

การวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกบนจานสปริงคอมโพสิตสำหรับ
การตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC LOCATION INSTALLED ON
COMPOSITE DISC SPRING FOR DETECTING THE VIBRATION SIGNAL

GUNTAPON CHAROENSOOK



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering

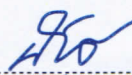
Suranaree University of Technology

Academic Year 2023

การวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกบนจานสปริงคอมโพสิตสำหรับ
การตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



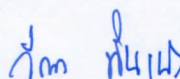
(ดร.เสกฐวรรธ สุจริตภักต์สกุล)

ประธานกรรมการ



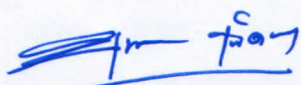
(อาจารย์.ดร.วัชรพงษ์ ปะดังทะโล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษา)



(รองศาสตราจารย์ ดร.วีณา พันเพ็ง)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กัณตภณ เจริญสุข : การวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกบนจานสปริงคอมโพสิต
สำหรับการตรวจจับสัญญาณการสั่นสะเทือน (ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC LOCATION
INSTALLED ON COMPOSITE DISC SPRING FOR DETECTING THE VIBRATION SIGNAL)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ปะดังทะโล, 66 หน้า.

คำสำคัญ: จานสปริงคอมโพสิต, เพียโซอิเล็กทริก, ไฟไนต์เอลิเมนต์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษาหาตำแหน่งในการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนจานสปริงที่ทำจากวัสดุผสมที่มีเส้นใยคาร์บอนเป็นตัวเสริมแรงเรียงแบบตามวงรอบของจานสปริง เมื่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกถูกกระทำด้วยความเค้น แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะทำการสร้างประจุไฟฟ้าหรือก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเรียกพฤติกรรมนี้ว่า พฤติกรรมทางตรงของเพียโซอิเล็กทริก จานสปริงมีพฤติกรรมอยู่ 3 รูปแบบ คือ 1. รูปแบบที่มีค่าแข็งเกร็งเป็นบวก 2. รูปแบบที่มีค่าความแข็งเกร็งเป็นลบได้เมื่อเกิดการโก่งมากพอ และสุดท้าย 3. รูปแบบที่มีค่าแข็งเกร็งเป็นลบได้และมีจุดต่ำสุด โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของจานสปริงที่มีค่าแข็งเกร็งเป็นบวกเท่านั้น โดยอาศัยโปรแกรมออบาคัสในการวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนในการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล โดยอาศัยการเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบพฤติกรรมของจานสปริงเมื่อถูกกระทำด้วยแรงกด และเปรียบเทียบผลจากผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดรวมกับการประมาณคำตอบด้วยวิธีริตส์ ซึ่งผลที่ได้ออกมาสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ถัดจากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นขั้นตอนในการวิเคราะห์หาตำแหน่งในการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนจานสปริง ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเป็นบ่งชี้ตำแหน่งที่ให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่ชัดเจน โดยอาศัยโปรแกรมออบาคัสในการวิเคราะห์ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเทียบกับผลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์ในครั้งนี้แสดงออกมาให้เห็นว่าตำแหน่งที่มีระยะห่างของขอบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกกับขอบบนของจานสปริงมีค่าน้อยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้ามาก และจะลดลงเมื่อตำแหน่งระยะห่างของทั้ง 2 ขอบนี้มีค่ามากขึ้น

GUNTAPON CHAROENSOOK : ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC LOCATION
INSTALLED ON COMPOSITE DISC SPRING FOR DETECTING THE VIBRATION SIGNAL
THESIS ADVISOR : WATCHARAPONG PATANGTALO, Ph.D. 66 PP.

Keyword: Composite disc spring, Piezoelectric, Finite element

This thesis focuses on the study of optimal placement of piezoelectric plates on a composite disc spring reinforced with carbon fibers arranged in a circumferential. When disc spring is applied strain, the piezoelectric plates generate an electric charge or voltage, a phenomenon known as the direct piezoelectric effect. The disc spring has 3 stiffness behaviors: 1. Positive stiffness (Monostable), 2. Negative stiffness when deflected sufficiently (Bistable) and 3. Negative stiffness with a minimum point (Bistable with a local minimum). This research focuses on the behavior of the disc spring with positive stiffness. The analysis was performed using the Abaqus software. The first step involved validating the model by comparing its behavior under compressive load with experimental results and calculations using the minimum energy method combined with the Ritz method, which showed excellent agreement. Following the validation, the study proceeded to determine the optimal placement of the piezoelectric plates on the disc spring. The electric potential was used as an indicator of the most responsive positions.

The analysis, conducted using Abaqus and validated against related research findings, revealed that the piezoelectric plates generate a higher electric potential when placed closer to the top edge of the disc spring. This potential decreases as the distance from the edge increases.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature กัณตapon ชาโรนสอ
Advisor's Signature พชร

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคล ต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดี ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการ ดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

อาจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ปะดังทะเล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชโลธร ธรรมแท้, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีณา ฟั่นเพ็ง, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเดช ตัญตรัยรัตน์ อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ อาจารย์อภิรักษ์ หล่ออ่อนกลาง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ

ดร.เสฏฐวรรธ สุจิตภวัตสกุล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการเรียน

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริม การศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

กันตภณ เจริญสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 พฤติกรรมของงานสปริง.....	4
2.1.2 ตัวสร้างพลังงานไฟฟ้าแบบไบสแตเบิล.....	5
2.1.3 พฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก.....	7
2.1.4 การตรวจสอบสภาพของโครงสร้างโดยอาศัยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเพียโซอิเล็กทริก.....	9
2.1.5 การวิเคราะห์ความเค้น (Stress) และ การโก่ง (Deflection) ของงานสปริงที่ทำจากวัสดุไอโซทรอปิก.....	10
2.1.6 สมการในการวิเคราะห์งานสปริงที่ทำจากวัสดุคอมโพสิต.....	10
2.1.7 ระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดและการประเมินคำตอบด้วยวิธีรีดส์.....	12
2.1.8 การเลือกวัสดุ.....	15
2.1.9 การวิเคราะห์งานสปริงโดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method).....	16
2.1.10 การวิเคราะห์อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟที่ทำจากงานสปริงคอมโพสิตประกอบกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก.....	17
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	ขั้นตอนการวิจัย.....	18
3.1.1	การทำนายพฤติกรรมของงานสปริงคอมโพสิต.....	19
3.1.1.1	การทดสอบงานสปริง.....	21
3.1.1.2	การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีรีดส์.....	22
3.1.1.3	การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	23
3.1.2	การวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก.....	27
4	ผลการทดลอง.....	32
4.1	ผลการทำนายพฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยแบบสานทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$	32
4.2	ผลการทำนายพฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามวงของงานสปริง.....	35
4.3	ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก.....	37
4.3.1	การเปรียบเทียบความถูกต้องกับงานวิจัยที่ใกล้เคียง.....	37
4.3.2	ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งในการติดตั้งของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนงานสปริง.....	38
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1	สรุปหัวข้อหลักของงานวิจัย.....	43
5.1.1	การทดสอบงานสปริง.....	43
5.1.2	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์แบบเรียงเส้นใยตามวงรอบ (circumferential).....	44
5.2	ปัญหาและข้อจำกัด.....	44
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	44
	รายการอ้างอิง.....	46
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยแบบสานทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$	48
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามวงของงานสปริง.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. ข้อมูลการวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก.....	54
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษา.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	66



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1	รูปทรงงานสปริง.....	20
2	สมบัติของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงคาร์บอนไฟเบอร์.....	23
3	ขนาดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก.....	28
4	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริง.....	35



สารบัญรูปภาพ

รูปที่

หน้า

1	งานสปริงในระบบพิกัดทรงกรวย.....	2
2	ความสัมพันธ์ของงานสปริงระหว่างแรงและการโก่งในแต่ละความสูง.....	5
3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นและความถี่การสั่ง ของตัวสร้างพลังงานแบบ ไบสเทเบิลเทียบกับตัวสร้างพลังงานแบบเชิงเส้น.....	6
4	การตอบสนองของความดันไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ.....	6
5	รูปแบบพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก.....	8
6	สัญญาณที่บันทึกตอนโครงสร้างปกติเทียบกับสัญญาณที่บันทึกตอนโครงสร้างมี ความผิดปกติ.....	9
7	พลังงานความเครียดจำเพาะของวัสดุสปริง.....	15
8	แบบจำลองงานสปริงและขอบเขตของการวิเคราะห์.....	16
9	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์ไฟฟ้าและระยะยุบของงานสปริงที่ทำจากเหล็ก.....	17
10	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	18
11	รูปแบบอนุหภูมิในการอบงานสปริงคอมโพสิตภายใต้ความดัน 1 บาร์.....	20
12	งานสปริงที่ผลิตจากคาร์บอนไฟเบอร์ที่เรียงมุมแบบ $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ ทั้ง 3 รูปแบบ.....	21
13	การทดสอบงานสปริงด้วยเครื่อง UTM.....	21
14	ขอบเขตในการวิเคราะห์ และทิศทางของเส้นใยแบบสาน $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$	22
15	งานสปริงที่เรียงเส้นใยแบบทิศทางตามวงรอบของงานสปริง.....	23
16	ขั้นตอนการกำหนดค่าสมบัติวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์.....	24
17	รายละเอียดการกำหนดทิศทางของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์แบบสานทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$	25
18	รายละเอียดการกำหนดทิศทางของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ตามวงรอบของงานสปริง.....	25
19	ขอบบนของงานสปริงที่ถูกจำกัดให้เคลื่อนที่ในทิศแกน z ตามจุดอ้างอิง.....	26
20	ขอบเขตที่กำหนดให้แก่แบบจำลอง.....	26
21	ตำแหน่งในการวัดขนาดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก.....	28
22	การสัมผัสแบบ Tie บนผิวงานสปริงและเพียโซอิเล็กทริก.....	29
23	การกำหนดให้ทุกโนดบนผิวบนงานสปริงมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับโนด S1 top.....	30
24	วิธีกำหนดสมการควบคุมให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากันกับโนด S1 top.....	30
25	กรณีศึกษาขณะเกิดวงจรปิด (closed-circuit).....	31

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
26	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ ชนิดที่ 1.....33
27	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ ชนิดที่ 2.....34
28	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ ชนิดที่ 3.....35
29	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของงานสปริงชนิดที่ 1.....36
30	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของงานสปริงชนิดที่ 2.....36
31	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของงานสปริงชนิดที่ 3.....37
32	ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าและระยะยุบของงานสปริงที่ทำจากวัสดุหลักสำหรับเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....38
33	ระยะติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก.....38
34	พฤติกรรมของงานสปริงชนิด A1.....39
35	พฤติกรรมของงานสปริงชนิด A2.....39
36	พฤติกรรมของงานสปริงชนิด A3.....40
37	พฤติกรรมงานสปริงที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณีศึกษา A1 ถึง E1 ที่ตำแหน่ง S_{tp} 0 mm.....41
38	พฤติกรรมงานสปริงที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณีศึกษา A2 ถึง E2 ที่ตำแหน่ง S_{tp} 0 mm.....41
39	พฤติกรรมงานสปริงที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณีศึกษา A3 ถึง E3 ที่ตำแหน่ง S_{tp} 0 mm.....42

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

s	=	แกน s
s_1	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางงานสปริงถึงขอบบนของงานสปริงในแนวแกน s
s_2	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางงานสปริงถึงขอบล่างของงานสปริงในแนวแกน s
h	=	ความสูง
z	=	แกน z
r	=	แกน r
p	=	แรงที่กระทำงานสปริง
t	=	ความหนา
D_i	=	เส้นผ่านศูนย์กลางในของงานสปริง
D_o	=	เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของงานสปริง
d_{ip}	=	ค่าคงที่ความเครียด (Strain coefficient)
σ_i	=	ความเค้น
τ_{ij}	=	ความเค้นเฉือน
S	=	ความเครียด
E	=	สนามไฟฟ้า, โมดูลัสยืดหยุ่น
D	=	การจัดไฟฟ้
s^E	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Compliant coefficient)
d	=	ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant)
ϵ^T	=	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความเค้นคงที่ (Dielectric constant matrix at constant stress)
c^E	=	เมทริกซ์ของการเกร็งที่สภาวะสนามไฟฟ้าคงที่ (Stiffness matrix at the condition electric field constant)
e	=	ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจากความเค้น (Piezoelectric stress coefficient)
ϵ^s	=	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความเครียดคงที่ (Dielectric constant matrix at constant strain)
F	=	แรง
ν	=	อัตราส่วนปัวซอง
δ	=	ระยะเคลื่อนตัว (Displacement)
M	=	ค่าคงที่
C_1	=	ค่าคงที่

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

C_2	=	ค่าคงที่
S_s	=	ความเครียดในทิศ s
S_θ	=	ความเครียดในทิศ θ
$\gamma_{s\theta}$	=	ความเครียดเฉือน
S_s^o	=	ความเครียดของระนาบกึ่งกลางในทิศ s
S_θ^o	=	ความเครียดของระนาบกึ่งกลางในทิศ θ
$\gamma_{s\theta}^o$	=	ความเครียดเฉือนของระนาบกึ่งกลาง
K_s^o	=	ค่าความโค้งในแกน s
K_θ^o	=	ค่าความโค้งในแกน θ
$K_{s\theta}^o$	=	ค่าความโค้งในระนาบ $s\theta$
z	=	ตำแหน่งที่เริ่มวัดจากระนาบกึ่งกลางตามแนวความยาวของแกน z
u^o	=	ระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางในแนวรัศมี
v^o	=	ระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางในแนวเส้นรอบวง
w^o	=	ระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางในแนวความหนา
A_{ij}	=	A เมทริกซ์ใน laminate stiffness matrix
B_{ij}	=	B เมทริกซ์ใน laminate stiffness matrix
D_{ij}	=	D เมทริกซ์ใน laminate stiffness matrix
N_i	=	ผลรวมของแรงตั้งฉากในระบบแกนทรงกรวย
N_{ij}	=	ผลรวมของแรงเฉือน
M_i	=	โมเมนต์รอบแกนในระบบแกนทรงกรวย
M_{ij}	=	ผลรวมของ Twisting moment
k	=	เลขลำดับชั้น
n	=	จำนวนชั้นทั้งหมด
Q_{ij}	=	Component of reduced stiffness
$\bar{Q}_{ij}$	=	Component of transformed reduced stiffness
G_{ij}	=	โมดูลัสเฉือน
a_i	=	ค่าสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า
c_k	=	ค่าสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า
l	=	ลำดับสูงสุดของฟังก์ชันพหุนาม
K	=	ลำดับสูงสุดของฟังก์ชันพหุนาม
U_{total}	=	พลังงานศักย์รวมของงานสปริงที่ติดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนผิวหน้าของงานสปริง
π	=	พลังงานศักย์ของงานสปริง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

U_p	=	พลังงานศักย์ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกหา
U	=	พลังงานที่เกิดจากความเครียด
W	=	งานที่เกิดจากแรงกดที่ขอบของจานสปริง
z_1	=	ระยะที่วัดจากระนาบกึ่งกลางของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกไปถึงพื้นผิวบน
z_2	=	ระยะที่วัดจากระนาบกึ่งกลางของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกไปถึงพื้นผิวล่าง
a	=	ระยะที่วัดจากขอบบนของจานสปริงในทิศ s
b	=	ระยะที่วัดจากขอบล่างของจานสปริงในทิศ s
c^{*E}	=	transformed stiffness matrix of constant electric field
e^*	=	transformed piezoelectric constant matrix
$\mathcal{E}^*$	=	transformed dielectric constant matrix at constant constrain
δ_{nor}	=	Normalized deflection
P_{nor}	=	Normalized load
s_{tp}	=	ระยะจะวัดจากขอบบนของจานสปริงถึงขอบบนของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

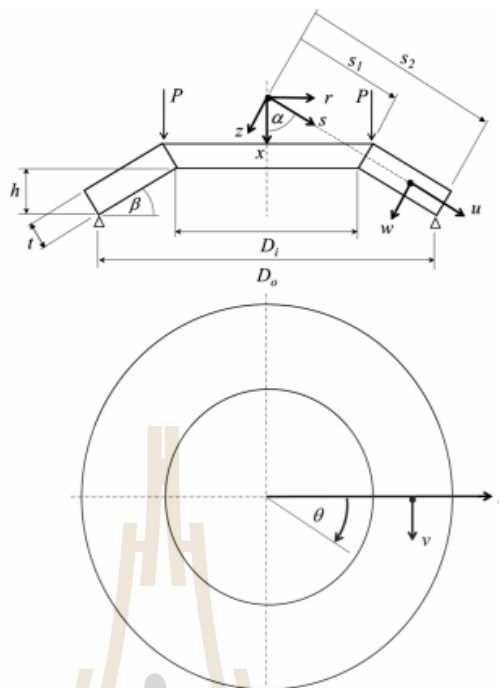
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากเครื่องจักรเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญในการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่บริษัท ดังนั้นเครื่องจักรควรมีสภาพที่สมบูรณ์พร้อมที่สุดที่จะสามารถทำงานได้ตลอดเวลา หากเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้เครื่องจักรทำงานไม่ราบรื่น หรือต้องหยุดการทำงานลง จะส่งผลให้การผลิตของบริษัทต้องหยุดชะงักลง ตลอดจนอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อรายได้ของบริษัท ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive maintenance) เพื่อป้องกันการเสียหายอันส่งผลให้เครื่องจักรนั้นต้องหยุดการทำงานลง การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมีหลักในการตรวจสอบสภาพการทำงาน of เครื่องจักร 2 รูปแบบ คือ การตรวจสอบตามช่วงเวลา หรือการตรวจสอบจากสภาพของเครื่องจักร อาจตรวจสอบจากการสังเกต หรือการตรวจสอบจากค่าที่ได้จากตัวรับรู้หรือเซนเซอร์ (Sensor) ต่างๆ

ในเครื่องจักรส่วนใหญ่ มักจะมีจานสปริง หรือแหวนสปริง (Disk Spring or Belleville Spring) ในหลายๆ ส่วนประกอบ เช่น ระบบส่งกำลัง ระบบรองรับการสั่นสะเทือน หรือในชิ้นส่วนเล็กๆ อย่าง แหวนรองสลักเกลียว (bolt) เพื่อป้องกันการคลายตัว โดยจานสปริงมีคุณสมบัติในการรับแรงที่สูงและยังเกิดการยุบตัวที่ต่ำอีกด้วย จานสปริงนั้นมีพฤติกรรมที่ซับซ้อน ซึ่งค่านิสสปริง (spring rate) ของจานสปริงจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางนอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางใน (D_o/D_i) อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความหนา (h/t) และอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางนอก (h/D_o)



รูปที่ 1 จานสปริงในระบบพิกัดทรงกรวย

โดยผู้วิจัยมีความสนใจในการวิเคราะห์และออกแบบเซนเซอร์ที่ทำมาจากจานสปริงโดยใช้วัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเป็นใยแก้วชนิดอี (E – glass composite) หรือเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ซึ่งในตัวจานสปริงนั้นมีการฝังเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เพื่อที่ใช้เปลี่ยนพลังงานเป็นเซนเซอร์จับสัญญาณเมื่อเครื่องจักรเกิดการสั่นสะเทือน แต่เนื่องจากพฤติกรรมของจานสปริงขึ้นกับตัวแปรต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น และยังรวมไปถึงจำนวนชั้นและทิศทางในการเรียงตัวของเส้นใย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมรวมไปถึงการหาตำแหน่งที่จะใช้ติดตั้งเซนเซอร์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ ออกแบบจานสปริงและตำแหน่งติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกที่ทำให้สัญญาณทางไฟฟ้าแสดงออกมาได้ชัดเจน
- 1.2.2 เพื่อสร้างเซนเซอร์จากจานสปริงที่แสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงกับความหนา (h/t) ไม่เกิน 3
- 1.3.2 ใช้วัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเป็นใยแก้วชนิดอีหรือเส้นใยคาร์บอนในการวิเคราะห์
- 1.3.3 เรียงเส้นใยตามวงของจานสปริง
- 1.3.4 แรงที่ใช้เป็นแรงกดแบบคงที่
- 1.3.4 สร้างชิ้นงานต้นแบบเพื่อใช้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบ
- 1.3.5 พิจารณาเฉพาะจานสปริงแบบเดี่ยว
- 1.3.6 กำหนดให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีปริมาตรเท่ากัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 งานสปริงสามารถเป็นเซนเซอร์ตรวจหาความผิดปกติของเครื่องจักรได้
- 1.4.2 แนวทางการออกแบบเซนเซอร์ที่ทำมาจากงานสปริงสามารถประยุกต์ต่อยอดในอนาคตได้



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

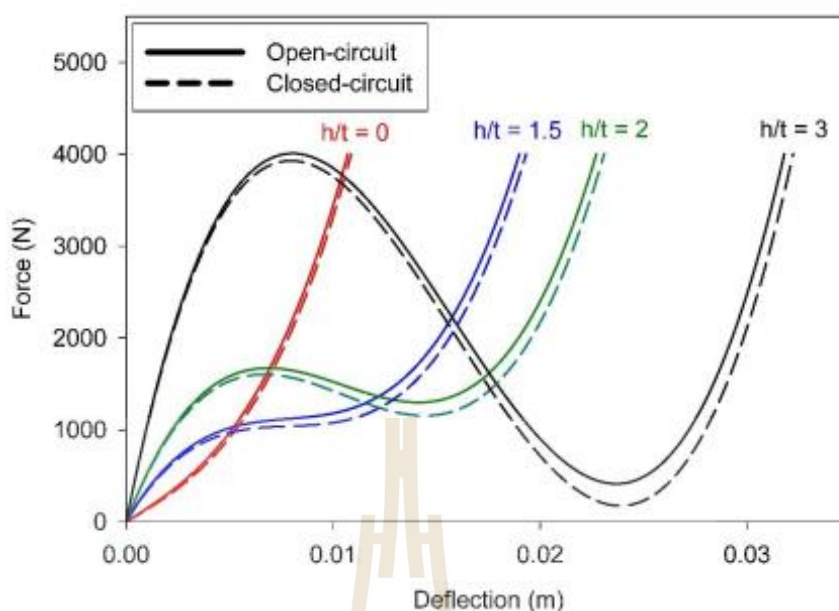
การตรวจสอบการทำงานของเครื่องบนพื้นฐานของการใช้เทคนิคการทำงานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric PZT) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นสร้างการเชื่อมต่อระหว่างโดเมนทางไฟฟ้าและทางกล เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดความเครียด (Strain) ส่งผลเกิดการผลิตรกระแสไฟฟ้า (Voltage) เมื่อนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกติดบนจานสปริง (Disc spring) ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับแรงสั่นสะเทือนชนิดหนึ่ง มักจะอยู่ในระบบขับเคลื่อนของเครื่องจักร ทำให้จานสปริงสามารถทำหน้าที่เปรียบเสมือนอุปกรณ์ตรวจจับชนิดหนึ่ง (Sensor)

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัย ตัวอย่างเช่น ผู้วิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมของจานสปริง วิธีการออกแบบจานสปริงโดยพิจารณาพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น ตัวสร้างพลังงานแบบไบสเตเบิล พฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก การทำนายพฤติกรรมของจานสปริง ระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดและการประเมินคำตอบด้วยวิธีริตส์ เป็นต้น

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 พฤติกรรมของจานสปริง

(Aimmanee & Phongsitthisak, 2022) พฤติกรรมของจานสปริงนั้นแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความหนา (h/t) ลักษณะที่ 1 คือ ค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) เป็นบวกเสมอเมื่อมีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความหนา (h/t) มีค่าเท่ากับ 0 ถึง 1.5 ลักษณะที่ 2 คือ ค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) สามารถเป็นลบได้เมื่อเกิดการโก่ง (deflection) ที่มากพอ โดยอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความหนา (h/t) มีค่าเท่ากับ 2 ถึง 3 และลักษณะที่ 3 คือ ค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) สามารถเป็นลบได้และจุดต่ำสุดวิกฤต (minimum critical point) นั้นมีค่าแรงเท่ากับ 0 นิวตันที่อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความหนา (h/t) มีค่าตั้งแต่ 3 ขึ้นไป ซึ่งทั้งสามลักษณะถูกแสดงในรูปที่ 2

