

การสแน็ปทรูในแผ่นที่อยู่ใต้อาการโก่งเดาะโดยใช้ Macro-Fiber Composite เป็นตัวขับเคลื่อน Snap-through in Buckled Plate Activated by Macro-Fiber Composite Actuator

สันติพีร์ เอมมณี^{1*}, ชัยวัฒน์ คุรุกิจวานิชย์¹, นริสสา ไกรกิริติ¹ และ กฤตพร พลमुख¹

¹ ห้องปฏิบัติการวัสดุและโครงสร้างขั้นสูง (AMASS) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*E-mail: sontipee.aim@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการสแน็ปทรูของแผ่นเหล็กที่อยู่ใต้อาการโก่งเดาะ (Buckling) โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกแอคชูเอเตอร์ชนิด Macro-Fiber Composite (MFC) เป็นตัวขับเคลื่อน แรงดันไฟฟ้าคงที่จะถูกป้อนให้กับ MFC ในกรณีที่เป็นการขับเคลื่อนแผ่นเหล็กแบบกึ่งสถิต ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ารูปแบบสัญญาณไซน์ (Sinusoidal Signal) จะถูกใช้เมื่อต้องการขับเคลื่อนแบบพลวัต โดยที่ทั้งสองกรณีมีแรงดันอยู่ในช่วง 0 – 1,300 โวลต์ เมื่อป้อนแรงดันคงที่การสแน็ปทรู (Snap-through) ของแผ่นเหล็กจะเกิดขึ้นจากการขยายตัวอย่างช้าๆของ MFC ที่ติดอยู่บนแผ่นเหล็กซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์ดัดจนแผ่นเหล็กเปลี่ยนค่าความโค้งจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งอย่างทันทีทันใด ส่วนการป้อนสัญญาณแบบพลวัตจะป้อนให้สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่อยู่ใต้อาการโก่งเดาะ ซึ่งทำให้แผ่นเหล็กสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงและเกิดการสแน็ปทรูในที่สุด ในการทดสอบจะหาว่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่จ่ายให้กับ MFC จนทำให้เกิดการสแน็ปทรูเมื่อแผ่นเหล็กมีความโก่งเดาะที่ต่างกัน โดยขนาดของความโก่งเดาะจะถูกควบคุมด้วยระยะกดที่ปลายของแผ่นเหล็ก นอกจากนี้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ได้ถูกนำมาใช้คำนวณหาว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการสแน็ปทรูในกรณีที่แรงดันคงที่ และหาความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่อยู่ใต้อาการโก่งเดาะเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับแต่งความถี่ที่ป้อนให้กับ MFC เมื่อใช้แรงดันสัญญาณไซน์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดการสแน็ปทรูจากการขับเคลื่อนแบบพลวัตจะมีค่าน้อยกว่าการขับเคลื่อนแบบกึ่งสถิต และเมื่อนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ FEM พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำหลัก: เพียโซอิเล็กทริกแอคชูเอเตอร์, สแน็ปทรู, โก่งเดาะ, Macro-Fiber Composite

Abstract

The purpose of this paper is to study snap-through in a buckled steel plate activated by a Micro-fiber Composite (MFC), a type of piezoelectric actuator. A uniform voltage signal is fed to MFC in the case of quasi-static drive, while a voltage signal of sinusoidal form is employed when dynamic drive is needed. The voltage range in both cases are 0 – 1,300 V. Under the application of quasi-static field snap-through action is induced by steady expansion of MFC, which is bonded on the steel plate. This generates bending moment and makes the whole structure bent and snapped instantaneously. The dynamic voltage signal is applied in harmony with a natural frequency of the buckled plate such that the plate vibrates at high amplitude and is finally snapped-through. The lowest voltage that causes snap-through action is measured in experiment for different buckling amplitudes that are controlled by end compression of the plate. Finite element method (FEM) is also used to calculate the snap-through voltage in the case of uniform electric field and find the buckling plate's natural frequencies as the fundamental information for tuning sinusoidal voltages signal fed to MFC. Experimental result shown that the voltages required for snap-through in the dynamic signal case are

lower than those in the quasi-static case. The comparison between the results from experiment and FEM reveals good agreement.

Keywords: Piezo Electric, Snap-Through, Buckled, Macro-Fiber Composite

1. บทนำ

การควบคุมการเคลื่อนที่ทางกลส่วนมากในอุตสาหกรรมมักอาศัยการขับเคลื่อนกลไกด้วยส่วนต่อโยง (Crank) ซึ่งทำให้การควบคุมความแม่นยำในการเคลื่อนที่ทำได้ยาก และเกิดการเสียดสีของชิ้นส่วนที่บริเวณข้อต่อซึ่งอาจมีอนุภาคของชิ้นส่วนกลไกหลุดออกมา และเป็นสาเหตุให้กลไกแบบส่วนต่อโยงไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความสะอาดเป็นอย่างสูง ดังนั้นการใช้กลไกแบบโครงสร้าง (Compliance Mechanism) ซึ่งใช้การเชื่อมต่อชิ้นส่วนทางกลน้อยลง สามารถทดแทนกลไกแบบส่วนต่อโยงในกรณีที่ต้องการความแม่นยำและต้องการความสะอาดสูง โดยในบทความนี้จะศึกษากลไกแบบโครงสร้างชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการประยุกต์นำเพียโซอิเล็กทริกแอคชูเอเตอร์ชนิด MFC มาเชื่อมต่อเข้ากับแผ่นเหล็กบางที่อยู่ในสภาวะโก่งเดาะ เมื่อกลไกแบบโครงสร้างนี้ถูกขับเคลื่อนจากการป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่ MFC จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างทันทีทันใด (หรือเกิดการสแน็ปทรู) ขึ้น

