

ค่าของตัวแปรร่องยางที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบร่องยางแบบกล่อง

Optimal tire slit variables for tire tread block design

ธีทัต ดลวิชัย^{1,3}, จำลอง ลิ้มตระกูล² และ สุจินต์ บุรีรัตน์³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ.นครราชสีมา 30000

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จ.ขอนแก่น 40000

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 044 224 231, โทรสาร: 044 224 316 E-mail: prapun@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันธุรกิจยานยนต์มีการเจริญเติบโตที่สูง ยางรถยนต์ถือเป็นส่วนประกอบหลักของรถยนต์ ซึ่งผู้ผลิตใช้รูปแบบของดอกยางเป็นจุดขาย ไม่ว่าจะเป็นยางประหยัดน้ำมัน ยางเพิ่มแรงฉุดลาก ยางรีดน้ำ โดยงานวิจัยในอดีตไม่มีนำเสนอต่อสาธารณะถึงที่มาของรูปแบบดอกยาง เนื่องจากเป็นความลับที่แต่ละบริษัทผู้ผลิตยางใช้เป็นกลยุทธ์ในการแข่งขัน Farhad T. เริ่มต้นวิเคราะห์ดอกยางรูปแบบง่ายคือ ดอกยางรูปกล่อง(tire tread block) โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป (DINA) ศึกษาความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกันของยางรถยนต์กับแผ่นแกร่งมีความฝืด(rigid friction plate) โดยงานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ดอกยางรถยนต์เป็นในลักษณะแบบกาวกระโดด คือวิเคราะห์จากรูปแบบดอกยางจริงแต่ขาดถึงที่มาของรูปร่างนั้น งานวิจัยนี้นำเสนอที่มาและค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรร่องดอกยางชนิดกล่อง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการสองฟังก์ชันเป้าหมาย โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่ใช้ในการออกแบบ คือ ค่าความเค้นเนื่องจากแรงเสียดทานมากที่สุด และค่าความเค้นสัมผัสในแนวตั้งฉากน้อยที่สุด ทำการวิเคราะห์ร่องดอกยาง 2 รูปแบบคือ ร่องยางรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม และปริซึมฐานสี่เหลี่ยม โดยจำลองการสัมผัสระหว่างดอกยางและแผ่นแกร่งมีความฝืด รูปแบบการสัมผัสเป็นแบบกดอัดและแบบสไลด์ของดอกยาง ซึ่งค่าตัวแปรร่องดอกยางที่ดีที่สุดนำเสนอในรูปของช่วงข้อมูลและค่าฐานนิยมตามเซตผลเฉลยของพาเรโต

คำหลัก: ความเค้นสัมผัส ร่องยาง แรงฉุดลาก ตัวแปรออกแบบ การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการ

Abstract

At present, automotive market has grown rapidly. Tire is the significant main part of the vehicle which the tire companies used the tire tread configuration as the selling point, such as fuel economy tire, increasing traction tire, water squeezing tire. The previous works about consequences of tire tread shape are not publishing, because of the confidentiality of any tire company of commercial strategy. The first

publish about simple tire tread was presented by Farhad T. as block shape. He used the commercial finite element program (DINA) to analyze the behavior of contact stresses at contact patch of tire tread block and rigid friction plate. Present researches about analysis of tire tread are informed by jumping of knowledge; because of they analyze the tire tread shape at present but do not have any consequents of its shape. These works are present optimal tire slit variables for tire tread block that use the combination of finite element analysis and two-objective evolutionary algorithm (MOEA). The two objective are consist of maximize the friction contact pressure and minimize normal contact pressure. The tire slit shape are classified in two configurations, first is triangular prism and second rectangle prism. The finite element model is modeled as contacting of a tire tread block and a rigid friction plate. The contact configurations are assigned as compression and sliding of tire tread. The optimal value of design variables are present inform of values interval and mode of individual variable of Pareto optimal set.

