

การวิเคราะห์สปริงขดแบบ Barrel โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Analysis of Barrel Shaped Spiral Spring

ทศนพ กำเนิดทอง¹ สุระเชษฐ์ ชุตินา² วีระชาติ กุลศิริเกษม

ศูนย์ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์เพื่องานวิจัยทางวิศวกรรม (COCARE)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Tel: 0-2470-9337, Fax: 0-2470-9111, Email: ithotong@kmutt.ac.th¹, surachate.chu@kmutt.ac.th²

Thoatsanope Kamnerdtong¹ Surachate Chutima² Weerachart Kulsirikasem

Center of Operation for Computer Aided Research Engineering (COCARE)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

, Thung Khru, Bangkok 10140

Tel: 0-2470-9337, Fax: 0-2470-9111, Email: ithotong@kmutt.ac.th¹, surachate.chu@kmutt.ac.th²

บทคัดย่อ

ระบบกันสะเทือนของรถยนต์นั่งและรถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้กันแพร่หลายมักนิยมใช้สปริงขดแบบทรงกระบอกเป็นชิ้นส่วนเพื่อรองรับภาระต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการขับขี่เนื่องจากมีสมรรถนะในการถ่ายเทพลังงานที่ดี สามารถติดตั้งและใช้งานได้ในพื้นที่จำกัด มีความทนทาน และต้องการการบำรุงรักษาต่ำ ในปัจจุบันสปริงขดแบบ Barrel เริ่มเข้ามามีบทบาทแทนที่สปริงขดแบบทรงกระบอกมากขึ้นเพราะสามารถปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของสปริงให้เหมาะกับภาระที่ใช้งานได้ แต่เนื่องจากรูปร่างที่ซับซ้อน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขด ระยะระหว่างขด และเส้นผ่านศูนย์กลางของ Barrel ไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นการยากที่จะทำนายพฤติกรรมจากทฤษฎี และต้องใช้ประสบการณ์ออกแบบสูง งานวิจัยนี้จึงทดลองใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นในการศึกษาและวิเคราะห์สปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel โดยรวมผลของการสัมผัสกันที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดของสปริงและระหว่างสปริงกับแท่นรองรับเพื่อให้เงื่อนไขขอบใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งานจริง พร้อมทั้งทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ผลของงานวิจัยพบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมความเค้นและค่าคงที่ของสปริงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มภาระที่กระทำ จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel สำหรับรถยนต์ อีกทั้งยังลดเวลาตลอดจนค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างชิ้นงานต้นแบบเพื่อทดสอบ และปรับปรุงชิ้นงานในระหว่างการออกแบบได้เป็นอย่างดี

คำหลัก : สปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel / วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Cylindrical helical spring is a component of suspension system which is widely used on passenger cars and light trucks due to its durability, maintainability, capability of installation and utilization in limited area. Recently, barrel shaped spiral spring plays more important role to replace the cylindrical helical spring because of multi-stiffness. However due to complex geometry, it is very difficult to design and predict behavior of barrel shaped spiral spring using the conventional method. This research aims to study the behavior of barrel shaped spiral spring using both linear and nonlinear finite element analysis. The contacts between both ends of spring and support and between coils are considered in this analysis to get more realistic. It is found that the simulation results are in agreement with the experiment data. Therefore, it can demonstrate that the finite element method can be used to design the barrel shaped spiral spring. Moreover, it can improve the characteristic of spring during design stage, reduce time and cost in production of prototype for testing.

Keywords: Barrel shaped spiral spring / Finite element method

1. บทนำ

สปริงขดเป็นชิ้นส่วนทางกลซึ่งมีหน้าที่เก็บสะสมพลังงานจากภาระภายนอกต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของพลังงานความเครียดของวัสดุ และถ่ายเทออกจากตัวสปริง ซึ่งสปริงขดนี้เป็นชิ้นส่วนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในเครื่องจักรกลทั่วไป ตลอดจนระบบกันสะเทือนของรถยนต์

