



การออกแบบวิธีการหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแบบไม่ทำลาย
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์



โดย
ธามัน ตูบรרתิง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์
วิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต
ปีการศึกษา 2566



**DESIGN A NON-DESTRUCTIVE METHOD TO DEFINE MATERIAL
CONSTANTS BY USING FINITE ELEMENT
WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

BY

THAMAN TOOBUNTERNG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN
BIOMEDICAL ENGINEERING
COLLEGE OF BIOMEDICAL ENGINEERING**

GRADUATE SCHOOL, RANGSIT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2023

วิทยานิพนธ์เรื่อง

การออกแบบวิธีการหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแบบไม่ทำลายโดย
ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์

โดย

ชามัน ตู้บรรเทิง

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2566

ดร.พิชญ์สิทธิ สุวรรณแพทย์

ประธานกรรมการสอบ

รศ.นันทชัย ทองแป้น

กรรมการ

ผศ. ดร.จรูญรัตน์ ปริญญาคุปต์

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร.ชากริต สุวรรณจำรัส

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ร.ต.หญิง ดร. วรณี สุขสาคร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

4 กันยายน 2566

Thesis entitled

**DESIGN A NON-DESTRUCTIVE METHOD TO DEFINE MATERIAL CONSTANTS BY
USING FINITE ELEMENT WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

by

THAMAN TOOBUNTERNG

was submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering in Biomedical Engineering

Rangsit University
Academic Year 2023

Phitsini Suvarnaphaet, Ph.D.

Examination Committee Chairperson

Assoc. Prof. Nuntachai Thongpance

Member

Asst. Prof. Jaronrut Prinyakupt, Ph.D.

Member and Advisor

Assoc. Prof. Chakrit Suvanjumrat, Ph.D.

Member and Co-Advisor

Approved by Graduate School

(Asst.Prof.Plt.Off. Vanee Sooksatra, D.Eng)

Dean of Graduate School

September 4, 2023

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดีเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรูญรัตน์ ปริญาคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร. ชาคริต สุวรรณจรัส อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความเอาใจใส่ช่วยเหลือ และคอยให้คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ดร. พิชญ์สิทธิ สุวรรณแพทย์ และ รศ. นันทชัย ทองแป้น ที่ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ดร. เบญจรัตน์ แสงทอง และคณะกายภาพบำบัด มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ได้ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยให้กำลังใจและให้โอกาสการศึกษา แก่ผู้จัดทำจนทำให้มีโอกาสในการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาลัยวิศวกรรมชีวิตการแพทย์ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ดร. ณัฐกานต์ เกาศล ที่คอยประสานงานและอำนวยความสะดวกในการศึกษาในระดับปริญญาโทให้มีความราบรื่น จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ นาย ศิวกร ภักดี ที่คอยให้ความช่วยเหลือและสอนด้านการใช้งานโปรแกรม เป็นผลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ความรู้และประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอขอบความดีที่ได้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธามัน ตู้บรรเทิง
ผู้วิจัย

6508768 : ชามัน ตู้บรรเทิง
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบวิธีการหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแบบไม่ทำลายโดยใช้
 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์
 หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.จตุรนต์ ปริญญุคุปต์
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ชาคริต สุวรรณจำรัส

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลอง
 ระยะเวลาการยุบตัวของวัสดุโฟมมาตรฐานที่ใช้สำหรับการทดสอบการทรงตัวทางคลินิก (CTSIB) และ
 ใช้ปัญญาประดิษฐ์ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียมและวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาคุณสมบัติทางกล
 ของวัสดุโฟมมาตรฐานเพื่อลดการสูญเสียวัสดุที่ถูกนำไปใช้ในการหาคุณสมบัติเชิงกลด้วยวิธีตาม
 ประกติ โดยผลของงานวิจัยบ่งชี้ว่า โมเดลออกแบบ มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมของโฟม มาตรฐาน
 จึงถูกใช้ในการจำลองระยะเวลาการยุบตัว และข้อมูลจากการจำลองจะถูกใช้ในการสอนโครงข่าย
 ประสาทเทียม การใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการเรียนรู้มีความแม่นยำในการทำนายระยะเวลาการ
 ยุบตัวของวัสดุใกล้เคียงกับระยะเวลาการยุบตัวที่ถูกคำนวณจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ
 เมนต์และวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถแสดงค่าคงที่ ซึ่งให้ผลลัพธ์การทำนายด้วยโครงข่ายประสาท
 เทียมมีระยะเวลาการยุบตัวของโฟมมาตรฐานที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากการทดสอบการกดบนวัสดุโฟม
 ทางคลินิก อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการยุบตัวที่ได้จากการทดสอบการกดบนวัสดุจริง
 เทียบกับผลลัพธ์ระยะเวลาการยุบตัวที่ได้จากการหาค่าข้อมูลซึ่งมาจากวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่ามีค่าความ
 คลาดเคลื่อนเฉลี่ย ± 0.75 เซนติเมตร

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 55 หน้า)

คำสำคัญ: โฟมมาตรฐาน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, โครงข่ายประสาทเทียม, วิธีเชิงพันธุกรรม

ลายมือชื่อนักศึกษา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

6508768 : Thaman Toobunterng
 Thesis Title : Design a Non-destructive Method to Define Material Constants by Using
 Finite Element Analysis with Artificial Intelligence
 Program : Master of Engineering in Biomedical Engineering
 Thesis Advisor : Asst. Prof. Jaroonrut Prinyakupt, Ph.D.
 Thesis Co-Advisor : Assoc. Prof. Chakrit Suvanjumrat, Ph.D.

Abstract

This study aims to simulate the vertical displacement of a conventional foam material used for clinical stability testing (CTSIB) by employing the finite element method and artificial intelligence incorporates artificial neural networks and genetic algorithm for determining the mechanical properties of conventional foam materials in order to reduce the number of materials lost by traditional methods. The findings revealed that the Ogden model approximates the behavior of conventional foam; consequently, it is used to simulate the distance of slump, and simulation data are used to train the artificial neural network. The accuracy of predicting the vertical displacement of the material is comparable to the vertical displacement calculated from the finite element method simulation, and the genetic algorithm is capable of producing a constant value. The artificial neural network has a conventional foam vertical displacement that is comparable to the outcomes of a clinical foam compression test. However, the mean deviation between the vertical displacement obtained from the compression test on the actual material and the vertical displacement result derived from the genetic method data set was ± 0.75 cm.

(Total 55 pages)

Keywords: Conventional foam, finite element, artificial neural networks, genetic algorithm

Student's Signature Thesis Advisor's Signature
 Thesis Co-Advisor's Signature

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 คำถามการวิจัย / สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	4
1.6 นิยามศัพท์	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	25
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	25
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	27
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	37
4.1 การทดสอบการกดบนวัสดุจริง	37
4.2 การจำลองการทดสอบการกดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	39
4.3 การหาค่าคงที่ของวัสดุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีเชิงพันธุกรรม	44
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม	50
ประวัติผู้วิจัย	55



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแสดงระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย	4
2.1 เปรียบเทียบความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมและตามจริง	12
3.1 ตารางแสดงการสร้างโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรมแต่ละชนิด	31
3.2 ตารางแสดงโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม	34
3.3 ตารางแสดงชนิดขององค์ประกอบโครงสร้างวิธีเชิงพันธุกรรม	36
4.1 ผลการทดสอบการกดบนวัสดุโฟมทางคลินิก โดยใช้แรงขนาดต่าง ๆ	37
4.2 ตารางแสดงค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของแรงขนาดต่าง ๆ	38
4.3 ตารางแสดงค่าคงที่และระยะการยุบตัวที่สัมพันธ์กันจากระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	41
4.4 ตารางแสดงการจำลองลักษณะการยุบตัวของวัสดุโฟมที่แรงกดขนาดต่าง ๆ จากโปรแกรม MSC Marc	42
4.5 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของชุดโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่ 1 ในแต่ละแรงที่ใช้ในการกดวัสดุโฟมของแบบจำลอง	44
4.6 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนของระยะการยุบตัวของค่าคงที่แต่ละชุด	45
4.7 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนของระยะการยุบตัวของค่าคงที่แต่ละชุด	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน
2.1	การทำงานของ การตอบสนองของลูกตาต่อการทรงตัว
2.2	ห้องหูชั้นใน (Labyrinth of the inner ear)
2.3	ภาพแบบจำลองชนิดของปัญญาประดิษฐ์
2.4	ภาพแสดงการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากเซลล์ประสาทของมนุษย์
2.5	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย
3.2	แผนภาพแสดงลำดับวิธีการจัดทำโครงการ
3.3	ภาพแสดงการวางตุ้มน้ำหนักและตำแหน่งการวัดบนโคม
3.4	ภาพแสดงโมเดลเท้าจำลองที่ผลิตจากวัสดุพลาสติก
3.5	ภาพแสดงโคมมาตรฐานสำหรับ CTSIB
3.6	ภาพแสดงเวอร์เนียไฮเกจ
3.7	ภาพแสดงระดับน้ำ
3.8	ภาพแสดงตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน
3.9	ภาพแสดงโมเดลโคมที่ใช้ในการจำลองการทดสอบ
3.10	แสดงการจำลองการทดสอบที่เวลา 0 วินาที และเวลา 44 วินาที เมื่อใช้แรง 1050 N ผลลัพธ์ของการจำลอง การทดสอบการกดจะถูกนำมาใช้ในการสอนปัญญาประดิษฐ์ และใช้วิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาค่าคงที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถทำให้โคมในแบบจำลอง แสดงระยะการยุบตัวใกล้เคียงกับการยุบตัวของโคมทางคลินิก
3.11	แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่าคงที่ของวัสดุด้วยโครงข่ายประสาทเทียม และวิธีเชิงพันธุกรรม
3.12	โครงข่ายประสาทเทียม
3.13	โครงสร้างวิธีเชิงพันธุกรรม

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการยุบตัวและน้ำหนักที่ใช้ในการกดบนโคมทางคลินิก	38
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุโคมทางคลินิกจากการทดสอบการกด	39
4.3	กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัสดุโคมทางคลินิกจากการทดสอบการกด เทียบกับโมเดลพฤติกรรมไฮเปออีลาสติก (ก) โมเดลแบบนีโอ-ฮุกเกียน(ข) โมเดลของมูนนี่-ริฟลินอนุพันธ์ลำดับ 2 (ค) โมเดลของมูนนี่-ริฟลินอนุพันธ์ลำดับ 3 (ง) โมเดลของออกเดน(จ) โมเดลของโยห์	40
4.4	กราฟเปรียบเทียบระยะการยุบตัวที่แรงขนาดต่าง ๆ ของชุดข้อมูลที่ 4 6 และ 12 เทียบกับวัสดุโคมทางคลินิก	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยจำนวนประชากรภายในประเทศไทย มีจำนวนผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยผลสำรวจปริมาณผู้สูงอายุภายในประเทศไทย ปีพุทธศักราช 2565 พบว่ามีจำนวนมากกว่าปริมาณประชากรที่อายุต่ำกว่า 15 ปี ซึ่งประชากรผู้สูงอายุมีจำนวน 12,519,926 คน โดยคิดเป็น 18.94% ของประชากรทั้งหมด ปัญหาสำคัญที่มักจะมีพบในผู้สูงอายุคือ ปัญหาการทรงตัว โดยมีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพของอวัยวะสำคัญในระบบประสาทการทรงตัว ระบบการทำงานของอวัยวะเหล่านี้จะเสื่อมถอยลงตามอายุที่เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาการหกล้มภายในผู้สูงอายุโดยปัญหาดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญอันดับสองของการเสียชีวิตอย่างไม่ได้ตั้งใจ รองจากการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน จากการศึกษาความชุกของการพลัดตกในปี พ.ศ.2564 ประชากรเพศหญิงมีอัตราเสี่ยงในการเกิดการหกล้มสูงกว่าเพศชาย 1.5 เท่า โดยเพศหญิงร้อยละ 55 จะเกิดการหกล้มภายในบ้าน ขณะที่เพศชายจะหกล้มภายนอกบ้าน โดยปัญหาเหล่านี้มักจะเกิดรอยแผลตามมา ซึ่งค่าใช้จ่ายในการป้องกันการหกล้มที่สูงขึ้น (Lee & Yu, 2020) รวมถึงรักษาภายในผู้สูงอายุที่หกล้มมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนทั่วโลก (Florence et al., 2018)

การควบคุมท่าทางภายใต้จิตใจสำนึก (Postural Control) จึงเป็นลักษณะที่ใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมร่างกายเพื่อให้อยู่ในสภาพที่สมดุล โดยสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบทั้งขณะเคลื่อนไหว (Dynamic) และหยุดนิ่ง (Static) ซึ่งการวิเคราะห์ขณะเคลื่อนไหวสามารถวัดได้มีความสมจริงที่มากกว่าเนื่องจากการวัดที่มาจากรูปแบบของกิจกรรมในแต่ละวันได้ แต่ก็มีข้อเสียคือต้นทุนในการประเมินสูง ทั้งยังใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่จึงยากต่อการพกพา (Wade, Davis, & Weimar, 2014) ในขณะเดียวกัน การวัดชนิดอยู่กับที่ มีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าและยังสามารถพกพาได้สะดวกแต่ก็มีข้อเสียคือค่าความแม่นยำที่ลดลง (Hong, Park, Kwon, Kim, & Koo, 2014)

การทดสอบการรักษาสมดุลการทรงตัวของร่างกายจึงจำเป็นอย่างมากในการประเมินการทรงตัวในผู้สูงอายุ เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดการล้ม ซึ่งวิธีที่ใช้ในการทดสอบ มีหลากหลายวิธี และวิธี Clinical Test of Sensory Integration and Balance (CTSIB) เป็นรูปแบบหนึ่งของการทดสอบระบบประสาทที่เกี่ยวข้องกับการทรงตัว ลักษณะการทดสอบประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 4 ขั้นตอน โดยความแม่นยำของผลการทดสอบขึ้นอยู่กับชนิดของโฟม (Chaikereee, Saengsirisuwan, Chinsongkram, & Boonsinsukh, 2015) โฟมที่ถูกใช้เป็นมาตรฐานในการประเมิน ปัจจุบันมีราคาสูง และจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงได้มีการหาวัสดุทดแทนที่สามารถหาได้จากภายในประเทศ และลดต้นทุนการนำเข้าจากต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดออกแบบวิธีที่ใช้ในการหาคุณสมบัติของโฟมดังกล่าวได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ในการหาคุณลักษณะเฉพาะของโฟม เพื่อนำไปใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่มีความใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่เป็นมาตรฐาน และสามารถผลิตได้ภายในประเทศไทยต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุโฟมมาตรฐาน
- 1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ในการหาค่าคงที่ของโมเดลคุณสมบัติทางกลที่เลือกใช้ ของวัสดุโฟมมาตรฐาน

1.3 คำถามการวิจัย / สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1 โฟมมาตรฐานที่ใช้มีลักษณะพฤติกรรมของคุณสมบัติเชิงกลเป็นแบบโมเดลไฮเปออิลาสติก
- 1.3.2 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์สามารถหาค่าคงที่ของวัสดุที่มีความใกล้เคียงกับค่าคงที่ของแบบจำลองของโฟมมาตรฐาน

1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)									
	ปี 2565 - 2566									
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
1.ศึกษาหัวข้อโครงการ										
2.รวบรวม ค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ										
3.ทดลองการกด และบันทึกผลจากวัสดุจริง										
4.สร้างโมเดลสำหรับการจำลองการทดสอบ										
5.เสนอหัวข้อโครงการ										
6.จำลองการกดด้วยระเบียบวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์										
7.สอบโครงร่างงานวิจัย										
8.หาแหล่งข้อมูลวัสดุด้วยปัญญาประดิษฐ์และวิธีเชิงพันธุกรรม										
9.ตรวจสอบความถูกต้องของค่าคงที่										
10.วิเคราะห์ผล										
11.ทำรูปเล่มในส่วนขอบบทที่ 4 และ 5										
12.สอบป้องกันวิทยานิพนธ์										
14.ปรับปรุงและแก้ไขรูปเล่ม										
15.ส่งต้นฉบับวิทยานิพนธ์ระดับสมบูรณ์										

1.6 นิยามศัพท์

สมมูลการทรงตัว หมายถึง การรักษาสภาพการทรงตัวของร่างกายให้สามารถทำกิจวัตรได้อย่างปกติ โดยอาศัยประสาทรับรู้ของร่างกาย

โพลีทางคลินิก หมายถึง แผ่นโพลีมาตรฐานที่ใช้ในการวัดการทรงตัวด้วยวิธีทางคลินิก

การทดสอบการกด หมายถึง วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติการเสีรูปของวัสดุโดยวัดจากระยะการยุบตัวของโพลีทางคลินิก