Keywords: Contact stress, tire slit, traction, design variables, evolutionary optimization

1. บทนำ

ยางรถยนต์ถือเป็นอีกนวัตกรรมหนึ่งที่ใช้ในงานในวงการยานยนต์ โดยปัจจุบันมีการแข่งขันกันของผู้ผลิตยางรถยนต์ ซึ่งเน้นที่ตัวดอกยาง (tire tread) ไม่ว่าจะเป็นยางประหยัดน้ำมัน หรือยางเพิ่มแรงฉุดลาก (traction) ยางยึดเกาะพื้นถนน ยางรีดน้ำ เป็นต้น จากประเด็นดังกล่าว บางประเด็นไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในเวลาเดียวกันอาทิเช่น การใช้งานรถยนต์ที่ต้องการประหยัดน้ำมันพร้อมกับต้องการแรงขับเคลื่อนที่สูง หากนำประเด็นที่กล่าวข้างต้นเป็นเป้าหมายในการออกแบบดอกยางที่เหมาะสมที่สุด จะถือเป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi-objective optimization problem) ปัจจุบันขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย (Multi-objective evolutionary Algorithm) ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้เพื่อแก้ปัญหาข้อขัดข้องของการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้อนุพันธ์ โดยใช้กลุ่มของคำตอบ (Population-Based-Method) และการสุ่ม (randomization) [2] เพื่อหาผลเฉลยโดยไม่ต้องใช้อนุพันธ์ โดยกลุ่มของคำตอบจะอยู่ในรูปของเซตคำตอบของพาเรโต (Pareto optimal set) อาทิเช่นวิธีเอ็มพีเอสโอ (MPSO: Multi-objective Particle Swarm Optimization) วิธีเอ็มพีเออีเอส (PAES: Pareto Archived evolutionary Strategy) วิธีเอ็นเอสจีเอ (NSGA: Non-Sorting Genetic

Algorithm) วิธีเอ็มพีบีไอแอล (PBIL: Population Based Increment Learning) โดยมีการใช้งานในหลายวงการอาทิเช่น การออกแบบแผ่นระบายความร้อนของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์[3-4] การหารูปร่างที่เหมาะสมของโครงกระดูกของโครงสร้าง[5] บทความนี้ได้กล่าวถึงส่วนประกอบของฟังก์ชันเป้าหมาย ตัวแปรออกแบบร่องยางชนิดกล่อง แบบจำลองการสัมผัสของดอกยางและแผ่นแกร่งมีความผิด ขั้นตอนหาค่าเหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาและบทสรุป

2. ฟังก์ชันเป้าหมายของการออกแบบร่องดอกยาง

เกณฑ์การออกแบบดอกยางของผู้ผลิตยางประกอบด้วย ยางประหยัดน้ำมัน ยางลดการสึกหรอ ยางรีดน้ำ ยางเพิ่มแรงฉุดลาก ซึ่งเกณฑ์ข้างต้นเกิดผลจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างดอกยางและพื้นผิวที่สัมผัส ซึ่งประกอบด้วย ความเค้นสัมผัสในทิศทางตั้งฉากกับดอกยาง (Normal contact stress) ความเค้นสัมผัสในทิศทางขนานหน้าสัมผัสดอกยาง (Friction contact stress) โดยความเค้นสัมผัสในทิศทางขนานกับหน้าสัมผัสนั้นแบ่งออกเป็นสองแนวคือ แนวทิศทางการเคลื่อนที่ (Longitudinal direction) และทิศทางการเคลื่อนที่ (Lateral direction) หากเราพิจารณาประเด็นที่เพิ่มแรงฉุดลาก (Traction) ซึ่งสัมพันธ์กับความเค้นในทิศทางการเคลื่อนที่นั่นเอง จึงใช้ฟังก์ชันเป้าหมายที่หนึ่งคือ ความเค้นในแนวสัมผัส

(Friction contact stress) สูงที่สุด และหากข้อประเด็นที่การสึกหรอ พบว่าจะขัดแย้งกับการเพิ่มแรงกดลากคือยังต้องการแรงกดลากสูงการสึกหรอที่สูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาความเค้นในแนวตั้งฉาก ซึ่งจากความสัมพันธ์พื้นฐานของแรงในแนวตั้งฉากและแรงเสียดทาน ค่าแรงเสียดทานขึ้นกับสองตัวแปรคือ แรงตั้งฉากและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยความเค้นในแนวตั้งฉาก หากมีค่าสูงจะมีผลต่อความเสียหายจากการกดอัด และการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิง จึงต้องมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งใช้เป็นฟังก์ชันเป้าหมายที่สอง

