

การศึกษาและประเมินผลการใช้ laminated solid model เปรียบเทียบกับการเทคนิครีบาร์เพื่อ การจำลองชั้นผ้าใบฉาบเสริมเส้นใยเหล็กในโครงสร้างของยางล้อ

Study and evaluation of laminated solid model compare with rebar method for steel belt reinforced radial tire simulations

เอกรินทร์ พงพิณจิณนา* และ พงษ์ศักดิ์ นิมดำ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

*ติดต่อ: Ekkarin.p@eng.kmutnb.ac.th, 0 2555 2000 ต่อ 8315, 0 2586 9541

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอถึงความสามารถและขีดจำกัดของการวิเคราะห์ชั้นผ้าใบฉาบเสริมเส้นใยเหล็กของยางล้อเรเดียลโดยใช้เทคนิคที่มีชื่อว่ารีบาร์ (rebar) ทำการเปรียบเทียบกับ laminated solid model ทั้งในแบบดั้งเดิมและแบบประยุกต์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมอาบาคัส ในส่วนแรกเปรียบเทียบพฤติกรรมรวม (macroscopic properties) และความเค้นนอกระนาบของชั้นผ้าใบฉาบเสริมเส้นใยเหล็กหนึ่งชั้นและสองชั้นที่มีการรับภาระแรงดึงในทิศทางต่างๆ และในส่วนที่สองทำการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองการอัดลมของยางล้อโครงสร้างแบบเรเดียล พบว่าการใช้เทคนิครีบาร์นั้นมีจุดเด่นในเรื่องของการลดความยุ่งยากซับซ้อนในการทำแบบจำลอง แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่จะต้องคำนึงถึง อาทิเช่น การเปลี่ยนไปของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ใช้เทคนิค laminated solid models

คำหลัก: เทคนิครีบาร์, โฮโมจีไนเซชัน, ชั้นผ้าใบฉาบเสริมเส้นใยเหล็ก, ผลกระทบจากขอบ, laminated solid model

Abstract

This paper presents capabilities and limits of the rebar model compare to the laminated solid models in term of original homogenize and homogenize modified model. This study is dedicated to simulate the steel belts in the specific structural analysis of radial tire by FEM using Abaqus commercial program. First, macroscopic properties and out-of-plane stress due to edge effect is determined on the single and double layer(s) plate of steel belt structure in order to compare the accuracy of method. Second, the rebar model and laminated solid models were applied to simulate the 2D-antisymmetry of radial tire in pressurize phase. The results shown that the rebar method is the simplified model with an acceptable result, but not accurate compared to the laminated solid models due to flexible material in term of shear modulus properties.

Keywords: rebar method, homogenization method, steel belt ply, edge effect, laminated solid model

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางพาราธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาพบว่าเพียงแค้อยละ 13.6 ของปริมาณยางดิบที่ผลิตได้นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในประเทศด้วยเหตุนี้ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา หน่วยงานภาครัฐได้พยายามส่งเสริมและสนับสนุน เพื่อให้มีการเพิ่มศักยภาพในการผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยาง จากข้อมูลของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร [1] ในบรรดาผลิตภัณฑ์จากยางพาราทั้งหมด ยางล้อเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ปริมาณยางดิบมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 50 ของปริมาณยางที่แปรรูปในประเทศ สร้างรายได้จากการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางล้อประมาณ 104,650.20 ล้านบาท [2]

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าควรส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการมีการส่งออกและพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางล้อให้มากขึ้น โดยในการออกแบบยางล้อโดยส่วนใหญ่จะทำการหาจุดสมดุลของสมรรถนะในด้านต่างๆ โดยหนึ่งในสมรรถนะที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบคือการทนทานต่อการใช้งาน [3-5] โดยนิยามการทนทานต่อการใช้งานคือความเสียหายใดๆที่เกิดขึ้นจนทำให้อายุการใช้งานยางล้อน้อยกว่าอายุการเกิดการสึกหรอของหน้ายาง โดยปกติในการออกแบบการทนทานต่อการใช้งาน มักจะเกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานเนื่องจากแรงกระทำแบบพลวัต จนทำให้ยางล้อเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า (fatigue) โดยสมรรถนะด้านความทนทานต่อการใช้งาน ค่อนข้างจะมีความซับซ้อน เนื่องจากเกิดจากหลายปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยส่งผลกระทบซึ่งกันและกัน โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบทางด้านความทนทานเช่น ปัจจัยด้านวัสดุ ปัจจัยด้านโครงสร้างของยางล้อ ปัจจัยด้านกระบวนการผลิต ปัจจัยจากการใช้งานของลูกค้า และปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม

โดยการศึกษาและออกแบบสมรรถนะทางด้านความทนทานต่อการใช้งานจะเกี่ยวข้องกับรูปแบบความเสียหายของยางล้อยิ่งจะแบ่งตามบริเวณที่เกิดความเสียหาย [6] เช่น บริเวณขอบกระทะล้อ บริเวณชั้น belt

และ carcasses บริเวณยางใน บริเวณไหล่ยาง บริเวณแก้มยาง และบริเวณหน้ายาง เป็นต้น อย่างไรก็ตามความเสียหายที่สำคัญที่มักเกิดและมักนิยมใช้ในการตรวจสอบสมรรถนะยางล้อก็คือการเกิด ply separation ซึ่งเป็นลักษณะความเสียหายที่เกิดจาก crack ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นยางที่มีการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงที่มุมต่างกัน ซึ่งสาเหตุความเสียหายดังกล่าวจะเกิดจากกลไกทางกลและความเค้นนอกระนาบของโครงสร้างยางล้อเมื่อมีการรับภาระ โดยกลไกการเกิดความเสียหายดังกล่าวมีกลไกการเกิดในลักษณะเดียวกับกับการเกิด delamination ของวัสดุคอมโพสิต [7,8]

