อเพื่อใช้ในการซ่อมแซมอวัยวะที่เสียหายหรือใช้ในงานวิจัยต่างๆ นั้น สำหรับเซลล์เนื้อเยื่อที่เป็นเซลล์ในส่วนของกล้ามเนื้อ การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเซลล์ จำเป็นต้องทำให้ทราบถึงความแข็งแรงของเซลล์หลังจากทำการปลูกถ่าย เนื่องจากในหลายๆ งานวิจัยพบว่า การให้แรงกระทำกับเซลล์เนื้อเยื่อกล้ามเนื้อจะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเซลล์ ดังเช่นงานวิจัยของ Garvin et al. [1,2] ได้ทดสอบการดึงยึดของเซลล์กล้ามเนื้อที่เลี้ยงอยู่บน BATs โดยให้แรงแบบวงรอบ พบว่าเซลล์กล้ามเนื้อนั้นมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เพิ่มขึ้นประมาณ 2.9 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการได้รับแรงดึงอย่างสม่ำเสมอจะทำให้เซลล์และโครงเลี้ยงเซลล์มีการจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงดึง ทำให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้สามารถรับแรงได้สูงขึ้น เซลล์เอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal ligament) ก็เป็นเซลล์ที่มีลักษณะคล้ายเอ็นที่สามารถยืดหดได้ ในงานวิจัยของ Shibata et al. [3] ได้ทดสอบการดึงยึดและการกดอัดของเซลล์เอ็นยึดปริทันต์ พบว่าเซลล์เอ็นยึดปริทันต์มีความแข็งแรงต่อการดึงยึดมากกว่าความแข็งแรงมีค่าต่อการกดอัดถึง 2 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์เอ็นยึดปริทันต์นี้ตอบสนองต่อสภาวะการถูกแรงกระทำชนิดดึงยึดได้ดีกว่าแรงกระทำชนิดกดอัด

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าส่วนใหญ่จะอธิบายผลของการให้แรงแบบวงรอบที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของเซลล์ที่เกิดขึ้นเป็นภาพรวมของทั้งเซลล์เนื้อเยื่อที่เลี้ยงอยู่บนแผ่นเมมเบรนสังเคราะห์ แสดงว่าแนวโน้มของคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบนั้นอาจไม่ใช่ผลที่เกิดขึ้นกับเซลล์จริงๆ แต่อาจเป็นพฤติกรรมของแผ่นเมมเบรนที่เปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งเครื่องมือทดสอบเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลแบบการให้แรงแบบวงรอบของเซลล์เนื้อเยื่อนั้นจะมีการใช้แผ่น เมมเบรนที่มีคุณสมบัติเฉพาะของทางบริษัทนั้นๆ ซึ่งในบางงานวิจัยอาจจะไม่สามารถเข้ากันได้กับเซลล์บางชนิด สำหรับงานวิจัยนี้ทางหน่วยปฏิบัติการวิจัยเนื้อเยื่อนินทรีย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการสังเคราะห์แผ่นเมมเบรนขึ้นเองเพื่อใช้สำหรับเลี้ยงเซลล์เอ็นยึด ปริทันต์ โดยสังเคราะห์จาก 2,4,6,8-Tetramethyl-2,4,6,8-tetravinyl-cyclotetrasiloxane เป็นสารประเภท silicone rubber ซึ่งมีพฤติกรรมของคุณสมบัติเชิงกลแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Behavior) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นก่อนที่จะนำไปใช้ทดสอบร่วมกับเซลล์เอ็นยึดปริทันต์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประเมินหาผลคุณสมบัติเชิงกลของเซลล์เนื้อเยื่อที่แท้จริง

สำหรับการศึกษาการกระจายตัวของแรงที่เกิดขึ้นภายในแผ่นเมมเบรนนั้น ใช้การสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ finite element analysis (FEA) ด้วยโปรแกรม ANSYS<sup>TM</sup> ซึ่งจำเป็นต้องคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic material) ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้กับเซลล์เอ็นยัดปริพันธ์

1.2.2 ศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 เมมเบรนสังเคราะห์ที่นำมาศึกษามีลักษณะเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) และมีคุณสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Material)

1.3.2 เมมเบรนสังเคราะห์ที่นำมาศึกษากำหนดให้เป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงานทดสอบขณะรับแรง

1.3.3 ไม่คำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทดลองเมื่อกำหนดการเป็นแบบวงรอบ

## 1.4 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

1.4.1 เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกสังเคราะห์และใช้ในหน่วยปฏิบัติการวิจัยเนื้อเยื่ออินทรีย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4.2 การทดสอบทำในสถานะที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องทดสอบแบบดิงแกนเดียว ซึ่งทดสอบในลักษณะการดึงเป็นวงรอบ

1.4.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดโดยแรงและชิ้นงานพิจารณาตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM

1.4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของแบบจำลองอยู่ที่ 10%

1.4.5 การสร้างแบบจำลองและคำนวณสมการสำหรับอธิบายพฤติกรรมของวัสดุใช้โปรแกรม ANSYS โดยทำการทดสอบแรงดึงแบบ Static

[illegible]

## บทที่ 2

### หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษารวบรวมเอกสารและรายงานผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเนื้อเยื่อเทียม , ลักษณะและสมการการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประเภทยาง เนื่องจากภาวะความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงของวัสดุประเภทยางนั้นมีความแตกต่างจากวัสดุทั่วไป มีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity Relation) และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุ รวมไปถึงการจำลองการใช้งานในสภาวะจริง ได้นำเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

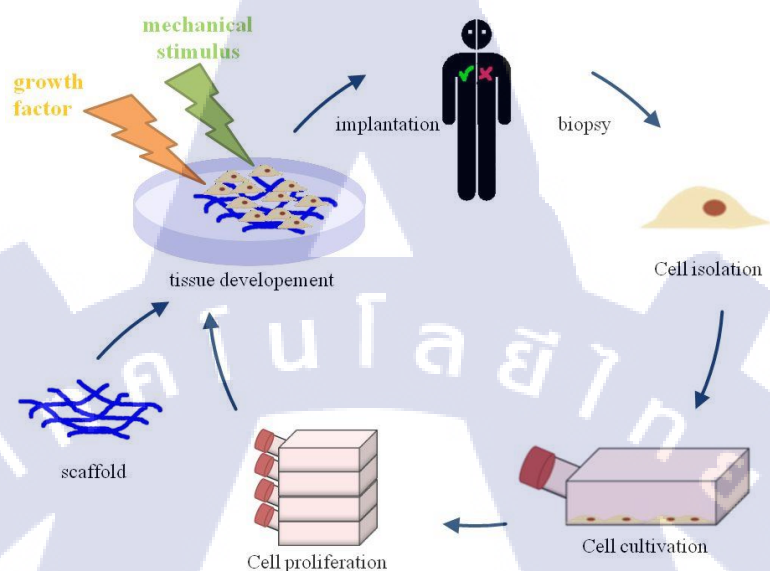
##### 2.1.1 ศาสตร์ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อทดแทน

ศาสตร์ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อทดแทน (Tissue Engineering) ได้พัฒนาไปอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาจนถึงระดับที่สามารถผลิตเนื้อเยื่อเทียมทดแทนบางชนิดที่สามารถนำมาใช้ในผู้ป่วยจริงได้ในปัจจุบัน แม้ว่าปัจจุบันจะมีแนวโน้มของการผลิตเนื้อเยื่อเทียมทดแทนในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์เพิ่มมากขึ้น แต่อุปสรรคสำคัญอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ การทำให้เนื้อเยื่อเทียมทดแทนสามารถทำงานได้เทียบเท่า รวมถึงผสานเป็นหนึ่งเดียวกับเนื้อเยื่อของร่างกายตามธรรมชาติ [4] ในปัจจุบันมีผู้คนมากมายที่จำเป็นต้องอาศัยอวัยวะหรืออุปกรณ์เทียมเพื่อให้สามารถมีชีวิตอยู่ได้ เทคโนโลยีการปลูกถ่ายอวัยวะ (Organ Substitution) ที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการใช้งานในปริมาณที่มากเช่นนี้ได้ ไม่ว่าในด้านของปริมาณและคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยหลังการปลูกถ่ายอวัยวะ ซึ่งยังคงมีความเสี่ยงต่อการปฏิเสธของเนื้อเยื่อ รวมถึงผลข้างเคียงที่เกิดขึ้น ดังนั้นศาสตร์ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อทดแทน (Tissue Engineering) จึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการเติมเต็มความต้องการที่เร่งด่วนเหล่านี้ด้วยการผลิตเนื้อเยื่อเทียมที่สามารถเข้าได้กับร่างกายผู้ป่วยโดยไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อต้าน รวมถึงสามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในร่างกายของมนุษย์ [4]

เนื้อเยื่อเทียมที่สร้างจากกระบวนการทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อทดแทนมีได้หลายรูปแบบตั้งแต่เนื้อเยื่อพื้นฐานที่ประกอบด้วยเซลล์เพียงไม่กี่เซลล์เรียงตัวกันเป็นกลุ่ม (Aggregations) หรือแผ่น (Sheets) จนถึงเนื้อเยื่อที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Thick Constructs of Complex Tissue) [4]

ในปัจจุบัน ประสบความสำเร็จในการวิจัยการผลิตเนื้อเยื่อผิวหนังและเนื้อเยื่อกระดูกอ่อนเทียมที่สามารถใช้ได้จริงในผู้ป่วยและยังมีเนื้อเยื่อเทียมอีกหลายประเภทที่กำลังอยู่ในขั้นตอนการ

ทดสอบก่อนนำมาใช้จริง นอกจากนี้งานวิจัยในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการสร้างเนื้อเยื่อเทียมที่มีการทำงานซับซ้อนก็กำลังก้าวไปในทิศทางที่น่าพึงพอใจ [4]

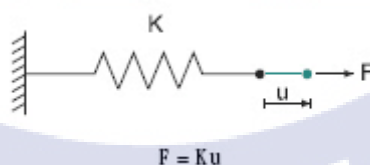


รูปที่ 2.1 กระบวนการทำเนื้อเยื่อเทียม [4]

ซึ่งในการศึกษาเนื้อเยื่อเทียมชนิดใหม่นั้น จำเป็นต้องมีการใช้เมมเบรนชนิดใหม่ที่มีความเข้ากันได้กับ Stem Cell ชนิดนั้นๆ ดังนั้นในการวิจัยจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาไปถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเมมเบรนชนิดนั้นๆ เพื่อให้เกิดความเป็นได้ในการสร้างเนื้อเยื่อเทียม ซึ่งคุณสมบัติหนึ่งที่ต้องศึกษาเป็นอันดับต้นๆ ก็คือคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้น

### 2.1.2 คุณสมบัติไฮเปอร์อีลาสติก

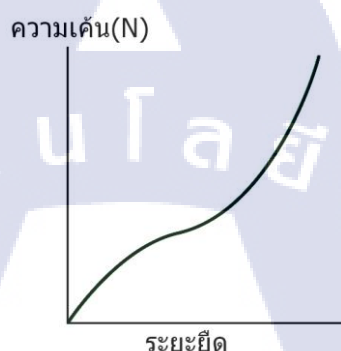
ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงแบบเชิงเส้น โดยทั่วไปจะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law)



รูปที่ 2.2 กฎความสัมพันธ์ของฮุก [5]

เมื่อ  $F$  เป็นแรงกระทำ,  $K$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ และ  $u$  เป็นระยะยืด

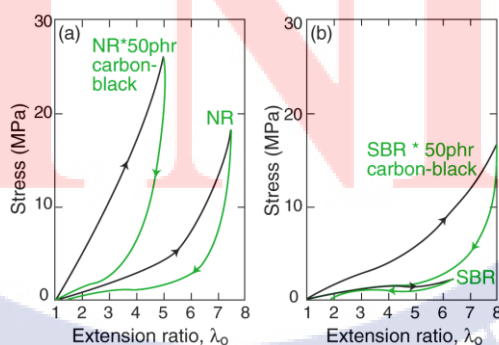
ซึ่งสำหรับวัสดุประเภทยางนั้น จะมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างออกไป การยืดตัวจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับภาระแรงที่ได้รับเหมือนกรณีของวัสดุจำพวกโลหะ หรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่า พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Behavior) [6]



รูปที่ 2.3 พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของยาง

### 2.1.3 วงรอบฮิสเตอเรซิส (Hysteresis)

ภายใต้แรงกระทำที่เป็นแบบวงรอบ โดยวัสดุประเภทยางจะมีการกระจายของพลังงานภายในโครงสร้าง ทำให้เกิดผลกระทบที่เรียกว่า ฮิสเตอเรซิส (Hysteresis) ที่สภาวะคงตัวจะค่อนข้างแตกต่างจากสภาวะเริ่มต้น สำหรับยางที่เติมสารประกอบจะเรียกพฤติกรรมนี้ว่า Stress-Induced Softening



ภาพที่ 2.4 พฤติกรรมความเสียหายของพอลิเมอร์ [6]

กลไกที่ส่งผลสำหรับ Hysteresis ของยางมี 5 ประการหลัก ๆ ดังนี้ [5,6]

(1) ความเสียดทานภายใน (Internal Friction)

ความเสียดทานที่เกิดขึ้นภายใน เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างโมเลกุล หลังจากได้รับแรงและการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ปรากฏการณ์ของความเสียดทานภายในขึ้นอยู่กับสถานะที่อุณหภูมิสูง และปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมินี้เองอาจบรรยายได้โดยแนวคิดการไหลแบบหนืด (Flow Viscosity,  $\eta_v$ ) ความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และที่  $T > T_g$  ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนได้ตามสมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอร์รี่ (Williams - Landel - Ferry Equation)

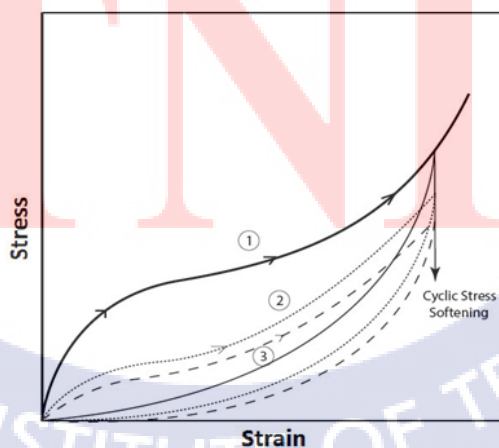
$$\log \frac{\eta_v(T)}{\eta_v(T_g)} = \frac{-C(T - T_g)}{C_p + T - T_g} \quad (2.1)$$

(2) Strain-Induced Crystallization

การยืดตัวมาก (Large Extension) และการหดกลับ (Retraction) หลาย ๆ ครั้งของวัสดุอีลาสโตเมอร์จะช่วยเพิ่มอัตราการก่อตัวและอัตราการสลายของผลึกได้ ระหว่างช่วงการหดกลับ อัตราการคลายความเค้นมีค่าเกินอัตราการยืดตัวของโซ่โมเลกุล

(3) การอ่อนตัวของความเค้น (Stress Softening)

การปรับเปลี่ยนและการขึ้นรูปใหม่ของโครงข่ายโครงสร้างของยางจากการรับแรงครั้งแรก ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงและคุณสมบัติของแดมปีง (Damping) เปลี่ยนไป พฤติกรรมลักษณะนี้เรียกว่า ผลกระทบของมุลลิน (Mullin's Effect)



รูปที่ 2.5 ผลของ Mullin's Effect [7]

ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นความเครียดจะเริ่มสู่สภาวะคงตัวเมื่อผ่านการรับแรงซ้ำเป็นวงรอบ 5-10 รอบ

#### (4) ความเสียหายของโครงสร้าง (Structural Breakdown)

ในกรณีวัสดุยางที่เติมสารประกอบ อนุภาคของสารประกอบจะไปรบกวนกระบวนการก่อตัวเป็นร่างแหและพื้นผิว โดยจะเกิดการพันเกลียวของโครงข่ายของโซโมเลกุลในระหว่างกระบวนการวัลคาไนเซชัน ถ้าหากมีการเสียหาย หรือแยกตัวระหว่างชั้นโมเลกุลจะทำให้พันธะไม่แข็งแรง เป็นสาเหตุให้เกิดพฤติกรรมฮิสเทอเรซิสได้

#### (5) ขอบเขตของการเสียรูป (Domain Deformation)

การพิจารณาความเค้น ความหนืดยืดหยุ่นแบ่งออกเป็น 2 กรณี ในกรณีที่เป็นความยืดหยุ่นสมบูรณ์ การเกิดพฤติกรรมฮิสเทอเรซิสจะเกิดในช่วงที่ไม่กว้าง แต่ในกรณีที่ยางขึ้นรูปอย่างถาวรและไม่มีความยืดหยุ่น โอกาสที่พฤติกรรมฮิสเทอเรซิสจะเกิดในช่วงที่กว้างมีมากขึ้น

#### 2.1.4 การทดสอบวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

จากการศึกษาแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ผ่านมา การที่จะทำนายพฤติกรรมของยางในแต่ละแบบจำลองจะต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งสามารถทำนายได้จากข้อมูลจากการทดลองในลักษณะต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็น การทดสอบในแนวแกนเดียว (Uniaxial Test) การทดสอบเท่ากันในแนวสองแนวแกน (Equi-Biaxial Test) การทดสอบแบบความกว้างคงที่ (Planar Test) และการทดสอบแบบปริมาตร (Volumetric Test)

นอกจากการทดลองที่กล่าวมาแล้ว ยังมีรูปแบบการทดลองหลายแนวแกน (Multiaxial Test) ซึ่งลักษณะการทดสอบจะแตกต่างออกไป และขึ้นงานทดสอบก็แตกต่างกัน เช่น การทดสอบดึงและกด (Tension-Compression Test) การทดสอบการบิด (Torsion Test) หรือการทดสอบในลักษณะการเป็นแบบวงรอบ (Cyclic Test) [5]

#### 2.1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก (Constitutive Laws of Hyperelasticity)

(1) แบบจำลองฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Function)

ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกแบบจำลองของวัสดุจะแตกต่างจากฟังก์ชันพลังงานความเครียดของวัสดุอีลาสติกทั่วไป สมการที่จะใช้อธิบายพฤติกรรมการยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) จะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Function,  $W$ ) ดังสมการที่ 2.2 [5,6]

$$W = W(U) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $U$  คือเทนเซอร์ระยะยืด (Stretch Tensor) ซึ่งประกอบไปด้วย  $\lambda_1, \lambda_2$  และ  $\lambda_3$  เป็นอัตราส่วนการยืดในทิศทางตามแนวแกนหลัก  $x, y, z$  สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic Material) พลังงานความเครียดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสมมาตร (Symmetric Function) ของ  $\lambda_1, \lambda_2$  และ  $\lambda_3$  ดังสมการที่ 2.3

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (2.3)$$

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการยืดตามแนวแกนหลักใด ๆ ( $\lambda_i$ ) กับแรงต่อพื้นที่ ( $f_i$ ) ในกรณีที่ชนิดวัสดุเป็นไอโซโทรปิก อธิบายโดยใช้ฟังก์ชันพลังงานความเครียดโดยสมการที่ 2.4

$$f_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (2.4)$$

พลังงานความเครียด  $W$  อาจจะเขียนให้อยู่ในรูปของ Strain Invariants

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูป

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2.6)$$

ในกรณีที่พิจารณาเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ สามารถเขียนได้ว่า

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{(V + \Delta V)}{V} = 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ  $V$  คือปริมาตร

ความเค้นหลักโคชี (Cauchy Principle Stress) ซึ่งเป็นแรงต่อพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลง (Strained Area) สามารถอธิบายได้จากสมการ 2.8

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial w}{\partial \lambda_i} + \sigma \quad (2.8)$$

## (2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Constitutive Model)

ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด ( $w$ ) ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Deformation) แบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มแรกเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model) พัฒนามาจากความสัมพันธ์ความเค้นกับการเปลี่ยนรูปเมื่อไม่พิจารณาถึงโครงสร้างภายในโมเลกุล กลุ่มที่สองเป็นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพ (Physical Based Model) เป็นการพัฒนามาจากกลไกโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ ทฤษฎีจลนศาสตร์ (Kinetic Theory) หรือทฤษฎีกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics Theory) สมมติฐานจากการเคลื่อนที่ระดับโซโมเลกุลในแต่ละอิลิเมนต์ [5,8-10]

### ก. แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (Phenomenological Model)

เป็นแบบจำลองที่อ้างอิงกับข้อมูลทดสอบ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนี้ ไม่มีความหมายทางกายภาพ แต่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการปรับแบบจำลองให้เข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหรือการทำนายพฤติกรรมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองลักษณะนี้มีข้อดีคือมีความแม่นยำในช่วงที่มีข้อมูลทดลอง แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้สมการดังกล่าวทำนายพฤติกรรมในลักษณะที่มีการทดสอบเพียงอย่างเดียวได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบวัสดุในหลาย ๆ ลักษณะเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมให้มีความถูกต้องมากที่สุด

- แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model)

ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Function) สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบไอโซโทรปิกและอัดตัวไม่ได้ (Isotropic and Incompressible) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมของค่าที่ไม่ผันแปรของเทนเซอร์การเสียรูปได้ดังสมการ 2.9

$$W = \sum_{i+j+k=1}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (2.9)$$

โดยที่  $C_{ijk}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

สมการข้างต้นเป็นแบบจำลองที่นิยมนำมาใช้ทำนาย เนื่องจากจำนวนเทอมที่ใช้มีความเหมาะสม ประกอบไปด้วยเทอมของ First Invariant,  $I_1$  และ Second Invariant,  $I_2$  และ จากสมมติฐานที่กำหนดให้ยางเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ ดังนั้น  $I_3 = 1$  เมื่อพิจารณาสภาวะดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) สามารถเขียนเป็นเทนเซอร์ระยะยืดได้

$$F = \begin{Bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \end{Bmatrix}$$

จากความสัมพันธ์

$$f = \frac{\partial W}{\partial \lambda} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda} \quad (2.10)$$

$$f = 2(1 - \lambda^{-3}) \left[ \frac{C_{10}\lambda + C_{01} + 2C_{20}(I_1 - 3)}{+C_{11}(I_1 - 3 + \lambda(I_2 - 3)) + 2C_{02}(I_2 - 3)} \right] \quad (2.11)$$

- แบบจำลองมูนีร์ฟลิน (Mooney-Rivlin Model)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2.12)$$

เป็นแบบจำลองที่ใช้รูปแบบสมการเดียวกับแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้เป็นอันดับที่ 1 ( $n=1$ ) แบบจำลองชนิดนี้ทำนายพฤติกรรมของยางได้ไม่ชัดเจนนัก โดยสาเหตุที่แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 1 ทำนายพฤติกรรมของวัสดุผิดพลาดนั้น เนื่องจากจำนวนเทอมของแบบจำลองมีน้อยเกินไป อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้สามารถนำไปอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ในช่วงที่ยืดตัวไม่สูงมาก เมื่อเทนเซอร์ของการเสียรูปทั้งสามแบบมีลักษณะเดียวกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่สภาวะการดึงแบบแกนเดียว

$$f = 2C_{10}\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) + C_{01}\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \quad (2.13)$$

- แบบจำลองออกเดน (Ogden Model)

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (2.14)$$

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อีกหนึ่งรูปแบบ สามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุได้ดี เขียนอยู่ในรูปแบบผลรวมของอัตราส่วนการยืดตัว มีค่าโมดูลัสของการเฉือนคือ

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (2.15)$$

อันดับของแบบจำลองออกเดนที่นิยมใช้คือแบบจำลองออกเดนอันดับที่ 3 ( $n = 3$ )  
พิจารณาที่สภาวะดึงแบบแกนเดียว

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i} \left( \lambda^{\alpha_i-1} - \lambda^{-\frac{\alpha_i}{2}-1} \right) \quad (2.16)$$

- แบบจำลองของโยห์ (Yeoh Model)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (2.17)$$

มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $C_{ij}$  มีค่า  $j = 0$  จึงเรียกสมการนี้อีกลักษณะหนึ่งว่า สมการพหุนามลดรูป (Reduce Polynomial Model) โดยกำหนด

เป็นแบบจำลองพหุนามลดรูปอันดับที่ 3 ( $n = 3$ ) จะสังเกตได้ว่าจะมีแต่ค่าอินวาเรียนท์  $I_1$  (First Invariant) เท่านั้น โดยโยทได้ให้เหตุผลของการลดรูปสมการว่าเทอมของ  $I_2$  (Second Invariant) มีอิทธิพลน้อยไม่ส่งผลต่อการทำนายพฤติกรรมจึงสามารถตัดทิ้งได้ ค่าสัมประสิทธิ์  $C_{10}$  แสดงถึงโมดูลัสของการเฉือน ค่า  $C_{20}$  จะแสดงถึงอิทธิพลต่อช่วงกลางของกราฟที่เป็นจุดเปลี่ยนซึ่งเป็นช่วงอ่อนตัว และค่า  $C_{30}$  จะแสดงอิทธิพลต่อกราฟช่วงปลาย ซึ่งเป็นช่วงที่มีการแข็งตัวขึ้น ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองของโยทใช้ได้ดีกับการวิเคราะห์ยางที่มีระยะยืดตัวมาก

พิจารณาที่สภาวะดึงแบบแกนเดียว

$$f = 2((\lambda - \lambda^{-2}) \sum_{i=1}^3 i C_{i0} (I_1 - 3)^{i-1}) \quad (2.18)$$

ข. แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (Physical Based Model)

เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปลักษณะอื่น ๆ ที่ไม่ได้มีผลการทดลองมาก่อน จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาแบบจำลองที่นำความรู้ด้านกลไกการเสียรูปและการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพสามารถทำนายพฤติกรรมในช่วงที่ไม่มีข้อมูลได้

- แบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (2.19)$$

แบบจำลองนี้มีค่าคงที่  $C_{10}$  ซึ่งเป็นโมดูลัสของการเฉือน (Shear Modulus) สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเมื่อเทียบกับการทดลองดึงแกนเดียวในช่วง 0 – 40 % และทำนายพฤติกรรม การเฉือนธรรมดา (Simple Shear) ได้ดีในช่วง 0 – 90 %

พิจารณาที่สภาวะการดึงแบบแกนเดียว

$$f = \frac{dW}{d\lambda} = C_{10} \left( 2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \right) \quad (2.20)$$

- แบบจำลองอูรดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (2.21)$$

โดยที่

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

$\mu$  เป็นโมดูลัสการเฉือน (Shear Modulus) ที่ความเครียดต่ำ,  $\lambda_m$  เป็นการลีดตัวของระยะยืด

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

พิจารณาที่สภาวะการดึงแบบแกนเดียว

$$f = 2\mu(\lambda - \lambda^{-2}) \sum_{i=1}^5 \frac{iC_i}{\lambda_m^{2i-2}} I_1^{i-1} \quad (2.22)$$

- แบบจำลองวานเดอวาลส์ (Van Der Waals Model)

$$W = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) \eta] - \frac{2}{3} a \left( \frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2.23)$$

โดยที่

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

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

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

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

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

พิจารณาที่สภาวะการดึงแกนเดียว

$$f = \mu(1 - \lambda^{-3}) \left[ \frac{1}{1 - \eta} - a \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{2}} \right] (\lambda(1 - \beta) + \beta) \quad (2.24)$$

#### 2.1.6 วิธี Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลทดสอบสำหรับนำมาใช้ทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ที่สามารถหาได้สะดวกที่สุดคือการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile Test Data) แต่ทั้งนี้การป้อนข้อมูลทดสอบจากการดึงในแนวแกนเดียวเพียงอย่างเดียวเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุในแบบจำลองนั้นไม่สามารถที่จะแน่ใจได้ว่าจะเพียงพอสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในหลายแกนของวัสดุว่าได้หรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบวัสดุในรูปแบบอื่นๆ เช่น การดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกน (Equi-Biaxial Testing) หรือการทดสอบแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing) เพิ่มเติม แต่การทดสอบดังกล่าวจะต้องมีความยุ่งยากและจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมในการทดลอง ดังนั้นจึงมีวิธีการที่เรียกว่า “Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio” ซึ่งถูกค้นพบโดย Turner และ Brennen [11] โดยวิธีนี้จะสามารถสร้างชุดข้อมูลของการทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน และการทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ได้จากชุดข้อมูลการดึงในแนวแกนเดียว [12-13]

ในความเป็นจริง ในการดึงในแนวแกนเดียวนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง (True Stress) กับ ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) นั้น มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วง ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) เท่ากับ 100% ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง (True Stress,  $\sigma_i$ ) กับ ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain,  $\epsilon_i$ ) แสดงได้ดังนี้

$$\epsilon_1 = \lambda_1 - 1 = \frac{1}{E}((\sigma_1 - \sigma_3) - \nu(\sigma_2 - \sigma_3)) \quad (2.25)$$

$$\epsilon_2 = \lambda_2 - 1 = \frac{1}{E}((\sigma_2 - \sigma_3) - \nu(\sigma_1 - \sigma_3)) \quad (2.26)$$

$$\epsilon_3 = \lambda_3 - 1 = \frac{1}{E}(-\nu((\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_2 - \sigma_3))) \quad (2.27)$$

โดย  $\lambda_i$  คือ อัตราส่วนการยืด(Extension Ratio)

ในวิธีการนี้สมมติให้ยางเป็นวัสดุที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible Material) ในความสัมพันธ์ข้างต้น Hydrostatic pressure จะไม่มีผลกระทบกับการเสียรูปไม่ว่าค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio,  $\nu$ ) จะมีค่าเท่าใดก็ตาม สมการข้างต้นสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_1 = \frac{E(\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1))}{(1 - \nu^2) + \sigma_3} \quad (2.28)$$

$$\sigma_2 = \frac{E(\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1))}{(1 - \nu^2) + \sigma_3} \quad (2.29)$$

$$\nu = \frac{(\lambda_1 \lambda_2 - 1)}{(\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 - 1) - 1)} \quad (2.30)$$

สำหรับการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Tensile)

$$\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda_1}$$

$$\sigma_u = \sigma_1 = E \left[ \lambda_u - 1 + \nu \frac{(1 - \sqrt{\lambda_u})}{\sqrt{\lambda_u}} \right] / (1 - \nu^2) \quad (2.31)$$

เมื่อ  $\lambda_u$  คือ อัตราส่วนการยืดในแนวแกนดึง และ อัตราส่วนปัวซอง คือ

$$\nu = 1/(\lambda_u + \sqrt{\lambda_u}) \quad (2.32)$$

สำหรับการดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกน (Equi-Biaxial Testing)

$$\lambda_1 = \lambda_2, \lambda_3 = 1/\lambda_1^2$$

$$\sigma_B = \sigma_1 = \sigma_2 = E[\lambda_B - 1 + \nu(\lambda_B - 1)]/(1 - \nu^2) \quad (2.33)$$