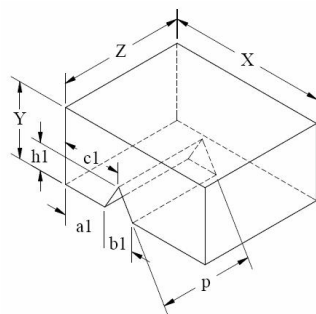
3. ตัวแปรออกแบบร่องดอกยางชนิดกล่อง

ดอกยางกำหนดเป็นขนาดคงที่คือ $X = 25$ มิลลิเมตร $Y = 12$ มิลลิเมตร และ $Z = 20$ มิลลิเมตร โดยขนาดของดอกยางชนิดกล่องอ้างอิงจากงานวิจัย [6] โดยงานวิจัยดังกล่าววิเคราะห์รูปร่างเฉพาะร่องรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยมแบบสมมาตร ตรงกลางดอกยาง ไม่มีการกล่าวถึงกรณีอื่น ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงแบ่งร่องดอกยางแบ่งรูปแบบออกเป็นสองรูปแบบคือ รูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม และปริซึมฐานสี่เหลี่ยม เพื่อให้เกิดความหลากหลายของรูปแบบร่องดอกยาง ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมแบ่งออกเป็นสามรูปแบบคือ

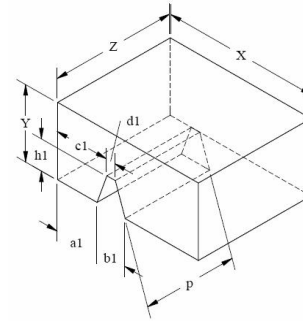
Model 1 ประกอบด้วยตัวแปร a_1, b_1, c_1, h_1 และ p รวม 5 ตัวแปร

Model 2 ประกอบด้วยตัวแปร a_1, b_1, c_1, h_1, h_2 และ p รวม 6 ตัวแปร

Model 3 ประกอบด้วยตัวแปร $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, h_1, h_2$ และ p รวม 9 ตัวแปร



รูปที่ 1 รูปแสดงร่องดอกยางกล่องชนิดปริซึมฐานสามเหลี่ยม



รูปที่ 2 รูปแสดงร่องดอกยางกล่องชนิดปริซึมฐานสี่เหลี่ยม

และรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมแบ่งออกเป็นสามรูปแบบคือ

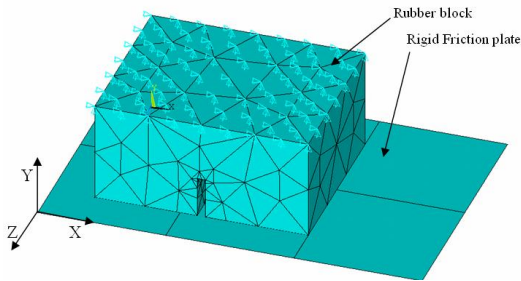
Model 4 ประกอบด้วยตัวแปร a_1, b_1, c_1, d_1, h_1 และ p รวม 6 ตัวแปร

Model 5 ประกอบด้วยตัวแปร $a_1, b_1, c_1, d_1, h_1, h_2$ และ p รวม 7 ตัวแปร

Model 6 ประกอบด้วยตัวแปร $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, h_1, h_2$ และ p รวม 11 ตัวแปร
ตัวแปรที่มีตัวห้อยหมายเลข 1 แทนตัวแปรของร่องยางด้านหน้า และตัวแปรที่มีตัวห้อยหมายเลข 2 แทนตัวแปรร่องยางตำแหน่งเช่นเดียวกับด้านหน้าแต่เป็นส่วนด้านในของกล่องดอกยาง

4. แบบจำลองการสัมผัสดอกยางและพื้นแครง

จากงานวิจัยของ Farhad T. [1] มีการใช้งานโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์สำเร็จรูป วิเคราะห์การสัมผัสกันของดอกยางแบบง่ายคือรูปดอกยางรูปกล่องกับแผ่นแครงที่มีความยืด จากการสัมผัสกันดังกล่าว จะเกิดปรากฏการณ์บริเวณพื้นสัมผัสออกเป็น 2 ลักษณะคือ สัมผัสแล้วติดกัน (Stick) และสัมผัสแล้วมีการเลื่อนตัวพร้อมกันไป (Slip) [3] ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งสองมีผลต่อความเค้นสัมผัสทั้งในแนวตั้งฉากและขนานกับผิวสัมผัส ฉะนั้นในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ตามรูปแบบของการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ของดอกยางรถยนต์กับพื้นถนนนั้น ยึดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้ เพื่อใช้วิเคราะห์กับปัญหาการสัมผัสของดอกยางที่สัมผัสกับพื้นแครงที่มีความยืด