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การโก่งเดาะของแผ่นเป็นกลไกแบบโครงสร้างพบว่ามีการวิจัยหลายชิ้นที่ทำการศึกษารูปแบบกลไกชนิดนี้ หนึ่งในงานวิจัยเหล่านี้เสนอโดย Oh [1] ที่อธิบายเกี่ยวกับการโก่งเดาะและพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของโครงสร้างฉลาด (Smart Structures) Oh ยังได้วิเคราะห์การสแน็ปทรูของโครงสร้างโดยใช้ FEM ที่มีเอลิเมนต์แบบ Shell ภายใต้อุณหภูมิและแรงทางไฟฟ้า งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งที่ถูกเสนอโดย Schultz [2] ได้นำ FEM มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจากวัสดุคอมโพสิตที่มีสองสถานะเสถียร (Bistable State) ในลักษณะปิดโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนรูประหว่างสถานะเสถียร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่วิเคราะห์แบบจำลองการสแน็ปทรูของการโก่งเดาะในคานเพื่อที่จะนำมาประยุกต์เป็น MEMS (Micro-Electromechanical system) ซึ่งนำเสนอโดย Vangbo [3] โดยที่ Vangbo ใช้แรงภายนอกมากระทำที่กลางคานที่เกิดการโก่งเดาะเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการสแน็ปทรู

อย่างไรก็ดีจากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องยังไม่มีงานวิจัยใดเท่าที่ผู้เขียนทราบที่ทำการทดลองและศึกษา

การสแน็ปทรูของแผ่นเหล็กบางที่อยู่ในสภาวะการโก่งเดาะโดยใช้ MFC เป็นตัวขับเคลื่อนด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้แรงดันคงที่และใช้แรงดันสัญญาณไซน์มาเปรียบเทียบกับ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังนำเสนอแบบจำลอง FEM ด้วยโปรแกรม ABAQUS เพื่อทำนายค่าแรงดันไฟฟ้ารวมถึงความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่ติด MFC สำหรับเรียนรู้พฤติกรรมทางพลศาสตร์ที่เหนี่ยวนำการสแน็ปทรูของแผ่นเหล็กในสภาวะการโก่งเดาะ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางกายภาพและการสแน็ปทรูของแผ่นเหล็กที่เกิดการโก่งเดาะ โดยใช้ MFC เป็นตัวขับเคลื่อน

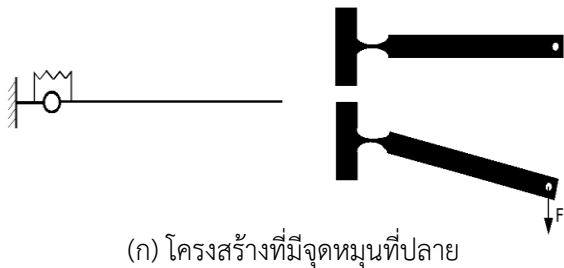
2. ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 กลไกแบบโครงสร้าง

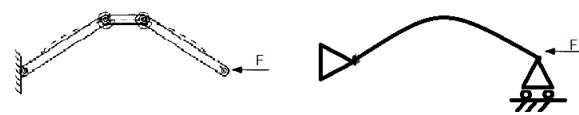
กลไกแบบโครงสร้างเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจในการนำมาทดแทนกลไกแบบส่วนต่อโยงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาตั้งแต่อดีต ลักษณะเด่นของกลไกแบบโครงสร้างนี้คือการใช้ความยืดหยุ่นของเนื้อวัสดุแทนข้อต่อจุดหมุนและจุดยึด เนื้อของวัสดุจะถูกดัดแปลงหรือออกแบบให้สามารถทำหน้าที่แทนชิ้นส่วนที่หายไป ดังนั้นการเคลื่อนที่ของกลไกจะเกิดจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 1 [4]

ข้อดีของกลไกแบบโครงสร้างคือสามารถลดการเสียดสีและการสึกหรอจากการเคลื่อนที่ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ยังไม่มี backlash ในกลไก และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและการบำรุงรักษาเนื่องจากมีชิ้นส่วนของกลไกจำนวนน้อย ด้วยจุดเด่นเหล่านี้ของกลไกแบบโครงสร้างทำให้ปัจจุบันมีการนำกลไกชนิดนี้มาประยุกต์เข้ากับเครื่องมือต่างๆ มากมายยกตัวอย่าง เช่น การนำมาใช้เป็นแอคชูเอเตอร์ (Actuator) และ เซ็นเซอร์ (Sensor) ในงานที่มีขนาดเล็กๆ