ไฟไนต์เอลิเมนต์ หมายถึง วิธีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม โดยการจำลองการทดสอบ ด้วยการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุตามจริง

โครงข่ายประสาทเทียม หมายถึง ระบบคอมพิวเตอร์ที่คำนวณจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองการทำงานโครงข่ายประสาทชีวภาพที่อยู่ในสิ่งมีชีวิต สามารถเรียนรู้จากสิ่งที่มอบหมายได้

วิธีเชิงพันธุกรรม หมายถึง วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยใช้หลักการเลียนแบบการอยู่รอดภายใต้ธรรมชาติ หรือแนวคิดการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ซึ่งจะให้คำตอบที่มีความเหมาะสมมากที่สุดขึ้นอยู่กับสมการความเหมาะสม



บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

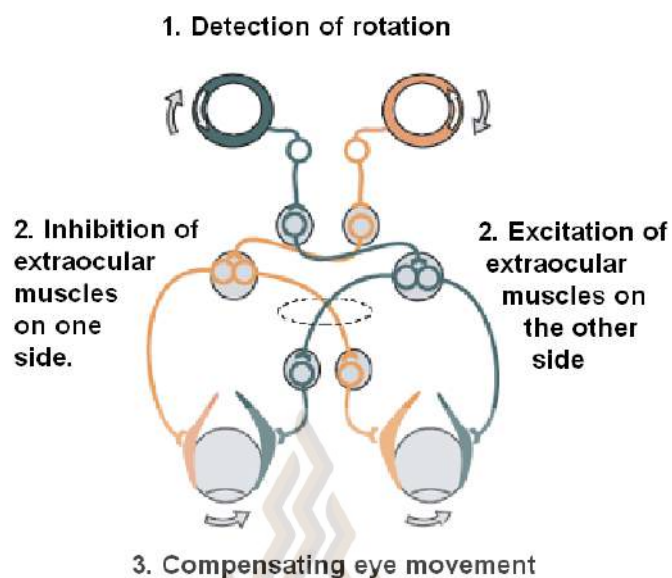
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การรับรู้ดุลของร่างกาย (Sense of Balance)

การรับรู้ดุลของร่างกายเป็นการรับรู้โดยอาศัยประสาทสัมผัสการทรงตัวซึ่งช่วยให้มนุษย์สามารถทรงตัวในทุกอิริยาบถทั้งขณะหยุดนิ่งหรือเคลื่อนไหว โดยอาศัยระบบการรับรู้ของอวัยวะรับสัมผัสจากนั้นจึงประมวลผ่านสมองและไขสันหลังแล้วจึงตอบสนองต่อการทรงตัวเพื่อป้องกันการหกล้ม โดยอวัยวะรับสัมผัสที่มีส่วนช่วยในระบบประสาทการทรงตัวประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

2.1.1.1 ระบบประสาทการมองเห็น (Visual System)

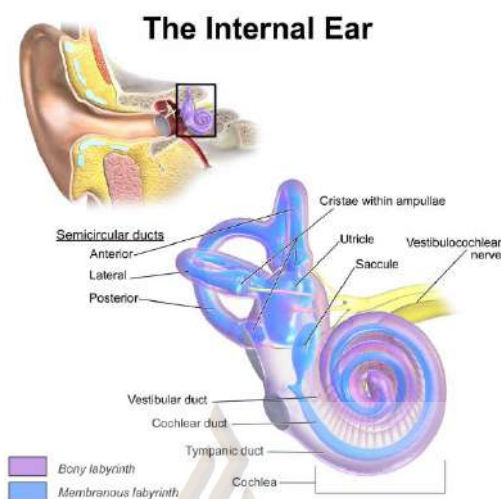
มีส่วนสำคัญในการทรงตัวเนื่องมาจากการตอบสนองของจอประสาทตา ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับข้อมูล โดยอาศัยการป้อนข้อมูลสภาพแวดล้อม เช่นความสามารถในการรับรู้ความลึก หรือ ระยะห่างจากตัว จากนั้นจะส่งข้อมูลเหล่านี้กลับสู่สมอง (Feedback) ตัวอย่างการตอบสนอง (Reflex) ของการเคลื่อนไหวตาเพื่อสร้างเสถียรภาพการมองเห็นคือ Vestibulo-ocular Reflex (VOR) โดยจะมีการเคลื่อนไหวของลูกตา ขดเชยการขยับของศีรษะ ดังนั้นระบบการเห็นจะมีส่วนสำคัญในการทรงตัวมากกว่าระบบที่เหลือทั้งสอง (Hansson, Beckman, & Hakansson, 2010) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบการมองเห็นจึงส่งผลต่อการทรงตัวได้ด้วย ตัวอย่างเช่น อายุที่มากขึ้นส่งผลให้ระบบการมองเห็นเสื่อมลง โดยอ้างอิงจากงานวิจัยในปี 1991 ของทีสเซล และคณะได้ทำการเปรียบเทียบการทรงตัวของผู้ใหญ่วัยชราและกลุ่มควบคุมวัยเยาว์ พบว่ากลุ่มควบคุมวัยเยาว์สามารถควบคุมการทรงตัวได้ดีกว่าผู้ใหญ่วัยชรา เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การทำงานของการตอบสนองของลูกตาต่อการทรงตัว
ที่มา: วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2566

2.1.1.2 ระบบประสาทการมองเห็น (Visual System)

เป็นระบบที่เกิดจากระบบของอวัยวะภายในหูชั้นใน (Inner Ear) ประกอบไปด้วย ระบบหลอดครึ่งวงกลม (Semicircular Canal) ติดอยู่กับโคเคลีย (Cochlear) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบการได้ยิน หลอดครึ่งวงกลมนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวแบบหมุน และระบบอโธลิธ (Otolith) หรือหินภายใน Utricle และ Saccule ของหูชั้นใน เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวตามแนวเส้น ทำให้สามารถรับรู้การเคลื่อนไหวของร่างกาย และศีรษะ รวมถึงการรับรู้ทิศทางโดยรอบ เทียบกับแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 2.2 หูชั้นใน (Labyrinth of the inner ear)

ที่มา: วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2566

2.1.1.3 ระบบประสาทรับรู้ความรู้สึกทางกาย (Somatosensory System)

เป็นระบบรับรู้ความรู้สึกจากการสัมผัสผ่านตัวรับรู้ความรู้สึกหรือปลายประสาทรับรู้ความรู้สึก (Sensory Receptor) บริเวณผิวหนัง กล้ามเนื้อ โครงสร้างกระดูก และอวัยวะอื่น ๆ โดยอ้างอิงเฉพาะในส่วนการรักษาการทรงตัว สมองจะตอบสนองต่อสัญญาณที่ส่งผ่านตัวรับรู้ความรู้สึกและออกคำสั่งแก่กล้ามเนื้อให้มีการเคลื่อนไหวเพื่อรักษาสมดุลการทรงตัวของร่างกายและศีรษะ

2.1.2 วิธีการตรวจประเมินความสามารถในการรักษาการทรงตัว (Posturography)

เป็นการทดสอบเชิงปริมาณ (Quantitative) ของระบบการตอบสนองการทรงตัวจากก้านสมอง (Vestibulospinal Reflex) โดยมีรากฐานใกล้เคียงกับการทดสอบแบบรอมเบิร์ก (Romberg Test) ซึ่งเป็นการรวมวิธีทดสอบระบบทั้งสามของระบบการรับรู้ความรู้สึกของร่างกายเพื่อรักษาสมดุลการทรงตัว หากระบบใดระบบหนึ่งประสบปัญหา ร่างกายจะต้องพึ่งพาระบบที่เหลือในการรักษาสมดุล โดยอวัยวะในระบบดังกล่าวจะทำงานหนักขึ้น และในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการใดที่สามารถวัดแยกระบบได้ (Kung & Willcox, 2007) ในการทดสอบการจัดระบบรับสัมผัสของการรักษาการทรงตัว จะถูกดำเนินการเพื่อทดสอบการแกว่งตัวขณะยืนบนพื้นผิวที่เรียบเทียบกับพื้นผิวที่มีลักษณะกระตุ้นให้มีการตอบสนองในการรักษาการทรงตัว โดยจะทดสอบทั้งในขณะปิดตาและเปิดตาเพื่อประเมินประสาทสัมผัสการรับรู้การมองเห็นรอบทิศทาง (Sebastia-Amat, Tortosa-Martínez, &

Pueo, 2023) ในการประเมินสามารถคำนวณความเร็วการแกว่งตัวได้จากระยะเวลาการแกว่งตัวออกจากตำแหน่งเริ่มต้นของเซนเซอร์ มีหน่วยเป็น เซนติเมตร เทียบกับระยะเวลาในแต่ละตำแหน่ง โดยจะได้ผลลัพธ์มีหน่วยเป็น เซนติเมตรต่อวินาที

วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มักใช้ในการประเมินความเสี่ยงต่อการหกล้ม ซึ่งมีส่วนช่วยในการแยกแยะผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุของการรักษาการทรงตัว (Gianoli, McWilliams, Soileau, & Belafsky, 2000) ซึ่งการประเมินมักจะถูกประเมินได้ทั้งในรูปแบบอยู่กับที่ (Static) และแบบเคลื่อนไหว (Dynamic)

2.1.2.1 การประเมินการทรงตัวแบบอยู่กับที่ (Static Posturography)

เป็นรูปแบบการประเมินโดยใช้แผ่นรับน้ำหนักที่อยู่กับที่ (Fixed Platform) และดำเนินการทั้งในขณะปิดและเปิดตา เช่นการยืนบนวัสดุที่มีสภาพพื้นผิวที่แตกต่างจากพื้นเรียบแข็ง และสังเกตการแกว่งตัวของร่างกายเพื่อรักษาสสมดุลโดยเปรียบเทียบกับพื้นปกติ

2.1.2.2 การประเมินการทรงตัวแบบไดนามิก (Dynamic Posturography)

เป็นประเมินการตอบสนองต่อการทรงตัวทั้งในทิศทางไปกลับ และการหมุนบนพื้นผิวที่เหมาะสม รวมถึงประเมินโดยอาศัยทิวทัศน์โดยรอบในการประเมินระบบการมองเห็นที่มีส่วนช่วยในการรักษาสมดุลการทรงตัว ในปัจจุบันมักใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการประเมิน จึงเรียกว่า ตรวจวัดการทรงตัวด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computerized Dynamic Posturography: CDP)

2.1.3 การตรวจประเมินการทรงตัว CTSIB (The Clinical Test of Sensory Interaction for Balance)

เป็นวิธีประเมินที่ถูกออกแบบในปี 1986 โดยอาศัยการออกแบบวิธีการตอบสนองของมนุษย์ที่สัมพันธ์กับระบบรับรู้ลึก เพื่อให้ร่างกายยังคงสภาพการทรงตัวให้สามารถยืนและเคลื่อนไหวได้โดยปกติ รูปแบบวิธีนี้เป็นการจำลองสภาวะพื้นผิวและการมองเห็นที่ไม่ปกติโดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ ประกอบด้วยทั้งหมด 6 สภาวะ ใช้เวลาทั้งหมด 180 วินาที หรือ 3 นาที

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูง และใช้อุปกรณ์ไม่มาก และมีความแม่นยำของการประเมินเทียบกับระบบวิเคราะห์การเคลื่อนไหว (VICON Motion Analysis) ผลที่ได้มีความเที่ยงตรงตามสภาพที่สูง

2.1.4 มาตรฐานสากลที่ผ่านการรับรองจากสมาคม American Society for Testing and Materials (ASTM)

จากการศึกษางานวิจัยเรื่อง คุณสมบัติของแผ่นโฟมและผลกระทบต่อการประเมินการทรงตัวในอาสาสมัครที่มีน้ำหนักแตกต่างกันของ Gosselin and Fagan (2015) พบว่าการศึกษาคุณสมบัติแผ่นโฟมที่ใช้ในการประเมินการทรงตัวทางคลินิก ได้ถูกดำเนินการทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D3574-11 ซึ่งเป็นมาตรฐานวิธีการทดสอบวัสดุชนิด Flexible Cellular Materials จำพวกยูรีเทนโฟม (Urethane Foam) มีวิธีทดสอบทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ดังนี้

2.1.4.1 การประเมินการทรงตัวแบบอยู่กับที่ (Static Posturography)

เป็นวิธีที่ใช้การคำนวณความหนาแน่นจากมวลและปริมาตรของชิ้นส่วนทดสอบ โดยชิ้นส่วนต้องมีหน้าตัดเป็นวงกลมหรือสี่เหลี่ยม ปริมาตรไม่น้อยกว่า 1000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งจะต้องตัดจากบริเวณที่คาดว่าจะได้รับผลกระทบมากที่สุดและไม่มีส่วนเสียหาย การคำนวณความหนาแน่นจะถูกคำนวณในหน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$$\text{Density} = \frac{M}{V} \times 10^6 \quad (2-1)$$

เมื่อ

M คือ มวลของชิ้นส่วนตัวอย่าง (กิโลกรัม)

V คือ ปริมาตรของชิ้นส่วนตัวอย่าง (ลูกบาศก์เมตร)

2.1.4.2 การทดสอบรูปแบบ B: การทดสอบแรงที่ทำให้เกิดการเสียรูป (Indentation Force Deflection Test: IFD Test)

เป็นวิธีที่ใช้เพื่อหาแรงที่ทำให้เกิดรอยเว้าของโฟมเช่น แรงที่ความหนา 25 และ 65 เปอร์เซ็นต์ของโฟมที่ทดสอบ โดยจะใช้หัวกดกลมแบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 มิลลิเมตร ความเร็วระหว่าง 50 ถึง 250 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยโฟมที่นำมาทดสอบจะถูกวางบนฐานที่มีรูพรุนประมาณ 6.5 มิลลิเมตร ระยะระหว่างรูพรุน 20 มิลลิเมตรจากจุดศูนย์กลางของแผ่น เพื่อระบายอากาศที่เกิดขึ้นขณะทดสอบการกด นาทิ

โฟมที่ใช้ในการทดสอบควรมีความกว้างและความยาวไม่เกิน 380 มิลลิเมตร ในขณะที่ความหนาไม่เกิน 100 มิลลิเมตร จากนั้นจะบันทึกผลในรูปแบบของ แรงที่ใช้ในการกด วัสดุโฟม ณ บริเวณที่เกิดการยุบตัว 25 และ 65 เซนติเมตรจากความหนาของวัสดุที่ใช้ขณะทดสอบ

2.1.4.3 การทดสอบรูปแบบ B2: การทดสอบการยุบตัวของโฟม (Indentation Residual Gauge Length Test: IRGL)

เป็นวิธีที่ใช้เพื่อตรวจสอบระยะการยุบตัวของโฟมโดยการกำหนดแรงที่ใช้ในการกดที่ระดับต่าง ๆ ที่ความเร็วระหว่าง 50 ถึง 250 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้หัวกดมาตรฐานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 มิลลิเมตร โดยวัสดุที่นำมาทดสอบจะมีขนาดมาตรฐาน กว้าง 380 มิลลิเมตร ยาว 380 มิลลิเมตร

การรายงานผลการทดสอบจะสังเกตจากความหนาหลังจากที่ได้รับแรงกด ขนาดต่าง ๆ เป็นระยะเวลาประมาณ 57 ถึง 63 วินาที

2.1.5 ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม

ในทางวิศวกรรมและวัสดุศาสตร์ เส้นกราฟความเค้นความเครียดของวัสดุจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยได้มาจากการทดสอบการยืดและการกดบนวัสดุ เพื่อวัดการเสียรูป เส้นกราฟนี้สามารถบ่งบอกข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุได้หลายอย่าง เช่น

โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's Modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) จุดคราก (Yield Strength) เป็นต้น

การสร้างกราฟ ความเครียดจะถูกกำหนดเป็นระนาบแนวนอน (X-axis) และความเค้นจะถูกกำหนดเป็นระนาบแนวตั้ง (Y-axis) ขณะที่ทดสอบมักสันนิษฐานว่าหน้าตัดของวัสดุเกิดความเปลี่ยนแปลง โดยความเป็นจริงพื้นที่หน้าตัดจะลดลงขณะเกิดการเสียรูปเนื่องจากการเสียรูปของความยืดหยุ่นและพลาสติก ดังนั้นกราฟที่อิงพื้นที่หน้าตัดและความยาวของระยะทดสอบ (Gauge Length) เดิมเรียกว่าเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress-strain Curve) ขณะที่เส้นโค้งที่เกิดจากพื้นที่หน้าตัดและระยะพิกค ณ ช่วงเวลานั้น ๆ จะถูกเรียกว่าเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดจริง (True Stress-strain Curve)