รูปที่ 3 แบบจำลองการสัมผัสของดอกยางรูปกล่องและแผ่นแกร่งมีความผิด

เพื่อเป็นการศึกษาในเบื้องต้นได้ทำการสร้างแบบจำลองการสัมผัสระหว่างดอกยางชนิดกล่อง (Tire tread block) สัมผัสกับแผ่นระนาบแกร่งที่มีความผิด (Rigid friction plate) มิติ $X \times Y \times Z$ คือ $25 \times 12 \times 20$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 แบบจำลองของวัสดุ หาค่าได้จากการสร้างสมการวัสดุจากข้อมูลการทดสอบอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ โดยมีการทดสอบพื้นฐาน 3 อย่าง [1,2] คือ การทดสอบแรงดึงในแกนเดียว (Uniaxial tensile test) การทดสอบแรงเฉือนในระนาบ (Planar shear test) และการทดสอบแรงดึงในสองแกนที่เท่ากัน (Equal bi-axial tensile test) โดยทอนวิธีการรวมทั้งขนาดขึ้นทดสอบยึดตามมาตรฐาน มอก. 1847-2542 และ ISO37/1994 โดยทดสอบวัสดุที่ใช้ผลิตดอกยางจริง และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคือ Ansys Version10 ช่วยสร้างสมการแบบจำลองวัสดุที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่สุด แบบจำลองวัสดุ Ogden hyper foam อันดับสาม ให้ผลใกล้เคียงที่สุด ซึ่งสมการแบบจำลองแสดงในสมการที่ (1)

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left(J^{\alpha_i/3} (\lambda_1^{-\alpha_i} + \lambda_2^{-\alpha_i} + \lambda_3^{-\alpha_i}) - 3 \right) + \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i \beta_i} (J^{\alpha_i/3} - 1) \quad (1)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุคือ

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 212.41 & \mu_3 &= 212.26 \\ \alpha_1 &= 2.4504 & \alpha_3 &= 2.4546 \\ \mu_2 &= 212 & \beta_1 &= 18.595 \\ \alpha_2 &= 2.4572 & \beta_2 &= 0.87908 \\ & & \beta_3 &= 0.87794 \end{aligned}$$

เมื่อ λ แทนอัตราส่วนการยืด (Stretch ratio) ของชิ้นทดสอบ

เงื่อนไขที่ขอบกำหนดโดยกำหนดให้ระนาบด้านบนของกล่องยางเคลื่อนตัวลงมาตามแกน Y ด้วยระยะ 2 มิลลิเมตร และเคลื่อนไปในทิศทางแกน X เป็นระยะ 5 มิลลิเมตร ซึ่งจำลองสภาวะที่ยางรถยนต์อยู่ในสภาวะทำการเบรกและมีการเลื่อนไถลเท่านั้น ชนิดของเอลิเมนต์ใช้ Element type แบบ SOLID185 ประกอบด้วย 8 nodes และกำหนดการเมสแบบ Free mesh เอลิเมนต์สัมผัส แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ Target และ Contact โดย Target element ใช้ Target 170 และ Contact ใช้ Contact 174

5. วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

สืบเนื่องจากบทความต้องชี้ประเด็นตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบร่องดอกยางชนิดกล่อง จึงเลือกวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงหนึ่งวิธีคือ วิธีพีเออีเอส (PAES: Pareto archived evolutionary strategy) เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่แบบวิวัฒนาการนำเสนอโดย Knowles และ Corne [2] โดยใช้กับการหาค่าเหมาะสมที่สุดกับปัญหาระบบสื่อสารโดยใช้เราเตอร์ (Router) ซึ่งใช้กลุ่มตัวแปรออกแบบแทนด้วยกลุ่มประชากรรุ่นต้นกำเนิด (parent generation) กำเนิดประชากรรุ่นลูกหลาน (off spring) ด้วยวิธีมิวเตชัน (Mutation) และการเปรียบเทียบประชากรรุ่นลูกหลานและประชากรรุ่นต้นกำเนิด โดยหากมีประชากรตัวใดถูกรอรับโดยประชากรรุ่นลูกหลาน ประชากรตัวนั้นจะถูกคัดทิ้งไป คงเหลือไว้เฉพาะประชากรที่ไม่ถูกรอรับ ซึ่งใช้จะเป็นกลุ่มประชากรรุ่นต้นกำเนิดต่อไป การคัดเลือกประชากรแต่ละรอบการคำนวณต้องเป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

6. ขั้นตอนหาค่าเหมาะสมที่สุดร่องยางแบบกล่อง

ขั้นที่ 1 สุ่มหากลุ่มประชากร โดยประชากรแบ่งเป็นชุดๆ ตามแบบจำลองโดย Model 1 Model 2 และ Model 3 สำหรับร่องยางรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม และ Model 4 Model 5 และ Model 6 สำหรับร่องยางรูปปริซึมฐานสี่เหลี่ยม ทำการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธี

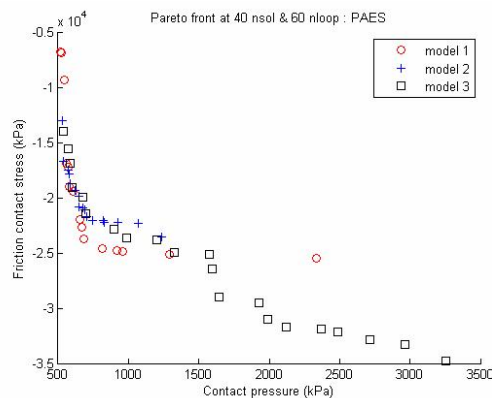
ไฟไนท์เอลิเมนต์ในโปรแกรมสำเร็จรูป Ansys V10 โดยเลือกประชากรรอบการคำนวณละ 40 กลุ่มตัวแปร ขั้นที่2 คัดเลือกกลุ่มตัวแปรที่เข้าข่ายตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในที่นี้คือให้ได้ค่าความเค้นสัมผัสในแนวนานกับระนาบสัมผัสมากที่สุดและความเค้นสัมผัสในแนวตั้งฉากน้อยที่สุด

ขั้นที่3 ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เลือกคัดเลือกรุ่นประชากรที่ใช้เป็นรุ่นพ่อแม่ในรอบการคำนวณรอบถัดไป โดยกำหนดรอบการคำนวณทั้งสิ้น 60 รอบ โดยในแต่ละรอบจะได้กลุ่มประชากรรอบการคำนวณละ 40 ชุด

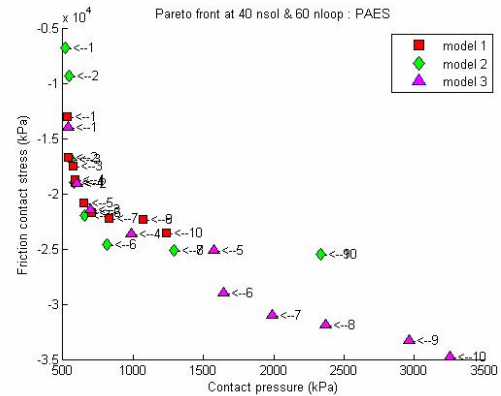
7. ผลการทดลอง

7.1 ร้อยยงรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม

จากการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพีเอเอส เพื่อหาช่วงของตัวแปรของร่องดอกยางชนิดกล่อง รูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม ชุดคำตอบทั้งหมดของพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 4 (ก) และหลังจากจัดเรียงตามค่าฟังก์ชันเป้าหมาย จำนวน 10 ชุดคำตอบ ดังแสดงในรูป (ข) โดยแกน X แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป้าหมายที่หนึ่งและแกน Y แทนฟังก์ชันเป้าหมายที่สอง เมื่อพิจารณาความเค้นสัมผัสในแนวตั้งฉากต่ำที่สุดเป็นหลัก พบว่าทั้งสามโมเดลให้ค่าที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 500 kPa ในขณะที่ค่าความเค้นสัมผัสมีค่าระหว่าง 6 ถึง 14 MPa และเมื่อพิจารณาค่าความเค้นสัมผัสแบบปัดสูงสุดเป็นหลัก พบว่า Model 3 มีค่าสูงสุด 35 MPa ในขณะที่ Model 1 และ Model 2 มีค่าสูงสุดเป็น 25 MPa และ 24 MPa ตามลำดับ

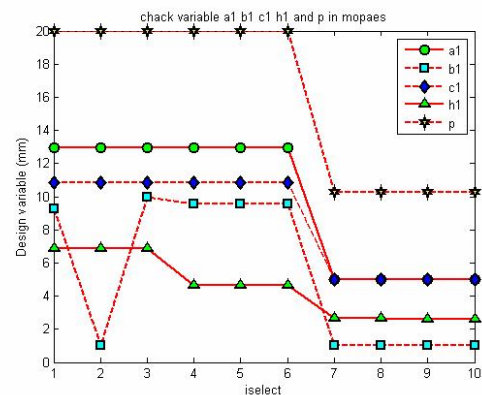


(ก) ชุดผลเฉลยทั้งหมดของพารามิเตอร์



(ข) ชุดผลเฉลยของพารามิเตอร์ที่จัดเรียงลำดับแล้วรูปที่ 4 รูปแสดงพารามิเตอร์ของชุดคำตอบของร่องดอกยางกล่องชนิดปริซึมฐานสามเหลี่ยม