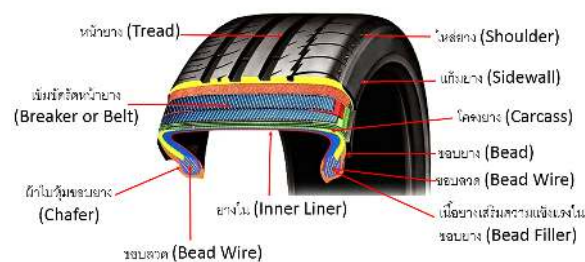
จากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทำให้ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาการออกแบบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายๆ อุตสาหกรรม ในส่วนของการออกแบบยางล้อด้วยเทคนิคระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าแยกออกเป็น 2 แนวทางด้วยกัน [9-11] โดยแนวทางที่หนึ่งใช้ทฤษฎีของ laminated shell model และแนวทางที่สองใช้ rebar model โดยทั้งสองแนวทางเป็นการพิจารณาพฤติกรรมของชั้นผ้าใบฉาบเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมแบบ anisotropic ซึ่งทำการพิจารณาบริเวณที่เป็นเส้นใยเสริมแรงด้วย shell element ส่งผลให้ขนาดของเส้นใย และค่าโมดูลัสการเค้นนอกระนาบไม่ถูกนำไปพิจารณา

จากข้อจำกัดดังกล่าวงานวิจัยนี้จะทำการนำเสนอแบบจำลอง laminated solid model ที่ใช้หลักการของ homogenization โดยใช้ทฤษฎีของ effective moduli methods ผ่านกฎของ mixtures methods ในการหาพฤติกรรมของชั้นผ้าใบฉาบ โดยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ถึงข้อดีข้อเสียกับแบบจำลอง rebar model

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบล้อยาง [3,4]

สำหรับโครงสร้างยางล้อสามารถแยกออกเป็นสองแบบคือ (1) ยางล้อโครงสร้างแบบไบแอสซึ่งเป็นยางล้อที่มีลักษณะการนำผ้าใบฉาบที่มีการเอียงของเส้นลวดหลักของชั้นผ้าใบฉาบด้านบนและด้านล่างที่ไขว้กันตลอดในแนวทิศแก้มยาง และ (2) ยางล้อแบบเรเดียลมีการวางชั้นผ้าใบฉาบที่ทำมุมไขว้กันในส่วนที่จะต้องสัมผัสกับผิวถนนและมีการเสริมการวางผ้าใบในทิศทางขนานไปกับแก้มยางตลอดหน้ายาง ผลที่ได้ทำให้ยางล้อแบบเรเดียลมีความแข็งแรงที่สูงในทิศทางเส้นรอบวงช่วยยืดอายุการใช้งานของยางล้อ นอกจากนั้นด้วยข้อดีจากการยึดตัวได้ดีบริเวณตรงแก้มยางส่งผลให้เกิดพื้นที่ contact patch หรือ footprint ที่สูงในขณะที่บังคับเลี้ยว ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวจะช่วยในการเกาะถนน นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติเด่นอีกประการคือให้ค่าแรงต้านการหมุนที่ต่ำ ทำใหยางเรเดียลมีการสูญเสียพลังงานน้อยช่วยในส่วนของการประหยัดพลังงานในขณะขับขี จากแนวโน้มพบว่าการใช้ยางล้อแบบเรเดียลที่สูงขึ้นและยางแบบไบแอสมีแนวโน้มการใช้ที่ลดต่ำลง ทำให้ในงานวิจัยนี้จะเน้นทำการศึกษาเฉพาะยางล้อแบบเรเดียลโดยมีลักษณะองค์ประกอบต่างๆ ของยางแบบเรเดียลแสดงดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 1 องค์ประกอบต่างๆ ของยางล้อแบบเรเดียล

2.2. วัสดุเชิงประกอบ (composite material)

เพื่อจะทำการหาพฤติกรรมของชั้นผ้าใบฉาบในส่วนของโครงยางและเข็มขัดรัดหน้ายางในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลอง laminated solid model ที่ใช้เทคนิค

ทางด้าน homogenization โดยใช้ทฤษฎีของ effective moduli methods ผ่านกฎของ mixtures methods ทำให้สามารถหาค่าสัดส่วนปัวซอง และโมดูลัสการยืดหยุ่นและการเค้นดัดแสดงในสมการด้านล่าง [12]

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (1)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + (1 - V_f) \nu_m \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{(1 - V_f)}{E_m} \quad (3)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{(1 - V_f)}{G_m} \quad (4)$$

โดยที่ E_1, E_2 คือค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นในทิศทางแนวแกนและแนวขวางตามลำดับ, G_{12} คือโมดูลัสการเค้นดัดในระนาบ, ν_{12} คือค่าสัดส่วนปัวซองในระนาบ, V_f คือสัดส่วนเชิงปริมาตรของเส้นใย, E_f, E_m คือค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของเส้นใยและเมตริกซ์ตามลำดับ, G_f, G_m คือค่าโมดูลัสการการเค้นดัดของเส้นใยและเมตริกซ์ตามลำดับ และ ν_f, ν_m คือสัดส่วนปัวซองของเส้นใยและเมตริกซ์ตามลำดับ

จากสมการที่ (1)-(4) นำไปคำนวณหาพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตแบบ anisotropic โดยใช้กฎของฮุกในกรณีทั่วไป [10]

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{\varepsilon}} \quad (5)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{S}} : \underline{\underline{\sigma}} \quad (6)$$

และ

$$\underline{\underline{S}} = \underline{\underline{C}}^{-1} \quad (7)$$

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

symm.

