

การวิเคราะห์การกันกระสุนของต้นแบบทางทหาร ด้วยโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิชของเคฟลาร์ และยางพารา ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดสอบ

นิตดา จงไฟโรจน์โมษิต¹ อชิรกฤษฎ์ จุลนิพิฐวรัช อรรถพล เจริญผล ชานนท์ เล็กอึ้งรงค์
นิรมล หุตะเจริญ และ อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน^{2*}

วันที่รับ 21 กรกฎาคม 2563 วันที่แก้ไข 11 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 13 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

ปัจจุบันยางพาราในประเทศไทยมีผลผลิตสูงแต่ราคาถูกลง เพื่อเป็นการสนับสนุนการใช้ยางพาราที่สามารถผลิตเองภายในประเทศ จึงมีแนวคิดการวิจัยและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ยางพารากับงานทางทหารและเพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ การวิจัยพื้นฐานสำหรับยานรบและระบบอาวุธของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ โดยในการประยุกต์ใช้ยางพารา ทางทหารนั้นเป็นการวิจัยและพัฒนาที่ยังมีศักยภาพในการป้องกันกระสุนทำให้ยานรบ อาวุธ ยานเกราะล้อย่างประเภทต่าง ๆ และยานรบลาดตระเวน สามารถปฏิบัติการทางทหารได้อย่างต่อเนื่อง ลดการพึ่งพาการติดตั้งเทคโนโลยีอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ยางแบบ Run Flat หรือการติดตั้งระบบเติมลมอัตโนมัติ เป็นต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบเชิงพฤติกรรมการป้องกันกระสุนโดยแผ่นยางพาราและยางพาราเสริมเส้นใยเคฟลาร์ ในลักษณะโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช (Sandwich Composite Structure) โดยการจำลองการวิเคราะห์ยางและการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐานจำกัด โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกด้วยการอ้างอิงสมการมูนี - ริฟลิน สมการฮ็อกเคน และสมการโย ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยาง และแบบจำลองวัสดุประเภทเคฟลาร์

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองของยางได้จากการทำ Curve Fitting จากผลการทดสอบ โดยทำการทดสอบการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มิลลิเมตร พบว่ากระสุนสามารถทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและก่อความเสียหายอย่างมาก และการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกระหว่างกลางในลักษณะโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช พบว่ากระสุนสามารถทะลุขึ้นงานได้โดยง่ายและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจน จากผลการวิจัยครั้งนี้ได้ข้อเสนอแนะในประเด็นเกี่ยวกับการเพิ่มความสมบูรณ์ของข้อมูลจากการทดสอบเพื่อให้การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองยางและเคฟลาร์มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ลดความคลาดเคลื่อนของการทำ Curve Fitting จากข้อมูลผลการทดลองที่น้อยเกินไป และในการทำวิจัยในครั้งต่อไปควรนำพฤติกรรมตามธรรมชาติของยางที่มีความยืดหยุ่น มีการคืนตัวหรือหดตัวกลับได้ มาใช้ในการพิจารณาในการทำแบบจำลองของยาง เพื่อให้ได้ผลจากการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมากขึ้น

คำสำคัญ: ยางพารา, ขอบเขตมูลฐานจำกัด, ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์, ยางป้องกันกระสุน

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* Corresponding author, E-mail: Artit.r@dti.or.th

The Analysis of Military Tire Concept using Sandwich Composite Structure made from Kevlar and Natural Rubber Using Finite Element Method and Experiment

Nadda Jongpairajcosit ¹ Achirakris Julniphitwong Attapon Charoenpon
Chanaon Lekthamrong Niramol Hutacharoen and Artit Ridluan ^{2*}

Received 21 July 2020 Revised 11 August 2020 Accepted 13 August 2020

Abstract

Currently, the domestic use of rubber currently has high productivity but price is very low. To encourage the use of domestic rubber, this research is aimed at the application of the natural rubber for military work and applications as well as the development of basic research to support the research and development of combat vehicles and weapon systems of Defence Technology Institute. The natural rubber application is emphasized on the basic knowledge in research and development of bullet proof rubber to enhance the military vehicle potential such as wheeled armored vehicles and combat patrol vehicles. In addition, the bullet proof rubber can reduce the other technology installation such as run-flat tire and CTIS system.

This research studied the behavioral impact of bullet proof on the rubber sheets and sandwich composite structure of natural rubber and Kevlar using experiment and Finite Element Method (FEM). The experimental and numerical conditions of bullet proof rubber are under shocks with boundary regulations. A series of FEM analysis and comparison against the test results were performed by using basic boundary regulations and the mechanical behavior model of hyperbolic materials based on Mooney-Rivlin, Ogden, and Yeoh equations together with the experiment data.