สามารถเปรียบเทียบการคำนวณได้ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมและตามจริง

	ความเค้น (Stress)	ความเครียด (Strain)
ทางวิศวกรรม (Engineering)	$\sigma = \frac{F}{A_0}$	$\epsilon = \frac{\delta}{L_0}$
ตามจริง (True)	$\sigma_t = \frac{F}{A}$	$\epsilon_t = \ln \frac{L}{L_0}$

F คือ แรงที่กระทำต่อวัสดุ (นิวตัน)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนตัวอย่างก่อนเกิดการเสียรูป (ตารางเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนตัวอย่างเมื่อเกิดการเสียรูป (ตารางเมตร)

δ คือ ระยะยืดหรือหด (เมตร)

L_0 คือ ค่าเริ่มต้นความยาวของระยะทดสอบ (เมตร)

L คือ ค่าต่อเนื่องของความยาวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง (เมตร)

2.1.6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นวิธีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการจำลองรูปแบบพฤติกรรมโครงสร้างของวัสดุ ทางวิศวกรรมศาสตร์ ภายใต้สภาวะที่ผู้ใช้งานกำหนด เช่น แรงกด อุณหภูมิ หรือ

การไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เพื่อแก้ปัญหาระบบสมการอนุพันธ์เชิงย่อย (Partial Different) ผลลัพธ์จะเป็นค่าประมาณของโจทย์ที่กำหนดโดยคำนวณผ่านระบบคอมพิวเตอร์โดยสามารถสร้างรูปภาพจำลองพฤติกรรมในรูปแบบกราฟ ภาพ 2 มิติ และภาพ 3 มิติ

ในปัจจุบันสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านชีวกลศาสตร์มากขึ้น เพื่อจำลองผลกระทบของวัสดุต่อร่างกายมนุษย์ เช่นการกักต่อนของวัสดุที่ถูกปลูกถ่ายเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ หรือการไหลของกระแสเลือดเมื่อมีสิ่งกีดขวาง รวมถึงศึกษาผลกระทบของเนื้อเยื่อมนุษย์ที่รองรับแรงบดเคี้ยว เพื่อพัฒนาจุดบกพร่องของวัสดุ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาในระยะยาว (ณัฐ ดวงรัตนประทีป, พิมพ์เดือน รังสิยากุล, ชาย รังสิยากุล, และกุลภพ สุทธิอาจ, 2562)

2.1.7 โมเดลวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic material models)

โมเดลที่ถูกพัฒนาขึ้นจากกฎของฮุก (Hook's Law) เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear correlation) ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น วัสดุอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) และ ยาง (Rubber) โดยโมเดลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของโมเดลแบบสังเกตพฤติกรรม (Phenomenological Models) และ กลุ่มของโมเดลแบบเชิงกลระดับจุลภาค (Micromechanical Models) ตามลำดับ (ไพโรจน์ จิตธรรม, 2552)

2.1.7.1 กลุ่มของโมเดลแบบสังเกตพฤติกรรม (Phenomenological Models)

เป็นโมเดลที่ได้มาจากการสังเกตพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress and Strain) ของวัสดุคล้ายยาง

1) โมเดลแบบนีโอ-ฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)

นิยมใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงโครงสร้าง แบบเชิงเส้น (Linear Structural Finite Element Analysis) เพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่เกิดการเสียรูปอย่างมาก ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Structural Finite Element Analysis) (Rivlin, 1948)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (2-2)$$

$$G = 2C_{10} \quad (2-3)$$

เมื่อ

W คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Function)

C_{10} คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

I_1 คือ ค่าอินยงลำดับ 1

G คือ ค่ามอดูลัสเฉือน (Shear Modulus)

2) โมเดลของมูนี-ริฟลิน (Mooney-Rivlin Model)

เป็นโมเดลที่ถูกพัฒนามาจากโมเดลแบบนีโอ-ฮุกเกียนโดยความหนาแน่นของพลังงานความเครียดจะขึ้นอยู่กับค่าอินยงลำดับที่ 1 และ 2 โดยจะมีค่าอนุพันธ์แบบ 2, 3, 5 และ 9 เทอม แต่นิยมใช้คือแบบ 2 และ 3 เทอม (Rivlin, 1997)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2-4)$$

$$G = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (2-5)$$

เมื่อ

W คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงาน ความเครียด (Strain Energy Density Function)

C_{10}, C_{01} คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

I_1, I_2 คือ ค่าอินยงลำดับ 1 และ 2

G คือ ค่ามอดูลัสเฉือน (Shear Modulus)

3) โมเดลของออกเดน (Ogden Model)

เป็นโมเดลที่กำหนดให้ ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียดขึ้น อยู่กับอัตราส่วนการยืดตัว และให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุไฮโปอีลาสติคมาก เมื่อใช้โมเดลแบบ 3 เทอม โดยเทอมแรก เมื่อค่า α_1 เท่ากับ 2 จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับโมเดลของนีโอ-ฮุกเกียน ขณะที่ในเทอมที่ 2 เมื่อ α_1 เท่ากับ 2 และ α_2 เท่ากับ -2 จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับโมเดลของมูนิ-รีฟลิน (Ogden, 1973)

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} [(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3] \quad (2-6)$$

$$G = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n \alpha_n}{2} \quad (2-7)$$

เมื่อ W คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Function)

μ_n และ α_n คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

N คือ จำนวนเทอมในสมการของออกเดน (โดยทั่วไปจะนิยมใช้ไม่เกิน 3 เทอม)

G คือ ค่ามอดูลัสเฉือน (Shear Modulus)

λ คือ อัตราส่วนการยืดตัว (Stretch Ratio)

4) โมเดลของโยห์ (Yeoh Model)

เป็นโมเดลที่กำหนดให้ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียดขึ้นอยู่กับค่าขึ้นขงลำดับที่หนึ่งเท่านั้น (Yeoh, 1993)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (2-8)$$

$$G = 2(C_{10}) \quad (2-9)$$

เมื่อ	
W	คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงาน
ความเครียด (Strain Energy Density Function)	
C_{10}, C_{20} และ C_{30}	คือ ค่าคงที่ของวัสดุ
I_1	คือ ค่าอินยงลำดับที่หนึ่ง
G	คือ ค่ามอดูลัสเฉือน (Shear Modulus) มีค่าเท่ากับค่า G ของโมเดลนีโอ-ฮุกเกียน

2.1.7.2 กลุ่มของโมเดลแบบเชิงกลระดับจุลภาค (Micromechanical Models)

1) โมเดลแบบ 8 สายโซ่ (8-chain Model)

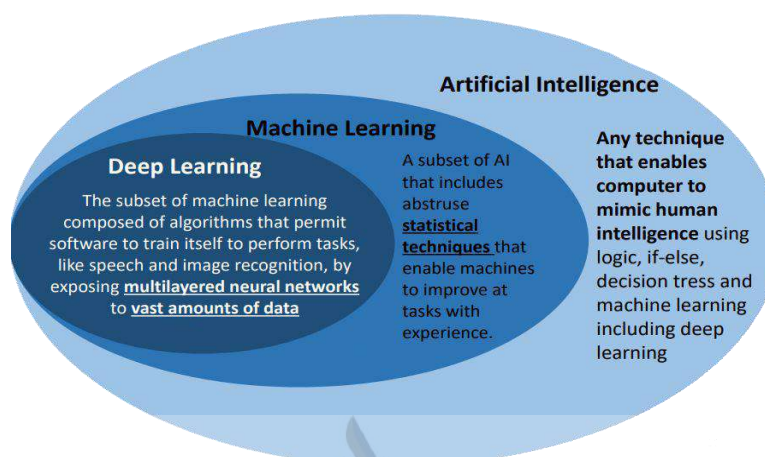
บางครั้งเรียกว่าโมเดลของอาร์รูด้า-บอยส์ (Arruda-Boyce Model) ถูกสร้างจากการอ้างอิงทฤษฎีกลศาสตร์เชิงสถิติ (Statistical Mechanics) มาอธิบายโครงสร้างของยาง โดยจำลองยางให้มีสายโซ่ 8 เส้นเรียงตัวภายในลูกบาศก์ (Arruda & Boyce, 1993)

2) โมเดลของเจนต์ (Gent Model)

เป็นแบบจำลองที่มีโครงสร้างพื้นฐานจากโมเลกุลของสารที่มีคุณสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์โดยใช้ทฤษฎี Non-Gaussian Network ในการทำนายพฤติกรรมการยืดหยุ่น (Gent, 1996)

2.1.8 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)

ระบบประมวลผลคอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่มีการวิเคราะห์เชิงลึก คล้ายมนุษย์ โดยกระบวนการเรียนรู้จะคล้ายมนุษย์ คือการเรียนรู้ผ่านกระบวนการจดจำ ทำความเข้าใจ การตอบสนอง และแก้ไขปัญหาโดยอาศัยข้อมูลจำนวนมาก เพื่อที่จะพัฒนาความฉลาดของปัญญาประดิษฐ์ จะต้องมีการอัปเดตข้อมูลใหม่ ๆ เข้าสู่ฐานข้อมูลขนาดใหญ่อยู่เสมอ จึงจะทำให้ปัญญาประดิษฐ์มีประสิทธิภาพที่จะใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ ทำนาย หรือตัดสินใจได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 2.3 ภาพแบบจำลองชนิดของปัญญาประดิษฐ์

ที่มา: Pechprasarn and Thongpan, 2019

2.1.8.1 การเรียนรู้โดยเครื่อง (Machine Learning)

เป็นเซตย่อยของปัญญาประดิษฐ์ซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ข้อมูลและนำความสามารถดังกล่าวมาใช้ในการพัฒนาตัวเองได้ โดยวิธีการเรียนรู้จะถูกแบ่งออกเป็นสามประเภทหลัก คือ

1) การเรียนรู้แบบมีการชี้นำ (Supervised Learning)

เป็นการเรียนรู้ที่ต้องมีการประมวล ไม่สามารถตอบสนองได้ทันที ต้องสอนให้โครงข่ายประสาทเทียม ได้เรียนรู้ข้อมูล และมีคำตอบของข้อมูลนั้น เมื่อสอนเสร็จจะมีการตรวจทานความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

2) การเรียนรู้แบบไม่มีการชี้นำ (Unsupervised Learning)

เป็นการเรียนรู้ที่ต้องมีการประมวล ไม่สามารถตอบสนองได้ทันที ให้เรียนรู้โดยกำหนดให้โครงข่ายประสาทจัดเรียงหรือ แบ่งข้อมูลตามลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูล

3) การเรียนรู้แบบส่งเสริม (Reinforcement Learning)

การเรียนรู้ที่สามารถตอบสนองได้ทันที โดยกำหนดเงื่อนไข เมื่อตรงเงื่อนไข หากทำตามเงื่อนไขจะได้ผลลัพธ์

2.1.8.2 การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning)

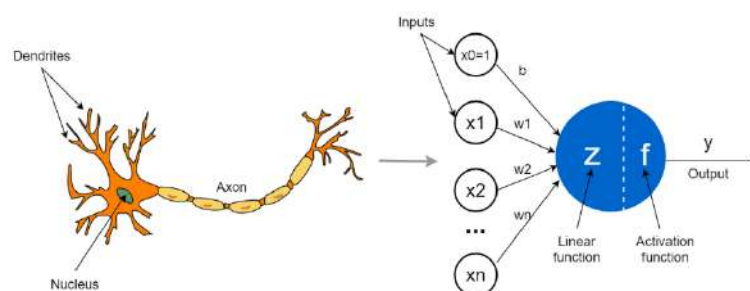
เป็นเซตย่อยของการเรียนรู้โดยเครื่อง ซึ่งเป็นการจำลองวิธีการทำงานของเซลล์ประสาทในสมอง โดยการประมวลจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) โดยให้คอมพิวเตอร์รู้จักการจดจำและเรียนรู้จากข้อมูลที่เป็นตัวอย่าง หลักการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียมจำเป็นต้องมี ข้อมูลนำเข้า (Input) เข้าสู่โครงข่ายประสาท จากนั้นจึงนำข้อมูลนำเข้ามาคูณกับน้ำหนัก (Weight) ในแต่ละขาของโครงข่ายประสาท และนำผลที่ได้ของแต่ละขามารวมกันเพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ (Threshold) ที่มนุษย์ได้กำหนดไว้ โดยแบ่งเป็นสองประเภทหลักคือ

1) การเรียนรู้แบบมีการชี้นำ (Supervised Learning)

เป็นการเรียนรู้จากข้อมูลที่นำเข้าและมีผลลัพธ์ที่ชัดเจน สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้

2) การเรียนรู้แบบไม่มีการชี้นำ (Unsupervised Learning)

เป็นการเรียนรู้จากข้อมูลนำเข้าเพียงอย่างเดียว สามารถนำไปใช้จำแนกหรือหาความสัมพันธ์ของข้อมูลได้



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากเซลล์ประสาทของมนุษย์

ที่มา: Pramoditha, 2021

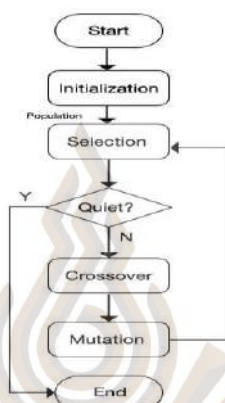
โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) เป็นหนึ่งในโครงข่ายประสาทเทียมชนิดหนึ่งที่คล้ายกับการเลียนแบบทางชีววิทยาของมนุษย์ โดยจะประมวลแต่ละพื้นที่ย่อยผ่านการแยกคุณลักษณะของข้อมูล (Features) ที่ได้รับมอบหมาย แล้วนำมาประกอบกันเพื่อแปรผลข้อมูลโดยอ้างอิงจากแนวคิดของการประมวลผลภาพ (Image Processing) คือคอนโวลูชันเชิงพื้นที่ (Spatial Convolution)

การคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันจำเป็นต้องใช้ตัวกรอง (Filter) หรือเคอร์เนล (Kernel) ในการดึงคุณลักษณะเด่นของข้อมูล และตัวกำหนดการเลื่อนตัวกรอง (Stride) ที่ทำงานร่วมกับพื้นที่ชดเชย (Padding) โดยหลักการทำงานคือตัวกรองจะถูกกรองและเลื่อนไปยังตำแหน่งถัดไปของข้อมูลนำเข้า (Input) เพื่อสร้างฟังก์ชันลักษณะ (Feature Map) ขึ้น ซึ่งค่าของตัวกำหนดการเลื่อนตัวกรอง จะทำหน้าที่ในการกำหนดขนาดของฟังก์ชันลักษณะ ตัวกำหนดการเลื่อนตัวกรองที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของฟังก์ชันลักษณะที่เล็กลง จึงมีการกำหนดพื้นที่ชดเชยขณะทำ CNN เพื่อให้ฟังก์ชันลักษณะมีขนาดเท่ากับข้อมูลนำเข้า

2.1.9 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)

เป็นวิธีการหาผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหา อาศัยหลักการทฤษฎีการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Natural Selection) หรือสิ่งที่เหมาะสมและปรับตัวได้เท่านั้นที่จะอยู่รอด วิธีดังกล่าวจะทำให้ผลลัพธ์มีความเหมาะสมกับปัญหามากที่สุด

การประยุกต์ใช้โดยคอมพิวเตอร์จะใช้เพื่อแก้ปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการสุ่มแทนค่าแล้วปรับปรุงคำตอบแต่ละชุด (Chromosome) ซึ่งจะถูกแบ่งเป็นรุ่น และสุ่มเลือกค่าจากแต่ละรุ่นมาเปลี่ยนแปลง หรือก็คือทำให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความเหมาะสมที่สุด (The Fitness Solution)