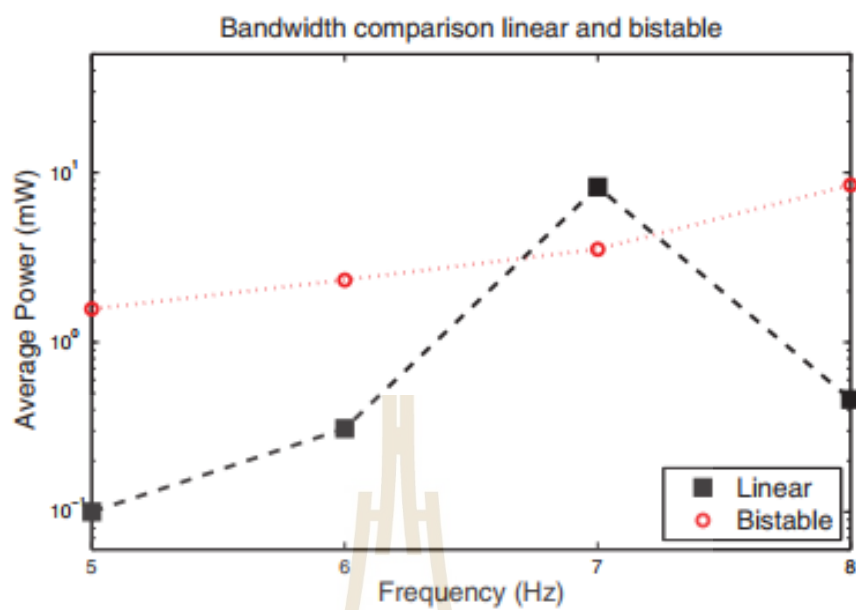


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของงานสปริงระหว่างแรงและการโก่งในแต่ละความสูง
(Aimmanee & Phongsitthisak, 2022)

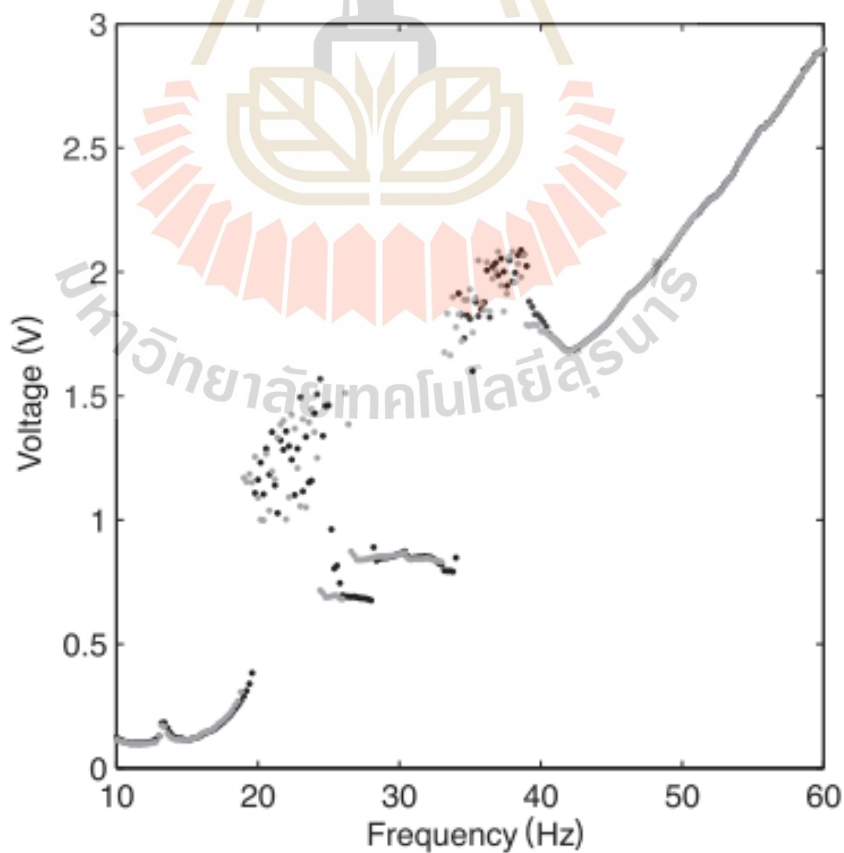
2.1.2 ตัวสร้างพลังงานไฟฟ้าแบบไบสเทเบิล

การสั่นในช่วงความถี่ต่ำ ตัวสร้างพลังงานไฟฟ้าแบบไบสเทเบิล (bistable energy harvester) ให้พลังงานที่มากกว่าตัวสร้างพลังงานแบบเชิงเส้น (linear energy harvester) ดังรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของตัวสร้างพลังงานไฟฟ้าแบบไบสเทเบิลถูกจำกัดอยู่ในช่วงความถี่บางช่วงและแอมพลิจูดบางค่าเท่านั้น ดังรูปที่ 4 ซึ่งกำหนดค่าแอมพลิจูดเท่ากับ $20\ \mu\text{m}$ โดยแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น (Erturk & Inman, 2011)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นและความถี่การสั่นของตัวสร้างพลังงานแบบไบสเทเบิลเทียบกับตัวสร้างพลังงานแบบเชิงเส้น (Erturk & Inman, 2011)

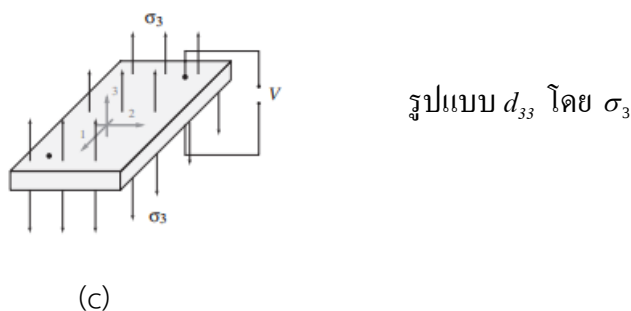
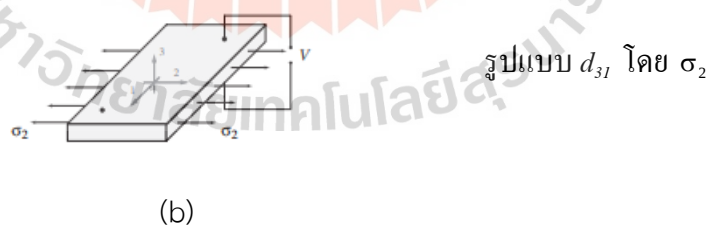
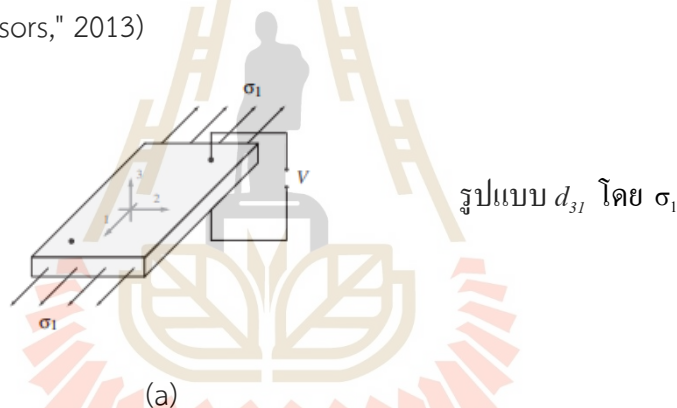


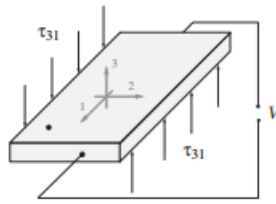
รูปที่ 4 การตอบสนองของความดันไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ

2.1.3 พฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก

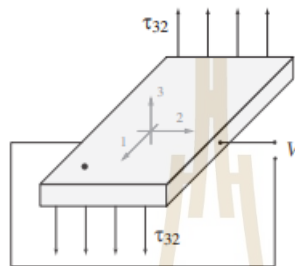
(Covaci & Gontean, 2020) กล่าวว่า พฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายผ่าน 2 พฤติกรรม ดังนี้ 1. พฤติกรรมทางตรง (Direct piezoelectric) กล่าวคือ เพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตสนามไฟฟ้า (Electric field) เมื่อได้รับความเครียด (Strain) 2. พฤติกรรมย้อนกลับ (Converse or inverse piezoelectric) กล่าวคือ เมื่อเพียโซอิเล็กทริกได้รับสนามไฟฟ้า (Electric field) เพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการเสียรูป (Deform)

(Calìo et al., 2014) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดจากการตอบสนองต่อความเครียดในทิศทางต่างๆ โดยอิเล็กโตรดอยู่บนระนาบ 1-2 ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ (Mode) โดยรูปแบบของเพียโซอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับค่าคงที่ความเครียด (Strain coefficient, d_{ip}) ดังนี้ 1. รูปแบบ d_{31} โดยจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการตอบสนองต่อความเครียดในทิศทางที่ 1 หรือ 2 ดังรูปที่ 5 (a) และ (b) 2. รูปแบบ d_{33} โดยจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการตอบสนองต่อความเครียดในทิศทางที่ 3 ดังรูปที่ 5 (c) และรูปแบบ d_{15} โดยจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการตอบสนองต่อความเครียดเฉือนในทิศทางที่ 31 หรือ 32 ดังรูปที่ 5 (d) และ (e) ("Piezoelectric Actuators and Sensors," 2013)



รูปแบบ d_{15} โดย τ_{31}

(d)

รูปแบบ d_{15} โดย τ_{32}

(e)

รูปที่ 5 รูปแบบพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก

ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ระยะห่างระหว่างประจุบวกและลบจะเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของการมีขั้วก็เพิ่มขึ้น ประจุอิสระบางส่วนจะถูกดูดซับบนอิเล็กโทรด ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ (Chen, Li, Tian, & Zhou, 2019)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างใต้แรงภายนอก ระยะห่างระหว่างประจุบวกและลบที่จับคู่กันในวัสดุจะลดลง และความเข้มข้นของการมีขั้วก็ลดลงด้วย ส่วนหนึ่งของประจุอิสระที่ถูกดูดซับบนอิเล็กโทรดจะถูกปล่อยออกมา และปรากฏการณ์การปล่อยประจุนี้เรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกบวก จากสองปรากฏการณ์ข้างต้นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายผ่านสมการเพียโซอิเล็กทริกที่แสดงดังสมการที่ (1) ถึง (4) (Park, Farrar, Rutherford, & Robertson, 2006) และ (2) (Zhang, 2017)

$$S = s^E \sigma + dE \quad \dots (1)$$

$$D = d\sigma + \epsilon^T E \quad \dots (2)$$

$$\sigma = c^E S - eE \quad \dots (3)$$

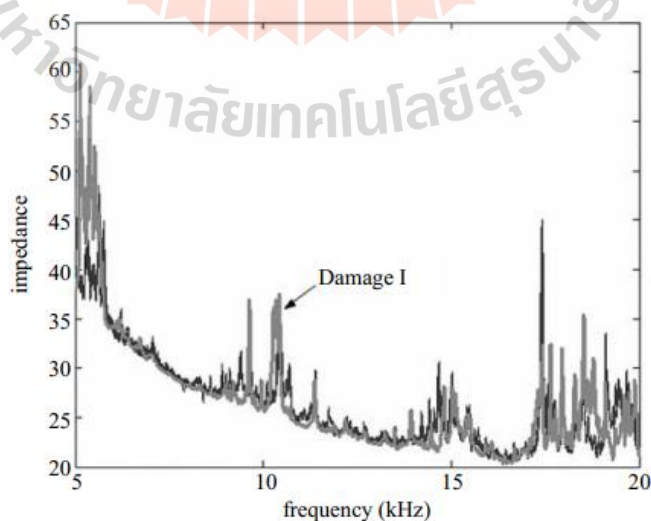
$$D = dS + \epsilon^S E \quad \dots (4)$$

ตัวแปร σ , S , E , D , s^E , d , ϵ^T , c^E , e , ϵ^S คือ ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) สนามไฟฟ้า (Electric field) การขจัดไฟฟ้า (Electric displacement) ค่า

สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Compliant coefficient) ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความเค้นคงที่ (Dielectric constant matrix at constant stress) เมทริกซ์ของการเกร็งที่สภาวะสนามไฟฟ้าคงที่ (Stiffness matrix at the condition electric field constant) ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจากความเค้น (Piezoelectric stress coefficient) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความเครียดคงที่ (Dielectric constant matrix at constant strain) สมการที่ (1) และ (2) เป็นรูปแบบของสมการที่มีตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องคือ σ และ E โดยสมการที่ (2) แสดงถึงพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct Piezoelectric) กล่าวคือ เมื่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเครียดจะส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้า สมการที่ (1) แสดงถึงพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ (Converse Piezoelectric) กล่าวคือ เมื่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกได้รับกระแสจะทำให้เกิดการยืดหรือหดตัว (เกิดความเครียด) สมการที่ (1) และ (2) เป็นรูปแบบของสมการที่มีตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องคือ s และ E โดยสมการที่ (4) แสดงถึงพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct Piezoelectric) สมการที่ (3) แสดงถึงพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ (Converse Piezoelectric) กล่าวคือ เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ความเค้นที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะลดลง

2.1.4 การตรวจสอบสภาพของโครงสร้างโดยอาศัยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเพียโซอิเล็กทริก

(Baker, Roundy, & Wright, 2005) อาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์เพื่อบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงหรือการเกิดความเสียหายของโครงสร้าง สังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์และความถี่ของการสั่นที่ป้อนเข้ามา ต้องทำการเก็บบันทึกสัญญาณของโครงสร้างขณะที่มีสภาพปกติเพื่อจะได้ไว้ใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณ โดยถ้าสัญญาณที่บันทึกได้มีความผิดปกติไปจากสัญญาณตัวเทียบ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างอาจจะมีการเสียหายหรือไม่ปกติ ดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าในช่วงที่ความถี่ประมาณ 10 kHz สัญญาณมีความแตกต่างไปจากสัญญาณตัวเทียบ



รูปที่ 6 สัญญาณที่บันทึกตอนโครงสร้างปกติเทียบกับสัญญาณที่บันทึกตอนโครงสร้างมีความผิดปกติ

2.1.5 การวิเคราะห์ความเค้น (Stress) และ การโก่ง (Deflection) ของงานสปริงที่ทำจากวัสดุไอโซทรอปิก

(Dubey & Bhope, 2012) ได้ทำการวิเคราะห์ความเค้นและการโก่งของงานสปริงโดยอาศัยการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) โดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางนอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางใน (D_o/D_i) และอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความหนา (h/t) สมการในการคำนวณสำหรับการโก่งและความเค้นของวัสดุประเภทไอโซทรอปิกเป็นสมการของ Almen และ Lazlo และได้กำหนดสมมุติฐานไว้ดังนี้

1. งานสปริงไม่มีการเสียรูปของหน้าตัด
2. การยุบตัวจะเกิดจากการหมุนตัวของหน้าตัดสปริงรอบจุดสะเทินเท่านั้น
3. ความเค้นในแนวนอนมีค่าเท่ากับศูนย์

$$F = \frac{4E\delta}{1-\nu^2} MD_o^2 \left[(h-t) \left(h - \frac{\delta}{2} \right) t + t^3 \right] \quad \dots (5)$$

$$M = \frac{6}{3.14 \log e(D_o / D_i)} \times \left[\frac{(D_o / D_i) - 1}{D_o / D_i} \right]^2 \quad \dots (6)$$

$$\sigma_1 = \frac{4E\delta}{1-\nu^2 MD_o^2} [C_1 \left(h - \frac{\delta}{2} \right) + C_2 t] \quad \dots (7)$$

$$\sigma_0 = \frac{4E\delta}{1-\nu^2} [C_1 \left(h - \frac{\delta}{2} \right) + C_2 t] \quad \dots (8)$$

$$C_1 = \frac{6}{3.14 \log e(D_o / D_i)} \times \left[\frac{(D_o / D_i) - 1}{\log e(D_o / D_i)} - 1 \right] \quad \dots (9)$$

$$C_2 = \frac{6}{3.14 \log e(D_o / D_i)} \times \left[\frac{(D_o / D_i) - 1}{2} \right] \quad \dots (10)$$

โดย M , C_1 , C_2 คือค่าคงที่ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นและ ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง

2.1.6 สมการในการวิเคราะห์งานสปริงที่ทำจากวัสดุคอมโพสิต

ได้มีการสร้างสมการในการวิเคราะห์งานสปริงที่ทำจากวัสดุคอมโพสิตโดยอาศัยทฤษฎีคลาสสิก ลามิเนชัน (Classical Lamination Theory, CLT) และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (Strain) กับระยะเลื่อน (Displacement) โดยสมการความเครียดของแผ่นบางแสดงได้ดังสมการที่ (11)

$$\begin{aligned}
S_s &= S_s^o + zK_s^o \\
S_\theta &= S_\theta^o + zK_\theta^o \\
\gamma_{s\theta} &= \gamma_{s\theta}^o + zK_{s\theta}^o \quad \dots (11)
\end{aligned}$$

โดยค่า $S_s^o, S_\theta^o, \gamma_{s\theta}^o$ และ $K_s^o, K_\theta^o, K_{s\theta}^o$ คือค่าความเครียดของระนาบกึ่งกลางและค่าความโค้ง ตามลำดับ z คือตำแหน่งที่เริ่มวัดจากระนาบกึ่งกลางตามแนวความยาวของแกน z สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดของระนาบกึ่งกลางกับระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางและความสัมพันธ์ระหว่างค่าความโค้งกับระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางได้ดังสมการที่ (12)

$$\begin{aligned}
S_s^o &= \frac{\partial u^o}{\partial s} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^o}{\partial s} \right)^2 \\
S_\theta^o &= \frac{u^o - w^o \cot \alpha}{s} + \frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial v^o}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial w^o}{\partial \theta} \right)^2 \\
\gamma_{s\theta}^o &= \frac{\partial v^o}{\partial s} - \frac{v^o}{s} \frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial u^o}{\partial \theta} + \frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial w^o}{\partial s} \frac{\partial w^o}{\partial \theta} \\
K_s^o &= -\frac{\partial^2 w^o}{\partial s^2} \\
K_\theta^o &= -\frac{1}{2} \frac{\partial w^o}{\partial s} - \frac{1}{s^2 \sin^2 \alpha} \frac{\partial^2 w^o}{\partial \theta^2} \\
K_{s\theta}^o &= -\frac{2}{\sin \alpha} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{s} \frac{\partial w^o}{\partial \theta} \right) \quad \dots (12)
\end{aligned}$$

เมื่อ u^o, v^o, w^o คือระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางในแนวรัศมี แนวเส้นรอบวง และแนวความหนา ตามลำดับ

สามารถหาแรงได้และโมเมนต์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงหรือโมเมนต์กับความเครียดของระนาบกึ่งกลางหรือค่าความโค้งผ่าน ABD เมทริกซ์ดังสมการที่ (13)

$$\begin{Bmatrix} N_s \\ N_\theta \\ N_{s\theta} \\ M_s \\ M_\theta \\ M_{s\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_s^o \\ S_\theta^o \\ \gamma_{s\theta}^o \\ K_s^o \\ K_\theta^o \\ K_{s\theta}^o \end{Bmatrix} \quad \dots (13)$$

โดย $N_s, N_\theta, N_{s\theta}$ และ $M_s, M_\theta, M_{s\theta}$ คือแรงและโมเมนต์ในระบบแกนทรงกรวยตามลำดับ ส่วน A_{ij}, B_{ij}, D_{ij} คำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k \frac{(z_k^3 - z_{k-1}^3)}{3} \end{aligned} \quad \dots (14)$$

โดยค่า k คือเลขลำดับชั้นจากทั้งหมด n ชั้น และค่า $\bar{Q}_{ij}$ หาได้จากสมการที่ (15)

$$\begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \\ (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \end{bmatrix} \quad \dots (15)$$

โดย $m = \cos \varphi$ และ $n = \sin \varphi$ เมื่อ $\varphi = \theta_f - \theta$ ส่วนค่า Q_{ij} หาได้จากสมการที่ (16)

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad \dots (16)$$

เมื่อ $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{21}$ และ G_{12} คือสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุคอมโพสิต เลข 1 และ 2 แสดงถึงทิศทางตามแนวไฟเบอร์และทิศทางตามขวางไฟเบอร์ตามลำดับ (Patangtalo, Aimmanee, & Chutima, 2016)

2.1.7 ระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดและการประเมินคำตอบด้วยวิธีริตส์

พิจารณาจานสปริงในระบบแกนทรงกรวย (conical coordinate) การประมาณค่าของระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางสามารถทำได้ตามสมการที่ (17)

$$\begin{aligned}
 u^o &= \sum_{i=0}^I a_i s^i \\
 v^o &= 0 \\
 w^o &= \sum_{k=0}^K c_k s^k
 \end{aligned}
 \quad \dots (17)$$

กำหนดให้การยุบตัวของจานสปริงเป็นแบบสมมาตรทำให้ v^o เท่ากับศูนย์ a_i และ c_k คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า ส่วนระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางที่เหลืออีกสองทิศทางเป็นฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Function) ในทิศทาง s ตัวแปร I และ K คือลำดับสูงสุดของฟังก์ชันพหุนาม

พลังงานศักย์รวมของจานสปริงที่ติดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนผิวหน้าของจานสปริง (U_{total}) แสดงดังสมการที่ (18) โดยที่ π คือพลังงานศักย์ของจานสปริง ซึ่งเกิดจากผลรวมของพลังงานที่เกิดจากความเครียด (U) กับงานซึ่งเกิดจากแรง P (W) ดังสมการที่ (19) (Patangtalo et al., 2016)

$$U_{total} = \pi + U_p \quad \dots (18)$$

$$\pi = U - W \quad \dots (19)$$

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{s_1}^{s_2} (N_s S_s^0 + N_\theta S_\theta^0 + N_{s\theta} \gamma_{s\theta}^0 + M_s K_s^0 + M_\theta K_\theta^0 \\
 &\quad + 2M_{s\theta} K_{s\theta}^0) s \sin \alpha ds d\theta
 \end{aligned}
 \quad \dots (20)$$

$$W = u^0(s_p) P \cos \alpha + w^0(s_p) P \sin \alpha \quad \dots (21)$$

U_p คือพลังงานศักย์ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกหาได้จากสมการที่ (22) โดยที่ z_1 และ z_2 คือระยะที่วัดจากระนาบกึ่งกลางของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกไปถึงพื้นผิวบนและพื้นผิวล่างตามลำดับ a และ b คือระยะที่วัดจากขอบบนของจานสปริงในทิศ s โดยที่ผลต่างของ a และ b คือความยาวของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (Aimmanee & Phongsitthisak, 2022)

$$U_p = \int_{z_0}^{z_1} \int_a^b \int_0^{n\pi} \left(\frac{1}{2} S C^* E - S e^* E - \frac{1}{2} E \mathcal{E}^* E \right) s \sin \alpha d\theta ds dz
 \quad \dots (22)$$