The coefficient of the rubber model equation was obtained by curve fitting of the experiment data. The experiment of the M193 bullet fired into the rubber sheet with 30 mm thickness showed that the bullet penetrated the tire concept made from natural rubber easily and caused great damage to the rubber. For the experiment of firing the M193 bullet on the rubber with Kevlar inserted in the middle (Sandwich Composite Structure), it was found that the bullet also penetrates the samples, making the rubber and Kevlar clearly separated. In addition, there are the suggestions concerning increase of the experiment to ensure integrity of test results for prediction of the reliable coefficient of rubber and Kevlar models, thus reducing errors in curve fitting due to small experimental data. For future research, the flexibility behavior of rubber is taken into account to accurately predict the behavior of natural rubber.

Keywords : Natural rubber, Finite element method, Bullet proof rubber

¹ Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Military Vehicle Division - RMV, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: Artit.r@dti.or.th

1. ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

จากรายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราภายใต้เครือข่ายความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบการและหน่วยงานวิจัยสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม [1] แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีการสร้างมูลค่าเพิ่มจากยางพาราเพียงร้อยละ 12.5 ของปริมาณยางพาราที่ผลิตในแต่ละปีหรือเพียง 520,628 ตันเท่านั้น (ข้อมูล พ.ศ. 2556) ยางพาราอีก 3,664,941 ตัน หรือร้อยละ 87.5 ส่งออกในรูปแบบวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรม ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่งมาตรฐาน และน้ำยางข้น การสร้างมูลค่าเพิ่มของยางพาราโดยการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้ 4-10 เท่าของมูลค่ายางพารา ดังนั้นจะเห็นได้ว่ารายได้ของประเทศจากการส่งออกยางพาราและผลิตภัณฑ์ยางพาราไม้ยางพาราในปี พ.ศ. 2556 กล่าวคือประเทศไทยส่งออกยางพารา 3,664,941 ตัน สร้างรายได้ 249,296 ล้านบาท แต่ส่งออกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการใช้ยางพาราประมาณ 520,628 ตัน สามารถ สร้างมูลค่าได้ถึง 257,204 ล้านบาท

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากยางสำหรับการประยุกต์ใช้ทางทหาร ซึ่งเป็นการสนับสนุนการใช้ยางพาราในประเทศ ปัจจุบันมีผลผลิตสูงแต่มูลค่าเพิ่มค่อนข้างต่ำ การวิจัยและพัฒนาทางทหารนี้รวมถึงการออกแบบยางให้มีคุณลักษณะพิเศษ เช่น ยางที่มีความสามารถในการป้องกันกระสุน ซึ่งความรู้ที่ได้รับจากโครงการนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการขยายขอบเขตองค์ความรู้ด้านการออกแบบด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีป้องกันประเทศให้มีศักยภาพมากยิ่งขึ้นและเพื่อเป็นกำลังหลักให้กับ การวิจัยและพัฒนา ยานรบและระบบอาวุธ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของยางในงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการพัฒนาสูตรยางทั้งแบบคอมพาวนด์ (Compound) และผสมเส้นใยเพิ่มความสามารถในการป้องกันแรงดันจากกระสุนแต่ยังไม่เพียงพอที่จะ

ยับยั้งกระสุนได้ นั่นคือกระสุนทะลุแผ่นยางได้ทุกแผ่น ทั้งพลังงานที่ลดลงยังมีค่าเพียงเล็กน้อยซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาล้อกันกระสุนโดยการพัฒนาแต่เพียงสูตรยางหรือการเพิ่มเส้นใยลงในเนื้อยางไม่สามารถต้านทานแรงจากกระสุนได้

ในการดำเนินงานต่อมาจึงได้นำผลการทดสอบข้างต้นมาทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) [2] รวมทั้งการหาคุณสมบัติของวัสดุเพิ่มเติม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อจำลองพฤติกรรม การเสียหายของยางและเก็บเป็นองค์ความรู้ในการวิเคราะห์ยางภายใต้แรงกระแทกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านยานรบและระบบอาวุธ [3] อีกทั้งเพื่อลดข้อจำกัดของการขับเคลื่อนยานรบคือ ยางรถเดิมที่ไม่สามารถทนทานต่อกระสุนปืนได้เนื่องจากเมื่อถูกกระสุนปืนยิงทะลุผ่านจะเกิดรูรั่วส่งผลให้ลมยางรั่ว

ปัจจุบันได้มีการพัฒนายางขึ้นมามากหลายแบบเพื่อแก้ไขจุดอ่อนดังกล่าวข้างต้น ทั้งมีการใส่ยาง Run-Flat ซึ่งเป็นยางตันอยู่ภายในยางรถยนต์หรือพัฒนายางประเภทไมล์เลส (Airless Tire) ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดการวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างนวัตกรรมการป้องกันยางรถจากกระสุนปืนที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตได้ง่าย โดยได้พัฒนารูปแบบโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช (Sandwich Composite Structure) ที่ประกอบด้วยชั้นของยางและชั้นของเคพลาร์ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการจำลองยิงกระสุนปืนขนาด 5.56 มม. ใส่โครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิชแล้วทำการบันทึกพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการเริ่มต้นเชิงแนวคิดในการพัฒนาล้อกันกระสุนและเป็นการพัฒนาความรู้ด้านการวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) ทางด้านการทำยางป้องกันกระสุนที่เป็นองค์ความรู้ในการวิเคราะห์ยางภายใต้แรงกระแทกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการออกแบบยางทางทหาร

2.1 นโยบายและการสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาทางทหาร

สาเหตุและปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ผลงานวิจัยทางทหารไปสู่การผลิตเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม [4] คือ ปรับเปลี่ยนแนวทางการวิจัยและพัฒนาจากการมุ่งวิจัยเพื่อซ่อมหรือทดแทนเป็นการวิจัยเพื่อสร้างนวัตกรรม เอกสารวิจัยฉบับนี้ค้นพบว่าผลผลิตของโครงการวิจัยและพัฒนาที่รับผิดชอบสามารถเป็นต้นแบบผลงานวิจัยทางทหารของไทยได้ทั้งสิ้น เพราะผ่านกระบวนการทดสอบและมาตรฐานต่าง ๆ จนสามารถใช้งานจริงได้ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดได้แก่เมื่อ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2537 ศูนย์สงครามพิเศษได้วิจัยและพัฒนารองเท้าสำหรับทหารหน่วยรบพิเศษและได้ซื้อสรุปารองเท้าที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงและได้มีการปรับปรุงรองเท้าต้นแบบดังกล่าวแล้ว

ส่วนการพัฒนายางทางทหารนั้น กองทัพให้ความสำคัญในการนำผลิตภัณฑ์ยางพารามาวิจัยและพัฒนาเพื่อการประยุกต์ใช้กับยุทธโศปกรณ์ทางทหาร ดังจะเห็นได้จากการayangแห่งประเทศไทยและกองทัพบกได้ตระหนักถึงความสำคัญในนโยบายด้านยางพาราของรัฐบาลที่เน้นดำเนินการแปรรูปยางพาราเพื่อเพิ่มมูลค่าและสนับสนุนการใช้ยางพาราภายในประเทศ รวมทั้งนโยบายด้านความมั่นคงและการป้องกันประเทศ จึงได้ร่วมลงนามบันทึกความเข้าใจด้วยความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาและนำศักยภาพของแต่ละหน่วยงานมาร่วมกันเสริมสร้างความมั่นคงและศักยภาพในการป้องกันประเทศผ่านการนำผลผลิตยางพารามาวิจัยและพัฒนาเพื่อนำไปสู่การแปรรูปเป็นนวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ที่มีมาตรฐานและประสิทธิภาพในการนำไปใช้ได้จริงในอนาคต [5]

2.2 การวิจัยและพัฒนายางทางทหาร

หลักการพื้นฐานของงานโดย Cole et al. [6] คือ การหาความแตกต่างในขนาดของวัสดุที่บรรจุไว้ในถุงทราย (ทรายและยางบด) ที่มีผลต่อการทะลุทะลวงของกระสุนที่ยิงแบบโปรเจกไทล์ขนาด 7.62x39 มม. (308-short) และ 9 มม. จากลำกล้อง Luger ผลที่ได้นำไปประยุกต์ใช้ได้กับทั้งด้านทหารและพลเรือน ถุงทรายมีผลการสึกกร่อนจากโปรเจกไทล์โดยเกิดรอยหรือการแยกส่วนและเปลี่ยนรูปขณะที่ยางยังคงอยู่ในสภาพเดิม

จากงานวิจัยของ สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม et al. [7] ได้เสนอผลการทดสอบเนื่องจากโครงการทดสอบแผงคอนกรีตกันกระสุนหลายชั้น (Multilayer bulletproof concrete panel) รูปแบบความล้มเหลวและการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ความหนาต่างกันถูกนำมาทดสอบด้วยปืนที่กระสุนขนาด 9 และ 11 มม. ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ต่อไปในการออกแบบแผงคอนกรีตกันกระสุนหลายชั้นโดยอาศัยหลักการรวมกันดูดซับพลังงาน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนา

การศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัย [7] ใน [8] โดย Maho et al. ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการใส่แผ่นยางพาราที่มีในเชิงพฤติกรรมของแผงกันกระสุนหลายชั้นที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กไฟเบอร์ วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือการใส่ชั้นยางเข้าไปในชั้นกลางเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นกักตักเพื่อป้องกันกระสุนจากการสะท้อนออกจากแผง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแผงที่มีระดับการดูดซับพลังงานจากการกระแทกต่ำกว่าพลังงานจลน์ของกระสุนล้มเหลวจากการเจาะเป็นโพรง

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นได้ว่ายางพารามีส่วนสำคัญในการยับยั้งการเปลี่ยนรูป และมีส่วนสำคัญในการคงสภาพเดิมของวัสดุที่ใช้ยางช่วยเสริมมีส่วนช่วยในการดูดซับพลังงานของวัสดุที่นำยางพาราเข้าไปผสมและเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนา

สามารถใช้ทำหน้าที่เป็นชั้นกับดักเพื่อป้องกันกระสุนจากการสะท้อนออกจากแผงได้

3. การจำลองการวิเคราะห์ยางและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

จากผลการดำเนินการทดสอบในปี 2559 [2] พบว่าแนวคิดในการพัฒนาสูตรยางทั้งแบบคอมพาวนด์ (Compound) และผสมเส้นใยเพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันแรงต้านจากกระสุนไม่สามารถต้านทานแรงจากกระสุนได้ จึงทำให้มีความจำเป็นในการปรับเปลี่ยนแผนการดำเนินการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมาโดยเปลี่ยนจากการสร้างต้นแบบเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ในการวิเคราะห์ยางภายใต้แรงกระแทกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนายานรบและระบบอาวุธต่อไปในอนาคต

3.1 การพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ยาง เป็นการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ยางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก (Hyper-elastic Model) ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยาง

3.1.1 แบบจำลองของวัสดุประเภทยางประเภทไฮเปอร์อีลาสติก (Hyper-elastic Material Model)

แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทยางนั้นอยู่ในกลุ่มของวัสดุประเภท Hyper-elastic [9] ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยในการพัฒนาแบบจำลองนั้นเป็นการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแสดงพฤติกรรมของยางได้สอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งในปัจจุบันมีสมการที่ใช้อ้างอิงอยู่หลายรูปแบบ สำหรับในรายงานนี้จะมามีทั้งหมด 3 รูปแบบที่ทำการศึกษา ดังนี้

1) สมการมูนี-ริฟลิน (Mooney-Rivlin) เป็น

สมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัญหาพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้น ของวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) สมการของมูนี-ริฟลินนั้นจะแสดงถึงความสัมพันธ์ ระหว่างพลังงานความเค้นกับค่าคงที่ (Invariant) ซึ่งอยู่ในรูปของเมทริกแบบสมมาตรของสัดส่วนการยืด (Stretch Ratio) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$W = \sum_i \sum_j c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j D(J - 1)^2 \quad (1)$$

ทำการกระจายตัวแปรในสมการที่ (1) ออกมาจะได้

$$W = C_{10}(I_1 - 3)^1 + C_{01}(I_2 - 3)^1 + C_{11}(I_1 - 3)^1 + C_{20}(I_1 - 3)^2 + \dots + D(J - 1)^2$$

โดยที่ค่าตัวแปร C_{10} , C_{01} , C_{11} และ C_{20} คือ ค่าที่ได้จากการทำ Curve Fitting ของผลการทดสอบแรงดึง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ทั้งนี้สำหรับสมการมูนี-ริฟลินอย่างง่ายที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นจะทำการลดนิพจน์ของสมการออกเพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงลดรูปเหลือดังสมการที่ (2)

$$W = C_{10}(I_1 - 3)^1 + C_{01}(I_2 - 3)^1 + D(J - 1)^2 \quad (2)$$

2) สมการอ็อกเดน (Ogden) มีพื้นฐานจากความสัมพันธ์ของพลังงานความเครียดกับค่าการยืดตัวหลัก (Principal Stretch) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\psi = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n \frac{\mu_j}{\alpha_j} (\lambda_i^{\alpha_j} - 1) + K(J - 1) \quad (3)$$

3) สมการโย (Yeoh) เสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1993 โดยใช้หลักการของพหุนามดีกรี 3 ที่ว่าพลังงานความเครียดนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปร I_1 เพียงตัวเดียว ซึ่งสมการของโยนี้มีข้อดีตรงที่สามารถเข้ากับกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ในช่วงกว้างได้ดีโดยแสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{D_j} (J - 1)^{2j} \quad (4)$$

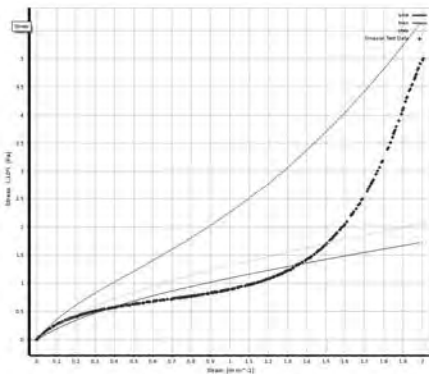
3.1.2 แบบจำลองวัสดุประเภทเคฟลาร์ (Kevlar Model)