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม

ที่มา: กฤตเมธ โกชะวัง, 2564

หลักการออกแบบวิธีเชิงพันธุกรรม มักจะเริ่มต้นด้วยการสุ่มผลลัพธ์แต่ละตัวมาเป็นชุดผลลัพธ์เริ่มต้น คล้ายกับการสุ่มยีน เพื่อสร้างโครโมโซมแรกเริ่ม จากนั้นจะทำการตรวจสอบคุณภาพโครโมโซมโดยสุ่มคัดเลือกจากความเหมาะสม(Fitness) แล้วจึงทำให้เกิดการกลายพันธุ์หรือการไขว้เปลี่ยน (Cross-over) จากนั้นนำไปเข้ากระบวนการเดิมเพื่อหาโครโมโซมที่มีคุณภาพที่สุดออกมา โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจำเป็นต้องมี วิธีการแทนค่ายีนของผลลัพธ์ (Genetic Representation) และ วิธีการหาความเหมาะสม (Fitness Function) โดยคำนวณจากการแทนค่ายีนส์เพื่อคำนวณหาคุณภาพยีนของผลลัพธ์นั้น และนำยีนส์ที่มีคุณภาพไปหาความเหมาะสมในรุ่นถัดไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาความเหมาะสมของการทดสอบการทรงตัวชนิดอยู่กับที่ (Static Posturography) เนื่องจากมีความแปรปรวนในแต่ละบุคคลสูงโดยได้มีการนำโฟมมาใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบประกอบด้วยอาสาสมัครที่มีสุขภาพปกติทั้งหมด 50 คน ดำเนินการทดสอบด้วยวิธีประเมินการทรงตัวแบบอยู่กับที่ ทั้งในขณะปิดตา (Eyes Close) และขณะเปิดตา (Eye Open) บนพื้นผิวปกติ และบนโฟม โดยวิธีการทดสอบจะเป็นการนำโฟมวางวางไว้บนแผ่นรับแรง (Force

Platform) ที่มีความเสถียร โดยอ้างอิงจากผู้ผลิต ซึ่งติดตั้งทรานสดิวเซอร์รับแรงแบบสเตรนเกจ หรือ ตัวตรวจรับโหลด ทั้งหมด 3 ตัวซึ่งไวต่อรับแรงในแนวตั้ง จึงสามารถนำมาใช้ในการอธิบายการ แกว่งตัวของอาสาสมัครได้ ผลลัพธ์จากการทดสอบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนขณะทดสอบด้วยวิธี ประกิตบนพื้นผิวระนาบแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนที่มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ใช้ แผ่นโฟมจะลดค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนลดลงเหลือ 9.47 – 14.42 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจจะต้อง มีการศึกษาเพิ่มเติมจากการคำนวณของข้อมูลทางคลินิก

และงานวิจัยของ Yu and Tu (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลพื้นที่ผิวของเท้า (Foot Surface Area: FSA) และสร้างสูตรการประมาณขนาดพื้นที่ผิวของเท้า โดยใช้ข้อมูลจากข้อมูลภาพสามมิติ โดยใช้เครื่องสแกนเท้าสามมิติความละเอียดสูง ข้อมูล FSA ที่ได้จะถูกสร้างเป็นตาข่ายสามเหลี่ยม (Mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ผลลัพธ์ของการศึกษาพบว่าความยาวของฝ่าเท้าและ เส้นรอบวงของเท้าเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีค่าความผันแปรของ การตอบสนอง (R-square) เท่ากับ 95.4 เปอร์เซ็นต์ โดยสูตรคำนวณการประมาณขนาดพื้นที่ผิวของ เท้าคือ 1.043 คูณด้วยความยาวของฝ่าเท้าและเส้นรอบวงของเท้า

การศึกษาการทำทางการวางเท้าที่เหมาะสมต่อการวัดการทรงตัวโดยงานวิจัยของ Mehdikhani, Khalaj, Chung, and Mazlan (2014) ซึ่งศึกษาลักษณะการยืน โดยไม่มีการพุง (Standing Balance) ในผู้ป่วยเบาหวาน ซึ่งการยืนดังกล่าวนับว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญในการยืน และเชื่อมโยงถึงความไม่มั่นคงในการทรงตัวของผู้สูงอายุด้วย โดยการศึกษานี้ดำเนินการทดสอบ ด้วยอาสาสมัคร 36 คน แบ่งเป็นสองกลุ่มเท่ากันคือกลุ่มผู้เป็นโรคเบาหวานและกลุ่มควบคุมที่มี สุขภาพปกติ วิธีการทดสอบแบ่งทำทางการวางเท้าทั้งหมด 4 วิธีได้แก่การวางเท้าที่สบายของ อาสาสมัครแต่ละบุคคล, การวางเท้าขนานกัน, การวางเท้าชนิดส้นเท้าห่างกัน 17 เซนติเมตรและ ขอบด้านในระหว่างเท้าทั้งสองข้างทำมุม 15 องศา, การวางเท้าชนิดส้นเท้าชิด และขอบด้านใน ระหว่างเท้าทั้งสองข้างทำมุม 30 องศา โดยดำเนินการทั้งขณะปิดตา (Eyes Close) และเปิดตา (Eyes Open) ผลสรุปของงานวิจัยตีความได้ว่าตำแหน่งการวางเท้าที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความมั่นคงใน การยืนของผู้ที่มีสุขภาพปกติ ในขณะที่ในผู้ป่วยเบาหวานจะส่งผลต่อความมั่นคงในการยืนใน ทิศทางด้านข้าง (Medial-lateral Stability Index) เมื่อหลับตา

Chaikere et al. (2015) ได้ทำการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอายุและชนิด ของโฟมเมื่อทดสอบด้วยวิธี CTSIB โดยทดสอบในกลุ่มอาสาสมัครเพศหญิง เนื่องจากมีอัตราการ

ลึ้มง่ายกว่าเพศชาย ซึ่งแบ่งเป็นสองกลุ่มศึกษาตามช่วงอายุได้แก่อาสาสมัครกลุ่มวัยรุ่นและอาสาสมัครผู้สูงอายุ และชนิดของโฟมที่ใช้ในการศึกษาคือโฟมนิวโรคอม (Neurocom Foam) โฟมยางอีวีเอ (EVA Foam) เมมโมรีโฟม (Memory Foam) และโฟมฟองน้ำ (Sponge Foam) โดยทดสอบคุณสมบัติของโฟมตามมาตรฐาน ASTM D3574-11 โดยผลลัพธ์พบกลุ่มวัยรุ่นแสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกลุ่มผู้สูงอายุ เมื่อทดสอบกับโฟมนิวโรคอมและโฟมยางอีวีเอ ขณะที่เมมโมรีโฟมและโฟมฟองน้ำให้ผลคล้ายกับทดสอบบนพื้นผิวปกติ จึงสามารถสรุปได้ว่าโฟมนิวโรคอมและโฟมยางอีวีเอสามารถใช้ในการทดสอบการทรงตัวเพื่อบ่งชี้ความผิดปกติได้อย่างดีเมื่อเทียบกับโฟมอีกสองชนิด ขณะที่การทดสอบคุณสมบัติของโฟมแต่ละชนิดพบว่าค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Young's Modulus) และค่าความหนาแน่น (Density) ของโฟมนิวโรคอมมีค่ายังมอดูลัสที่มากกว่าอีวีเอโฟม เนื่องจากค่าทั้งสองส่งผลต่อการทดสอบการทรงตัว โดยยังมีค่ามาจะยังเหมาะสมต่อการทดสอบโดยอ้างอิงจากผลของความเร่งแกว่งตัวทั้งในทิศทางหน้าหลัง (Anterior-posterior Sway) และด้านข้าง (Media-lateral Sway)

Liu et al. (2017) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทดสอบการทรงตัวชนิดอยู่กับที่ด้วยการเพิ่มความหนาของโฟม กลุ่มอาสาสมัครประกอบด้วยกลุ่มควบคุมที่มีสุขภาพปกติทั้งหมด 30 คนและกลุ่มผู้มีความผิดปกติด้านการทรงตัว (Unilateral Vestibular Hypofunction: UVH) โดยทดสอบด้วยวิธี CTSIB โดยการเพิ่มจำนวนชั้นของโฟม โดยโฟมที่ใช้ 1 ชั้นมีขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และหนา 4.7 เซนติเมตร มีค่าความหนาแน่น 40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่ามอดูลัสของยังเป็น 0.0498 เมกะปาสคาล ในการทดสอบใช้ทั้งหมด 5 ชั้น ผลของงานวิจัยนี้พบว่าค่าความเร็วการแกว่งตัวออกจากจุดศูนย์กลาง (Sway Velocity of Center of Pressure: SV) ของอาสาสมัครทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นทั้งในขณะปิดตา (Eyes Close: EC) และเปิดตา (Eyes Open: EO) เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของโฟม และเวลาที่ใช้ในการทรงตัวก่อนจะตกลงจากโฟม (Standing Time Before Falling: STBF) ของกลุ่ม UVH ขณะปิดตา (EC) จะลดลงและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่า SV เมื่อเปรียบเทียบอาสาสมัครทั้งสองกลุ่มขณะเปิดตา (EO) เมื่อยืนบนโฟมมากกว่า 3 ชั้น และขณะปิดตา (EC) เมื่อยืนบนพื้นปกติและบนโฟมมากกว่า 1 ชั้นจากการวิเคราะห์ลักษณะกราฟเส้นโค้ง (Receiver Operating Characteristic Analysis: ROC Analysis) พบว่าจำนวนโฟมที่สามารถแสดงเสถียรภาพความแตกต่างระหว่างสองกลุ่มอาสาสมัครได้ดีที่สุดขณะปิดตา (EC) คือโฟมจำนวน 4 ชั้น หรือที่ความหนา 18.8 เซนติเมตร

ปัจจุบันมีโฟมสองชนิดที่มีความแม่นยำและนิยมใช้ในการทดสอบการทรงตัวในผู้สูงอายุ มีสองชนิดคือ โฟมนิวโรคอม (Neurocom Foam) และ โฟมไอเร็กซ์ (Airex Foam) อ้างอิงจากงานวิจัยศึกษาความแม่นยำของโฟมทั้งสองชนิดเมื่อทดสอบด้วยวิธี m-CTSIB ในผู้สูงอายุโดย Boonsinsukh, Khumnonchai, Saengsirisuwan, and Chaikereee (2020) ซึ่งทดสอบกับอาสาสมัครทั้งหมด 84 คนซึ่งมีอายุเฉลี่ย 69 ปี โดยแบ่งอาสาสมัครเป็นสองกลุ่มคือกลุ่มที่เคยมีประวัติการหกล้ม 12 เดือนก่อนเข้ารับการทดสอบกับกลุ่มไม่เคยมีประวัติการหกล้ม ซึ่งทดสอบภายใต้สภาวะทั้งหมด 4 รูปแบบ ใช้เวลาทั้งหมด 120 วินาที มีการใช้นาฬิกาจับเวลาและระบบอิงตามความเร่ง (Acceleration-based System) ผลจากการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way Mixed ANOVA) และการวิเคราะห์ลักษณะกราฟเส้นโค้ง (Receiver Operating Characteristic Analysis: ROC Analysis) ผลลัพธ์ของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโฟมแสดงความแตกต่างระหว่างสองกลุ่ม จากการที่ผู้ที่ไม่เคยหกล้มต้องใช้เวลามากกว่าเพื่อรักษาเสถียรภาพและมีพื้นที่แกว่งน้อยกว่าผู้ที่ล้มลง จึงแนะนำให้มีการใช้โฟมในการตรวจสอบความเสี่ยงในการหกล้ม โดยโฟมทั้งสองชนิดทำให้เกิดพื้นที่ใต้กราฟ (Area Under Curve) ที่ 0.93 ถึง 0.95 ในการจำแนกผู้ที่หกล้มและไม่เคยหกล้ม ซึ่งสามารถบ่งชี้ความแม่นยำของการทดสอบที่ 88 ถึง 89 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความไวการตอบสนองอยู่ที่ (Sensitivity) 0.80-0.92 และความจำเพาะ (Specificity) 0.88-0.95 กล่าวโดยสรุปคือโฟมทั้งสองชนิดสามารถใช้แทนกันได้ในการทดสอบด้วยวิธี m-CTSIB เนื่องจากโฟมทั้งสองชนิดสามารถบ่งชี้ผู้สูงอายุที่เคยล้มได้อย่างแม่นยำ

ในงานวิจัยจำลองการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ ได้มีการประยุกต์ใช้การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุคล้ายยางโดยใช้โปรแกรม MSC. Marc โดย Sang, Liu, Wang, Xing, and Chen (2008) ได้ศึกษาทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Finite Deformation) และฟังก์ชันต่าง ๆ ของพลังงานความเครียดโดยประเมินค่าคุณสมบัติวัสดุตามกฎการยืดหยุ่นของเกาส์ (Elastic Law of Gao) เทียบกับพฤติกรรมของวัสดุรูปแบบ Mooney–Rivlin โดยให้ผลที่คล้ายคลึงกัน

Zisis, Zafiropoulou, and Giannakopoulos (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุไฮโปอีลาสติกชนิดอัดตัวไม่ได้โดยใช้การทดสอบการเยื้องด้วยเครื่องมือ (Instrumented Indentation Tests) เพื่อหาฟังก์ชันของวัสดุเนื่องจากวัสดุที่นำมาทดสอบนั้นไม่สามารถระบุฟังก์ชันที่แน่นอนได้ เพราะมีหลายฟังก์ชันและแต่ละฟังก์ชันมักมีพารามิเตอร์หลายชนิด จึงใช้วิธีดังกล่าวในการศึกษาย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุที่ถูกทำการกด โดยวิธีนี้สามารถนำไปใช้กับหวัคชนิดอื่นได้

จากการศึกษาวัสดุโพลิเมอร์ที่สามารถนำไปใช้ในทางคลินิกเพื่อทดสอบการทรงตัว จึงได้มีการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของโพลิเมอร์โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปโพลิเมอร์โดยความแม่นยำของการจำลองการสามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริง โดยงานวิจัยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองโครงสร้างรูปทรงของโพลิเมอร์ โดยการกดในแกนเดียวโดยสังเกตพฤติกรรมเมื่อโพลิเมอร์มีความเปลี่ยนแปลง โดย Emori, Fushimi, Miura, and Yonezu (2020) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุชนิดโพลิเมอร์ที่ทำจากโพลิโพรพิลีนโดยมีความหนาแน่นประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ และมีการสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแรงอัดของโพลิเมอร์ที่มีอัตราความหนาแน่นต่างกันโดยใช้วิธี X-ray CT Method ขณะเดียวกันการสร้างโมเดลโพลิโพรพิลีนถูกจำลองแบบสามมิติและรูปร่าง ผลลัพธ์จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในระดับจุลภาคสามารถจำลองขึ้นได้ด้วยการสังเกตการณ์ในแหล่งกำเนิดโดยใช้ X-ray CT Method มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแบบย้อนกลับ จำเป็นต้องมีการสุ่มทำนายค่าคงที่ของวัสดุโดยใช้ความร่วมมือของการทดสอบบนวัสดุจริงร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เพียงพอต่อการหาค่าคงที่ที่แม่นยำ จึงได้มีการศึกษางานวิจัยของ Wierzbanski, Tarasiuk, and Lodini (2010) ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการนำวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสม ร่วมกับงานวิจัย การระบุพารามิเตอร์ของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกคล้ายยางโดยอิงตามโครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอย โดย Hou et al. (2022) โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอย (General Regression Neural Network: GRNN) ข้อมูลการทดลอง และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกันเพื่อระบุพารามิเตอร์ของวัสดุในแบบจำลองส่วนประกอบของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก เช่น ยาง โดยวิธีการการใช้การวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้เป็นตัวอย่างการเรียนรู้ของแบบจำลอง GRNN ในขณะที่ยังได้ผลลัพธ์ที่สังเกตได้จากการทดสอบแรงดึงแกนเดียวถูกกำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (Output) ของแบบจำลอง GRNN โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่อิงตาม GRNN มีความแม่นยำดี และสามารถขยายไปสู่การระบุพารามิเตอร์ของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่มีลักษณะคล้ายยางที่ซับซ้อน

