

การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของลวดสปริง Analysis of Deformation Behavior of Wire Springs

ศนทกานต์ เหลืองวิเศษ¹และ อรรถพร วิเศษสินธุ์^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: fengapw@ku.ac.th, 02-797-0999 ต่อ 1861

บทคัดย่อ

ลวดสปริงเป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับการเคลื่อนของชิ้นส่วนในอุปกรณ์ทางการแพทย์หรือเครื่องจักรกลต่างๆ ที่มีลักษณะถูกจับยึดที่ปลาย 1 ด้านและรับแรงแบบไปกลับที่ปลายอีก 1 ด้าน ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบและศึกษาคุณสมบัติของลวดสปริงในการรับความล้า ซึ่งคุณสมบัติของลวดสปริงจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางและชนิดของวัสดุ เมื่อนำมาพิจารณาคู่กับพฤติกรรมการใช้งาน จะทราบถึงอายุการใช้งานของลวดสปริง ซึ่งถือว่าจำเป็นอย่างมากในการนำสปริงมาใช้ อย่างปลอดภัยและเหมาะสม งานวิจัยนี้ให้ลวดสปริงมีการรับแรงดัดแบบคานปลายยื่นที่ระยะ 50 มม. โดยนำสปริงแบบเส้นลวดมาทดสอบการดัดเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งาน และทดสอบความล้าจากการดัด โดยมีแรงกระทำเบื้องต้น 19 N จากนั้นรับแรงกดกระทำแบบซ้ำ ๆ ที่ระยะเคลื่อนตัวสูงสุด 8 มม. แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์พฤติกรรมรวมถึงอายุการใช้งานของลวดสปริง ผลการวิจัยพบว่าควรใช้ลวดสปริง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.76 มม. มีอายุการใช้งานได้ประมาณ 12000 รอบ

คำหลัก: ลวดสปริง, คานปลายยื่น, ทดสอบการดัด, ทดสอบความล้าจากการดัด

Abstract

A wire spring is an important part for the moving parts in medical equipment or machines which are fixed at one end and performed by a cyclic loading at the other end. In this research, wire springs were subjected to cyclic loads for determining the optimal behaviors and their lifespan. Wire springs properties were varied by their diameters and material types, taking these into account with usage behavior will provide sufficient data to determine their lifespan. This study conducts an experiment on wire springs by subjecting them to bending force by the cantilever method. The initial load was performed at 50 mm of the wire springs with a magnitude of 19 N and further apply a cyclic load with maximum deflection is 8 mm. This information is crucial for determining whether the spring was suitable for the usage in optimal manners. Finally, experiments conclude that wire springs with 2.76 mm in diameter have a lifespan of 12000 cycles.

Keywords: wire spring, cantilever beam, bending test, fatigue bending test

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้มีการนำเครื่องจักรกล เครื่องมือ อุปกรณ์ ทางกลต่าง ๆ เข้ามาใช้ในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรม เป็นจำนวนมาก ทั้งด้านอุปกรณ์อำนวยความสะดวก อุปกรณ์ทางการแพทย์ และ อุปกรณ์ที่ใช้สร้างพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีหลายการทำงานที่ต้องการความยืดหยุ่นของอุปกรณ์ในส่วนการใช้งานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กลไก ถ่ายทอดแรง หรือทำให้อุปกรณ์คงสภาพเดิมหลังจากการทำงาน เห็นได้ว่าชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่นี้ คือ สปริง ซึ่งมีรูปร่างต่างกันและทำจากวัสดุหลากหลายชนิด เพื่อใช้ในงานที่หลากหลาย หนึ่งในนั้นคือ ลวดสปริง ด้วยพฤติกรรมการใช้งานที่มีแรงกระทำซ้ำ ๆ วัฏจักร โดยขนาดของแรงเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุด ทำให้ความเค้นมีค่าต่ำกว่าความต้านแรงของวัสดุ แต่ก็เป็สาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย เรียกพฤติกรรมนี้ว่า การแตกหักเนื่องจากความล้า (Fatigue) ซึ่งพบได้บ่อยในสปริง ความล้าจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาสำหรับพฤติกรรมการใช้งานที่รับแรงกระทำซ้ำเป็นวัฏจักร เพื่อให้เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม และการประเมินอายุการใช้งานจะช่วยป้องกันความเสียหายและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้