โดยที่

- $\underline{\underline{\sigma}}$ คือ stress tensor order 2
 $\underline{\underline{\epsilon}}$ คือ strain tensor order 2
 $\underline{\underline{C}}$ คือ stiffness tensor order 4
 $\underline{\underline{S}}$ คือ compliance Tensor order 4

2.3 ผลจากทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย

อย่างไรก็ตามจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5)-(8) พบว่าพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตแบบ anisotropic จะขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง โดยปกติการเรียงตัวที่มุมต่างๆ จะใช้ระบบของ Euler's rotation theorem ที่อธิบายการหมุนด้วยมุมสามมุม (ψ, θ, ϕ) ทำให้สามารถหาค่า stiffness matrix ของวัสดุได้ตามสมการด้านล่าง [10,11]

$$\underline{\underline{C'}} = \underline{\underline{P}}_{\sigma} : \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{P}}_{\epsilon} \quad (9)$$

โดยที่

$$\underline{\underline{P}}_{\epsilon} = \begin{bmatrix} Q_{11}^2 & Q_{21}^2 & Q_{31}^2 & 2Q_{31}Q_{21} & 2Q_{31}Q_{11} & 2Q_{21}Q_{11} \\ Q_{12}^2 & Q_{22}^2 & Q_{32}^2 & 2Q_{32}Q_{21} & 2Q_{32}Q_{11} & 2Q_{22}Q_{11} \\ Q_{13}^2 & Q_{23}^2 & Q_{33}^2 & 2Q_{33}Q_{21} & 2Q_{33}Q_{11} & 2Q_{23}Q_{11} \\ Q_{12}Q_{13} & Q_{22}Q_{23} & Q_{32}Q_{33} & Q_{32}Q_{23} + Q_{22}Q_{33} & Q_{32}Q_{13} + Q_{12}Q_{33} & Q_{22}Q_{13} + Q_{12}Q_{23} \\ Q_{11}Q_{13} & Q_{21}Q_{23} & Q_{31}Q_{33} & Q_{31}Q_{23} + Q_{21}Q_{33} & Q_{31}Q_{13} + Q_{11}Q_{33} & Q_{21}Q_{13} + Q_{11}Q_{23} \\ Q_{11}Q_{12} & Q_{21}Q_{22} & Q_{31}Q_{32} & Q_{31}Q_{22} + Q_{21}Q_{32} & Q_{31}Q_{12} + Q_{11}Q_{32} & Q_{21}Q_{12} + Q_{11}Q_{22} \end{bmatrix}$$

$$\underline{\underline{P}}_{\sigma} = \begin{bmatrix} Q_{11}^2 & Q_{21}^2 & Q_{31}^2 & Q_{31}Q_{21} & Q_{31}Q_{11} & Q_{21}Q_{11} \\ Q_{12}^2 & Q_{22}^2 & Q_{32}^2 & Q_{32}Q_{21} & Q_{32}Q_{11} & Q_{22}Q_{11} \\ Q_{13}^2 & Q_{23}^2 & Q_{33}^2 & Q_{33}Q_{21} & Q_{33}Q_{11} & Q_{23}Q_{11} \\ 2Q_{21}Q_{31} & 2Q_{22}Q_{31} & 2Q_{23}Q_{31} & Q_{32}Q_{23} + Q_{22}Q_{33} & Q_{32}Q_{13} + Q_{12}Q_{33} & Q_{22}Q_{13} + Q_{12}Q_{23} \\ 2Q_{11}Q_{31} & 2Q_{12}Q_{31} & 2Q_{13}Q_{31} & Q_{31}Q_{23} + Q_{21}Q_{33} & Q_{31}Q_{13} + Q_{11}Q_{33} & Q_{21}Q_{13} + Q_{11}Q_{23} \\ 2Q_{11}Q_{12} & 2Q_{11}Q_{22} & 2Q_{11}Q_{32} & Q_{31}Q_{22} + Q_{21}Q_{32} & Q_{31}Q_{12} + Q_{11}Q_{32} & Q_{21}Q_{12} + Q_{11}Q_{22} \end{bmatrix}$$

และ

$$[Q_{ij}] = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \phi - \sin \psi \cos \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi - \sin \psi \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \phi - \cos \psi \cos \theta \sin \phi & -\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \theta \cos \phi & -\cos \psi \sin \theta \\ \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \end{bmatrix}$$

2.4 rebar element

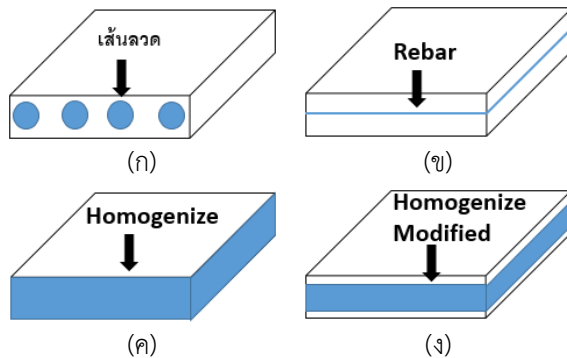
สำหรับแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เทคนิครีบาร์เป็นแบบจำลองที่ใช้ลักษณะแบบ shell element ที่ทำทานิยามที่ตำแหน่งระนาบกึ่งกลางของเส้นใยเสริมแรงฝังลงไปเมตริกซ์ โดยเอลิเมนต์เป็นแบบ 3 DOF (degrees of freedom) ที่สามารถยืด/หดและหมุนในระนาบได้ ซึ่งการใช้เทคนิครีบาร์ในโปรแกรม

FEM ของอาบาคัสจะมีการจำลองพฤติกรรมโดยการกำหนดคุณสมบัติของเส้นลวดได้แก่ (1) ขนาดพื้นที่หน้าตัด (2) ระยะพิท (3) มุมในการเรียงตัว และ (4) พฤติกรรมทางกล (ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น และสัดส่วนปัวซอง)

3. วิธีการทดสอบ

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของแบบจำลองระหว่าง laminate solid model และ rebar model ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของชั้นผ้าในฉาบเสริมแรงด้วย 4 รูปแบบ (รูปที่ 2) ดังนี้

- แบบจำลองเหมือนจริงเป็นการจำลองผ้าใบฉาบเสริมแรงที่สอดคล้องกับรูปจริงซึ่งประกอบด้วยส่วนของเส้นลวดและเนื้อยาง
- แบบจำลอง Rebar เป็นการใส่ rebar element เพื่อการจำลองในส่วนของเส้นใยเสริมแรงด้วย shell element ที่มีการคำนวณแบบ rebar model
- แบบจำลอง Homogenize เป็นการใส่ laminate solid model ในการจำลองพฤติกรรมของผ้าใบเสริมแรงตลอดหน้าตัดของความหนาโดยใช้เทคนิค Homogenization ผ่านพฤติกรรมแบบ anisotropic
- แบบจำลอง Homogenize modified เป็นแบบจำลองคล้ายกับแบบจำลอง Homogenize ที่ใช้ laminate solid model แต่ทำการ Homogenization เฉพาะส่วนของความหนาของเส้นลวดในผ้าใบเสริมแรงเท่านั้นที่จำลองให้มีพฤติกรรมแบบ anisotropic ในส่วนที่เหลือยังคงทำการจำลองพฤติกรรมให้เป็นวัสดุยางดังเดิม