โดยที่ c^{*E} , e^* , ϵ^{*E} คือ transformed stiffness matrix of constant electric field, transformed piezoelectric constant matrix และ transformed dielectric constant matrix at constant constrain ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$c^{*E} = \begin{bmatrix} c_{11}^E - \frac{c_{31}^E c_{13}^E}{c_{33}^E} & c_{12}^E - \frac{c_{32}^E c_{13}^E}{c_{33}^E} & 0 \\ c_{21}^E - \frac{c_{31}^E c_{23}^E}{c_{33}^E} & c_{22}^E - \frac{c_{32}^E c_{23}^E}{c_{33}^E} & 0 \\ 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix}$$

$$e^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{13} - \frac{c_{13}^E e_{33}^E}{c_{33}^E} \\ 0 & 0 & e_{13} - \frac{c_{23}^E e_{33}^E}{c_{33}^E} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\epsilon^{*E} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^s & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^s & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^s + \frac{e_{33}^2}{c_{33}^E} \end{bmatrix}$$

... (23)

S คือ เมทริกซ์ของความเครียดและ E คือเมทริกซ์เวกเตอร์สนามไฟฟ้า โดยทั้งสองตัวแปรเป็นตัวแปรอิสระ สามารถขยายอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$S = \begin{pmatrix} S_s \\ S_\theta \\ S_{s\theta} \end{pmatrix}$$

... (24)

$$E = \begin{pmatrix} E_s \\ E_\theta \\ E_z \end{pmatrix} \quad \dots (25)$$

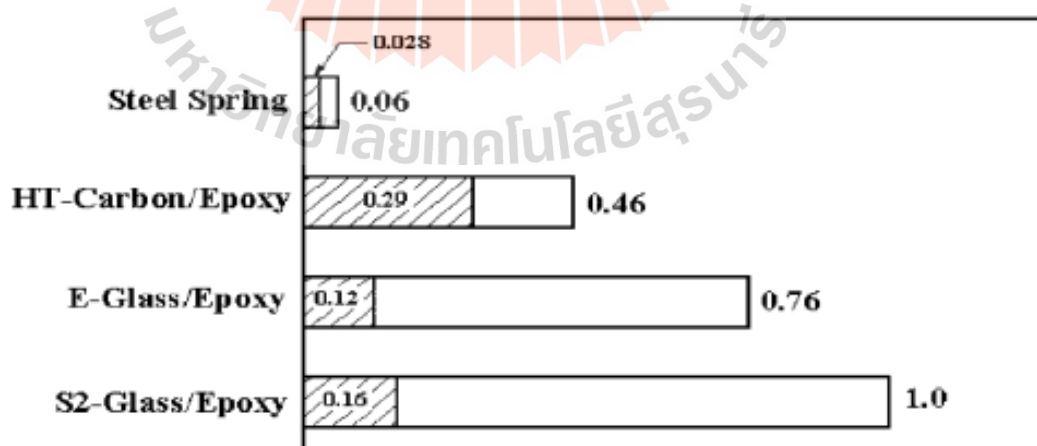
ในกรณีที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกถูกพิจารณาเป็นวัตถุแบบแผ่นบาง สนามแม่เหล็กในทิศทาง E_s และ E_θ จะมีค่าเท่ากับ 0 และพิจารณาเฉพาะ E_z เท่านั้น (Le Khan, 1986)

2.1.8 การเลือกวัสดุ

วัสดุจำพวกต่างๆ มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยการเลือกวัสดุให้ตรงกับความต้องการในการใช้งาน นอกจากจะส่งผลต่อความแข็งแรง ทนทานแล้ว ยังส่งผลต่อน้ำหนักของชิ้นงาน การทนต่อการกัดกร่อนหรือสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ชิ้นงานนั้นๆ จะต้องพบเจอ อีกทั้งยังรวมถึงราคาในการผลิตอีกด้วย (Shokrieh & Rezaei, 2003) ได้ทำการเปรียบเทียบวัสดุ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 โดยส่วนที่แรเงาแสดงถึงค่าพลังงานความเครียดจำเพาะ (Specific strain energies) จะพบว่าวัสดุ HT-Carbon/Epoxy สามารถเก็บพลังงานได้สูงที่สุด มีความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่งที่สูง (Stiffness) และยังมีน้ำหนักที่เบา แต่ในอีกมุมหนึ่ง วัสดุนี้มีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกที่ต่ำ และในกรณีที่มีการสัมผัสกับวัสดุจำพวกโลหะ มักจะเกิดปัญหาการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion) อีกทั้งวัสดุนี้มีราคาที่สูง

เปรียบเทียบระหว่างวัสดุเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) กับ วัสดุเส้นใยแก้ว (Glass fiber) วัสดุเส้นใยแก้วมีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งที่ต่ำกว่า มีความหนาแน่นที่สูงกว่า ทนการกัดกร่อนได้ดีกว่า ทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าและยังมีราคาที่ถูกลง

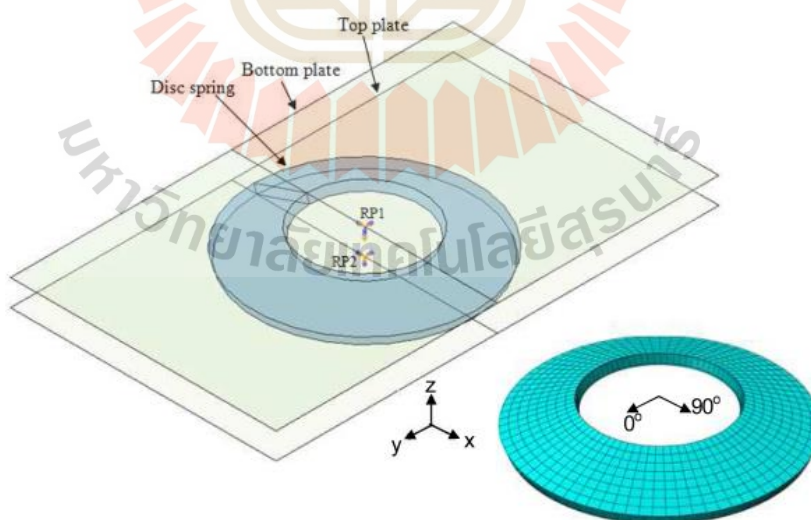


รูปที่ 7 พลังงานความเครียดจำเพาะของวัสดุสปริง

2.1.9 การวิเคราะห์งานสปริงโดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

(Karakaya, 2012) ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงโดยใช้โปรแกรมช่วยคำนวณปัญหาทางวิศวกรรม (Computer edge engineering) ABAQUS โดยกำหนดขอบเขตของปัญหา (Boundary condition) ดังนี้ ดังรูปที่ 8 และเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ (analytical) จากสมการของ Almen and Lazlo

1. มีชิ้นส่วนในการคำนวณ 3 ชิ้น ได้แก่ Top plate, Bottom plate และ Disc spring
2. งานสปริงวางตัวอยู่ระหว่าง Top plate และ Bottom plate
3. ชิ้นส่วน Top plate และ Bottom plate ถูกกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งไม่เสียรูป (Non-deformed rigid parts)
4. กำหนดจุดอ้างอิง (Reference point: *RP1* และ *RP2*) ที่กึ่งกลางของ Top plate และ Bottom plate ตามลำดับ
5. กำหนด Fixed (ไม่สามารถเคลื่อนตัวและหมุนรอบแกน x y และ z ได้) ที่จุดอ้างอิงของ Bottom plate
6. กำหนดระยะเคลื่อนตัวในทิศทาง z (Compression) บน Top plate ที่ตำแหน่งจุดอ้างอิง ระยะเคลื่อนตัวในทิศทางอื่นๆ (x และ y) และการหมุนรอบแกนทั้งสาม (x y และ z) ถูกจำกัดการเคลื่อนไหว
7. งานสปริงสัมผัสกับ Top plate และ Bottom plate แบบไร้แรงเสียดทาน (Frictionless)

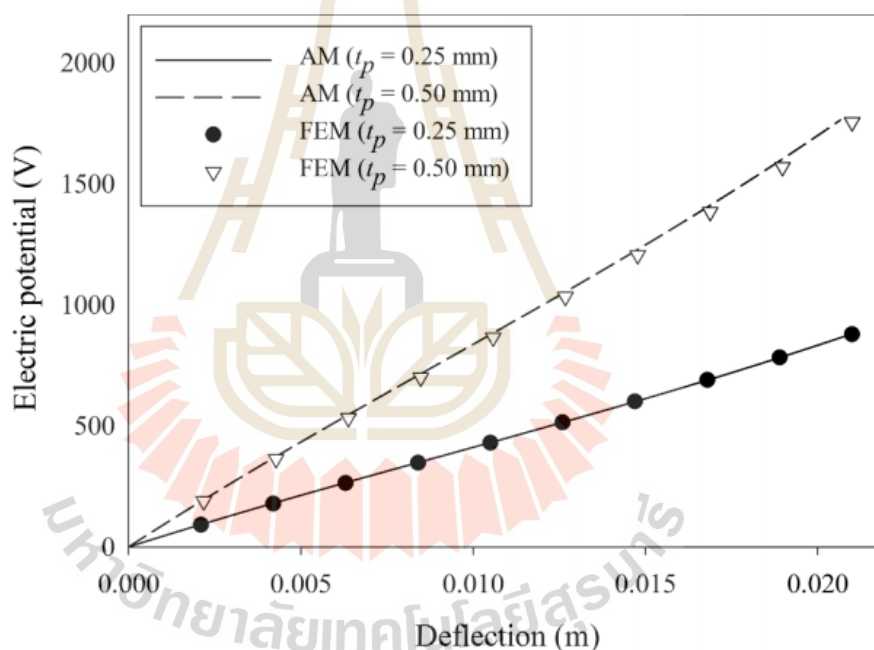


รูปที่ 8 แบบจำลองงานสปริงและขอบเขตของการวิเคราะห์

โดยผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมกับผลที่ได้จากการคำนวณนั้นมีความสอดคล้องกัน

2.1.10 การวิเคราะห์อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่ทำจากงานสปริงคอมโพสิตประกอบกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

(Aimmanee & Phongsitthisak, 2022) ได้ทำการวิเคราะห์อุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าที่ทำจากงานสปริงทั้งที่ทำจากเหล็กและวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบเข้ากับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยงานสปริงที่ผลิตจากวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์แบบสาน (Woven) เรียงเส้นใยแบบ $\left[\left[(0^\circ/90^\circ), (+45^\circ/-45^\circ) \right]_s, \left(0^\circ/90^\circ \right) \right]_s$ และมีรูปทรงของงานสปริง ดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก (D_o) 400 mm เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน (D_i) 200 mm ความหนาของงานสปริง (t) 5 mm ความหนาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (t_p) 0.25 mm รูปที่ 9 แสดงถึงผลการวิเคราะห์พลังงานศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่องานสปริงที่ทำจากเหล็กถูกกดที่ปลายขอบบน โดยสมการพลังงานและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ ABAQUS โดยวิเคราะห์แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric)

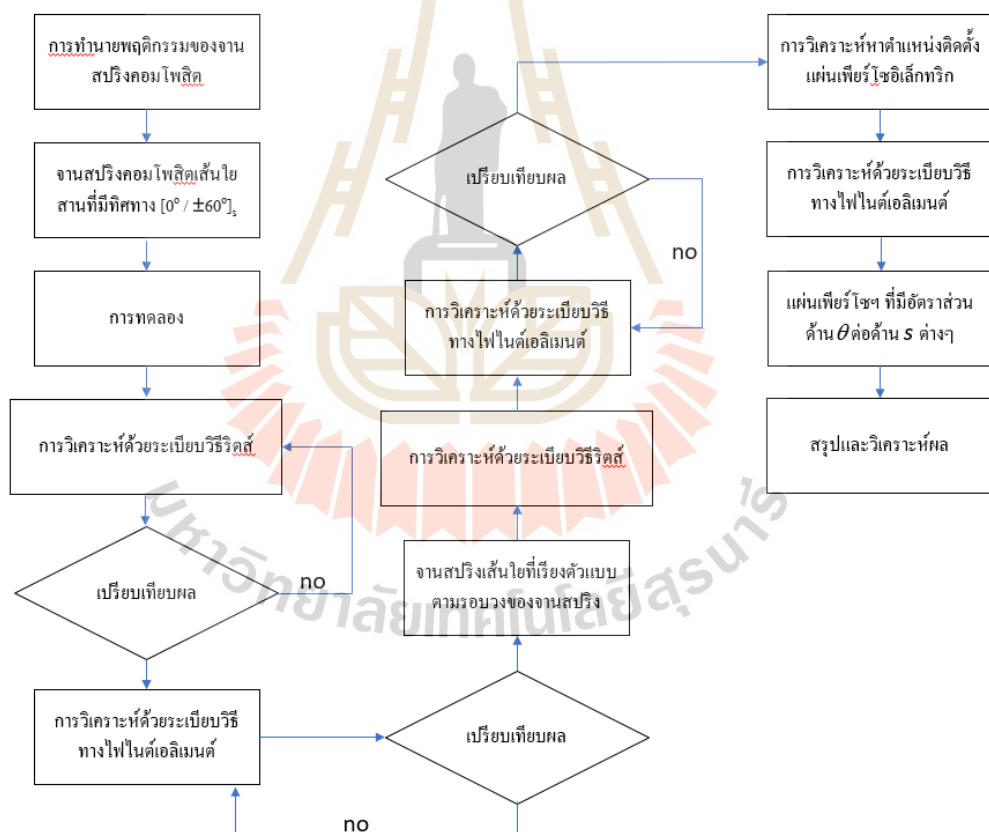


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์ไฟฟ้าและระยะยุบของงานสปริงที่ทำจากเหล็ก (Aimmanee & Phongsitthisak, 2022)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะแบ่งการวิจัยเป็นสองส่วน คือ การทำนายพฤติกรรมของจานสปริง รายละเอียดดังหัวข้อที่ 3.1.1 โดยใช้วิธีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดร่วมกับการประมาณคำตอบด้วยวิธีริตส์ (Analytical) การวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ช่วยคำนวณปัญหาทางวิศวกรรม (CAE) และการทดสอบ (Experimental) และ การวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก รายละเอียดดังหัวข้อที่ 3.1.2 ใช้การวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ช่วยคำนวณปัญหาทางวิศวกรรม (CAE) เท่านั้น



รูปที่ 10 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

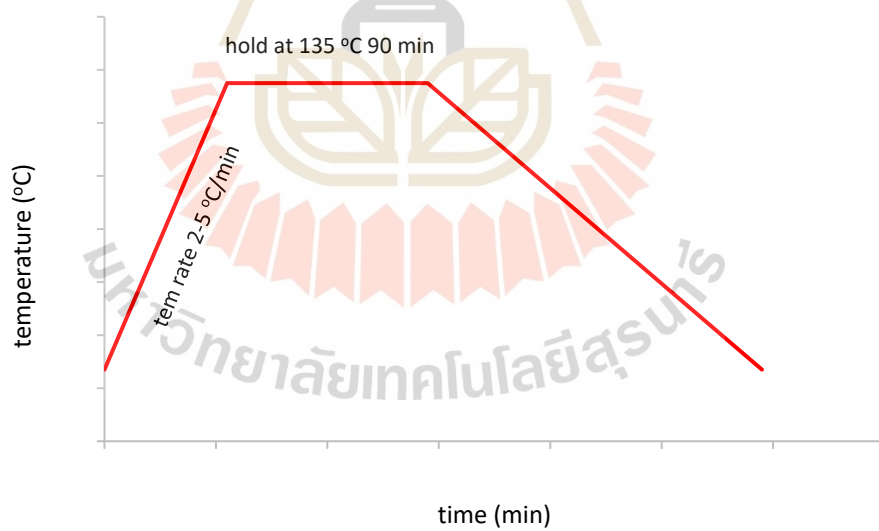
3.1.1 การทำนายพฤติกรรมของงานสปริงคอมโพสิต

ในส่วนแรกคือ การทำนายพฤติกรรมของงานสปริงคอมโพสิต การวิจัยในส่วนนี้อาศัยการเปรียบเทียบพฤติกรรมของงานสปริงระหว่างการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดรวมกับการประเมินค่าตอบด้วยวิธีริตส์ เปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรม CAE และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยในขั้นตอนนี้นอกจากจะเป็นการศึกษาพฤติกรรมของงานสปริงแล้ว ยังเป็นขั้นตอนที่ใช้พิสูจน์ความถูกต้องของผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดรวมกับการประเมินค่าตอบด้วยวิธีริตส์ และ การวิเคราะห์ผลด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์อีกด้วย

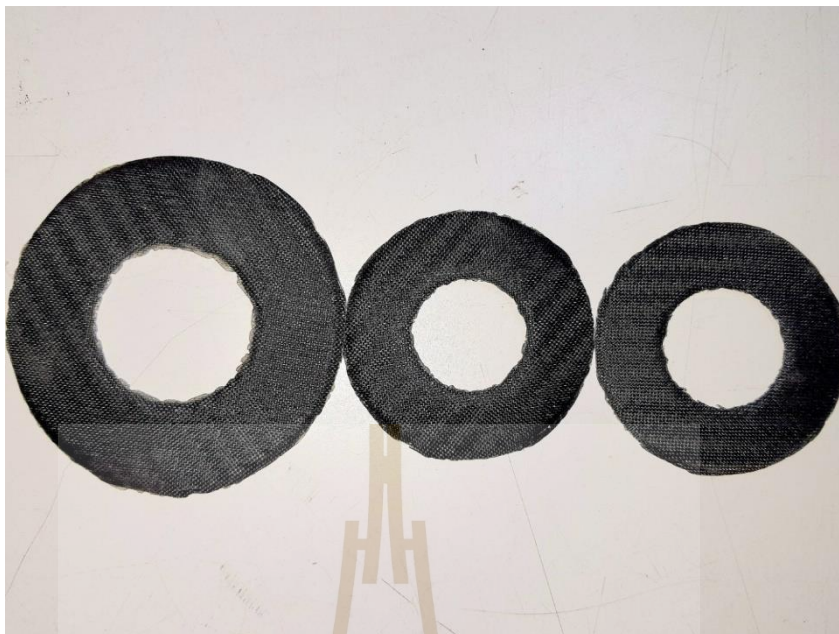
งานสปริงที่ใช้วิเคราะห์ด้วยวิธีการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นงานสปริงวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเป็นคาร์บอนไฟเบอร์สานแบบ 2x2 twill โดยทำการเรียงจำนวน 6 ชั้น โดยเรียงแบบ $[0^\circ/\pm 60^\circ]$ รูปทรงละ 3 ชั้น ทั้งหมด 3 รูปทรงที่มีอัตราส่วน h/t อยู่ในช่วงค่าที่งานสปริงบวกลบเนื่องจากเครื่องทดสอบสามารถกดชิ้นงานจนแบนได้เพียงเท่านั้น รูปทรงของงานสปริงที่ถูกเลือกมาวิเคราะห์อ้างอิงขนาดจากชิ้นงานที่มีการผลิตใช้งานจริง ตารางที่ 1 แสดงถึงรูปทรงของชิ้นงานทั้ง 3 รูปทรง โดยชิ้นงานทั้งหมดถูกควบคุมอุณหภูมิและความดันขณะทำการอบในตู้อบ (Oven) ซึ่งมีรูปแบบอุณหภูมิ (Temperature profile) ดังนี้ 1. ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ (Raising temperature) จากอุณหภูมิภายในตู้อบขณะยังไม่ได้ใช้งานไปยังอุณหภูมิ 135°C ที่มีอัตราการเพิ่มความร้อน (Temperature rate) ที่ประมาณ 1 ถึง $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 2. ช่วงอุณหภูมิคงที่ (Holding) จะทำการคงอุณหภูมิภายในเตาไว้ที่ 135°C เป็นเวลา 90 นาที สุดท้ายคือช่วงปล่อยให้เย็นตัว (Cooldown) จะทำการปล่อยให้อุณหภูมิของชิ้นงานค่อยๆ ลดลงภายในตู้อบ ทั้ง 3 ช่วงอยู่ภายใต้การควบคุมความดัน 1 บาร์ โดยรูปแบบอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 11. โดยในขั้นตอนนี้จัดทำขึ้นเพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของการคำนวณและการใช้ซอฟต์แวร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 1. รูปทรงงานสปริง

ตัวแปร	ชนิดของงานสปริง		
	1	2	3
D_o (mm.)	60	80	60
D_i (mm.)	31.8	41.6	31.8
t (mm.)	1.2	1.2	1.2
h (mm.)	1.13	1.53	2
h/t	0.939	1.28	1.702
D_i/D_o	0.53	0.52	0.53
h/D_o	0.00188	0.019	0.034



รูปที่ 11 รูปแบบอุณหภูมิในการอบงานสปริงคอมโพสิตภายใต้ความดัน 1 บาร์



รูปที่ 12 จานสปริงที่ผลิตจากคาร์บอนไฟเบอร์ที่เรียงมุมแบบ $[0^\circ / \pm 60^\circ]$, ทั้ง 3 รูปแบบ

3.1.1.1 การทดสอบจานสปริง

วางชิ้นงานทดสอบจานสปริงไว้บนแท่นของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) โดยออกแรงกระทำกับชิ้นงานด้วยการกดที่ขอบบนของชิ้นงาน โดยอัตราความเร็วคงตัวที่ 0.5 mm/s จนกระทั่งชิ้นงานแบนราบไปกับแท่นของเครื่องทดสอบ ทำการทดสอบกับชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 รูปแบบ รูปแบบละ 3 ชิ้น

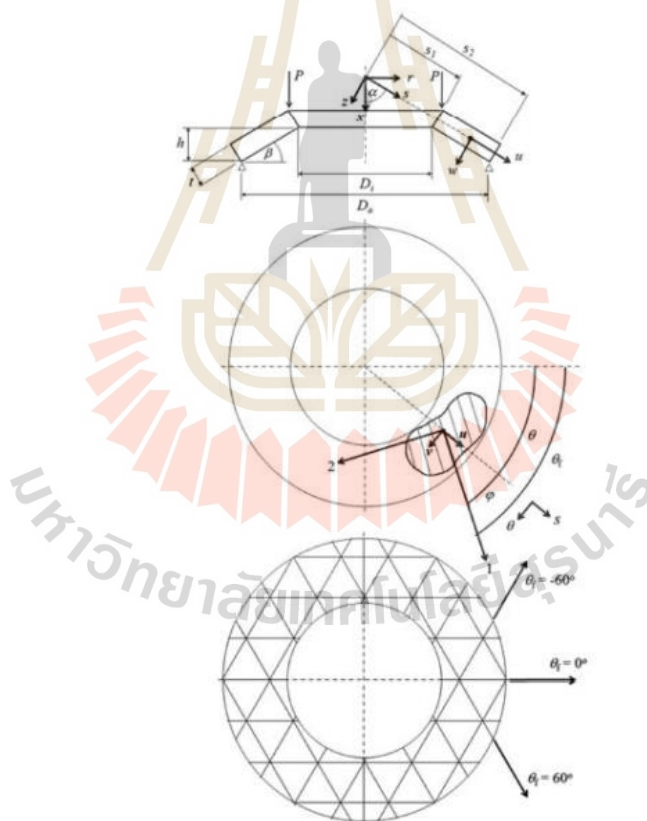


รูปที่ 13 การทดสอบจานสปริงด้วยเครื่อง UTM

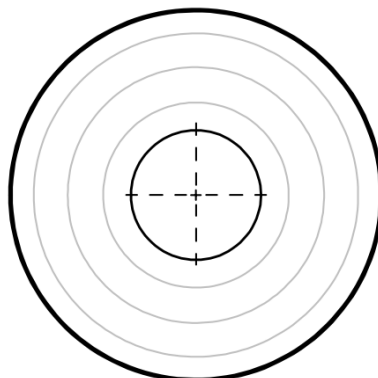
3.1.1.2 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีรีดส์

ใช้ระเบียบวิธีรีดส์และวิธีพลังงานต่ำสุดในการทำนายพฤติกรรมของงานสปริงที่ทำจากวัสดุคอมโพสิต คาร์บอนไฟเบอร์ โดยใช้วิธีพลังงานต่ำสุดร่วมกับระเบียบวิธีรีดส์ที่พิจารณาตัวแปร 9 ตัวแปร แบ่งเป็น a_i 6 ตัวแปร และ c_k 3 ตัวแปร ซึ่งการเพิ่มจำนวนตัวแปรให้มากขึ้นไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของงานสปริงแล้ว โดยขอบเขตของการวิเคราะห์และสมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นไปตามหัวข้อที่ 2.2.7 ซึ่งแปลความหมายได้ดังนี้ 1. แรกกระทำที่ขอบบนของงานสปริง 2. กำหนดให้ขอบล่างของงานสปริงไม่สามารถเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x ดังรูปที่ 14

ในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นไปตามตารางที่ 2 โดยวิเคราะห์งานสปริงสองรูปแบบ คือ 1. งานสปริงที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสาน ดังรูปที่ 14 และ 2. งานสปริงที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบทิศทางตามวงรอบของงานสปริง ดังรูปที่ 15



รูปที่ 14 ขอบเขตในการวิเคราะห์ และทิศทางของเส้นใยแบบสาน $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$



รูปที่ 15 จานสปริงที่เรียงเส้นใยแบบทิศทางตามวงรอบของจานสปริง

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงคาร์บอนไฟเบอร์

E_1 (GPa)	77
E_2 (GPa)	77
ν_{12}	0.064
G_{12} (GPa)	4.2
G_{23} (GPa)	4.2
G_{13} (GPa)	4.2

3.1.1.3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

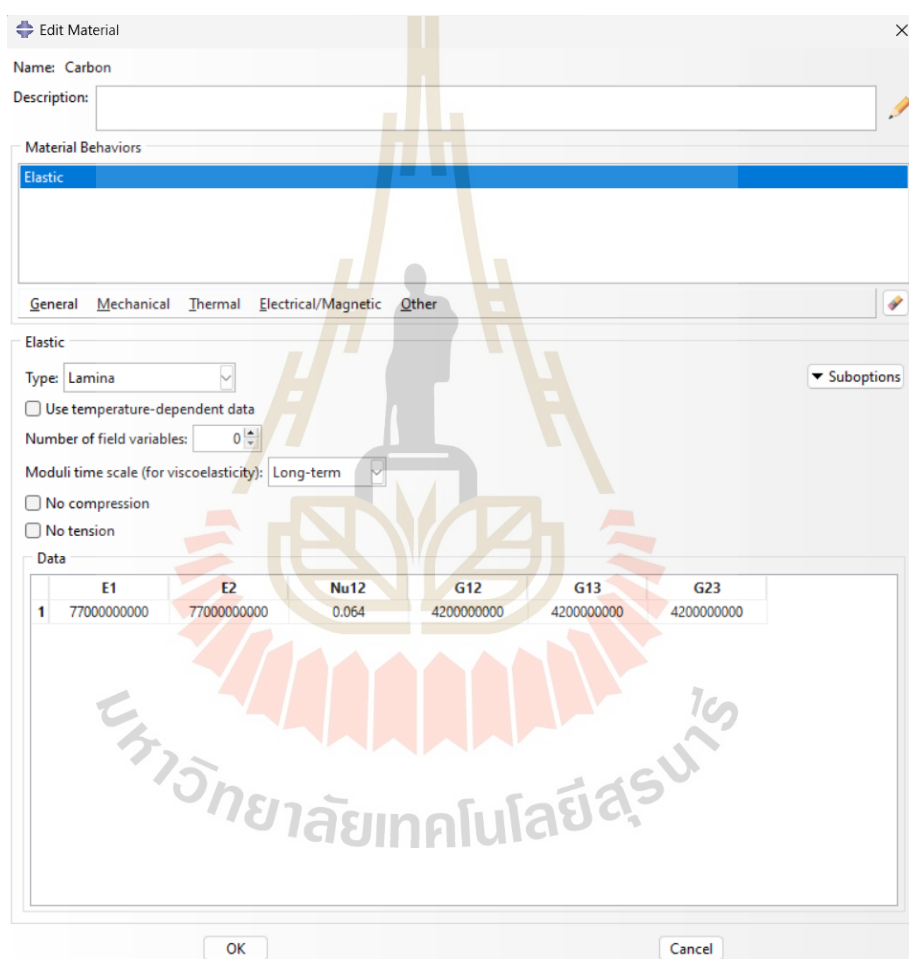
งานวิจัยนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์จานสปริงสองรูปแบบ คือ 1. จานสปริงที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบสาน เป็นไปตามการวิเคราะห์ด้วยการทดลอง 2. จานสปริงที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบทิศทางตามวงรอบในการวิเคราะห์ ขอบเขตของการวิเคราะห์จานสปริงเป็นไปตามหัวข้อที่ 3.1.1.2

เนื่องจากจานสปริงมีรูปทรงสมมาตร (Symmetry) จึงสามารถใช้วิธีวิเคราะห์แบบสมมาตรได้ ใช้เอลิเมนต์แบบ Quadratic quadrilateral ที่มีขนาด 1 mm จำนวนโนด (node) 2107 โนด และ เอลิเมนต์ 648 เอลิเมนต์ ซึ่งได้พิสูจน์แล้วว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโนดและเอลิเมนต์มากขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ (Mesh independent) การกำหนดขอบเขตแสดงดังรูปที่ 14 โดยขอบล่างของจานสปริงถูกกำหนดไม่ให้อาจเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน z ขอบบนของจาน

สปริงถูกกำหนดให้เคลื่อนตัวตามจุดอ้างอิง $RP-1$ ซึ่งจุดอ้างอิงเป็นจุดที่ไว้กำหนดภาระที่มากระทำต่องานสปริง (Load) โดยภาระที่มากระทำต่องานสปริงใช้การเคลื่อนตัวของงานสปริงจนงานสปริงแบนขนานกับระนาบ xy แทนการกำหนดแรงกิริยา และที่ขอบตำแหน่งที่เป็นสมมาตรกำหนดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ทิศทางแกน y ไม่สามารถหมุนรอบแกน x และ z ได้

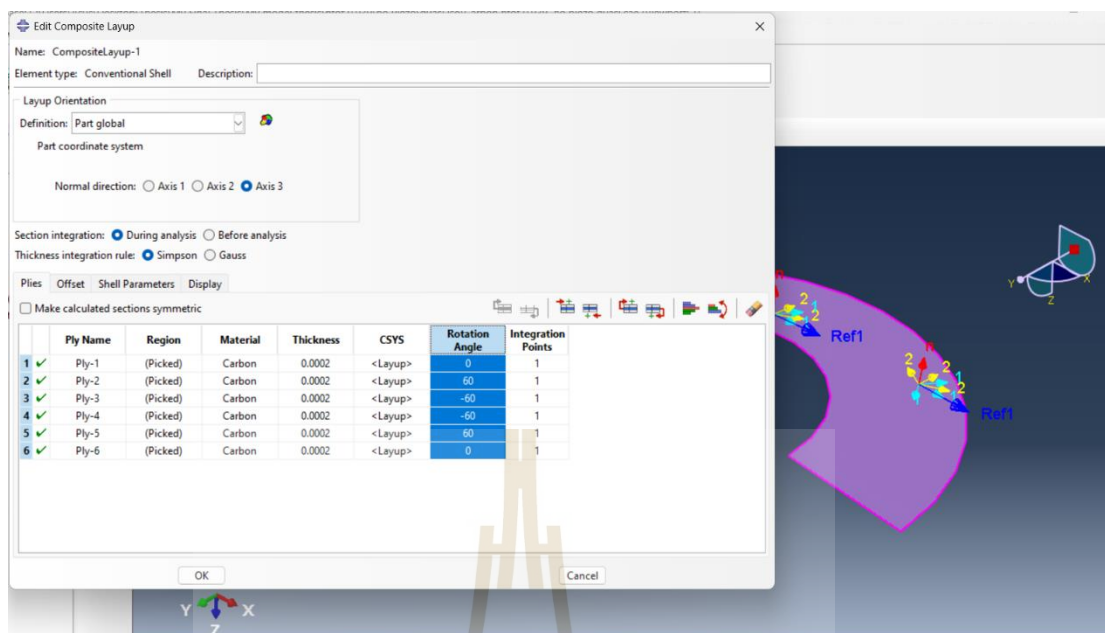
ขั้นตอนการใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS ในการวิเคราะห์พฤติกรรมงานสปริง

1. การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ โดยเลือกเป็นวัสดุแบบยืดหยุ่น (Elastic) ชนิดลามินา (Lamina) ดังรูปที่ 16

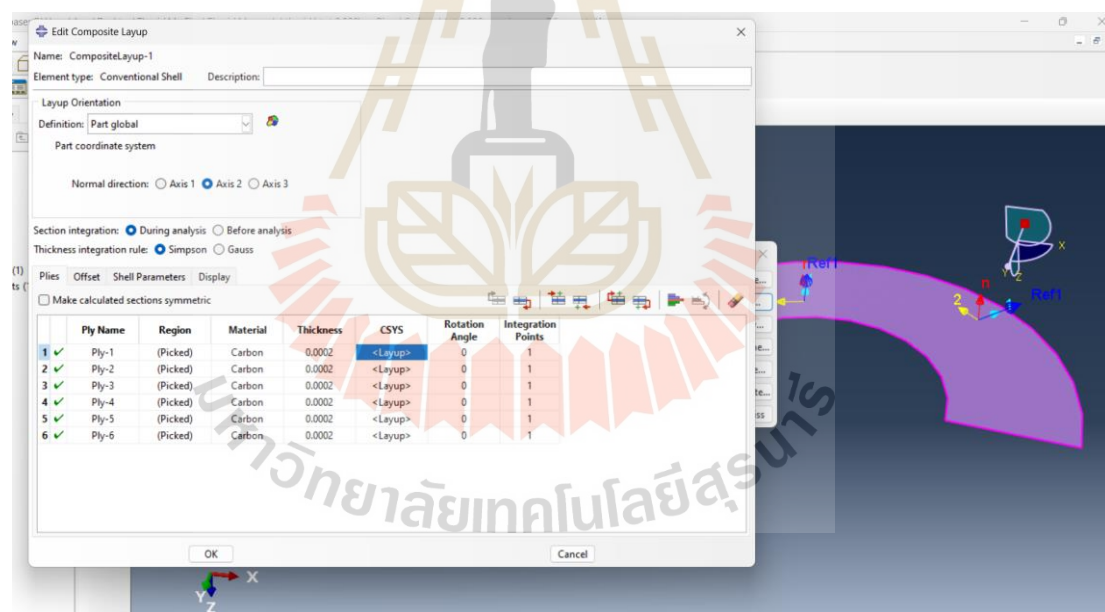


รูปที่ 16 ขั้นตอนการกำหนดค่าสมบัติวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์

2. ขั้นตอนในการกำหนดทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยถ้าเรียงเส้นใยแบบสานทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ เป็นดังรูปที่ 17 และการกำหนดการเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ตามวงรอบของงานสปริงเป็นดังรูปที่ 18

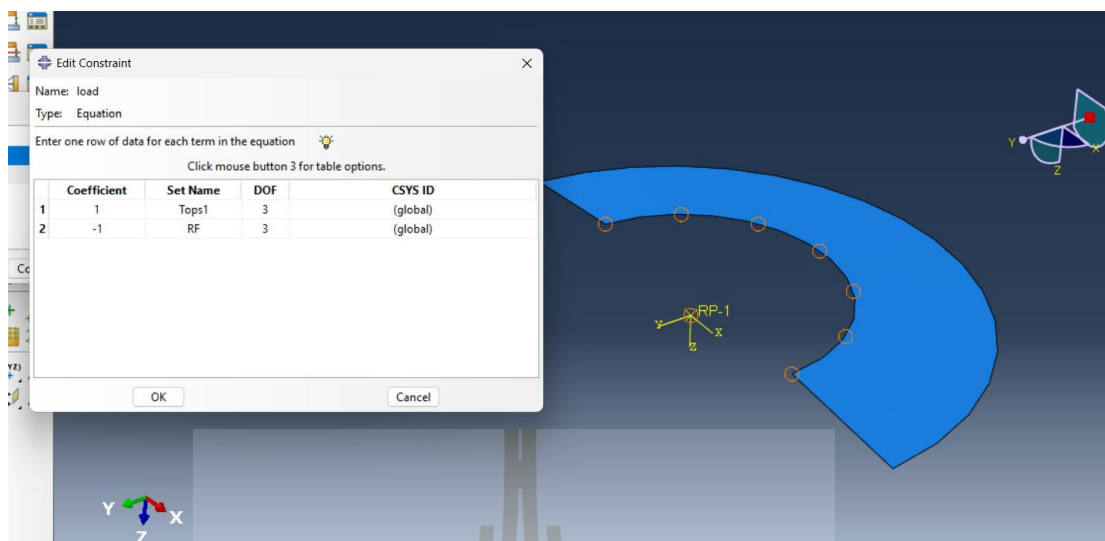


รูปที่ 17 รายละเอียดการกำหนดทิศทางของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์แบบสานทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$

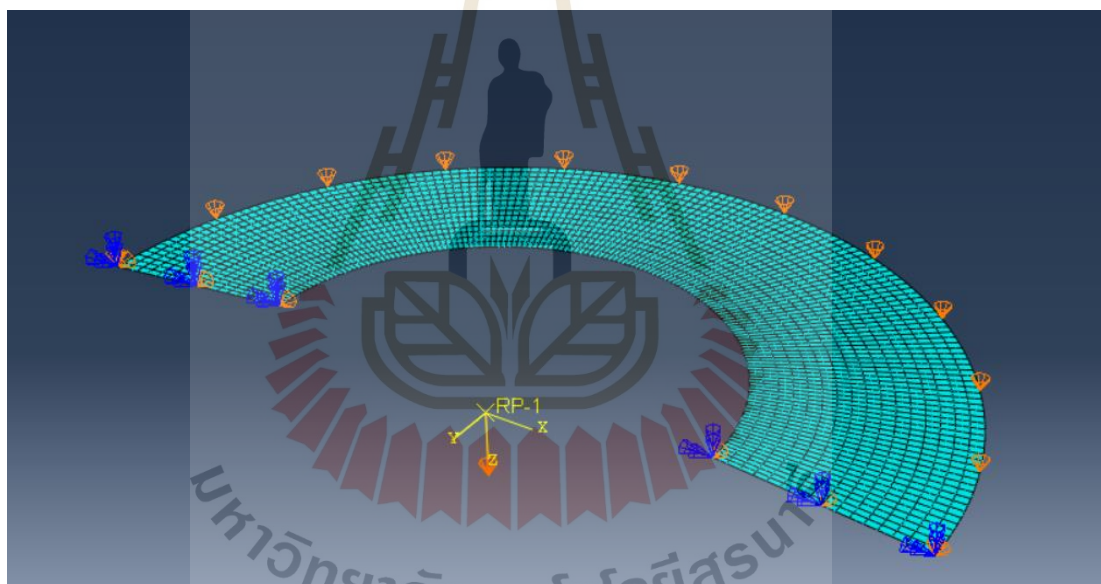


รูปที่ 18 รายละเอียดการกำหนดทิศทางของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ตามวงรอบของจานสปริง

3. ขั้นตอนในการกำหนดขอบเขตให้แบบจำลอง กำหนดให้ขอบบนของจานสปริงเคลื่อนตัวตามจุดอ้างอิง $RP-1$ โดยให้เคลื่อนตัวตามในทิศทางแกน z ดังรูปที่ 19 ขอบล่างของจานสปริงถูกกำหนดไม่ให้อาจเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน z และกำหนดภาระกรรม (Load) ที่จุด $RP-1$ ชนิดการเคลื่อนตัว (Displacement) ในทิศ $-z$ จนขึ้นงานขนานกับระนาบ xy ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ขอบบนของจานสปริงที่ถูกจำกัดให้เคลื่อนที่ในทิศแกน z ตามจุดอ้างอิง



รูปที่ 20 ขอบเขตที่กำหนดให้แก่แบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์จานสปริงที่มีรูปทรงต่างกัน ทั้งหมด 3 รูปทรง รูปทรงละ 3 ชั้น ซึ่งมีการเรียงตัวของเส้นใย 2 รูปแบบ 1. เส้นใยสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$ และ 2. เส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของจานสปริง โดยในรูปแบบเส้นใยสานเรียงตัวแบบ $[0^\circ / \pm 60^\circ]$ ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากการทดลอง การคำนวณด้วยวิธีพลังงานต่ำสุดรวมกับการประมาณคำตอบด้วยระเบียบวิธีริตส์ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนรูปแบบเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของจานสปริง ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการคำนวณด้วยวิธีพลังงานต่ำสุดรวมกับการประมาณคำตอบด้วยระเบียบวิธีริตส์ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยงานวิจัยนี้ได้จัดรูปของแรงและระยะยุบให้เป็นตัวแปรไร้มิติซึ่งจะช่วยลดตัวแปรที่วิเคราะห์เนื่องจากผลการวิเคราะห์ทั้งระยะยุบและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับค่าสมบัติของวัสดุรวมถึงตัวแปร

ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานสปริง โดยเรียกระยะยุบไว้เรียกว่า Normalized deflection δ_{nor} หาได้จากสมการที่ (26)

$$\delta_{nor} = \frac{\delta}{h} \quad \dots (26)$$

เรียกแรงที่ไว้เรียกว่า Normalized load P_{nor} หาได้จากสมการที่ (27)

$$P_{nor} = \frac{PD_o^2}{Et^4} \quad \dots (27)$$

3.1.2 การวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

หลังจากทำการพิสูจน์การใช้ซอฟต์แวร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายพฤติกรรมโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยอาศัยค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Volt) เป็นตัวไว้เปรียบเทียบ เนื่องจากเมื่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกได้รับภาระความเค้นหรือความเครียดจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt) และประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (Charge) โดยมีขั้นตอนการกำหนดขอบเขตเพิ่มเติมจากการศึกษาพฤติกรรมของงานสปริงดังต่อไปนี้

1. เพิ่มแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเข้าไปในการทดลอง โดยมีขนาดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกดังตารางที่ 3. โดย ตัวเลขที่ 1 : ตัวเลขที่ 2 คือ ขนาดของเพียโซอิเล็กทริกในแกน $s : \theta$ และมีความหนาเท่ากันทุกกรณีศึกษาเท่ากับ 0.25 mm. ทิศทาง θ วัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขอบงานสปริง ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 ตำแหน่งในการวัดขนาดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 3 ขนาดของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

ชนิด ของ จาน สปริงที่	ขนาด $s:\theta$ (mm) ที่ความหนา 0.25 mm.				
	A	B	C	D	E
1	2.83 : 2.83	1.415 : 5.66	5.66 : 1.415	2.123 : 3.773	3.773 : 2.123
2	4 : 4	2 : 8	8 : 2	3 : 5.333	5.333 : 3
3	2.863 : 2.863	1.432 : 5.726	5.726 : 1.432	2.147 : 3.817	3.817 : 2.147

2. กำหนดค่าสมบัติวัสดุของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกดังต่อไปนี้ (Aimmanee & Phongsitthisak, 2022) (Malgaca & Karagülle, 2009)

ค่า Elasticity แบบ Orthotropic

$$\begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ \text{Sym.} & & & & D_{1313} & 0 \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 126.0 & 80.0 & 84.0 & 0 & 0 & 0 \\ & 126.0 & 84.0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 117.0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 23.0 & 0 & 0 \\ \text{Sym.} & & & & 23.0 & 0 \\ & & & & & 24.0 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$

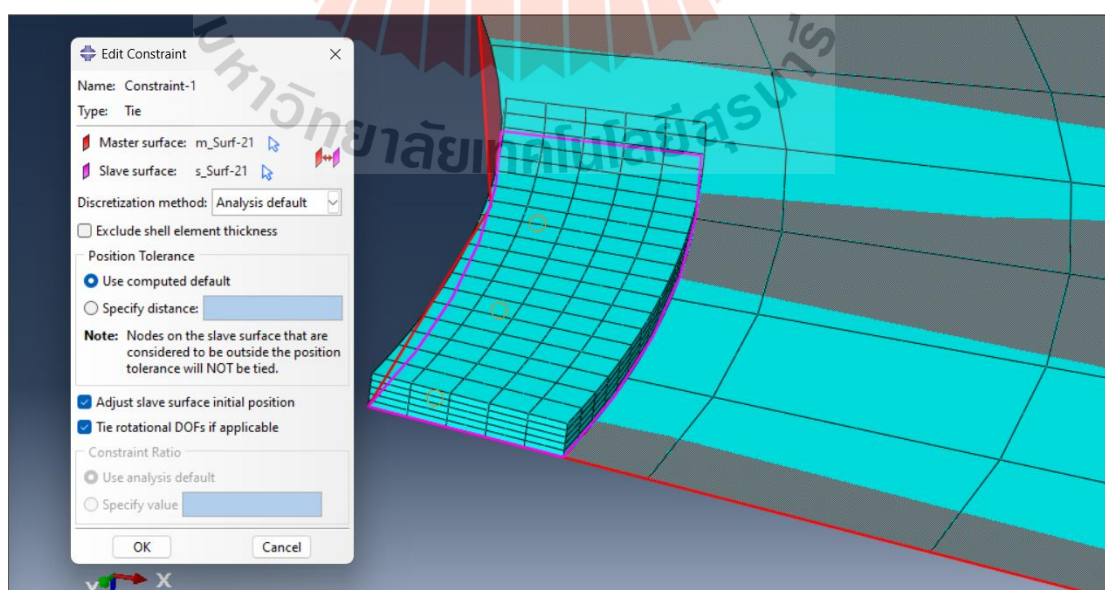
ค่า Dielectric (Electric Permittivity) แบบ Orthotropic

$$\begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15.1 & 0 & 0 \\ 0 & 15.1 & 0 \\ 0 & 0 & 12.7 \end{bmatrix} \text{ nF / m}$$

ค่า Piezoelectric constants จากรูปแบบความสัมพันธ์ความเครียด (Strain)

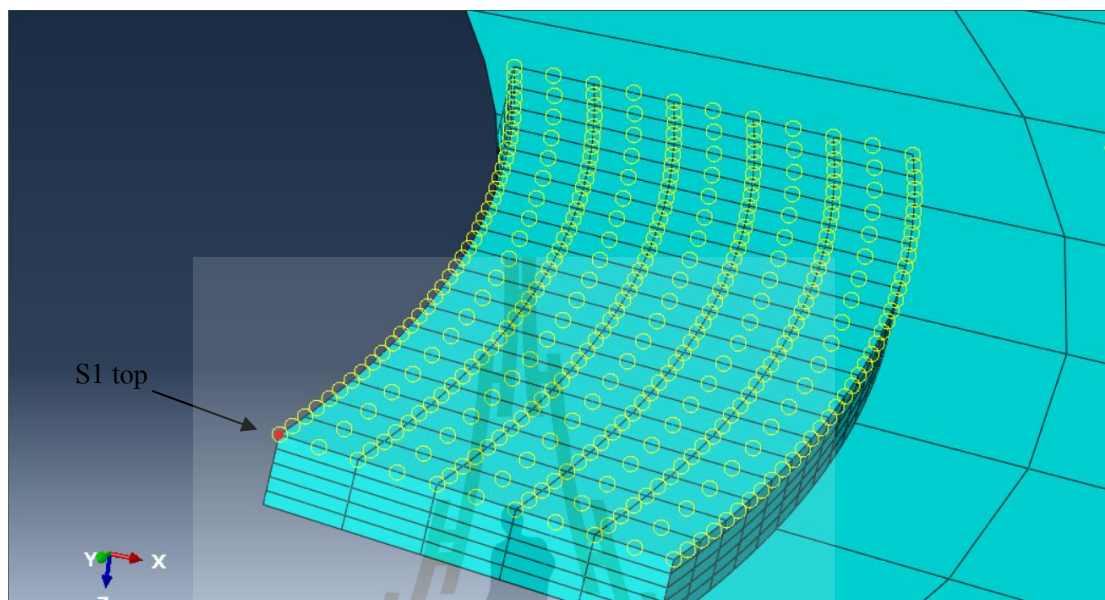
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{113} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{212} & 0 & 0 \\ d_{311} & d_{322} & d_{333} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 715 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 715 & 0 & 0 \\ -273 & -274 & 593 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ pm / V}$$

