บทความวิจัย

# การศึกษาและทดสอบการนำไปใช้ของเปลือกอาคารแผ่นพับแบบพลิกกลับ

ภูริน หล้าเตจา*
ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พงษ์ศักดิ์ วิชัยโย
บริษัท อีเอ็นดับบลิวพี คอนซัลแตนท์ จำกัด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 2890 3659 อีเมล: purin.l@archd.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.11.004
รับเมื่อ 15 มิถุนายน 2564 แก้ไขเมื่อ 3 กันยายน 2564 ตอบรับเมื่อ 21 กันยายน 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 3 พฤศจิกายน 2566
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**บทคัดย่อ**

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเสนอแนวทางในการออกแบบและนำไปใช้แผ่นผนังพับจากสองมิติ (2D) เป็นสามมิติ (3D) ด้วยวัสดุที่มีแผ่นบางและมีรูปแบบการพับในลักษณะแบบพลิกกลับ กระบวนการศึกษาหลักการพับได้รับแรงบันดาลใจจากโอริกามิ ศิลปะการพับกระดาษของญี่ปุ่น เริ่มจากรูปแบบพื้นฐาน คือ การพับแบบภูเขาและพับแบบหุบเขา สู่การพับแบบพลิกกลับไปจนไปถึงการพับที่ซับซ้อนคือการพับแบบพลิกกลับแนวทแยง และเพื่อที่จะทราบศักยภาพของโครงสร้างแผ่นพับแบบพลิกกลับ ทีมผู้วิจัยด้านสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมโครงสร้างได้ทดสอบเปรียบเทียบตัวอย่างการพับแต่ละรูปแบบเกี่ยวกับรูปแบบการแอ่นตัวและความสามารถในการรับน้ำหนักด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามมิติ ผลการวิจัยพบว่า ในขนาดพื้นที่ที่เท่ากันรูปแบบการพับแบบพลิกกลับทั้งแบบตรงและแบบทแยงมีความแข็งแรงกว่ารูปแบบการพับแบบลอนลูกฟูกปกติ โดยในท้ายที่สุดได้นำผลวิจัยนี้ไปใช้ต่อยอดกับการออกแบบสถาปัตยกรรม ด้วยวัสดุแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตเรียบแบนสองมิติไปสู่การพับขึ้นรูปทรงสามมิติของเปลือกผนังอาคาร

**คำสำคัญ**: โอริกามิ สถาปัตยกรรมพับ เปลือกอาคาร การพับแบบพลิกกลับ

การอ้างอิงบทความ: ภูริน หล้าเตจา และ พงษ์ศักดิ์ วิชัยโย, "การศึกษาและทดสอบการนำไปใช้ของเปลือกอาคารแผ่นพับแบบพลิกกลับ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 4, หน้า 1–10, เลขที่บทความ 234-235158, ต.ค.–ธ.ค. 2566.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 33 ฉบับที่ 4 ต.ค.–ธ.ค. 2566
*The Journal of KMUTNB., Vol. 33, No. 4, Oct.–Dec. 2023*

Research Article

# The Study and Test the Implementation of the Reverse Folding Building Façade

Purin La-teja*
Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
Phongsak Vichaiyo
ENWP Consultant Co.,Ltd., Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 2890 3659, E–mail: purin.l@archd.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.11.004
Received 15 June 2021; Revised 3 September 2021; Accepted 21 September 2021; Published online: 3 November 2023
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**Abstract**

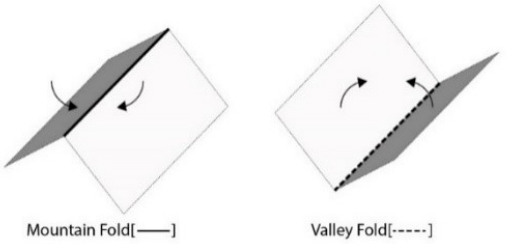
This paper proposes a guideline for designing and implementing a two-dimensional (2D) to three-dimensional (3D) folded wall panel with thin sheet material and a reverse folding pattern. The study framework was inspired by folding principles of "origami" which is the Japanese art of paper folding. The origami folds begin with the basic folding such as mountain and valley, then to the reverse and complex folding such as diagonal reverse fold in order to understand the potential of reversible folding in structures. The architectural and structural engineering researchers compared samples of each folding form, i.e. the deflection pattern and load capacity with a three-dimensional computer program. The results illustrated that both straight and diagonal reverse folding patterns were more substantial at the same area size than standard zigzag folding patterns. Finally, the results of this research were applied to other architectural designs with two-dimensional flat aluminum composite panel material to fold the three-dimensional shape of the building facade.

**Keywords**: Origami, Folding Architecture, Building Façade, Revers Fold

Please cite this article as: P. La-teja and P. Vichaiyo, "The study and test the implementation of the reverse folding building façade," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 4, pp. 1–10, ID. 234-235158, Oct.–Dec. 2023 (in Thai).