โครงสร้างแผ่นที่อยู่ในสภาวะการโก่งเดาะในรูปที่ 1(ข) ที่ทำการศึกษาในบทความฉบับนี้ก็เป็นกลไกแบบโครงสร้างชนิดหนึ่ง ซึ่งการทำงานของกลไกจะเกิดจากการสะสมพลังงานในกลไกไว้ในรูปของพลังงานความเครียด (Strain Energy) ในเนื้อของวัสดุ และปลดปล่อยพลังงานจลน์ออกมาในขณะที่เคลื่อนที่แบบสแน็ปทรู เพื่อให้กลไกเปลี่ยนสถานะภาพของพลังงาน



(ก) โครงสร้างที่มีจุดหมุนที่ปลาย



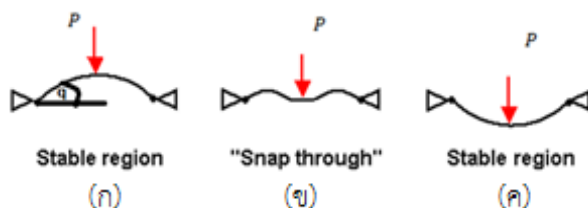
(ข) โครงสร้างในสภาวะการโก่งเดาะ

รูปที่ 1 การทดแทนกลไกแบบส่วนต่อโยงด้วยโครงสร้างที่เป็นกลไก

ความเครียดไปอีกค่าหนึ่ง สภาวะก่อนและหลังการสแน็ปทรูจะมีความเสถียรจึงทนต่อการรบกวน (Disturbance) จากภายนอกได้ และเหมาะกับการนำไปออกแบบอย่างมั่นคง (Robust design) ยิ่งไปกว่านี้กลไกรูปแบบนี้สามารถควบคุมการเปลี่ยนรูปร่างได้ดี มีความรวดเร็วและความแม่นยำในการตอบสนอง โครงสร้างแผ่นที่อยู่ในสภาวะการโก่งเดาะจึงสามารถนำไปใช้งานจำพวก ลิ้น (Valve) และสวิตช์ (Switch) ที่มีการทำงานในลักษณะเปิดปิด (On – off, open – close) ได้ดี

2.2 การสแน็ปทรูของแผ่นโครงสร้าง

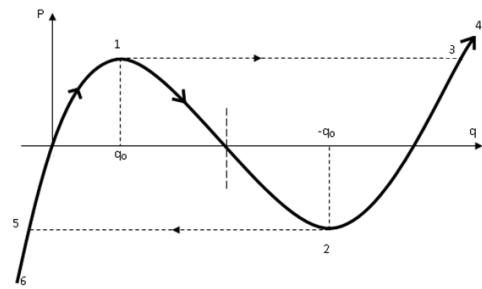
การสแน็ปทรูจะเกิดกับโครงสร้างที่มีความเสถียรสองสภาวะ (Bistable Structure) [5] ซึ่งในกรณีของแผ่นเหล็กที่เกิดการโก่งเดาะจะเสถียรในสภาวะที่โก่งไปด้านใดด้านหนึ่งเมื่อมีแรงที่เท่ากับหรือมากกว่าแรงกวดวิกฤต F มากกระทำที่ปลายของแผ่นโครงสร้างและทำการควบคุมระยะกดปลายไว้ค่าหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 1(ข) การสแน็ปทรูจากการขับเคลื่อนแบบกึ่งสถิตย์ของโครงสร้างอาจเกิดจากแรง P มากกระทำดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนในรูปที่ 3 จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง (P) ที่มากกระทำกับมุมของเส้นสัมผัสที่ปลายแผ่นที่วัดเทียบกับแนวราบ (q)



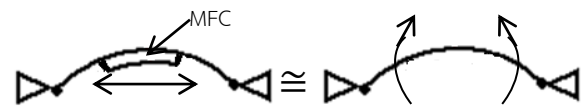
รูปที่ 2 กระบวนการการสแน็ปทรูของโครงสร้างแผ่นโค้ง

(ก) เกิดการโก่งเดาะและเริ่มมีแรง P มากกระทำ

(ข) ในขณะที่เริ่มสแน็ปทรู (ค) หลังจากเกิดการสแน็ปทรู



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง P กับมุม q



รูปที่ 4 การขยายตัวของ MFC เพื่อสร้างโมเมนต์ดัด

จากกราฟในรูปที่ 3 ช่วงที่ไม่เสถียรคือช่วงที่ 1-2 เนื่องจากความชันที่แสดงถึงความแข็งแกร่งของระบบมีค่าติดลบ เมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะที่ไม่เสถียรวัสดุจะพยายามวิ่งไปยังสภาวะที่เสถียร ช่วงที่ 1-2 จึงไม่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดสอบโดยการควบคุมแรงที่มากระทำ (Load Control) กราฟจะข้ามช่วง 1-2 ที่ไม่เสถียรไปเป็น 1-3-4 แทนจึงทำให้เกิดการสแน็ปทรูขึ้น นอกเหนือจากการใช้แรงในการสแน็ปทรูที่จำเป็นต้องมีกลไกในการให้แรง P เราสามารถใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งในงานวิจัยจะใช้ MFC มาติดบนพื้นผิวของโครงสร้างแผ่นเหล็ก เมื่อ MFC ได้รับแรงดันไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดการขยายตัวของ MFC และสร้างโมเมนต์ดัดภายในดังแสดงในรูปที่ 4 ที่มีผลเทียบเท่ากับการให้แรงในรูปที่ 3 จนกระทั่งเกิดการสแน็ปทรูในโครงสร้างที่มีการโก่งเดาะขึ้น นอกจากนี้การสแน็ปทรูที่เหนี่ยวนำจาก MFC ยังเป็นการได้เปรียบเชิงกลในอีกรูปแบบหนึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของ MFC ที่อยู่ในระดับไมโครเมตรสามารถทำให้โครงสร้างทั้งหมดเกิดการเคลื่อนที่ในระดับเซนติเมตรได้