เมื่อ  $\lambda_B$  คือ อัตราส่วนการยืดในแนวแกนดึง และ อัตราส่วนปัวซอง คือ

$$\nu = (\lambda_B + 1)/(2\lambda_B^2 + \lambda_B + 1) \quad (2.34)$$

สำหรับการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing)

$$\lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1/\lambda_1$$

$$\sigma_S = E(\lambda_S - 1)/(1 - \nu^2) \quad (2.35)$$

เมื่อ  $\lambda_S$  คือ อัตราส่วนการยืดในแนวแกนดึงที่ทำให้เกิดการเฉือน และ อัตราส่วนปัวซอง คือ

$$\nu = 1/(\lambda_S + 1) \quad (2.36)$$

จากสมการที่ 2.31 , 2.33 และ 2.35 จะเห็นว่าความเค้นเป็นฟังก์ชันกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และ อัตราส่วนปัวซอง ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนั้นสามารถหาได้จากข้อมูลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวโดยพิจารณาจากสมการที่ 2.31 สามารถเขียนได้ในรูปแบบใหม่คือ

$$\sigma_U = EP(\lambda_U, \nu) \quad (2.36)$$

ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^N \sigma_{U_i} P(\lambda_{U_i}, \nu_i) / \sum_{i=1}^N P^2(\lambda_{U_i}, \nu_i) \quad (2.37)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ,  $\sigma_{v_i}$  คือ ความเค้นจริงที่ได้จากการทดลองการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่  $i$  และ  $v_i$  คือ อัตราส่วนปัวซอง ค่าที่  $i$

และค่า  $P$  หาได้จากสมการ

$$P = \left[ \lambda_v - 1 + v \frac{(1 - \sqrt{\lambda_v})}{\sqrt{\lambda_v}} \right] / (1 - v^2) \quad (2.38)$$

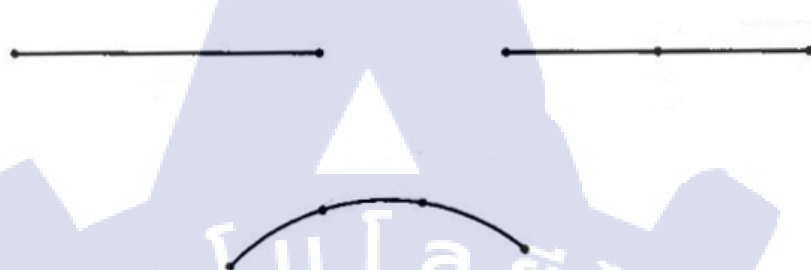
### 2.1.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) โดยใช้ในการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) เหมาะกับปัญหาที่มีความซับซ้อน ซึ่งผลเฉลยที่แม่นยำของปัญหาเหล่านี้หาได้ยาก หลักการขั้นต้นของวิธีนี้เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของชิ้นส่วนที่เราต้องการวิเคราะห์ออกเป็นพื้นที่หรือปริมาตรในกรณีวิเคราะห์แบบสามมิติ ในแต่ละส่วนย่อย ๆ ที่แบ่งออกมาจะเรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แล้วการวิเคราะห์จะพิจารณาทีละเอลิเมนต์ แต่ละเอลิเมนต์ก็จะมีสมการที่สร้างขึ้นให้สอดคล้องกับตำแหน่งของเอลิเมนต์ สมการของทุกเอลิเมนต์จะมีความสัมพันธ์กัน เมื่อนำแต่ละสมการมาเชื่อมโยงกันจะก่อให้เกิดระบบสมการรวมเป็นรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ ความถูกต้องของผลเฉลยจะมีความถูกต้องหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับรูปร่างชิ้นงานจริงให้มากที่สุด การแบ่งย่อยเอลิเมนต์ต้องมีจำนวนที่เพียงพอ เพื่อให้การทำนายพฤติกรรมใกล้เคียงกับสภาวะจริง การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาได้หลายแขนง วิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ไม่มีข้อจำกัดในด้านการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายจากการทดสอบจริง [5]

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับรูปร่างและลักษณะการกระทำของภาระ ชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งได้เป็น 4 ประเภทคือ เอลิเมนต์มิติเดียว เอลิเมนต์สองมิติ เอลิเมนต์สามมิติและเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกน

## (1) เอลิเมนต์มิติเดียว

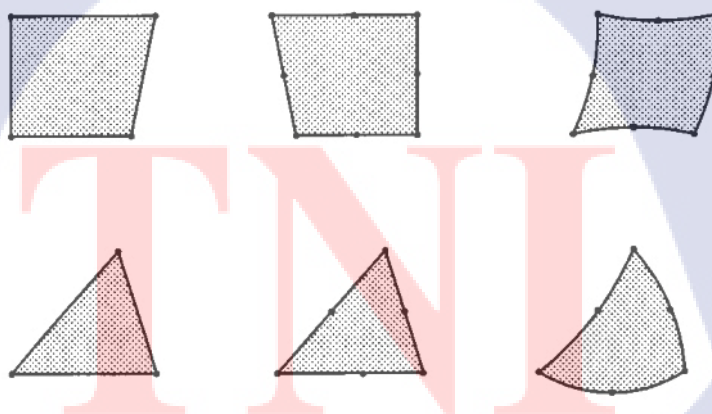
เอลิเมนต์ชนิดนี้นิยมนำไปใช้วิเคราะห์ปัญหาที่สนใจมิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่เป็นเส้นลวด ท่อยาว ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน



รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์มิติเดียว

## (2) เอลิเมนต์สองมิติ

เอลิเมนต์ชนิดนี้มักใช้กับการวิเคราะห์ชิ้นงานในแนวระนาบ แกน x-y โดยทั่วไปจะมีรูปทรงเป็นสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ประกอบเป็นด้านด้วยเส้นตรงหรือโค้ง



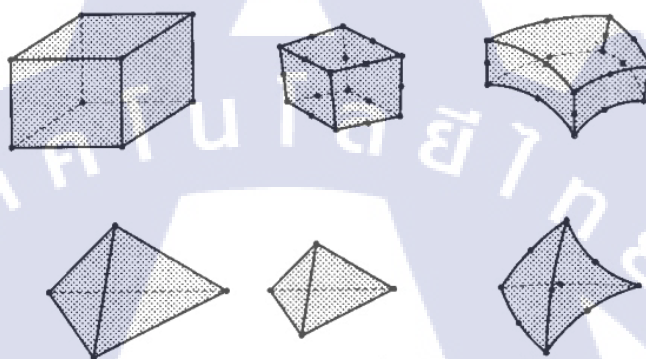
รูปที่ 2.7 เอลิเมนต์สองมิติ

โดยทั่วไปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับความนิยมมากกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยม เพราะในระดับชั้นความเสถียรที่เท่ากันเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะให้ผลเฉลยที่ถูกต้องกว่า แต่บางกรณีจำเป็นต้อง

กำหนดเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์เหมาะกับการแบ่งโดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม

### (3) เอลิเมนต์สามมิติ

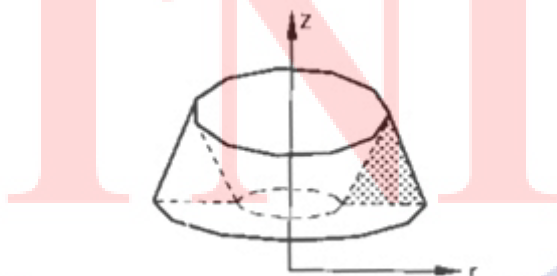
รูปร่างในกรณีนี้จะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และรูปทรงสี่หน้า



รูปที่ 2.8 เอลิเมนต์สามมิติ

### (4) เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Element)

นอกจากเอลิเมนต์ทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมาแล้วยังมีเอลิเมนต์แบบสมมาตรรอบแกนซึ่งใช้วิเคราะห์กับรูปทรงที่มีความสมมาตรรอบแกน นอกจากการวิเคราะห์จะได้ผลเฉลยที่ถูกต้องเช่นเดิมแล้วยังลดภาระในการคำนวณลง เนื่องจากถ้าวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งชิ้นงานจะเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการและใช้เวลาในการคำนวณมาก



รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์สมมาตรรอบแกน

## 2.2 งานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

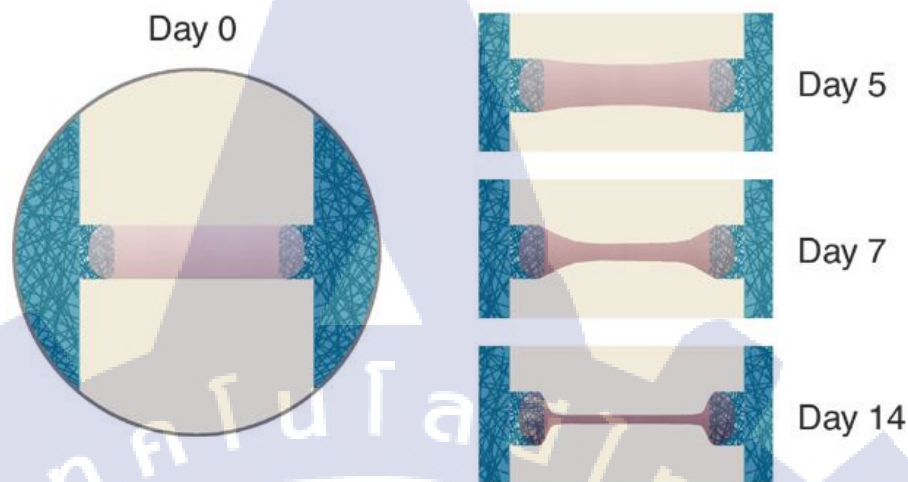
จากงานวิจัยของ Garvin et al. [1] และ Triantafillopoulos et al. [14] ทำการทดสอบการดึงยึดเซลล์กล้ามเนื้อที่เลี้ยงอยู่บนวัสดุเลี้ยงเซลล์ (Bioartificial Tendons : BATs) โดยให้แรงกระทำในรูปแบบของการกดอัดและดึงยึดเข้าไปมา 1 ชั่วโมง/วัน ที่อัตราการยืด 1% และความถี่ 1 Hz เป็นเวลา 7 วัน พบว่า ค่า Elasticity Modulus และ Ultimate Tensile Strength มีค่าเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า BATs ที่ผ่านการให้รับแรงดึงยึดอย่างสม่ำเสมอจะมีค่า Ultimate Tensile Strength มากกว่าที่ไม่ได้ผ่านการให้รับแรงประมาณ 2.9 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการได้รับแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เซลล์และวัสดุเลี้ยงเซลล์มีการจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงดึงและมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้สามารถรับแรงได้สูงขึ้น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Elasticity Modulus) และ ความเค้นแรงดึงที่จุดสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) จากการทดลองดึงยึดเป็นเวลา 7 วัน [1]

|                                       | Load               | No load           |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Day 7 elasticity (MPa)                | $1.80 \pm 1.82$    | $0.49 \pm 0.24$   |
| Day 7 ultimate tensile strength (kPa) | $32.65 \pm 172.03$ | $112.20 \pm 6.07$ |

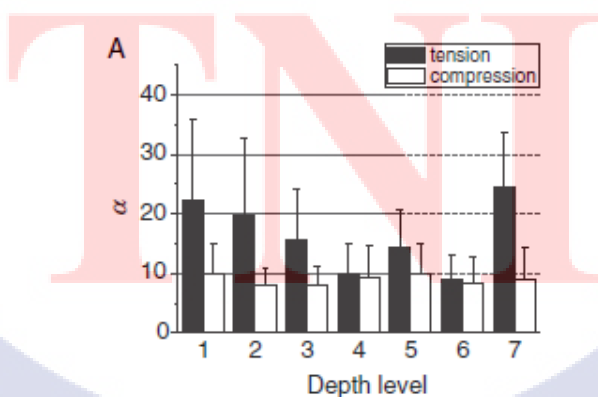
และจากรูปที่ 2.9 ลักษณะรูปร่างของเซลล์เมื่อผ่านการทดสอบไปเป็นเวลา 7 วัน พบว่า เซลล์จะมีการจัดเรียงตัวไปตามแนวการยืดและจะมีความกว้างที่ลดลง และเมื่อผ่านไป 14 วัน จะมีลักษณะคล้ายเส้นตรงเส้นเดียว [1,2]

## Bioartificial Tendon (BAT) Development



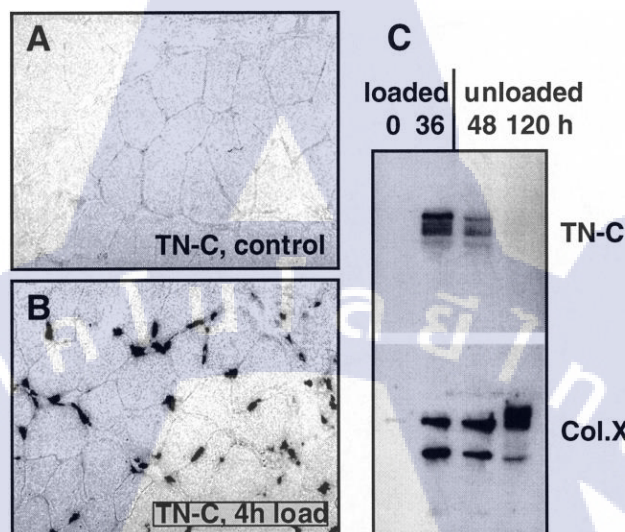
รูปที่ 2.10 ลักษณะ Bioartificial Tendons (BATs) เมื่อทำการทดลองในเวลาต่างๆ [1,2]

ในงานวิจัยของ Shibata et al. [3] ทำการทดสอบการดึงยืดและการกดอัดของเซลล์เอ็นยึด ปริพันธ์ที่อยู่ระหว่างรากฟันฟันกับกระดูกขาพื้น โดยนำส่วนเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยฟัน , เซลล์เอ็นยึดปริพันธ์ และกระดูกขาพื้น จากวัว มาให้แรงดึงกับแรงกดอัดแบบวงรอบ ด้วยความถี่ 1 Hz ที่ระยะดึง 35% พบว่าเซลล์เอ็นยึดปริพันธ์มีความแข็งแรงต่อการดึงยืดมากกว่าความแข็งแรงต่อการกดอัดถึง 2 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์เอ็นยึดปริพันธ์นี้ตอบสนองต่อสภาวะการถูกแรงกระทำ ชนิดดึงยืดได้ดีกว่าแรงกระทำชนิดกดอัดดังรูปที่ 2.10



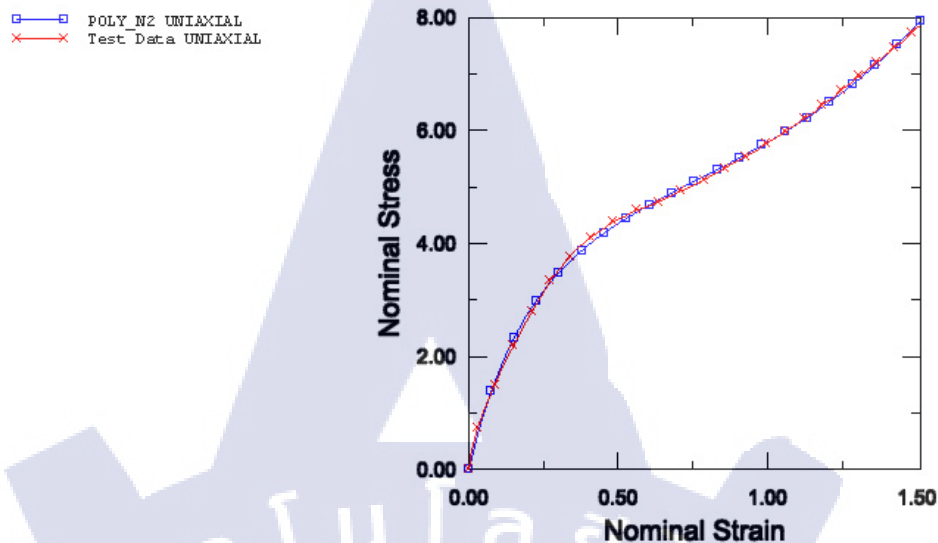
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงค่า  $\alpha$  ของ การดึงยืด (Tensile) และ การกดอัด (Compressive) จากการทดสอบการเปลี่ยนรูปที่ความถี่ 1 Hz กับตำแหน่งของชิ้นงาน [14]

จากงานวิจัยของ Chiquet et al. [15] พบว่าการให้แรงกระทำแก่เซลล์ fibroblasts นั้น จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของ extracellular matrix ที่มีรูปแบบที่ต่างออกไปจากการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่า ดังรูปที่ 2.11



รูป 2.12 แสดงลักษณะของ fibroblasts [15]

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ในการอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก เช่น ยาง จากงานวิจัยของรพีภัทร์ วีระชาติพิทักษ์ชน [5] ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการรับภาระเป็นวงรอบของวัสดุประเภทยางเติมผงคาร์บอนดำโดยศึกษาอย่าง 3 สูตร โดยใช้การอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลจากการทดลองจะถูกนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของแต่ละแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคำนวณ เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์และแบบจำลองที่เหมาะสมแล้ว ในที่นี้คือแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ดังรูปที่ 2.12



รูป 2.13 ทำนายการดึงแกนเดียวด้วยอัตราเร็ว 500 mm/min ยังไม่กำจัดผลของมุลลิน [5]

จากนั้นจึงเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เป็นวงรอบระหว่างการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยให้การทำนายพฤติกรรมที่มีความใกล้เคียงและเหมาะสมที่สุด เพื่อใช้เป็นโปรแกรมขั้นต้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุประเภทยางเมื่อได้รับภาระในสภาวะที่เป็นวงรอบ

อีกงานวิจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ทาง อริสรา และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในล้อยางตันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถนำมาใช้ในการจำลองการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับยางตันเมื่อโดนกดอัดได้ และได้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

จากงานวิจัยของ รัชดา จิระญวณารัญ [16] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองรูปแบบการแตกหักของชิ้นงาน PP และ PP composites จากการทดสอบการดึงยึดในแนวแกนเดียวโดยใช้โปรแกรม ANSYS ในโหมดวิเคราะห์ Transient structural/Explicit dynamics เพื่อนำไปเป็นสภาวะเริ่มต้นของการจำลองไมโครคอมพอสิต ซึ่งจากผลการทดลองทำให้พิสูจน์ได้ว่าโปรแกรมสามารถจำลองลักษณะการแตกหักได้

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| ผู้วิจัย                | ปี   | การทดลอง                                                                                                                                                                                                                                     | ผลการทดลอง                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| J. Garvin; et al. [1]   | 2003 | ทดสอบการดึงยึดของเซลล์กล้ามเนื้อที่เลี้ยงอยู่บน BATs โดยให้แรงเข้าไปมา 1 ชั่วโมง/วัน ที่อัตราการยืด 1% และความถี่ 1 Hz เป็นเวลา 7 วัน                                                                                                        | เซลล์กล้ามเนื้อ มีค่า Ultimate Tensile Strength มีค่าเพิ่มขึ้น มีค่ามากกว่าประมาณ 2.9 เท่า แสดงให้เห็นว่าการได้รับแรงดึงอย่างสม่ำเสมอจะทำให้เซลล์และโครงเลี้ยงเซลล์ มีการจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงดึง ทำให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้สามารถรับแรงได้สูงขึ้น |
| A. J. Banes; et al. [2] | 2009 | ทดสอบการดึงยึดของเซลล์กล้ามเนื้อที่เลี้ยงอยู่บน BATs โดยให้แรงเข้าไปมา 8 ชั่วโมง/วัน เป็นเวลา 2 วันที่อัตราการยืด 3.5% และความถี่ 1 Hz เป็นเวลา 7 วัน                                                                                        | ทำการตรวจสอบการยืดออกด้วย 3D gel polymerize พบว่าเซลล์กล้ามเนื้อมีลักษณะการยืดออกตามแนวแรงอย่างเห็นได้ชัด                                                                                                                                                       |
| T. Shibata; et al. [3]  | 2006 | ทดสอบการดึงยึดและกันกดอัดของเซลล์เอ็นยึดปริทันต์ที่อยู่ระหว่างรากฟันฟันกับกระดูกเบ้าฟัน โดยนำส่วนเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยฟัน , เซลล์เอ็นยึดปริทันต์ และกระดูกเบ้าฟัน จากวัว มาให้แรงดึงกับแรงกดอัดแบบวัฏจักร ด้วยความถี่ 1 Hz ที่ tension 35% | เซลล์เอ็นยึดปริทันต์มีความแข็งแรงต่อการดึงยึดมากกว่าความแข็งแรงต่อการกดอัดถึง 2 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์เอ็นยึดปริทันต์นี้ตอบสนองต่อสภาวะการถูกแรงกระทำชนิดดึงยึดได้ดีกว่าแรงกระทำชนิดกดอัด                                                                 |

| ผู้วิจัย                        | ปี   | การทดลอง                                                                                                                          | ผลการทดลอง                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M. Chiquet; et al. [15]         | 2003 | ศึกษาและค้นหาวิธีการแปลงผล การเปลี่ยนแปลงเชิงกลที่เกิด ขึ้นกับ fibroblasts และส่งผลต่อ extracellular matrix                       | พบว่าการให้แรงแก่เซลล์ fibroblasts นั้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของ extracellular matrix ที่รูปแบบที่ต่าง ออกไปจากเกิดเองตามธรรมชาติ แต่ เกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่า                   |
| R. Weerachatpittuchon [5]       | 2006 | ศึกษาถึงพฤติกรรมการรับภาระ เป็นวงรอบของวัสดุประเภทยาง เต็มผงคาร์บอนดำโดยศึกษาทาง 3 สูตร โดยใช้การอธิบายด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ | ข้อมูลจากการทดลองจะถูกนำมาหาค่า สัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของแต่ละ แบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคำนวณ เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์และแบบจำลองที่ เหมาะสมแล้ว ในที่นี้คือแบบจำลองพหุ นามอันดับที่ 2 |
| A. Chaikittiratana; et al. [13] | 2005 | ศึกษาการกระจายตัวของความ เค้นและความเครียดในล้อยางตัน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์                                            | พบว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สามารถนำมาใช้ในการจำลองการ กระจายตัวของความเค้น และ ความเครียดที่เกิดขึ้นกับยางตันเมื่อโดน กดอัดได้ และได้ผลที่ใกล้เคียงกับความ เป็นจริง      |
| R. Chiranyawaran [16]           | 2012 | ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองรูปแบบ การแตกหักของชิ้นงาน PP และ PP composites จากการทดสอบ การดึงยึดในแนวแกนเดียวโดยใช้ โปรแกรม ANSYS      | ผลการทดลองทำให้พิสูจน์ได้ว่า โปรแกรมสามารถจำลองลักษณะการ แตกหักได้                                                                                                                |

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูล

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลและวิธีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวไว้ในเนื้อหาบทที่ 2

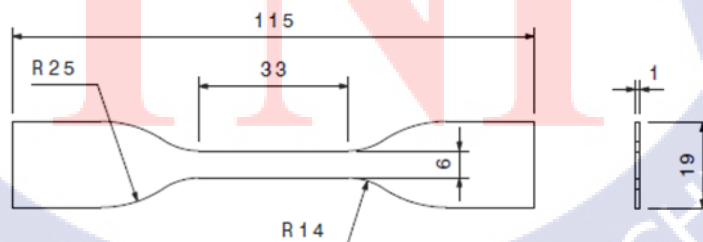
#### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินการวิจัยนั้น ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนใหญ่ ประกอบด้วย

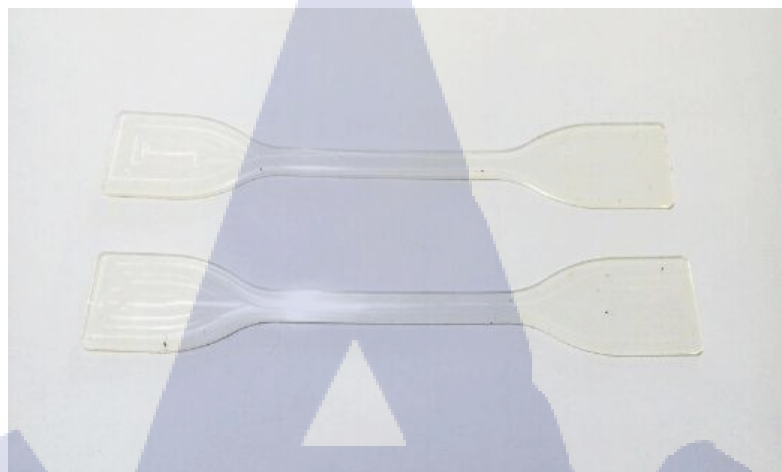
1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน
2. ขั้นตอนตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) ของชิ้นงาน
3. ขั้นตอนการทดลองคุณสมบัติเชิงกลแบบการดึงแกนเดียว
4. ขั้นตอนการทำนายพฤติกรรมของวัสดุจากข้อมูลการทดลอง
5. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้น

##### 3.2.1 การเตรียมชิ้นงาน

แผ่นเมมเบรนที่ใช้งานวิจัยสังเคราะห์จาก 2,4,6,8-Tetramethyl-2,4,6,8-Tetravinyl—Cyclotetrasiloxane ซึ่งเป็นวัสดุประเภทยางซิลิโคน โดยในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นเมมเบรนนั้น ชิ้นงานทดสอบจะถูกหล่อขึ้นรูปเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) อ้างอิงการทดสอบแบบดึงแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV และ ASTM D412-92 [17-18] ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งทางหน่วยปฏิบัติการวิจัยเนื้อเยื่ออินทรีย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผู้สังเคราะห์และขึ้นรูป



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 type IV [17]



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานสำหรับทดสอบ

โดยแผ่นเมมเบรนที่จะทำการทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตัวอย่างตามขั้นตอนของการกระบวนการปรับปรุงแผ่นเมมเบรนให้มีความเหมาะสมสำหรับเลี้ยงเซลล์ นั่นคือ

- (1) แผ่นเมมเบรนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการต่างๆ (Original)
- (2) แผ่นเมมเบรนที่นำมาฉายรังสี UV เพื่อทำการฆ่าเชื้อ (UV)
- (3) แผ่นเมมเบรนที่ฉายรังสี UV และ ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย plasma เพื่อให้ผิวมีความขรุขระ ช่วยในการยึดเกาะของเซลล์ (UV/Plasma)
- (4) แผ่นเมมเบรนที่ฉายรังสี UV, activate และทำการเคลือบด้วยสารเลี้ยงเซลล์ เพื่อเป็นสารอาหารสำหรับเซลล์ (Uv/Plasma/Coat)

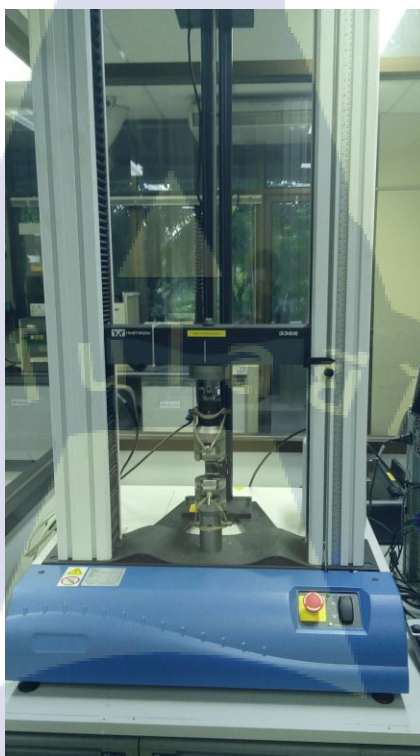
### 3.2.2 ตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) ของชิ้นงาน

นำชิ้นงานทดสอบทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง ไปทำการตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้อง Optical Microscope ยี่ห้อ Keyence รุ่น VHX-2000 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เพื่อตรวจสอบดูความเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงาน

### 3.2.3 การทดลองคุณสมบัติเชิงกลแบบการดึงแกนเดียว

ทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Instron 3360 Series Dual Column Tabletop Universal Testing Systems ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล ผลการทดลองได้มาจากการป้อนแรงดึงซึ่งเป็นแรงจากการทดสอบ เมื่อป้อนแรงเข้าไปด้วยอัตราการยืดคงที่ ชิ้นงานจะยืดตัวออก เครื่องทดสอบจะใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดระยะยืดที่

เรียกว่า เอกซ์เทนโซมิเตอร์ (Extensometer) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อคำนวณหาความเครียด

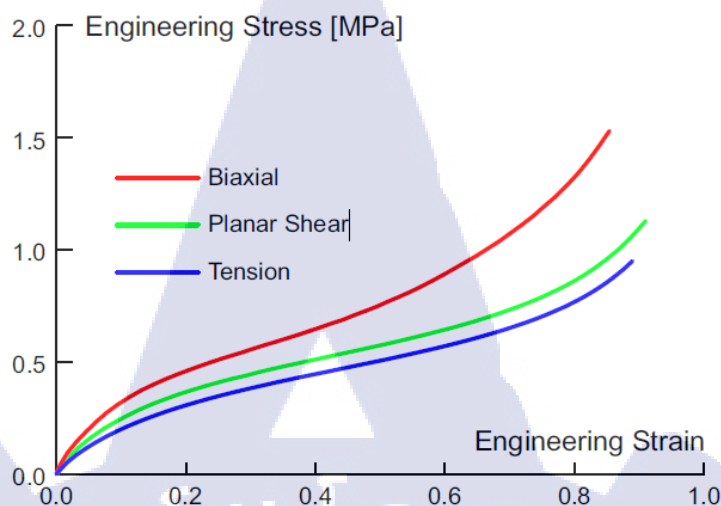


รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราความเร็วในการดึงคือ 100 มิลลิเมตรต่อนาที กำหนดโปรแกรมการดึงโดยให้คีมจับเคลื่อนที่เป็นระยะ 25 มิลลิเมตร สำหรับการกำจัดผลของมุลลิน กำหนดโปรแกรมให้ดึงขึ้นงานในลักษณะดึงกลับปกลบมาจำนวน 5 รอบ เพื่อกำจัดผลของมุลลิน โดยกำหนดความเร็วและระยะยึดให้เท่ากับการทดลองจริง บันทึกผลการทดลองและเขียนกราฟ

#### 3.2.4 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุจากข้อมูลการทดลอง

การเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุที่ถูกต้องแม่นยำนั้น การทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลการทดลองที่ถูกต้องนั้นมีส่วนที่สำคัญ โดยส่วนมากจะใช้ชุดข้อมูลการทดลอง 3 แบบ คือ การดึงในแนวแกนเดียว การดึงแบบสองแนวแกนเท่ากัน และการดึงแบบความกว้างคงที่ [8-13] ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดข้อมูลการทดลองทั้งสามแบบ

สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ ทำการทดสอบในลักษณะของการดึงในแนวแกนเดียวในสภาวะที่เป็นวงรอบ ส่วนข้อมูลการทดสอบวัสดุในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ การดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกน และการทดสอบแบบความกว้างคงที่นั้นจะใช้วิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio ในการสร้างชุดข้อมูลของการทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน และการทดสอบดึงแบบความกว้างคงที่ ได้จากชุดข้อมูลการดึงในแนวแกนเดียว เนื่องจากการทดสอบใน 2 รูปแบบหลังนั้นจะต้องมีการใช้อุปกรณ์เสริมเพิ่มเติมและมีความยุ่งยากในการทดลอง