มีมาตรฐานที่กำหนดคุณสมบัติของลวดสปริง คือ music spring wire ASTM A228 [1] ทำการทดสอบทางกลด้วยวิธีการดึง การดัดม้วน การบิด ส่วน stainless steel spring wire ASTM A313 [2] มีการทดสอบการดึง การดัดม้วน และ uniformity (coil test) พบว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบจะแสดงถึงคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปในทุกส่วนผสมของวัสดุ และ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง ยังมีงานวิจัยและบทความเป็นจำนวนมากที่ได้ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติวัสดุ โดย Q. Y. WANG, J. Y. BERARD [3] และ รศ. ยรรยง ศรีสม, อ. สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ [4] ได้ทำการศึกษาทดสอบชิ้นงานด้วยการทดสอบทางกลที่แตกต่างกัน พบว่า ชิ้นงานมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปตาม

วัสดุที่เป็นส่วนผสมและกรรมวิธีในการผลิต จากงานวิจัยที่กล่าวมาได้ศึกษาไปที่ตัววัสดุของชิ้นงาน แต่มีงานวิจัยไม่มากนักที่ศึกษาและสนใจในสภาวะการใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญเช่นกัน โดย ทศนพ กำเนิดทอง [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดของสปริงขดให้คล้ายสภาวะการใช้งาน พบว่า มีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสปริงรับแรงเป็น 2 ช่วง ตามลักษณะรูปทรงของขดสปริงที่ใช้รับแรง จากงานวิจัยข้างต้น พบว่า ในลวดสปริงมีการศึกษาเกี่ยวกับสภาวะการใช้งานค่อนข้างน้อย ยังไม่ครอบคลุมในการใช้งานแบบคานปลายยื่นและรับแรงกระทำซ้ำ ซึ่งพฤติกรรมของลวดสปริงในรูปแบบของคานปลายยื่นนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอุปกรณ์ได้หลายรูปแบบเช่น การเคลื่อนที่ของแขนชิ้นงานรอบจุดหมุนแบบไปกลับ เป็นต้น

ดังนั้นสำหรับการประยุกต์ใช้งานลวดสปริงแบบคานปลายยื่นในอุปกรณ์ต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของลวดสปริงที่รับแรงแบบคานปลายยื่น โดยมีการจับยึดปลายลวดสปริง 1 ด้านให้อยู่นิ่ง และปลายของลวดสปริงอีกด้านให้รับแรงกระทำซ้ำๆ ในแนวแกน y ในการทดสอบได้นำลวดสปริงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางและชนิดของวัสดุแตกต่างกันมาทดสอบ โดยให้ลวดสปริงมีการรับแรงดัดแบบคานปลายยื่นที่ระยะห่างจากจุดยึดตามแนวแกน x เคลื่อนตัวลงตามแนวแกน y ด้วยอัตราเร็วคงที่จนถึงช่วงในการประยุกต์ใช้งานจริงและมีแรงกระทำเบื้องต้น 19 N และเคลื่อนตัวซ้ำเป็นวัฏจักร ในระยะที่เหลือจากแรงเบื้องต้นจนถึงระยะที่ทำให้ลวดสปริงทำมุม 7° จากนั้นทำการบันทึกค่าการและวิเคราะห์พฤติกรรมของลวดสปริง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลวดสปริง

ลวดสปริงถูกใช้งานในการเก็บและปลดปล่อยพลังงานออกมา โดยสปริงจะมีความเค้นสูงมากขณะรับ

แรง วัสดุจึงต้องมีความแข็งแรงในขณะเดียวกันต้องมีความยืดหยุ่น (elastic limit) สูง รองรับภาระที่สั่นสะเทือนได้ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสปริง เช่นเดียวกัน ทั่วไปแล้วใช้เหล็กที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.5% แล้วนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน [4,6,7]