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรออกแบบของชุดคำตอบเนื่องจากหากแสดงในรูปสามมิติแล้วทำให้เห็นรายละเอียดไม่ชัดเจน จึงแสดงค่าตัวแปรออกแบบเป็นช่วงและค่าฐานนิยม ดังตารางที่ 1 โดยช่วงของค่าตัวแปรค้นหาได้จาก การวิเคราะห์การสัมผัสของดอกยางแล้วสามารถให้ผลการวิเคราะห์ได้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดความไม่ต่อเนื่องของชั้นดอกยางขณะสัมผัสกับแผ่นที่มีความผิดซึ่งเหตุให้ไม่ได้คำตอบ รูปที่ 5 แสดงค่าตัวแปรตามชุดคำตอบของพารามิเตอร์ของ Model 1



รูปที่ 5 รูปแสดงค่าตัวแปรออกแบบ a_1, b_1, c_1, h_1 และ p ร้อยยงชนิดกล่อง Model 1

ตารางที่ 1 แสดงช่วงของตัวแปรออกแบบร่องยางชนิด
กล่องรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม

ตัวแปร ออกแบบ	Model 1		Model 1		Model 1		ช่วงค่าตัว แปร (mm)
	[a,b]* (mm)	Mode** (mm)	[a,b]* (mm)	Mode** (mm)	[a,b]* (mm)	Mode** (mm)	
a1	[5,13]	13	[5,12]	5	[5,11.5]	5	[5,20]
a2					[5,17]	5	[5,20]
b1	[1,9.5]	1 and 9.5	[1,7.8]	1	[1,1]	1	[1,10]
b2					[1,7]	1	[1,10]
c1	[5,11]	11	[5,11]	5	[5.5,20]	5.5	[5,20]
c2					[5,17]	5	[5,20]
h1	[2,6.8]	2.6	[2,5.4]	2	[2,4.8]	2	[2,7]
h2			[2,4.1]	2	[2,5.5]	2	[2,7]
p	[11,20]	20	[5,19]	6	[5.5,10.5]	10.5	[5,20]

[a,b]* แทนช่วงของค่าตัวแปรของชุดคำตอบ

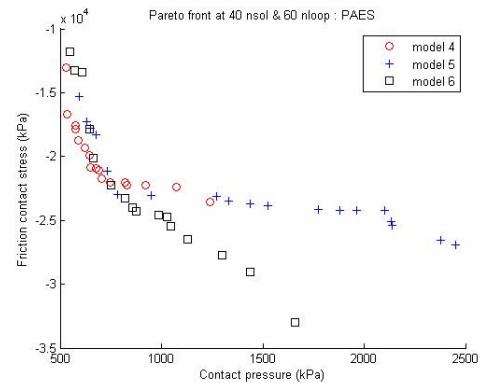
Mode** แทนค่าฐานนิยมของค่าตัวแปรของชุดคำตอบ

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าของตัวแปรออกแบบมีการ
กระจายจากค่าในช่วงของตัวแปรสุ่ม โดยที่

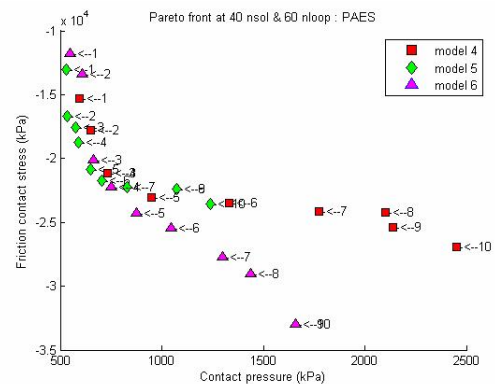
- ตำแหน่งด้านล่างของร่องยาง(ตัวแปร a_1, a_2) ส่วนใหญ่ชุดคำตอบอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจาก
ด้านหน้าของดอกยางไปด้านหลังเมื่ออ้างอิงตาม
ทิศทางการเคลื่อนที่
- ความกว้างของร่องยาง(ตัวแปร b_1, b_2) ส่วนใหญ่
มีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร
- ตำแหน่งยอดแหลมของรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม
(ตัวแปร c_1, c_2) มีตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่ง
ของตัวแปร a_1
- ความสูงของร่องยาง (ตัวแปร h_1, h_2) ส่วนใหญ่มี
ขนาดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร
- ความลึกของร่องยาง (ตัวแปร p) มีการกระจาย
ค่าตลอดช่วงความยาวร่องยาง