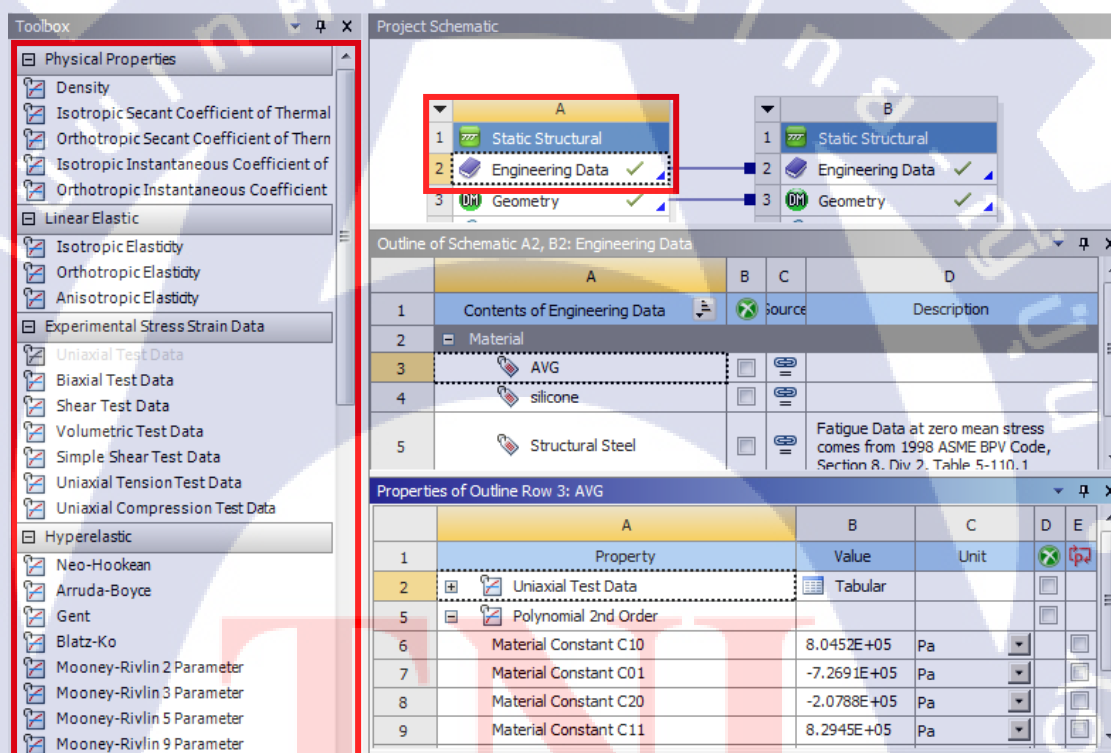
ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปใช้กำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรม ANSYS และทำการสร้างแบบจำลองการดึงสำหรับแผ่นเมมเบรนที่ใช้จริงในงานวิจัยดังกล่าวถึงขั้นตอนในหัวข้อต่อไป

### 3.2.5 การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้น

ในการสร้างแบบจำลองแผ่นเมมเบรนตามขนาดที่ใช้จริงในงานวิจัยทางทันตกรรมและวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นบนแผ่นเมมเบรนนั้นจะทำในโปรแกรม ANSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การจำลองการกระจายตัวของความเค้นนั้นจะใช้การจำลองในโหมด Static Structural โดยจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อยด้วยกันดังนี้

(1) เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ

การเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมของวัสดุนั้น อยู่ใน ส่วนของการเลือกข้อมูลเชิงวิศวกรรมซึ่งอยู่ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS ข้อดี ของโปรแกรมนี้คือสามารถสร้างข้อมูลของวัสดุต่างๆที่ยังไม่เคยมีข้อมูลมาก่อนได้ตามต้องการโดยจะมี แถบ Toolbox แสดงแบบจำลองและสมบัติต่างๆของวัสดุอยู่ทางด้านซ้ายมือดังแสดงในรูป 3.5 จาก ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้น จะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด นำ ข้อมูลป้อนใส่ลงในโปรแกรมในหัวข้อ Engineering Data เพื่อกำหนดเป็นคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่จะ ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ต่างๆในโปรแกรม ANSYS ดังแสดงในรูปที่ 3.5

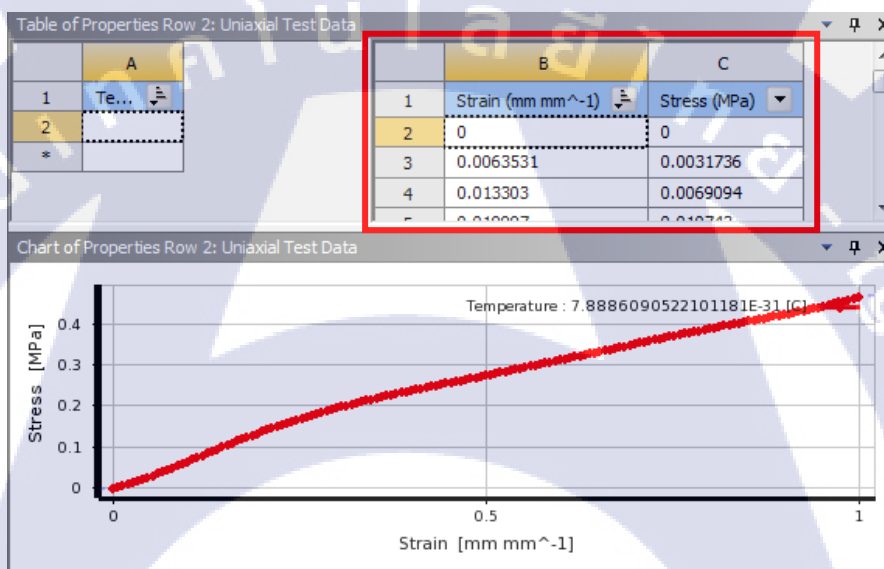


รูปที่ 3.5 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับป้อนข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ขั้นตอนสำหรับป้อนข้อมูลการทดลองลงในโปรแกรมและคำนวณเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองดังนี้

1. ในหัวข้อ Experimental Stress Strain Date นั้น จะเป็นการเลือกรูปแบบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบต่างๆ เช่น Uniaxial Test Data เป็นข้อมูลจากการทดสอบดึงในแนวแกนเดียว, Biaxial Test Data เป็นข้อมูลจากการทดสอบดึงเท่ากันในสองแนวแกน หรือ Planar Test Data เป็นข้อมูลจากการทดสอบดึงแบบความกว้างคงที่

2. ป้อนข้อมูลผลการทดลองลงในตารางดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยข้อมูลที่ป้อนเข้าไปนั้นคือค่าความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain) ของการทดสอบลักษณะต่างๆ



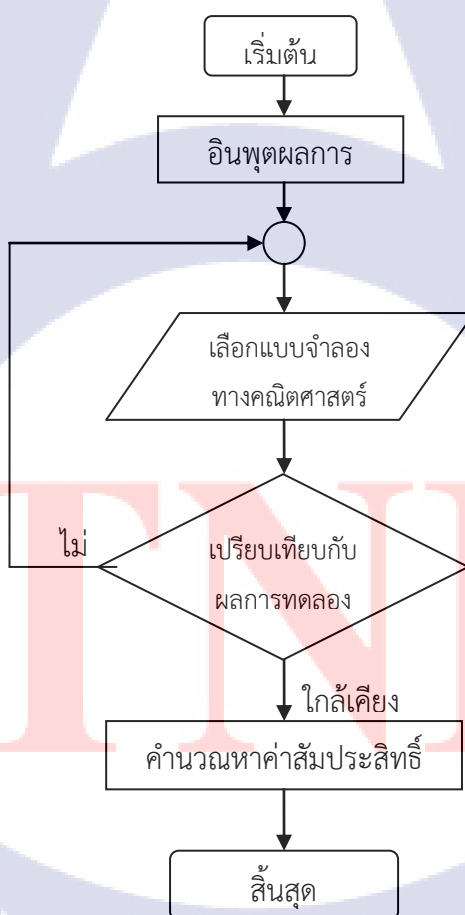
รูปที่ 3.6 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับป้อนข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

3. สำหรับการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองในหัวข้อ Hyperelastic ในรูปที่ 3.5 จะกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆที่ใช้สำหรับทำนายพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติคตังนำเสนอในบทที่ 2 ทำการเลือกแบบจำลองที่ต้องการให้โปรแกรมคำนวณสมการและค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 3.7

| Properties of Outline Row 3: AVG |                                |                                                                 |                  |     |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------|-----|
|                                  | A                              | B                                                               | C                | D E |
| 1                                | Property                       | Value                                                           | Unit             |     |
| 5                                | Polynomial 2nd Order           |                                                                 |                  |     |
| 6                                | Material Constant C10          | 8.0452E+05                                                      | Pa               |     |
| 7                                | Material Constant C01          | -7.2691E+05                                                     | Pa               |     |
| 8                                | Material Constant C20          | -2.0788E+05                                                     | Pa               |     |
| 9                                | Material Constant C11          | 8.2945E+05                                                      | Pa               |     |
| 10                               | Material Constant C02          | -1.0746E+06                                                     | Pa               |     |
| 11                               | Incompressibility Parameter D1 | 0                                                               | Pa <sup>-1</sup> |     |
| 12                               | Incompressibility Parameter D2 | 0                                                               | Pa <sup>-1</sup> |     |
| 13                               | Curve Fitting                  | Fit Type: Polynomial 2nd Order                                  |                  |     |
| 14                               | Error Norm for Fit             | Normalized...                                                   |                  |     |
| 15                               | Uniaxial Test Data             | Tabular                                                         |                  |     |
| 16                               | Biaxial Test Data              | Add this experimental data, to include it in the curve fitting. |                  |     |
| 17                               | Shear Test Data                | Add this experimental data, to include it in the curve fitting. |                  |     |

รูปที่ 3.7 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับคำนวณสมการและค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ

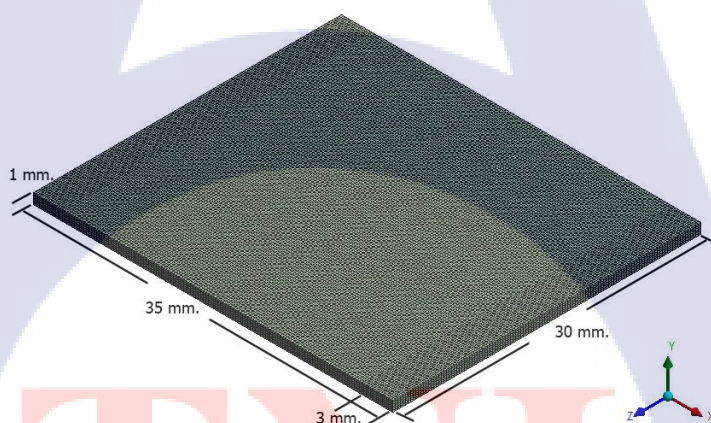
จากขั้นตอนที่กล่าวมาสามารถนำมาเขียนเป็นแผนผังขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.8



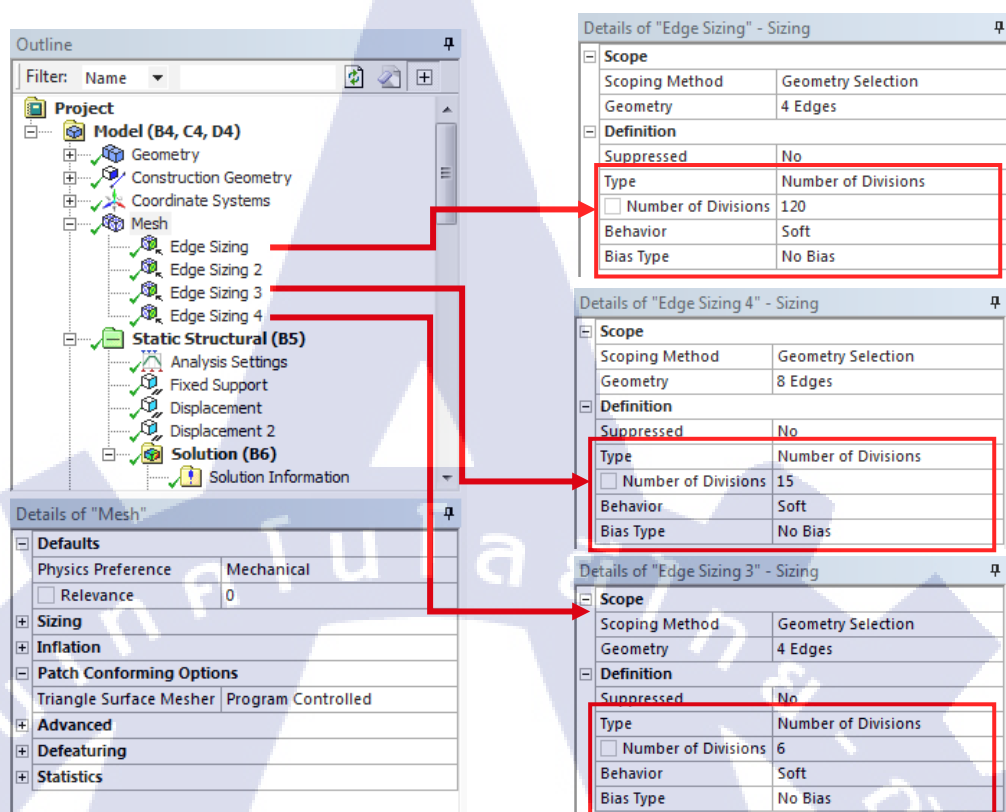
ภาพที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ

## (2) สร้างแบบจำลอง 3 มิติ

สำหรับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ สำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์นั้น จะสร้างในหัวข้อ Geometry ขนาดของแบบจำลอง 3 มิติที่มีขนาด  $30 \times 35 \times 1$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งขั้นตอนต่อไปคือการสร้างเอลิเมนต์ให้กับแบบจำลอง โดยแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็กๆหลายๆส่วนที่เรียกว่า Mesh รูปแบบของ Mesh ที่ใช้จะมีอยู่หลากหลายลักษณะ เช่น Multizone, Sweep, Hexahedral ฯลฯ ในงานวิจัยนี้จะเลือกรูปแบบการตรวจสอบการเปลี่ยนรูปร่างแบบ Standard Mechanical การสร้าง Mesh นั้นทำโดยการกำหนด Edge sizing ของบริเวณส่วนที่ไม่ใช่บริเวณที่หนีบจับ โดยเลือกประเภทของการกำหนด Mesh เป็น Number of Divisions เท่ากับ 120 และ กำหนด Edge sizing ของบริเวณที่หนีบจับโดยเลือกประเภทของการกำหนด Mesh เป็น Number of Divisions เท่ากับ 15 และกำหนดความหนาของชิ้นงานให้ Edge sizing ของบริเวณที่หนีบจับโดยเลือกประเภทของการกำหนด Mesh เป็น Number of Divisions เท่ากับ 6 ดังแสดงในรูป 3.10 จากนั้นทำการสร้างเอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์รวมของชิ้นงานเท่ากับ 108,000 เอลิเมนต์ ประเภทของเอลิเมนต์คือเฮกซะฮีดรอลเอลิเมนต์ (Hexahedral Element)



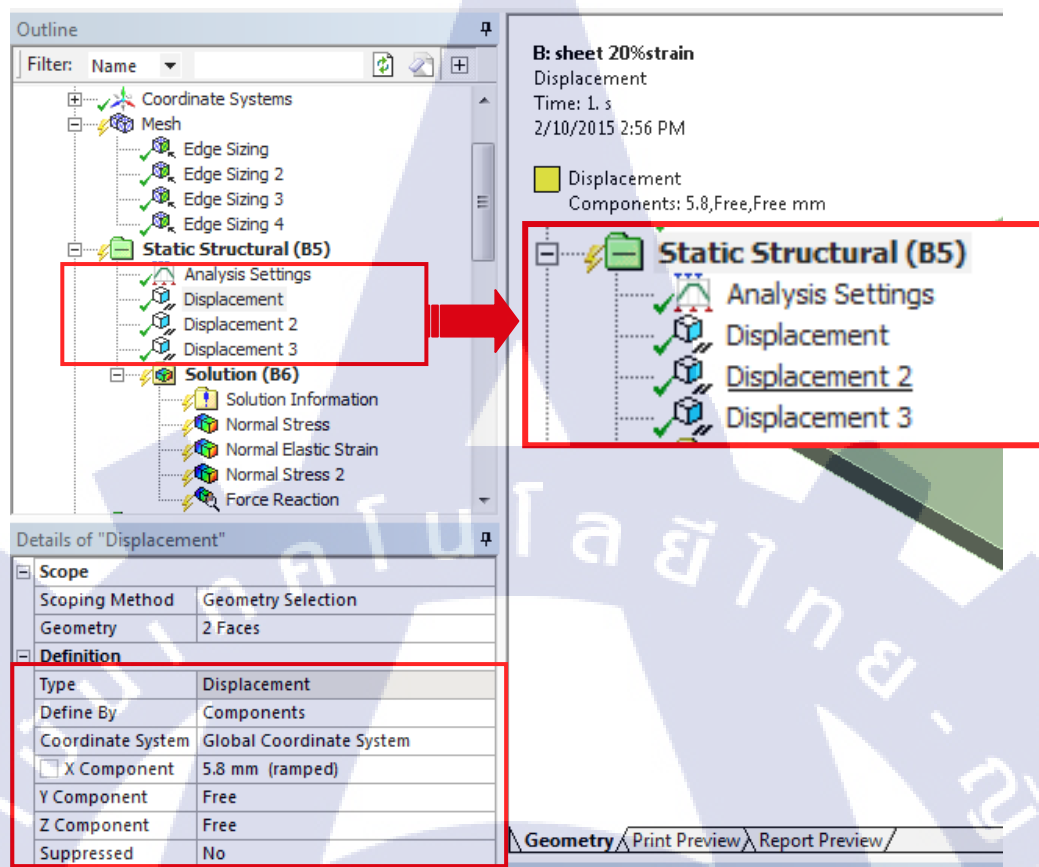
รูปที่ 3.9 ขนาดและรูปร่างของแบบจำลอง 3 มิติของแผ่นเมมเบรน



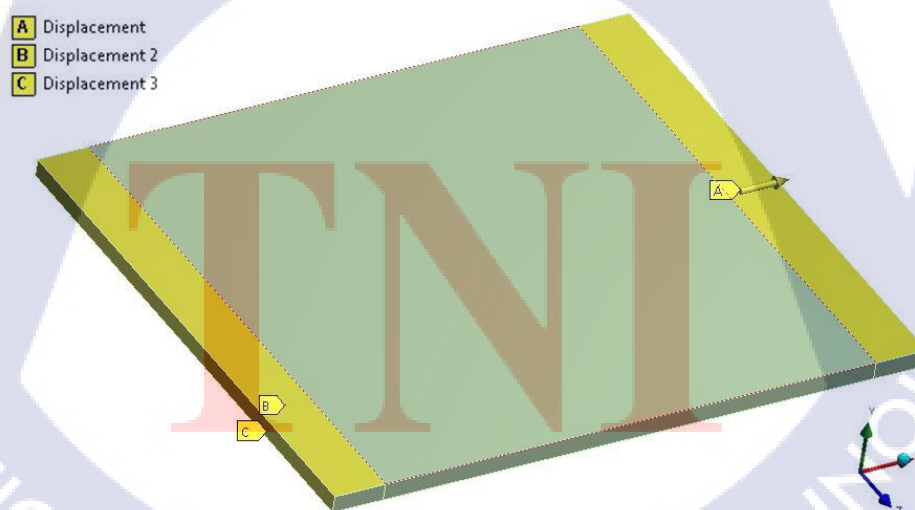
รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงการกำหนดขนาดและประเภทของ mesh

### (3) กำหนดสภาวะในการจำลอง

สำหรับสภาวะที่ใช้สำหรับจำลองลักษณะการดึงยืดของแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัย กำหนดให้ทั้ง 2 ข้างของแบบจำลองเป็นบริเวณสำหรับหนีบชิ้นงาน โดยมีขนาดความกว้าง 3 มิลลิเมตร เข้าไปภายในชิ้นงาน โดยกำหนดพื้นผิว A เป็น Displacement ซึ่งจะทำให้การยืดออกให้ แนวแกน x เป็นระยะ 5.8 มม.(20%strain), 2.9 มม.(10%strain), 2.03 มม.(7%strain), 1.45 มม. (5%strain), 0.87 มม.(3%strain) และ 0.29 มม.(1%strain) ส่วนพื้นที่ B ให้เป็น Displacement โดยกำหนด  $x_{composit} = 0$  mm. เพื่อไม่ให้มีเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ ส่วนพื้นผิว C บริเวณ ด้านปลายชิ้นงาน ให้เป็น Displacement โดยกำหนด  $x_{composit}$ ,  $y_{composit}$  และ  $z_{composit} = 0$  mm. เช่นกัน เพื่อไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทั้ง 3 แนวแกน แต่เอลิเมนต์ยังสามารถเกิดการหมุนได้อยู่ซึ่งจะเป็นลักษณะการยึดจับแบบ Simple Support



รูปที่ 3.11 หน้าต่างแสดงการกำหนดสภาวะจำลองกับชิ้นงาน



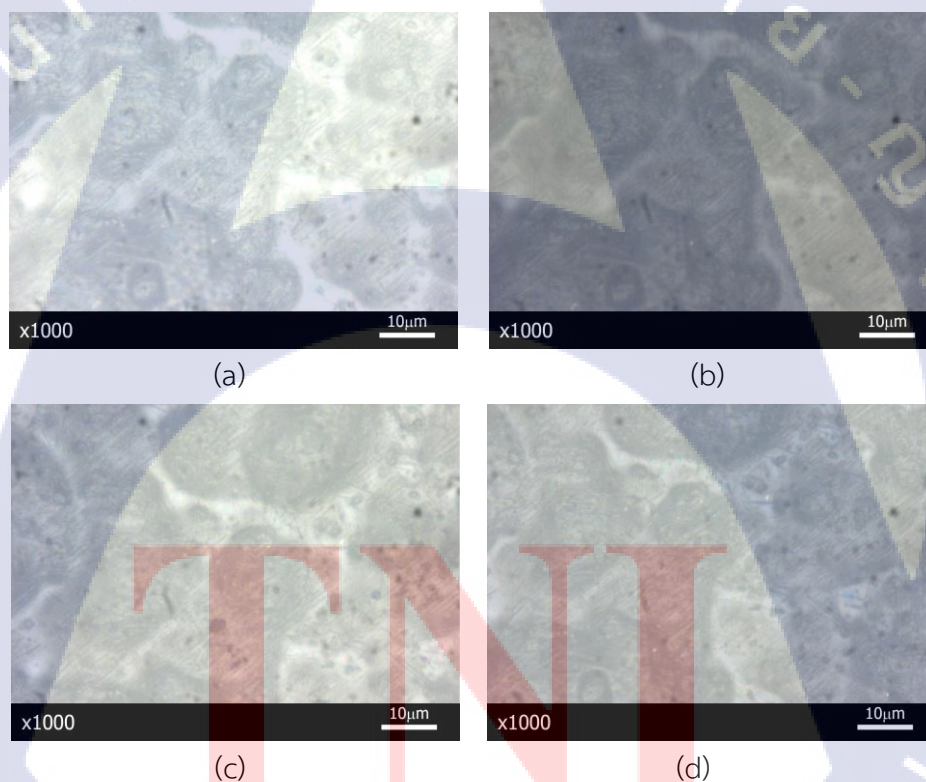
รูปที่ 3.12 สภาวะที่กำหนดในการจำลองลักษณะการดึงยึด

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) ของชิ้นงาน

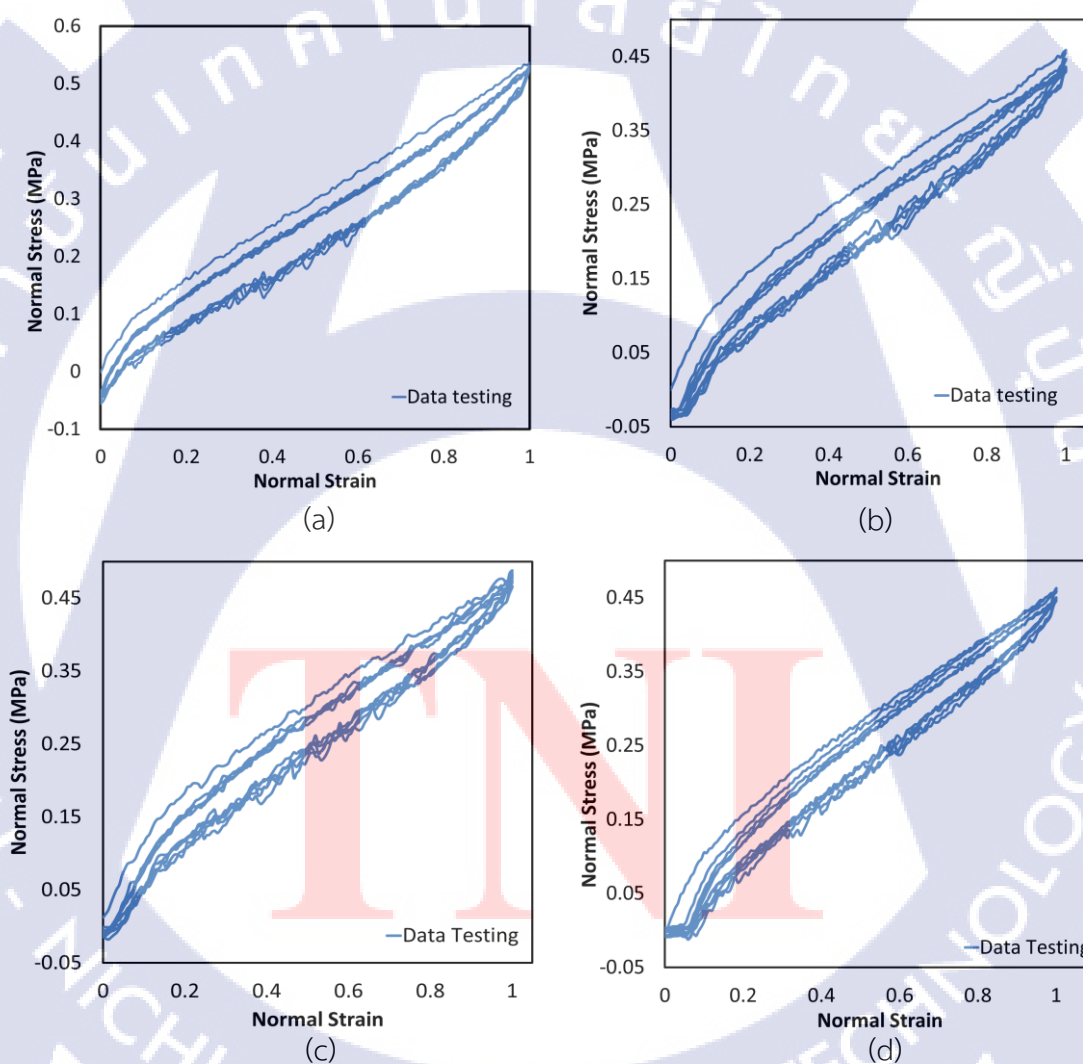
จากการนำชิ้นงานทดสอบทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง ไปทำการตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้อง Optical Microscope ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เพื่อตรวจสอบดูความเป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงาน จากรูปที่ 4.1 พบว่าทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่างนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน แสดงว่าทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่างนั้นมีความเป็นวัสดุเอกพันธ์ในทุกทิศทาง ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจึงไม่คำนึงถึงผลของทิศทางจากการขึ้นรูปชิ้นงานในการทดสอบ เพราะชิ้นงานมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง



รูปที่ 4.1 พื้นผิวชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง : (a) Original, (b) UV, (c) UV/Plasma, (d) UV/Plasma/Coat

#### 4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลแบบการดึงแกนเดียว

หลังจากขั้นตอนการทดลองโดยใช้เครื่องทดสอบการดึงแกนเดียว โดยขึ้นงานสำหรับทดสอบขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D638 และ ASTM D412 ทำการทดลองทั้งหมด 4 กลุ่มตัวอย่าง นั่นคือ Original UV UV/Plasma UV/Plasma/Coated โดยการทดลองการดึงแกนเดียวที่อัตราเร็วการดึง 100 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งทำการศึกษาพฤติกรรมของขึ้นงานทดสอบทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง ในการทดลองการดึงแกนเดียวจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบของมูลลินร่วมด้วย เนื่องจาก การทำนายพฤติกรรมของแรงที่เป็นวงรอบจำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์ให้สอดคล้องและเหมาะสม ดังนั้นในการทดลองนี้กำหนดจำนวนรอบการดึง 5 รอบ เพื่อกำจัดผลของมูลลินออกไป

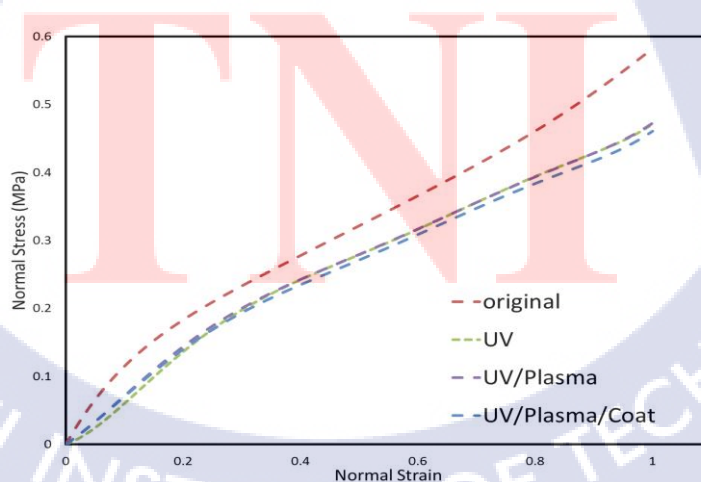


รูปที่ 4.2 กราฟความเค้น-ความเครียดของขึ้นงานทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง : (a) Original, (b) UV, (c) UV/Plasma, (d) UV/Plasma/Coat

จากรูปที่ 4.2 การทดลองการดึงแกนเดียวของชิ้นงานซึ่งกำหนดจำนวนรอบการดึง 5 รอบ เพื่อกำจัดผลของมุลลิน พบว่ากราฟของทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อผ่านการดึง ตั้งแต่รอบที่ 2 ขึ้นไป ดังนั้นสำหรับวัสดุที่สังเคราะห์จาก 2,4,6,8-Tetramethyl-2,4,6,8-Tetravinyl—Cyclotetrasiloxane นั้น การกำจัดผลของมุลลินจำเป็นต้องดึงตั้งแต่ 2 รอบขึ้นไป แล้วจึงจะบันทึกผลในรอบที่ 3 ซึ่งเพียงพอต่อการทำนายพฤติกรรมของวัสดุเมื่อผลของมุลลินหมดไป

สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของกราฟในช่วงที่ให้แรงดึงและไม่ได้ให้แรงดึงกับชิ้นงาน พบว่ากราฟมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากผลกระทบของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Effect) ซึ่งเกิดจากการยืดตัวมาก (Large Extension) และการหดกลับ (Retraction) หลาย ๆ ครั้งของวัสดุ จะช่วยเพิ่มอัตราการก่อตัวและอัตราการสลายของผลึกภายในโครงสร้างบางส่วนที่ไม่ได้เกิดเป็น โครงสร้างร่างแห (Crosslinks Network) แต่โดยรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อได้รับการดึงยืด สายโซ่ โมเลกุลบริเวณนี้จะถูกดึงยืดและจัดเรียงตัวตามแนวแรง ทำให้สายโซ่โมเลกุลบางส่วนที่อยู่ใกล้กันจะ ก่อตัวเป็นผลึกเกิดขึ้นชั่วคราว แต่ระหว่างช่วงการหดกลับ อัตราการคลายความเค้นมีค่าเกินอัตรา การหดตัวของโซ่โมเลกุลเนื่องจากสายโซ่บางส่วนได้ก่อรูปเป็นผลึกทำให้อัตราการหดตัวต่ำลง และ พลังงานบางส่วนถูกนำไปใช้ในการก่อรูป ดังนั้นกราฟความเค้น-ความเครียดในช่วงการหดกลับจึงไม่ ทับเส้นเดิมของช่วงยืดตัว และกลับมาที่ระยะเท่าเดิมที่ค่าความเค้นติดลบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง และเสียรูปของโครงสร้างโมเลกุลดังที่กล่าวไปในข้างต้น ทำให้การหดกลับถึงระยะเดิมนั้น จำเป็นต้อง กดอัดชิ้นงานเพิ่มเติม จึงส่งผลให้กราฟมีค่าความเค้นที่ติดลบเมื่อระยะยืดเท่ากับศูนย์

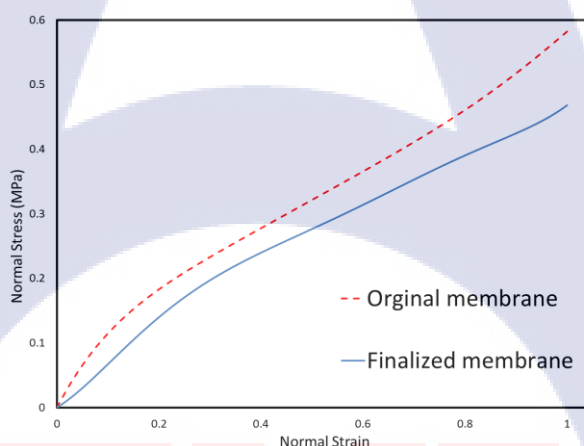
จากนั้นทำการเฉลี่ยข้อมูลที่ได้จากรอบการดึงที่ 2-5 เพื่อให้ได้กราฟเฉลี่ยซึ่งจะเป็นตัวแทน ของชิ้นงานกลุ่มตัวอย่างนั้นๆ สำหรับนำไปทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่า สัมประสิทธิ์ของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง

จากรูป 4.3 พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการ UV ได้แก่ UV, UV/Plasma และ UV/Plasma/Coated นั้น กระบวนการฉายแสง UV ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานจะมีความแข็งแรงลดลงจากชิ้นงานที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการ UV ซึ่งเป็นผลมาจากการฉายแสง UV ลงบนชิ้นงานที่เป็นวัสดุ silicone rubber นั้น แสง UV จะส่งผลต่อโครงสร้างโมเลกุลภายนอกของชิ้นงาน [19-22]

สำหรับขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวด้วย plasma และ การเคลือบด้วยสารเลี้ยงเซลล์ นั้นไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบ ซึ่งกราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานทดสอบ 3 ประเภทหลังนั้นมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงทำการเฉลี่ยข้อมูลชิ้นงานทดสอบ 3 กลุ่มตัวอย่างหลังรวมเป็นชิ้นงานเดียวซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลของชิ้นงานเมมเบรนใช้จริงในการทดลอง ซึ่งต้องผ่านขั้นตอนการฉายรังสี UV ปรับปรุงพื้นผิวและทำการเคลือบด้วยสารเลี้ยงเซลล์ก่อนที่จะนำไปเลี้ยงเซลล์เนื้อเยื่อ โดยเรียกแทนข้อมูลทดสอบของกลุ่มชิ้นงานเฉลี่ย 3 กลุ่มหลังว่า ชิ้นงาน “Finalized Membrane” ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความเค้น-ความเครียดของชิ้นงาน Original Membrane กับ Finalized Membrane

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ

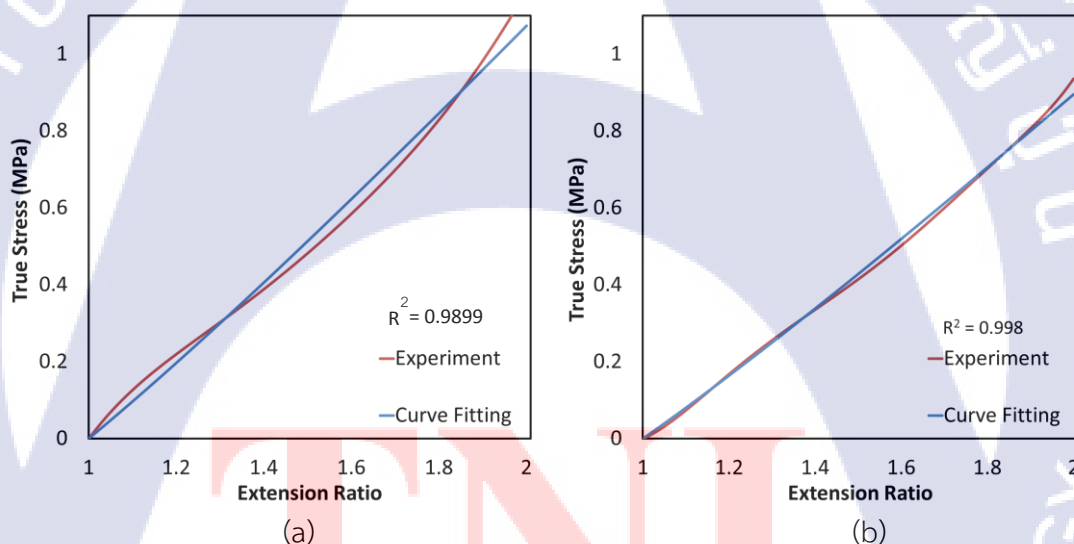
การทํานายพฤติกรรมจากการทดลองดั่งแกนเดียวนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าสัมประสิทธิ์สามารถหาได้จากโปรแกรม ANSYS โดยนำข้อมูลการทดลองแบบการดั่งแกนเดียวนมาทํานายพฤติกรรม เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ใช้เป็นค่าเริ่มต้น ในการทํานายพฤติกรรมในสภาวะการรับแรงในรูปแบบอื่นๆต่อไป จากการใช้โปรแกรมคำนวณจะให้ได้กราฟที่ใช้ทํานายพฤติกรรมของวัสดุ

และค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองชนิดต่างๆ เพื่อมาเปรียบเทียบกันหาแบบจำลองที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับพฤติกรรมของชิ้นงานทดสอบมากที่สุด

#### 4.3.1 การเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

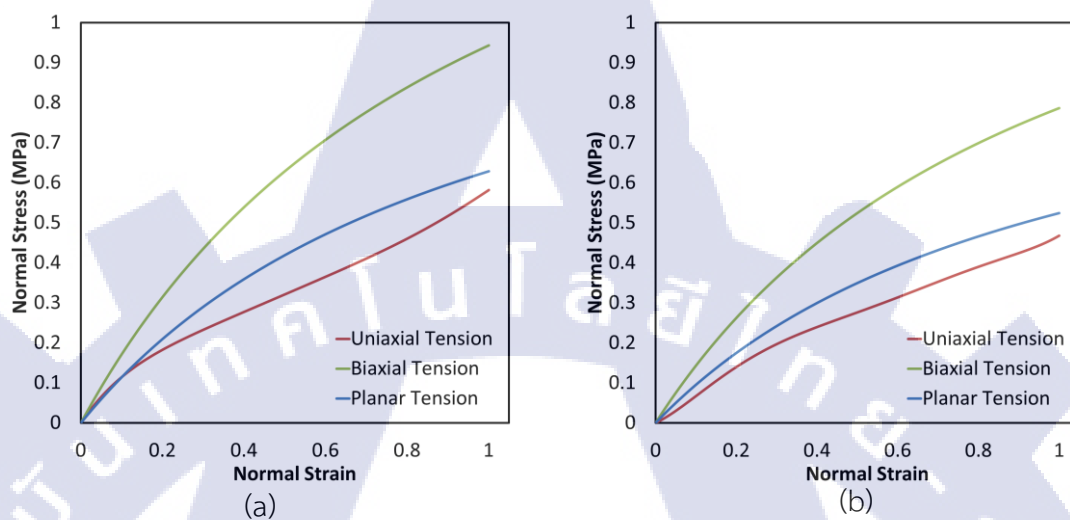
เนื่องจากการทำนายพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกโดยใช้ผลการทดลองการดึงแกนเดียวเพียงอย่างเดียว อาจไม่เพียงพอต่อการเลือกใช้แบบจำลอง จึงจำเป็นต้องทำนายการดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกนและการดึงแบบความกว้างคงที่ จากวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio [11-13] โดยใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) เท่ากับ 0.5 เมื่อยังไม่มีการดึงและพิจารณาวัสดุเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material)

จากสมการที่ 2.31 เราสามารถเขียนกราฟความเค้นจริงสำหรับการดึงในหนึ่งแนวแกน ( $\sigma_u$ ) เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดึงในหนึ่งแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนการยืดตัว ( $\lambda_u$ ) จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความเค้นจริง



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกับคำนวณตามวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio : (a) Original Membrane , (b) Finalized Membrane

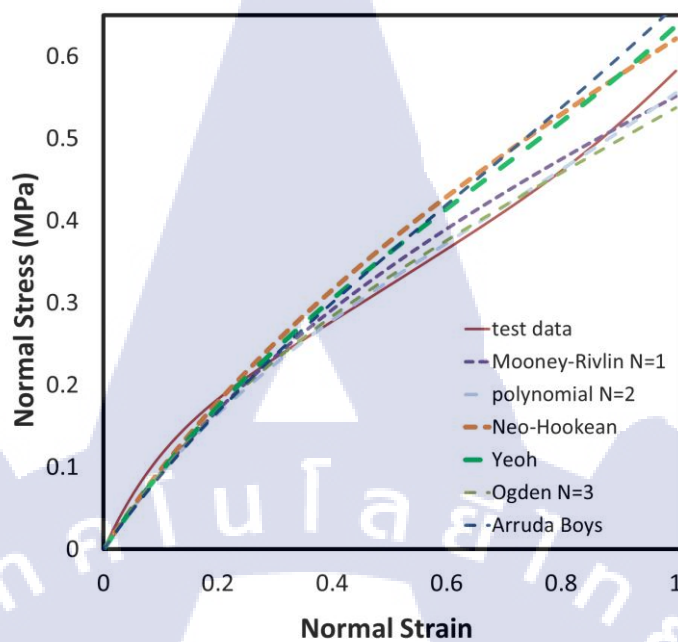
จากสมการที่ 2.31 , 2.33 และ 2.35 เราจะสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress ,  $\sigma_E$ ) กับความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain,  $\epsilon_i$ ) ดังแสดงผลในรูปที่ 4.6



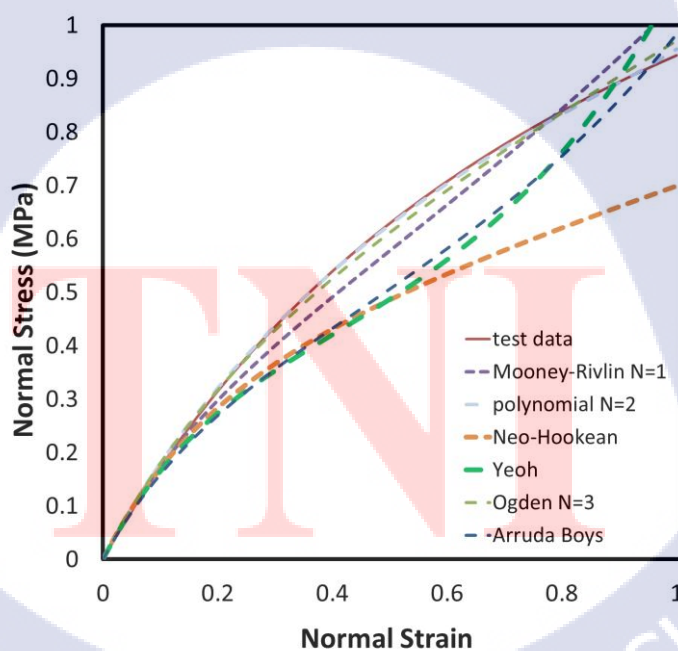
รูปที่ 4.6 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุจากผลการทดสอบทั้ง 3 ลักษณะจากการคำนวณโดยใช้อัตราส่วนปัวซอง (a) Original Membrane , (b) Finalized Membrane

เมื่อได้ผลการทดลองทั้งสามลักษณะแล้ว ทำการหาแบบจำลองที่เหมาะสมและได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องมากขึ้นโดยเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวมาในบทที่ 2 มาทำนายพฤติกรรมของแผ่นเมมเบรนโดยใช้โปรแกรม ANSYS

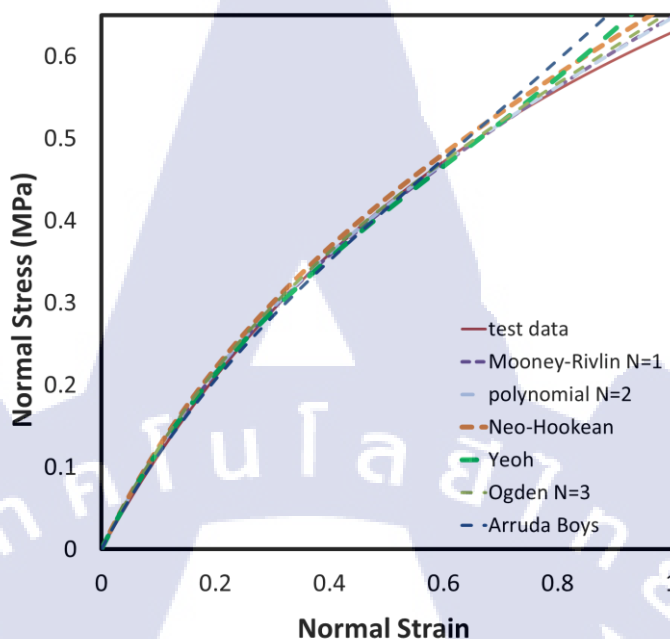
TNI



รูปที่ 4.7 ทำนายพฤติกรรมการดึงแบบแกนเดียวของชิ้นงาน Original Membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ



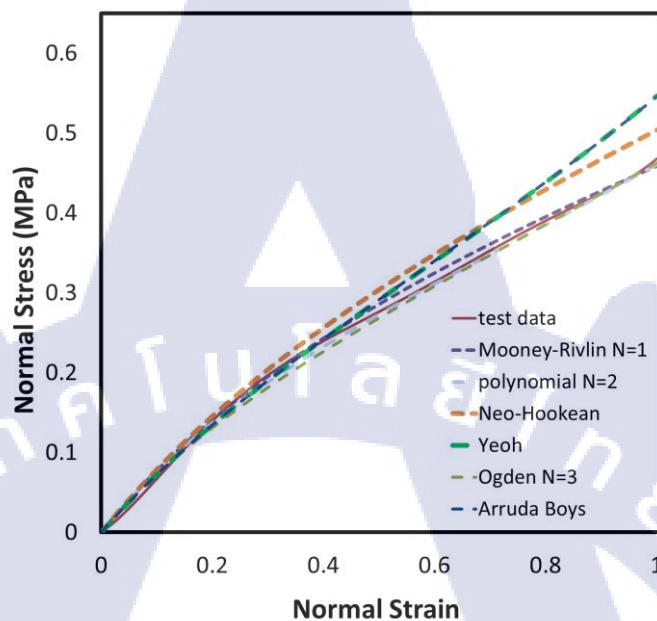
รูปที่ 4.8 ทำนายพฤติกรรมการดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกนของชิ้นงาน Original Membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ



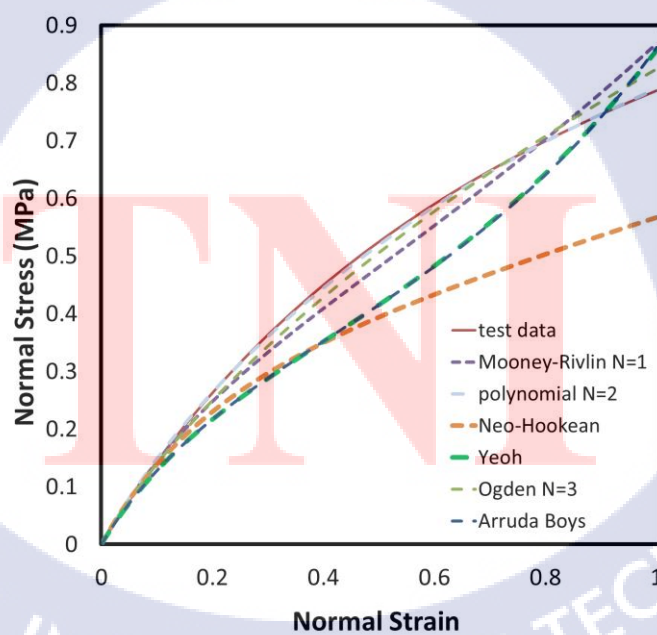
รูปที่ 4.9 ทำนายพฤติกรรมการดึงแบบความกว้างคงที่ของชิ้นงาน Original Membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสามลักษณะกับแบบจำลองต่าง ๆ สำหรับชิ้นงาน Original Membrane นั้น เมื่อพิจารณาการดึงในแกนเดียวยังภาพที่ 4.7 จะเห็นว่ามีแบบจำลองอยู่ 3 แบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงคือ แบบจำลองของมูนีร์ฟลิน แบบจำลองออกเดนอันดับที่ 3 และแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 เมื่อพิจารณาการดึงแบบเท่ากันสองแนวแกนดังภาพที่ 4.8 เพิ่มเติม พบว่าจะเหลือแบบจำลองที่ยังสามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงคือ แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 และแบบจำลองออกเดนอันดับที่ 3 และเมื่อพิจารณาภาพที่ 4.9 การดึงแบบความกว้างคงที่ พบว่าแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนได้ใกล้เคียงที่สุดโดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) ซึ่งใช้วัดว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้มีความสมรูปกับข้อมูลมากน้อยอย่างไร โดยเทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบแกนเดียว (Uniaxial Testing) เท่ากับ 0.994 , ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equi-Biaxial Testing) เท่ากับ 0.999 และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing) เท่ากับ 0.999 ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเลือกใช้แบบจำลอง พหุนามอันดับที่ 2 ในการทำนายพฤติกรรมของชิ้นงาน Original Membrane

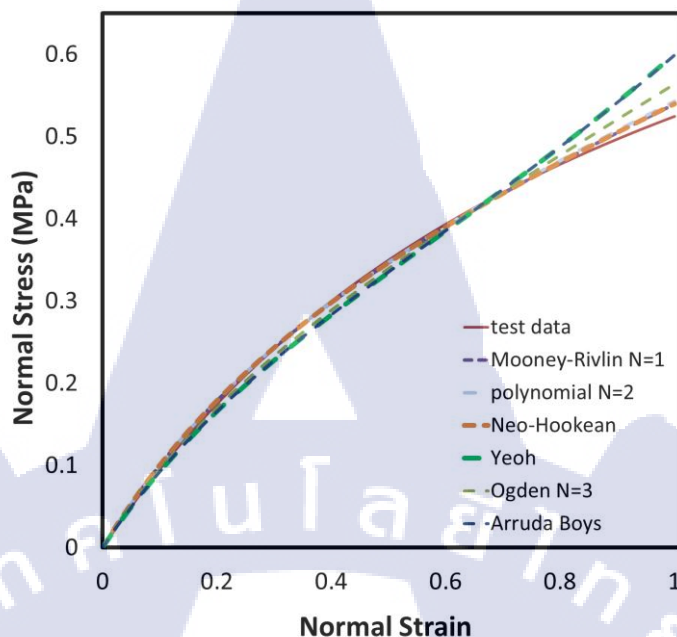
สำหรับข้อมูลทดสอบจากชิ้นงาน Finalized Membrane นั้น ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมเชิงกลของชิ้นงานแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 ทำนายพฤติกรรมการดึงแบบแกนเดียวของชิ้นงาน Finalized Membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ

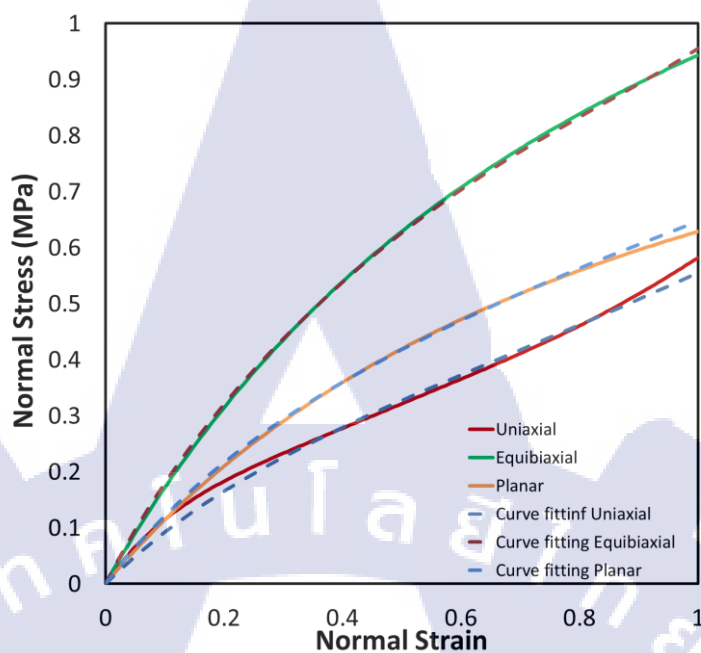


รูปที่ 4.11 ทำนายพฤติกรรมการดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกนของชิ้นงาน Finalized Membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ

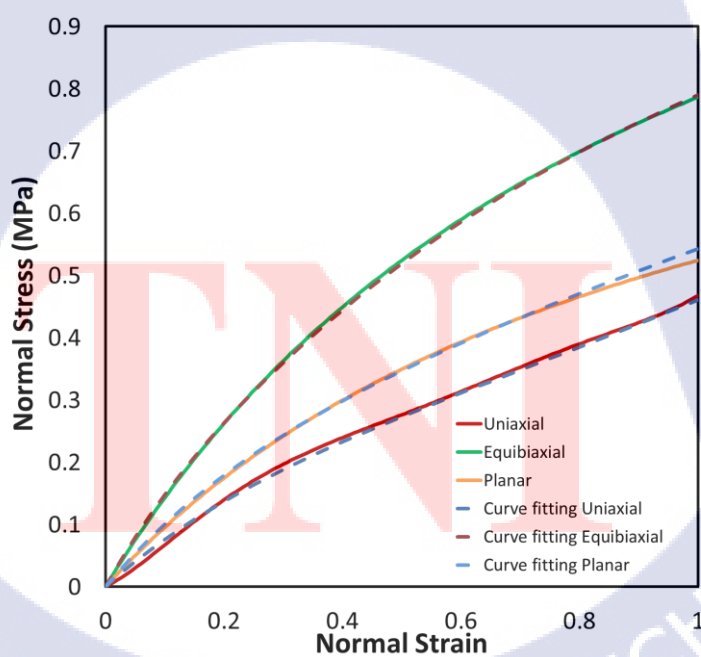


รูปที่ 4.12 ทำนายพฤติกรรมการดึงแบบความกว้างคงที่ของชิ้นงาน Finalized Membrane โดยแบบจำลองชนิดต่างๆ

ส่วนการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสามประเภทกับแบบจำลองต่าง ๆ สำหรับชิ้นงาน Finalized Membrane นั้น เมื่อพิจารณาการดึงในแกนเดียวดังภาพที่ 4.10 จะเห็นว่า มีแบบจำลองอยู่ 3 แบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงคือ แบบจำลองของมูนีร์ฟลิน แบบจำลองออกเดนอันดับที่ 3 และแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 เมื่อพิจารณาการดึงแบบเท่ากันในสองแนวแกนดังภาพที่ 4.11 เพิ่มเติม พบว่าจะเหลือแบบจำลองที่ยังสามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงคือ แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 และแบบจำลองออกเดนอันดับที่ 3 และเมื่อพิจารณาภาพที่ 4.12 การดึงแบบความกว้างคงที่ พบว่าแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนได้ใกล้เคียงที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบแกนเดียว (Uniaxial Testing) เท่ากับ 0.998 , ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equi-Biaxial Testing) เท่ากับ 0.999 และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing) เท่ากับ 0.998 ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเลือกใช้แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ในการทำนายพฤติกรรมของชิ้นงาน Finalized Membrane เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 กับ 4.14



รูปที่ 4.13 ทำนายพฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะของชิ้นงาน Original Membrane โดยแบบจำลอง พหุนามอันดับที่ 2



รูปที่ 4.14 ทำนายพฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะของชิ้นงาน Finalized Membrane โดยแบบจำลอง พหุนามอันดับที่ 2

#### 4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์จากผลการทดลองการดึงแกนเดียว

หลังจากที่กำหนดเลือกใช้แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 มาทำนายพฤติกรรมของแผ่นเมมเบรน ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนั้นสามารถหาได้จากการนำผลการทดลองพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนในการรับโหลดทั้ง 3 ลักษณะนั้น ไปคำนวณในโปรแกรม ANSYS ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 กับ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ตามภาพที่ 4.12 ของชิ้นงาน Original Membrane

| C10     | C01      | C20       | C11      | C02       |
|---------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0.11637 | 0.058813 | 0.0073892 | -0.00931 | 0.0011978 |

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ตามภาพที่ 4.13 ของชิ้นงาน Finalized Membrane

| C10      | C01      | C20       | C11       | C02        |
|----------|----------|-----------|-----------|------------|
| 0.088525 | 0.047481 | 0.0093126 | -0.006518 | 0.00041182 |

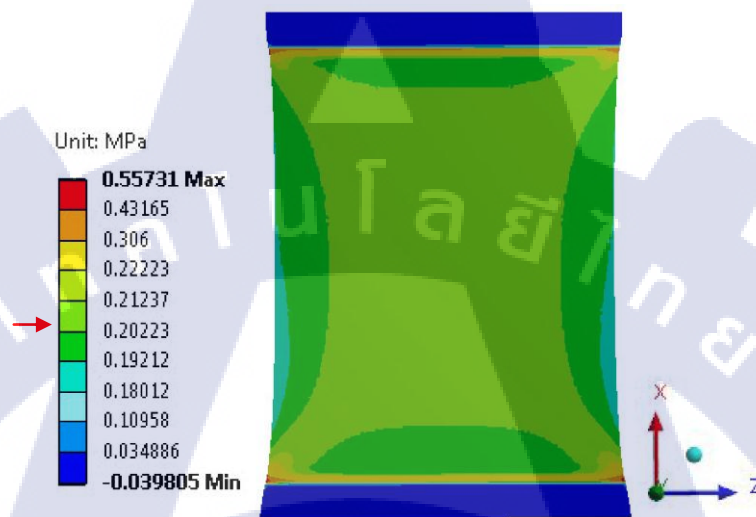
เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุที่ใช้ในการการทำนายพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ป้อนลงในโปรแกรม ANSYS สำหรับกำหนดเป็นพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุที่เลือกใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ และ ทำการศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของแผ่นเมมเบรนตามสภาวะการรับโหลดในรูปแบบต่างๆดังจะแสดงในหัวข้อต่อไป

#### 4.4 ผลการศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS

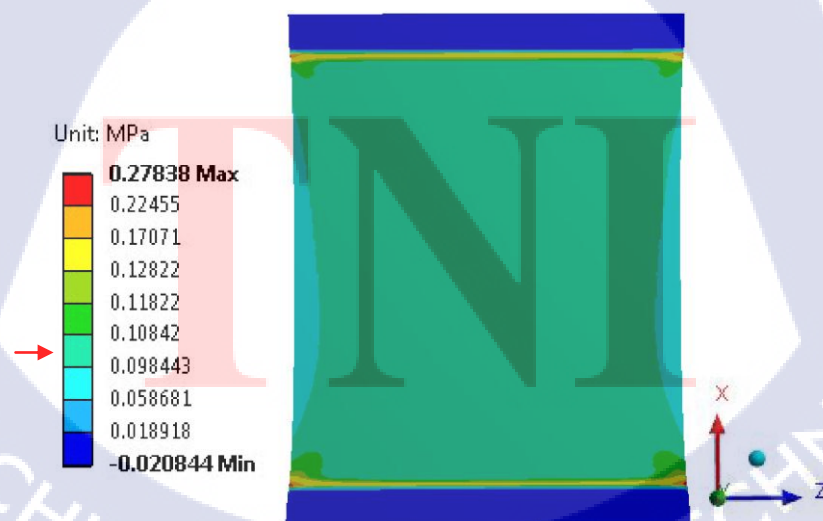
สำหรับการศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรนนั้น รูปแบบสภาวะที่ใช้ในการจำลองนั้นจะเป็นไปตามรูปแบบการทดลองจริงที่ใช้ในงานวิจัยทางด้านัทกรรมของหน่วยปฏิบัติการวิจัยเนื้อเยื่อนินทรีย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งรูปร่างและขนาดของแผ่นเมมเบรนนั้นจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $30 \times 35 \times 1$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยทำการหนีบชิ้นงานบริเวณปลาย 2 ข้าง ลึกเข้ามาข้างละ 3 มิลลิเมตร กำหนดให้ด้านหนึ่งของชิ้นงานหยุดนิ่ง ส่วนอีกด้านดึงออกตามแนวแกน x เป็นระยะระยะ 5.8 มม.(20%strain), 2.9 มม.