บทที่ 3

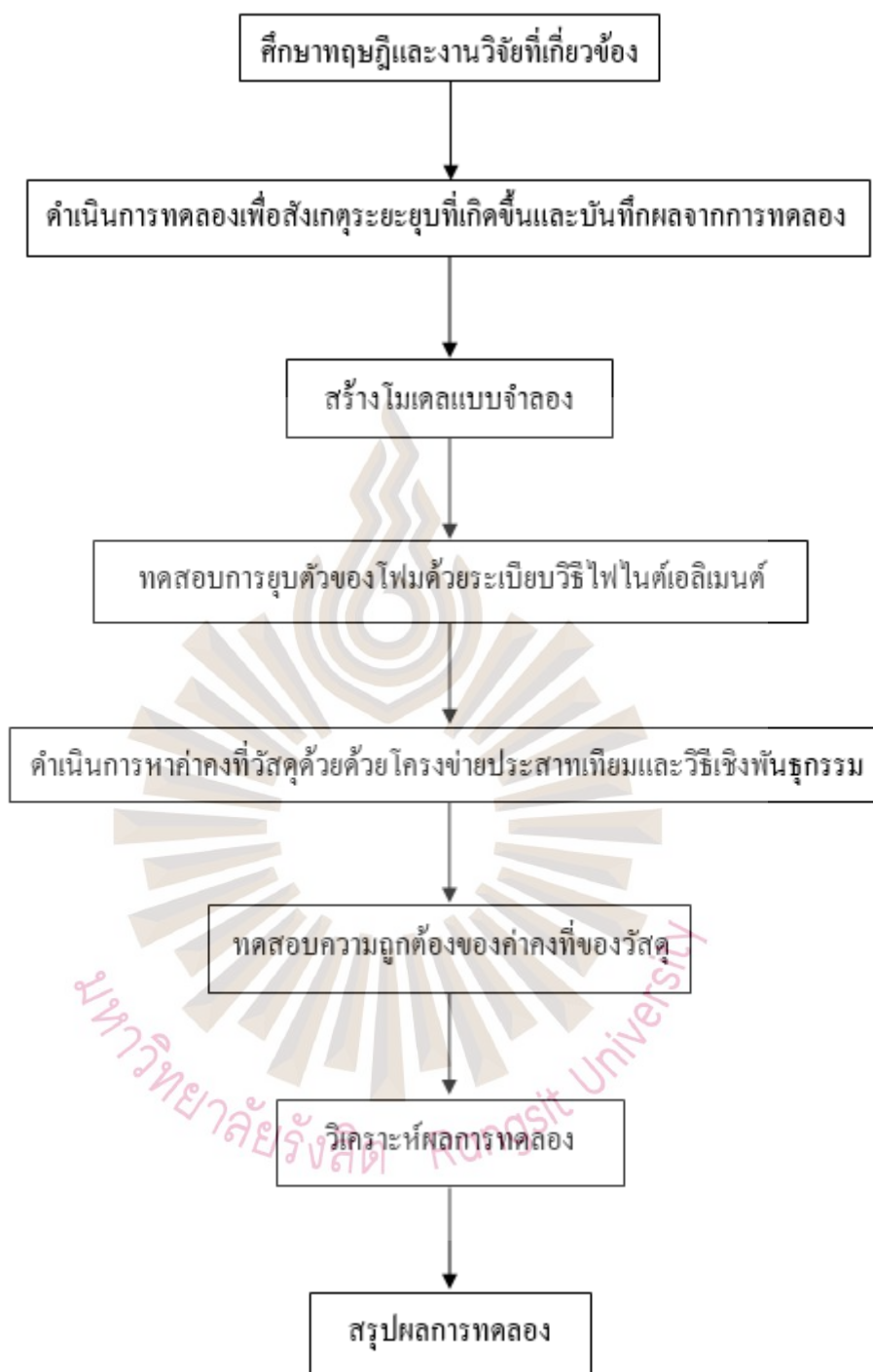
ระเบียบวิธีการวิจัย

งานวิจัยการออกแบบวิธีการหาค่าคงที่ของวัสดุแบบไม่ทำลายโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรม มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการวิจัย ประกอบด้วย 8 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- 3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 ดำเนินการทดลองเพื่อสังเกตระยะยวบที่เกิดขึ้นและบันทึกผลจากการทดลอง
- 3.1.3 สร้างโมเดลแบบจำลอง
- 3.1.4 ทดสอบการยุบตัวของโพลีเมอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 3.1.5 ดำเนินการหาค่าคงที่วัสดุด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีเชิงพันธุกรรม
- 3.1.6 ทดสอบความถูกต้องของค่าคงที่ของวัสดุ
- 3.1.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.1.8 สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 ภาคการทดสอบบนวัสดุจริง

- 3.2.1.1 โมเดลเท้าจำลอง
- 3.2.1.2 โฟมมาตรฐานสำหรับ CTSIB
- 3.2.1.3 เวอร์เนียไฮเกจ
- 3.2.1.4 ระดับน้ำ
- 3.2.1.5 ตูมน้ำหนักมาตรฐาน 2 กิโลกรัม จำนวน 1 ลูก
- 3.2.1.6 ตูมน้ำหนักมาตรฐาน 20 กิโลกรัม จำนวน 5 ลูก

3.2.2 ภาคระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

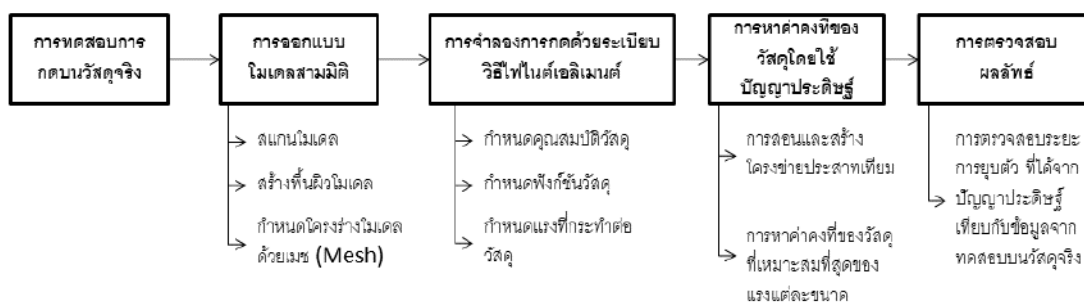
- 3.2.2.1 โปรแกรม EinScanner Pro2X
- 3.2.2.2 โปรแกรม Solidworks
- 3.2.2.3 โปรแกรม MSC Patran
- 3.2.2.4 โปรแกรม MSC Marc

3.2.3 ภาคปัญหาประดิษฐ์

- 3.2.3.1 โปรแกรม MATLAB

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

โครงการนี้ออกแบบวิธีการหาค่าคงที่ของวัสดุแบบไม่ทำลายโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรมโดยแบ่งหลักการทำงานของโครงการออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงลำดับวิธีการจัดทำโครงการ

3.3.1 ภาคการทดสอบบนวัสดุจริง

อ้างอิงจากการทดสอบการกดวัสดุตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3574-11 การทดสอบรูปแบบ B2: การทดสอบการยุบตัวของโฟม (Indentation Residual Gauge Length Test: IRGL) โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่มีน้ำหนัก 2 และ 20 กิโลกรัม เพื่อศึกษาระยะการยุบตัวของโฟมเมื่อมีแรงกดทับบนโมเดลเท้า เพื่อเลียนแบบการยืนของมนุษย์บนแผ่นโฟมและเพื่อให้แน่ใจว่าตุ้มน้ำหนักวางได้อย่างสมดุล จึงใช้ระดับน้ำเทียบจากนั้นจึงวัดการยุบตัวของโฟมที่ตำแหน่งเดียวกันตลอดการทดสอบ



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการวางตุ้มน้ำหนักและตำแหน่งการวัดบนโฟม

3.3.1.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

เพื่อศึกษาการยุบตัวของวัสดุโฟมโดยการเพิ่มแรงกดจากการวางตุ้มน้ำหนัก

มาตรฐาน

3.3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) โมเดลเท้าจำลอง
- 2) โฟมมาตรฐานสำหรับ CTSIB
- 3) เวอร์เนียไฮเกจ
- 4) กระจกน้ำ
- 5) ตู้มน้ำหนักมาตรฐาน



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงโมเดลเท้าจำลองที่ผลิตจากวัสดุพลาสติก

ที่มา: Shoemakers Academy, 2023

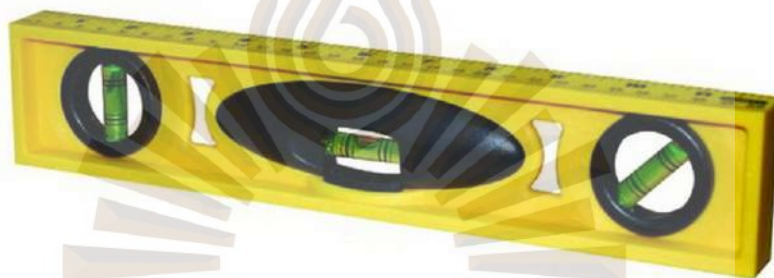


รูปที่ 3.5 ภาพแสดงโฟมมาตรฐานสำหรับ CTSIB

ที่มา: Khumnonchai, Chinwaro, Boonsinsukh, and Chaikereee, 2017



รูปที่ 3.6 ภาพแสดงเวอร์เนียไฮเกจ
ที่มา: JSR Group, 2023



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงระดับน้ำ
ที่มา: Stanley, 2566



รูปที่ 3.8 ภาพแสดงดุ่มน้ำหนักมาตรฐาน

3.3.1.3 วิธีการทดสอบ

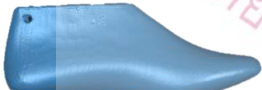
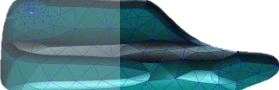
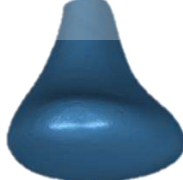
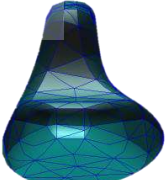
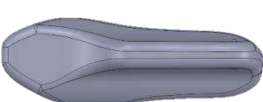
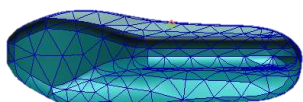
นำโมเดลเท้าจำลองวางบนแผ่นโฟม จากนั้นจึงวางค้ำน้ำหนักมาตรฐานโดยใช้ระดับน้ำเปรียบเทียบเพื่อให้ตำแหน่งของค้ำน้ำหนักวางอย่างสมดุล หลังจากวางค้ำน้ำหนัก 30 วินาที ทำการบันทึกระยะการยุบตัวของโฟม โดยค้ำน้ำหนักแต่ละตัวจะถูกวางซ้ำหลังจากนำค้ำน้ำหนักเดิมออก และรอ 30 วินาทีเพื่อให้โฟมกลับคืนสภาพเดิม โดยทำซ้ำในค้ำน้ำหนักแต่ละขนาด 10 รอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยการยุบตัวของค้ำน้ำหนักแต่ละขนาด

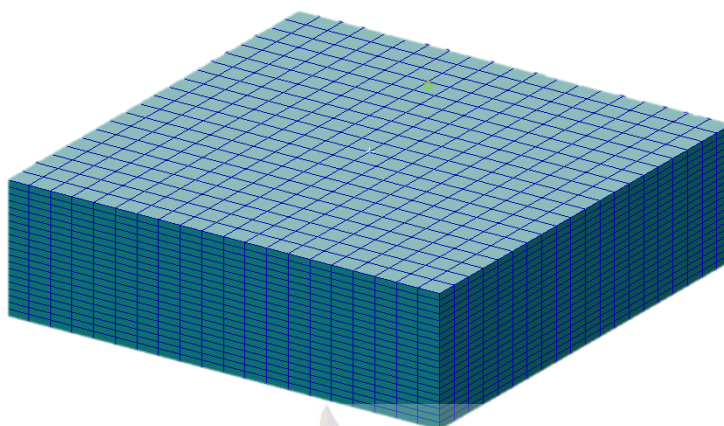
3.3.2 ภาวะเบี่ยงวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.2.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติ

อ้างอิงจากสัดส่วนโมเดลเท้าจำลองที่ใช้ในการทดสอบ บนโปรแกรม Einscanner3D และสร้างโมเดลใหม่โดยใช้โปรแกรม Solidwork หลังจากนั้น ดำเนินการสร้างเมช (Mesh) ด้วยโปรแกรม MSC Patran จากนั้นดำเนินการจำลองการทดสอบการยุบตัวของวัสดุโฟม ด้วยโปรแกรม MSC Marc

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงการสร้างโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรมแต่ละชนิด

EinScan 2X Pro	Solidworks	MSC Patran
		
		
		

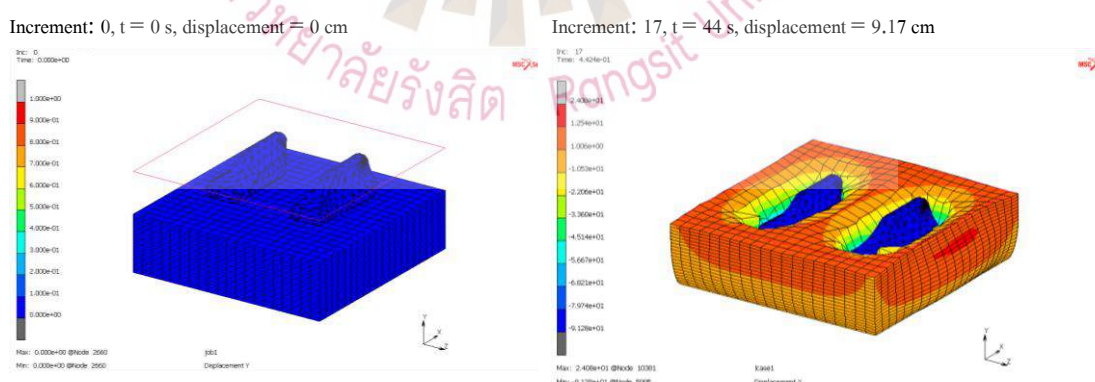


รูปที่ 3.9 ภาพแสดงโมเดลโฟมที่ใช้ในการจำลองการทดสอบ

โดยการวางเมชของแต่ละโมเดลจะสังเกตจำนวนจุดเชื่อมต่อ(Nodes) และเอเลเมนต์ทั้งหมด เพื่อหาจำนวนเมชที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองการทดสอบ โดยที่ปริมาณเมชไม่ส่งผลต่อการทดสอบ

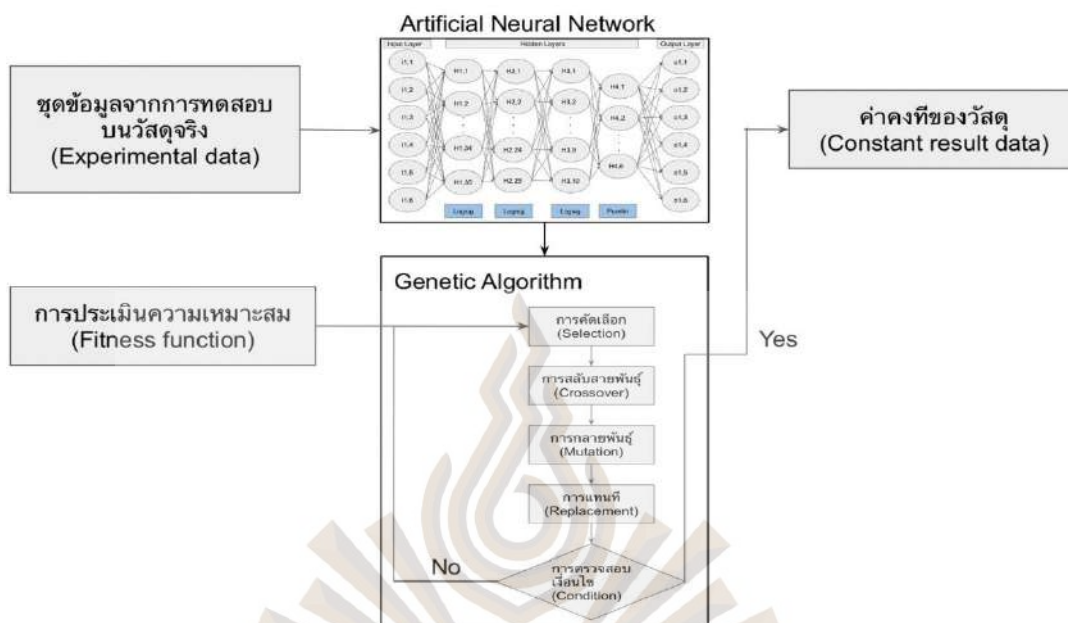
3.3.2.2 การจำลองการทดสอบการกด

โมเดลที่ได้รับการวางเมช เรียบร้อยแล้วถูกนำเข้าสู่โปรแกรม MSC Marc เพื่อจำลองการยุบตัวของโฟมต่อไป



รูปที่ 3.10 แสดงการจำลองการทดสอบที่เวลา 0 วินาที และเวลา 44 วินาที เมื่อใช้แรง 1050 N ผลลัพธ์ของการจำลอง การทดสอบการกดจะถูกนำมาใช้ในการสอนปัญหาประดิษฐ์ และใช้วิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาค่าคงที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถทำให้โฟมในแบบจำลอง แสดงระยะการยุบตัวใกล้เคียงกับการยุบตัวของโฟมทางคลินิก