นั่งและรถบรรทุกขนาดเล็ก เนื่องจากมีสมรรถนะในการถ่ายเทพลังงานที่ดี สามารถติดตั้งและใช้งานได้ในพื้นที่จำกัด มีความทนทาน ราคาถูก และต้องการการบำรุงรักษาต่ำ สปริงชนิดรับแรงกดสามารถแบ่งตามลักษณะรูปร่างออกเป็นหลายประเภท คือ แบบทรงกระบอก แบบทรงกรวย แบบ Barrel และแบบทรงของนาฬิกาทราย ซึ่งสปริงชนิดแต่ละแบบจะมีลักษณะการตอบสนองที่ต่างกัน

สำหรับสปริงชนิดรับแรงอัดแบบทรงกระบอกในรูปที่ 1 ซึ่งมีหน้าตัดของขดลวดเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d จำนวนขดใช้งาน n เส้นผ่านศูนย์กลางขด D และโมดูลัสเฉือน G สามารถหาค่าคงที่ของสปริงได้จาก[1]

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (1)$$

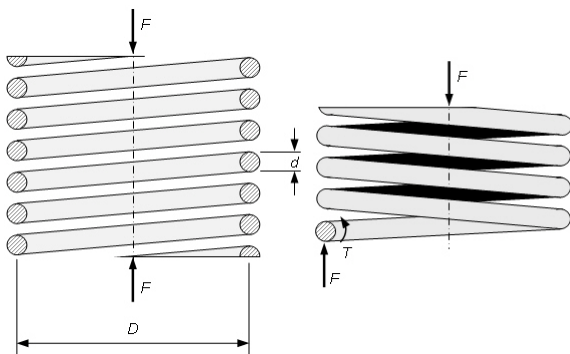
และหากสปริงดังกล่าวได้รับแรงกด P จะเกิดความเค้นเฉือนสูงสุดที่ผิวด้านในของขดลวดเป็น

$$\tau = K \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2)$$

เมื่อ K คือ ตัวคูณแก้ไข Wahl [2] ซึ่งมีค่าเป็น

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (3)$$

โดยที่ C คือ ดัชนีสปริงมีค่าเป็น D/d



รูปที่ 1 สปริงชนิดรับแรงกดแบบทรงกระบอก

ในกรณีนี้ดัชนีสปริงมีค่ามาก ๆ ความเค้นหลักสูงสุดจะเปลี่ยนตำแหน่งจากด้านในของขดลวดเป็นด้านนอกของขดลวด[3] แต่อย่างไรก็ตามสูตรในการคำนวณค่าคงที่ของสปริงตามสมการที่ 1 ไม่ได้คำนึงถึงความเค้นของขดลวด การเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำกับเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสปริง สำหรับสมการที่ 2 นั้นได้มีการพิจารณาถึงผลจากความโค้งของขดลวดไว้ด้วย ซึ่งรวมอยู่ในตัวคูณแก้ไข Wahl ค่าที่ได้นี้ค่อนข้างถูกต้องแม่นยำ แต่สมการที่ 2 นี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานซึ่งทำให้ค่าที่คำนวณได้ไม่แม่นยำ กล่าวคือ ในกรณีที่สปริงขดมีมุมพิชามาก ซึ่งจะมีผลจากโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้อง และกรณีมีขีดทำงานน้อย ผลจากการเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำก็จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ไม่สามารถมองข้ามได้ [4] นอกจากความเค้นที่เกิดจากแรงภายนอกที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีความเค้นตกค้างที่จ้องใจสร้างขึ้นในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานของสปริงและยืดอายุการใช้งาน

[5-7] จากข้อจำกัดต่าง ๆ ในการคำนวณทางทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการนำเอาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการคำนวณ [8-9]

สำหรับสปริงชนิดแบบ Barrel ที่นำมาศึกษาในที่นี้ เป็นสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะระหว่างขดไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากรูปร่างที่ซับซ้อน มีพฤติกรรมที่ทำนายทางทฤษฎีได้ยาก งานวิจัยนี้จึงทดลองใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นในการศึกษาและวิเคราะห์โดยทำการสอบเทียบผลลัพธ์กับการทดสอบซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์