(10%strain), 2.03 มม.(7%strain), 1.45 มม.(5%strain), 0.87 มม.(3%strain) และ 0.29 มม. (1%strain) ซึ่งผลการศึกษการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS นั้นแสดงดังรูปต่อไปนี้

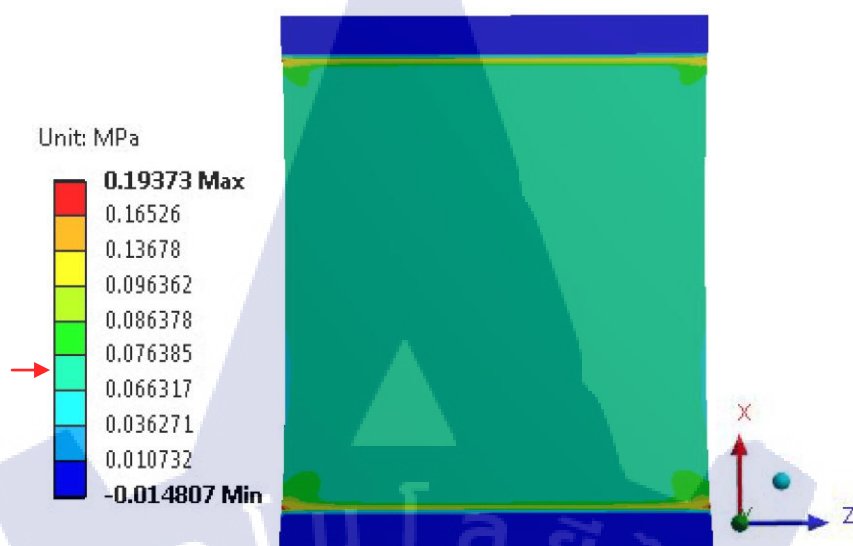
#### 4.4.1 ผลการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวชิ้นงาน Original Membrane



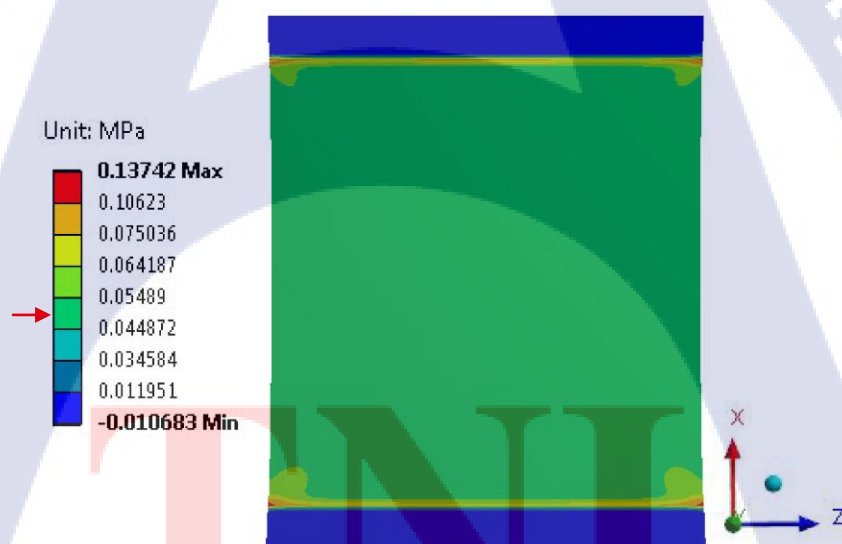
รูปที่ 4.15 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original Membrane ที่ระยะการดึง 5.8 มม. (20%strain)



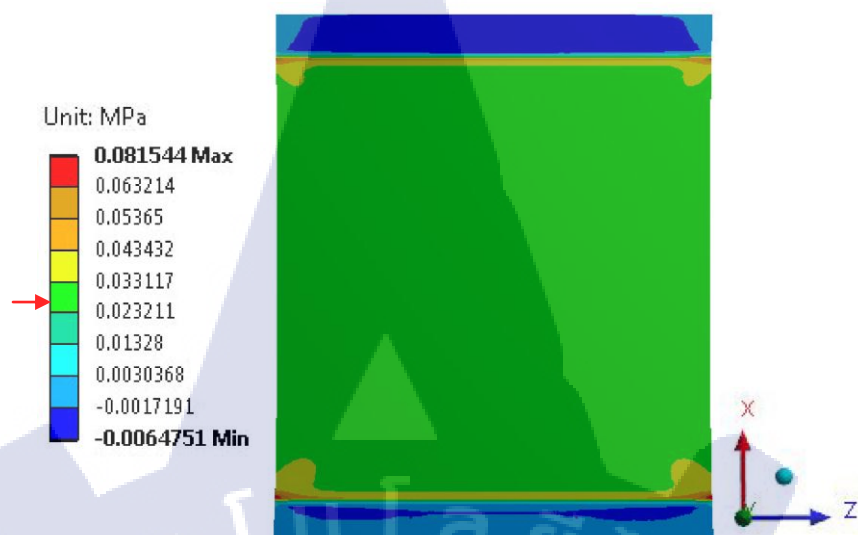
รูปที่ 4.16 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original Membrane ที่ระยะการดึง 2.9 มม. (10%strain)



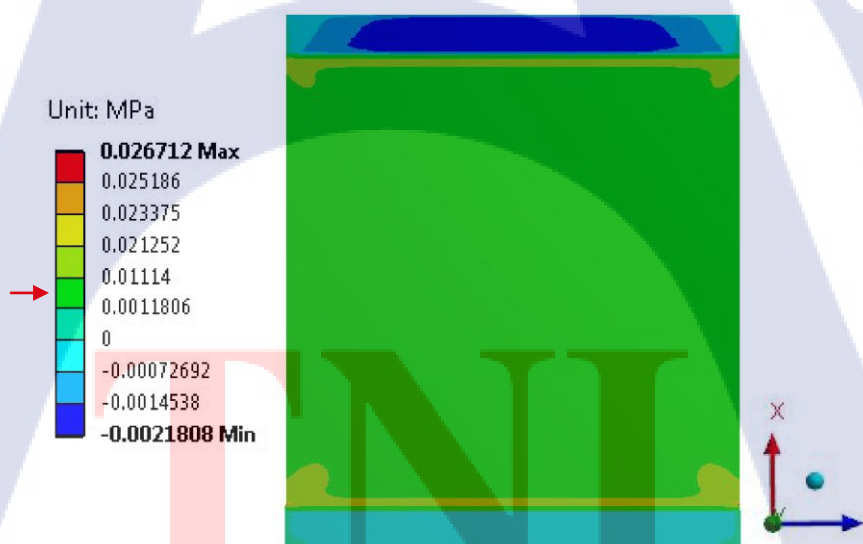
รูปที่ 4.17 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original Membrane ที่ระยะการดึง 2.03 มม. (7%strain)



รูปที่ 4.18 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original Membrane ที่ระยะการดึง 1.45 มม. (5%strain)



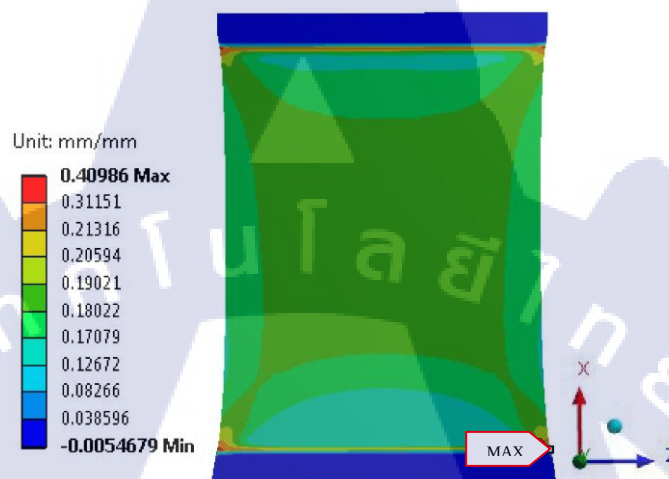
รูปที่ 4.19 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original Membrane ที่ระยะการดึง 0.87 มม. (3%strain)



รูปที่ 4.20 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original Membrane ที่ระยะการดึง 0.29 มม. (1%strain)

จากรูปที่ 4.15 – 4.20 เป็นผลการจำลองการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวของแผ่นเมมเบรนจากการดึงยืดออกตามแนวแกน x ในระยะยืดต่างๆ พบว่าการกระจายของ

ความเค้นบนพื้นผิวบริเวณต่างๆของชิ้นงานนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน โดยจะสังเกตได้จากรูปที่ 4.15 จุดที่มีความเค้นสูงสุดของชิ้นงานจะอยู่บริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของส่วนที่อยู่ติดกับบริเวณที่ยึดจับซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับภาระและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของส่วนย่อยของชิ้นงานมากที่สุดดังแสดงให้เห็นจากผลของการกระจายตัวของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวชิ้นงานดังรูปที่ 4.21

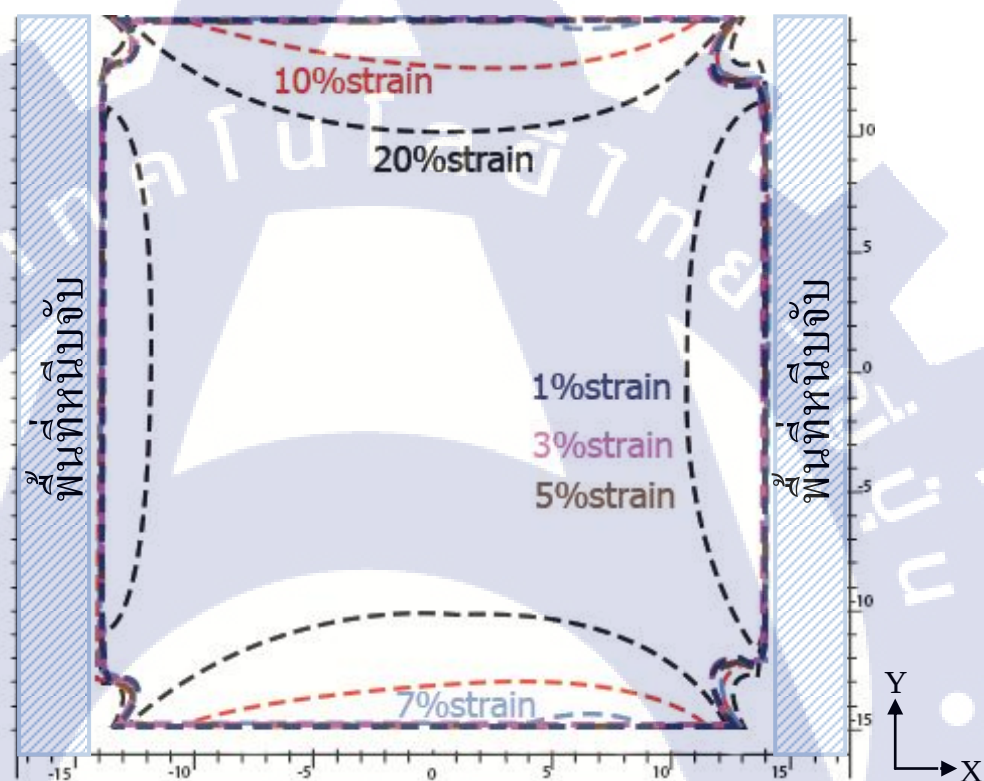


รูปที่ 4.21 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Original Membrane ที่ระยะการดึง 5.8 มม. (20%strain)

เช่นเดียวกันกับผลการจำลองการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมที่ระยะยึดอื่นๆซึ่งพบว่าจุดที่มีความเค้นสูงสุดนั้นจะอยู่บริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของส่วนที่อยู่ติดกับบริเวณที่ยึดจับเช่นเดียวกัน และลักษณะการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมที่ระยะยึดอื่นๆมีความคล้ายคลึงกัน โดยบริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของส่วนที่อยู่ติดกับบริเวณที่ยึดจับจะมีความเค้นทางวิศวกรรมสูงที่สุด จากนั้นค่อยๆลดลงตามแนวรอยต่อระหว่างส่วนที่โดนยึดจับกับไม่โดนยึดจับ บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน และน้อยที่สุดคือบริเวณชิ้นงานที่โดนยึดจับเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในลักษณะการรับภาระโหลดในแนวแกน x นั้นจะมีรูปแบบการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวของแผ่นเมมเบรนที่คล้ายคลึงกันในแต่ละระยะการดึง

การกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมของชิ้นงานบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานนั้น ซึ่งเป็นบริเวณที่เราสนใจ จะพบว่ากระจายของความเค้นทางวิศวกรรมมีแนวโน้มลดน้อยลงเมื่อระยะการดึงยึดลดลง เนื่องจากในระยะการดึงยึดที่น้อย (1-7 %strain) ส่วนต่างๆของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของส่วนย่อยของชิ้นงานที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้แต่ละบริเวณมีขนาดของความเค้นทางวิศวกรรมที่ใกล้เคียงกัน หรือมีขนาดที่แตกต่างกันต่ำกว่า 0.01 MPa กลับกันที่ระยะยึดที่มากขึ้น

นั่นคือ 10 และ 20 %strain กลับพบว่ามีความเค้นบริเวณที่ใกล้เคียงกันแคบลง นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ระยะการดิ่งยัดที่มากขึ้น ความแตกต่างของขนาดความเค้นบริเวณกลางชิ้นงานจะมีค่าเกินกว่า 0.01 MPa ทั้งนี้เกิดจากการที่ส่วนย่อยของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่แตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนั้นสัมพันธ์กับแรงที่ส่วนย่อยของชิ้นงานนั้นได้รับ เมื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาก แสดงว่าส่วนย่อยนั้นได้รับภาระโหลดกระทำมากเช่นกัน ซึ่งขนาดของช่วงความเค้นที่ใกล้เคียงกันบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานของแต่ละระยะการดิ่งยัดแสดงดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบพื้นที่กลางชิ้นงานที่มีขนาดของความเค้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันของระยะการดิ่งยัดต่างๆ

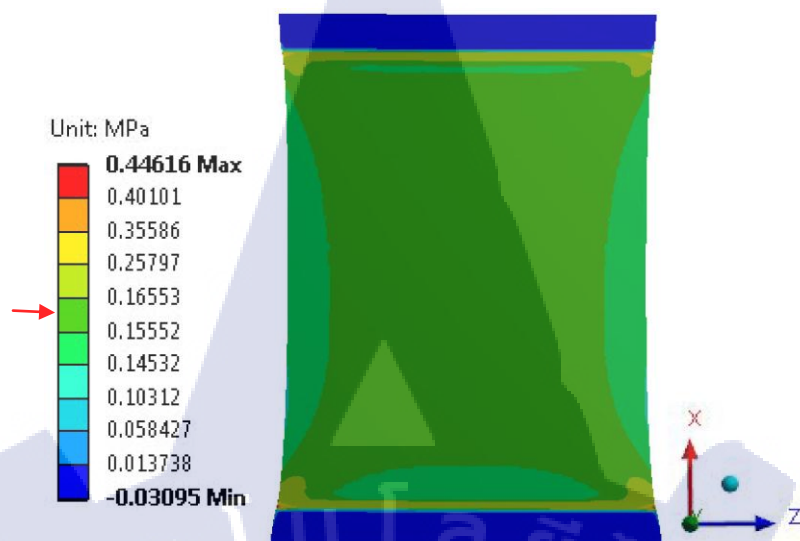
ตารางที่ 4.3 ช่วงของขนาดความเค้นทางวิศวกรรมและพื้นที่ที่บริเวณกลางชิ้นงาน Original Membrane

| ระยะยืด             | ช่วงความเค้นวิศวกรรม<br>บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน (MPa) | พื้นที่ (ความยาวตามแกน X *<br>ความยาวตามแกน Y, mm.) |
|---------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 5.8 มม. (20%strain) | 0.20223 - 0.21237                                   | 21.5 * 21                                           |
| 2.9 มม. (10%strain) | 0.098443 - 0.10842                                  | 23.5 * 24                                           |
| 2.03 มม. (7%strain) | 0.066317 - 0.076385                                 | 23.5 * 24                                           |
| 1.45 มม. (5%strain) | 0.044872 - 0.05489                                  | 23.5 * 24                                           |
| 0.87 มม. (3%strain) | 0.023211 - 0.033117                                 | 23.5 * 24                                           |
| 0.29 มม. (1%strain) | 0.0011806 - 0.01114                                 | 23.5 * 24                                           |

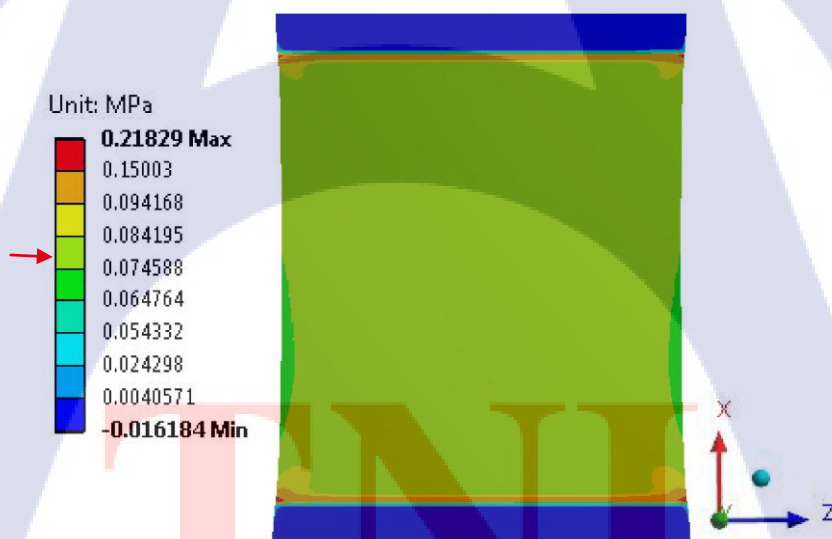
ส่วนแรงปฏิกิริยาที่เกิดการดึงยืดที่คำนวณจากการจำลองนั้นมีค่าเท่ากับ 5.1144 N ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ได้จากการทดสอบจริงคือ 5.48604 N อยู่ 0.37164 N หรือคิดเป็น 6.77 % ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งยังไม่สามารถแทนชุดข้อมูลได้ 100 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งชุดข้อมูลจากการทดลองดึงเท่ากันทั้งสองแนวแกน กับ ดึงแบบความกว้างคงที่นั้น เป็นข้อมูลที่คำนวณจากวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio โดยอาศัยชุดข้อมูลจากการทดสอบดึงแบบแกนเดียว ซึ่งไม่ใช่ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกับชิ้นงานจริง ดังนั้นจึงอาจทำให้การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกมาแทนพฤติกรรมเชิงกลของการทดสอบทั้งสามประเภทยังมีความคลาดเคลื่อนไปจากเดิมได้ แต่ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นยังอยู่ในช่วงที่รับได้ทางการทดลองในวิศวกรรม

#### 4.4.2 ผลการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวชิ้นงาน Finalized Membrane

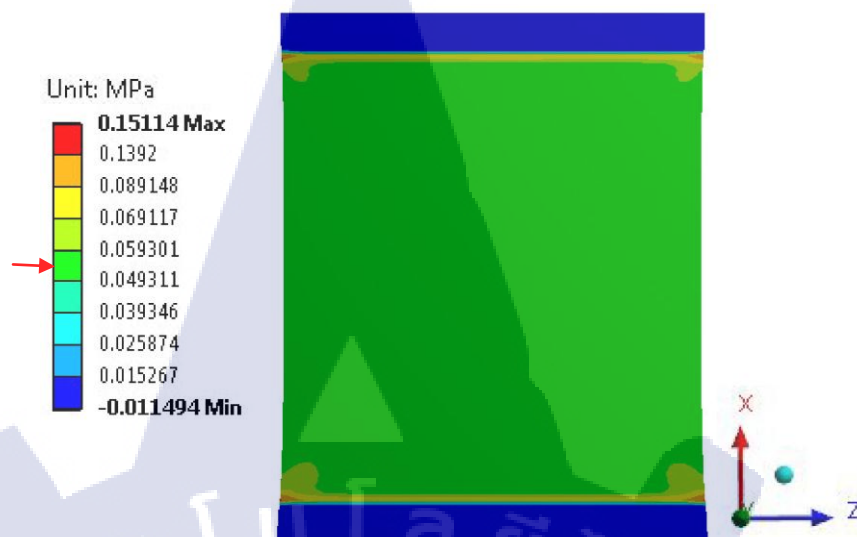
สำหรับผลการศึกษาการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมของชิ้นงาน Finalized Membrane นั้น ซึ่งทำการทดสอบดึงยืดในระยะต่างๆ เช่นเดียวกับชิ้นงาน Original Membrane จะแสดงดังรูปข้างล่างต่อไปนี้



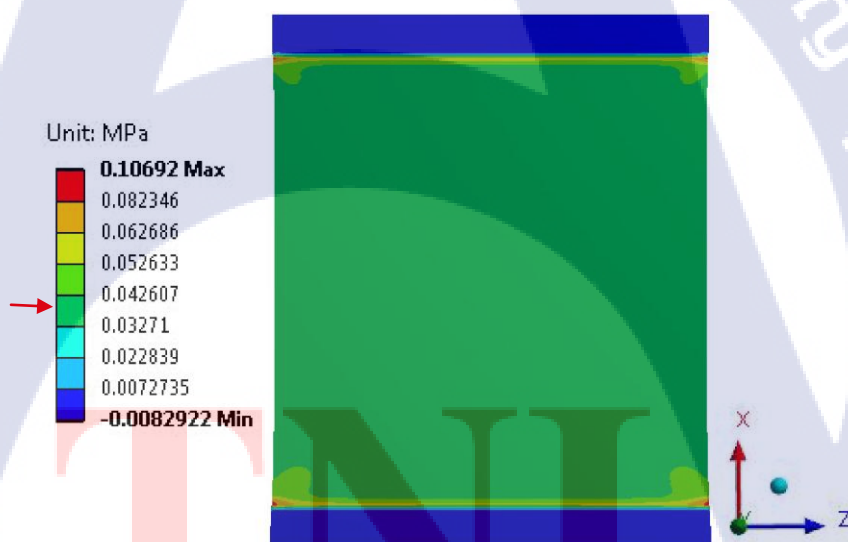
รูปที่ 4.23 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized Membrane ที่ระยะการดึง 5.8 มม. (20%strain)



รูปที่ 4.24 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized Membrane ที่ระยะการดึง 2.9 มม. (10%strain)



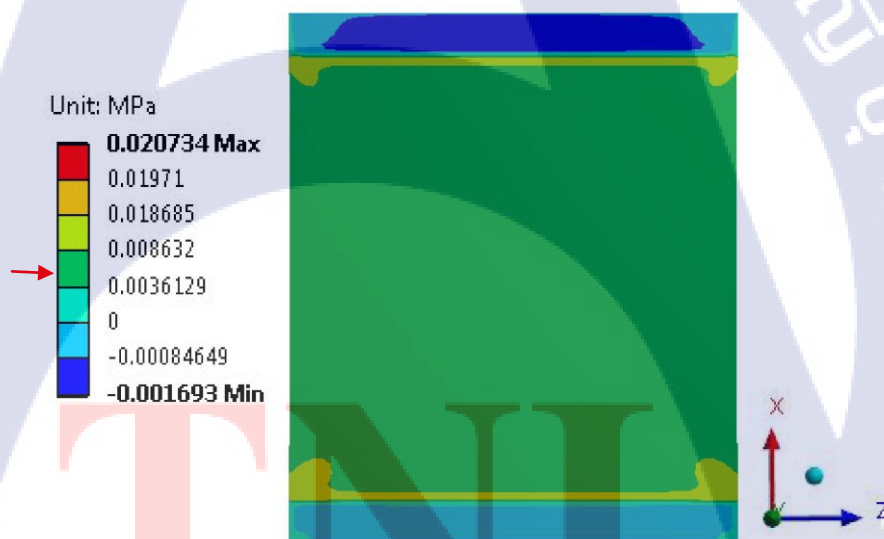
รูปที่ 4.25 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized Membrane ที่ระยะการดึง 2.03 มม. (7%strain)



รูปที่ 4.26 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized Membrane ที่ระยะการดึง 1.45 มม. (5%strain)



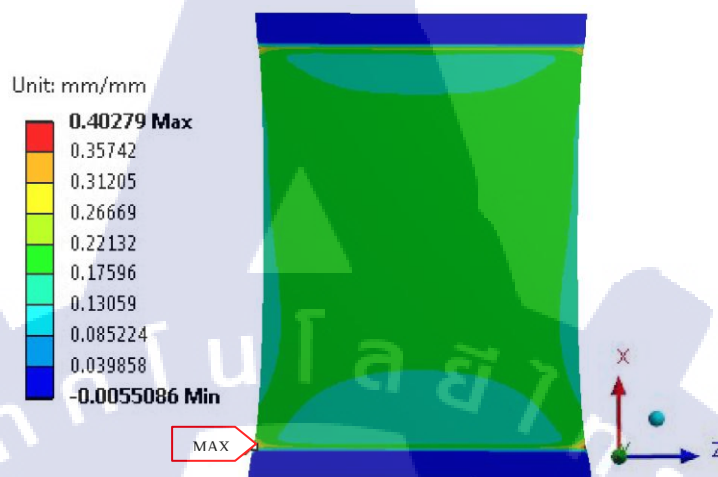
รูปที่ 4.27 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized Membrane ที่ระยะการดึง 0.87 มม. (3%strain)



รูปที่ 4.28 การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized Membrane ที่ระยะการดึง 0.29 มม. (1%strain)

จากรูปที่ 4.23 – 4.28 พบว่าการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวบริเวณต่างๆของชิ้นงานนั้นมีค่าที่แตกต่างกันเช่นกัน โดยจะสังเกตได้จากรูปที่ 4.23 จุดที่มีความเค้นสูงสุดของชิ้นงานจะอยู่บริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของส่วนที่อยู่ติดกับบริเวณที่ยึดจับซึ่งเป็นที่ได้รับภาระมากที่สุด

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแปลงรูปร่างของส่วนย่อยของชิ้นงานมากที่สุดดังแสดงให้เห็นจากผลของการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวชิ้นงานดังรูปที่ 4.29

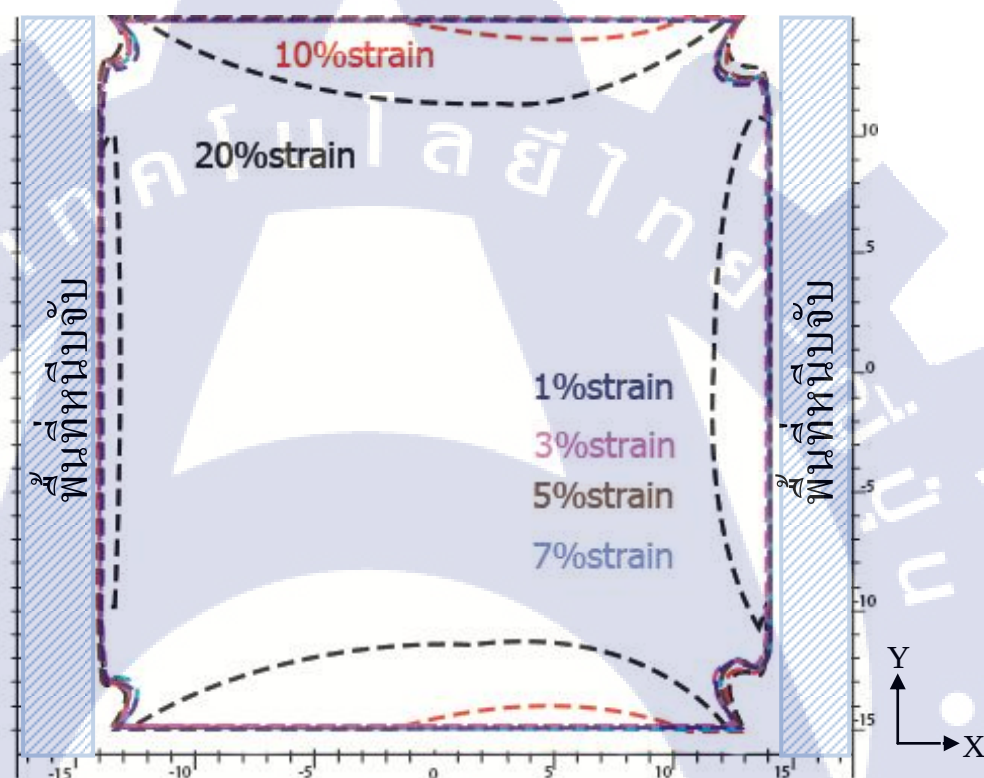


รูปที่ 4.29 การกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวของชิ้นงาน Finalized Membrane ที่ระยะการดึง 5.8 มม.(20%strain)

ผลการจำลองการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมที่ระยะยืดอื่นๆ นั้นมีลักษณะคล้ายชิ้นงาน Original Membrane ซึ่งพบว่าจุดที่มีความเค้นสูงสุดนั้นจะอยู่บริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของส่วนที่อยู่ติดกับบริเวณที่ยึดจับเช่นเดียวกัน และลักษณะการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมที่ระยะยืดอื่นๆ มีความคล้ายคลึงกัน โดยจะไล่จากบริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของส่วนที่อยู่ติดกับบริเวณที่ยึดจับซึ่งความเค้นทางวิศวกรรมสูงที่สุด จากนั้นค่อยๆ ลดลงไปตามแนวของการยึดจับ ต่อมาคือบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน สุดท้ายคือบริเวณชิ้นงานที่โดนยึดจับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในลักษณะการรับภาระโหลดในแนวแกน x นั้นจะมีรูปแบบการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวของแผ่นเมมเบรนที่คล้ายคลึงกันในแต่ละระยะการดึง

การกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมของชิ้นงานบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานนั้น ซึ่งเป็นบริเวณที่เราสนใจ จะพบว่าการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมมีแนวโน้มลดน้อยลงเมื่อระยะการดึงยืดลดลงเช่นกัน เนื่องจากในระยะการดึงยืดที่น้อย (1-7 %strain) ส่วนต่างๆ ของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของส่วนย่อยของชิ้นงานที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้แต่ละบริเวณมีขนาดของความเค้นทางวิศวกรรมที่ใกล้เคียงกัน หรือมีขนาดที่แตกต่างกันต่ำกว่า 0.01 MPa กลับกันที่ระยะยืดที่มากขึ้นนั้นคือ 10 และ 20 %strain กลับพบว่ามีความเค้นทางวิศวกรรมที่ใกล้เคียงกันแคบลง นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ระยะการดึงยืดที่มากขึ้น ความแตกต่างของขนาดความเค้น

บริเวณกลางชิ้นงานจะมีค่าเกินกว่า 0.01 MPa ทั้งนี้เกิดจากการที่ส่วนย่อยของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่แตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนั้นสัมพันธ์กับแรงที่ส่วนย่อยของชิ้นงานนั้นได้รับ เมื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากแสดงว่าส่วนย่อยนั้นได้รับภาระจากแรงกระทำมากเช่นกัน ซึ่งขนาดของช่วงความเค้นที่ใกล้เคียงกันบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานของแต่ละระยะการดัดแสดงดังรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบพื้นที่กึ่งกลางชิ้นงานที่มีขนาดของความเค้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันของระยะการดัดยัดต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ช่วงของขนาดความเค้นทางวิศวกรรมและพื้นที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน Finalized Membrane

| ระยะยืด             | ช่วงความเค้นวิศวกรรม<br>(MPa) | พื้นที่ (ความยาวตามแกน X *<br>ความยาวตามแกน Y, mm.) |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 5.8 มม. (20%strain) | 0.15552 – 0.16553             | 24.5 * 22                                           |
| 2.9 มม. (10%strain) | 0.074588 – 0.084195           | 24 * 24                                             |
| 2.03 มม. (7%strain) | 0.049311 – 0.059301           | 24 * 24                                             |
| 1.45 มม. (5%strain) | 0.03271 – 0.042607            | 24 * 24                                             |
| 0.87 มม. (3%strain) | 0.015891 – 0.02571            | 24 * 24                                             |
| 0.29 มม. (1%strain) | 0.0036129 – 0.008632          | 24 * 24                                             |