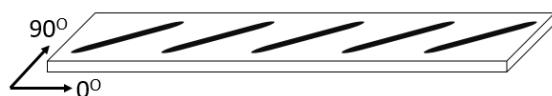
รูปที่ 2. แบบจำลองที่ถูกใช้ในงานวิจัย: (ก) Real model, (ข) Rebar model, (ค) Homogenize model และ (ง) Homogenize modified model

โดยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ จะถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาข้อดีข้อเสีย โดยการนำแบบจำลองทั้ง 4 แบบไปทำการ simulation เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลจากผลกระทบที่เกิดจากการเรียงตัวของเส้นลวดในชั้นยาง โดยการทำการ simulation ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

1. การจำลองการรับภาระแรงดึงของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงกรณี 1 ชั้น
2. การจำลองการรับภาระแรงดึงของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงกรณี 2 ชั้น
3. การจำลองการอัดลมในโครงสร้างยางล้อแบบเรเดียลของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรง

3.1 การจำลองการรับภาระแรงดึงของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงกรณี 1 ชั้น

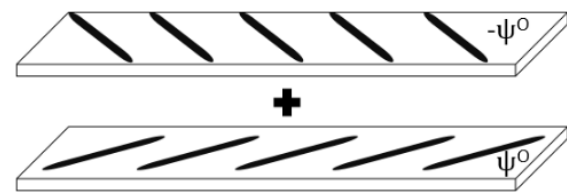
สำหรับกรณีนี้เป็นการทำ simulation ในการรับภาระแรงดึงของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรง 1 ชั้น ของแบบจำลองทั้ง 4 แบบดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น โดยทำการปรับเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวของเส้นลวดจาก 0 องศา ถึง 90 องศา (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 การเรียงตัวของเส้นลวดในชั้นยางและแกนอ้างอิง

3.2 การจำลองการรับภาระแรงดึงของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงกรณี 2 ชั้น

ในการทำ simulation กรณีที่สองเป็นการจำลองการรับภาระแรงดึงของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงแบบ 2 ชั้น ที่มีทิศทางการเรียงตัวของเส้นลวดไขว้กันแบบ $(\pm\psi, 0, 0)$ (รูปที่ 4) โดยจะทำการวิเคราะห์การเกิดความเค้นเฉือนนอกกระนาบซึ่งเป็นเหตุที่ก่อให้เกิดการแยกตัวของชั้นยางในโครงสร้างยางล้อ [6-8]



รูปที่ 4 การเรียงตัวไขว้กันของเส้นลวดในชั้นยาง

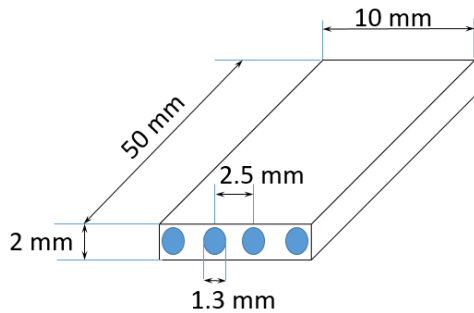
3.3 การจำลองการอัดลมในโครงสร้างยางล้อแบบเรเดียลของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรง

การทำ simulation ในขั้นตอนนี้เป็นการจำลองการอัดลมของแบบจำลองยางล้อใน 2 มิติแบบสมมาตรรอบแนวแกน ซึ่งประกอบด้วยส่วนของเนื้อยางต้นแทรกด้วยชั้นผ้าใบเสริมแรงเพื่อทำหน้าที่เป็นเข็มขัดรัดหน้ายาง (Belt) และ โครงยาง (Carcass) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหาจุดเด่นและจุดด้อยของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ อันได้แก่ (1) แบบจำลอง Rebar, (2) แบบจำลอง Homogenize และ (3) แบบจำลอง Homogenize modified

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลจากการจำลองการรับภาระแรงดึงของชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงกรณี 1 ชั้น

การจำลองชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงของแบบจำลองทั้ง 4 แบบ กำหนดให้ลักษณะการเสริมโยมีขนาดและรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้ยางและเส้นลวดมีสมบัติทางกลแบบเชิงเส้นและมีค่าดังแสดงในตารางที่ 1

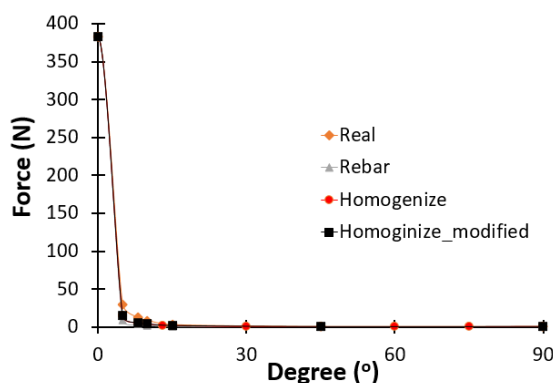


รูปที่ 5 ขนาดและรูปร่างของชิ้นผ้าใบฉาบเสริมใยเหล็ก

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลแบบเชิงเส้นของยางและเส้นลวดเสริมแรง

	ค่าโมดูลัส (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง
ยาง	5	0.49
เส้นลวด	36000	0.3

จากผลการทำ simulation ด้วยการรับภาระแรงดึง ที่ระยะการยืดตัวเท่ากับ 0.1 มม ของทั้ง 4 แบบจำลอง ที่มุมต่างๆ พบว่าเมื่อนำค่าแรงที่ใช้ในการดึงเทียบกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นลวด สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6