ในการทดสอบการยิงแผ่นยางนั้น ใช้แผ่นยางที่ได้รับ การเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar) ซึ่งเป็น เส้นใยสังเคราะห์ประเภทพารา-อะรามิด (Para-aramid) สำหรับสมการแสดงคุณสมบัติของวัสดุประเภทเคฟลาร์ นั้นใช้สมการสถานะพัฟฟ์ (Puff EOS) ซึ่งสมการพัฟฟ์นี้ ถูกพัฒนาโดย Shark และ Sharp ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1958 เพื่อ อธิบายคลื่นความเครียด (Stress Wave) ที่เกิดจากการชน และการระเบิด โดยใช้หลักการของลากรางจ์ (Lagrange) และอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) เข้าช่วย

3.2 การเลือกเส้นกราฟที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบ (Curve Fitting)

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองของยางนั้นได้ จากการทำ Curve Fitting ของผลการทดสอบ ซึ่งแต่ละ แบบจำลองได้ผลดังนี้

3.2.1 แบบจำลองของสมการมูนิ-ริฟลิน

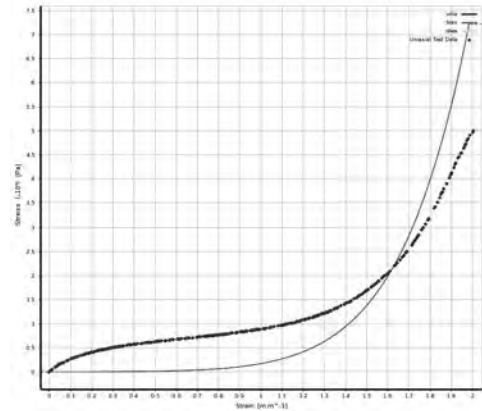


รูปที่ 1 Curve Fitting ด้วยสมการมูนิ-ริฟลิน

จากรูปที่ 1 แสดงการทดสอบ Curve Fitting ด้วยสมการมูนิ-ริฟลิน ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร $C_{10} = 0.27414$ MPa และ $C_{01} = 0.75052$ MPa

3.2.2 แบบจำลองของสมการอ็อกเดน

ผลการ Curve Fitting ด้วยสมการอ็อกเดน (รูปที่ 2) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรดังในตารางที่ 1

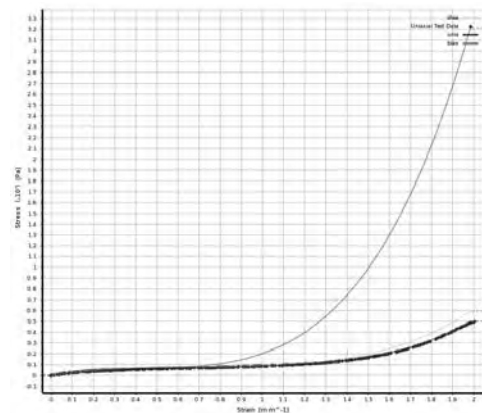


รูปที่ 2 Curve Fitting ด้วยสมการอ็อกเดน

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรของสมการอ็อกเดน

ตัวแปร	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3
หน่วย	Pa	Pa	-	-	-	-
ค่า	87.634	87.647	87.66	10.366	10.333	10.346

3.2.3 แบบจำลองของสมการโย



รูปที่ 3 Curve Fitting ด้วยสมการโย

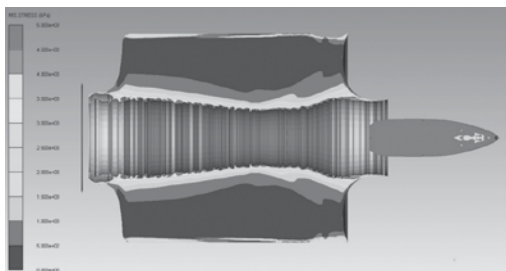
จากรูปที่ 3 แสดงการทดสอบ Curve Fitting ด้วย สมการโยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรดังนี้

$C_{10} = 0.4014$ MPa, $C_{20} = -0.700$ MPa และ $C_{30} = 0.107$ MPa

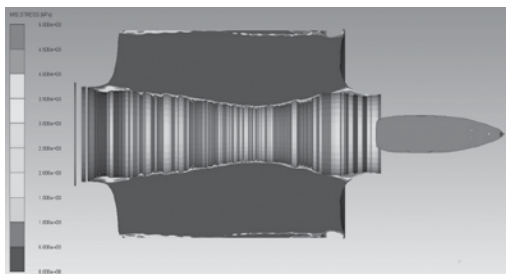
4. การวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มม.