ส่วนแรงปฏิกิริยาที่เกิดการดึงยืดที่คำนวณจากการจำลองนั้นมีค่าเท่ากับ 3.9868 N ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ได้จากการทดสอบจริงคือ 4.19135 N อยู่ 0.20455 N หรือคิดเป็น 4.88 % ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งยังไม่สามารถแทนชุดข้อมูลได้ 100 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งชุดข้อมูลจากการทดลองดึงเท่ากันทั้งสองแนวแกน กับ ดึงแบบความกว้างคงที่นั้น เป็นข้อมูลที่คำนวณจากวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio โดยอาศัยชุดข้อมูลจากการทดสอบดึงแบบแกนเดียว ซึ่งไม่ใช่ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกับชิ้นงานจริง ดังนั้นจึงอาจทำให้การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกมาแทนพฤติกรรมเชิงกลของการทดสอบทั้งสามประเภทยังมีความคลาดเคลื่อนไปจากเดิมได้ แต่ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นยังอยู่ในช่วงที่รับได้ทางการทดลองในวิศวกรรม

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้กับเซลล์เอนิยดปริทนต์และศึกษาการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS ซึ่งทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของเมมเบรน 4 ลักษณะด้วยกันคือ แผ่นเมมเบรนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการต่างๆ (Original) แผ่นเมมเบรนที่นำมาฉายรังสี UV (UV) แผ่นเมมเบรนที่ฉายรังสี UV และ ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Plasma (UV/Plasma) และ แผ่นเมมเบรนที่ฉายรังสี UV ปรับปรุงพื้นผิวและทำการเคลือบด้วยสารเลี้ยงเซลล์ (UV/Plasma/Coat) จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนแต่ละลักษณะ และ วิเคราะห์กระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรน ซึ่งผลสรุปการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสองโมเดลสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) และวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นเมมเบรน

แผ่นเมมเบรนที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จัดอยู่ในประเภทเดียวกับวัสดุยาง ซึ่งจะมีพฤติกรรมเชิงกลที่แตกต่างจากวัสดุทั่วไป เช่น เหล็กหรือโลหะต่างๆ จึงจำเป็นการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุนั้นๆ ซึ่งผลการตรวจสอบความเป็นวัสดุเอกพันธ์ (Homogeneous) ของแผ่นเมมเบรนพบว่ามีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน แสดงว่าแผ่นเมมเบรนมีความเป็นวัสดุเอกพันธ์ในทุกทิศทาง ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจึงไม่คำนึงถึงผลของทิศทางจากการขึ้นรูปชิ้นงานในการทดสอบ

ผลจากวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นเมมเบรนพบว่าการกำจัดผลของมุลลินจำเป็นต้องตั้งตั้งแต่ 2 รอบขึ้นไป แล้วจึงจะบันทึกผลในรอบที่ 3 ซึ่งเพียงพอต่อการทำนายพฤติกรรมของวัสดุ สำหรับการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นเมมเบรนทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่าง พบว่ากระบวนการ UV นั้นส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ทำให้แผ่นเมมเบรนหลังจากผ่านกระบวนการฉายแสง UV มีความแข็งแรงลดลง สำหรับขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวด้วย plasma และการเคลือบด้วยสารเลี้ยงเซลล์ นั้นไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบ ดังนั้นสำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเมมเบรนที่จะนำไปใช้งานสำหรับเลี้ยงเซลล์ซึ่งจำเป็นต้องผ่านกระบวนการ ฉายแสง UV การปรับปรุงพื้นผิวด้วย plasma และ การเคลือบด้วยสารเลี้ยงเซลล์ นั้น

ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการบวกรายการฉายแสง UV อย่างเดียวนั้นจะสามารถเป็นตัวแทนข้อมูลของเมมเบรนในการทดสอบแต่ละขั้นตอนได้เช่นกัน สำหรับใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายพฤติกรรมของแผ่นเมมเบรนกลุ่มนั้นๆ เพื่อลดขั้นตอนการเตรียมเมมเบรนสำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเป็นการประหยัดงบประมาณในงานวิจัยอีกทางหนึ่ง

#### 5.1.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุ

จากการนำข้อมูลทดสอบชิ้นงานไปทำการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมของแผ่นเมมเบรนกลุ่มนั้นๆ สำหรับชิ้นงาน Original membrane พบว่าแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนได้ใกล้เคียงที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบแกนเดียว (Uniaxial Testing) เท่ากับ 0.994 , ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equi-Biaxial Testing) เท่ากับ 0.999 และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing) เท่ากับ 0.999 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ของชิ้นงาน Original Membrane

| C10     | C01      | C20       | C11      | C02       |
|---------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0.11637 | 0.058813 | 0.0073892 | -0.00931 | 0.0011978 |

สำหรับชิ้นงาน Finalized membrane พบว่าแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 สามารถทำนายพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนได้ใกล้เคียงที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบแกนเดียว (Uniaxial Testing) เท่ากับ 0.998 , ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equi-Biaxial Testing) เท่ากับ 0.999 และ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เทียบกับพฤติกรรมการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing) เท่ากับ 0.998 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2 ของชิ้นงาน Finalized Membrane

| C10      | C01      | C20       | C11       | C02        |
|----------|----------|-----------|-----------|------------|
| 0.088525 | 0.047481 | 0.0093126 | -0.006518 | 0.00041182 |

### 5.1.3 ผลการศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS

จากผลการจำลองการดึงยึดแผ่นเมมเบรนด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อศึกษาการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิว พบว่าการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมบนพื้นผิวบริเวณต่างๆของชิ้นงานนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน และลักษณะการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมที่ระยะยึดต่างๆ มีความคล้ายคลึงกัน โดยบริเวณมุมทั้ง 4 ด้านของส่วนที่อยู่ติดกับบริเวณที่ยึดจับซึ่งความเค้นวิศวกรรมสูงที่สุด จากนั้นค่อยๆลดลงไปตามแนวรอยต่อระหว่างส่วนที่โดนยึดจับกับไมโดนยึดจับบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน และน้อยที่สุดคือบริเวณชิ้นงานที่โดนยึดจับเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานนั้น เป็นบริเวณที่เราสนใจ จะพบว่าการกระจายของความเค้นทางวิศวกรรมมีแนวโน้มลดน้อยลงเมื่อระยะการดึงยึดลดลง ( มีขนาดที่แตกต่างกันต่ำกว่า 0.01 MPa)

ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน Original membrane คิดเป็น 6.77 % ส่วนชิ้นงาน Finalized membrane คิดเป็น 4.88 % ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นยังอยู่ในช่วงที่รับได้ทางการทดลองในวิศวกรรม

จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นเมมเบรนและศึกษาการกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อได้รับแรงกระทำด้วยโปรแกรม ANSYS ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นบนพื้นผิวของเมมเบรน ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในงานวิจัยครั้งนี้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สำหรับการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกนั้น จำเป็นต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมในอีก 2 รูปแบบนั้นคือ การทดสอบการดึงเท่ากันในสองแนวแกน (Equi-biaxial Testing) และ การทดสอบการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing) เพื่อให้สามารถที่จะคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุนั้นๆได้อย่างแม่นยำและมีความถูกต้องมากขึ้น

5.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้สามารถทำนายพฤติกรรมได้ดีเฉพาะวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเท่านั้น ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนเป็นวัสดุชนิดอื่นจะต้องทำการคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับวัสดุนั้นๆ เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมเชิงกลให้มีความแม่นยำและถูกต้อง

5.5.3 การวิจัยครั้งต่อไปอาจศึกษาผลของการคลายความเค้นของแผ่นเมมเบรนเพื่อให้ข้อมูลการทำนายพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นเมมเบรนมีความแม่นยำและสามารถศึกษาโดยใช้การจำลองในรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย

| สัญลักษณ์  | ความหมาย                      |
|------------|-------------------------------|
| $a$        | Global Interaction Parameter  |
| $C_1, C_2$ | ค่าคงที่ , K                  |
| $C_{ijk}$  | สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง       |
| $E$        | โมดูลัสยืดหยุ่น               |
| $F$        | แรง , N                       |
| $f_i$      | ความเค้นทางวิศวกรรม , MPa     |
| $I$        | Strain Invariants             |
| $K$        | สัมประสิทธิ์ของวัสดุ , N/m    |
| $T$        | อุณหภูมิ , K                  |
| $u$        | ระยะยืด , mm                  |
| $W$        | Stain Energy Density Function |

### สัญลักษณ์อักษรกรีก

|                 |                             |
|-----------------|-----------------------------|
| $\eta_v$        | การไหลแบบหนืด , Pa.s        |
| $\lambda$       | อัตราการยืด                 |
| $\mu_0$         | โมดูลัสของการเฉือน , MPa    |
| $\beta$         | Invariant Mixture Parameter |
| $\sigma_i$      | ความเค้นจริง , MPa          |
| $\varepsilon_i$ | ความเครียดวิศวกรรม          |
| $\nu$           | อัตราส่วนปัวซอง             |

### สัญลักษณ์ย่อ

|     |                      |
|-----|----------------------|
| $B$ | Equi-biaxial Testing |
| $I$ | Coordinate system    |
| $S$ | Planar Testing       |
| $U$ | Uniaxial Testing     |

บรรณานุกรม

TNI

## บรรณานุกรม

- [1] J. Garvin, J. Qi, M. Maloney, and A. J. Banes, “Novel System for Engineering Bioartificial Tendons and Application of Mechanical Load,” *Tissue Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 967 – 979, October 2003.
- [2] A. J. Banes, J. Qi, D. S. Anderson, M. Maloney, and R. Summanasinghe, “A Method for Culture and Mechanical Loading of Cells in a Linear 3D Matrix”. *Tissue Train Tech Report*, vol. 2, no. 4, pp. 1-7, August 2009.
- [3] T. Shibata, J. Botsis, M. Bergomi, A. Mellal, and K. Komatsu, “Mechanical Behavior of Bovine Periodontal Ligament under Tension Compression Cyclic Displacements,” *European Journal of Oral Sciences*, vol. 114, no. 1, pp. 74–82, February 2006.
- [4] A. Khademhosseini, J. P. Vacanti, and R. Langer, “Progress in Tissue Engineering,” *Scientific American*. vol. 300, pp. 64 – 71, May 2009.
- [5] W. Rapeepat, “Analysis of Mechanical Behavior of Hyperviscoelastic Material by Finite Element Method,” M.S., Dept Mechanical Engineering. Eng. King Mongkut’s Institute of Technology North Bangkok, Thailand, 2006.
- [6] MSC. Software Corporation. (2010) “Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers,” [Online]. Available: [www.axelproducts.com/downloads/MARC\\_FEA\\_ELASTOMERS\\_2000.pdf](http://www.axelproducts.com/downloads/MARC_FEA_ELASTOMERS_2000.pdf). [Accessed: Dec. 10, 2014]
- [7] S. Cantournet, R. Desmorat, and J. Besson, “Mullins Effect and Cyclic Stress Softening of Filled Elastomers by Internal Sliding and Friction Thermodynamics Model,” *International Journal of Solids and Structures*. vol. 46, no.7-8, pp. 2255–2264, April 2009.
- [8] M. C. Boyce, and E. M. Arruda, “Constitutive Model of Rubber Elasticity A Review,” *Rubber Chemistry and technology*. vol. 73, pp. 504-523, March 2000.
- [9] Z. Guo, and L. J. Sluys, “Constitutive Modelling of Hyperelastic Rubber-Like Materials,” *Heron*. vol. 53, no. 3, pp. 109 – 132, 2008.

### บรรณานุกรม(ต่อ)

- [10] M. W. Gagnon, P. Hubert, C. Semler, M. P. Païdoussis, M. Vézina, and D. Lavoie, “Hyperelstic Modeling of Rubber in Commercial Finite Element Software (ANSYS),” *Conference: SAMPE '06: Creating New Opportunities For The World Economy*. vol. 51, pp. 1-15, April- May 2006.
- [11] D. M. Turner, and M. Brennan, “The Multiaxial Elastic Behaviour of Rubber,” *Plastics and Rubber Processing and Applications*. vol. 14, pp. 183-188, 1990.
- [12] W. Sathaporn, G. Chanyuth, and C. Arisara, “Finite Element Simulation for Heat Built-up in Vulcanized Natural Rubber Subjected to Dynamic Load,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 18, no. 3, pp. 49-61, Sep – Dec 2008.
- [13] C. Arisara, “Finite element stress-strain analysis of a solid tyre,” The Project of KMUTNB. Eng. King Mongkut’s Institute of Technology North Bangkok, Thailand, 2005.
- [14] I. K. Triantafillopoulos, A. J. Banes, K. F. Bowman, M. Maloney, W. E. Garrett, and S. G. Karas, “Nandrolone Decanoate and Load Increase Remodeling and Strength in Human Supraspinatus Bioartificial Tendons,” *The American Journal of Sports Medicine*, vol.32, no. 4, pp. 934 – 943, June 2004.
- [15] M. Chiquet, A. S. Renedo, F. Huber, and M. Flück, “How Do Fibroblasts Translate Mechanical Signals Into Changes in Extracellular Matrix Production?,” *Matrix Biology*. vol. 22 pp. 73 – 80, January 2003.
- [16] C. Riyada, “Fracture Surface Simulation of Composites Using ANSYS Program,” M.S., Dept Petrochemical and polymeric material. Eng. Silpakorn University, 2012.
- [17] American Society for Testing and Materials Standard. “Test Method for Tensile Properties of Plastics. Designation: D 638 - 02a,” [Online]. Available: <http://classes.engr.oregonstate.edu/mime/winter2012/me453-001/Lab1%20-%20Shear%20Strain%20on%20Polymer%20Beam/ASTM%20D638-02a.pdf>. [Accessed: Oct. 15, 2013]

### บรรณานุกรม(ต่อ)

- [18] American Society for Testing and Materials Standard. “Vulcanized Rubber & Thermoplastic Rubbers & ThermoplasticElastomers - Tension: D412-92,” [Online]. Available:<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/astm.d412.1968.pdf> [Accessed: Oct. 15, 2013]
- [19] F. Zhenga, C. Q. He, P. F. Fang, J. G. Wang, B. Y. Xiong, K. Wang, F. W. Liu, X. Y. Peng, X. G. Xu, Z. H. Xu, and S. J. Wang, “The Surface Structure of UV Exposed Poly-Dimethylsiloxane (PDMS) Insulator sStudied by Slow Positron Beam,” *Applied Surface Science*, vol. 283, pp. 327– 331, June 2013.
- [20] D. Bodas, J. Rauch, and C. K. Malek, “Surface modification and aging studies of addition-curing silicone rubbers by oxygen plasma,” *European Polymer Journal*, vol. 44, pp. 2130–2139, April 2008.
- [21] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, “Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, pp. 1448-1454, December 2005.
- [22] B. H. Youn, and C. S. Huh, “Surface Degradation of HTV Silicone Rubber and EPDM Used for Outdoor Insulators under Accelerated Ultraviolet Weathering Condition,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, No. 5, pp. 1015-1024, October 2005.

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.  
การคำนวณและการแปลงข้อมูล

TNI

### ก.1 การคำนวณหาค่าความเค้นจริงจากจากวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio

การคำนวณหาค่าความเค้นจริงจากจากวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองและใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) เท่ากับ 0.5 จะเห็นว่าความเค้นจริงเป็นฟังก์ชันกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และ อัตราส่วนปัวซองดังสมการ ก.1

$$\sigma_U = EP(\lambda_U, \nu) \quad (\text{ก.1})$$

ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ,  $\sigma_{U_i}$  คือ ความเค้นจริงที่ได้จากการทดลองการดึงในแนวแกนเดียวค่าที่  $i$  และ  $\nu_i$  คือ อัตราส่วนปัวซองค่าที่  $i$

และค่า  $P$  หาได้จากสมการที่ ก.3

$$P = \left[ \lambda_U - 1 + \nu \frac{(1 - \sqrt{\lambda_U})}{\sqrt{\lambda_U}} \right] / (1 - \nu^2) \quad (\text{ก.3})$$

### ก.2 การแปลงข้อมูลจากการทดลองจริงเป็น True Data เพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio

การแปลงค่าของข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงเพื่อให้ใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio โดยต้องทำการแปลงค่าทุกคู่อันดับ  $x, y$  แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง ( $\sigma_t$ ) และอัตราส่วนการยืดตัว ( $\lambda_u$ ) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ ก.1 ดังจะแสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

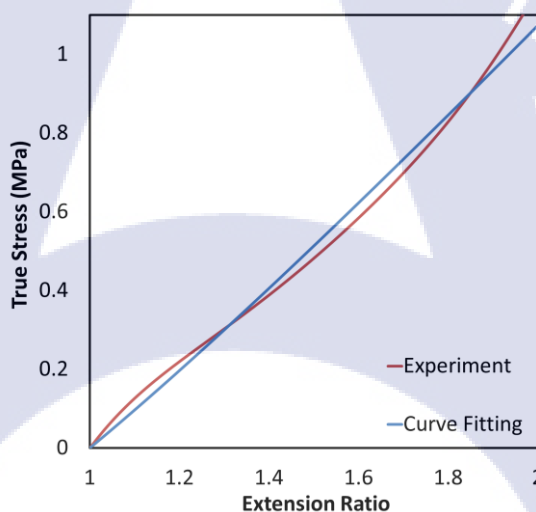
- ความเค้นจริง (True Stress,  $\sigma_t$ )

$$\sigma_t = \sigma_e \times (1 + \varepsilon_e) \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ  $\sigma_e$  คือ ความเค้นวิศวกรรม และ  $\varepsilon_e$  คือ ความเครียดวิศวกรรม

- อัตราส่วนการยืดตัว (Extension Ratio,  $\lambda_u$ )

$$\lambda_u = \varepsilon_e + 1 \quad (\text{ก.5})$$



รูปที่ ก.1 กราฟความเค้นจริง( $\sigma_t$ ) และอัตราส่วนการยืดตัว ( $\lambda_u$ ) เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกับคำนวณจากตามวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio

### ก.3 การทำนายข้อมูลการดึงแบบเท่ากันในสองแกนและการดึงแบบความกว้างคงที่ จากวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นจริงที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณจากวิธีการ Constant True Young's Modulus with Varying Poisson's Ratio แล้ว เราจะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของการทดลองรูปแบบนั้นๆ จากนั้นทำการคำนวณหาชุดข้อมูลของการทดลองในอีก 2

รูปแบบคือการดึงแบบสองแนวเท่ากัน (EquiBiaxial Testing) และการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing) ดังจะแสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

สำหรับการดึงแบบสองแนวเท่ากัน (EquiBiaxial Testing)

$$\lambda_1 = \lambda_2, \lambda_3 = 1/\lambda_1^2$$

$$\sigma_B = \sigma_1 = \sigma_2 = E[\lambda_B - 1 + \nu(\lambda_B - 1)]/(1 - \nu^2) \quad (\text{ก.6})$$

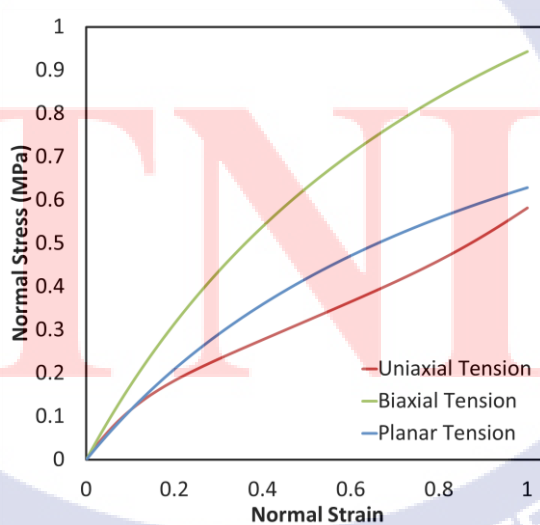
เมื่อ  $\lambda_B$  คือ อัตราส่วนการยืดตัว ในแนวแกนดึง และ อัตราส่วนปัวซองคือ

$$\nu = (\lambda_B + 1)/(2\lambda_B^2 + \lambda_B + 1) \quad (\text{ก.7})$$

สำหรับการดึงแบบความกว้างคงที่ (Planar Testing)

$$\lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1/\lambda_1$$

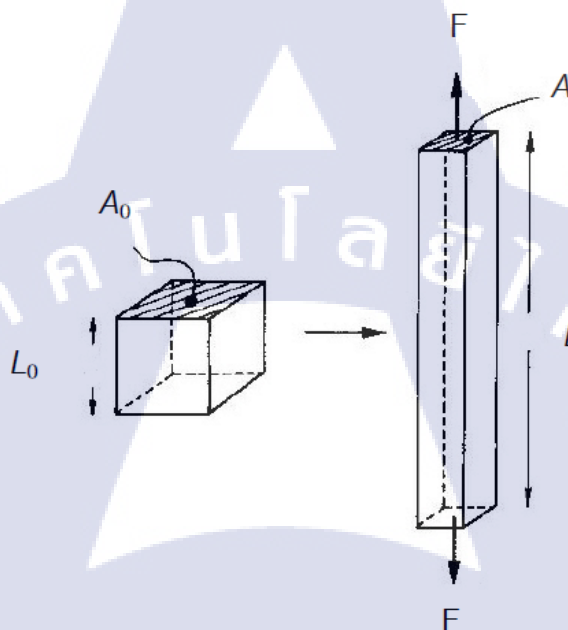
$$\sigma_S = E(\lambda_S - 1)/(1 - \nu^2) \quad (\text{ก.8})$$



รูปที่ ก.2 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุจากผลการทดลองการดึงแกนเดียวคำนวณโดยใช้อัตราส่วนปัวซอง

#### ก.4 สมการแบบจำลองฟังก์ชันพลังงานความเครียดพหุนามอันดับที่ 2 ลักษณะการดัดแกนเดียว

ฟังก์ชันพลังงานความเครียดเป็นฟังก์ชันที่ศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร  $V$  ของวัสดุ ซึ่งในกรณีการดัดแกนเดียวตามรูป ก.3 ชิ้นงานรูปลูกบาศก์ถูกแรงกระทำดัดขึ้นในแนวแกน  $Z$  ทำให้ชิ้นงานที่มีความยาวที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม จาก  $L_0$  ยึดระยะเป็น  $L$  ส่วนพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนจากขนาดพื้นที่หน้าตัดเดิม  $A_0$  เป็นพื้นที่หน้าตัดใหม่  $A$  [5]



รูปที่ ก.3 แสดงการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกระทำตามแนวแกน

จากสมมติฐานที่ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือกำหนดให้ยางเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V = A_0 L_0 = AL \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (\text{ก.10})$$

จากความสัมพันธ์  $\lambda = \frac{L}{L_0}$  และกำหนดให้  $\lambda_3 \equiv \lambda$  การหดตัวตามแนวแกนทางขวาง (Transverse Directions) จะต้องมียึดอัตราส่วนระยะยืดเท่ากัน ดังนั้น

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

(ก.11)

เขียนเป็นเกรเดียนต์การเปลี่ยนรูป  $F$  และโคชีกรีนเทนเซอร์  $C$  ได้ดังนี้

$$F = \begin{Bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \end{Bmatrix} \quad C = \begin{Bmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda} \end{Bmatrix}$$

จากสมการความเค้นอันดับที่ 2 ของ Piola-Kirchoff

$$S = 2 \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \left( \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \right) \right) F - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} C + (p + p_0) C^{-1} \right] \quad (\text{ก.12})$$

เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ทั้งสองโดยพิจารณาแต่ละแนวแกน

$$S_1 = 2 \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{2}{\lambda} + \frac{(p + p_0)}{\lambda^2} \right) \right] \quad (\text{ก.13})$$

$$S_2 = S_3 = 2 \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \left( \lambda^2 + \frac{1}{\lambda} \right) + (p + p_0) \lambda \right) \right] \quad (\text{ก.14})$$

ในสภาวะที่ยางเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้ กำหนดให้  $S_2 = S_3 = 0$  จัดรูปแบบสมการใหม่ได้

$$p = -2 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{1}{\lambda} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \left( \lambda + \frac{1}{\lambda^2} \right) \right) - p_0 \quad (\text{ก.15})$$

แทนค่า  $p$  ลงในสมการที่ (ก.14) จะได้

$$s_1 = 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{1}{\lambda}\right) \quad (\text{ก.16})$$

จากการเลือกใช้แบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2

$$W = \sum_{i+j+k=1}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (\text{ก.17})$$

จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial I_1} &= C_{10} + C_{11}(I_2 - 3) + 2C_{20}(I_1 - 3) \\ \frac{\partial W}{\partial I_2} &= C_{01} + C_{11}(I_1 - 3) + 2C_{02}(I_2 - 3) \end{aligned} \quad (\text{ก.18})$$

จากเกรเดียนต์การเปลี่ยนรูป สามารถหาค่าอินวาเรียนท์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 = 2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \end{aligned} \quad (\text{ก.19})$$

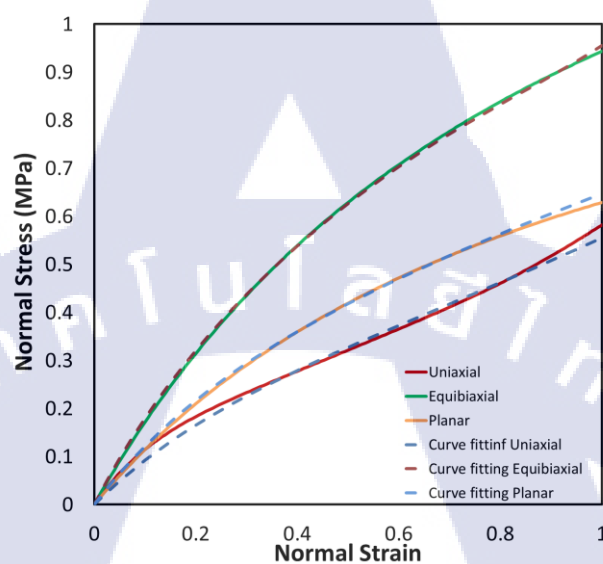
แทนค่าอินวาเรียนท์ลงในสมการ (ก.18) และแทนค่าทั้งหมดลงในสมการ (ก.13) จะได้

$$s_1 = 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \left[ \begin{aligned} &C_{10} + C_{01} \frac{1}{\lambda} + 3C_{11} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} - 1\right) \\ &+ 2C_{20} \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3\right) + 2C_{02} \left(2 + \frac{1}{\lambda^3} - \frac{3}{\lambda}\right) \end{aligned} \right] \quad (\text{ก.14})$$

เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังตารางข้างล่างซึ่งเป็นการทดลองการดึงครั้งเดียวที่สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากการทำนายโดยใช้โปรแกรมและการทำนายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2

| C10     | C01      | C20       | C11      | C02       |
|---------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0.11637 | 0.058813 | 0.0073892 | -0.00931 | 0.0011978 |



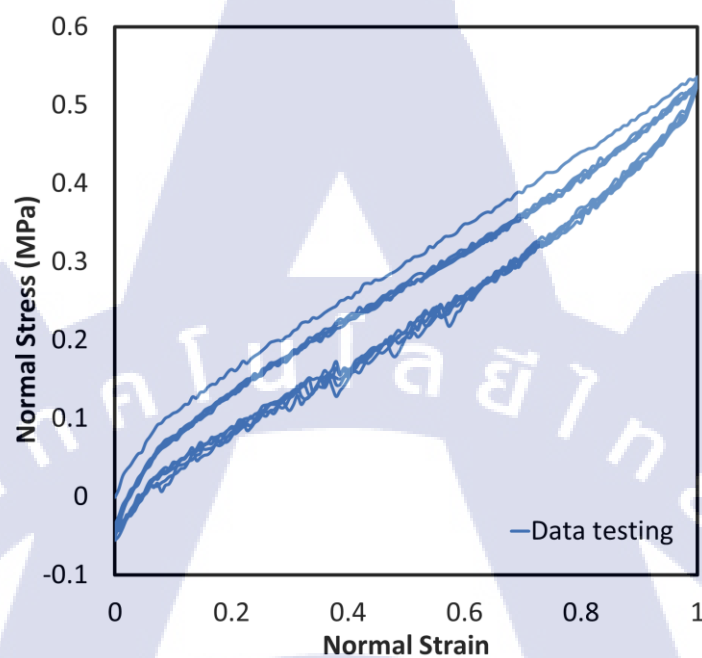
รูปที่ ก.4 ทำนายพฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะของชิ้นงาน Original membrane โดยแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 2

ภาคผนวก ข.  
ผลการทดลอง

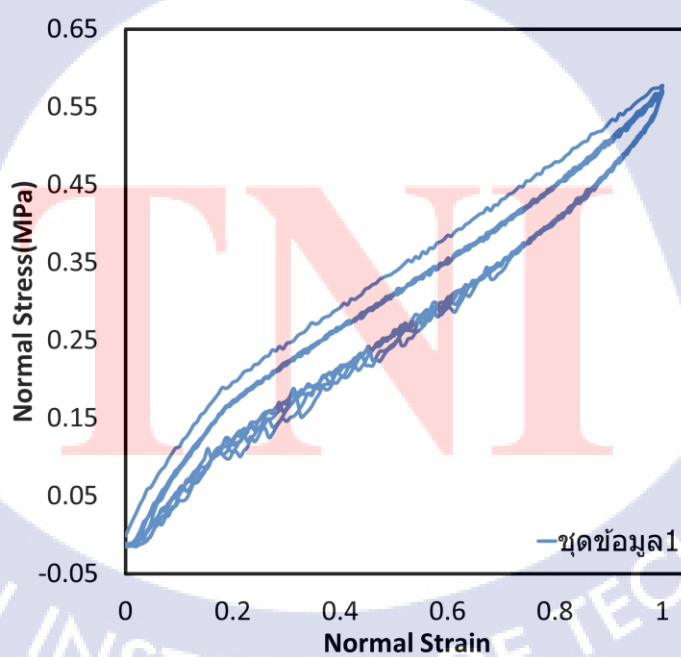
TNI

## ข. 1 ข้อมูลผลทดสอบการดึงยึดในแนวแกนเดียว (Uniaxial testing)

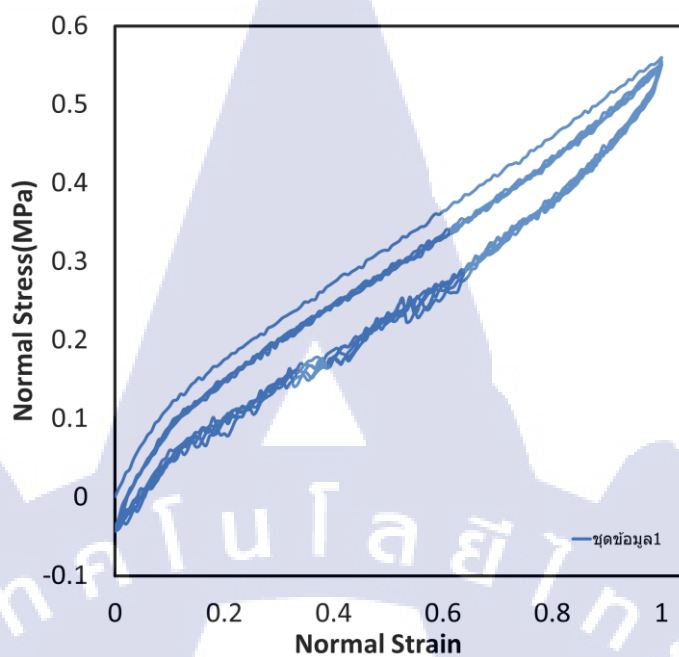
ข.1.1 ชิ้นงาน Original เมื่อดึงที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตร/นาที เป็นจำนวน 5 รอบ