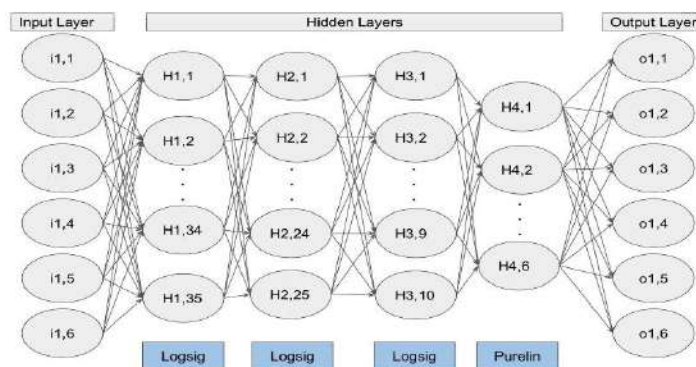
3.3.3 ภาวะปัญญาประดิษฐ์



รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่าคงที่ของวัสดุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีเชิงพันธุกรรม

การประยุกต์ใช้การทำงานโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการทำนายค่าคงที่ของวัสดุและวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจสอบความเข้ากันได้ของค่าคงที่ของวัสดุที่เหมาะสมที่สุด

3.3.3.1 การสอนโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 3.12 โครงข่ายประสาทเทียม

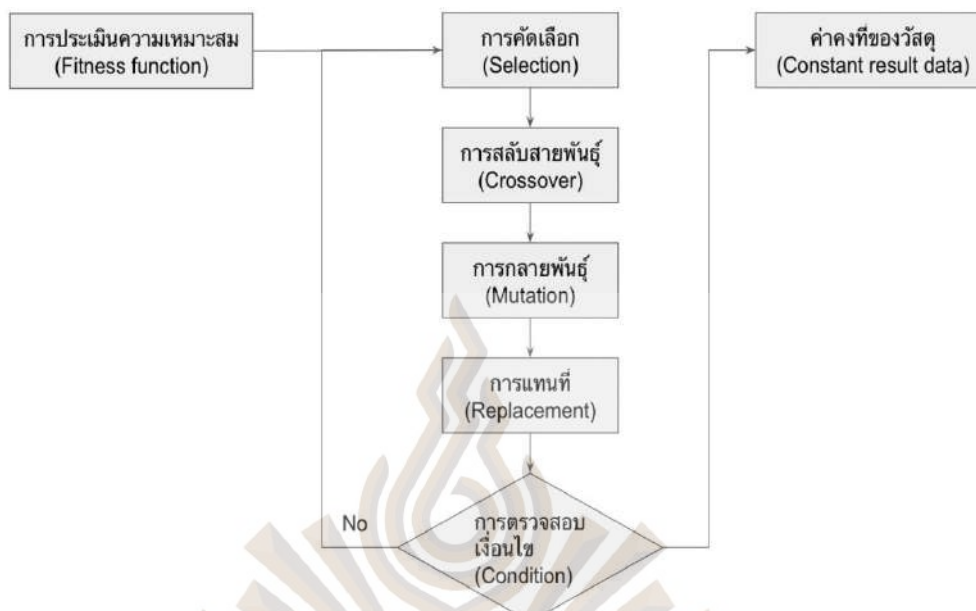
การสอนโครงข่ายประสาทเทียม ถูกดำเนินการเพื่อให้โครงข่ายประสาท (Network) สามารถทำนายระยะการยุบตัวจากค่าคงที่ของวัสดุได้มีความใกล้เคียงกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากที่สุด โดยรายละเอียดโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม เป็นไปตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

คุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียม	รายละเอียด
ขนาดของข้อมูลนำเข้า (Input)	$\mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2, \mu_3, \alpha_3$
โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Network Architecture)	HiddenLayer1 - Size = 35 - Transfer function = logsig - HiddenLayer2 - Size = 25 - Transfer function = logsig - HiddenLayer3 - Size = 10 - Transfer function = logsig - HiddenLayer4 - Transfer function = purelin
ฟังก์ชันที่ใช้ในการสอน	Lavenberg-Marquardt backpropagation
จำนวนกรณีที่ใช้ (Epochs)	200
เป้าหมายความผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean square error)	1e-06
ขนาดของข้อมูลขาออก (Output)	ระยะการยุบตัวที่แรงขนาด 50 250 450 650 850 และ 1050 นิวตัน

โดยที่ชุดข้อมูลนำเข้า คือค่าคงที่ของวัสดุ โดยใช้สัญลักษณ์เป็น $I_{1,n}$ โดยที่ 1 คือชุดข้อมูลขาเข้าชุดที่ 1 และ n คือตำแหน่งของค่าคงที่ของวัสดุ ขณะที่ชุดข้อมูลขาออก ใช้สัญลักษณ์ $O_{1,n}$ โดยที่ 1 คือชุดข้อมูลขาเข้าชุดที่ 1 และ n คือตำแหน่งของระยะการยุบตัวของแรงแต่ละขนาด

3.3.3.2 วิธีเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 3.13 โครงสร้างวิธีเชิงพันธุกรรม

ในกระบวนการวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการหาค่าคงที่ของวัสดุที่เหมาะสมที่สุดโดยการหาสมการที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสม (Fitness Function) เพื่อใช้ในกระบวนการเชิงพันธุกรรม ที่มีขั้นตอนต่าง ๆ ตามรูปที่ 3.13

1) การคัดเลือก (Selection) เป็นขั้นตอนการคัดเลือกตัวอย่างที่มีความเหมาะสมและส่งต่อไปยังรุ่นถัดไป

2) การสลับสายพันธุ์ (Crossover) เป็นขั้นตอนการนำตัวอย่างที่ผ่านการคัดเลือกมาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างไปจากเดิม เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับวิธีเชิงพันธุกรรม

3) การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นกระบวนการที่ป้องกันการนำตัวอย่างชุดเดิมมาใช้ซ้ำ

4) การแทนที่ (Replacement) เป็นขั้นตอนที่นำผลจากระบวนการมาแทนที่ตัวอย่างชุดเดิม เนื่องจากเป็นชุดตัวอย่างที่ดีกว่าชุดก่อนหน้า

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงชนิดขององค์ประกอบโครงสร้างวิธีเชิงพันธุกรรม

คุณสมบัติของวิธีเชิงพันธุกรรม	รายละเอียด
การคัดเลือก (Selection)	การคัดเลือกแบบแข่งขัน (Tournament Selection)
การสลับสายพันธุ์ (Crossover)	การสลับแบบเอกรูป (Uniform Crossover)
การกลายพันธุ์ (Mutation)	การกลายพันธุ์ของเกาส์ (Gaussian Mutation)
การแทนที่ (Replacement)	การแทนที่แบบตัวเลือกที่ดีกว่า (Elitism Replacement)



บทที่ 4

ผลการวิจัย

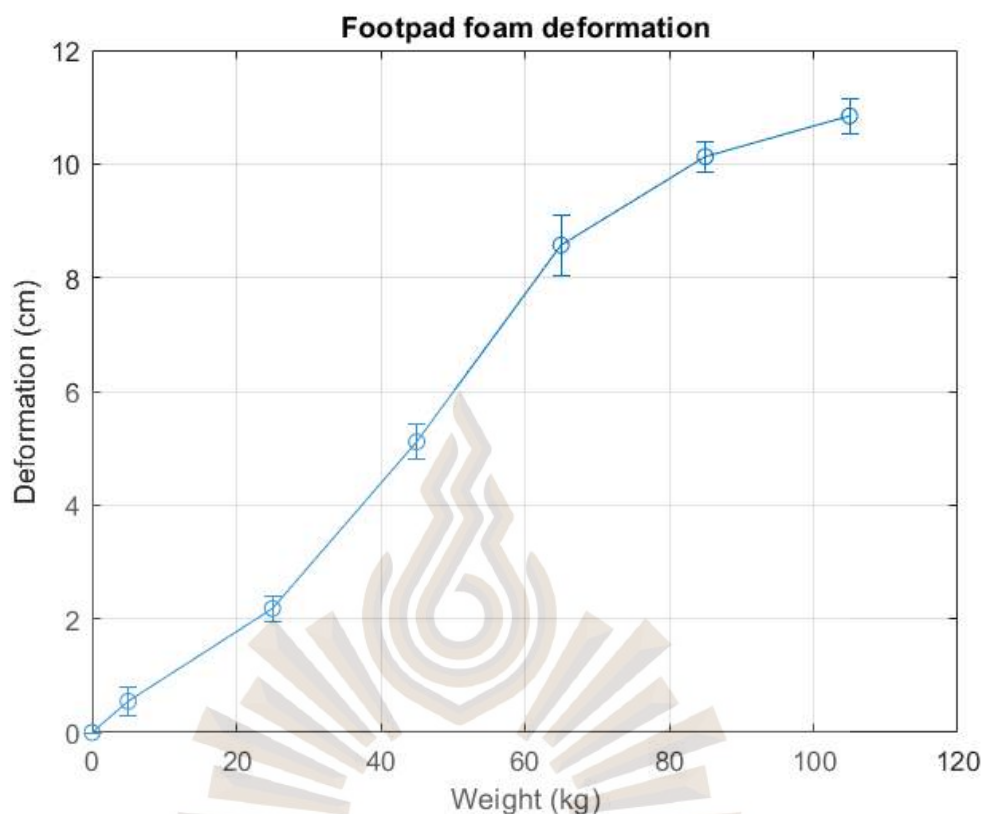
ผลการทดลอง งานวิจัยการออกแบบวิธีการหาค่าคงที่ของวัสดุแบบไม่ทำลายโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรม มีผลลัพธ์ดังนี้

4.1 การทดสอบการกดบนวัสดุจริง

ผลการทดสอบการกดบนวัสดุโฟมทางคลินิก ได้ดำเนินการทำซ้ำในแต่ละแรงกด 10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย และจดบันทึกในเพื่อนำคุณสมบัติของวัสดุ จะมีระยะการยุบตัวในแต่ละแรงกด ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการกดบนวัสดุโฟมทางคลินิก โดยใช้แรงขนาดต่าง ๆ

แรง (นิวตัน)		50	250	450	650	850	1050
ระยะยุบตัว (เซนติเมตร)	การทดสอบครั้งที่ 1	1.020	2.608	4.940	8.498	10.772	11.588
	การทดสอบครั้งที่ 2	0.890	2.224	5.326	8.990	10.186	10.836
	การทดสอบครั้งที่ 3	0.491	2.386	5.546	9.060	10.266	10.882
	การทดสอบครั้งที่ 4	0.272	2.138	4.644	7.190	9.870	10.520
	การทดสอบครั้งที่ 5	0.342	1.932	4.684	8.986	9.828	10.416
	การทดสอบครั้งที่ 6	0.244	1.774	5.244	8.474	9.970	10.844
	การทดสอบครั้งที่ 7	0.590	2.312	5.302	8.692	9.990	10.752
	การทดสอบครั้งที่ 8	0.566	2.154	5.402	8.866	10.166	10.928
	การทดสอบครั้งที่ 9	0.598	2.158	4.972	8.456	10.160	10.878
	การทดสอบครั้งที่ 10	0.488	2.116	5.076	8.494	10.080	10.802
	ค่าเฉลี่ย	0.550	2.180	5.114	8.571	10.123	10.845
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.250	0.231	0.303	0.541	0.267	0.309

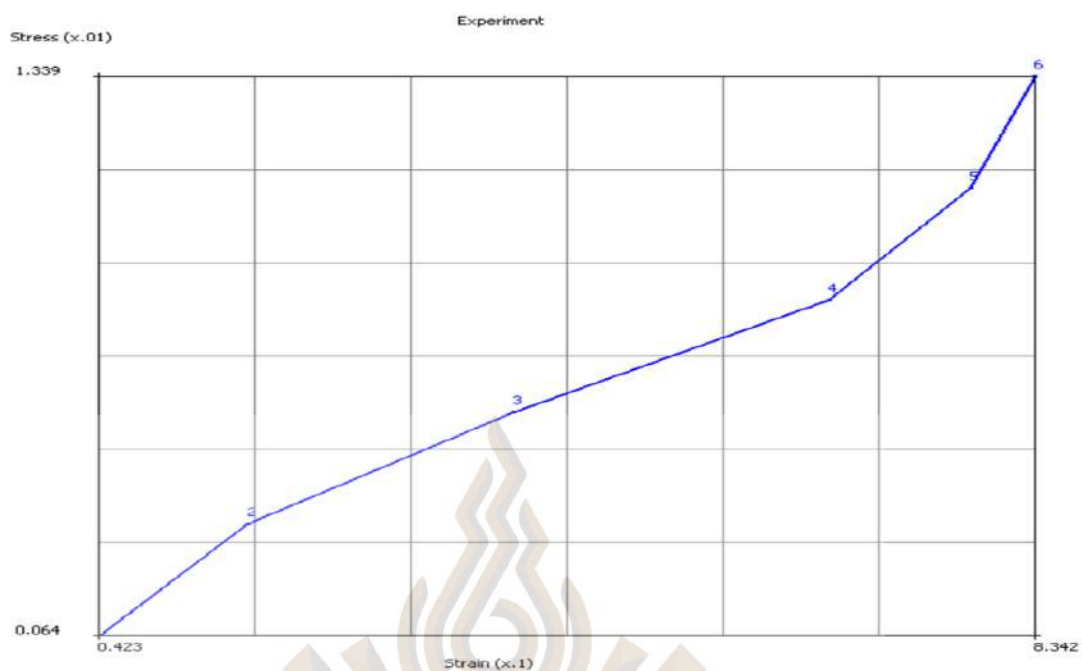


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการยุบตัวและน้ำหนักที่ใช้ในการกดบนโฟมทางคลินิก

ค่าที่ได้จากการทดสอบบนวัสดุจริงถูกนำไปใช้ในการจำลองการทดสอบการกดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะถูกแปลงเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของแรงขนาดต่าง ๆ

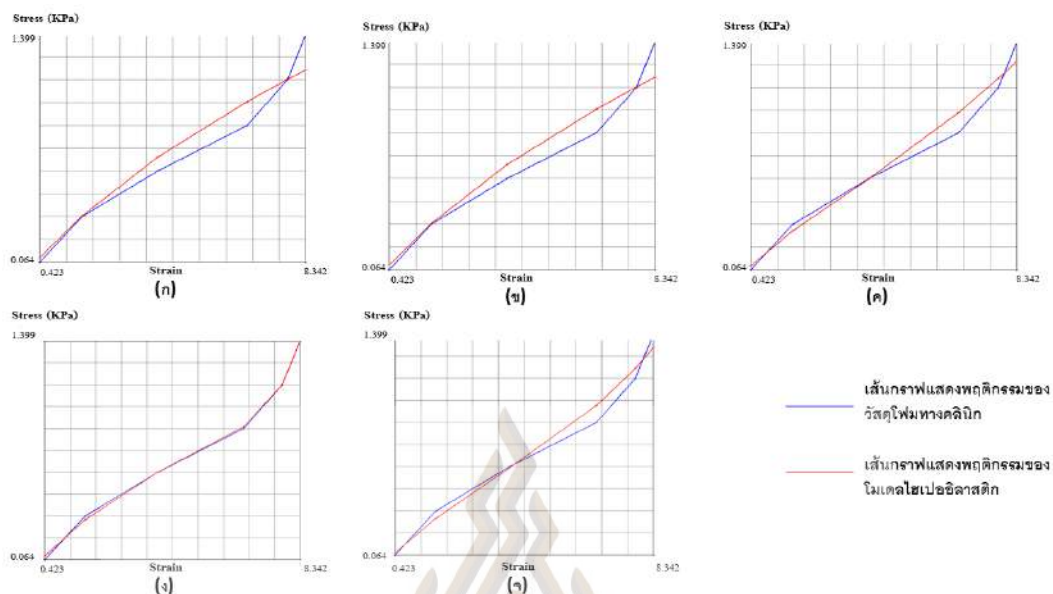
แรง (นิวตัน)	ค่าความเครียด	ค่าความเค้น (MPa)
5	0.042315	0.000638
25	0.167708	0.003188
45	0.393354	0.005739
65	0.659277	0.008290
85	0.779138	0.010841
105	0.834200	0.013391



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุโม่ทางคลินิกจากการทดสอบการกด

4.2 การจำลองการทดสอบการกดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองการทดสอบการกด ได้มีการนำคุณสมบัติของวัสดุที่ทดสอบจริง มาใช้เป็นคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง โดยอิงลักษณะคุณสมบัติจากวัสดุไฮโปอีลาสติกทั้ง 4 รูปแบบ และได้ผลลัพธ์ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัสดุโพลิเมอร์ทางคลินิกจากการทดสอบการกด เทียบกับ โมเดลพฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติก (ก) โมเดลแบบนีโอ-ฮุกเกียน(ข) โมเดลของมูนนี่-ริฟลินอนุพันธ์ ลำดับ 2 (ค) โมเดลของมูนนี่-ริฟลินอนุพันธ์ลำดับ 3 (ง) โมเดลของออกเดน(จ) โมเดลของโยห์

โดยโมเดลของออกเดนบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนถึงลักษณะพฤติกรรมของโพลิเมอร์ทางคลินิกที่มีความคล้ายคลึงกัน จึงได้ทำการจำลองหาค่าคงที่ของสมการฟังก์ชันของ โมเดลออกเดนจากสมการที่ 7 โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม(Artificial Neural Networks) และวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ในการหาค่าคงที่ดังกล่าว ซึ่งในขั้นตอนการ ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โมเดลพฤติกรรมของโพลิเมอร์ทางคลินิกที่ถูกทดสอบด้วยการกดบน วัสดุจริงจะถูกนำมาเข้ามาแปลงเป็นค่าคงที่ ผลลัพธ์การจำลองจะแสดงเป็นระยะการยุบตัวของโพลิเมอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของวัสดุ จึงได้มีการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของวัสดุ เพื่อสังเกตพฤติกรรมระยะการ ยุบตัวของโพลิเมอร์ทางคลินิก

สมการของโมเดลออกเดน:

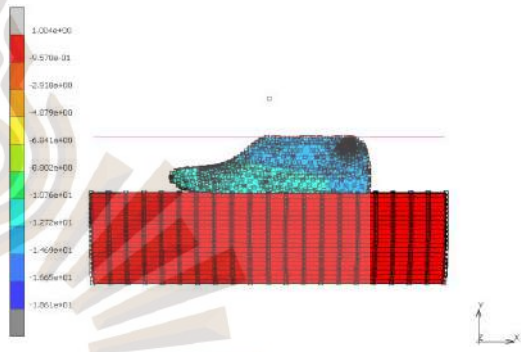
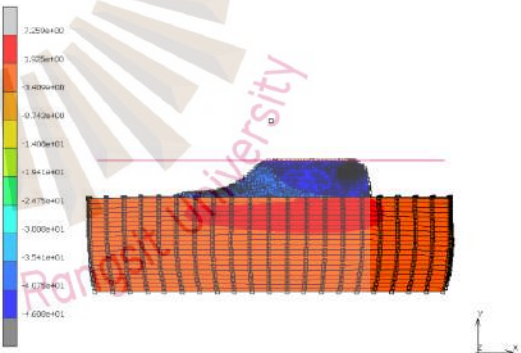
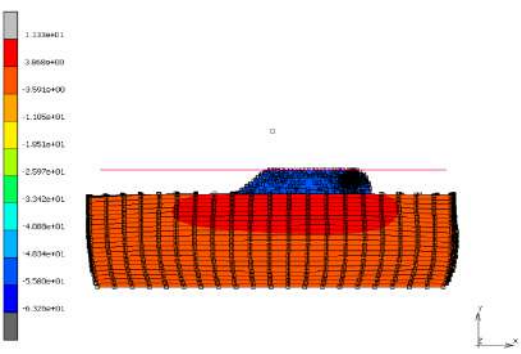
$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} [(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}) - 3] \quad (4-1)$$

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าคงที่และระยะการยุบตัวที่สัมพันธ์กันจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

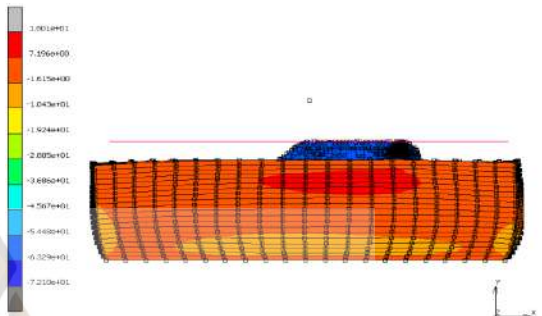
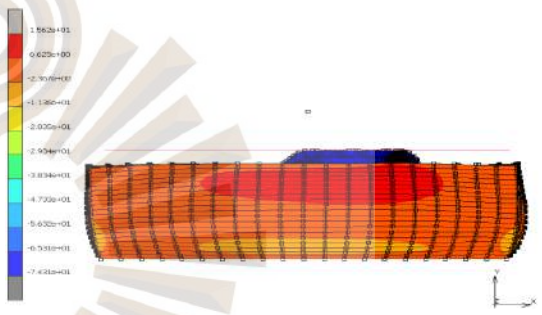
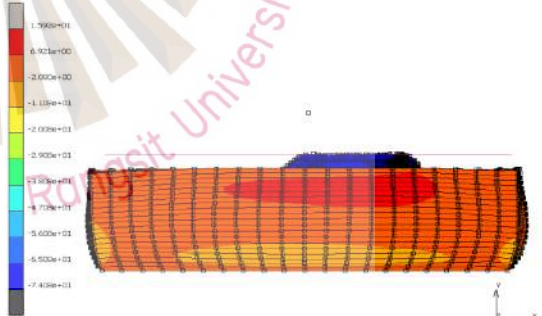
ตัวแปรจากสมการของโมเดลออกเดน						ระยะการยุบตัว (เซนติเมตร)					
μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	50	250	450	650	850	1050
1.03E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.57
1.13E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.97	4.57
1.23E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.38	3.90	4.57
1.24E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.57
1.33E-08	8.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	3.35	3.90	4.53
1.33E-08	6.55E-02	1.25E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.52	1.57	2.32	2.96	3.58	4.06
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.56
1.33E-08	6.55E-02	9.46E-03	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.63	1.91	2.80	3.59	4.15	4.78
1.33E-08	6.55E-02	8.46E-03	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.68	2.06	3.05	3.84	4.49	5.11
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.15E+00	2.02E-09	25.00	0.66	1.97	2.92	3.69	4.36	4.83
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	8.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	3.35	3.89	4.55
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	4.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	3.35	3.90	4.56
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	-2.02E-09	-10.00	0.59	1.79	2.64	3.35	3.92	4.53
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	-2.02E-09	-15.00	0.59	1.79	2.64	3.35	3.97	4.57
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	-2.02E-09	-25.00	0.59	1.79	2.64	3.34	3.89	4.36
1.51E-03	3.75E-01	4.46E-03	7.55E-01	3.02E-09	25.00	1.45	4.21	5.57	5.47	6.96	7.01
3.56E-07	3.75E-01	4.46E-03	7.55E-01	3.02E-09	26.00	1.56	4.43	5.79	6.47	6.81	6.97
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.56
1.33E-08	6.05E-01	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.53
1.33E-08	1.05E-01	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.56
1.33E-08	9.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	3.35	3.90	4.57
1.33E-08	7.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.38	3.90	4.57
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.56
1.33E-08	5.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.53
1.33E-08	4.55E-02	1.05E-02	1.35E+00	2.02E-09	25.00	0.59	1.79	2.64	2.37	3.90	4.57
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	5.74E-01	2.02E-09	25.00	1.09	3.10	4.45	3.45	6.07	6.08
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	3.55E-01	2.02E-09	25.00	1.46	4.14	5.57	6.43	5.99	7.10
1.33E-08	6.55E-02	1.05E-02	3.00E-01	2.02E-09	25.00	1.63	4.50	6.00	5.65	7.04	6.99
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	4.55E-01	4.02E-09	25.00	1.70	4.66	6.02	6.48	6.93	7.16
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	3.55E-01	4.02E-09	25.00	2.02	4.33	6.43	6.85	7.11	7.16
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	3.55E-01	4.02E-09	24.00	1.95	4.41	6.54	6.98	6.61	7.31
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	3.55E-01	4.02E-09	23.94	1.46	4.47	6.54	6.99	6.57	7.32
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	3.55E-01	4.02E-09	23.94	2.00	4.45	6.54	6.99	6.51	7.32
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	3.55E-01	4.02E-09	23.00	2.02	5.26	6.64	7.09	7.39	7.35
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	3.55E-01	4.02E-09	19.00	2.04	5.41	7.05	7.67	6.54	8.18
1.33E-08	6.55E-02	6.46E-03	3.55E-01	4.02E-09	18.00	1.99	5.42	7.16	7.81	6.56	8.38

จากตารางที่ 4.3 จะเป็นตารางแสดงค่าคงที่ซึ่งถูกใช้ในการทำไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองการยุบตัวของโคมทางคลินิก และแสดงผลลัพธ์ในแต่ละแรงที่ใช้ ซึ่งตารางดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม และวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาค่าคงที่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโคมจำลองที่สามารถแสดงผลลัพธ์การยุบตัวที่คล้ายคลึงกับโคมทางคลินิก

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการจำลองลักษณะการยุบตัวของวัสดุโคมที่แรงกดขนาดต่าง ๆ จากโปรแกรม MSC Marc

แรงที่ใช้ในการกด (Newton)	ภาพแสดงลักษณะการยุบตัวของโคม
50	
250	
450	

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการจำลองลักษณะการยุบตัวของวัสดุโฟมที่แรงกดขนาดต่าง ๆ จากโปรแกรม MSC Marc (ต่อ)

แรงที่ใช้ในการกด (Newton)	ภาพแสดงลักษณะการยุบตัวของโฟม
650	
850	
1050	

4.3 การหาค่าคงที่ของวัสดุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีเชิงพันธุกรรม

4.3.1 การสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการนำชุดข้อมูลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการสอน โครงข่ายประสาทเทียมแสดงผลลัพธ์ของการทำนายความแม่นยำในแต่ละแรงที่ใช้ในการกดวัสดุโฟมทางคลินิก ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของชุดโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่ 1 ในแต่ละแรงที่ใช้ในการกดวัสดุโฟมของแบบจำลอง

แรงที่ใช้ในการกด (Force)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของชุดโครงข่ายประสาทเทียม (เปอร์เซ็นต์)				
	1	2	3	4	5
50 นิวตัน	14.74	16.08	7.19	14.93	17.15
250 นิวตัน	14.47	9.07	2.65	9.55	11.62
450 นิวตัน	13.28	11.68	1.83	8.78	11.34
650 นิวตัน	9.45	18.58	1.86	8.36	10.76
850 นิวตัน	10.20	20.96	6.68	8.96	12.06
1050 นิวตัน	8.77	25.61	8.40	8.30	11.87

4.3.2 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม

หลังจากได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีความแม่นยำมากที่สุด จะนำโครงข่ายประสาทเทียมชนิดที่ 1 มาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาค่าความเหมาะสมจากทุกความเป็นไปได้ของค่าคงที่ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สามารถแสดงค่าคงที่ ที่ใกล้เคียงที่สุดของสมการของโมเดลออกเดิน ที่ทำให้ระยะการยุบตัวของโฟมในแต่ละแรงมีค่าเป็นไปตามระยะการยุบจากการทดสอบบนวัสดุโฟม

$$b = \sum_{x=1}^n |a(x) - d_x| \quad (4-2)$$

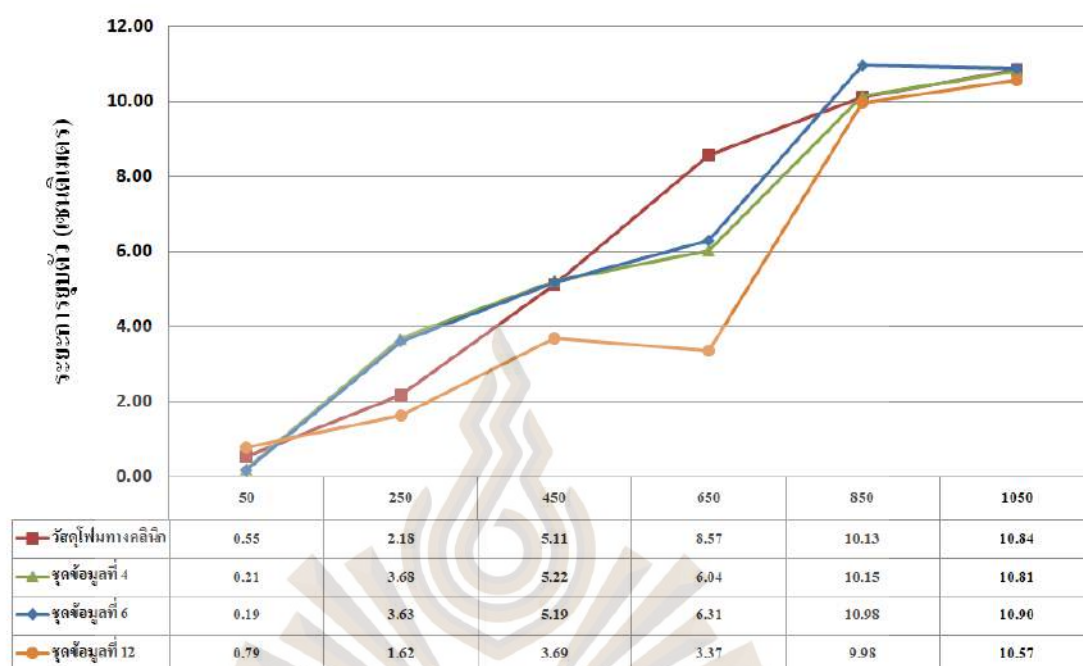
โดย $a(x)$ คือ ระยะการยุบตัวจากชุดข้อมูลค่าคงที่จากระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม และ d_x คือ ระยะการยุบตัวของโพลิมาตรฐานจากการทดสอบการกดบนวัสดุจริง ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีเชิงพันธุกรรมจะแสดงเป็นค่าคงที่ของวัสดุโพลิมาในสมการออกเคน ซึ่งจะถูกนำมาใช้ทำนายระยะการยุบตัวของวัสดุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม และได้ผลการทำนายเป็นไปตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนของระยะการยุบตัวของค่าคงที่แต่ละชุด

ชุดข้อมูล	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	ค่าความคลาดเคลื่อน (เซนติเมตร)					
							50	250	450	650	850	1050
1	0.00000	-3.45760	7.29520	2.69040	0.01560	0.00000	0.36	1.44	0.06	2.28	0.81	0.00
2	-0.01510	-10.00000	2.72090	10.00000	8.70420	0.00000	0.30	0.58	1.46	5.13	0.09	0.30
3	-0.01630	-10.00000	2.68980	10.00000	8.62770	0.00000	0.27	0.57	1.45	5.16	0.12	0.29
4	-0.00960	-3.49740	6.77370	0.73620	0.10710	0.00010	0.34	1.50	0.11	2.53	0.02	0.03
5	-0.04140	-9.65220	0.31420	10.00000	6.88510	5.99780	0.00	1.15	2.60	5.38	0.00	0.04
6	-0.00005	-3.45760	7.29520	2.69040	0.01560	0.00000	0.36	1.45	0.07	2.26	0.85	0.05
7	-0.00003	-3.45760	7.29520	2.69040	0.01560	0.00000	0.36	1.44	0.07	2.27	0.83	0.03
8	-0.01520	-10.00000	2.72270	10.00000	8.70810	0.00000	0.29	0.58	1.46	5.13	0.09	0.30
9	-0.01770	-10.00000	2.64730	10.00000	8.52820	0.00001	0.24	0.56	1.43	5.20	0.15	0.27
10	-0.01768	-9.99999	2.64844	10.00000	8.52987	0.00000	0.24	0.56	1.43	5.20	0.15	0.27
11	-0.01563	-9.99994	2.70737	10.00000	8.67000	0.00018	0.28	0.58	1.46	5.14	0.10	0.29
12	-0.01774	-9.99999	2.64682	10.00000	8.52861	0.00001	0.24	0.56	1.43	5.20	0.15	0.27
13	-0.03865	-9.95631	0.41475	9.98738	6.90521	0.00164	0.00	1.16	2.69	5.33	0.00	0.00
14	-0.02376	-6.25557	6.14991	2.79945	0.38663	5.88708	0.43	1.41	0.12	2.87	0.00	0.06
15	-0.01602	-10.00000	2.69705	10.00000	8.64620	0.00000	0.28	0.57	1.45	5.15	0.11	0.29
16	-0.04999	-7.29423	9.86511	0.00347	0.73533	1.62081	0.43	1.37	0.07	2.84	0.16	0.00
17	-0.03940	-9.81274	0.34036	9.62795	6.81375	1.34896	0.00	1.16	2.65	5.35	0.00	0.00

จากตารางดังกล่าว ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละชุดข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแรงที่ใช้กด ผลปรากฏว่าอยู่ในช่วง 26.87 – 28.77 เปอร์เซ็นต์ และมีบางส่วนของเกิน 30 เปอร์เซ็นต์จะถูกคัดออก และจากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดและน้อยที่สุด ที่แรงขนาด 250 และ 650 นิวตัน รวมถึงพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยผลปรากฏกว่าค่าคงที่ของวัสดุที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุดคือชุดข้อมูลที่ 4 ซึ่งเป็นชุดที่มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่แรงขนาดต่าง ๆ น้อยที่สุดโดยเปรียบเทียบลักษณะเด่นของแต่ละชุดข้อมูลดังตารางที่ 4.7