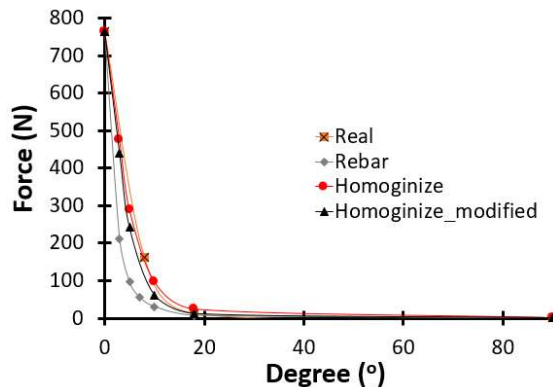
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นลวดในชั้นยาง

จากกราฟจะเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบ ให้ค่าแรงดึงที่มีความใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่มุม 0 องศา และ 90 องศา พบว่าค่าแรงดึงที่

ใช้ในกรณีแบบจำลองเหมือนจริง แบบจำลอง Homogenize และ แบบจำลอง Homogenize modified ให้ค่าออกมาเท่ากัน (382.4 นิวตัน และ 0.4 นิวตัน ตามลำดับ) โดยในส่วนแบบจำลอง Rebar ให้ค่าที่แตกต่างกันโดยใช้แรงเท่ากับ 382.5 นิวตัน ในทิศทาง 0 องศา และ ใช้แรง 0.3 นิวตัน ในทิศทาง 90 องศา ถึงแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยมาก แต่เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยยะ โดยความแตกต่างเกิดจากการแทรกเส้นใยเหล็กเข้าในชั้นยางด้วย rebar element ส่งผลให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเกิดความคลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริง แต่เนื่องจากส่วนของเมทริกซ์ในงานวิจัยนี้คือยางซึ่งมีค่าโมดูลัสต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสของเส้นลวด ทำให้ค่าแรงดึงที่ได้มีค่าไม่แตกต่างจากค่าที่แท้จริง ในทางกลับกันหากค่าโมดูลัสของเมทริกซ์มีค่าสูงขึ้น ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Rebar ก็จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นตาม แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลอง Rebar ที่มีการใช้ rebar element มีความสะดวกในการทำ simulation (การสร้าง mesh และการกำหนดสมบัติของวัสดุ) และใช้เวลาในการประมวลผลต่ำ เมื่อเทียบกับแบบจำลองโครงสร้างเหมือนจริง ซึ่งหากต้องการความถูกต้องจะต้องทำการตีเมชละเอียดมาก เป็นเหตุให้ใช้เวลา และทรัพยากรในการคำนวณสูง

4.2 ผลจากการจำลองการรับภาระแรงดึงของชิ้นผ้าใบฉาบเสริมแรงกรณี 2 ชั้น

การจำลองในหัวข้อนี้เปรียบได้กับการนำแบบจำลองในหัวข้อก่อนมาซ้อนทับกันโดยมีทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยไขว้กันและการยึดติดระหว่างชั้นโดยสมบูรณ์ จากนั้นทำการทดสอบด้วยการรับภาระแรงดึงให้เกิดการยึดเป็นระยะ 0.1 มม จากการทดสอบทั้ง 4 แบบนำค่าแรงดึงและค่ามุมบิดของเส้นใยเสริมแรงมาสร้างความสัมพันธ์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7

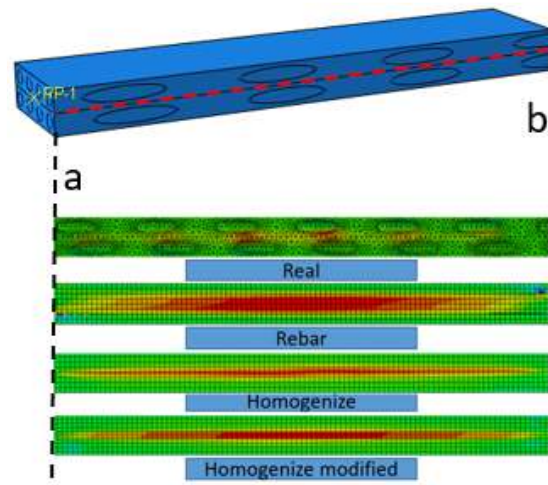


รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดิ่งกับมุมบิดไขว้กันของเส้นลวด

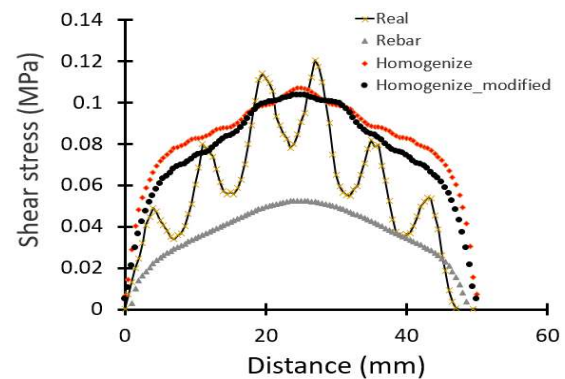
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบให้ค่าแรงดิ่งเท่ากันในกรณีที่ลวดเรียงตัวในทิศทาง 0 องศา แต่เมื่อเริ่มทำการบิดมุมทิศทางของเส้นใย พบว่าแรงที่ใช้ในการดิ่งที่มีระยะยืดเท่ากัน กรณีแบบจำลอง Rebar มีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่เหลือทั้งสามแบบ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การแทรกชั้นของ rebar ในลักษณะ shell element ที่ระนาบกึ่งกลางในแต่ละชั้นของแผ่นยางเปรียบเสมือนว่าเส้นลวดที่แทรกเข้าไปแบบไม่มีความหนา โดยสามารถรับแรงดิ่งได้ ดังนั้นการรับแรงดิ่งในทิศ 0 องศา จึงให้ค่าที่ถูกต้องเพราะเป็นการรับภาระแรงดิ่งเพียงอย่างเดียว แต่ถ้าลวดเกิดการเอียงมุม เมื่อมีแรงดิ่งกระทำจากภายนอกชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงจะเกิดการเสียรูปแบบการยืดและการเอียงไปพร้อมกัน โดยค่าความแข็งของโมดูลัสการเอียงของชั้นผ้าใบฉาบจะขึ้นกับระยะห่างของลวดที่อยู่ชั้นติดกัน ดังนั้นแบบจำลอง Rebar ที่พิจารณาแบบไม่มีความหนาของลวดส่งผลให้ความหนาของยางที่แทรกอยู่ระหว่างลวดมีความหนามากกว่าแบบจำลองอื่น ดังนั้นค่าความเค้นเฉือนระหว่างแผ่นยางจึงมีค่าต่ำลงและทำให้เสียรูปได้ง่าย