2.3 วิธี Static Riks

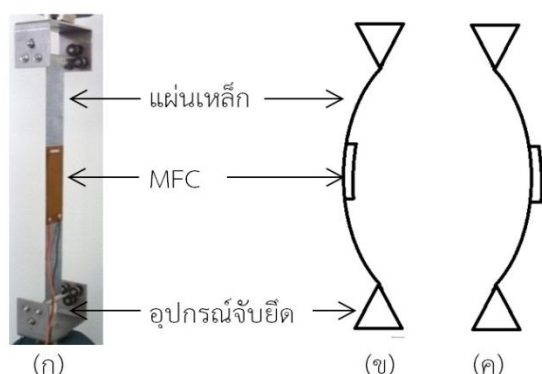
การทำนายการสแน็ปทรูจากการขับเคลื่อนแบบกึ่งสถิตย์ด้วยโปรแกรม ABAQUS จะใช้วิธี Static Riks [6] ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงตัวเลขโดยการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Control) ของโครงสร้างแทนการควบคุมแรงที่มากระทำเหมือนวิธีที่ใช้ในการทดสอบจริงหรือที่ใช้ในการคำนวณด้วย FEM ตามปกติ ดังนั้นการใช้วิธี Static Riks จึงทำให้สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในสภาวะที่ไม่เสถียรได้ (ช่วง 1-2 ในรูปที่ 3) นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากระทำกับระยะกดปลายที่ถูกควบคุม (หรือกับมุมของเส้นสัมผัส

ที่ปลายแผ่นในรูปที่ 3) เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น การคำนวณหาความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงต้องคำนวณจากการกำหนดโหลดที่แปรผันตามเวลา แล้วค่อยๆเพิ่มเวลาจนได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นออกมา การหาผลลัพธ์จะกำหนดขนาดการเพิ่มเวลาครั้งแรกให้กับโปรแกรม จากนั้นตัวโปรแกรมจะทำการกำหนดขนาดการเพิ่มขึ้นเองตามวิธีการของนิวตัน ที่จุดสุดท้ายของการเพิ่มขึ้นของเวลาในการคำนวณจะให้รูปร่างของโครงสร้างอยู่ที่จุดสมดุลที่ต้องการ

3. การดำเนินงานวิจัย

3.1 ชุดทดสอบและการติดตั้งชุดทดสอบ

ชิ้นงานในการทดสอบจะประกอบไปด้วย MFC ชนิด d_{33} ขนาด 40×112 mm ติดกับแผ่นเหล็กหนา 0.185 mm กว้าง 112 mm และยาว 355 mm ด้วยกาวอีพอกซี Loctite E20HP ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ด้านตรงข้ามแผ่นจะติด Strain gauge เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียดของแผ่นเหล็กในขณะที่เกิดการสั่นปทறு โดยที่ปลายแผ่นเหล็กทั้งสองด้านจะยึดเข้ากับอุปกรณ์จับยึดแบบหมุนได้ (Simple Support) ที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อใช้ติดตั้งกับ Universal Testing Machine (UTM) ทำให้สามารถกำหนดระยะกดที่ปลายแผ่นเหล็กด้านบนแผนภาพของการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ MFC จะได้จาก Piezo Driver Amplifier ส่วนสัญญาณลดทอนจาก Piezo Driver Amplifier และสัญญาณจาก Strain gauge จะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม LABVIEW เพื่อสามารถอ่านแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ MFC

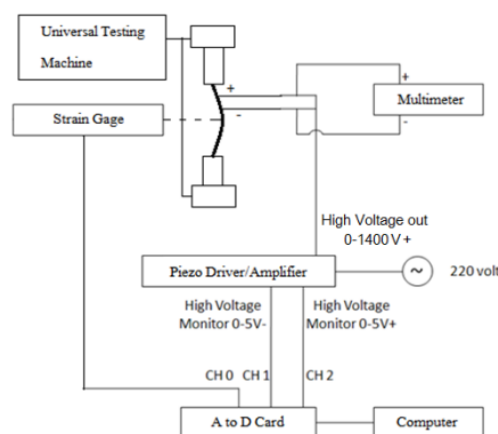


รูปที่ 5 แผ่นเหล็กที่ติดกับ MFC

(ก) การติดตั้งชิ้นงานทดสอบ

(ข) สภาวะโก่งเดาะด้านเว้า (Concave)

(ค) สภาวะโก่งเดาะด้านนูน (Convex)



รูปที่ 6 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อให้แผ่นเกิดการโก่งเดาะ