2.2 ระยะโค้งตัวของคานจากสมการ elastic curve

ในการวิเคราะห์การออกแบบคาน ต้องมีการพิจารณาระยะโค้งตัวของคาน โดยเฉพาะระยะโค้งสูงสุดของคาน ซึ่งสามารถหาค่านี้ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ ชนิด รูปร่างของวัตถุ และ แรง โดยในคานปลายยื่นนั้น มีสมการ elastic curve [8] ดังสมการที่ 1 และมีระยะโค้งสูงสุดบริเวณปลายคาน ดังสมการที่ 2

$$y = \frac{P}{6EI} (X^3 - 3LX^2) \quad (1)$$

$$y = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (2)$$

เมื่อ y คือ ระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกน y (m)

P คือ แรงกระทำ (N)

E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Pa)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

L คือ ความยาวคาน (m)

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นทดสอบลวดสปริงมี 4 แบบ ทำมาจาก stainless steel ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.24 มม. 1.83 มม. และจาก music wire ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.50 มม. 2.76 มม. มีความยาวในการใช้ทดสอบ 200 มม. โดยแต่ละชนิดของชิ้นทดสอบมีรหัสชิ้นงานทดสอบ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเส้นผ่าศูนย์กลางและรหัสชิ้นงานของชิ้นทดสอบ

วัสดุสำหรับลวดสปริง	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm.)	รหัสชิ้นงาน
stainless steel	1.24	A
stainless steel	1.83	B
music wire	2.50	C
music wire	2.76	D

3.2 ทดสอบการตัดและทดสอบความล้าจากการตัด

การทดสอบการตัดและทดสอบความล้าจากการตัด (static and fatigue bending test) ของลวดสปริง มีกระบวนการทดสอบ 2 ส่วน เริ่มที่การทดสอบการตัดแบบคานปลายยื่น โดยได้เลือกลวดที่ขนาดและชนิดต่างกันมาทดสอบ แล้วนำผลที่ทดสอบได้มาวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขพฤติกรรมสมมติของการใช้งาน จากนั้นจึงนำชนิดของลวดสปริงที่ผ่านเงื่อนไขมาทดสอบความล้าจากการตัด มีกระบวนการดังรูปที่ 1 เริ่มทดสอบการตัดที่ความยาว 50 มม. จากจุดยึดแล้วเคลื่อนตัวลงมาเป็นระยะ 50 มม. ตามแนวแกน y ด้วยความเร็วคงที่ 0.1 มม./sec ดังรูปที่ 2 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมของชิ้นทดสอบ นำผลมาวิเคราะห์ชิ้นทดสอบที่มีระยะเคลื่อนตัว 8 มม. ซึ่งเป็นช่วงใช้งาน แล้วไม่เกิดการเสียรูป จึงนำชิ้นงานมาทดสอบความล้าจากการตัด เพื่อนำผลไปประเมินว่าสามารถนำไปปรับใช้กับชิ้นงานต่าง ๆ ได้ โดยให้ระยะการเคลื่อนตัวของสปริงที่ความยาว 50 มม. มีการเคลื่อนตัวลง 8 มม. ตามแนวแกน y ซึ่งใน 8 มม. เป็นระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดจากแรงกระทำเบื้องต้น 19 N มีระยะการเคลื่อนตัว 1.6 มม. แล้วทดสอบความล้าจากการตัดในระยะเคลื่อนตัวจาก 1.6 - 8 มม. มีแนวสมมุติที่ 4.8 มม. และ แอมพลิจูด 3.2 มม. ดังรูปที่ 3 ทำการบันทึกพฤติกรรมของชิ้นทดสอบในทุก 10000 รอบ ระยะการเคลื่อนที่และแรงจะถูกควบคุมและบันทึกโดยเครื่อง 8801 Servo hydraulic fatigue testing machine แสดงผลบนหน้าจอของคอมพิวเตอร์