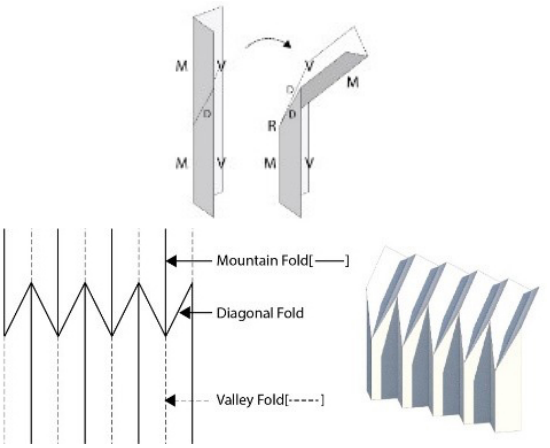
## 1. บทนำ

เทคนิคการพับ หรือที่เรียกว่า โอริกามิ เป็นศิลปะการพับกระดาษที่มีรากฐานมาจากจีนและญี่ปุ่นโบราณเป็นการผสมผสานระหว่างคำภาษาญี่ปุ่น “Oru” แปลว่า การพับ และ “Kami” แปลว่า กระดาษ ในประวัติศาสตร์ของญี่ปุ่นไม่มีการบันทึกว่าโอริกามิกำเนิดขึ้นเมื่อใด แต่สันนิษฐานว่าน่าจะเกิดขึ้นมาแล้วหลายร้อยปี เนื่องจากปรากฏเพียงภาพอายุ 700 ปี ของ “Noshi” ซึ่งเป็นการพับกระดาษเป็นเครื่องรางที่เชื่อว่าจะนำความโชคดีมาให้ เดิมทีการพับกระดาษของชาวญี่ปุ่นจะใช้ในการประกอบพิธีกรรมทางศาสนาเท่านั้น เนื่องจากระดาษมีราคาแพง จนกระทั่งสมัยเอโดะ (ค.ศ. 1603–1868) กระดาษเริ่มมีราคาถูกลง โอริกามิจึงเริ่มแพร่หลายในหมู่คนทั่วไปในที่สุด [1] โดยหากค้นหารูปแบบของการพับเรามักจะพบกับความหลากหลาย แต่ความเป็นจริงพื้นฐานของการพับมีเพียง 2 รูปแบบเท่านั้น คือ การพับภูเขา (Mountain fold) คือการพับกระดาษที่เป็นสัน และในทางกลับกันการพับแบบหุบเขา (Valley Fold) คือการพับกระดาษที่สร้างร่องลึก [2] ดังรูปที่ 1




**รูปที่ 1** การพับแบบหุบเขาและการพับแบบภูเขา

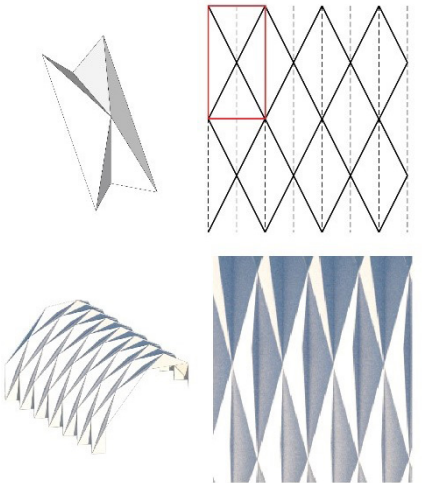
การพับแบบพลิกกลับ (Reverse Fold) คือ การพับขึ้นลงที่ต่อเนื่องแบบสันพลิกกลับเป็นร่อง เป็นหนึ่งในเทคนิคพื้นฐานของโอริกามิ การพับลักษณะนี้สามารถสร้างการเปลี่ยนมุมกลับตรงข้ามได้ ในรูปที่ 2 แสดงการใช้รอยพับในแนวทแยงข้ามพลิกกลับจากภูเขา (M) ไปยังหุบเขาพับ (V) ที่จุดผกผันรอยพับด้านในแนวทแยงสองเส้นจะวิ่งไปที่ขอบพับขนาน รอยพับทั้งสี่มาบรรจบกันที่จุดเบี่ยงเบน (R) มุมของการเบี่ยงเบน ขึ้นอยู่กับการเปิดมุมของรอยพับหลัก (M) และรอยพับหลักผกผัน (V) และรอยพับด้านทแยงมุม (D) โดยหลักการพับแบบพลิกกลับนี้เมื่อนำปรับใช้หรือทำซ้ำก็จะสามารถสร้างรูปแบบอื่นๆ ขึ้นได้อีก เช่น การพับแบบเพชร การพับแบบทแยงมุม เป็นต้น