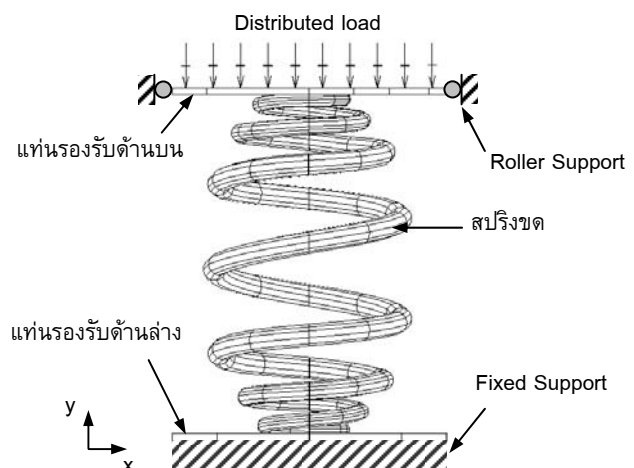
2. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทั้งแบบเชิงเส้นตรงและไม่เป็นเชิงเส้นตรง ได้สร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ I-DEAS Master Series 9.0 และมีสมมติฐานต่าง ๆ ในการศึกษาดังนี้

- วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันและมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง
- ไม่คำนึงถึงความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต
- ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างชั้นของสปริง
- ไม่มีการเลื่อนระหว่างสปริงขดกับแท่นรองรับ
- แท่นรองรับมีลักษณะแข็งเกร็ง
- มีแรงกระทำในแนวตั้งเท่านั้น

2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์สปริงชนิดรับแรงกดแบบ Barrel ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีลักษณะ 3 มิติ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะระหว่างขดไม่สม่ำเสมอ สำหรับเงื่อนไขขอบนั้นจะบังคับให้แท่นรองรับด้านล่างยึดแน่น ขณะที่แท่นรองรับด้านบนยอมให้มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเท่านั้น โดยมีแรงกดบนแท่นรองรับด้านบนในแนว y ซึ่งขนาดสูงสุดเป็น 12000 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนั้นยังมีการใช้เงื่อนไขสัมผัสระหว่างชั้นของขดลวดสปริง และระหว่างสปริงกับแท่นรองรับ ซึ่งทำให้เห็นพฤติกรรมของสปริงขณะรับแรงขนาดต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานและการทดสอบ



รูปที่ 2 เงื่อนไขขอบที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ทั้งหมด สร้างขึ้นจากเอลิเมนต์ทรงเหลี่ยมสี่หน้า ซึ่ง 1 เอลิเมนต์มี 10 โหนด โดยมีฟังก์ชันการกระจายเป็นสมการกำลังสอง สำหรับจำนวนโหนดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนโหนดและเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง

ชั้นงาน	จำนวนโหนด	จำนวนเอลิเมนต์
สปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel	27693	16535
แท่นรองรับ	17123	5651

2.2 สมบัติทางกลของวัสดุ

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด โดยแท่นรองรับทั้งด้านบนและล่างเป็นวัสดุแข็งเกร็ง ขณะที่สปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel เป็นเหล็กสปริง SUP 9 ซึ่งมีสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุ [10]

สมบัติทางกลของวัสดุ	ชิ้นส่วน	
	สปริงขด (SUP 9)	แท่นรองรับ
ความหนาแน่น (kg/m^3)	7,850	แข็งเกร็ง (Rigid)
โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)	205	
อัตราส่วนปัวซอง	0.29	
ความแข็งแรงดึง, สูงสุด (MPa)	> 1,170	
ความแข็งแรงดึง, จุดคดลากตัว (MPa)	> 1,070	

3. วิธีการทดสอบ

การทดสอบสปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel จะทดสอบด้วยเครื่อง Universal Tensile Testing โดยเริ่มจากการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3 จากนั้นกดสปริงให้ยุบตัวทีละ 2 มิลลิเมตร และบันทึกแรงที่ใช้ในการกดแต่ละครั้ง จนกระทั่งสปริงติดกันทุกชุด นำผลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการกดกับระยะยุบตัวของสปริงขด ซึ่งสามารถสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำของการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่ของสปริงที่ได้จากการคำนวณทั้งแบบเชิงเส้นตรงและแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง

4. ผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ผลจะแยกออกเป็นสองกรณี คือ เปรียบเทียบค่าคงที่ของสปริงที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งแบบเชิงเส้นตรงและไม่เป็นเชิงเส้นตรงกับผลการทดสอบ สำหรับกรณีที่สอง