และสัญญาณจาก Strain gauge ขณะที่เกิดการสั่นปทறுในเวลาเดียวกัน

3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองพฤติกรรมของการโก่งเดาะและความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่ติด MFC จะใช้เอลิเมนต์แบบ Shell และใช้ Composite Layer ในการแบ่งชั้นของวัสดุในเอลิเมนต์ให้เหมือนกับชิ้นงานทดสอบจริง อย่างไรก็ตามแบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยความยาวที่แตกต่างกัน 3 ขนาดคือ 355 , 255 และ 175 mm โดยมีความกว้างเท่ากันที่ 40 mm ซึ่งขนาดความยาว 255 และ 175 mm จะเป็นตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมาจากการทดสอบจริงเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความยาวต่อพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปของโครงสร้างแผ่นเหล็กที่อยู่ในสภาวะการโก่งเดาะ สมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 1

ระยะโก่งของ MFC ที่คำนวณได้จาก FEM จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับระยะโก่งจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง FEM แล้วจึงนำแบบจำลองไปคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสั่นปทறு อย่างไรก็ตามการคำนวณแรงดันไฟฟ้าไม่สามารถทำได้โดยตรงในโปรแกรม ABAQUS เนื่องจากเอลิเมนต์แบบ Shell ไม่มีองศาอิสระของตัวแปรทางไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อเลียนแบบการเปลี่ยนรูปของ MFC จึงกำหนดให้เกิดมีการขยายตัวจากความร้อนใน MFC แทนการขยายตัวที่เกิดจากการป้อนสนามไฟฟ้า โดยให้ค่าของการขยายในทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากันเมื่อแบบจำลอง FEM ให้ค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสั่นปทறுจากวิธี Static Riks ค่าอุณหภูมิดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสั่นปทறுอีกที

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุและรูปร่างเรขาคณิต

Properties and Geometry		Glue*	แผ่นเหล็ก*	MFC**
Mass Density (kg/m^3)		1096.7	7596.5	114
Modulus [#]	E_1 (GPa)	0.491	77.040	30.340
	E_2 (GPa)	0.491	77.040	15.857
	G_{12} (GPa)	0.175	28.962	5.515
	G_{13} (GPa)	0.175	28.962	5.515
Poisson's Ratio		0.4	0.33	0.31
Piezoelectric coefficient, d_{33} (pC/N)		-	-	4.6×10^2
Thickness (mm)		0.326	0.218	0.148
Width (mm)		40	40	40
Length (mm)		112	355, 255 และ 175	112

*Isotropic Type **Lamina Type

1 : ทิศตามแนวความยาวแผ่น 2 : ทิศตามแนวความกว้างแผ่น
3 : ทิศตามแนวความหนาแผ่น

นอกจากนี้เนื่องจากโครงสร้างของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำการทดสอบสามารถมีสองสภาวะการโก่งเดาะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) และ (ค) คือ MFC อยู่ทางด้านเว้า (Concave) และ MFC อยู่ทางด้านนูน (Convex) ผลที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแผ่นเหล็กทั้งจากการทดสอบและจากแบบจำลอง FEM จึงระบุไว้ว่าเป็นของสภาวะโก่งใดเพื่อความชัดเจนในการอภิปรายผล

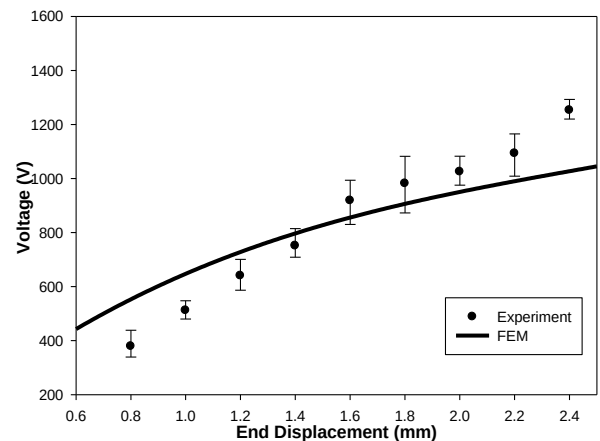
4. ผลการทดสอบ

ในขณะที่ทำการปรับระยะกดที่ปลายของแผ่นเหล็กโดยใช้เครื่อง UTM จนกระทั่งแผ่นเหล็กเกิดการโก่งเดาะพบว่าเมื่อระยะกดปลายมีค่ามากขึ้นจะทำให้ระยะโก่งมีค่ามากขึ้นด้วย ระยะโก่งสูงสุดที่จุดกึ่งกลางแผ่นเมื่อโก่งตัวทางด้านเว้าจะถูกวัดเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับเปรียบเทียบกับผลการคำนวณระยะโก่งที่ได้จากโปรแกรม ABAQUS เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 2 แสดงถึงความสอดคล้องของระยะโก่งตัวที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลอง FEM ได้เป็นอย่างดี

ผลการทดสอบในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับ MFC ที่ระยะกดต่างๆ กันเพื่อหาแรงดันแบบกึ่งสถิตย์ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องจากด้านเว้าไปด้านนูนแสดงไว้ในรูปที่ 7 จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อระยะกดปลายของแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการให้เกิดการสั่นพ้องก็มีค่ามากขึ้นด้วยเนื่องจากโครงสร้างแผ่นเหล็กมีความแข็งตึงเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อนำผลการทดสอบ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบระยะโก่งของแผ่นด้านเว้า