7.1 ร่องยางรูปปริซึมฐานสี่เหลี่ยม

ผลการวิเคราะห์ร่องดอกยางกล่องรูปปริซึมฐาน
สี่เหลี่ยม โดยทำการวิเคราะห์ผลทำนองเดียวกับร่อง
ดอกยางรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม แสดงในรูปที่ 5 (ก)
และ (ข) พบว่าเมื่อพิจารณาค่าความเค้นสัมผัสต่ำที่สุด
เป็นหลัก ทั้งสามโมเดลให้ค่าใกล้เคียงกับร่องยางรูป
ปริซึมฐานสามเหลี่ยมคือ 500 kPa ในขณะที่ความเค้น
สัมผัสแบบปัดมีค่าระหว่าง 12 ถึง 16 MPa และเมื่อ
พิจารณาค่าความเค้นสัมผัสปัดสูงสุดเป็นหลัก พบว่า
model 6 มีค่าสูงสุด 33 MPa ในขณะที่ Model 4 และ
model 5 มีค่าสูงสุดเป็น 23 MPa และ สูงสุด 27 MPa



(ก) ชุดผลเฉลยทั้งหมดของพารेटโต



(ข) ชุดผลเฉลยของพารेटโตที่จัดเรียงลำดับแล้ว

รูปที่ 5 แสดงพารेटโตฟรอนของชุดคำตอบร่องดอกยาง
กล่องชนิดปริซึมฐานสี่เหลี่ยม

ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรในแต่ละชุดคำตอบ
ของพารेटโต แสดงเป็นช่วงและค่าฐานนิยมดังตารางที่
2 พบว่าค่าของตัวแปรออกแบบมีการกระจายจากค่า
ในช่วงของตัวแปรสุ่ม

ตารางที่ 2 แสดงช่วงของตัวแปรออกแบบร่องยางชนิด
กล่องรูปปริซึมฐานสี่เหลี่ยม

ตัวแปร ออกแบบ	Model 4		Model 5		Model 6		ช่วงค่าตัว แปร (mm)
	[a,b]* (mm)	Mode** (mm)	[a,b]* (mm)	Mode** (mm)	[a,b]* (mm)	Mode** (mm)	
a1	[5,12]	5	[5,19]	5	[5,17]	5	[5,20]
a2			[12,17.5]	13			[5,20]
b1	[1,7.8]	1	[1,2]	1	[1,4]	2	[1,10]
b2					[7,8]	8	[1,10]
c1	[5,11]	5	[5,18.5]	5	[10,20]	16	[5,20]
c2					[5,17]	6	[5,20]
d1	[1,5]	1	[1,9.5]	1	[3,8]	6	[1,10]
d2					[1,4]	2	[1,10]
h1	[2,5.25]	2	[2,2.25]	2	[2,4.7]	7	[2,7]
h2			[2,6.25]	2	[2,2.4]	2.4	[2,7]
p	[5,19]	2	[5.5,19.5]	8	[7,8]	8	[5,20]

เช่นเดียวกับร่องยางรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม โดยที่

- ตำแหน่งด้านล่างของร่องยาง(ตัวแปร a_1) มีค่าทำนองเดียวกับร่องยางร่องยางรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม แต่ตำแหน่งด้านในของร่องยาง(ตัวแปร a_2) มีค่าตำแหน่งเลยจากส่วนกลางไปด้านหน้าของดอกยาง
- ความกว้างของร่องยางด้านนอก(ตัวแปร b_1) ส่วนใหญ่มีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ในขณะที่ความกว้างของร่องยางด้านใน (ตัวแปร b_2) มีขนาดที่กว้างกว่าด้านนอก
- ตำแหน่งยอดแหลมด้านนอกและด้านในของรูปปริซึมฐานสี่เหลี่ยม (ตัวแปร c_1, c_2) มีตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งของตัวแปร a_1 ยกเว้น Model 6 ที่ตำแหน่งยอดแหลมด้านนอก(ตัวแปร c_1) มีตำแหน่งเคลื่อนมาด้านหน้าของดอกยาง
- ความกว้างด้านบนทั้งด้านนอกและด้านในร่องยางรูปปริซึมฐานสี่เหลี่ยม (ตัวแปร d_1, d_2) ส่วนใหญ่มีขนาดโดยประมาณ 1 มิลลิเมตร
- ความสูงของร่องยาง (ตัวแปร h_1, h_2) ส่วนใหญ่มีขนาดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร
- ความลึกของร่องยาง (ตัวแปร p) ไม่มีชุดคำตอบที่ทำร่องทะลุดอกยาง โดยส่วนใหญ่ความลึกประมาณครึ่งหนึ่งของความกว้างดอกยาง