จะพิจารณาถึงความเค้นที่เกิดขึ้นบนขดลวดสปริงขณะรับภาระ ดังที่จะได้แสดงดังต่อไปนี้

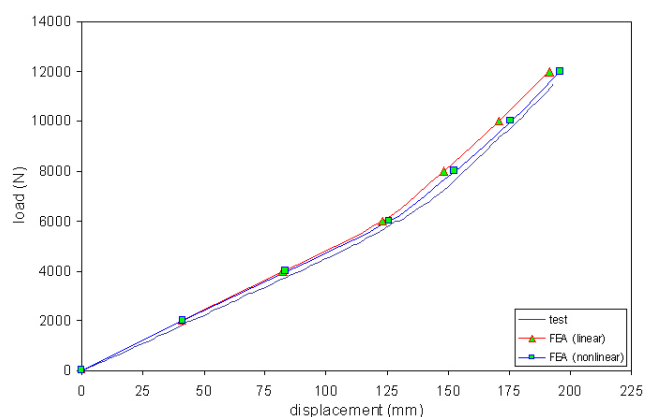


รูปที่ 3 การทดสอบสปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของสปริง

เมื่อนำผลลัพธ์จากการคำนวณและผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวดังรูปที่ 4 พบว่าเส้นกราฟที่ได้แต่ละเส้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ตามความชันของกราฟแตกต่างกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสปริงขณะได้รับแรง คือในช่วงแรกขดสปริงที่อยู่บริเวณปลายซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดและขนาดของขดลวดเล็กยุบตัวก่อน จนกระทั่งไปติดกับแท่นรองรับจากนั้นในช่วงที่สองขดลวดขนาดใหญ่ซึ่งอยู่บริเวณท่อนกลางของสปริงจึงเริ่มยุบตัวจนกระทั่งขดลวดถูกกดจนยุบตัวติดกัน

นอกจากนั้นยังพบว่าระยะยุบตัวที่ได้จากการคำนวณแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงแรกใกล้เคียงกับผลการทดสอบค่อนข้างมาก โดยความแตกต่างจะเริ่มเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะยุบตัวสูง ซึ่งผลการคำนวณแบบไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงผลการทดสอบมากกว่าแบบเป็นเชิงเส้นเนื่องจากการคำนวณแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะคำนวณในลักษณะวนรอบโดยนำเอารูปร่างของสปริงหลังการยุบตัวในแต่ละรอบ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวของสปริงขดแบบ Barrel ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเชิงเส้นตรง ไม่เป็นเชิงเส้นตรงและผลการทดสอบ

มาสร้างเป็นสตีฟเนสเมทริกซ์สำหรับการคำนวณในรอบถัดไป จึงทำให้ระยะยวบตัวที่ได้ใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่า

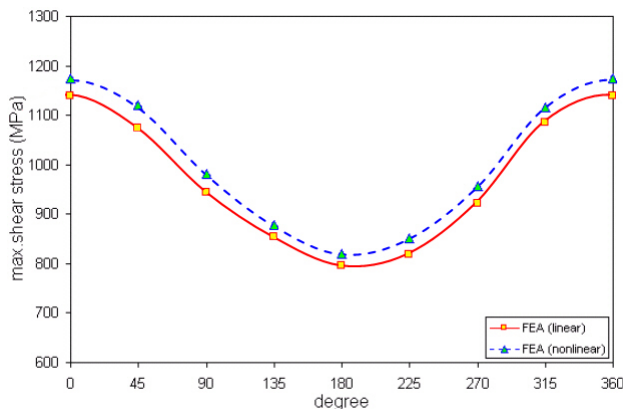
หากพิจารณาถึงค่าคงที่ของสปริงพบว่าผลลัพธ์จากการคำนวณทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบเป็นอย่างมากดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสปริงที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ

	Stiffness(N/mm)		%Error	
	k_1	k_2	k_1	k_2
Test	45.2	89.4	-	-
Linear	48.2	89.4	6.6	-
Non-linear	47.2	86.0	4.4	-3.8