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน Original ชั้นที่ 1

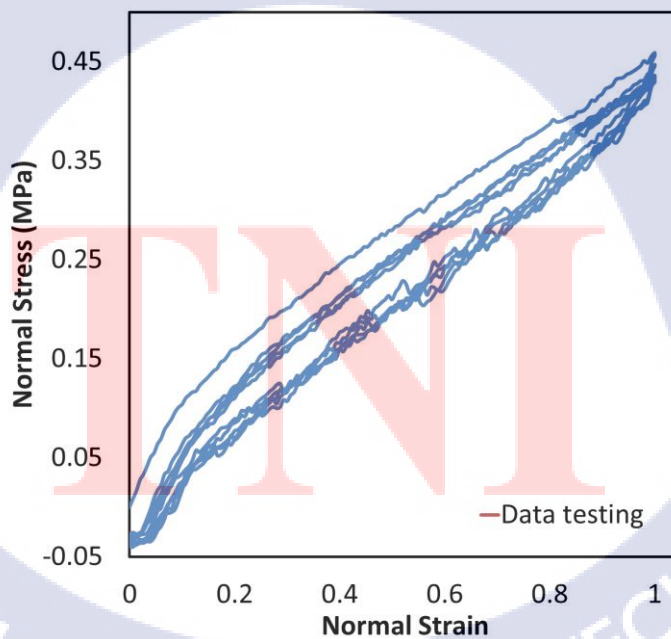


รูปที่ ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน Original ชั้นที่ 2

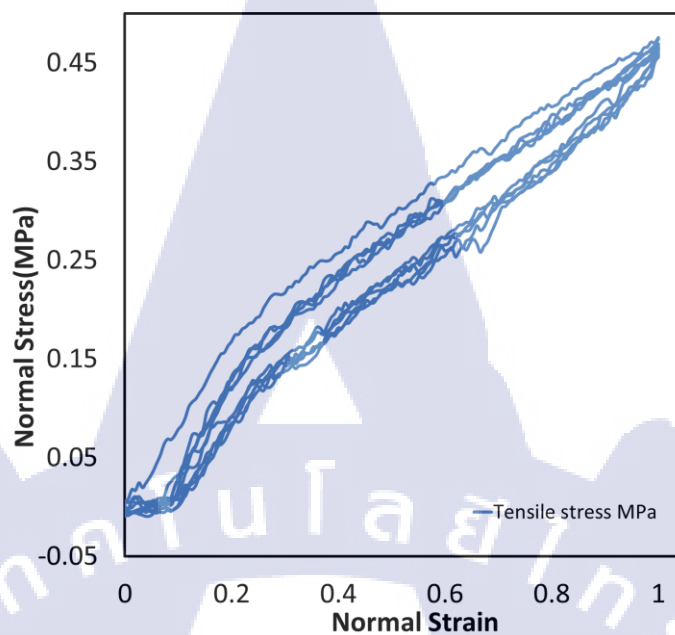


รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน Original ชั้นที่ 3

ข.1.2 ชิ้นงาน UV เมื่อตั้งที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตร/นาที เป็นจำนวน 5 รอบ

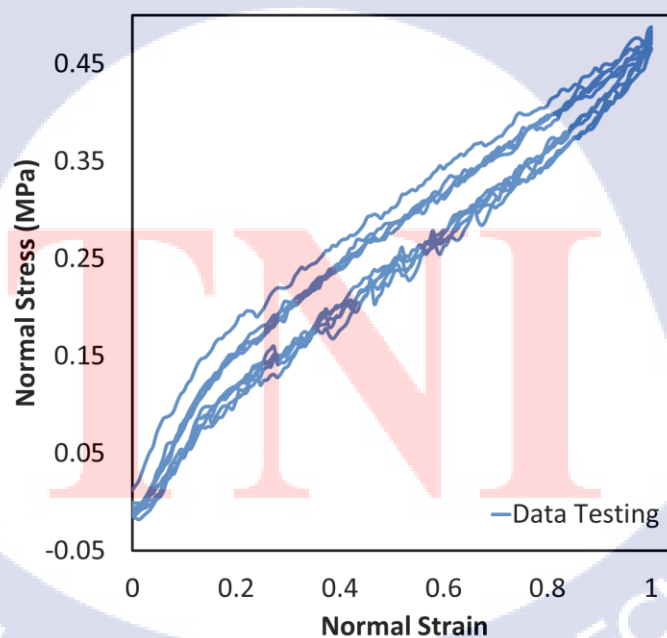


รูปที่ ข.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV ชั้นที่ 1

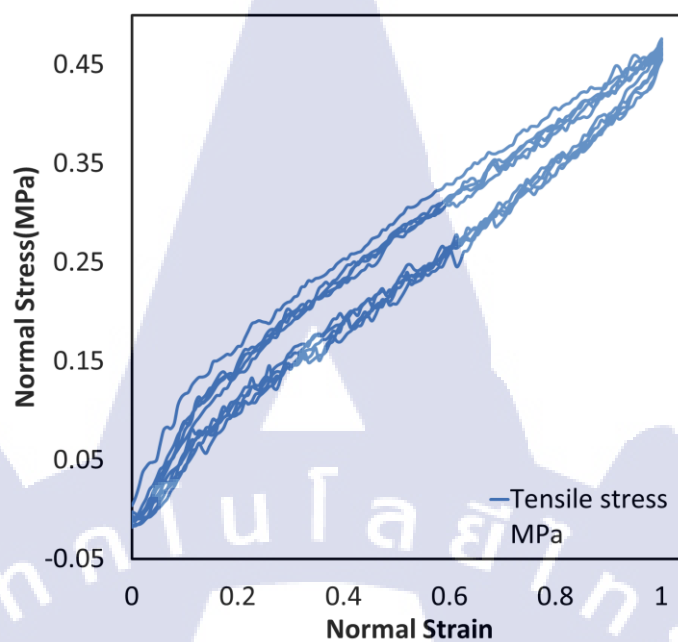


รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV ชั้นที่ 2

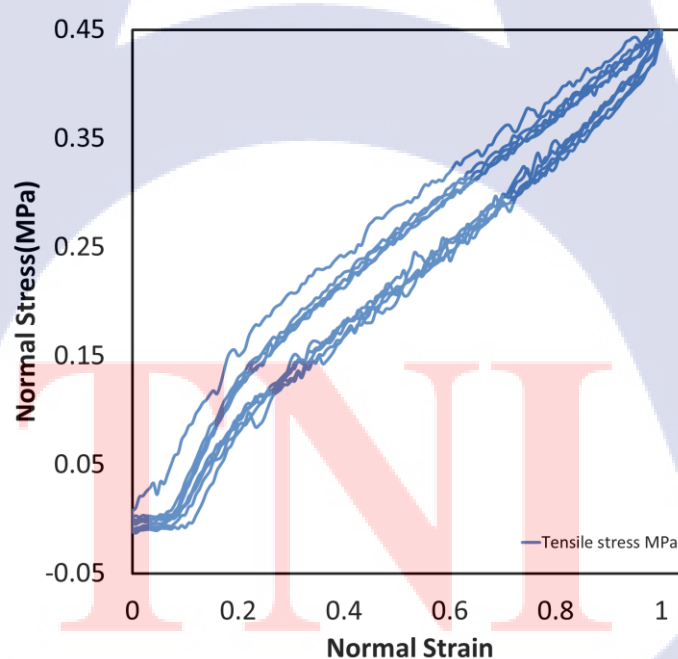
ข.1.3 ชิ้นงาน UV/Plasma เมื่อตั้งที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตร/นาทื เป็นจำนวน 5 รอบ



รูปที่ ข.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma ชั้นที่ 1



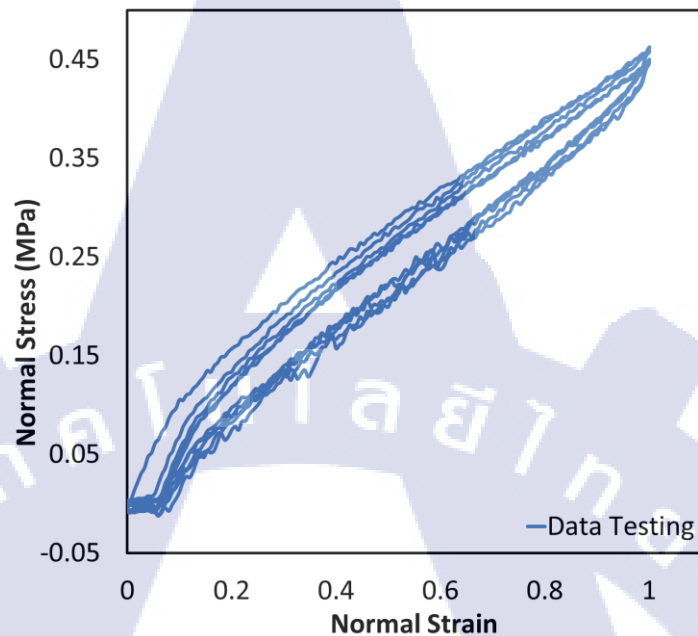
รูปที่ ข.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma ชั้นที่ 2



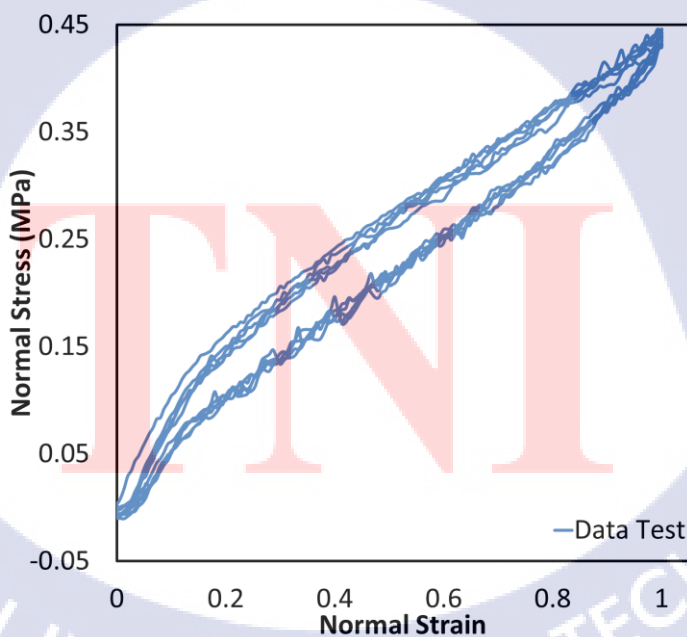
รูปที่ ข.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma ชั้นที่ 3

ข.1.4 ชั้นงาน UV/Plasma/Coat เมื่อตั้งที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตร/นาที เป็นจำนวน

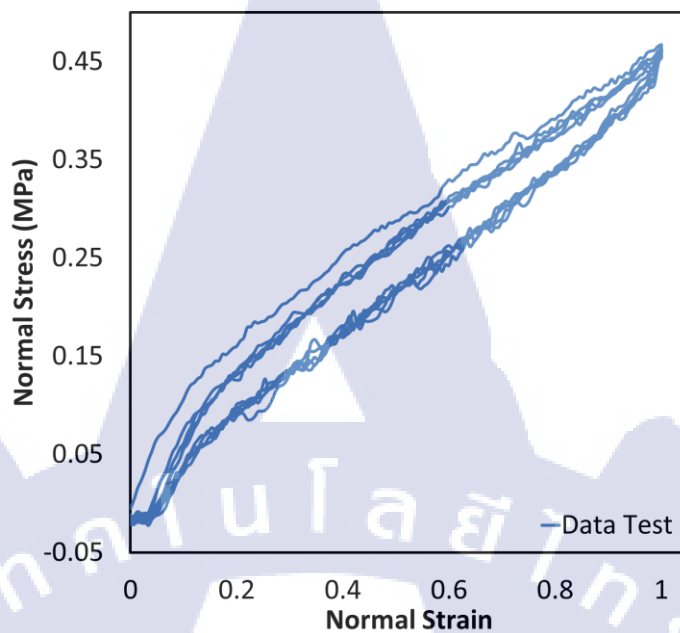
5 รอบ



รูปที่ ข.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชั้นงาน UV/Plasma/Coat  
ชั้นที่ 1



รูปที่ ข.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชั้นงาน UV/Plasma/Coat  
ชั้นที่ 2



รูปที่ ข.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของชิ้นงาน UV/Plasma/Coat  
ชิ้นที่ 3

ภาคผนวก ค.  
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม

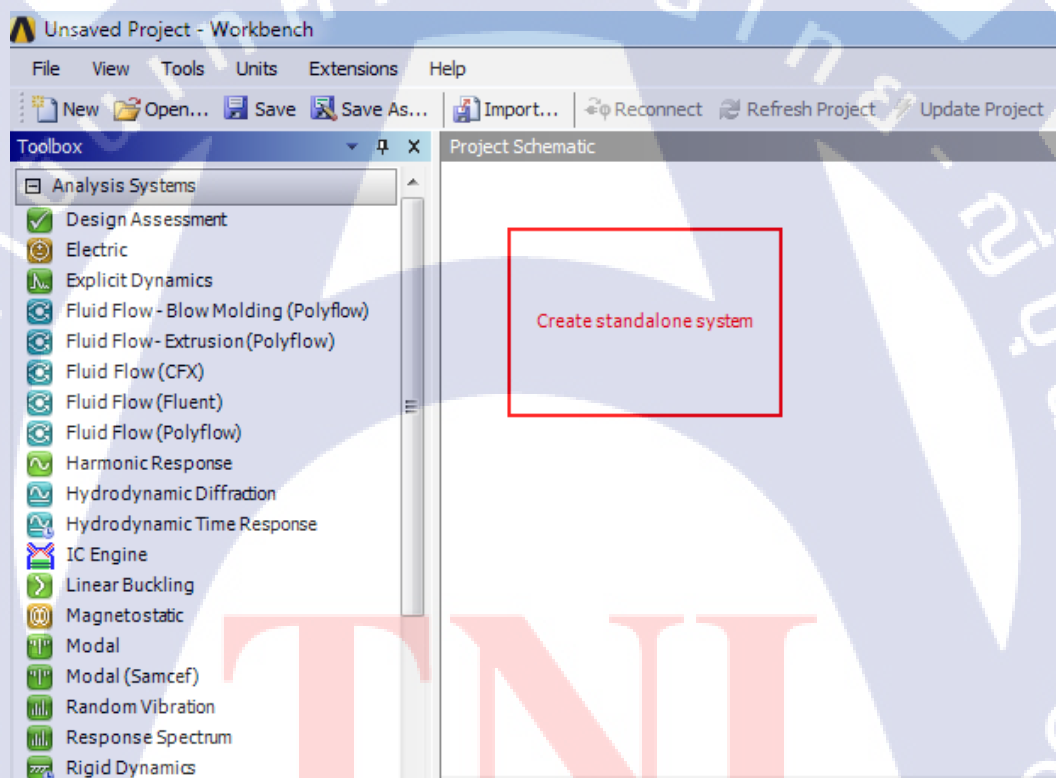
TNI

## ค.1 การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS

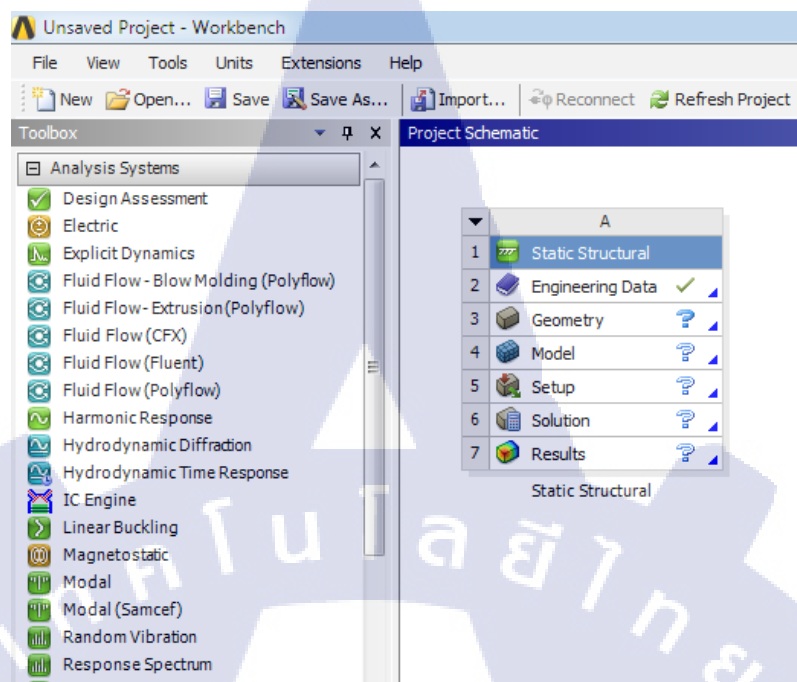
แบ่งขั้นตอนการทำงานหลักเป็น 6 ส่วน ดังนี้

### ค.1.1 Engineering Data : การสร้างชุดข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุ

เมื่อทำการเปิดโปรแกรมขึ้นมา จะพบกับหน้าต่างหลักของโปรแกรม หลังจากนั้นกด Component system เพื่อเลือกโหมดที่จะใช้ในการจำลอง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โหมด Static Structural โดยการคลิกค้างแล้วลากเข้าสู่ช่องสี่เหลี่ยมสีเขียว แล้วจะปรากฏสี่เหลี่ยมสีแดงเขียนว่า Create standalone system ดังรูปที่ ค.1 และ ค.2

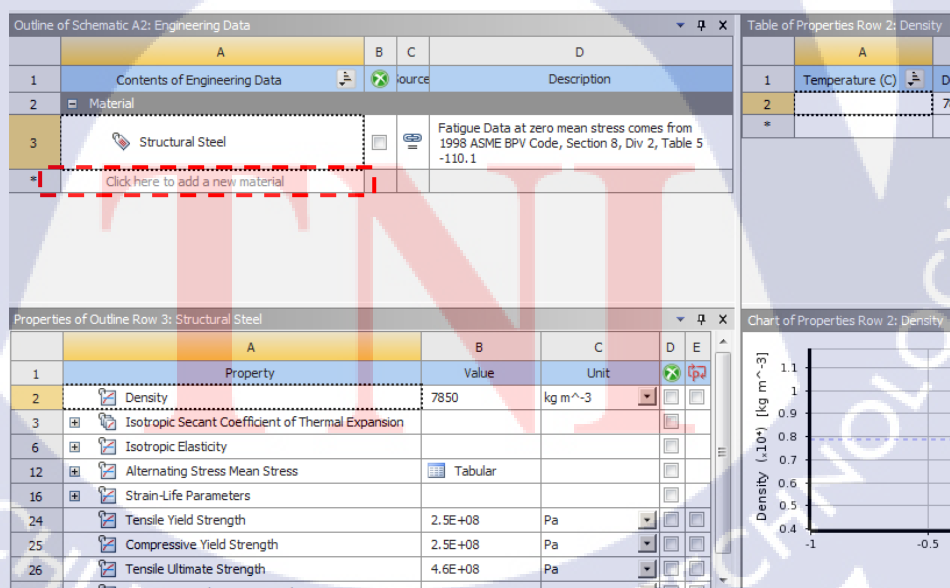


รูปที่ ค.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม ANSYS



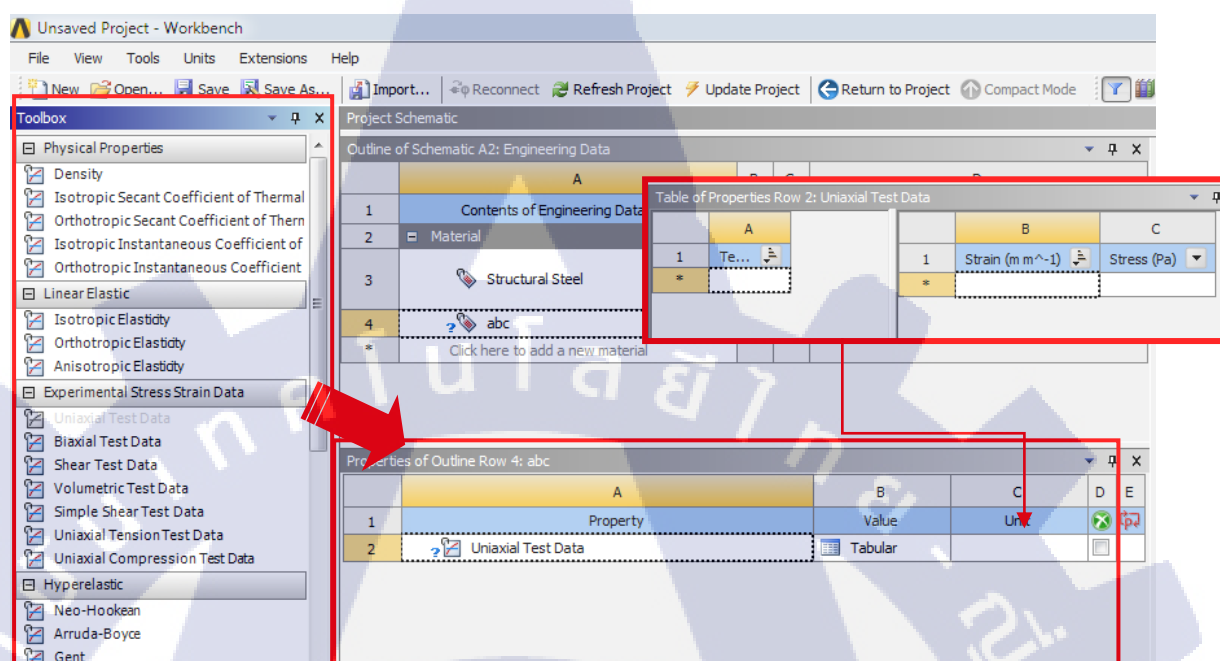
รูปที่ ค.2 หน้าต่างหลักของโหมด Static Structural

หลังจากนั้นคลิกที่ Engineering data เพื่อเลือกสร้างข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุ ทำการตั้งชื่อของวัสดุที่เราต้องการสร้างใช้ช่อง Click Here to Add a New material ดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 หน้าต่างหลักของ Engineering Data

หลังจากนั้นทำการเลือกคุณสมบัติของวัสดุที่เราต้องการป้อนข้อมูลจากคำสั่ง Toolbox คำสั่งที่เลือกจะมาปรากฏที่ตาราง Property of Outline Row ดังรูปที่ ค.4

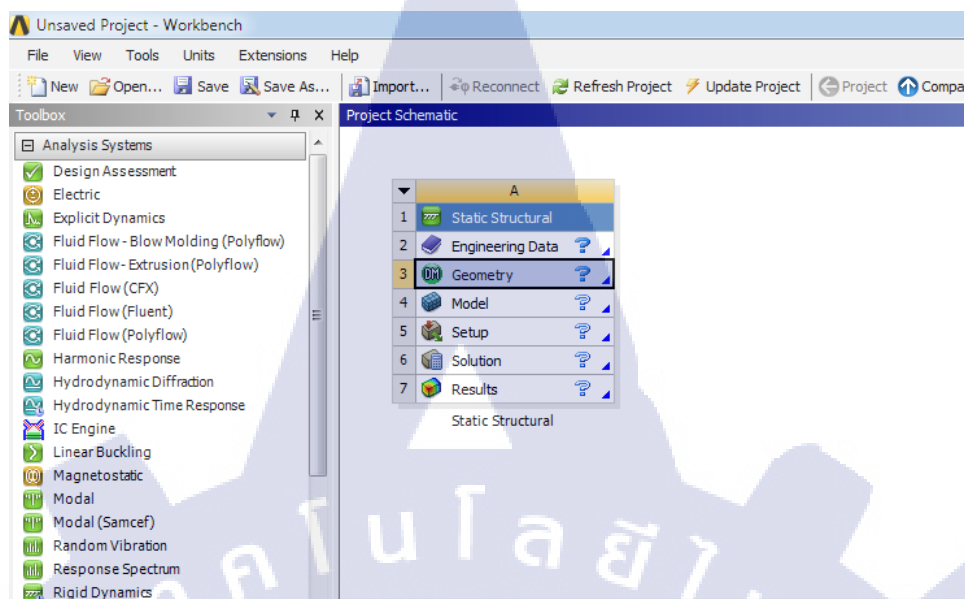


รูปที่ ค.4 แสดงสารบัญข้อมูลของ Engineering Data

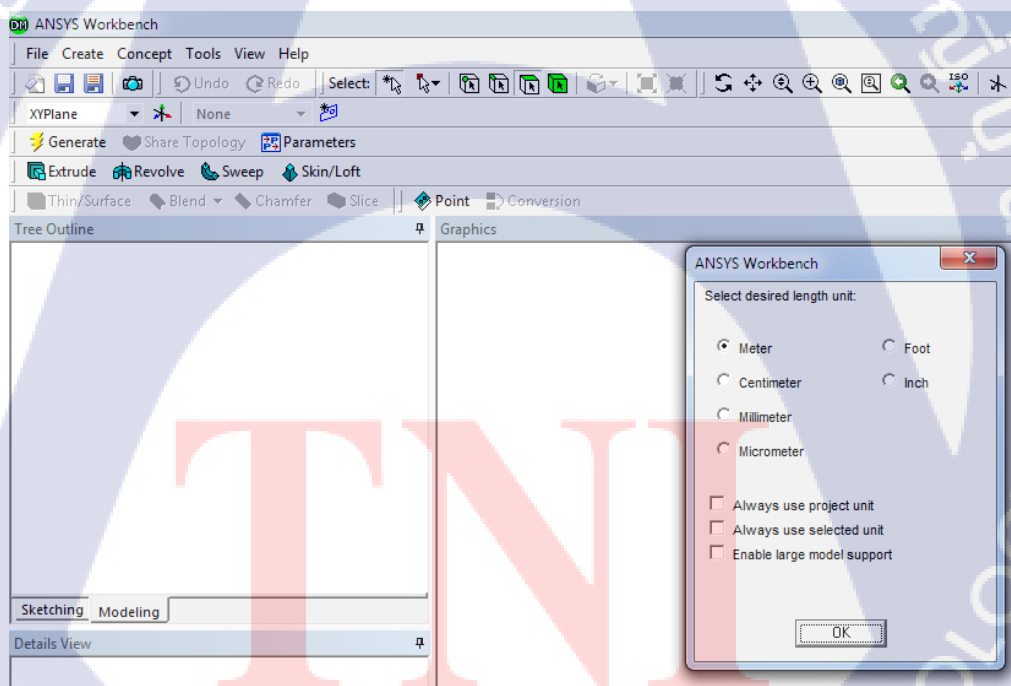
เมื่อทำการป้อนข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุจนครบตามที่ต้องการแล้ว เลือกคำสั่ง return to Project เพื่อกลับสู่หน้าจอหลักของโปรแกรม

### ค.1.2 Geometry

จากหน้าจอหลักของโปรแกรม ให้เลือกคำสั่ง Geometry จากนั้นคลิกขวาแล้วเลือกคำสั่ง New Geometry เพื่อสร้างแบบจำลอง ซึ่งจะปรากฏหน้าต่างให้เลือกหน่วยความยาวที่ต้องการใช้ เมื่อเลือกเสร็จแล้ว กด OK จะปรากฏหน้าต่างหลักของการสร้างแบบจำลองดังรูปที่ ค.5 และ ค.6



รูปที่ ค.5 แสดงการเลือกคำสั่ง Geometry จากหน้าต่างหลักของโปรแกรม



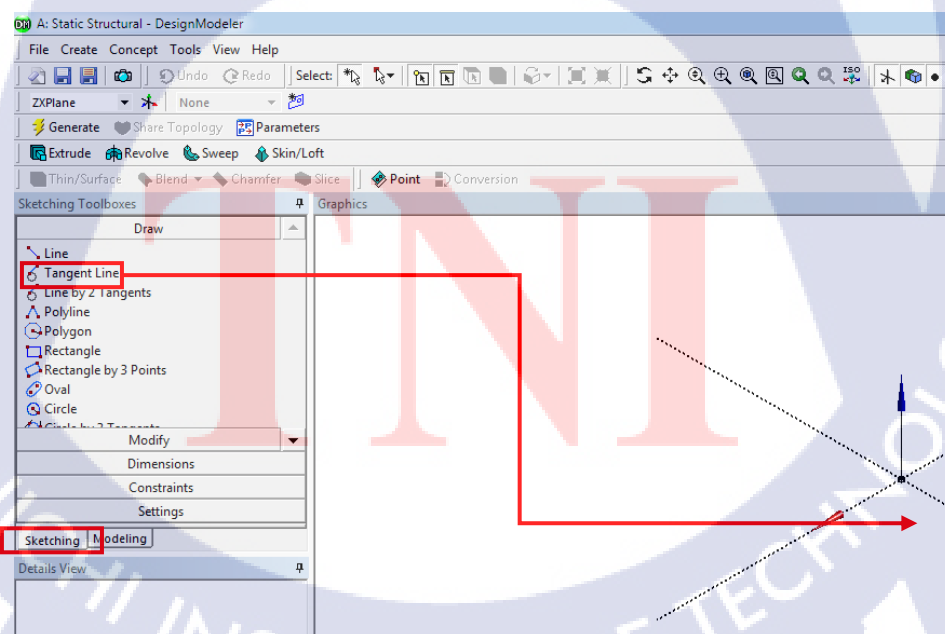
รูปที่ ค.6 หน้าต่างแสดงส่วนคำสั่งใน Geometry