3. กำหนดชนิดของการสัมผัส (Contact) ให้แก่จานสปริงและแผ่นเพียโซอิเล็กทริกโดยกำหนดเป็นชนิด Tie กำหนดที่ผิวบนของจานสปริงเป็น Master surface และ ผิวล่างของเพียโซอิเล็กทริกเป็น Slave surface ดังรูปที่ 22

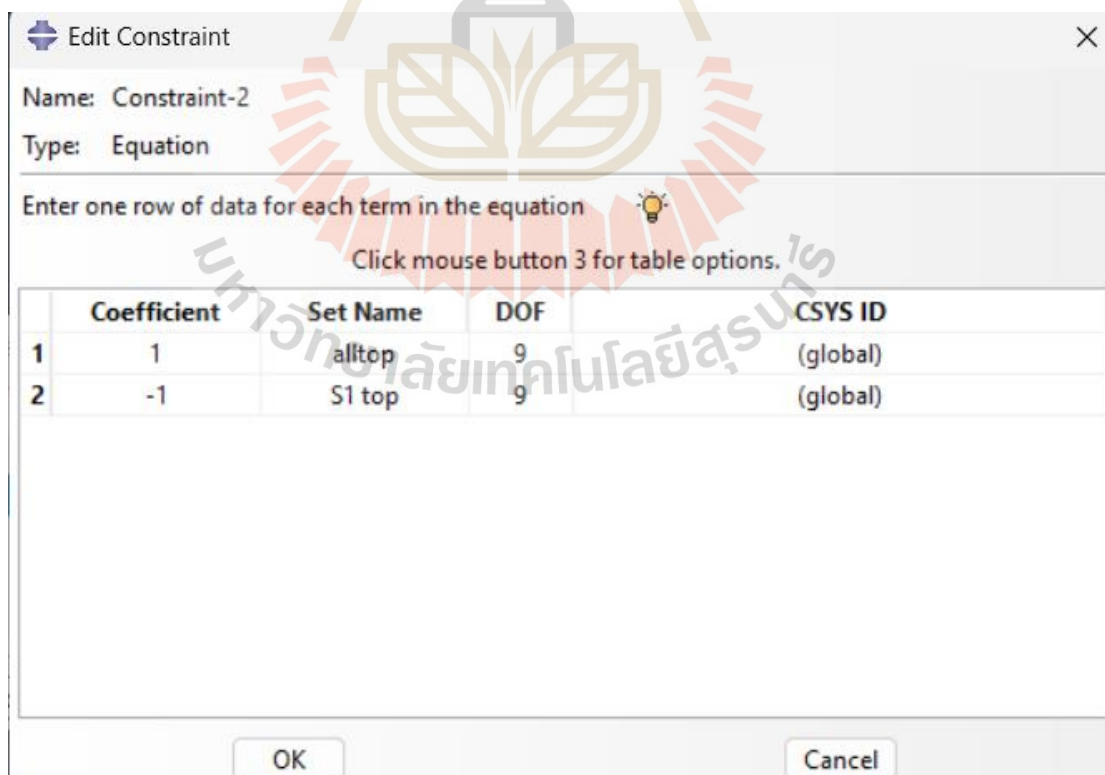


รูปที่ 22 การสัมผัสแบบ Tie บนผิวจานสปริงและเพียโซอิเล็กทริก

4. กำหนดให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวบนของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกทุกโนดมีค่าเท่ากับกับโนด *S1 top* ดังรูปที่ 23 โดยชิ้นงานที่อยู่ด้านบนคือแผ่นเพียโซอิเล็กทริก และ ชิ้นงานที่อยู่ข้างล่างคือจานสปริง ซึ่งสามารถกำหนดสมการขอบเขตได้ดังรูปที่ 24

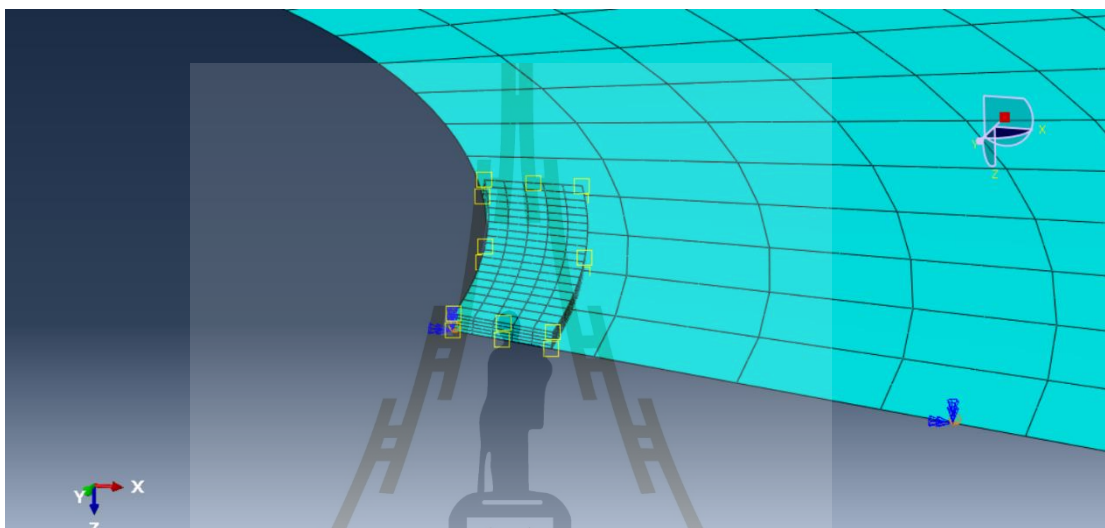


รูปที่ 23 การกำหนดให้ทุกโนดบนผิวบนจานสปริงมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับโนด *S1 top*



รูปที่ 24 วิธีกำหนดสมการควบคุมให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับกับโนด *S1 top*

5. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นทางไฟฟ้า โดยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกสามารถวิเคราะห์ได้สองแบบ ดังนี้ 1. วิเคราะห์ขณะที่วงจรเปิด (Open-circuit) จะไม่เกิดประจุไฟฟ้า ($q = 0$) สามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขตได้โดยกำหนดให้ความต่างศักย์เริ่มต้น (Initial electrical potential) ที่ผิวบนหรือผิวล่างของงานสปริงด้านใดด้านหนึ่งให้มีค่าเท่ากับ 0 และ 2. วิเคราะห์ขณะวงจรปิด (Closed or short-circuit) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0 ($V = 0$) สามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขตได้โดยกำหนดให้ความต่างศักย์เริ่มต้น (Initial electrical potential) ที่ผิวบนและผิวล่างของงานสปริงให้มีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 25 กรณีศึกษาขณะเกิดวงจรปิด (closed-circuit)

6. สร้างกริดให้เพียโซอิเล็กทริก โดยใช้ชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบทรงหกหน้า สำหรับ Piezoelectric (Hexahedral element) C3D20RE โดยกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ (Global size) เท่ากับ 0.00025 และกำหนดให้มีชั้นของเอลิเมนต์เท่ากับ 5 ชั้น

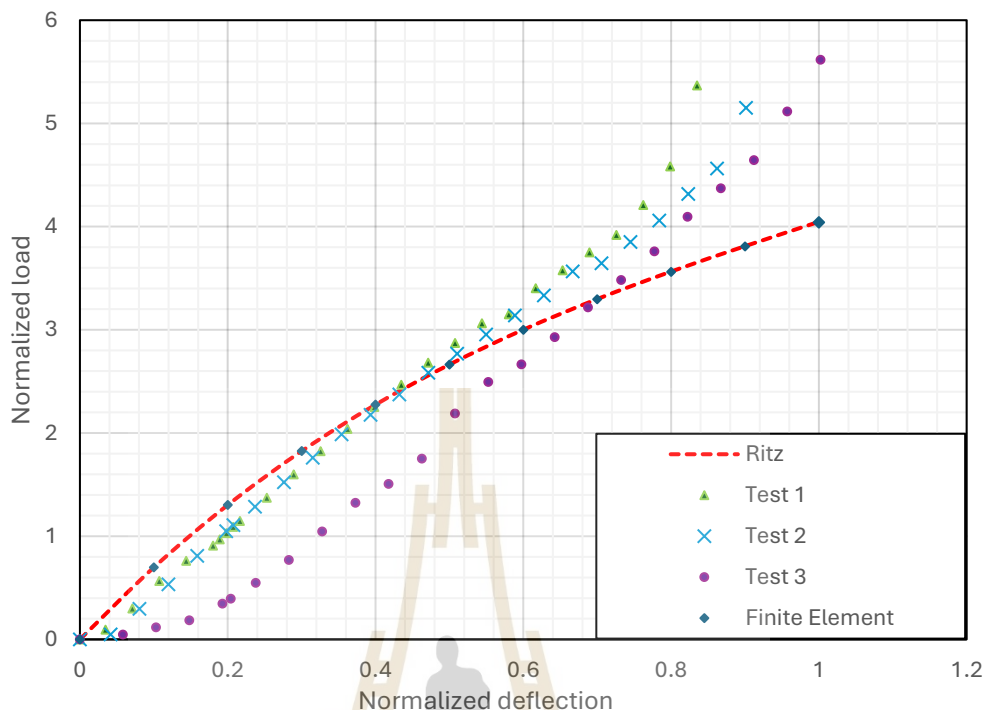
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทำนายพฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยแบบสานทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$

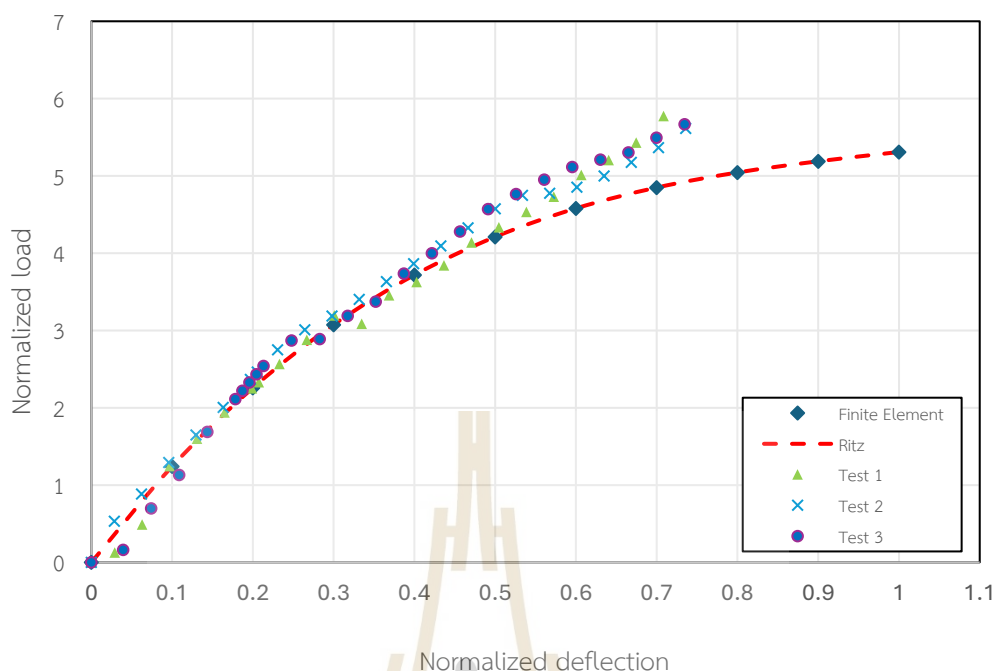
ในขั้นตอนนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดลอง การคำนวณด้วยวิธีพลังงานต่ำสุด ร่วมกับการประมาณค่าตอบด้วยระเบียบวิธีริตส์ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งวิเคราะห์งานสปริงที่มีรูปทรงต่างกัน 3 รูปทรง ดังตารางที่ 1. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวของงานสปริงและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ได้ผลดังรูปที่ 26 ถึง 28

รูปที่ 26 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวของงานสปริงกับแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของงานสปริงชนิดที่ 1 โดยในช่วงระยะไรมิติที่ 0 ถึง 0.4 ชิ้นงานทั้งสามมีความชันเท่ากับ 5.6511, 5.5323 และ 3.607 เฉลี่ยเป็น 4.9301 ความชันจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 5.6872 ความชันจากการคำนวณด้วยสมการพลังงานเท่ากับ 5.6854 ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความชันจากวิธีต่างๆ เทียบกับความชันเฉลี่ยจากการทดสอบจะได้ว่า เมื่อเทียบกับความชันจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 15.32 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเทียบกับความชันจากสมการพลังงานจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 15.36 เปอร์เซ็นต์ จากผลทดลองจะพบว่าชิ้นงานที่ 3 (Test 3) มีผลการทดลองที่แตกต่างไปจากผลการทดลองที่ 1 และ 2 โดยความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับความชันจากชิ้นงานที่ 1 และ 2 นั้นได้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.591 และ 2.8 เปอร์เซ็นต์ ทำนองเดียวกันกับความคลาดเคลื่อนที่เทียบกับความชันจากสมการพลังงาน มีค่าเท่ากับ 0.61 และ 2.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนที่สูงนั้นอาจเกิดจากการขึ้นรูปของชิ้นงานที่ 3 มีความผิดพลาดหรือมีความไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลการทดสอบของชิ้นงานที่ 3 มีความแตกต่างไปจากการทดสอบของชิ้นงานที่ 1 และ 2



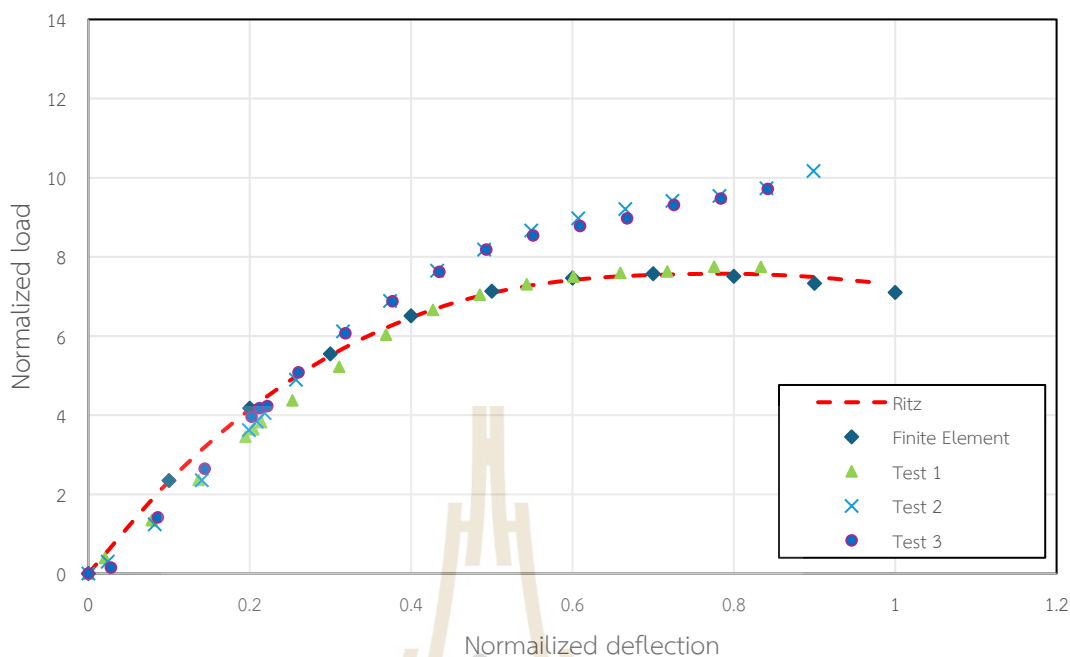
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ ชนิดที่ 1

รูปที่ 27 แสดงถึงผลของความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวของงานสปริงและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของงานสปริงชนิดที่ 2. ความชันในช่วงที่ระยะยุบไรมิติที่ประมาณ 0 ถึง 0.2 เป็นช่วงที่งานสปริงมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง ผลการทดสอบของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น มีค่าความชันในช่วงนี้เท่ากับ 11.244, 11.989 และ 11.905 เฉลี่ยเป็น 11.7123 ความชันจากการคำนวณสมการพลังงานเท่ากับ 11.54 และความชันจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 11.534 ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% error) กับความชันของผลการทดสอบจะได้ดังต่อไปนี้ ผลการคำนวณมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.48% และ ผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.53%



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของจานสปริงเส้นใยแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ ชนิดที่ 2

รูปที่ 28 แสดงถึงผลของความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวของจานสปริงและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของจานสปริงชนิดที่ 3. ความชันในช่วงที่ระยะยุบไรมิติที่ประมาณ 0 ถึง 0.4 เป็นช่วงที่จานสปริงมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง ผลการทดสอบของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น มีค่าความชันในช่วงนี้เท่ากับ 73.738, 82.88 และ 86.289 เฉลี่ยเป็น 80.969 ความชันจากสมการพลังงานเท่ากับ 93.4627 และความชันจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 94.3917 ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% error) กับความชันของผลการทดสอบจะได้ดังต่อไปนี้ ผลการคำนวณจากสมการพลังงานมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 15.4302% และ ผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 16.577%



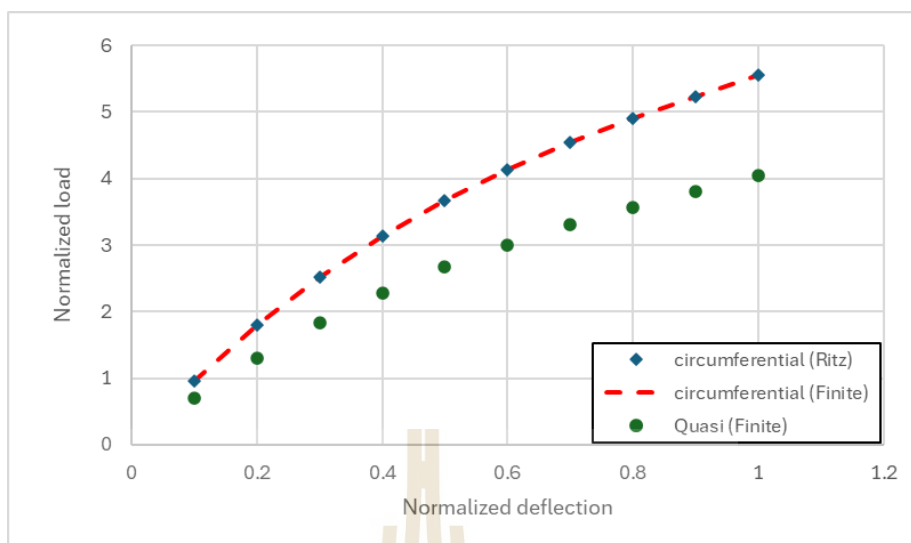
รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ ชนิดที่ 3

ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริง

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	ชนิดงานสปริง		
	1	2	3
ความชันของสมการพลังงานเทียบกับความชันเฉลี่ยของการทดลอง	15.36 %	1.48 %	15.43 %
ความชันของไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับความชันเฉลี่ยของการทดลอง	15.32 %	1.53 %	16.58 %

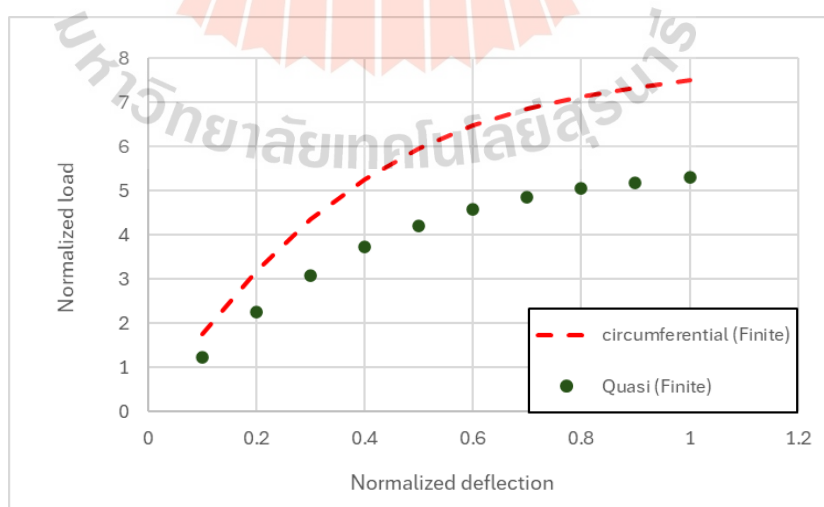
4.2 ผลการทำนายพฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามวงของงานสปริง

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทำนายพฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามวงรอบของงานสปริงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และทำการพิสูจน์ผลจากวิธีนี้ด้วยการเทียบกับผลของการคำนวณสมการพลังงานต่ำสุด โดยได้นำกรณีงานสปริงชนิดที่ 1 เป็นกรณีในการพิสูจน์ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มีผลดังรูปที่ 29

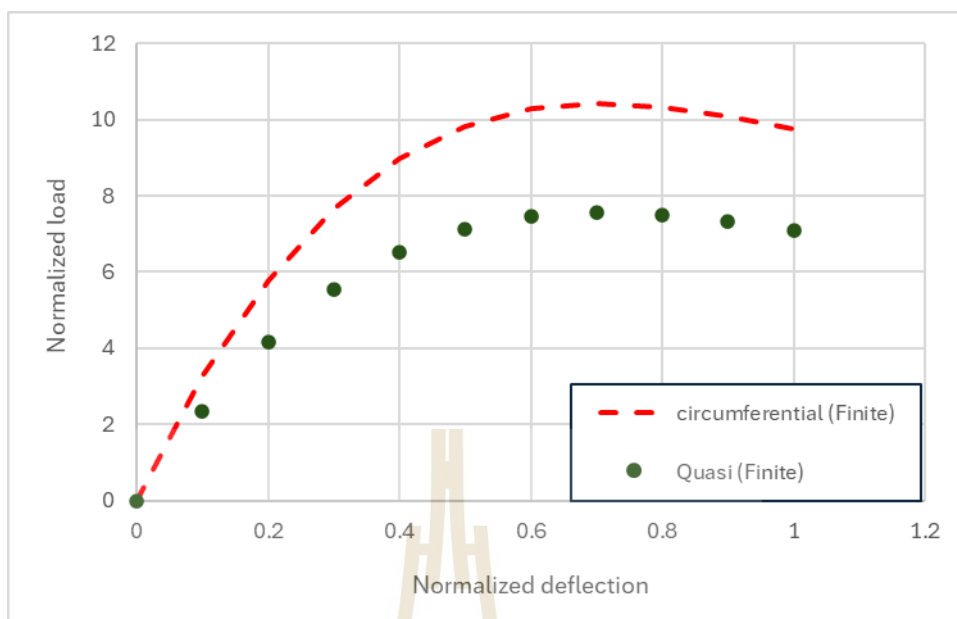


รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของจานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของจานสปริง ชนิดที่ 1

พบว่าผลการทำนายพฤติกรรมของจานสปริงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลการทำนายด้วยวิธีคำนวณสมการพลังงานต่ำสุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.8% เมื่อการทำนายพฤติกรรมของจานสปริงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลการทำนายด้วยวิธีคำนวณสมการพลังงานต่ำสุดแล้ว ทำให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของจานสปริงชนิดที่ 2 และ ที่ 3 ได้ โดยที่ไม่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการคำนวณสมการพลังงานร่วมด้วย และพบว่าจานสปริงทั้ง 3 ชนิด เมื่อมีเส้นใยที่เรียงเส้นใยแบบตามวงรอบของจานสปริงมีความแข็งแรงมากกว่าจานสปริงที่เรียงตัวแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$ 。



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของจานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของจานสปริง ชนิดที่ 2