4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้น

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นพบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของขดสปริง เมื่อให้แรงกดขนาด 12000 นิวตันกระทำกับสปริงพบว่าทั้งความเค้นเฉือนสูงสุดและความเค้นพอนมิสเชสที่เกิดขึ้นบนผิวรอบขดลวด ณ ตำแหน่งนี้ จะมีค่าสูงสุดที่ด้านในของขดลวด ดังรูปที่ 5 และ 6 โดยการคำนวณแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่าความเค้นเฉือนที่สูงกว่าแบบเป็นเชิงเส้น เนื่องจากการคำนวณแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะคำนึงถึงการขยายตัวในแนวด้านข้างขณะรับภาระ โดยนำมาสร้างเป็นสตีฟเนสเมทริกซ์สำหรับการคำนวณในรอบถัดไป จึงส่งผลให้ความเค้นที่ได้มีค่าสูงกว่า ขณะที่การคำนวณแบบเป็นเชิงเส้นจะอิงรูปร่างของสปริงในตอนเริ่มต้นตลอด

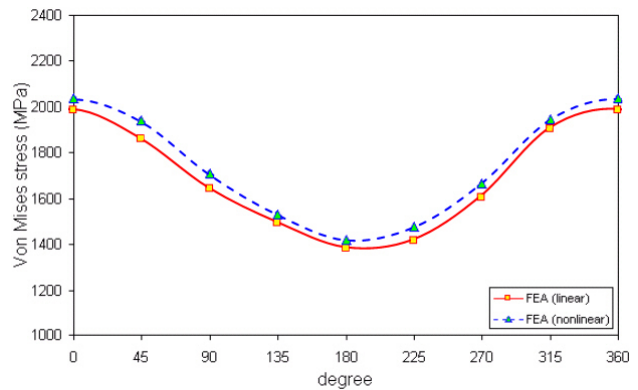


รูปที่ 5 ความเค้นเฉือนสูงสุดของสปริงขดแบบ Barrel ขณะรับแรง 12000 นิวตัน

5. สรุป

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลลัพธ์จากการคำนวณในหัวข้อที่ 4 พบว่าทั้งการคำนวณแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับการทดสอบเป็นอย่างมากจึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสปริงขดรับแรงกดแบบ Barrel สำหรับรถยนต์ อีกทั้งยังลดเวลาตลอดจนค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างชิ้นงาน

ต้นแบบเพื่อทดสอบ และปรับปรุงชิ้นงานในระหว่างการออกแบบได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6 ความเค้นพอนมิสเชสของสปริงขดแบบ Barrel ขณะรับแรง 12000 นิวตัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณชาตรี ศรีแสงจันทร์, คุณดนัย หาญวัง, และคุณพคุณ ศรีคำ ที่ช่วยดำเนินการทดสอบและถอดแบบสปริงขดแบบ Barrel

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.E. Shigley, and C.R. Mischke, Mechanical Engineering Design, 5th ed., McGraw-Hill, Singapore, 1989, pp.413-416.
- [2] A.M. Wahl, Mechanical Springs, McGraw-Hill, New York, 1963.
- [3] M.T. Todinov, "Maximum Principal Tensile Stress and Fatigue Crack Origin for Compression Springs," International Journal of Mechanical Sciences, Vol.41, 1999, pp. 357-370.
- [4] M. Shimoseki, T. Hamano, and T. Imaizumi (Eds.), FEM for Springs, Springer, Germany, 2003.
- [5] Society of Automotive Engineers, Inc., Spring Design Manual, 2nd ed. AE-21, SAE Inc., 1996.
- [6] J. Matejcek, P.C. Brand, A.R. Drews, A. Krause, and C. Lowe-Ma, "Residual Stress in Cold-coiled Helical Compression Springs for Automotive Suspensions Measured by Neutrom diffraction," Materials Science and Engineering, Vol.A 367, 2004, pp. 306-311.
- [7] W.R. Berry, Spring design, Emmott & Company, London, 1961.
- [8] W.G. Jiang, and J.L. Henshall, "A Novel Finite Element Model for Helical Springs," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.35, 2000, pp.363-377.
- [9] T. Yutaka, L. Jong-Bin, and T. Minoru, "Finite Element Analysis of Superelastic, Large Deformation Behavior of Shape Memory Alloy Helical Springs," Computers and Structures, Vol.82, 2004, pp.1685-1693.

[10] Japanese Industrial Standards Committee, Leaf springs-requirements for design performance test method, JIS B 2710, Japan, 2000.