กราฟเปรียบเทียบระยะการยุบตัวของชุดข้อมูล และ วัสดุโพนทางคลินิก



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระยะการยุบตัวที่แรงขนาดต่าง ๆ ของชุดข้อมูลที่ 4 6 และ 12 เทียบกับ วัสดุโพนทางคลินิก

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนของระยะการยุบตัวของค่าคงที่แต่ละชุด

ชุดข้อมูล	ลักษณะเด่น
4	ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
6	ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่แรงขนาด 250 และ 650 น้อยที่สุด และความคลาดเคลื่อนที่แรงขนาด 650 น้อยที่สุด
12	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแรงทั้งหมด น้อยที่สุดและ ความคลาดเคลื่อนที่แรงขนาด 250 น้อยที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลลัพธ์ของการจำลองโมเดลพฤติกรรมการยุบตัวของวัสดุโฟมมาตรฐานทางคลินิก เทียบกับโมเดลพฤติกรรมของวัสดุไฮโปอีลาสติก ทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ โมเดลนีโอ-ฮุกเกียน โมเดล มูนี-ริฟลิน โมเดล ออกเดน และโมเดลโยห์ พบว่าโมเดลที่มีลักษณะพฤติกรรมใกล้เคียงกับ วัสดุโฟมมากที่สุดคือ โมเดลออกเดน ทางผู้วิจัยจึงได้ใช้ฟังก์ชันคุณสมบัติของออกเดนในการหา ค่าคงที่ของวัสดุ โดยการสร้างค่าคงที่ภายในชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการจำลองการกดบนระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีผลลัพธ์จากการจำลองคือ ระยะเวลายุบตัวที่แรงขนาดต่าง ๆ ในแต่ละชุด ข้อมูลค่าคงที่ โดยทั้งชุดข้อมูลค่าคงที่ และระยะเวลายุบตัวที่แรงขนาดต่าง ๆ จะถูกนำมาใช้เป็น ข้อมูลในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อสร้างโครงข่ายประสาท ชุดที่ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าคงที่ของวัสดุโฟมมาตรฐานทางคลินิก ซึ่งโครงข่ายประสาท ชุดที่มีความแม่นยำมากที่สุด คือ โครงข่ายประสาท ชุดที่ 3 จากทั้งหมด 5 โครงข่ายประสาท ชุดที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 4.77 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำโครงข่าย ประสาท ชุดที่ 3 ไปใช้ร่วมกับฟังก์ชันความเข้ากันได้ ภายในกระบวนการวิธีเชิงพันธุกรรม ปรากฏ ชุดค่าคงที่ทั้งหมด 3 ชุดที่มีความใกล้เคียงกับระยะเวลายุบตัวของวัสดุโฟมจากการทดสอบการกด บนวัสดุจริง โดยชุดค่าคงที่ ที่มีความแม่นยำมากที่สุด คือชุดที่ 4 โดยมีระยะเวลายุบตัวที่คลาดเคลื่อน เฉลี่ย 0.75 เซนติเมตร และมีพฤติกรรมของกราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมที่ใกล้เคียง กับวัสดุโฟมมาตรฐานทางคลินิกมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดสอบการกดบนวัสดุจริง

จากการทดสอบระยะการยุบตัวของโฟมทางคลินิกด้วยการใช้ค้อนน้ำหนักมาตรฐาน ซึ่งคิดเป็นแรงขนาด 50 250 450 650 850 และ 1050 นิวตัน พบว่าที่แรงขนาด 250 และ 650 นิวตันมีความแปรปรวนค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแรงขนาดอื่น ๆ โดยผู้จัดทำสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากความแข็งแรงที่ขนาด 250 และ 650 นิวตัน เป็นจุดเปลี่ยนพฤติกรรม เนื่องจากระยะการยุบตัวของโฟมจะเริ่มคงที่ โดยสามารถสังเกตลักษณะของกราฟจากรูปที่ 4.1 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมที่ค่าความเครียดจากรูปที่ 4.2 โดยเกิดการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening) ซึ่งหมายความว่าโฟมทางคลินิกจะเริ่มเข้าสู่จุดที่ไม่สามารถยุบตัวลงได้อีกหรือในอีกกรณีหนึ่งโฟมทางคลินิกที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นโฟมที่ผ่านการใช้งานจึงทำให้โฟมมีความทนทานที่ลดลงทำให้จุดเปลี่ยนพฤติกรรมมีความแปรปรวนมาก

5.2.2 การจำลองการทดสอบการกดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในกระบวนการจำลองการยุบตัวของโฟมทางคลินิกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเป็นกระบวนการที่ทำการสแกนวัสดุเท้าจำลองที่มีความคล้ายคลึงกับเท้ามนุษย์มากที่สุด โดยน้ำหนักและขนาดจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ จากนั้นจึงนำคุณสมบัติของวัสดุที่ผลิตเท้าเทียมมาใช้ในการจำลอง ขณะที่วัสดุโฟม ความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมถูกนำมาอนุมานเป็นคุณสมบัติของโฟม เนื่องจากยังไม่ทราบค่าคงที่ของวัสดุโฟมที่แน่ชัด โดยจะได้ค่าคงที่ของวัสดุทั้งหมด 6 ค่าซึ่งจะถูกใช้ภายในโมเดลจำลอง ค่าคงที่ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการสอนโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นจึงทดสอบใส่แรงที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อสังเกตพฤติกรรมการยุบตัวของวัสดุโฟม และบันทึกระยะการยุบตัวของวัสดุโฟมในค่าคงที่แต่ละชุด โดยขั้นตอนดังกล่าว ไม่พบปัญหาใด ๆ

5.2.3 การหาค่าคงที่ของวัสดุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีเชิงพันธุกรรม

เป็นขั้นตอนที่นำชุดข้อมูลจากการจำลองมาใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม โดยในขั้นตอนแรกของการหาค่าคงที่ของวัสดุ จะใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการเรียนรู้ข้อมูลที่มาจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยขั้นตอนดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบระยะการยุบตัวของโคมทางคลินิกของโครงข่ายประสาทเทียมกับระยะการยุบตัวของโคมทางคลินิกจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อน อยู่ที่ ± 0.5 เซนติเมตร -23.2381

ในขั้นตอนการเรียนรู้เชิงพันธุกรรม จะทำการนำชุดโครงข่ายประสาทเทียมชุดที่ 3 มาใช้ร่วมกับฟังก์ชันความเหมาะสมเพื่อหาค่าคงที่ของวัสดุที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดผลลัพธ์ระยะการยุบตัวของวัสดุตามการทดสอบบนวัสดุจริง โดยผลลัพธ์ที่ได้ สามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะการยุบตัวของชุดค่าคงที่ของวัสดุที่เลือกใช้ ที่แรงขนาด 250 นิวตัน และ 650 นิวตันเมื่อเทียบกับแรงขนาดต่าง ๆ มีความคลาดเคลื่อนในระดับที่ 1.5 เซนติเมตร และ 2.26 เซนติเมตร ตามลำดับ สอดคล้องกับความแปรปรวนจากการทดสอบบนวัสดุโคมทางคลินิก และพฤติกรรมของโมเดลออกเดน

บรรณานุกรม

- กฤตเมธ โกชะวัง. (2564). *Genetic algorithms คืออะไร?? (พร้อมตัวอย่างและโค้ด)*. สืบค้น 1 สิงหาคม 2566, จาก <https://krittamet-project.medium.com/genetic-algorithms-คืออะไร-พร้อมตัวอย่างและโค้ด-57c41fbac251>
- ณัฐ ดวงรัตนประทีป, พิมพ์เดือน รังสียากุล, ชาย รังสียากุล, และกุลภพ สุทธิธิดา. (2562). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรมรากเทียม. *เชียงใหม่ทันตแพทยสาร*, 39(3), 29-42.
- ไพโรจน์ จิตรธรรม. (2552). โมเดลวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยางในเชิงโครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์. *วารสาร MTEC*, 57, 28-36.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2566). *ระบบการทรงตัว*. สืบค้น 1 สิงหาคม 2566, จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบการทรงตัว>
- Arruda, E. M., & Boyce, M. C. (1993). A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41(2), 389–412. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(93\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(93)90013-6)
- Boonsinsukh, R., Khumnonchai, B., Saengsirisuwan, V., & Chaikereee, N. (2020). The effect of the type of foam pad used in the modified clinical test of sensory interaction and balance (metsib) on the accuracy in identifying older adults with fall history. *Hong Kong Physiotherapy Journal*, 40(2), 133–143. <https://doi.org/10.1142/s1013702520500134>
- Çapar, Y. (2020). *Engineering stress/strain VS true stress/strain*. Retrieved August 1, 2023, from <https://yasincapar.com/engineering-stress-strain-vs-true-stress-strain/>
- Chaikereee, N., Saengsirisuwan, V., Chinsongkram, B., & Boonsinsukh, R. (2015). Interaction of age and foam types used in clinical test for sensory interaction and balance (CTSIB). *Gait and Posture*, 41(1), 313–315. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.09.011>
- Emori, K., Fushimi, S., Miura, T., & Yonezu, A. (2020). FEM simulation of polymeric foam with random pore structure: Uniaxial compression with loading rate effect. *Polymer Testing*, 82, 106303. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106303>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Federica, D. B., Eliana, F., Stefania, B., Gianpiero, G., Dario, A., & Antonio, C. (2009). The use of rubber foam pads and “sensory ratios” to reduce variability in static posturography assessment. *Gait and Posture*, 29(1), 158–160. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.08.006>
- Florence, C. S., Bergen, G., Atherly, A., Burns, E., Stevens, J., & Drake, C. (2018). Medical costs of fatal and nonfatal falls in older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 66(4), 693–698. <https://doi.org/10.1111/jgs.15304>
- Gent, A. N. (1996). A new constitutive relation for rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 69(1), 59–61. <https://doi.org/10.5254/1.3538357>
- Gianoli, G., McWilliams, S., Soileau, J., & Belafsky, P. (2000). Posturographic performance in patients with the potential for secondary gain. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 122(1), 11–18. [https://doi.org/10.1016/s0194-5998\(00\)70137-9](https://doi.org/10.1016/s0194-5998(00)70137-9)
- Gosselin, G., & Fagan, M. (2015). Foam pads properties and their effects on posturography in participants of different weight. *Chiropractic & Manual Therapies*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12998-014-0045-4>
- Hansson, E. E., Beckman, A., & Håkansson, A. (2010). Effect of vision, proprioception, and the position of the vestibular organ on postural sway. *Acta Oto-Laryngologica*, 130(12), 1358–1363. <https://doi.org/10.3109/00016489.2010.498024>
- Hong, S. K., Park, J. H., Kwon, S. Y., Kim, J. S., & Koo, J. W. (2014). Clinical efficacy of the Romberg test using a foam pad to identify balance problems: A comparative study with the sensory organization test. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 272(10), 2741–2747. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-3273-2>
- Horak, F. B. (1987). Clinical measurement of postural control in adults. *Physical Therapy*, 67(12), 1881–1885. <https://doi.org/10.1093/ptj/67.12.1881>
- Hou, J., Lu, X., Zhang, K., Jing, Y., Zhang, Z., You, J., & Li, Q. (2022). Parameters identification of rubber-like hyperelastic material based on general regression neural network. *Materials*, 15(11), 3776. <https://doi.org/10.3390/ma15113776>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- JSR Group. (2023). 506-208 | Vernier Height Gage Series 506 – Standard Height Gage with Adjustable Main Scale, 0- 8” MITUTOYO. Retrieved August 1, 2023, from <https://jsr.co.th/product-tag/vernier-height-gage/>
- Kerber, K. A., & Baloh, R. W. (2008). Neuro-Otology: Laboratory Investigations in diagnosis and management of neuro-Otological Disorders. In W. G. Bradley, *Neurology in Clinical Practice* (pp.741–749). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Khumnonchai, B., Chinwaro, U., Boonsinsukh, R., & Chaikereee, N. (2017). Time to maintain standing balance on NeuroCom and AIREX foams during the Modified Clinical Test of Sensory Interaction and Balance (mCTSIB) in elderly. In The 1st National Conference Research and Innovation Knowledge Transformation towards Thailand 4.0 (pp. MS-2:1-9). Chiang Rai: Mae Fah Luang University.
- Kung, B. C., & Willcox Jr., T. O. (2007). Examination of hearing and balance. *Neurology and Clinical Neuroscience*, 318–327. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-03354-1.50029-8>
- Lee, S. H., & Yu, S. (2020). Effectiveness of multifactorial interventions in preventing falls among older adults in the community: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Nursing Studies*, 106, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2020.103564>
- Liu, B., Leng, Y., Zhou, R., Liu, J., Liu, D., Liu, J., Zhang, S. L., & Kong, W. J. (2017). Foam pad of appropriate thickness can improve diagnostic value of foam posturography in detecting postural instability. *Acta Oto-Laryngologica*, 138(4), 351–356. <https://doi.org/10.1080/00016489.2017.1393842>
- Mehdikhani, M., Khalaj, N., Chung, T. Y., & Mazlan, M. (2014). The effect of feet position on standing balance in patients with diabetes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 228(8), 819–823. <https://doi.org/10.1177/0954411914547714>
- Ogden, R. W. (1973). Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible Rubberlike solids. *Rubber Chemistry and Technology*, 46(2), 398–416. <https://doi.org/10.5254/1.3542910>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Pechprasarn, S. & Thongpan, N. (2019). *Overview of Artificial intelligence in Biomedical Applications in 2019*. Bangkok: Rangsit University.
- Pramoditha, R. (2021). *The Concept of Artificial Neurons (Perceptrons) in Neural Networks*. Retrieved August 1, 2023, from <https://towardsdatascience.com/the-concept-of-artificial-neurons-perceptrons-in-neural-networks-fab22249cbfc>
- Rivlin, R. S. (1948). Large elastic deformations of isotropic materials IV. further developments of the general theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 241(835), 379–397. <https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0024>
- Rivlin, R. S. (1997). Some applications of elasticity theory to rubber engineering. *Collected Papers of R.S. Rivlin*, 9–16. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2416-7_2
- Sang, J. B., Liu, B., Wang, Z. L., Xing, S. F., & Chen, J. (2008). Application and research of numerical simulation for rubber like material with MSC.Marc. *Materials Science Forum*, 575–578, 854–858. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.575-578.854>
- Sebastia-Amat, S., Tortosa-Martínez, J., & Pueo, B. (2023). The use of the static posturography to assess balance performance in a parkinson's disease population. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 981. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020981>
- Shoemakers Academy. (2023). *How Shoe Lasts are Made*. Retrived August 1, 2023, from <https://shoemakersacademy.com/how-shoe-lasts-are-made-2/>
- Stanley. (2023). *Stanley #42-466 ระดับน้ำ ยาว 12 นิ้ว รุ่น I-Beam วัสดุ ABS สีเหลือง (Levels)*. Retrieved August 1, 2023, from <http://www.stanley-thailand.com/ระดับน้ำ/stanley-42-466-ระดับน้ำ-ยาว-12-นิ้ว-รุ่น-i-beam-วัสดุ-abs-สีเหลือง-levels-detail.html>
- Teasdale, N., Stelmach, G. E., & Breunig, A. (1991). Postural sway characteristics of the elderly under normal and altered visual and support surface conditions. *Journal of Gerontology*, 46(6), B238–B244. <https://doi.org/10.1093/geronj/46.6.b238>
- Wade, C., Davis, J., & Weimar, W. H. (2014). Balance and exposure to an elevated sloped surface. *Gait & Posture*, 39(1), 599–605. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.09.017>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Wierzbanski, K., Tarasiuk, J., & Lodini, A. (2010). Optimization of material properties using genetic algorithms. *Materials Science Forum*, 652, 1–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.652.1>
- Yeoh, O. H. (1993). Some forms of the strain energy function for rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(5), 754–771. <https://doi.org/10.5254/1.3538343>
- Yu, C. Y., & Tu, H. H. (2009). Foot Surface Area Database and estimation formula. *Applied Ergonomics*, 40(4), 767–774. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.08.004>
- Zisis, T., Zafiropoulou, V. I., & Giannakopoulos, A. E. (2015). Evaluation of material properties of incompressible hyperelastic materials based on instrumented indentation of an equal-biaxial prestretched substrate. *International Journal of Solids and Structures*, 64–65, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.019>



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	ธามัน ตู้บรรเทิง
วัน เดือน ปีเกิด	23 มีนาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดสุราษฎร์ธานี ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์, 2564
ทุนการศึกษา	ทุนสนับสนุนการทำวิจัยบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยรังสิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	146 ถนนนาสารนอก ตำบลนาสาร อำเภอบ้านนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี