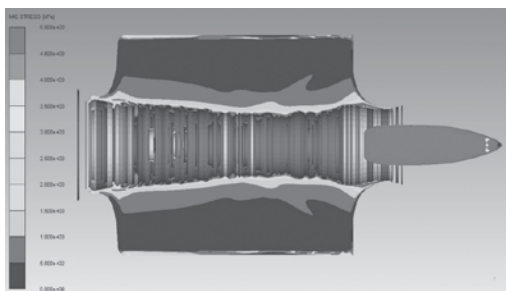
จากผลการทดสอบการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดสอบ Curve Fitting ผลที่ได้ดังในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงถึงความสามารถของกระสุนในการทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและมีความเสียหายเกิดขึ้นที่ยางอย่างมาก การกระจายตัวของความเครียดในเนื้อยางนั้นพบว่าแบบจำลองของมูนี-ริฟลิน (รูปที่ 4 ก) และโย (รูปที่ 4 ค) ให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกัน



ก) ยางที่ใช้แบบจำลองมูนี-ริฟลิน



ข) ยางที่ใช้แบบจำลองออกเคน

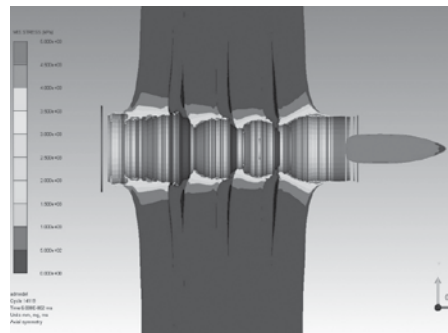


ค) ยางที่ใช้แบบจำลองโย

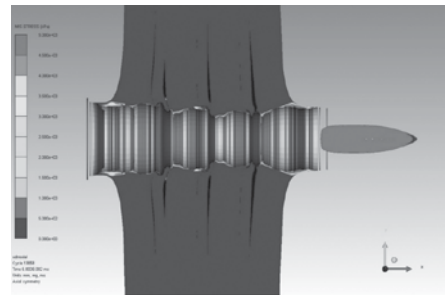
รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์การยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มม.

4.2 ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรก

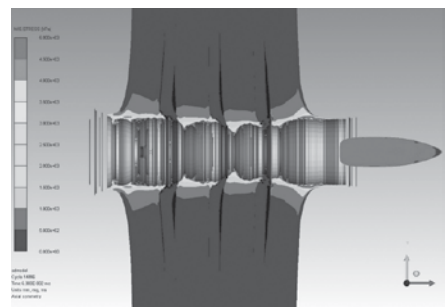
ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกเป็นชั้นระหว่างกลาง โดยใช้ยางที่มีความหนา 6 มม. จำนวน 4 ชั้น และชั้นเคฟลาร์มีความหนา 2 มม. จำนวน 3 ชั้น ถูกอัดให้รวมอยู่ด้วยกัน ผลของการจำลองแสดงให้เห็นว่ากระสุนสามารถทะลุชั้นงานได้โดยยางและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนและการกระจายตัวของความเครียดในเนื้อยางนั้นพบว่าแบบจำลองของมูนีและโยนั้นยังให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกัน



ก) ยางใช้แบบจำลองมูนี-ริฟลินและเคฟลาร์ใช้แบบจำลอง Puff



ข) ยางใช้แบบจำลองออกเคนและเคฟลาร์ใช้แบบจำลอง Puff



ค) ยางใช้แบบจำลองโยและเคฟลาร์ใช้แบบจำลอง Puff

รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์การยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรก

5. การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง

ภายหลังการทดลองยิงกระสุนขนาด 5.56 มม. ใส่ยางปรากกว่ากระสุนสามารถทะลุผ่านยางไปได้โดยง่าย ทั้งนี้วัดค่าความเร็วของกระสุนก่อนเข้าและหลังออกจากแผ่นยางแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเร็วของกระสุนก่อนเข้าและหลังออกจากแผ่นยาง

ชิ้นงานทดสอบ	ความเร็วเข้า [m/s]	ความเร็วออก [m/s]	%ลด
ยางหนา 30 มม.	963	954	0.93
ยางเสริมเส้นใยเคพลาร์หนา 30 มม.	971	915	5.7

เมื่อศึกษาขนาดของรูขาเข้าและรูขาออกของกระสุนพบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณอยู่ที่ 3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 6



ก) แสดงรูกระสุนขาเข้าของแผ่นทดสอบยางเสริมเส้นใยเคพลาร์

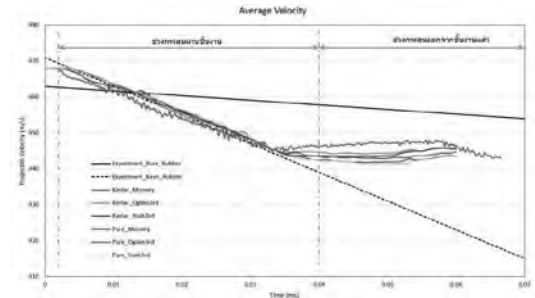


ข) แสดงรูกระสุนขาออกของแผ่นทดสอบยางเสริมเส้นใยเคพลาร์

รูปที่ 6 ผลวิเคราะห์การยิงกระสุนบนแผ่นยางทดลอง:

ก) รูกระสุนขาเข้า และ ข) รูกระสุนขาออก

ผลการจำลองนั้นสามารถวัดความเร็วเฉลี่ยของกระสุนขาออกได้อยู่ที่ประมาณ 945 m/s โดยที่แต่ละรูปแบบสมการของวัสดุนั้นให้ค่าที่ไม่ต่างกัน ดังแสดงในกราฟของรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความเร็วของกระสุนที่มีการเปลี่ยนแปลง