8. บทสรุป

จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรร่องยางชนิดกล่องด้วยขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย ทำให้ได้ชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ โดยแต่ละชุดคำตอบประกอบด้วยค่าตัวแปรออกแบบทั้งหกโมเดล โดยค่าตัวแปรออกแบบสามารถนำมาใช้ขึ้นรูปจริงของร่องดอกยางได้ภายใต้ฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนด จากการศึกษาครั้งนี้ได้ข้อสรุปของค่าตัวแปรออกแบบร่องดอกยางดังนี้

- ตำแหน่งร่องดอกยางด้านล่างส่วนด้านนอกดอกยาง(ตัวแปร a_1) มีแนวโน้มของตำแหน่งชิดด้านหลังดอกยางเมื่อเทียบกับทิศการเคลื่อนที่ ในขณะที่ส่วนด้านในดอกยาง (ตัวแปร a_2) มีแนวโน้มเอียงไปด้านหน้าของดอกยาง

- ขนาดความกว้างร่องยางด้านล่าง(ตัวแปร b_1, b_2) และความกว้างด้านบน (ตัวแปร d_1, d_2) มีแนวโน้มคงที่ที่ 1 มิลลิเมตร โดยความกว้างด้านล่างด้านใน จะมีค่ามากกว่าความกว้างด้านบน
- ความสูงของร่องยาง(ตัวแปร h_1, h_2)มีแนวโน้มคงที่ 2 มิลลิเมตร
- ความลึกของร่องดอกยาง (ตัวแปร p) แนวโน้มของร่องยางรูปปริซึมฐานสี่เหลี่ยม จะทะลุตลอดแนวดอกยาง ในขณะที่ร่องยางรูปปริซึมฐานสามเหลี่ยม มีการกระจายค่าตลอดความลึกของดอกยาง

จากข้อสรุปข้างต้นจะเห็นว่า ความเด่นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสขึ้นกับขนาดของพื้นที่สัมผัส โดยตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของพื้นที่สัมผัสเมื่อคงขนาดของดอกยางเดิมคือ a_1, a_2, b_1, b_2 และ p ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวส่วนใหญ่มีแนวโน้มคงที่ นั้นหมายความว่า ตัวแปรอื่นๆ จึงมีผลต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนดเช่นกัน

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอส.เค.โพลีเมอร์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ชิ้นยางทดสอบ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อนุเคราะห์เครื่องทดสอบ

10. เอกสารอ้างอิง

10.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Tabaddor F "Finite element analysis of a rubber block in fictional contact", Computers&Structures, Vol.32(No.3/4), 1989
- [2] J. Knowles and D. Corne, "Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy" Evolutionary Computation, Vol.8(2)
- [3] S. Bureerat and S. Srisomporn, "Optimum plate-fin heat sinks by using a multi-objective evolutionary algorithm", Engineering

Optimization Vol. 42, No. 4, April 2010, 305–323

- [4] Sungkom S. and Sujin B., “Geometrical design of plate fin heat sinks using hybridization of MOEA and RSM”, IEEE transaction on components and packaging technologies, Vol. 31 No. 2, June 2008
- [5] Chaid N. and Sujin B., “Simultaneous topology, shape and sizing, Optimization of Skeletal Structures Using Multiobjective Evolutionary Algorithms”, Evolutionary computation,
- [6] K. Hofstetter, Ch. Grohs, J. Eberhardsteiner, H.A. Mang, “Sliding behaviour of simplified tire tread patterns investigated by means of FEM”, Computers and structures Vol. 84, 2006, 1151-1163

10.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

- [1] Dolwichai P., Limtragool J., Inban S. Piyasin S., “Finite element analysis of a three dimensional rubber block in frictional contact”, The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, Phuket, Thailand
- [2] Dolwichai P., Limtragool J., Inban S. Piyasin S., “Hyperelastic Material Models for Finite Element Analysis with Commercial Rubber”, Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006), Khon Kaen, Thailand.
- [3] Dolwichai P., Limtragool J., “The effect of tire treads shape to stick - slip phenomenon in frictional contact”, The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 18-20 October 2006, Nakorn Ratchasima, Thailand

10.3 รายงาน

- [1] “Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy”, TRB Special Report 286, National Research Council of The national Academies, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2006, Printed in the USA

10.4 หนังสือ

- [1] John C. and Dixon, “Tires, Suspension and handling”, Cambridge university Press, UK, 1996
- [2] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , ยางบ่มสุก หรือเทอร์โมพลาสติก - การหาสมบัติความเครียด และความเค้นจากแรงดึง, มอก.1847-2542; ISO 37:1994,สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, ISBN 974-608-294-9