ระยะกด (mm)	ระยะโก่ง (mm)	
	การทดสอบ	FEM
1	9.5	10.63
1.5	12.0	13.02
2	14.0	15.03



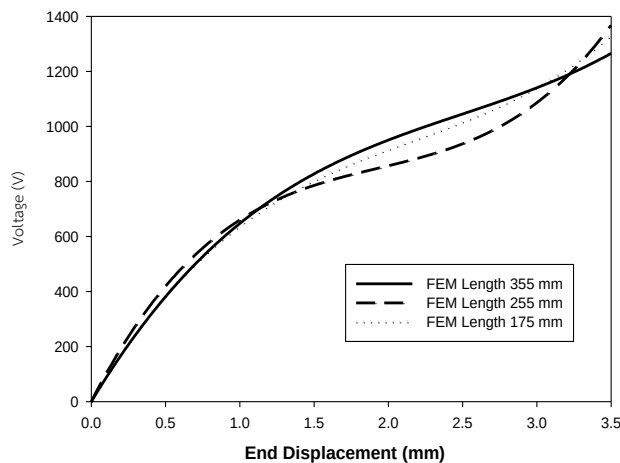
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับแรงดันคงที่ของแผ่นเหล็กยาว 355 mm

ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธี Static Riks พบว่าค่าแรงดันมีความใกล้เคียงกันเมื่อระยะกดปลายไม่เกิน 2 mm แต่แรงดันที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FEM อย่างเห็นได้ชัดเมื่อระยะกดปลายมีค่ามากกว่า 2 mm ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นผลจากความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดจึงทำให้แผ่นเหล็กมีการบิดตัวมากขึ้นเมื่อมีระยะกดปลายที่เพิ่มขึ้นและทำให้ค่าแรงดันที่ใช้ในการสั่นพ้องสูงกว่าที่คำนวณได้ นอกจากนี้ผลการคำนวณด้วยวิธี FEM ของแผ่นที่มีขนาดความยาวน้อยลงคือ 255 และ 175 mm แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการสั่นพ้องมีค่าใกล้เคียงกันกับแรงดันที่คำนวณได้เมื่อแผ่นมีขนาดความยาว 355 mm ดังแสดงในรูปที่ 8

ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าสัญญาณไซน์ที่ป้อนให้กับ MFC ในการทดสอบขั้นต้นจะใช้ความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่อยู่ในสภาวะโก่งเดาะ ซึ่งผลการคำนวณความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่มีความยาว 355 mm แสดงไว้ในรูปที่ 9 โดยที่ค่าความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กในสภาวะโก่งเดาะทางด้านเว้าของการสั่นโหมดที่ 1 โหมดที่ 2 และ โหมดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 8, 23 และ 42 Hz ตามลำดับ ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบพลวัตที่น้อยที่สุดที่ทำให้แผ่นเหล็กเกิดการสั่นพ้องจากด้านเว้าไปด้านนูนใน

บริเวณความถี่ข้างต้นแสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยความถี่ที่ให้แรงดันสแน็ปทรูที่ต่ำที่สุดในแต่ละโหมดแสดงไว้ในวงเล็บด้านหลังของค่าแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าสแน็ปทรูรูปแบบไซน์ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสแน็ปทรูแบบกึ่งสัณฐานอย่างเห็นได้ชัด ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นเหล็กที่เกิดการสั่นสะเทือนมีโมเมนต์จากการเคลื่อนที่ซึ่งช่วยให้แผ่นเหล็กเกิดการสแน็ปทรูได้ง่ายขึ้น อนึ่งค่าแรงดันสแน็ปทรูในรูปแบบสัญญาณไซน์ของโหมดที่ 3 ที่จ่ายให้กับ MFC ที่ระยะกด 2 mm ได้ระบุไว้ว่ามากกว่า 1,300 V เนื่องมาจากว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ MFC รับผิดชอบได้คือ 1,400 V ดังนั้นในการทดลองจึงจำกัดแรงดันสูงสุดไว้ที่ 1,300 V เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับ MFC

นอกจากนี้จากการทดสอบพบว่าโครงสร้างแผ่นเหล็กจะไม่เกิดการสแน็ปทรูขึ้นเลยเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ในโหมดที่ 1 สาเหตุของปรากฏการณ์นี้เกิดเนื่องมาจากรูปร่างโหมด (Mode shape) ของความถี่ธรรมชาติของโหมดที่ 1 ในรูปที่ 9 (รูปร่างคล้ายกราฟไซน์ 1 คาบ) ไม่ตรงกับรูปร่างที่คำนวณได้จากวิธี Static Riks ในช่วงที่ไม่เสถียรที่ ดังนั้นรูปร่างดังกล่าวจึงไม่ใช่รูปร่างที่เหมาะสมในการเกิดสแน็ปทรู

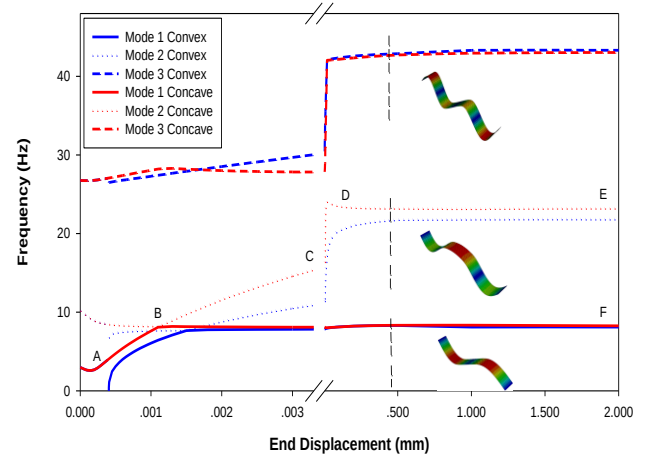


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับแรงดันของแผ่นเหล็กที่มีความยาวต่างกัน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สแน็ปทรู