จากกราฟแสดงความเร็วของกระสุนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อวิ่งผ่านทะลุแผ่นยาง สามารถสรุปความเร็วของกระสุนโดยการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ของแผ่นยางได้ดังตารางที่ 3 และ สรุปความเร็วของกระสุนที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ของแผ่นยางและเคพลาร์ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 สรุปความเร็วกระสุนเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองของแผ่นยาง

ชิ้นงานทดสอบ	ความเร็วเข้า [m/s]	ความเร็วออก [m/s]	% ลด
ยาง 30 มม.	963	954	0.93
ผลการทดลอง	963	954	0.93
แบบจำลอง มูนนี่-ริฟลิน	968	942	2.68
แบบจำลอง อ็อกเดน	968	943	2.58
แบบจำลอง โย	968	942	2.68

เมื่อวัดร้อยละของความเร็วกะสุนที่ลดลงไปพบว่าข้อมูลที่ได้จากการใช้แบบจำลอง มีค่าค่อนข้างแตกต่างไปจากผลการทดลอง แต่รูปแบบของการลดลงของ

ความเร็วนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกแบบจำลองสาเหตุในเบื้องต้นมาจากความคลาดเคลื่อนในการคำนวณทางตัวเลข การขาดข้อมูลที่สมบูรณ์ของการทดสอบที่จะนำมาใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองยางและเคฟลาร์ ความคลาดเคลื่อนของการทำ Curve Fitting และข้อมูลผลการทดลองที่น้อยเกินไป จึงเป็นข้อเสนอนี้สำคัญเพื่อการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4 สรุปความเร็วกระสุนเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองของแผ่นยางเสริมแรงเคฟลาร์

ชิ้นงานทดสอบยางเสริมแรงเคฟลาร์หนา 30 มม.	ความเร็วขาเข้า [m/s]	ความเร็วขาออก [m/s]	% ลด
ผลการทดลอง	971	915	5.7
แบบจำลองมุนนี่-ริฟลิน	968	945	2.37
แบบจำลองอ็อกเดน	968	943	2.53
แบบจำลองโย	968	942	2.68

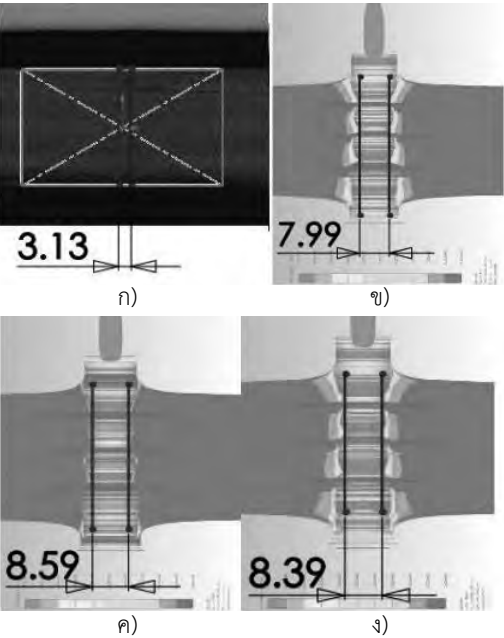
ผลการวัดขนาดของรูที่กระสุนปืนเจาะไว้ตามรูปที่ 8 พบว่า ค่าจากการจำลอง (รูปที่ 8 ข), ค) และ ง)) นั้นมีค่าสูงกว่าผลของการทดลอง (รูปที่ 8 ก)) เกินกว่า 2.5 เท่าเนื่องจากลักษณะธรรมชาติของยางที่มีความยืดหยุ่นจะมีการคืนตัวหรือหดตัวกลับได้ ทำให้น้ำหนักของรูเล็กกว่าขนาดของกระสุนคือ 5.56 มม. แต่ในแบบจำลองของยางที่ใช้นั้นไม่ได้นำพฤติกรรมนี้เข้าไปในแบบจำลองเนื่องจากการจำลองจะสามารถคำนวณได้ด้วยความรวดเร็วกว่า ดังนั้นจึงมีข้อเสนอนี้ให้มีการนำพฤติกรรมความยืดหยุ่นของยางเข้ามาจำลองเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงผลการทดลองมากขึ้น

6. สรุปผลและข้อเสนอนี้

6.1 สรุปผล

การวิจัยและพัฒนาทางทหารครั้งนี้ทำการศึกษาผลกระทบจากการใส่เส้นใยเสริมแรงเคฟลาร์ในยางพาราซึ่งมีพฤติกรรมในเชิงของแผ่นกันป้องกันกระสุนหลายชั้น ด้วยการจำลองการวิเคราะห์ยางและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยระเบิดไฟในต้อลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกด้วยการอ้างอิงสมการมุนนี่-ริฟลิน สมการอ็อกเดน และสมการโยร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบยาง และแบบจำลองวัสดุประเภทเคฟลาร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองของยางจาก Curve Fitting ของผลการทดลอง

ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มม. แสดงให้เห็นว่ากระสุนทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและก่อความเสียหายต่ออย่างมาก แบบจำลองของมุนนี่-ริฟลินและโยให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกันและผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกระหว่างกลาง แสดงให้เห็นว่ากระสุนสามารถทะลุชิ้นงานได้โดยยางและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนและพบว่าการกระจายตัวของความเครียดในเนื้อยางแบบจำลองของมุนนี่-ริฟลินและโยยังคงให้การกระจายตัวความเครียดที่คล้ายคลึงกัน



รูปที่ 8 ผลการวัดขนาดรูที่กระสุนเจาะไว้ : ก) จากการทดลอง, ข) แบบจำลองมุนนี่-ริฟลิน, ค) แบบจำลองอ็อกเดน, ง) แบบจำลองโย

6.2 ข้อเสนอแนะ

ประเด็นความเร็วกระสุนที่ลดลงจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองมีค่าค่อนข้างแตกต่างไปจากผลการทดลองขณะที่รูปแบบของการลดลงของความเร็วในแต่ละแบบจำลองนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน สืบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการคำนวณทางตัวเลข จึงเสนอให้เพิ่มเติมความสมบูรณ์ของข้อมูลจากการทดสอบเพื่อให้การหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองยางและเคพลาร์มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ลดความคลาดเคลื่อนของการทำ Curve Fitting เนื่องจากข้อมูลผลการทดลองที่น้อยเกินไป

อีกทั้งมีข้อเสนอแนะจากผลการวัดขนาดของรูที่กระสุนปืนเจาะไว้จากการใช้แบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลของการทดลองเกินกว่า 2.5 เท่า เนื่องจากลักษณะธรรมชาติของยางที่มีความยืดหยุ่น มีการคืนตัวหรือหดตัวกลับได้ ทำให้น้ำขนาดของรูเล็กกว่าขนาดของกระสุน แต่ในแบบจำลองของยางที่ใช้ไม่ได้ นำพฤติกรรมนี้เข้าไปในแบบจำลองเนื่องจากเหตุผลด้านการคำนวณได้เร็วกว่า ดังนั้นจึงเสนอแนะให้มีการนำพฤติกรรมความยืดหยุ่นเข้ามาจำลองเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษฎา สุชีวะ. 2557. โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราภายใต้เครือข่ายความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบการและหน่วยงานวิจัย. รายงานการศึกษาศัมบูรณ์. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. จำนวน 254 หน้า.
- [2] ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ. 2559. รายงานการดำเนินการโครงการวิจัยพื้นฐานยางทางทหาร ปี 2559. โครงการวิจัยพื้นฐานยางทางทหาร: รายงานการดำเนินงาน ต.ค. 2558 - ก.ย. 2559. Doc. No.: DTI-ORD-TP-2013: Rev.00. จำนวน 40 หน้า.
- [3] Editoiral team. 2019. Armoured vehicles and weapon systems. Thailand Defence Technology Journal. Volume 9 Issue 35: July - September 2019. pp. 56 - 69.

[4] ศรชัย กาญจนสูตร. 2560. การวิจัยและพัฒนาต้นแบบผลงานวิจัยทางทหารไปสู่การผลิตเพื่อนำไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม. เอกสารวิจัยส่วนบุคคล. วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร. จำนวน 92 หน้า.

[5] สำนักงานวิจัยและพัฒนาทางทหารกองทัพบก. 2560. ความร่วมมือด้านการวิจัยและพัฒนาในการใช้ยางพาราทางทหาร. บันทึกความเข้าใจระหว่างการยางแห่งประเทศไทยกับกองทัพบก. 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2560.

[6] Cole., R. P. (2010). Ballistic penetration of a sandbagged redoubt using silica sand and pulverized rubber of various grain sizes. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of South Florida. 22 October 2010. 120p.

[7] สิทธิศักดิ์ แจ่มนาม, บุชิต มาให้ และปิติ สุนทรสุขกุล. (2561) การดูดซับพลังงานและรูปแบบการวิบัติของผนังคอนกรีตแบบหลายชั้นจากเส้นใยเหล็กแผ่นโฟม และยางพารา. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 28 ฉบับที่ 3 ก.ค.-ก.ย.2561. หน้า 515 - 524.

[8] Maho, B., Jamnam, S., Sukontasukkul, P., Fujikak, K. and Banthia, N. (2017). Preliminary study on Multilayer bulletproof concrete panel: impact Energy absorption and failure pattern of fibre reinforced concrete, para-rubber and styrofoam sheets. 6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2017, 11-12 December 2017, Guangzhou (Canton), China.

[9] Miller, F. P., Vandome, A. F. and John, M. 2010. Hyperelastic material. VDM Publishing. 80p.