4. ผลการทดสอบ

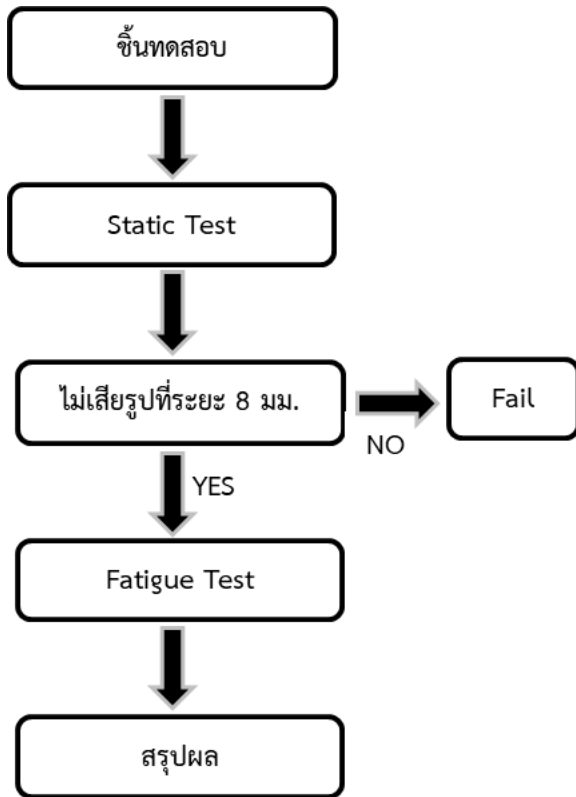
4.1 ผลการทดสอบการดัด

จากการนำชิ้นทดสอบทั้ง 4 ชนิด มาทำการดัดทดสอบแบบคานปลายยื่น โดยทดสอบซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละชนิด ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน ด้วยแรงแบบคงที่และเสียรูปดังรูปที่ 4 จะได้ผลการทดสอบซึ่งสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเคลื่อนตัวลง ดังกราฟเส้นทดสอบ(เส้นหนา) ในรูปที่ 5 เพื่อใช้บอกช่วงพฤติกรรม elastic ของ สปริง โดยแต่ละชุดทดสอบมีกราฟแสดงพฤติกรรมของวัสดุและขนาดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

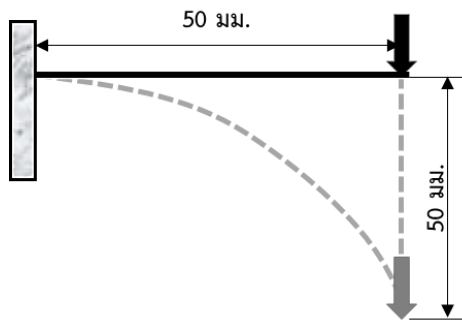
เมื่อนำกราฟดังกล่าวในช่วง elastic มาเปรียบเทียบกับผลจากสมการของ elastic curve โดยมีสมการที่ 2 เป็นสมการความสัมพันธ์ของแรงกับระยะกดในตำแหน่งปลายของลวดสปริง และมีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นทดสอบดังตารางที่ 1 เป็นค่าที่เปลี่ยนตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทดสอบ เมื่อนำมาแทนค่าในสมการที่ 2 หาโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity : E) ของแต่ละชิ้นทดสอบ ตามค่าของแรงและระยะกดที่บันทึกไว้ จะได้โมดูลัสความยืดหยุ่น ที่นำมาใช้สร้างสมการ elastic curve ในทางทฤษฎี(เส้นบาง) โดยจะซ้อนทับกับกราฟเส้นทดสอบ(เส้นหนา) ในช่วงพฤติกรรม elastic ดังรูปที่ 5 ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบ A และ B คือ 135 GPa ชิ้นทดสอบ C และ D คือ 155 GPa ดังตารางที่ 2