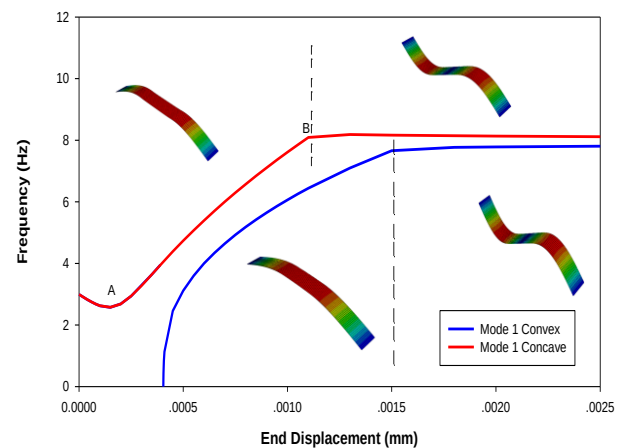
ระยะ กด (mm)	แรงดันไฟฟ้า (V)				
	แรงดัน คงที่	สัญญาณไซน์		% delta	
		mode 2	mode 3	mode 2	mode 3
1	510	238 (25)*	94 (43)*	-53.33	-81.87
1.5	855	417 (28)*	730 (46)*	-51.23	-14.62
2	1069	567 (30)*	> 1300	-46.96	-

* ความถี่ที่ใช้ในการสแน็ปทรู (Hz)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กยาว 355 mm

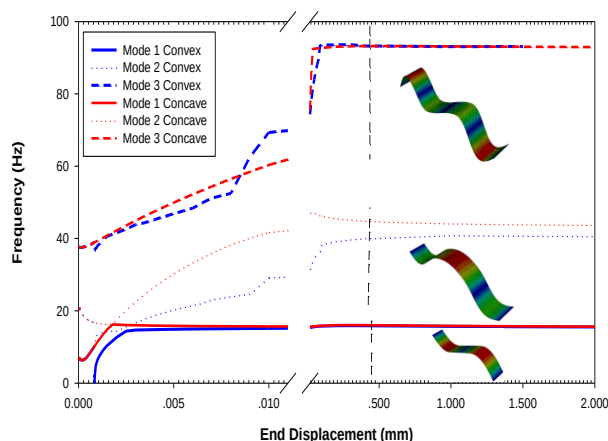
รูปที่ 9 ยังแสดงปรากฏการณ์การสลับโหมด (Mode Switching) ระหว่างโหมดที่ 1 กับ 2 และ 3 กับ 4 (โหมดที่ 4 ไม่ได้แสดงในรูป) โดยที่เมื่อเรียงตามลำดับของค่าความถี่จากน้อยไปมาก เส้นกราฟ A-B-F และ A-B-E จะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับระยะกดปลายแผ่นเหล็กในโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งในช่วง A-B ของโหมดที่ 1 มีรูปร่างโหมดคล้ายไซน์ครึ่งคาบดังแสดงในรูปที่ 10 แต่ช่วง B-F ของโหมดที่ 1 มีรูปร่างโหมดที่แตกต่างคือคล้ายไซน์หนึ่งคาบซึ่งไปตรงกับรูปร่างโหมดของความถี่โหมดที่ 2 ในช่วงต้น ส่วนช่วง B-C ในโหมดที่ 2 นั้นกลับมีรูปร่างโหมดลักษณะเดียวกันกับช่วง A-B ในโหมดที่ 1 ดังนั้นการเปลี่ยนความถี่หรือการหักมุมของกราฟที่จุด B จึงแสดงถึงจุดที่เกิดจากการสลับโหมดขึ้น (กราฟของโหมดที่ 3 ในรูปที่ 9 มีจุดหักมุมที่บริเวณระยะกดปลาย 0.001 mm เช่นเดียวกัน)



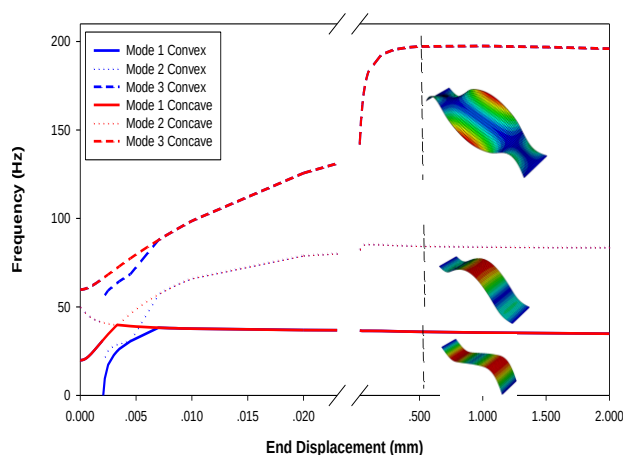
รูปที่ 10 ความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กยาว 355 mm เมื่อมีระยะกดน้อยๆ