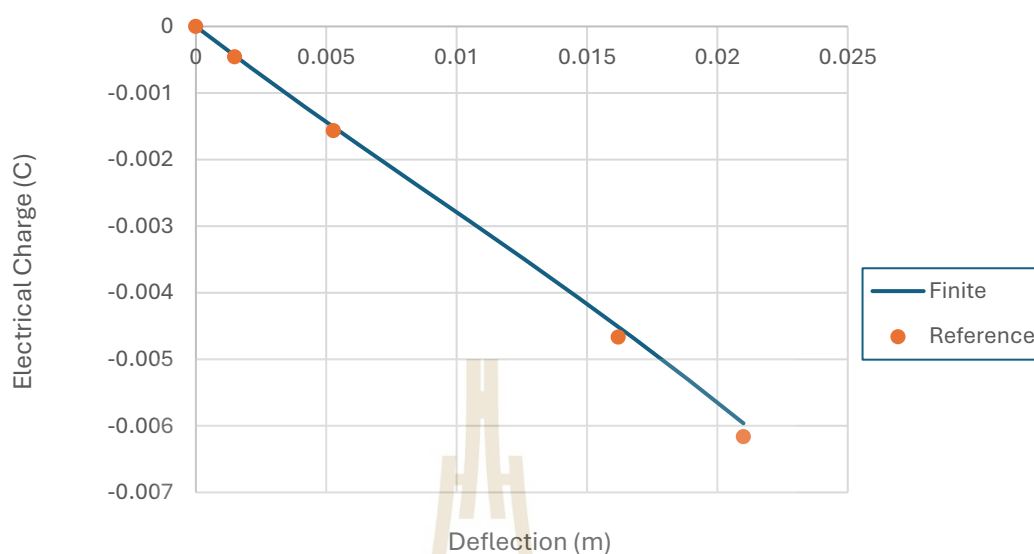


รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามรอบวงของงานสปริง ชนิดที่ 3

4.3 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

4.3.1 การเปรียบเทียบความถูกต้องกับงานวิจัยที่ใกล้เคียง

ในขั้นตอนนี้เริ่มด้วยการพิสูจน์ความถูกต้องของการกำหนดขอบเขต (Boundary conditions) ด้วยการเปรียบเทียบผล (Validation) จากงานวิจัยที่ใกล้เคียง โดยเปรียบเทียบงานวิจัยของ (Aimmanee & Phongsitthisak, 2022) การวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีแบบสมมาตร ผลที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 32 จะพบว่าผลที่ได้เป็นไปตามกับงานวิจัยที่ได้นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 3.1.2 มีความถูกต้องสามารถใช้วิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าและระยะยุบของจานสปริงที่ทำจากวัสดุเหล็กสำหรับเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

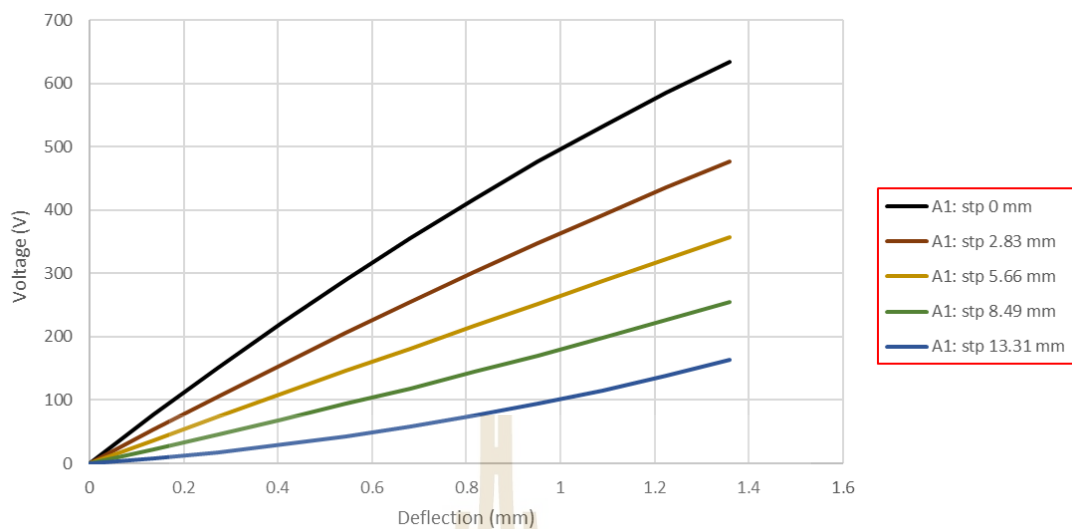
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งในการติดตั้งของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนจานสปริง

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการวิเคราะห์จานสปริงคอมโพสิตที่เส้นใยเรียงตัวแบบตามรอบวงของจานสปริงซึ่งที่ผิวบนติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกโดยมีกรณีศึกษาทั้งหมด 15 กรณี ดังตารางที่ 2 ในการศึกษาจะเริ่มศึกษาจากกรณีศึกษา A1 A2 และ A3 ในตำแหน่งต่างๆ ในทิศทาง s (s -direction) ดังรูปที่ 1 โดยการวัดระยะจะวัดจากขอบบนของจานสปริงถึงขอบบนของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ดังรูปที่ 33

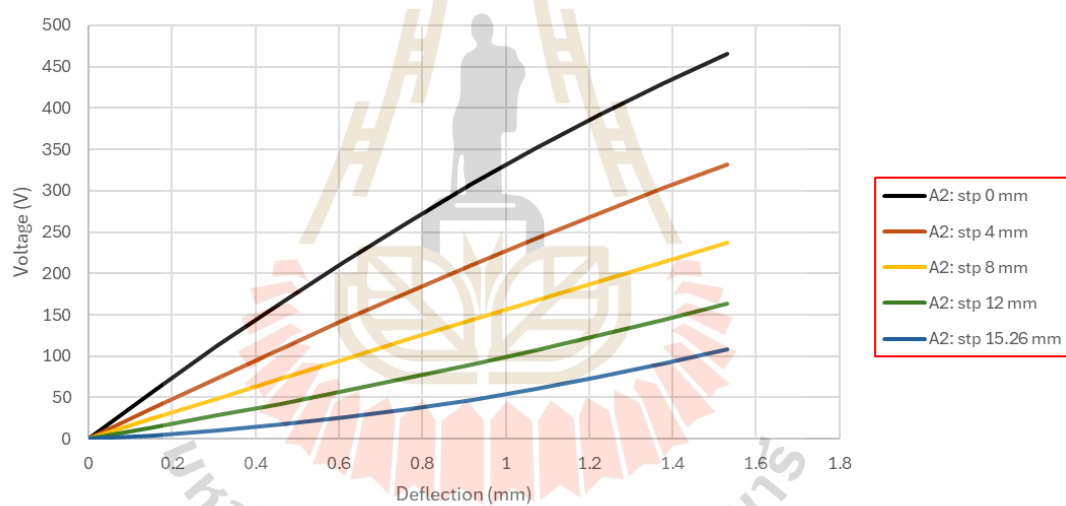


รูปที่ 33 ระยะติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

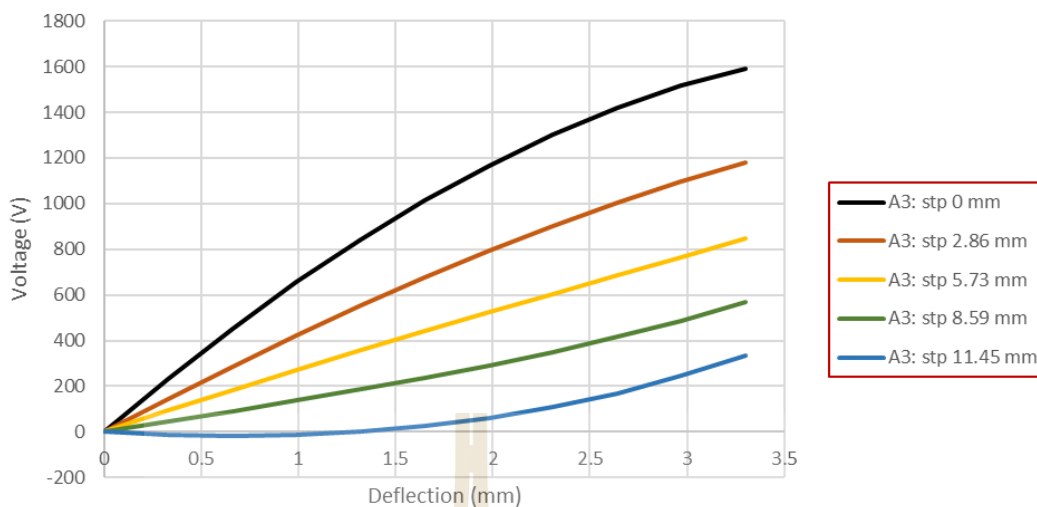
จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าเมื่อจานสปริงมีระยะยุบตัวมากขึ้น แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะมีความต่างศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น และเมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งจะพบว่าเมื่อระยะ S_{tp} มากขึ้นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 34 ถึง รูปที่ 36



รูปที่ 34 พฤติกรรมของงานสปริงชนิด A1

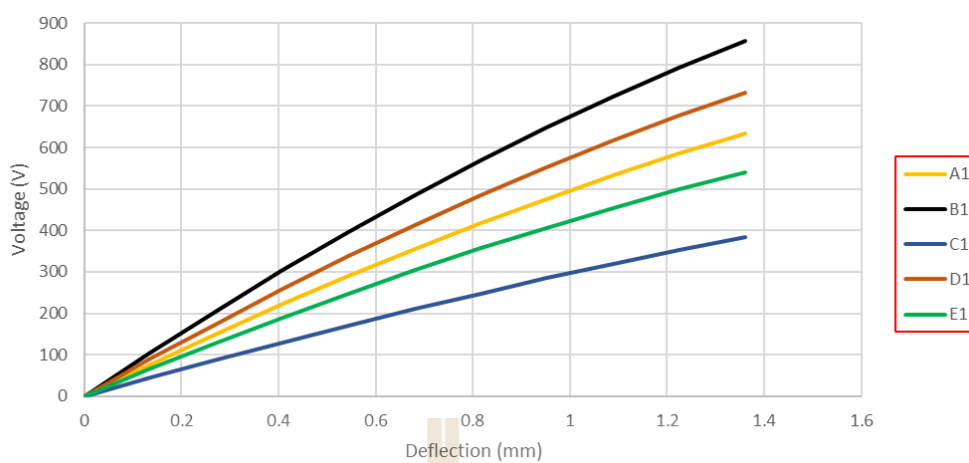


รูปที่ 35 พฤติกรรมของงานสปริงชนิด A2

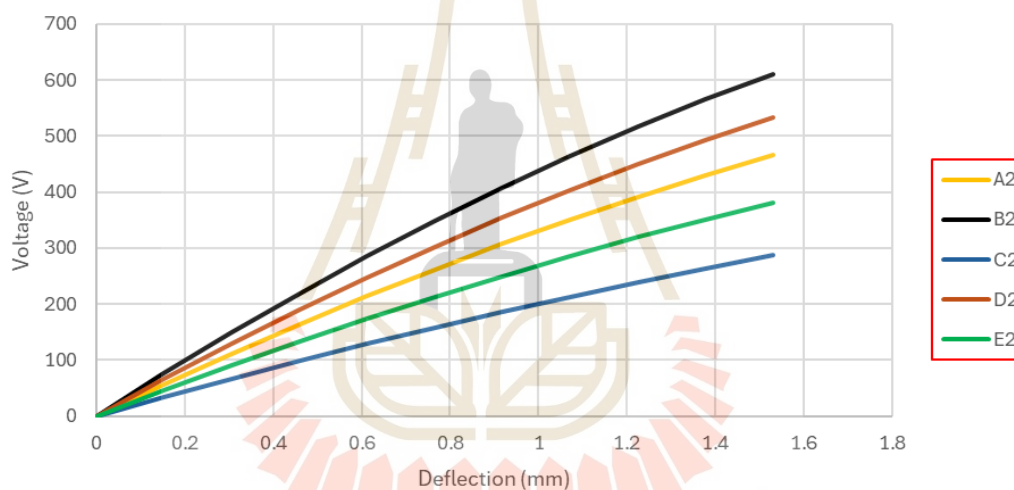


รูปที่ 36 พฤติกรรมของงานสปริงชนิด A3

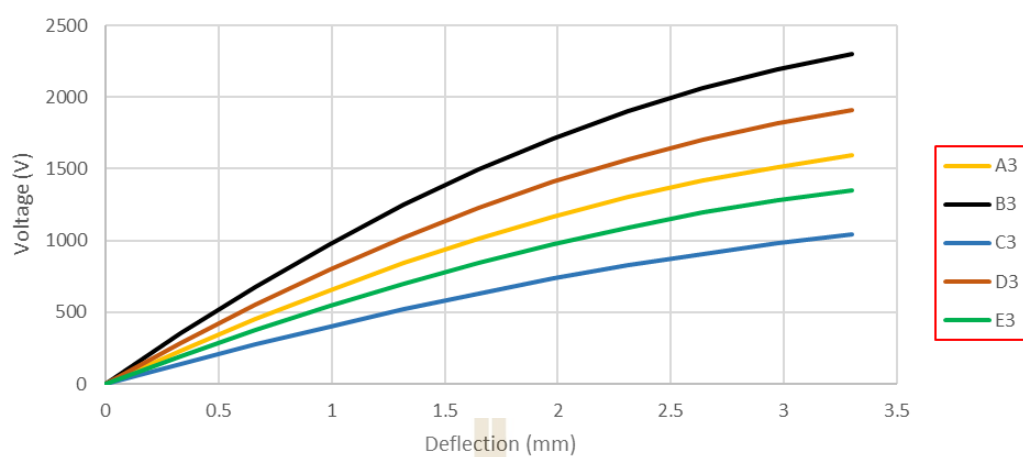
หลังจากพบว่าตำแหน่งที่ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง s_p เท่ากับ 0 mm ดังนั้นในการวิเคราะห์งานสปริงชนิดที่เหลือนี้จะทำการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง s_p เท่ากับ 0 mm กรณีศึกษา A1 B1 C1 D1 และ E1 ติดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีความหนาเท่ากับ 0.25 mm และมีพื้นที่สัมผัสกับงานสปริงเท่ากับ 8.0089 mm^2 พบว่ากรณีศึกษา B1 สามารถสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด และกรณี D1 A1 E1 และ C1 สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเรียงตามลำดับ กรณีศึกษา A2 B2 C2 D2 และ E2 ติดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีความหนาเท่ากับ 0.25 mm และมีพื้นที่สัมผัสกับงานสปริงเท่ากับ 16 mm^2 พบว่ากรณีศึกษา B2 สามารถสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด และกรณี D2 A2 E2 และ C2 สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเรียงตามลำดับ และกรณีศึกษา A3 B3 C3 D3 และ E3 ติดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีความหนาเท่ากับ 0.25 mm และมีพื้นที่สัมผัสกับงานสปริงเท่ากับ 8.197 mm^2 พบว่ากรณีศึกษา B3 สามารถสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด และกรณี D3 A3 E3 และ C3 สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเรียงตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 37 ถึง 39



รูปที่ 37 พฤติกรรมงานสปริงที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณีศึกษา A1 ถึง E1 ที่ตำแหน่ง s_p 0 mm



รูปที่ 38 พฤติกรรมงานสปริงที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณีศึกษา A2 ถึง E2 ที่ตำแหน่ง s_p 0 mm



รูปที่ 39 พฤติกรรมงานสปริงที่ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กรณีศึกษา A3 ถึง E3 ที่ตำแหน่ง s_{tp} 0 mm



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้โปรแกรม Abaqus มีความถูกต้องเนื่องจากเทียบกับผลจากการทดสอบและผลจากการสมการพลังงาน ได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ สามารถนำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้
2. จานสปริงคอมโพสิตที่เรียงเส้นใยแบบตามวงรอบ (Circumferential) ให้ความแข็งแรงที่มากกว่าจานสปริงคอมโพสิตที่เรียงเส้นใยเรียงตัวแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]_s$ (Quasi isotropic)
3. ตำแหน่งขอบบน ($s_p = 0$ mm) ของจานสปริงทั้ง 3 ชนิดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด ส่วนในทิศทางตามวงรอบ θ นั้นค่าความต่างศักย์มีค่าเท่ากันในทุกตำแหน่ง
4. ควรติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ตำแหน่งที่ขอบบนของจานสปริง หรือ ตำแหน่งที่ s_p มีค่าน้อยๆ
5. ที่ปริมาตรของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเท่ากัน ความยาวในด้าน θ ส่งผลต่อความความต่างศักย์ทางไฟฟ้ามากกว่าความยาวในด้าน s

5.1 สรุปหัวข้อหลักของงานวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาหาตำแหน่งในการติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนจานสปริงที่ทำจากวัสดุผสมชนิดคาร์บอนไฟเบอร์ที่เรียงเส้นใยแบบตามวงรอบ (Circumferential) จากการวิเคราะห์พบว่าตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าทางไฟฟ้ามากที่สุดซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเป็นตัวบ่งชี้ โดยตำแหน่งขอบบน ($s_p = 0$ mm) ของจานสปริงทั้ง 3 ชนิดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด ส่วนในทิศทางตามวงรอบ θ นั้นค่าความต่างศักย์มีค่าเท่ากันในทุกตำแหน่ง และงานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ว่ารูปร่างของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในอัตราส่วนต่างๆโดยที่คงปริมาตรให้มีค่าเท่ากัน พบว่ารูปร่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มีความยาวในทิศทาง θ มากกว่าในทิศทาง s ให้ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่สูง

งานวิจัยยังมีการวิเคราะห์ในหัวข้อย่อยต่างๆเพื่อประกอบให้งานวิจัยนี้ให้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือดังต่อไปนี้

5.1.1 การทดสอบจานสปริง

ในการวิจัยในครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายในการวิเคราะห์จานสปริงที่ทำจากวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ที่เรียงเส้นใยแบบตามวงรอบ (Circumferential) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และเพื่อความต้องการของการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดในการขึ้นรูปจานสปริงที่เรียง

เส้นใยตามวงรอบ จึงได้ทำการวิเคราะห์งานสปริงที่เรียงเส้นใยแบบเรียงตัวแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$ s (Quasi isotropic) และได้้นำการวิเคราะห์จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดร่วมกับการประมาณคำตอบด้วยระเบียบวิธีริตส์มาเปรียบเทียบกับ ผลการการเปรียบเทียบจากสามวิธีมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

5.1.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์แบบเรียงเส้นใยตามวงรอบ (Circumferential)

หลังจากเปรียบเทียบผลจากการทดสอบแล้วนั้น ขั้นตอนไปของงานวิจัยนี้คือการนำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดร่วมกับการประมาณคำตอบด้วยระเบียบวิธีริตส์มาเปรียบเทียบกับ การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงคาร์บอนไฟเบอร์แบบเรียงเส้นใยตามวงรอบ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในการกำหนดขอบเขตต่างๆในการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ทั้งสองมีความคลาดเคลื่อนไม่ถึง 1 % ซึ่งสรุปได้ว่าการกำหนดขอบเขตต่างๆในโปรแกรมมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปได้อย่างถูกต้อง

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ของงานสปริงคาร์บอนไฟเบอร์แบบเรียงตัวแบบสานที่มีทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$ s (Quasi isotropic) กับงานสปริงวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์แบบเรียงเส้นใยตามวงรอบ (Circumferential) พบว่างานสปริงที่เรียงเส้นใยตามวงรอบให้ความแข็งแรงที่มากกว่างานสปริงที่เรียงเส้นใยแบบสาน

5.2 ปัญหาและข้อจำกัด

5.2.1 การขึ้นรูปงานสปริงคาร์บอนไฟเบอร์แบบเรียงเส้นใยตามวงรอบจำเป็นต้องใช้เครื่องพิมพ์ขึ้นงาน 3 มิติ ชนิดที่สามารถขึ้นรูปโดยวัสดุคอมโพสิตได้

5.2.2 การขึ้นรูปงานสปริงคาร์บอนไฟเบอร์แบบสานไม่สมบูรณ์แบบ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ในการตัดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้เป็นรูปวงกลม รวมถึงขั้นตอนในการเรียงชั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ส่งผลให้ผลการทดสอบมีความผิดพลาดในบางชิ้นงานทดสอบ

5.2.3 ในขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลังงานต่ำสุดร่วมกับการประมาณคำตอบด้วยวิธีริตส์เกิดปัญหา Jacobian Singularity ซึ่งยากต่อการแก้ปัญหา

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรทำการทดสอบพิสูจน์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก

5.3.2 ควรใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติในการขึ้นรูปขึ้นงานเพื่อลดความไม่สมบูรณ์จากการขึ้น

5.3.3 ควรมีการทดสอบหาค่าสมบัติของวัสดุ โดยทดสอบตามระบบมาตรฐาน

5.3.4 ควรเพิ่มจำนวนชิ้นงานทดสอบให้มากขึ้น

5.3.5 ควรทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ซึ่งจะรวมถึงการใช้เครื่องทดสอบที่การสอบเทียบแล้ว

รายการอ้างอิง



รายการอ้างอิง

- Aimmanee, S., & Phongsitthisak, C. (2022). Analysis of electrical energy harvesting from piezoelectric integrated shallow conical composite shells in metastable configurations using mixed formulation. *Composite Structures*, 282, 115031. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115031>
- Baker, J., Roundy, S., & Wright, P. (2005). Alternative Geometries for Increasing Power Density in Vibration Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks. In *3rd International Energy Conversion Engineering Conference: American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Caliò, R., Rongala, U. B., Camboni, D., Milazzo, M., Stefanini, C., De Petris, G., & Oddo, C. M. (2014). Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. *Sensors*, 14(3), 4755-4790. doi:10.3390/s140304755
- Chen, B., Li, H., Tian, W., & Zhou, C. (2019). PZT Based Piezoelectric Sensor for Structural Monitoring. *Journal of Electronic Materials*, 48(5), 2916-2923. doi:10.1007/s11664-019-07034-8
- Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review. *Sensors*, 20(12). doi:10.3390/s20123512
- Dubey, H., & Bhope, D. (2012). Stress and Deflection Analysis of Belleville Spring. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2. doi:10.9790/1684-0250106
- Erturk, A., & Inman, D. J. (2011). Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. *Journal of Sound and Vibration*, 330(10), 2339-2353. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.11.018>
- Karakaya, Ş. (2012). INVESTIGATION OF HYBRID AND DIFFERENT CROSS-SECTION COMPOSITE DISC SPRINGS USING FINITE ELEMENT METHOD. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 36, 399-412.
- Le Khan, C. (1986). The theory of piezoelectric shells. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 50(1), 98-105. doi:[https://doi.org/10.1016/0021-8928\(86\)90065-1](https://doi.org/10.1016/0021-8928(86)90065-1)
- Malgaca, L., & Karagülle, H. (2009). Numerical and Experimental Study on Integration of Control Actions into the Finite Element Solutions in Smart Structures. *Shock and Vibration*, 16, 401-415. doi:10.1155/2009/246419

- Park, G., Farrar, C. R., Rutherford, A. C., & Robertson, A. N. (2006). Piezoelectric Active Sensor Self-Diagnostics Using Electrical Admittance Measurements. *Journal of Vibration and Acoustics*, 128(4), 469-476. doi:10.1115/1.2202157
- Patangtalo, W., Aimmanee, S., & Chutima, S. (2016). A unified analysis of isotropic and composite Belleville springs. *Thin-Walled Structures*, 109, 285 - 295 . doi:<https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.09.023>
- Piezoelectric Actuators and Sensors. (2013). In I. Chopra & J. Sirohi (Eds.), *Smart Structures Theory* (pp. 113-193). Cambridge: Cambridge University Press.
- Shokrieh, M. M., & Rezaei, D. (2003). Analysis and optimization of a composite leaf spring. *Composite Structures*, 60(3), 317-325. doi:[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00349-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00349-5)
- Zhang, J. S. (2017, 22-24 June 2017). *The FEM Analysis of PZT5H Piezoelectric Square Sheet Thickness Mode Vibration*. Paper presented at the 2017 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT).