เมื่อนำแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 5 มาวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุในการใช้งานจริงที่ระยะ 8 มม. จากการทดลอง(เส้นหนา) แล้วไม่เกิดการเสียรูป รวมถึงยังสามารถแสดงพฤติกรรมความเป็น elastic ได้ อยู่ พบว่า มีชิ้นทดสอบ 1 ชนิดที่ยังมีพฤติกรรมดังกล่าวได้นั้นคือ ชนิด D ซึ่งจะนำชิ้นทดสอบชนิดนี้ไปทดสอบความล้าจากการดัดต่อไป

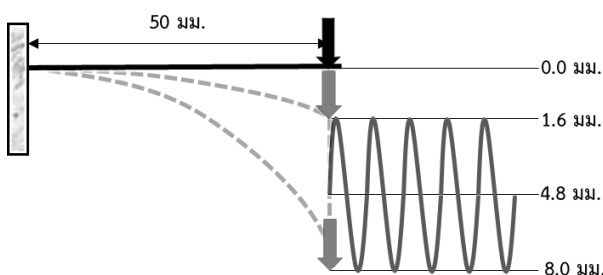
ส่วนชิ้นทดสอบ A B และ C ไม่สามารถรองรับการใช้งานที่ระยะ 8 มม. ตามข้อกำหนดในการใช้งานได้ จึงไม่นำมาทดสอบความล้าจากการดัดต่อไป



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการทดสอบ



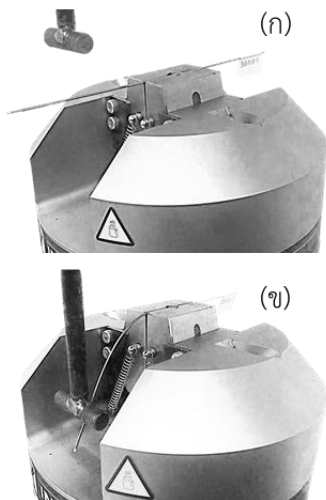
รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการทดสอบการดัดแบบ Static



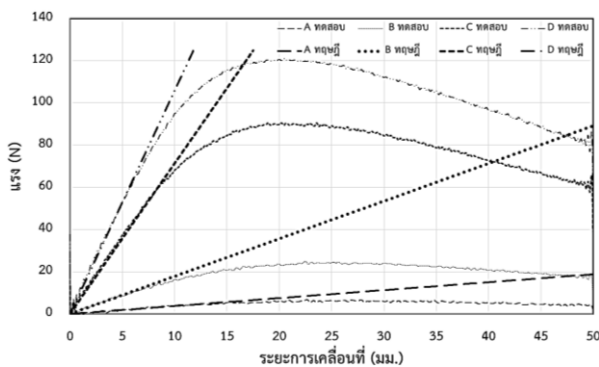
รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการทดสอบความล้าจากการดัด

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบจากสมการ ของ elastic curve

รหัสชิ้นงาน	E (GPa)
A	135
B	135
C	155
D	155



รูปที่ 4 ภาพถ่ายแสดงชิ้นทดสอบในเครื่องทดสอบ (ก) ก่อนการทดสอบ และ (ข) หลังทำการทดสอบ



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดขึ้นทดสอบ 4 ชนิด จากการทดสอบและทฤษฎี

4.2 ผลการทดสอบความล้าจากการตัด

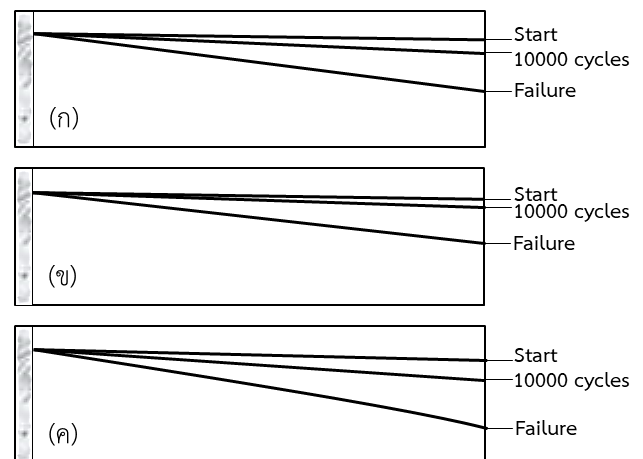
4.2.1 ระยะยุบตัวของสปริง

จากการนำชิ้นงาน D มาทดสอบความล้าจากการตัด และเก็บค่าพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปทุก 10000 รอบ จะได้ดังรูปที่ 6 เส้นตรงในรูปแต่ละเส้นจะแสดงพฤติกรรม ของ

ลวดสปริงที่จำนวนรอบตามการบันทึก เส้นบนสุดบันทึก ขณะก่อนทำการทดสอบ เส้นถัดมาบันทึกขณะทดสอบ ความล้าที่ 10000 รอบ และเส้นล่างสุดบันทึกหลังจาก เกิดการเสียรูปโดยวัฏระยะการยุบตัวถาวรตามแนวแกน y จากเส้นก่อนทำการทดสอบที่ความยาว 50 มม. จากจุด ยึดตามแนวแกน x ได้ค่าเฉลี่ยที่ความล้าจากการตัด 10000 รอบ คือ 1.43 มม. และที่การเสียรูปถาวร คือ 6.17 มม. ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางแสดงการเคลื่อนตัวถาวรของชิ้นงานทดสอบ D ที่ระยะเคลื่อนตัว 50 มม.

หมายเลข ชิ้นทดสอบ	ระยะการเคลื่อนตัวถาวร (มม.)		
	0 รอบ	10000 รอบ	เสียรูปถาวร
D-1	0	1.5	6
D-2	0	0.8	4.5
D-3	0	2	8
ค่าเฉลี่ย	0.00	1.43	6.17



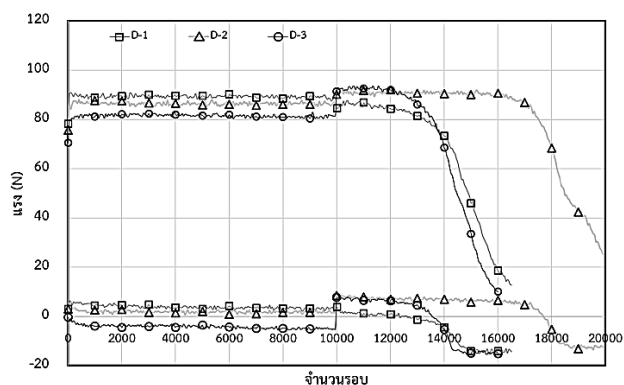
รูปที่ 6 ภาพแสดงพฤติกรรมการยุบตัวของสปริงขึ้นทดสอบ (ก) D-1 (ข) D-2 และ (ค) D-3

4.2.2 พฤติกรรมการรับแรงของสปริง

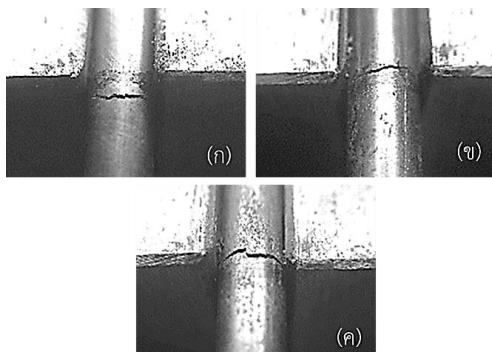
จากการนำชิ้นงานมาทดสอบความล้าเนื่องจากการตัดโดยการควบคุมแอมพลิจูดของการสั่น ผลการทดสอบสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากที่สุดและน้อยที่สุด กับจำนวนรอบของการใช้งาน ดังรูปที่

7 โดยมีการหยุดพักที่ 10000 รอบ เพื่อให้ใกล้เคียงสมมติฐานการใช้งานจริง พบว่าในช่วงประมาณ 1000 รอบ มีความไม่เสถียรของแรง จากนั้นแรงเฉลี่ยเริ่มคงที่ประมาณ 2 N และมีแนวโน้มลดลง หลังจากเก็บค่าที่ 10000 รอบแล้วทดสอบต่อ พบว่ากราฟในแต่ละชิ้นงานมีพฤติกรรมการรับแรงที่ใกล้เคียงกันจนถึงช่วง 12000 รอบ เริ่มมีชิ้นงานที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร แรงที่ชิ้นงานสามารถรับได้จะลดลง สุดท้ายแล้วที่บริเวณจุดยึดชิ้นงานได้เกิดการแตกร้าวขึ้น ดังรูปที่ 8 ดังนั้นชิ้นทดสอบ D จึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่จำนวนรอบประมาณ 12000 รอบ เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

และในผลการทดสอบ D-2 ที่มีจำนวนรอบมากกว่าชิ้นงานอื่นอาจเกิดจากคุณภาพของวัสดุที่ซื้อจากท้องตลาด ทำให้ไม่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของคุณภาพวัสดุได้



รูปที่ 7 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงมากที่สุดและน้อยที่สุดกับจำนวนรอบของการใช้งาน



รูปที่ 8 ภาพถ่ายแสดงรอยแตกร้าวของชิ้นงานหลังการทดสอบ (ก) D-1 (ข) D-2 และ (ค) D-3

5. สรุปผลการทดสอบ

สปริงที่ใช้งานภายใต้สถานการณ์ การทำงานที่เคลื่อนตัวตามแนวแกน y ทำมุม 7° มีแรงกระทำเบื้องต้น 19 N และมีการเคลื่อนที่ในลักษณะซ้ำเป็นวัฏจักร คือ ชิ้นงานรหัส D หรือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.76 มม. โดยใช้งานได้ประมาณ 12000 รอบ

ถ้าต้องการให้มีรอบการทำงานที่มากหรือรับแรงได้เยอะขึ้น ควรใช้ลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากขึ้น อาจรวมไปถึงคุณภาพของลวดสปริงที่จะนำมาใช้ทดสอบ เนื่องจากเป็นการซื้อจากร้านค้าตามท้องตลาด ไม่ได้มีการรับรองมาตรฐานคุณภาพของชิ้นงาน ทำให้ค่าคุณสมบัติของชิ้นงานบางค่ามีคุณสมบัติแตกต่างจากที่ระบุไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ จึงควรทดสอบคุณสมบัติของลวดสปริงอีกครั้งก่อนนำมาใช้งาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society for Testing and Materials. (2018), *Standard Specification for Steel Wire, Music Spring Quality, ASTM-A228*
- [2] American Society for Testing and Materials. (2018), *Standard Specification for Stainless Steel Spring Wire, ASTM-A228*
- [3] Q. Y. Wang, J. Y. Berard, S. Rathery and C. Bathias. (1999). High-cycle fatigue crack initiation and propagation behavior of high-strength spring steel wires, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 22, pp. 673 – 677
- [4] รศ. ยรรยง ศรีสม, อ. สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ, อ. ชานนท์ มุลวรรณ, อ.สมเดช อิงคะวะระ, อ. สิงห์แก้ว ปือกเท็ง (2545). การพิจารณาเลือกวัสดุสำหรับการผลิตเหล็กสปริง, *เทคนิค เครื่องกล ไฟฟ้า อุตสาหกรรม*, 212, กรกฎาคม 2545, หน้า 153 - 164
- [5] ทศนพ กำเนิดทอง, สุรเชษฐ ชูติมา และ วีระชาติ กุลศิริเกษม (2548).การวิเคราะห์ลวดสปริงชนิดแบบ Barrel



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

BME – 002



โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, จังหวัดภูเก็ต.

[6] ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และ รศ. ชชาญ ถนัดงาน (2556). การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม1, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.

[7] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th edition in SI units, ISBN: 978-981-4595-28-5, McGraw-Hill Education, New York.

[8] Ferdinand Beer, E. Russel Johnston Jr., John DeWolf, David Mazurek (2015). Mechanics of Materials, 7th edition in SI units, ISBN: 978-9-814-59524-7, McGraw-Hill Education, New York.