รูปที่ 8 เป็นตัวอย่างกรณีที่เส้นลวดทำมุมไขว้กัน +/- 18 องศา และเมื่อพิจารณาค่าความเค้นเฉือนนอกระนาบตามบริเวณขอบของแผ่นยาง (ตามเส้น a – b ในรูปที่

8(ก)) พบว่าค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากแบบจำลองเหมือนจริงนั้นมีการแกว่งขึ้นลงตามระยะห่างของเส้นลวดบริเวณขอบ และเมื่อพิจารณาพร้อมกับแบบจำลอง Homogenize และ แบบจำลอง Homogenize modified พบว่าแบบจำลองทั้งสองสามารถพยากรณ์ค่าความเค้นเฉือนได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองเหมือนจริง



(ก)

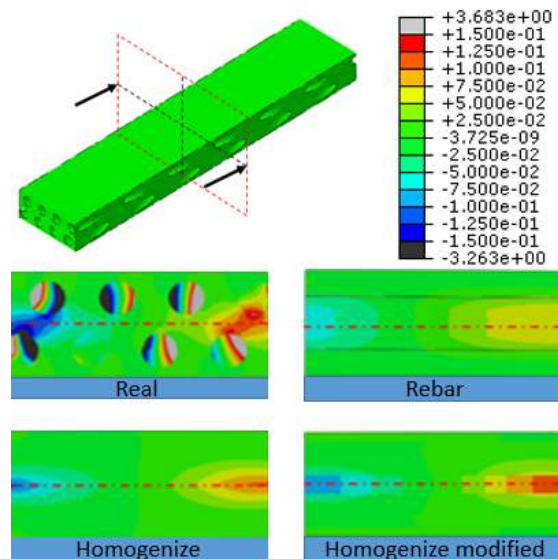


(ข)

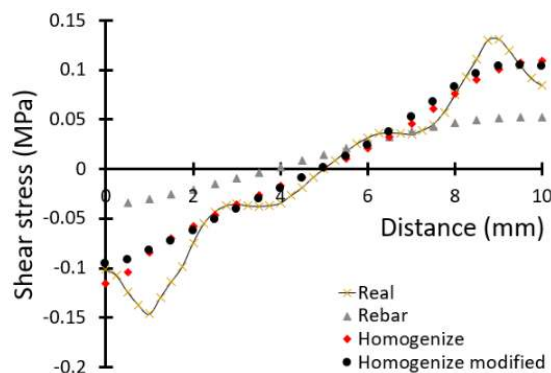
รูปที่ 8 (ก) แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นเฉือนในแต่ละแบบจำลอง, (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะทางตามขอบ

ในลำดับต่อมาทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นเฉือนที่ระนาบกึ่งกลางของชั้นทดสอบดังรูปที่ 9 พบได้ว่าที่บริเวณขอบทางด้านซ้ายและขอบทางด้านขวานั้นมีค่าความเค้นเฉือนสูงซึ่งเกิดจากผลกระทบจากขอบ [7,8]

โดยจะเกิดพฤติกรรมดังกล่าวเมื่อขึ้นทดสอบมีทิศทางการเรียงตัวของเส้นลวดไขว้กันพฤติกรรมนี้เป็นสาเหตุให้ชั้นยางสองชั้นแยกตัวออกจากกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 (ก) แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นเฉือนในแต่ละแบบจำลอง, (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับระยะทางตามแนวขวาง

4.3 ผลจากการจำลองการรับภาระแรงดันในโครงสร้างยางล้อของชั้นผ้าใบฉาบเสริมใยเหล็ก

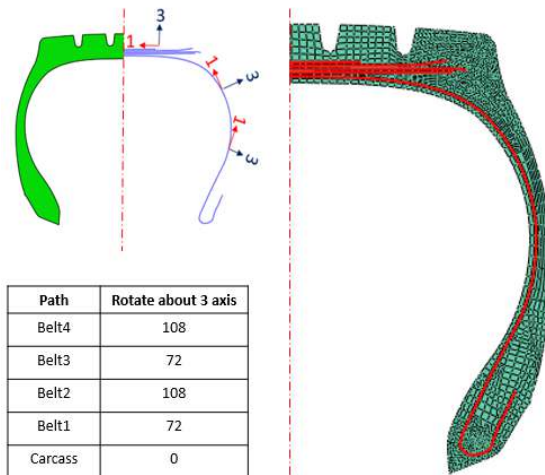
ในขั้นตอนสุดท้ายนี้เป็นการนำแบบจำลองทั้งสามแบบอันได้แก่ แบบจำลอง Rebar แบบจำลอง Homogenize และ แบบจำลอง Homogenize

modified มาใช้เพื่อทำการจำลองชั้นผ้าใบฉาบเสริมแรงในล้อยาง โดยกำหนดให้ทิศทางการลวดในบริเวณโครงยาง (Carcass) วิ่งขนานแนวหน้าตัดของล้อยาง (0°) และในส่วนของการเสริมชั้นรัดหน้ายางทั้ง 4 ชั้น ทิศทางการเส้นใยเอียงเป็นมุม 72 องศา สลับกับมุม 108 องศา รอบแกน 3 (รูปที่ 10) โดยทำการศึกษาผลของแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก อันได้แก่การพิจารณาการเสียรูปโดยรวมของหน้าตัดยางล้อหลังอัดลมที่ระดับแรงดัน 5 บาร์ และการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของวัสดุ เช่น แรงดึงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดในชั้นโครงยางและค่าเค้นนอกระนาบบริเวณไหล่ยางของแต่ละชั้น