ภาคผนวก ก.

ข้อมูลผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยแบบสานทิศทาง $[0^\circ / \pm 60^\circ]$,

ผลการวิเคราะห์ของงานสปริงชนิดที่ 1			
Ritz		Finite Element	
Fnor	Unor	Fnor	Unor
0	0	0	0
0.698403	0.100145	0.698403	0.1
1.303277	0.20023	1.303277	0.2
1.825208	0.300225	1.825208	0.3
2.274893	0.400128	2.274893	0.4
2.66291	0.499937	2.66291	0.5
2.999751	0.599656	2.999751	0.6
3.295833	0.699308	3.295833	0.7
3.561458	0.798921	3.561458	0.8
3.806881	0.898557	3.806881	0.9
4.042266	0.99828	4.042266	1

ผลการทดสอบของงานสปริงชนิดที่ 1					
Test 1		Test 2		Test 3	
Fnor	Unor	Fnor	Unor	Fnor	Unor
0	0	0	0	0	0
0.094755	0.034652	0.048603	0.041457	0.047102	0.05806
0.299805	0.071033	0.296618	0.080539	0.116034	0.103019
0.566405	0.107413	0.532689	0.119622	0.184966	0.147978
0.761418	0.143794	0.809232	0.158705	0.346376	0.192937
0.909265	0.180174	1.048594	0.197788	0.394486	0.204177
0.969467	0.189269	1.107871	0.207559	0.547963	0.237896
1.02967	0.198365	1.285704	0.236871	0.768768	0.282855
1.089872	0.20746	1.522815	0.275953	1.045649	0.327815
1.147296	0.216555	1.759925	0.315036	1.32253	0.372774
1.372851	0.252935	1.986867	0.354119	1.506647	0.417733
1.598407	0.289316	2.1754	0.393202	1.751041	0.462692
1.823963	0.325696	2.372525	0.432285	2.187839	0.507651
2.038977	0.362077	2.583432	0.471367	2.494419	0.55261

ผลการทดสอบของงานสปริงชนิดที่ 1					
Test 1		Test 1		Test 1	
Fnor	Fnor	Fnor	Fnor	Fnor	Fnor
2.251734	0.398457	2.769016	0.51045	2.663745	0.597569
2.468153	0.434838	2.953898	0.549533	2.927389	0.642528
2.680781	0.471218	3.13878	0.588616	3.21669	0.687487
2.871808	0.507599	3.332375	0.627699	3.482517	0.732446
3.062835	0.543979	3.564954	0.666782	3.759777	0.777405
3.149477	0.58036	3.645263	0.705865	4.094847	0.822365
3.750822	0.689501	3.850529	0.744948	4.370538	0.867324
3.919429	0.725882	4.059085	0.784031	4.643315	0.912283
4.209959	0.762262	4.316719	0.823114	5.114957	0.957242
4.582767	0.798643	4.563	0.862197	5.615625	1.002201
5.367521	0.835023	5.15011	0.90128	6.27785	1.04716

ผลการวิเคราะห์ของงานสปริงชนิดที่ 2			
Ritz		Finite Element	
Fnor	Unor	Fnor	Unor
0	0	0	0
1.24061247	0.09993758	1.24061247	0.1
2.25676607	0.19989535	2.25676607	0.2
3.07366522	0.29983358	3.07366522	0.3
3.71617765	0.3997464	3.71617765	0.4
4.20926728	0.49961164	4.20926728	0.5
4.57793811	0.59941304	4.57793811	0.6
4.84718615	0.69913689	4.84718615	0.7
5.04197531	0.7988451	5.04197531	0.8
5.18729357	0.89875531	5.18729357	0.9
5.30808081	0.99921938	5.30808081	1

ผลการทดสอบของงานสปริงชนิดที่ 2					
Test 1		Test 2		Test 3	
Fnor	Unor	Fnor	Unor	Fnor	Unor
0	0	0	0	0	0
0.1284107	0.02898475	0.53327608	0.02856252	0.1630115	0.0393491
0.4907146	0.06296331	0.88410843	0.06224936	0.6992065	0.0741108
1.2465166	0.09694187	1.29274053	0.09593619	1.1302552	0.1088725
1.5995767	0.13092043	1.64886713	0.12962302	1.68863	0.1436342
1.938975	0.16489899	2.00499374	0.16330986	2.112289	0.1783958
2.2532728	0.19887755	2.36715759	0.19699669	2.2195707	0.1870863

ผลการทดสอบของงานสปริงชนิดที่ 2					
Test 1		Test 2		Test 3	
Fnor	Unor	Fnor	Unor	Fnor	Unor
2.3317845	0.20737219	2.46277787	0.2054184	2.3268524	0.1957767
2.566865	0.23285611	2.74963871	0.23068353	2.4341341	0.2044671
2.880432	0.26683467	3.00913507	0.26437036	2.5414158	0.2131575
3.1943302	0.30081323	3.1862857	0.29805719	2.8696597	0.2479192
3.0876602	0.33479179	3.4017314	0.33174403	2.888328	0.2826809
3.4557733	0.36877035	3.63253612	0.36543086	3.1882835	0.3174426
3.6275155	0.40274891	3.86334083	0.39911769	3.3736907	0.3522042
3.8427071	0.43672747	4.09414554	0.43280453	3.7356841	0.3869659
4.1387718	0.47070603	4.32904356	0.46649136	3.9982858	0.4217276
4.3361975	0.50468459	4.57424835	0.50017819	4.2809667	0.4564893
4.5336232	0.53866315	4.7493559	0.53386503	4.5696368	0.491251
4.7310489	0.57264171	4.77509953	0.56755186	4.7647926	0.5260126
5.0126939	0.60662027	4.85350889	0.60123869	4.9513401	0.5607743
5.2054322	0.64059883	4.99805283	0.63492553	5.1157217	0.595536
5.4301856	0.67457739	5.17526375	0.66861236	5.2099265	0.6302977
5.7734832	0.70855595	5.36476715	0.70229919	5.3035925	0.6650594
6.3407309	0.74253451	5.61384708	0.73598603	5.4940729	0.699821
8.0011146	0.77651307	6.62856766	0.76967286	5.667842	0.7345827

ผลการวิเคราะห์ของงานสปริงชนิดที่ 3			
Ritz		Finite Element	
Fnor	Unor	Fnor	Unor
0	0	0	0
2.350284091	0.100861	2.350284	0.1
4.178409091	0.2019879	4.178409	0.2
5.546635101	0.3034742	5.546635	0.3
6.511994949	0.4057408	6.511995	0.4
7.132954545	0.5101793	7.132955	0.5
7.467487374	0.6273306	7.467487	0.6
7.573674242	0.7752181	7.573674	0.7
7.509469697	0.8852387	7.50947	0.8
7.33270202	0.9856359	7.332702	0.9

ผลการทดสอบของงานสปริงชนิดที่ 3					
Test1		Test2		Test3	
Fnor	Unor	Fnor	Unor	Fnor	Unor
0	0	0	0	0	0
0.391921	0.020580977	0.298748	0.024041074	0.14988	0.027910382
1.347824	0.078652724	1.24323	0.082350604	1.420531	0.086062995
2.367752	0.136724471	2.358636	0.140660133	2.649206	0.144215608
3.454723	0.194796218	3.624882	0.198969662	3.964859	0.202368221
3.643511	0.204474842	3.841033	0.208687917	4.178997	0.212060323
3.82602	0.214153467	4.057184	0.218406172	4.2302	0.221752425
4.373036	0.252867965	4.896904	0.257279192	5.083438	0.260520834
5.219465	0.310939712	6.118927	0.315588721	6.071671	0.318673447
6.033481	0.369011459	6.889118	0.37389825	6.878662	0.37682606
6.660369	0.427083206	7.652975	0.43220778	7.62122	0.434978673
7.043807	0.485154953	8.184602	0.490517309	8.187007	0.493131286
7.307213	0.543226701	8.665317	0.548826839	8.542814	0.551283898
7.503715	0.601298448	8.973664	0.607136368	8.77978	0.609436538
7.596191	0.659370195	9.20734	0.665445897	8.974921	0.667589281
7.632995	0.717441942	9.413388	0.723755427	9.314531	0.725742023
7.751775	0.775513689	9.538454	0.782064956	9.475009	0.783894766
7.749912	0.833585436	9.735185	0.840374485	9.718642	0.842047509
8.087464	0.891657183	10.17194	0.898684193	10.32365	0.900200252

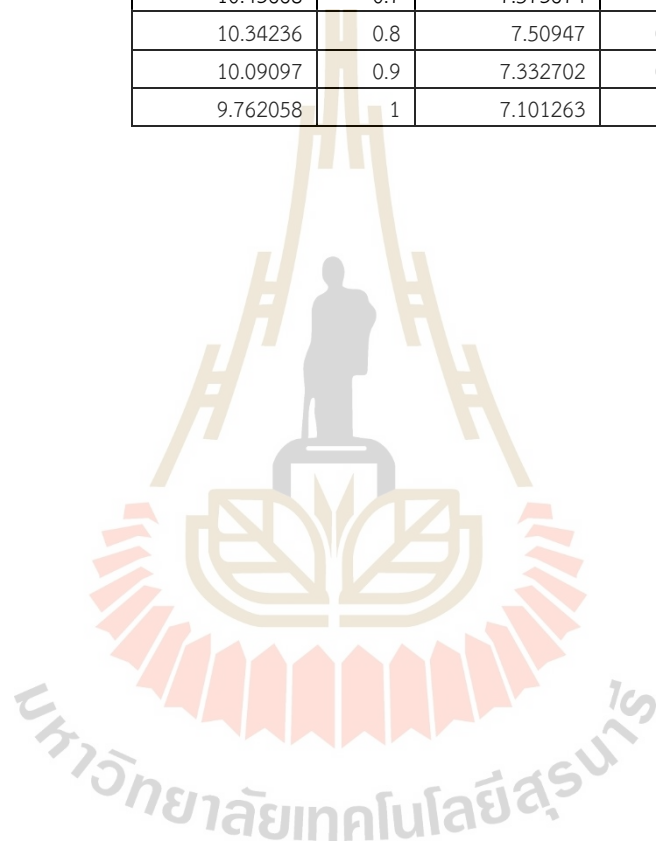
ภาคผนวก ข.

ข้อมูลผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของงานสปริงเส้นใยที่เรียงตัวแบบตามวงของงานสปริง

ผลการวิเคราะห์ของงานสปริงชนิดที่ 1					
Circum (Ritz)		Circum (Finite)		Quasi (Finite)	
Fnor	Unor	Fnor	Unor	Fnor	Unor
0.964696	0.100003	0.964696	0.100003	0.964696	0.700396
1.799907	0.200005	1.799907	0.200005	1.799907	1.307072
2.520368	0.300008	2.520368	0.300008	2.520368	1.83071
3.140416	0.40001	3.140416	0.40001	3.140416	2.281711
3.674474	0.500013	3.674474	0.500013	3.674474	2.670559
4.136945	0.600015	4.136945	0.600015	4.136945	3.007719
4.542213	0.700018	4.542213	0.700018	4.542213	3.303655
4.90466	0.800021	4.90466	0.800021	4.90466	3.568833
5.238645	0.900023	5.238645	0.900023	5.238645	3.813724
5.558533	1.000026	5.558533	1.000026	5.558533	4.048805

ผลการวิเคราะห์ของงานสปริงชนิดที่ 2			
Circum (Finite)		Quasi (Finite)	
Fnor	Unor	Fnor	Unor
43.7126	0.000153	30.9508	0.000153
79.5412	0.000306	56.3018	0.000306
108.361	0.000459	76.6818	0.000459
131.0384	0.000612	92.7112	0.000612
148.4448	0.000765	105.0128	0.000765
161.453	0.000918	114.2104	0.000918
170.9368	0.001071	120.9276	0.001071
177.772	0.001224	125.7872	0.001224
182.8346	0.001377	129.4126	0.001377
187.0014	0.00153	132.426	0.00153

ผลการวิเคราะห์ของงานสปริงชนิดที่ 3			
Circum (Finte)		Quasi (Finite)	
Fnor	Unor	Fnor	Unor
0	0	0	0
3.243112	0.1	2.350284	0.1
5.765183	0.2	4.178409	0.2
7.651831	0.3	5.546635	0.3
8.982071	0.4	6.511995	0.4
9.836301	0.5	7.132955	0.5
10.29457	0.6	7.467487	0.6
10.43668	0.7	7.573674	0.7
10.34236	0.8	7.50947	0.8
10.09097	0.9	7.332702	0.9
9.762058	1	7.101263	1



ภาคผนวก ค.

ข้อมูลการวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

Circum ที่ตำแหน่ง s ต่างๆ งานสปริงชนิด A1 Volt	
A1: s_{tp} 0 mm	
0	0
0.136	76.8409
0.272	150.823
0.408	221.884
0.544	289.996
0.68	355.111
0.816	417.184
0.952	476.171
1.088	532.023
1.224	584.694
1.36	634.136

Circum ที่ตำแหน่ง s ต่างๆ งานสปริงชนิด A1 Volt	
A1: s_{tp} 2.83 mm	
0	0
0.136	53.1678
0.272	105.224
0.408	156.127
0.544	205.834
0.68	254.313
0.816	301.523
0.952	347.42
1.088	391.964
1.224	435.108
1.36	476.81

Circum ที่ตำแหน่ง s ต่างๆ งานสปริงชนิด A1 Volt	
A1: s_{tp} 5.66 mm	
0	0
0.136	36.9583
0.272	73.5532
0.408	109.814
0.544	145.774
0.68	181.465
0.816	216.918
0.952	252.161
1.088	287.215
1.224	322.124
1.36	356.906

Circum ที่ตำแหน่ง s ต่างๆ งานสปริงชนิด A1 Volt	
A1: s_{tp} 8.49 mm	
0	0
0.136	22.8083
0.272	46.0075
0.408	69.6797
0.544	93.9068
0.68	118.77
0.816	144.351
0.952	170.73
1.088	197.983
1.224	226.189
1.36	255.423

Circum ที่ตำแหน่ง s ต่างๆ งานสปริงชนิด A1 Volt	
A1: s_{tp} 13.31 mm	
0	0
0.136	8.06042
0.272	17.8231
0.408	29.3507

Circum ที่ตำแหน่ง s ต่างๆ งานสปริงชนิด A1 Volt A1: s_{tp} 13.31 mm	
0.544	42.7005
0.68	57.9308
0.816	75.0994
0.952	94.2633
1.088	115.479
1.224	138.801
1.36	164.284

แผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดตั้งที่ตำแหน่ง $s_{tp} = 0$ mm									
A1		B1		C1		D1		E1	
U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.136	76.8409	0.136	105.787	0.136	44.7842	0.136	89.7421	0.136	65.6764
0.272	150.823	0.272	207.194	0.272	88.2384	0.272	175.944	0.272	128.891
0.408	221.884	0.408	304.166	0.408	130.321	0.408	258.554	0.408	189.599
0.544	289.996	0.544	396.675	0.544	170.991	0.544	337.536	0.544	247.764
0.68	355.111	0.68	484.686	0.68	210.209	0.68	412.854	0.68	303.35
0.816	417.184	0.816	568.168	0.816	247.93	0.816	484.467	0.816	356.316
0.952	476.171	0.952	647.087	0.952	284.112	0.952	552.339	0.952	406.622
1.088	532.023	1.088	721.411	1.088	318.705	1.088	616.428	1.088	454.227
1.224	584.694	1.224	791.106	1.224	351.663	1.224	676.696	1.224	499.088
1.36	634.136	1.36	856.141	1.36	382.934	1.36	733.101	1.36	541.16

แผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดตั้งที่ตำแหน่ง $s_{tp} = 0$ mm									
A2		B2		C2		D2		E2	
U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.153	56.8798	0.153	76.4077	0.153	33.683	0.153	65.8385	0.153	45.8389
0.306	111.586	0.306	149.504	0.306	66.3555	0.306	129.013	0.306	90.0608
0.459	164.072	0.459	219.233	0.459	97.9815	0.459	189.469	0.459	132.624
0.612	214.291	0.612	285.585	0.612	128.525	0.612	247.177	0.612	173.488
0.765	262.214	0.765	348.52	0.765	157.951	0.765	302.095	0.765	212.615
0.918	307.794	0.918	408.005	0.918	186.221	0.918	354.181	0.918	249.964
1.071	350.99	1.071	464.011	1.071	213.298	1.071	403.396	1.071	285.492
1.224	391.76	1.224	516.505	1.224	239.142	1.224	449.699	1.224	319.15

แผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดตั้งที่ตำแหน่ง $s_{tp} = 0$ mm									
A2		B2		C2		D2		E2	
U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V
1.377	430.061	1.377	565.458	1.377	263.713	1.377	493.05	1.377	350.912
1.53	465.852	1.53	610.84	1.53	286.965	1.53	533.409	1.53	380.725

แผ่นเพียโซอิเล็กทริกติดตั้งที่ตำแหน่ง $s_{tp} = 0$ mm									
A3		B3		C3		D3		E3	
U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V	U mm	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3299	233.713	0.3299	350.717	0.3299	140.727	0.3299	285.221	0.3299	192.019
0.6598	452.3	0.6598	676.15	0.6598	274.609	0.6598	550.96	0.6598	372.866
0.9897	655.296	0.9897	975.726	0.9897	401.271	0.9897	796.686	0.9897	542.089
1.3196	842.191	1.3196	1248.85	1.3196	520.272	1.3196	1021.83	1.3196	699.176
1.6495	1012.44	1.6495	1494.9	1.6495	631.105	1.6495	1225.81	1.6495	843.562
1.9794	1165.48	1.9794	1713.31	1.9794	733.201	1.9794	1408.03	1.9794	974.634
2.3093	1300.7	2.3093	1903.46	2.3093	825.928	2.3093	1567.87	2.3093	1091.73
2.6392	1417.47	2.6392	2064.8	2.6392	908.588	2.6392	1704.73	2.6392	1194.14
2.9691	1515.15	2.9691	2196.77	2.9691	980.418	2.9691	1818	2.9691	1281.11
3.299	1593.03	3.299	2298.82	3.299	1040.59	3.299	1907.03	3.299	1351.82



ภาคผนวก ง.

บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษา

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



การทดสอบแรงกดของจานสปริงคอมโพสิต Compression Testing of Composite Disk Spring

กันตภณ เจริญสุข¹ และ วัชรพงษ์ ปะดังทะโล²

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนพหลโยธิน ต.สุรนารี อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

²อีเมล: watcharapong@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบผลการทำนายพฤติกรรมเปลี่ยนรูปของจานสปริงที่ทำจากวัสดุผสม (Composite Material) ที่มีการเรียงเส้นใยให้มีสมบัติเสมือนเป็นวัสดุไอโซทรอปิก (Quasi-Isotropic) ภายใต้ภาระกดในแนวแกน จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีพลังงานต่ำสุดและการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีรีตซ์ (Ritz Method) กับผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาพบว่าผลการวิเคราะห์จากสมการพลังงานให้การทำนายใกล้เคียงกับผลการทดสอบแรงกดและผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณทางวิศวกรรม ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองด้วยวิธีพลังงานไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบจานสปริงที่ซับซ้อนต่อไป

คำหลัก: จานสปริง / พลังงานต่ำสุด / ระเบียบวิธีรีตซ์ / การทดลอง

Abstract

This article discusses the comparison of the total minimum potential energy principle and the Rayleigh-Ritz approach are used to solve for quasi-isotropic fiber-reinforced composite disk spring's deformation behavior under axial loading, with the experiments and finite element analysis. The result show that the energy equation can predict the quasi-isotropic fiber-reinforced composite disk spring's deformation behavior and has a similar result with the experiments and finite element analysis. So that this energy equation can be used as a basic of design the complicated composite disk spring.

Keywords: disk spring / total minimum potential energy / Ritz method / experimental

1 บทนำ

จานสปริงเป็นสปริงชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกรวยตัดยอด มีความสามารถในการรับแรงที่สูงแต่มีระยะยุบตัวเพียงเล็กน้อย ถูกนำไปใช้ในงานทางวิศวกรรมได้หลากหลาย เช่น เป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ไอพ่น ใช้ป้องกันการคลายตัวของสกรูและนัท ใช้เป็นอุปกรณ์รองรับการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์ เป็นต้น [1, 2] จานสปริงมีจุดเด่นที่ต่างจากสปริงชนิดอื่นที่ค่านิจสปริงจะคงที่ แต่ค่านิจสปริงสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อระยะยุบมากขึ้น โดยค่านิจ

สปริงอาจมีค่ามากขึ้น หรือมีค่าลดลงได้ รวมถึงสามารถมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปมากขึ้นได้แม้แรงกระทำคงที่

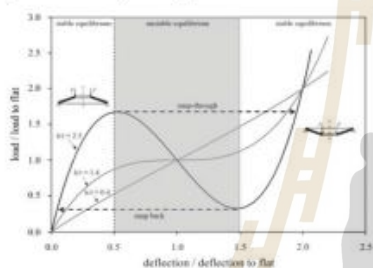
รูปที่ 2 แสดงแบบจานสปริง โดยที่ h คือความสูงของจานสปริง t คือความหนา D_o คือเส้นผ่านศูนย์กลางนอกและ D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางใน ค่านิจสปริงที่เปลี่ยนแปลงได้เมื่อระยะยุบมากขึ้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางในต่อเส้นผ่านศูนย์กลางนอก (D_i/D_o) อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความหนา (h/t) และอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางนอก (h/D_o) โดยค่านิจสปริงจะเป็นบวกเสมอเมื่ออัตราส่วนระหว่าง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



ความสูงต่อความหนา (h/t) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1.4 ที่อัตราส่วน h/t ประมาณ 1.4 คำนิจสปริงจะเริ่มมีค่าเป็นศูนย์ 1 ตำแหน่ง และเมื่ออัตราส่วน h/t มากกว่า 1.4 ขึ้นไป คำนิจสปริงจะมีช่วงที่เป็นลบ โดยมีค่าเป็นศูนย์ 2 ตำแหน่งที่อัตราส่วนระยะ ยึดต่อความสูง ($deflection/deflection to flat$) เท่ากับ 0.5 และ 1.5 อัตราส่วนระยะยึดต่อความสูงเท่ากับ 1 คือ สปริง ยุบตัวจนแบน ดังรูปที่ 1 [3]



รูปที่ 1 คำนิจสปริงและรูปแบบพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูป กลับทิศของงานสปริง

โดยทั่วไปงานสปริงผลิตมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนหรือ เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้ งานบางประเภท ไม่ทนต่อการกัดกร่อน มีน้ำหนักมากและนำ ไฟฟ้า เป็นต้น ปัจจุบันมีการนำวัสดุคอมโพสิต (Fiber-Reinforce Composite Material) มาใช้มากขึ้นเพราะวัสดุประเภทนี้ สามารถปรับแต่งส่วนผสมทำให้มีความแข็งแรงต่อความ หนาแน่นที่สูงกว่าโลหะ ทำให้มีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัด กร่อนได้ดี [4] เป็นต้น นอกจากนี้งานสปริงที่ทำจากวัสดุเส้น โยผสมยังมีข้อดีที่ส่วอีก คือ มีความแข็งแรงและพลังงาน งานศักย์ยืดหยุ่นที่สูง [5]

ปี 1936 Almen และ Laszlo ได้พัฒนาสมการการ ทำนายพฤติกรรมของงานสปริงที่ทำจากวัสดุไอโซทรอปิกไว้ [6, 7] ปี 2007 Dharan และ Bauman ได้นำสมการของ Almen และ Laszlo มาปรับใช้กับงานสปริงที่ทำจากวัสดุ ผสมที่เรียงเส้นใยจนมีสมบัติเหมือนวัสดุไอโซทรอปิก (Quasi-Isotropic) สมการของ Almen และ Laszlo ไม่สามารถใช้ ทำนายพฤติกรรมของวัสดุผสมที่ซับซ้อน [8] ต่อมา ปี 2016 Patangtalo และคณะ ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของงานสปริงได้ทั้งที่ทำจากวัสดุ