ยิ่งไปกว่านี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณในรูปที่ 9 มีแนวโน้มที่คงที่เมื่อปลายของแผ่นเหล็กถูกกดมากกว่า 0.1 mm ขึ้นไป แต่สำหรับช่วงที่มีระยะกดต่ำๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10 ความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่โก่งเดาะด้านเว้าจะมีแนวโน้มสูงขึ้นจาก 3 Hz เมื่อระยะกดปลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 mm แต่สำหรับคานที่โก่งเดาะด้านนูนความถี่ธรรมชาติจะเพิ่มจาก 0 Hz ที่ระยะกด 0.0004 mm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการโก่งเดาะด้านนูนจะไม่เกิดขึ้นก่อนที่คานมีระยะกดปลาย 0.0004 mm ดังนั้นจึงสามารถระบุได้ว่าที่ระยะกดนี้แผ่นเหล็กจะโก่งเดาะและมีรูปร่างของแผ่นที่เกิดจากการโก่งเดาะขึ้นได้สองรูปร่าง (ทางด้านนูนและด้านเว้า) เมื่อมีระยะกดปลายมากกว่า 0.0004 mm

ผลการจำลองทาง FEM ของแผ่นเหล็กที่มีขนาดความยาว 255 และ 175 mm พบว่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณทาง FEM มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับแผ่นเหล็กที่มีขนาด 355 mm และมีแนวโน้มไปในทิศ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กยาว 255 mm



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดกับความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กยาว 175 mm

ทางเดียวกันแต่ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จะมากกว่าแผ่นเหล็กขนาด 355 mm ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 เนื่องจากแผ่นเหล็กที่มีขนาดสั้นกว่าจะมีความแข็งตึงมากกว่าเมื่อมีจุดรองรับหรือจุดยึดเหมือนเดิม และด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้รูปร่างโหมดของความถี่โหมดที่ 3 ของแผ่นเหล็กที่มีความยาว 175 mm ที่แสดงในรูปที่ 12 เป็นโหมดการบิดแทนที่จะเป็นโหมดการดัดเหมือนกับที่แสดงในรูปที่ 10 และ 11

5. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสั่นพ้องในแผ่นเหล็กที่เกิดการโก่งเดาะโดยทำการศึกษาทั้งด้วยวิธีการทดสอบและด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาพบว่าแรงดันคงที่ที่ทำให้แผ่นเหล็กติด MFC เกิดการสั่นพ้องเพิ่มขึ้นตามระยะกดปลาย ส่วนแรงดันสัญญาณไซน์ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องนั้นขึ้นอยู่กับระยะกดปลายและความถี่ของสัญญาณที่สัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่ใช้ทดสอบ ผลจากการทดสอบพบว่าที่ความถี่ธรรมชาติค่าเดียวกันแรงดันไฟฟ้าสัญญาณไซน์ที่ใช้ในการสั่นพ้องมีขนาดสูงขึ้นเช่นเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าคงที่เมื่อระยะกดปลายมีค่ามากขึ้น และแรงดันไฟฟ้าสัญญาณไซน์ที่ใช้ในการสั่นพ้องโดยส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าแรงดันคงที่ นอกจากนี้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาทำนายความถี่ธรรมชาติของแผ่นเหล็กที่อยู่ในสภาวะโก่งเดาะ ซึ่งจากการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติอย่างละเอียดสามารถระบุระยะกดที่ทำให้โครงสร้างแผ่นเหล็กที่ติด MFC เกิดการโก่งเดาะอย่างสมบูรณ์ และยังสามารถระบุโหมดของความถี่ธรรมชาติที่ทำให้แผ่นเหล็กเกิดการสั่นพ้องแบบพลวัตได้ด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณวันฉัตร สังข์ทอง นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่อง UTM อย่างถูกต้องและปลอดภัย นอกจากนี้ผู้เขียน ขอขอบคุณ คุณณัฐวุฒิ สรรพโสภิต คุณพัชณีนัน พุฒินัน เมธา และคุณธนศตริรัตน์สกุลชัย สำหรับการสร้าง ชิ้นงานและให้คำแนะนำในการจัดตั้งอุปกรณ์ทดสอบซึ่งทำให้การดำเนินการวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Oh, I.K., Han, J.H., and Lee, I. (2000). Postbuckling and vibration characteristics of piezolaminated composite plate subject to thermo-piezoelectric load, *J. Sound Vib.*, 233, 19–40.
- [2] Schultz, M.R. (2005). A new concept for active bistable twisting structures 12th *SPIE Ann. Conf. on Smart Structures and Materials*.
- [3] Vangbo, M. (1997). An analytical analysis of a compressed bistable buckled beam, *Sens. Actuators A*, 69, 212–6.
- [4] Jensen, B.D. and Howell, L.L. (2004). Bistable configurations of compliant mechanisms modeled using four links and translation joints, *J. of Mech. Des.*, 126, 657-666.
- [5] Brenner, M.P., Lang, J., Li, J., Qiu, J., and Slocum, A. (2003). Optimal design of a bistable switch, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 100, 9663-9667.
- [6] ABAQUS Theory Manual Version 6.7. (1998). Habbitt, Karlsson, & Sorenson, Inc