รูปที่ 11 แสดงส่วนประกอบของหน้ายางที่ใช้ในการทำ simulation โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ในส่วนแรกคือส่วนของเนื้อยางจะทำการคำนวณด้วยเอลิเมนต์ชนิด CGAX4 (Four-node axisymmetric element) มีความสมมาตรรอบแนวแกนที่ให้ค่าความเค้นและความเครียดในทิศทางนอกระนาบได้ และในส่วนที่สองคือเข็มขัดรัดหน้ายาง (belt) และโครงยาง (Carcass) โดยในส่วนนี้จะถูกจำลองโดยใช้แบบจำลองทั้ง 3 แบบดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สำหรับเอลิเมนต์ที่ถูกใช้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ SFMGAX1 (Generalized Axisymmetric surface elements) ใช้สำหรับแบบจำลอง Rebar และ CGAX4 ใช้สำหรับแบบจำลอง Homogenize และ แบบจำลอง Homogenize modified

เมื่อวิเคราะห์ผลของการทำ simulation จากแบบจำลองทั้งสาม ในมิติของการเสียรูปของโครงสร้างโดยรวมพบว่า แบบจำลอง Homogenize มีการเสียรูปน้อยที่สุด ส่วนแบบจำลอง Rebar และแบบจำลอง Homogenize modified ให้ค่าการเสียรูปที่ใกล้เคียงกัน และมีการเสียรูปมากกว่าแบบจำลองสาร Homogenize (รูปที่ 11) เนื่องจากว่าพฤติกรรมทางกลกรณีแบบจำลอง Homogenize ที่มีการพิจารณาเส้นลวดเสริมแรงและยางเป็นวัสดุเนื้อเดียวพฤติกรรมแบบ anisotropic ที่มีความ

แข็งสูง ทำให้เกิดการเสียรูปจากการตัดตัวได้ยากกว่าเมื่อเทียบอีกสองจำลองที่เหลือ

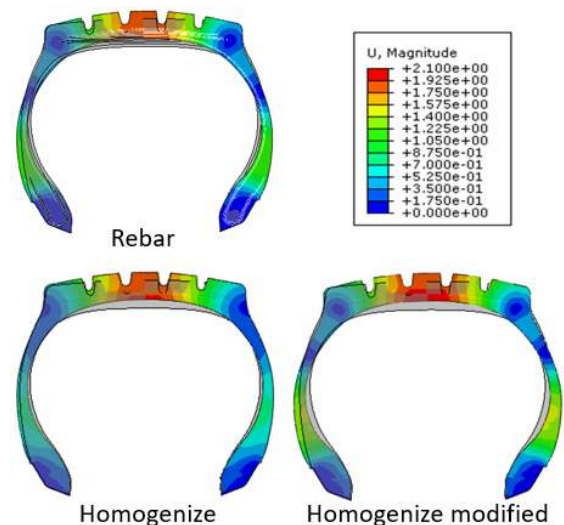


รูปที่ 10 ส่วนประกอบของหน้า และทิศทางของเส้นลวดในส่วนต่างๆ

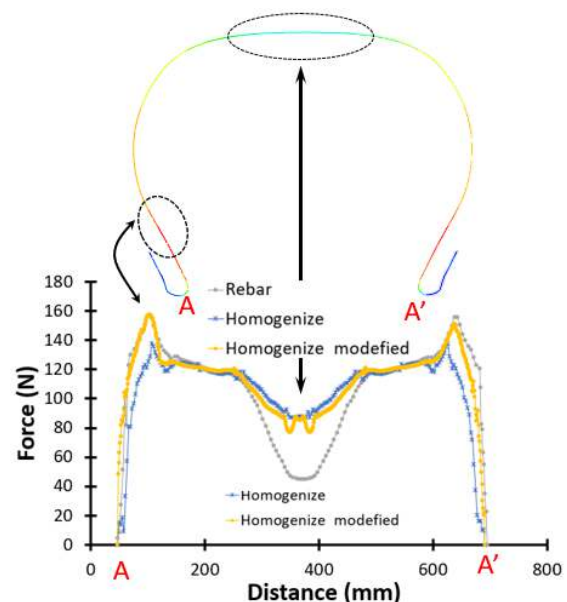
รูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงการแบกรับภาระแรงดึงของลวดในบริเวณโครงยาง พบว่าทั้ง 3 แบบจำลองให้ผลออกมาในทิศทางที่สอดคล้องกัน โดยบริเวณขอบลวด (bead) เส้นลวดมีการรับภาระแรงดึงสูง จากนั้นมีแนวโน้มลดลงในบริเวณหน้ายาง เนื่องจากในบริเวณนี้มีเข็มขัดรัดหน้ายางช่วยรับภาระอยู่ นอกจากนี้ยังพบว่าที่บริเวณแก้มยาง แบบจำลอง Rebar ให้ผลแรงดึงใกล้เคียงกับแบบจำลอง Homogenize modified ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางของหน้ายาง แบบจำลอง Rebar รับภาระแรงดึงต่ำเมื่อเทียบกับสองแบบที่เหลือ

ในลำดับต่อมาเมื่อพิจารณาค่าความเค้นเฉือนบริเวณไหล่ยางที่เกิดจากผลกระทบขอบอันเนื่องมาจากการเรียงตัวของเส้นลวดในทิศทางที่ไขว้กันของชั้นเข็มขัดรัดหน้ายาง พบว่าค่าความเค้นเฉือนนอกกระนาบที่ได้จากแบบจำลอง Rebar และแบบจำลอง Homogenize modified (รูปที่13) ให้ค่าความเค้นที่สูงบริเวณขอบซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โดยเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบที่ตำแหน่งชั้นต่างๆ พบว่าที่