ไอโซทรอปิกและวัสดุคอมโพสิต ด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุด และการประมาณคำตอบแบบริตซ์ (Ritz Method) [9]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบผล การทำนายพฤติกรรมของงานสปริงที่ทำจากวัสดุคอมโพสิต โดยเรียงเส้นใยจนมีสมบัติเหมือนเป็นวัสดุไอโซทรอปิก $[0^\circ/\pm 60^\circ]$, ภายใต้ภาระกดในแนวแกนงานสปริงแบบ กับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีพลังงานและ การประมาณคำตอบด้วยวิธีริตซ์ (Ritz Method) และสอบ เทียบกับผลการทดสอบแรงกดและผลวิเคราะห์จากการใช้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณทางวิศวกรรม

2 การทำนายพฤติกรรมของงานสปริง

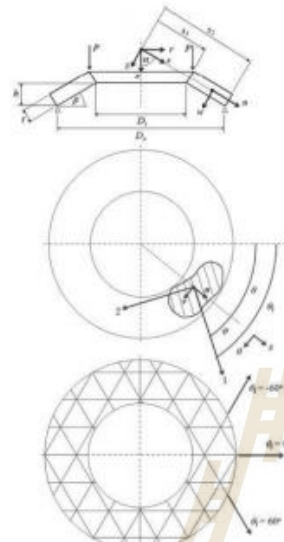
การทำนายพฤติกรรมของงานสปริงอาศัยระเบียบวิธี พลังงานศักย์ต่ำสุดและการประมาณคำตอบด้วยวิธีริตซ์และ อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะยุบภายใต้ ทฤษฎี Kirchhoff-Love hypothesis โดยความเครียดของ แผ่นบางหาได้จากสมการที่ (1) [1, 9, 10]

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_x^0 + z\kappa_x^0 \\ \epsilon_y &= \epsilon_y^0 + z\kappa_y^0 \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy}^0 \end{aligned} \quad (1)$$

โดยที่ $\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$ และ $\kappa_x^0, \kappa_y^0, \kappa_{xy}^0$ คือ ความเครียดและความโค้งของระนาบกึ่งกลางตามลำดับ z คือ ตำแหน่งที่เริ่มวัดจากระนาบกึ่งกลางตามแนวยาวของแกน x รูปที่ 2 [1] แสดงแบบของงานสปริงในระบบพิกัดทรง กลอยและตัวแปรมิติที่เกี่ยวข้อง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 - 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



รูปที่ 2 จานสปริงในระบบพิกัดทรงกรวย

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของระนาบกึ่งกลางกับ
ระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางและความสัมพันธ์
ระหว่างค่าความโค้งกับระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลาง
สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^o &= \frac{\partial u^o}{\partial s} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w^o}{\partial s} \right)^2 \\ \varepsilon_\theta^o &= \frac{u^o - w^o \cot \alpha}{s \sin \alpha} + \frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial u^o}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial w^o}{\partial \theta} \right)^2 \\ \gamma_{r\theta}^o &= \frac{\partial v^o}{\partial s} - \frac{v^o}{s} + \frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial u^o}{\partial \theta} + \frac{1}{s \sin \alpha} \frac{\partial w^o}{\partial s} \frac{\partial v^o}{\partial \theta} \\ \kappa_r^o &= -\frac{\partial^2 w^o}{\partial s^2} \\ \kappa_\theta^o &= -\frac{1}{s} \frac{\partial w^o}{\partial s} - \frac{1}{s^2 \sin^2 \alpha} \frac{\partial^2 w^o}{\partial \theta^2} \\ \kappa_{r\theta}^o &= -\frac{2}{\sin \alpha} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{s} \frac{\partial w^o}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

โดย u^o , v^o และ w^o คือระยะการยุบตัวของระนาบ
กึ่งกลางในระบบพิกัดทรงกรวยที่มีมุมความชันของทรงกรวย
(taper angle) β ($\beta = 90^\circ - \alpha$)

สามารถหาแรงและโมเมนต์สัฟท์ทฤษฎี classical
lamination [10] โดยอาศัยเมทริกซ์เอปที่ดังสมการที่ (3)

$$\begin{Bmatrix} N_s \\ N_\theta \\ N_{s\theta} \\ M_s \\ M_\theta \\ M_{s\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_s^o \\ \varepsilon_\theta^o \\ \gamma_{s\theta}^o \\ \kappa_s^o \\ \kappa_\theta^o \\ \kappa_{s\theta}^o \end{Bmatrix} \quad (3)$$

A_{ij} , B_{ij} และ D_{ij} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k \frac{(z_k^2 - z_{k-1}^2)}{2} \\ D_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k \frac{(z_k^3 - z_{k-1}^3)}{3} \end{aligned} \quad (4)$$

ปริมาณ $\bar{Q}_{ij}$ คือ transformed reduced stiffness
สามารถหาได้จากสมการที่ (5)

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{13} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{23} \\ \bar{Q}_{33} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}(m^4 + n^4) \\ Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \\ (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^2 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ $m = \cos \varphi$ และ $n = \sin \varphi$ และ $\varphi = \theta_f - \theta$ จาก
รูปที่ 2 θ , มุมของเส้นใยเสริมแรง ปริมาณ Q_{ij} คือ ค่าความ
แข็งเกร็งลดรูป (reduced stiffness) หาได้จากสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่ E_i คือยังโมดูลัส ν_{ij} คืออัตราส่วนของปัวซอง และ
 G_{ij} คือโมดูลัสเฉือน ดัชนีล่าง i และ j แสดงถึงทิศทางตามยาว
และทิศทางตามขวางของเส้นใย ตามลำดับ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



2.1 ระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดและการประมาณค่าด้วยวิธีรีดส์

พิจารณาจานสปริงในระบบแกนทรงกรวย การประมาณค่าของระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางสามารถทำได้ตามสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} u'' &= \sum_{i=0}^I a_i s^i \\ v'' &= 0 \\ w'' &= \sum_{i=0}^K c_i s^i \end{aligned} \quad (7)$$

กำหนดให้การยวบตัวของจานสปริงเป็นแบบสมมาตรทำให้ v'' เท่ากับศูนย์ a_i และ c_i คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า ส่วนระยะการกระจัดของระนาบกึ่งกลางที่เหลืออีกสองทิศทางเป็นฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Function) ในทิศทาง s ตัวแปร I และ K คือลำดับสูงสุดของฟังก์ชันพหุนาม

พลังงานศักย์ของจานสปริง Π เกิดจากการรวมกันของพลังงานความเครียด U (strain energy) โดย U เป็นฟังก์ชันผลรวมของผลคูณระหว่างแรงลัพธ์กับความเครียดของระนาบกึ่งกลางรวมกับผลรวมของผลคูณของโมเมนต์กับความโค้งของระนาบกึ่งกลาง แรงและโมเมนต์ลัพธ์คำนวณได้จากสมการที่ (3) ความเครียดและความโค้งของระนาบกึ่งกลางคำนวณได้จากสมการที่ (2) งานซึ่งเกิดจากแรงกด W และค่าคงที่ g ตามสมการที่ (8 ถึง 11)

$$\Pi = U - W - \lambda g \quad (8)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (N_\theta \epsilon_\theta'' + N_\phi \epsilon_\phi'' + N_{\theta\phi} \gamma_{\theta\phi}'' + M_\theta \kappa_\theta'' + M_\phi \kappa_\phi'' + 2M_{\theta\phi} \kappa_{\theta\phi}'') \sin \alpha \, d\alpha \, d\theta \quad (9)$$

$$W = u''(s_1) P \cos \alpha + w''(s_1) P \sin \alpha \quad (10)$$

$$g = u''(s_2) \cos \alpha + w''(s_2) \sin \alpha \quad (11)$$

โดยที่ s_1 และ s_2 คือ ระยะในแนวรัศมี s_r คือระยะในแนวรัศมีที่แรงกระทำกับจานสปริงตั้งรูปที่ 2 ซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดให้แรงกระทำที่ขอบด้านในของจานสปริงซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำให้ $s_r = s_1$ และที่ขอบด้านนอกของจานสปริงถูกกำหนดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งแต่ยังสามารถเคลื่อน

ตัวแนวระนาบได้ ($g = 0$) ตัวแปร λ คือตัวคูณลากรางจ์ (Lagrange multiplier) ซึ่งเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันค่าคงที่ g

สามารถหาผลเฉลยของสมการที่ (8) ได้จากการหาค่าตัวแปรไม่ทราบค่าได้จากทฤษฎีพลังงานที่มีค่าต่ำสุดโดยการหาอนุพันธ์ของพลังงานเทียบกับตัวแปรไม่ทราบค่าทุกตัวแล้วให้เท่ากับศูนย์ตั้งสมการที่ (12)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_i} (U - W) - \lambda \frac{\partial g}{\partial a_i} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_k} (U - W) - \lambda \frac{\partial g}{\partial c_k} &= 0 \\ g &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

ซึ่งระยะยวบของจานสปริงในแนวตั้ง δ หาได้จากสมการที่ (13)

$$u''(s_1) \cos \alpha + w''(s_1) \sin \alpha = \delta \quad (13)$$

3 ผลและการวิเคราะห์ผล

เนื่องจากระยะยวบของจานสปริงหรือแรงปฏิบัติที่เกี่ยวกับการยวบตัวของจานสปริงขึ้นอยู่กับค่าสมบัติของวัสดุหลายตัวรวมถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงของจานสปริง ดังนั้นการจัดรูปของแรงและระยะยวบให้เป็นตัวแปรไร้มิติจะช่วยให้ตัวแปรที่วิเคราะห์ได้ง่าย โดยเรียกแรงที่ไร้มิติว่า normalized load P_{nor} หาได้จากสมการที่ (14)

$$P_{nor} = \frac{PD^2}{Et^4} \quad (14)$$

ส่วนระยะยวบไร้มิติ normalized deflection δ_{nor} หาได้จากสมการที่ (15)

$$\delta_{nor} = \frac{\delta}{h} \quad (15)$$

3.1 การวิเคราะห์แรงและระยะยวบ

จานสปริงที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ผลิตจากวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเป็นคาร์บอนไฟเบอร์สานแบบ 2x2 twill โดยทำการเรียงชั้นจำนวน 6 ชั้น โดยเรียงแบบ $[0^\circ / \pm 60^\circ]_3$ รูปทรงละ 3 ชั้น ทั้งหมด 3 รูปทรงที่มีอัตราส่วน h/t อยู่ในช่วงค่าจานสปริงบวกเนื่องจากเครื่องทดสอบสามารถกดชิ้นงานจนแบนได้เพียงเท่านั้น รูปทรงของจานสปริงที่ถูกเลือกมาวิเคราะห์อ้างอิงขนาดจากชิ้นงานที่มีการผลิตใช้งานจริง ตารางที่ 1

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



แสดงถึงรูปทรงของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น ชิ้นงานถูกอบในอุณหภูมิ
ที่ถูกควบคุมที่ความดัน 1 บาร์ โดยมีรูปแบบอุณหภูมิ
(Temperature Profile) 3 รูปแบบดังนี้ 1. ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ
จากอุณหภูมิภายในตู้ขณะยังไม่ได้ใช้งานจนไปถึง 135 องศา
เซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 1 ถึง 5 องศา
เซลเซียสต่อนาที 2. ช่วงอุณหภูมิคงที่ โดยคงอุณหภูมิไว้ที่
135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที 3. ช่วงปล่อยให้เย็นตัว
โดยปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในตู้อบ

ตารางที่ 1 รูปทรงงานสปริง

ตัวแปร	ชนิดงานสปริง		
	1	2	3
D_o (mm.)	80	60	60
D_i (mm.)	41.6	31.8	31.8
t (mm.)	1.2	1.2	1.2
h (mm.)	1.53	1.13	2
h/t	1.28	0.939	1.702
D_i/D_o	0.52	0.53	0.53
h/D_o	0.019	0.0188	0.034

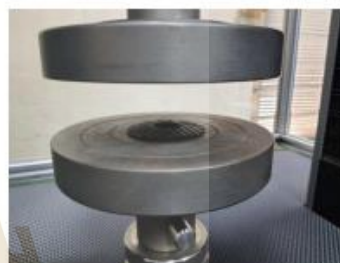


รูปที่ 3 งานสปริงที่ผลิตจากคาร์บอนไฟเบอร์ที่เรียงรูปแบบ
[0°/±60°]

3.1.1 การทดสอบงานสปริง

ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยการกดที่ขอบบนของงาน
สปริงโดยที่ชิ้นงานวางอยู่บนแท่นของเครื่องทดสอบ

อเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ทำการ
กดชิ้นงานจนกระทั่งงานสปริงแบนขนานกับแท่นวางชิ้นงาน
ด้วยอัตราเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการทดสอบงานสปริง
ที่รูปทรงแตกต่างกันทั้ง 4 รูปทรง โดยในแต่ละรูปทรงทำการ
ทดสอบรูปทรงละ 3 ชิ้น ดังในรูปที่ 5, 6, 7 และ 8 โดย
ผลทดสอบที่ได้จากชิ้นงานทั้ง 3 ครั้งของแต่ละรูปทรงมี
แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4 การทดสอบงานสปริงด้วยเครื่อง UTM

3.1.2 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีรีดส์

ได้มีการคิดค้นรูปแบบสมการสำหรับทำนายพฤติกรรม
ของงานสปริงที่ทำจากวัสดุเส้นใยผสม โดยอาศัยการสร้าง
รูปแบบสมการด้วยระเบียบวิธีพลังงานต่ำสุดและประมาณ
การคำนวณด้วยระเบียบวิธีรีดส์ ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาตัว
แปรทั้งหมด 9 ตัวแปร โดยแบ่งเป็น α ทั้งหมด 6 ตัวแปรและ
 α_s ทั้งหมด 3 ตัวแปร โดยได้พิสูจน์แล้วว่า การเพิ่มตัวแปรไม่
ส่งผลต่อค่าตอบที่ได้ ขอบเขตที่กำหนดในสมการได้กล่าวไว้ใน
หัวข้อที่ 2.1 คำสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณแสดงใน
ตารางที่ 2 [11]

3.1.3 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำระเบียบวิธีทางไฟ
ไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมที่ใช้คือ Abaqus เอลิ
เมนต์แบบ Continuum Shell Quadrilateral (SC8R) โดย
ใช้จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 88,736 เอลิเมนต์ และจำนวนโนด
เท่ากับ 113,290 โนด โดยควบคุมจำนวน element 4, 118
และ 47 ในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ ในส่วนของ
ขอบเขตกำหนดเช่นเดียวกับการทดสอบคือ ใส่แรงกดที่ขอบ
บนของงานสปริงและขอบล่างถูกจำกัดไม่ให้เคลื่อนที่ได้ใน
แนวตั้ง โดยขอบบนถูกกำหนดให้มีการจำกัดแบบ Structural

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



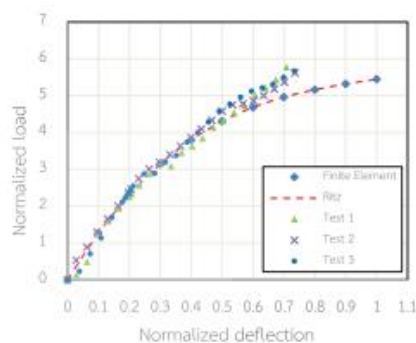
Distributing ไปยังจุดอ้างอิงซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของขอบบน โดยจุดอ้างอิงนี้เป็นจุดในการใส่แรงกด

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์จานสปริงที่มีรูปทรงต่างกัน ทั้งหมด 3 รูปทรง รูปทรงละ 3 ชั้น โดยได้ทำการเปรียบเทียบ ผลพฤติกรรมการยุบตัวที่เกิดจากแรงกดจากการคำนวณ การทดลอง และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลดังรูปที่ 5 ถึง 7

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์แบบ 2x2 twill

E_1 (GPa)	77
E_2 (GPa)	77
ν_{12}	0.064
G_{12} (GPa)	4.2
G_{23} (GPa)	4.2
G_{13} (GPa)	4.2

รูปที่ 5 แสดงผลพฤติกรรมที่ได้จากการคำนวณ การทดลอง และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของจานสปริงชนิดที่ 1 ความชันในช่วงระยะยุบมีมิติตั้งแต่ 0 ถึง ประมาณ 0.2 ซึ่งเป็นช่วงที่จานสปริงมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรง ขึ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชั้นมีความชันเท่ากับ 11.244, 11.989 และ 11.905 เดลิยเป็น 11.7123 ความชันจากสมการพลังงานเท่ากับ 11.54 และความชันจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 11.534 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับความชันของผลทดสอบจะได้ว่า สมการพลังงานมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.48% และความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ที่ 1.53%

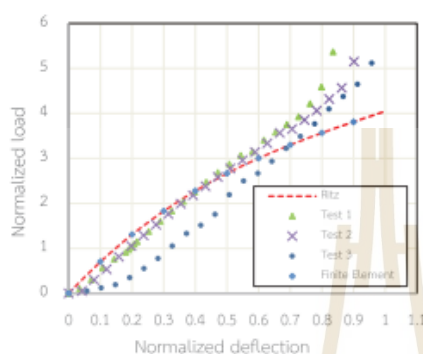


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวของจานสปริงชนิดที่ 1

รูปที่ 6 แสดงผลพฤติกรรมที่ได้จากการคำนวณ การทดสอบ และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของจานสปริงชนิดที่ 2 ความชันในช่วงระยะยุบมีมิติตั้งแต่ 0 ถึง ประมาณ 0.2 ซึ่งเป็นช่วงที่จานสปริงมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรง ขึ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชั้นมีความชันเท่ากับ 5.2534, 5.3376 และ 1.9321 เดลิยเป็น 4.174 ความชันจากสมการพลังงานเท่ากับ 6.5009 และความชันจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 6.516 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับความชันจากผลทดสอบจะได้ว่า สมการพลังงานมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 55.73% และความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ที่ 56.1% จากผลการทดสอบชั้นงานที่ 3 (Test 3) มีผลที่แตกต่างจากชั้นทดสอบตัวที่ 1 และ 2 ความคลาดเคลื่อนของสมการพลังงานเทียบกับความชันจากชั้นงานที่ 1 และ 2 นั้นได้ค่าในทำนองเดียวกันกับการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณ 24% ความคลาดเคลื่อนที่สูงอาจเกิดจากขั้นตอนการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ของชั้นทดสอบที่ 3 ทำให้ความชันของชั้นที่ 3 มีค่าต่างไปจากชั้นงานที่ 1 และ 2 ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูง

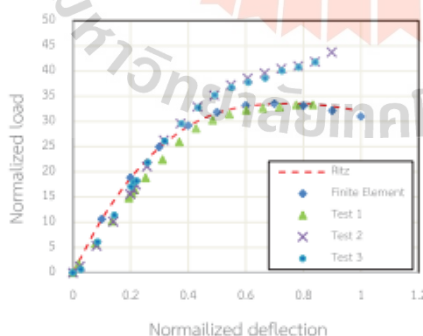
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวของจานสปริงชนิดที่ 2

รูปที่ 7 แสดงผลพฤติกรรมที่ได้จากการคำนวณ การทดสอบ และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของจานสปริงชนิดที่ 1 ความชันในช่วงระยะยุบไม่มีตั้งแต่ 0 ถึง ประมาณ 0.2 ซึ่งเป็นช่วงที่จานสปริงมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรง ขึ้นจนทดสอบทั้ง 3 ชิ้นมีความชันเท่ากับ 76.618, 79.141 และ 84.243 เฉลี่ยเป็น 80 ความชันจากสมการพลังงานเท่ากับ 93.463 และความชันจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 94.392 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับความชันจากการทดสอบจะได้ว่า สมการพลังงานมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 16.83% และความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ที่ 17.99%



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวของจานสปริงชนิดที่ 3

ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบแสดงถึงค่าสปริงซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการยุบตัวของสปริง จากรูปที่ 5 ถึง 7 แสดงให้เห็นว่าความชันหรือค่าสปริงสูงขึ้นเมื่อจานสปริงมีรูปทรงที่มีอัตราความสูงต่อความหนาสูงขึ้น และเมื่อรูปทรงมีอัตราความสูงต่อความหนามากขึ้นพฤติกรรมของจานสปริงก็ยังมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น จากการทดสอบจานสปริงทั้งสามรูปทรงพบว่าสมการพลังงานและผลวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความคลาดเคลื่อนต่างกันประมาณ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ในทุกรูปทรงโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนมากกว่า เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	ชนิดของจานสปริง		
	1	2	3
สมการพลังงาน	1.48	55.73	16.83
ไฟไนต์เอลิเมนต์	1.53	56.1	17.99

4 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่าสมการพลังงานสามารถทำนายพฤติกรรมของจานสปริงคอมโพสิต เมื่อนำผลที่ได้จากสมการพลังงานเทียบกับผลการทดสอบแรงกดพบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน การขึ้นรูปชิ้นงานที่ส่งผลให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ ผลจากสมการพลังงานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่างกันเล็กน้อย ประมาณ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าการจะนำสมการพลังงานไปใช้ในการออกแบบจานสปริงคอมโพสิตควรมีการคูณค่าความปลอดภัย (Safety factor) เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการผลิตชิ้นงาน

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะสำเร็จไม่ได้หากปราศจากความช่วยเหลือของอาจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ปะติงพะไล และความอนุเคราะห์ใน

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -22 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม

CST0014



การใช้วัสดุอุปกรณ์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมา พันเพ็ง
ร่วมไปถึงความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์
อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6 เอกสารอ้างอิง

- [1] Karakaya (2012). Investigation of Hybrid and different cross-section composite disc springs using finite element method, CSME, No.12-CSME-62.
- [2] R.G. Zala, K.R. Gawande. (2017). Disc spring washer: Design and axisymmetric analysis using ANSYS, Trend in Machine Design, vol.4, 2017, pp. 21 – 25.
- [3] วัชรพงษ์ ปะติงพะโล, สนต์พิร์ เออมมณี, สุวเชษฐ์ ชุตินา (2560). การสร้างแผนภาพการออกแบบงานสปริงด้วยแบบจำลองจากวิธีพลังงาน, วารสารวิจัยและพัฒนา, 40, เมษายน - มิถุนายน 2560, หน้า 175 – 187.
- [4] Paul V. Huchette, Latrobe. (1970). Composite Belleville type springs and manufacture, United States Patent, No.34, 124, May 1970.
- [5] Mahmood M. Shokrieh, Davood Rezaei. (2003). Analysis and optimization of a composite leaf spring, Composite Structures, 60, 2003, pp. 317 – 325.
- [6] Almen JO, Laszlo A. (1936), The uniform-section disc spring, Trans ASME, 58, pp.305-314.
- [7] H.K. Dubey and D.V. Bhope. (2012). Stress and Deflection Analysis of Belleville Spring. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 2, pp. 01 - 06.
- [8] C.K.H. Dharan, Jesse A. Bauman (2007). Composite disc springs, Composite, Part A 38, 2007, pp. 2511-2516.
- [9] W. Patangtalo, S. Aimmanee and S. Chutima (2016). A unified analysis of isotropic and composite Belleville springs, Thin-Walled Structures, 109, 2016, pp. 285 – 295.
- [10] Michael W. Hyer. (1998). Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Material, McGraw-Hill International Editions.
- [11] Guo-Cai Yu, Lin-Zhi Wu, Li-Jia Feng and Wen Yang (2016). Thermal and mechanical properties of carbon fiber polymer-matrix composite with a 3D thermal conductive pathway, Composite Structures, 149, 2016, pp. 213 – 219.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายกันตภณ เจริญสุข เกิดเมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2538 ณ จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอากาศยาน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2562 ปัจจุบันทำงานตำแหน่งวิศวกร ณ สำนักพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