จากนั้นทำการเลือกกระบวนที่ต้องการสร้างแบบจำลองดังรูปที่ ค.7



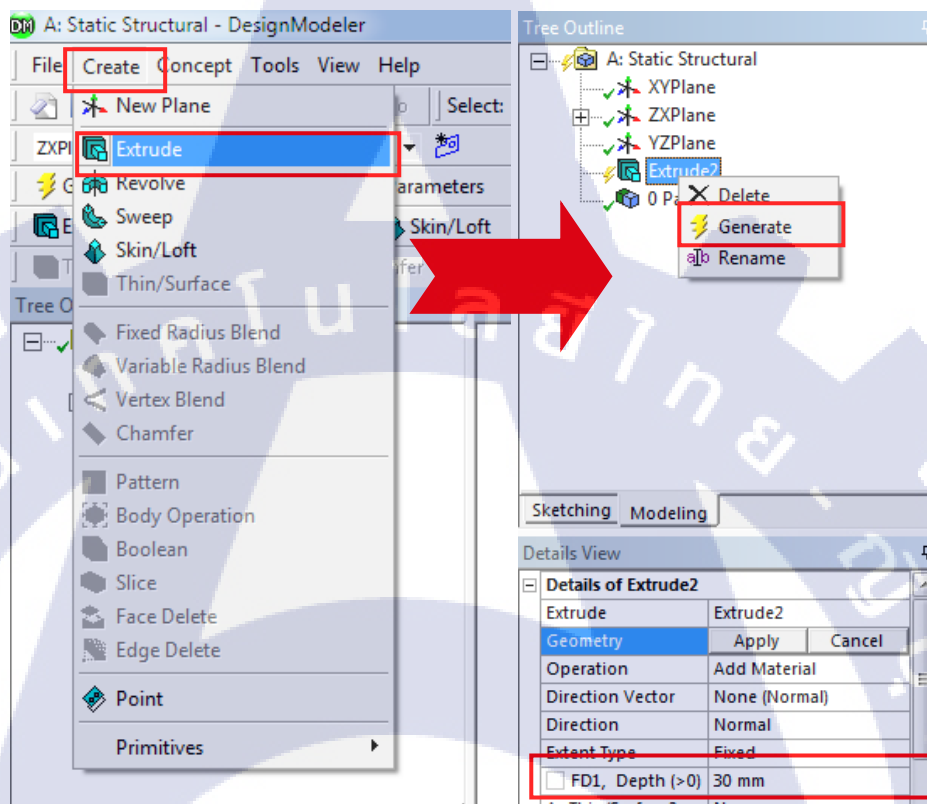
รูปที่ ค.7 แสดงการเลือกกระนาบในการวาดแบบจำลอง

ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองนั้นเริ่มจากกดคำสั่ง Sketching จากนั้นเลือกคำสั่งที่เราต้องการวาดในหมวดของ Draw ยกตัวอย่างเช่น อยากสร้างเส้นตรง ก็ให้เลือกที่คำสั่ง Line และกำหนดขนาดของโมเดลโดยการเลือกคำสั่ง General ในหมวดของ Dimension ถ้าหากเป็นเส้นแนวตั้งให้เลือก Vertical และหากเป็นเส้นแนวนอนให้เลือก Horizontal ดังรูปที่ ค.8



รูปที่ ค.8 แสดงการวาดแบบจำลอง

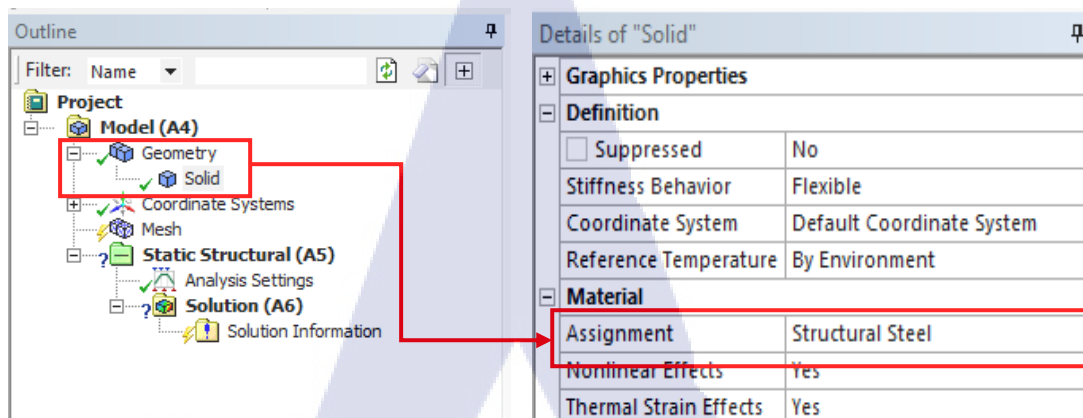
เมื่อทำการสร้างรูป 2 มิติเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการสร้างแบบจำลองให้เป็น 3 มิติโดยการเลือกคำสั่ง Extrude จากนั้นทำการกำหนดความหนาของชิ้นงานในตาราง Detail of Extrude แล้วคลิกที่คำสั่ง Generate ดังรูปที่ ค.9



รูปที่ ค.9 ขั้นตอนการสร้างรูป 3 มิติของแบบจำลอง

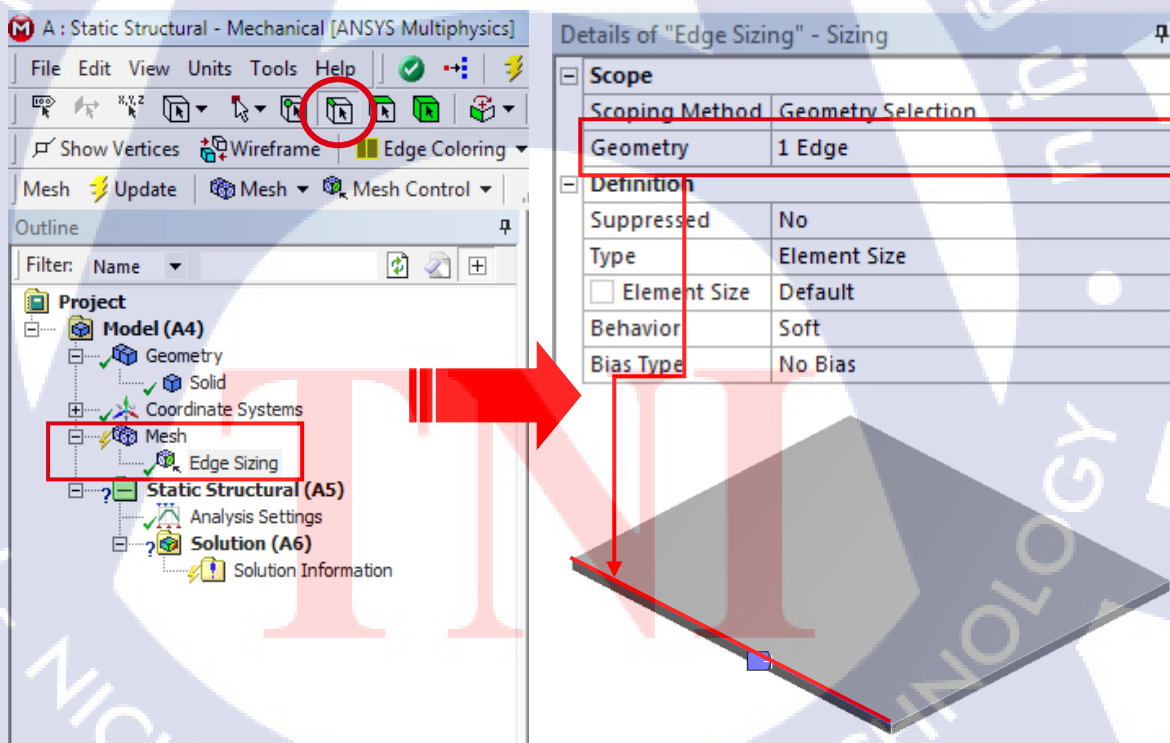
### ค.1.3 Model

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเสร็จเรียบร้อยแล้วตามที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการจำลองสถานการณ์ที่ต้องการให้เกิดขึ้นกับแบบจำลอง โดยเริ่มจากคลิกที่เลือกคำสั่ง Model ในหน้าต่างหลักของโปรแกรม ขั้นตอนแรกจะเป็นการกำหนดวัสดุให้กับชิ้นงานจำลองโดยคลิกที่หัวข้อ Geometry จากนั้นเลือกหัวข้อ Assignment ในช่อง detail ด้านล่าง แล้วเลือกวัสดุสำหรับแบบจำลอง ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่ถูกบันทึกอยู่ใน Engineering Data ดังรูปที่ ค.10

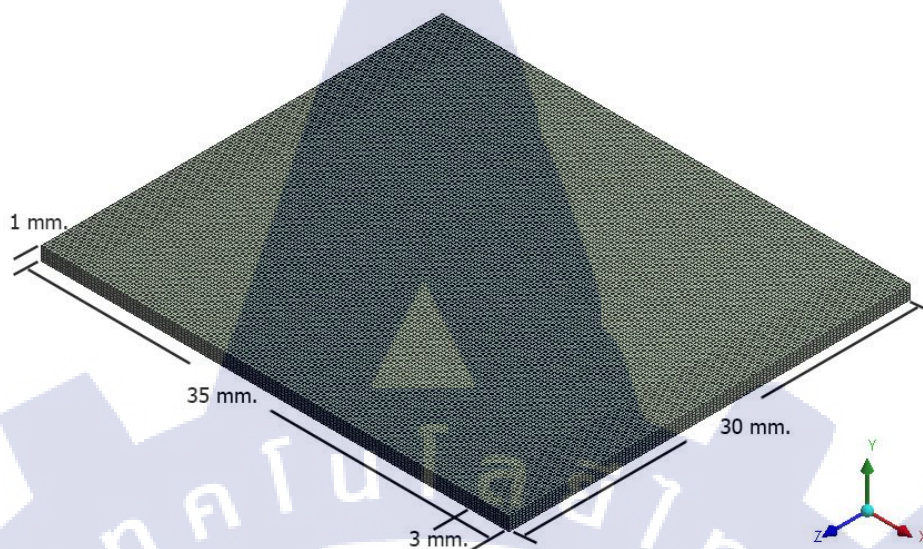


รูปที่ ค.10 แสดงการเลือกวัสดุให้กับแบบจำลอง

จากนั้นกำหนดเอลิเมนต์ของชิ้นงานในหัวข้อ Mesh กำหนดขนาดโดยการเลือกใช้คำสั่ง Sizing จากนั้นเลือกบริเวณที่ต้องการจะกำหนดขนาดโดยในงานวิจัยนี้จะเลือกกำหนดที่เส้น โดยการเลือกบริเวณในหัวข้อ Geometry ในช่อง Detail ดังรูปที่ ค.11 และ ค.12



รูปที่ ค.11 แสดงการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์

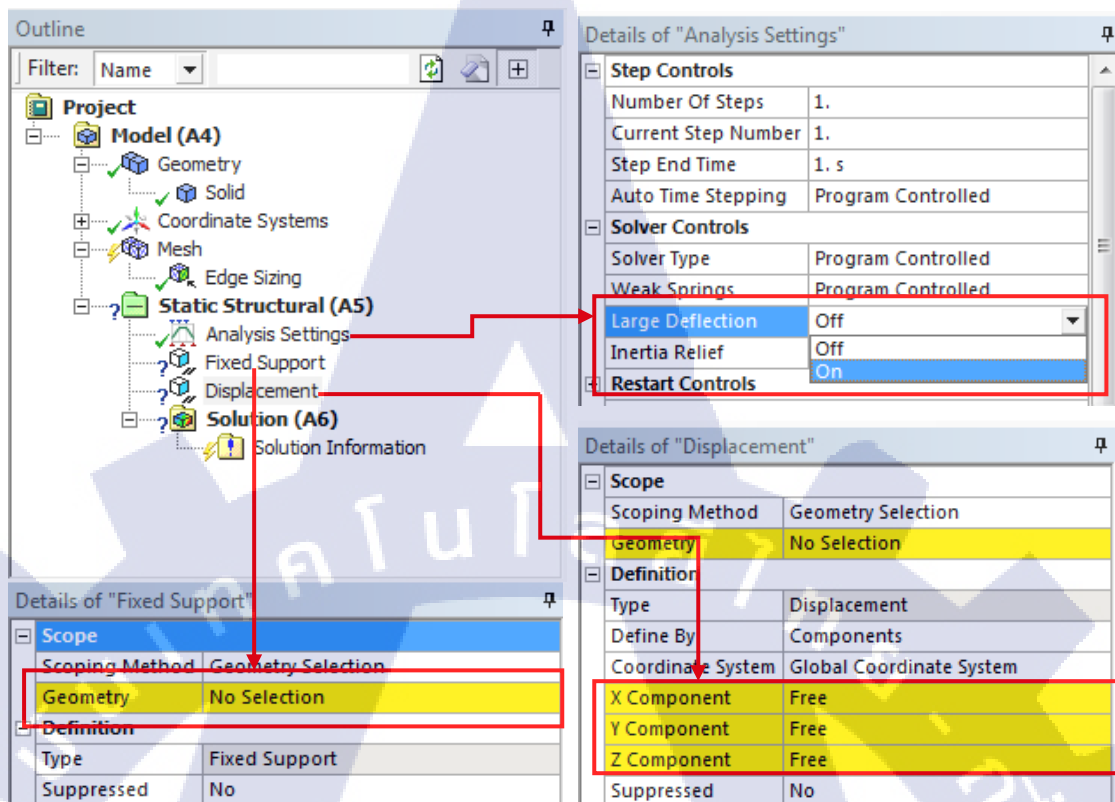


รูปที่ ค.12 แบบจำลองหลังทำการสร้าง Mesh

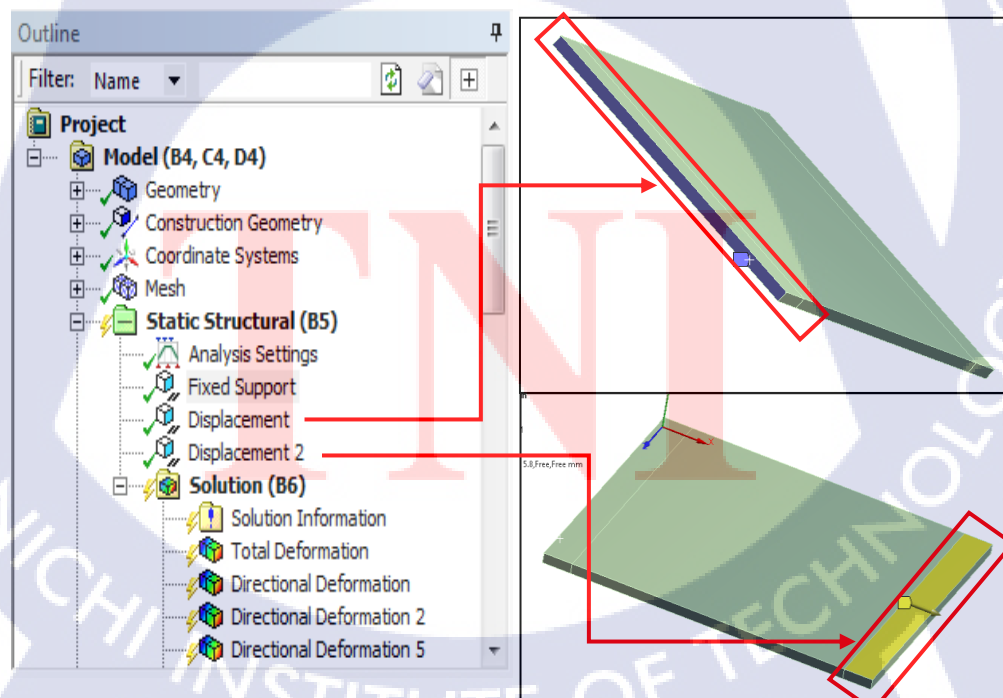
#### ค.1.4 Setup

ขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดสภาวะให้กับแบบจำลอง โดยคลิกขวาที่หัวข้อ Static Structural เลือก insert จากนั้นเลือกสภาวะที่ต้องการใช้ โดยสำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดสภาวะดังรูปที่ ค.13 และ ค.14

1. หัวข้อ Analysis Settings จะเป็นการตั้งค่าต่างๆสำหรับการวิเคราะห์ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือก Large Deflection เปลี่ยนเป็น On เป็นการเลือกใช้สำหรับวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก
2. Fixed Support เป็นการกำหนดให้บริเวณหนึ่งอยู่นิ่งกับที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางต่างๆ
3. Displacement เป็นการกำหนดระยะการเคลื่อนที่ออกไปตามแนวแกนต่างๆ



รูปที่ ค.13 ขั้นตอนการกำหนดสภาวะ

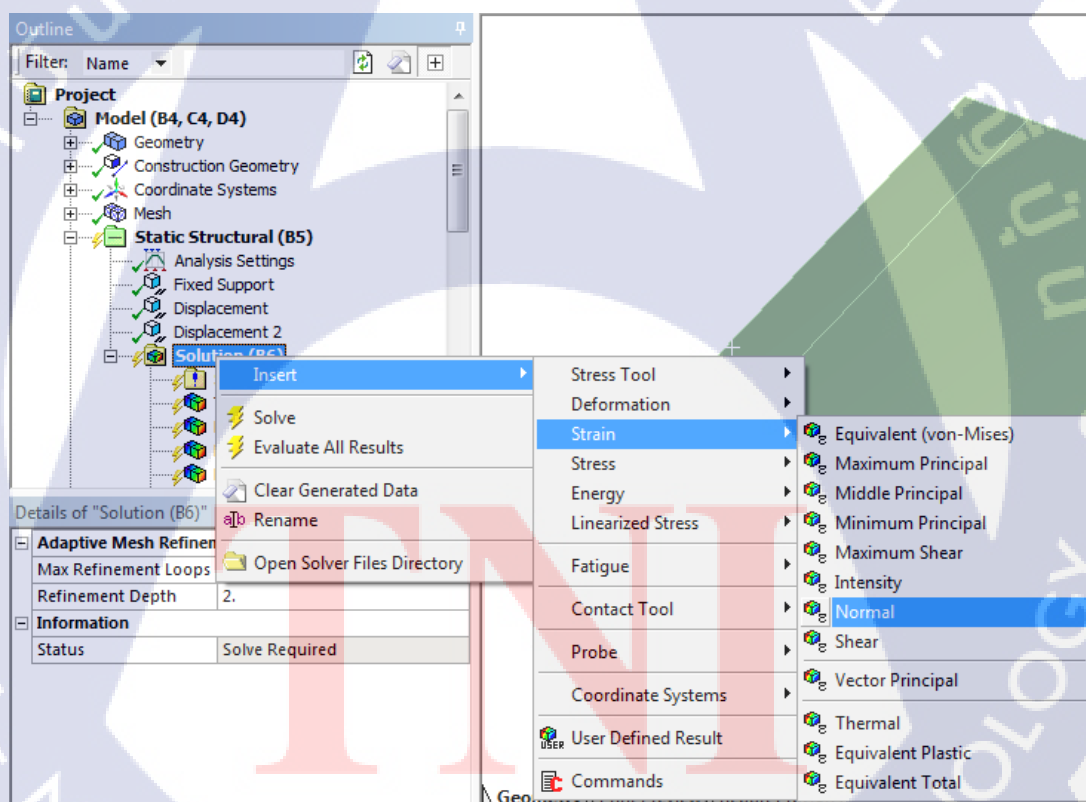


รูปที่ ค.14 ขั้นตอนการกำหนดบริเวณของ Fix Support และ Displacement

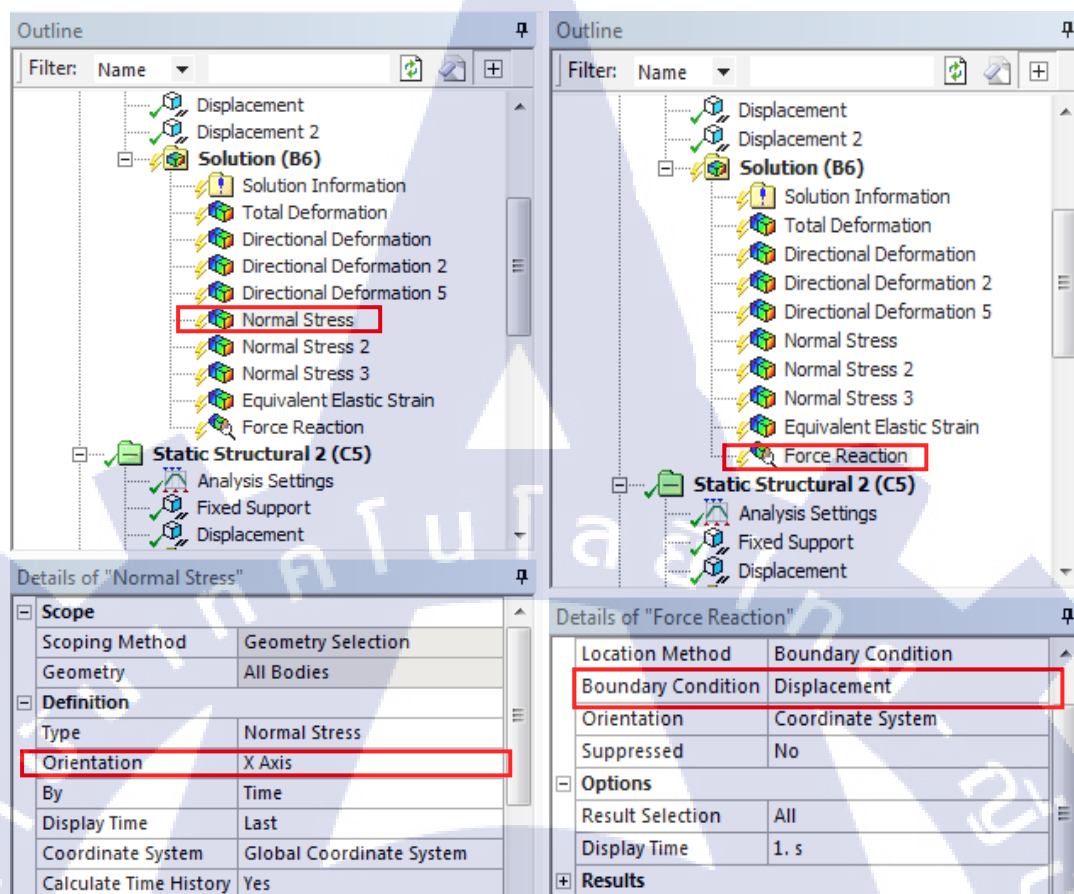
### ค.1.5 Solution

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์ ในหัวข้อ Solution คลิกขวา เลือก insert ซึ่งจะพบหน้าต่างของพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกพารามิเตอร์ที่สนใจดังนี้

1. Normal Stress โดยกำหนด Orientation เป็นแกน X เนื่องจากทำการดัดงอในแนวแกน X
2. Normal Strain โดยกำหนด Orientation เป็นแกน X เนื่องจากทำการดัดงอในแนวแกน X
3. Force Reaction โดยกำหนดในหัวข้อ Boundary Condition เป็น Displacement เพื่อดูแรงกระทำรวมที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจากผลของการดัดงอ



รูปที่ ค.15 ขั้นตอนการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์



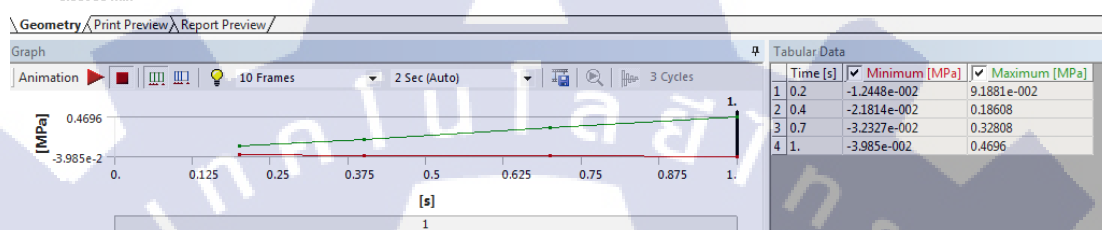
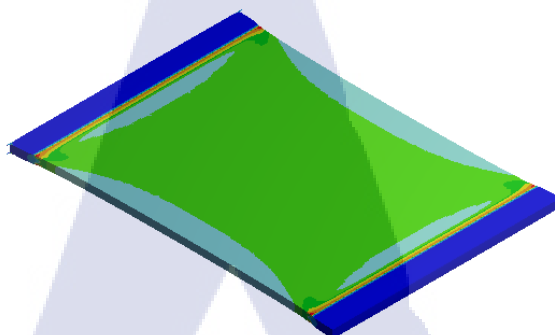
รูปที่ ค.16 ขั้นตอนการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์

#### ค.1.6 Results

เมื่อทำการกำหนดสภาวะสำหรับแบบจำลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม โดยการคลิกคำสั่ง Solve จากนั้นโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ผลการจำลองจากสภาวะที่ได้ตั้งค่าไว้ และจะปรากฏหน้าต่าง ANSYS Workbench Solution status ขึ้น เพื่อแสดงขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรม เมื่อโปรแกรมประมวลผลเสร็จสมบูรณ์ หน้าต่าง ANSYS Workbench Solution Status ก็จะหายไปและสามารถดูผลการทดลองที่เราเลือกในหัวข้อ Solution ได้ดังรูปที่ ค.17

B: sheet 20% strain  
 Normal Stress  
 Type: Normal Stress(X Axis)  
 Unit: MPa  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 1/29/2015 5:03 PM

0.4696 Max  
 0.35047  
 0.27105  
 0.225  
 0.2082  
 0.1982  
 0.18879  
 0.17804  
 0.16159  
 0.060871  
 -0.03985 Min



รูปที่ ค.17 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS

ภาคผนวก ง.

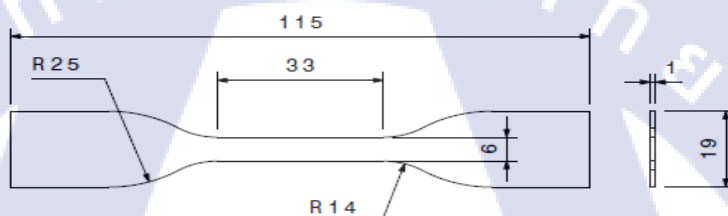
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 และ ASTM D412

TNI

### ง.1 สมบัติแรงดึงของพลาสติก (ASTM D638)

มาตรฐาน ASTM D638 เป็นมาตรฐานที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อกำหนดรูปแบบและสภาวะสำหรับการหาสมบัติแรงดึงของพลาสติกและพลาสติกเสริมแรง สมบัติแรงดึงเหล่านี้ได้แก่ มอดูลัส ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเครียดที่จุดแตกหัก โดยชิ้นงานทดสอบจำเป็นต้องขึ้นรูปให้มีขนาดและรูปทรงเป็นไปตามมาตรฐานเพื่อให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำมากที่สุด โดยจะแบ่งรูปแบบการขึ้นรูปไปตามประเภทวัสดุของชิ้นงาน โดยมีรูปทรงต่างๆ เช่น ดัมเบลล์ (Types I – V), แบบแท่ง หรือท่อทรงกระบอก

ซึ่งสำหรับในงานวิจัยนี้ กลุ่มประเภทของวัสดุนั้นจัดอยู่ในกลุ่มของ Nonrigid Plastic และมีความหนาของชิ้นงานไม่เกิน 4 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ Type IV มีรูปร่างและขนาดตามรูปที่ ง.1 และตารางที่ ง.1



รูปที่ ง.1 สัดส่วนชิ้นงานทดสอบ Type IV

ตารางที่ ง.1 สัดส่วนของชิ้นงานทดสอบ Type IV

| Dimensions (see drawings)                  | 4 (0.16) or under     |                       |
|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                            | Type IV <sup>B</sup>  | Type V <sup>C,D</sup> |
| W – width of narrow section <sup>E,F</sup> | 6 (0.25)              | 3.18 (0.125)          |
| L – Length of narrow section               | 33 (1.30)             | 9.53 (0.375)          |
| WO – width overall, min <sup>G</sup>       | 19 (0.75)             | -                     |
| WO - width overall, min <sup>G</sup>       | -                     | 9.53 (0.375)          |
| LO – Length overall, min <sup>H</sup>      | 115 (4.5)             | 63.5 (2.5)            |
| G – Gage length <sup>I</sup>               | -                     | 7.62 (0.300)          |
| G – Gage length <sup>I</sup>               | 25 (1.00)             | -                     |
| D – Distance between grips                 | 65 (2.5) <sup>J</sup> | 25.4 (1.0)            |
| R – Radius of fillet                       | 14 (0.56)             | 12.7 (0.5)            |
| RO – outer radius (Type IV)                | 25 (1.00)             | -                     |

ในขั้นตอนของการทดสอบนั้น จะทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในรูปแบบต่างๆได้ อาทิ การดึงยืด , การกดอัด , การบิดงอ เป็นต้น สำหรับในการทดสอบการดึงยืดย่นนั้น อุปกรณ์ที่สำคัญเพื่อให้ได้ข้อมูลทดสอบที่แม่นยำคือการเลือกใช้ extensometer ที่มีความละเอียดและแม่นยำ เพื่อให้วัดค่าความเครียดได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกมักจะประกอบด้วยส่วนของอีลาสติกแบบเชิงเส้นและส่วนของพลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น บริเวณส่วนของเชิงเส้นนั้นจะเกิดขึ้นที่ค่าความเครียดต่ำมากและเนื่องจากค่ามอดูลัสจะตรวจวัดที่ในบริเวณนี้ การใช้ extensometer ที่มีความละเอียดสูงจึงมีความจำเป็น

สำหรับการทดสอบแรงดึงของวัสดุประเภทยางและอีลาสโตเมอร์นั้นจะมีข้อแตกต่างและข้อจำกัดของการทดสอบ ซึ่งจะแตกต่างจากวัสดุพลาสติกทั่วไปดังนั้นจึงต้องอาศัยมาตรฐาน ASTM D412 เพิ่มเติมในการกำหนดสภาวะในการทดสอบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

## ง.2 การทดสอบแรงดึงของยางและอีลาสโตเมอร์ (ASTM D412)

สำหรับมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของยางและอีลาสโตเมอร์ ASTM D412 นั้นจะครอบคลุมวัสดุประเภทต่าง ๆ ทั้งเทอร์โมเซต (วัลคาไนซ์) และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ สมบัติวัสดุที่มักถูกวัดในการทดสอบแรงดึงได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด, การยืดตัว ณ จุดขาด, ความเค้นที่ระยะยืดตัวที่กำหนด, การยืดตัวที่ความเค้นที่กำหนด, ความเค้นคราก และการยืดตัวที่จุดคราก

เนื่องจากยางและอีลาสโตเมอร์นั้นสามารถยืดตัวได้สูง ทำให้อุปกรณ์ extensometer ที่ใช้งานนั้นจะต้องสามารถที่จะวัดการยืดตัวได้อย่างแม่นยำในขณะที่ที่ชิ้นงานได้รับแรง นอกจากการเลือก extensometer ที่เหมาะสมแล้ว การเลือกอุปกรณ์จับยึดและพื้นผิวปากจับที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์จับยึดแบบ pneumatic side-acting ที่มีพื้นผิวปากจับแบบสันนูนหรือเคลือบด้วยยางนั้นเหมาะสม แรงจับยึดที่คงที่ของอุปกรณ์จับยึดนี้จะป้องกันการลื่นหลุดของชิ้นงานทดสอบในระหว่างการทดสอบ

สำหรับอัตราการดึงยืดชิ้นงานก็มีส่วนสำคัญกับความแม่นยำของข้อมูลเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อัตราการดึงที่ 100 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งตรงตามมาตรฐานที่กำหนดเนื่องจากสำหรับวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์นั้นสามารถดึงยืดออกได้มาก ดังนั้นถ้าเลือกใช้อัตราการดึงยืดที่น้อยจะไม่สามารถแสดงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุได้อย่างแม่นยำและใช้เวลาในการทดสอบนาน ดังนั้นอัตราที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 – 500 มิลลิเมตร/นาที