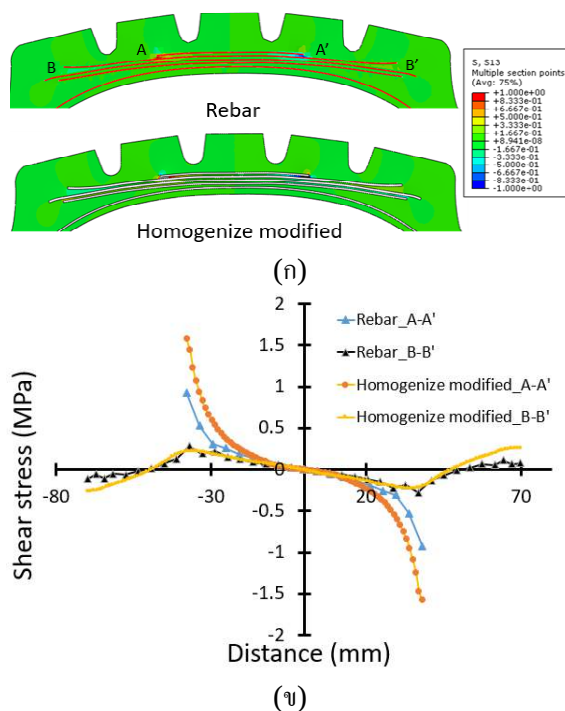
บริเวณ A และ A' มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณ B และ B' เนื่องจากที่ปลายเข็มขัดรัดหน้ายางที่ 2 และ 3 นั้นถูกแทรกด้วยชั้นยางเพื่อช่วยลดผลกระทบจากขอบซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง [6]



รูปที่ 11 การเสียรูป ที่ความระดับความดัน 5 บาร์



รูปที่ 12 ภาระแรงดึงเส้นลวดในชั้นโครงยาง (Carcass)



รูปที่ 13 แสดงผล FEM ความเค้นนอกระนาบ: (ก) ความเค้นเฉือนในเนื้อยางระหว่างชั้นของเข็มขัดรัดหน้ายาง (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นเฉือนกับตำแหน่ง

5. สรุป

จากผลการศึกษาแบบจำลองทั้ง 4 แบบพบว่า

- แบบจำลองเหมือนจริงให้ค่าความแข็งแรงและค่าความเค้นเฉือนนอกระนาบจากผลกระทบขอบได้ถูกต้องแต่มีการใช้ทรัพยากรในการคำนวณสูงรวมทั้งมีความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองกรณีล้ออย่างอัดลม
- แบบจำลอง Homogenize สามารถแสดงพฤติกรรมการเสียรูปและการรับแรงได้ดี แต่ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าความเป็นจริงทำให้ค่าความเค้นนอกระนาบที่เกิดจากผลกระทบขอบมีค่านสูง นอกจากนี้ยังมีความยุ่งยากในการเตรียมค่าพฤติกรรมของวัสดุซึ่งขึ้นกับทิศทางการเรียงตัว
- แบบจำลอง Rebar สามารถแสดงพฤติกรรม การเสียรูปและการรับแรงได้ดี แต่มีค่าโมดูลัสการเฉือนต่ำกว่าความเป็นจริงส่งผลให้เกิดการ

เสียรูปได้ง่ายและให้ค่าความเค้นเฉือนนอกระนาบจากผลกระทบขอบต่ำกว่าปกติ นอกจากนี้ยังมีปัญหาในส่วนของสัดส่วนเชิงปริมาตรที่แตกต่างจากความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตามมีข้อดีในเรื่องของการทำแบบจำลองทั้งในส่วนของการขึ้นแบบจำลอง และการกำหนดค่าพฤติกรรมของโครงยางและเข็มขัดรัดหน้ายาง

- แบบจำลอง Homogenize modified สามารถแสดงพฤติกรรมการเสียรูปและการรับแรงได้ดี และให้ค่าโมดูลัสการเฉือนที่สอดคล้องกับความเป็นจริงทำให้ผลการเสียรูปและค่าความเค้นเฉือนนอกระนาบมีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง แต่อย่างไรก็ตามมีข้อด้อยทั้งในส่วนของการขึ้นแบบจำลอง และการกำหนดค่าพฤติกรรมของโครงยางและเข็มขัดรัดหน้ายาง นอกจากนี้ด้วยความซับซ้อนของแบบจำลองกรณีโครงสร้างยางล้อการอัดลมส่งผลให้ต้องใช้จำนวนเอลิเมนต์ที่สูง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 2556.
- [2] กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง 2556 สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 2556.
- [3] Clark, S.K., "Mechanics of pneumatic tires," University of Michigan, 1981.
- [4] Jazar, R.N., "Vehicle Dynamics: Theory and application" ISBN: 978-0-387-74243-4, Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [5] Pacejka, H.B., "Tyre and Vehicle Dynamics" 2nd edition Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.

- [6] Engineering Analysis Report and Initial Decision: EA00-023: Firestone Wilderness AT Tires, U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration Safety Assurance Office of Defects Investigation, 2001.
- [7] Nimdum, P. and Renard, J., “Comportement de composites tissés épais soumis à des sollicitations quasi statiques”, RCMA, Revue des composites et des matériaux avancés, vol.20-n°1, 2010.
- [8] Nimdum, P. and Renard, J., “Non local approach for prediction of delamination onset”, Proceeding of 18th International Conference on Composite Materials, 21 – 26 Août 2011, Jeju Island, Korea.
- [9] Kabe, K. and Koishi, M., “Tire Cornering Simulation Using Finite Element Analysis” Journal of Applied Polymer Science, vol. 78, pp. 1566–1572, 2000.
- [10] Tonuk, E. and Unlusoy, Y.S., “Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis”, Computers and structures, vol.79, pp. 1219–1232, 2001.
- [11] Yanjin, G., Guoqun, Z. and Gang, C., “Influence of Belt Cord Angle on Radial Tire under Different Rolling States”, Journal of Reinforced plastics and composites, vol. 25, No. 10, 2006.
- [12] Bunsell, A.R. and Renard, R., “Fundamentals of fibre reinforced composite materials”, Institute of physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2005.
- [13] Thionnet A., and Martin, C., “Mecanique et comportements des milieu continus: Tome1- Concepts generaux”, ellipses, 2003.