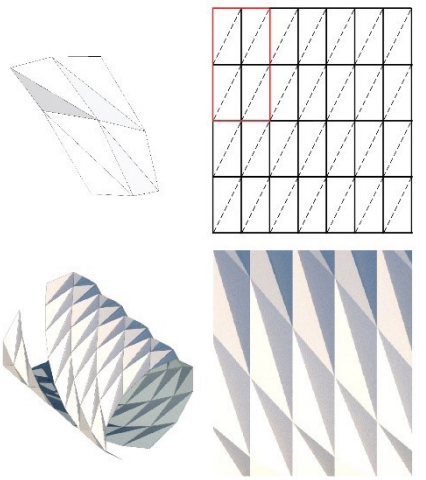

**รูปที่ 2** การพับแบบพลิกกลับ (Reverse Fold)

การพับแบบเพชรหรือที่เรียกอีกอย่างว่าการพับแบบลายโยชิมูระ โดยได้รับการตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นที่สังเกตเห็นว่ากระบอกสูบที่มีผนังบางแสดงรูปแบบการโก่งแบบนี้ภายใต้การบีบอัดตามแนวแกน [3] หากในรูปแบบเพชรปกติเส้นทแยงมุมขนานทั้งหมดของทิศทางเดียวจะพับเป็นรอยพับของหุบเขาและขอบเท่าภูเขาจะได้รูปทรงกระบอก รูปแบบนี้สามารถหาได้จากการสะท้อนการพับย้อนกลับที่จุดเปลี่ยนทิศทาง (R) และที่จุดฐานของรอยพับด้านข้าง (D) เส้นทแยงมุมของเพชรจะเทียบเท่ากับรอยพับหลักของรอยพับย้อนกลับและขอบของเพชรกับ รอยย่นด้านข้าง ความโค้งของรูปแบบการพับถูกกำหนดโดยรูปทรงของเพชรโดยใช้มุมระหว่างเส้นทแยงมุมของเพชรกับขอบมุมทำให้เกิดการโค้งงอของรูปแบบ ดังรูปที่ 3

การพับแบบทแยงมุม พื้นฐานของรูปแบบนี้ คือ สี่เหลี่ยมด้านขนานพับในแนวทแยง ขอบจะหันขึ้นในแนวทแยงมุม ชุดของขนานที่พับดังนั้นจึงเป็นรูปแบบการพับที่บิดโค้งแบบขดลวด [4] รูปแบบเพชรและแนวทแยงมีลักษณะใกล้เคียงกันแตกต่างกันโดยข้อเท็จจริงที่ว่ารอยพับของรูปแบบเพชรเป็นเส้นหลายเหลี่ยมระนาบในขณะที่รอยพับของรูปแบบทแยงเป็นรูปแบบเส้นหลายเหลี่ยมแบบขดเกลียว ดังรูปที่ 4



**รูปที่ 3** การพับรูปแบบเพชร (Diamond Fold)



**รูปที่ 4** การพับรูปแบบทแยงมุม (Diagonal Fold)

โอริกามิเป็นแรงบันดาลใจให้การออกแบบสิ่งต่างๆ มากมาย ตั้งแต่ของชิ้นเล็กเช่น การพับเป็นรูปสิ่งของ หรือรูปทรงต่างๆ ไปจนถึงวัตถุขนาดใหญ่ในอวกาศที่ได้นำหลักการพับของโอริกามิไปใช้เป็นแนวคิดในสร้างใบเรือพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับดาวเทียมที่สามารถบรรจุในรูปทรงขนาดกะทัดรัดและขยายกางออกได้ในภายหลัง [5] ในส่วนการออกแบบสถาปัตยกรรมก็เช่นกันที่มักได้แรงบันดาลใจจากโอริกามิเพราะนอกเหนือจากเหตุผลเรื่องความสวยงามที่ทำให้เกิดการเกิดมิติของแสงเงาที่น่าสนใจ เทคนิคการพับกระดาษนี้ยังสามารถทำให้เกิดโครงสร้างทางวิศวกรรมที่สร้างสรรค์ซึ่งมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากโอริกามินั้นเป็นเทสเซลเลชัน (Tessellation) รูปแบบหนึ่ง คือ มีลักษณะการต่อกันของรูปเรขาคณิตแบบลงตัวไม่มีช่องว่างระหว่างรอยต่อ [6] แต่เป็นในลักษณะเทคนิคการพับ และรูปแบบที่พับแล้วจะมีความแข็งแรง กระดาษพับแบบเทสเซลเลชันจะสร้างมิติรูปทรง ซึ่งมีความน่าสนใจเป็นพิเศษทั้งในด้านของรูปแบบและโครงสร้าง จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้ในการออกแบบสถาปัตยกรรม [7] โดยการพับของโอริกามิมีลักษณะเด่นที่น่าสนใจแตกต่างจากการพับแบบปกติทั่วไปดังที่กล่าวมา คือ เทคนิคการพับแบบพลิกกลับการสลับด้านของการพับจากการพับเข้าเปลี่ยนเป็นพับออกนี้เองที่สร้างความต่อเนื่องให้ยังคงอยู่ ส่วนที่เคยเป็นสันกลับกลายเปลี่ยนเป็นร่องต่อเนื่องสลับกันทำให้เกิดสร้างการรับรู้แบบยุบเข้าในและพุ่งออกนอกไปพร้อมๆ กัน

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเสนอแนวทางในการพัฒนาการออกแบบเปลือกผนังอาคารสามมิติด้วยการพับแผ่นวัสดุสองมิติและมีรูปแบบการพับแบบพลิกกลับโดยการผสมผสานด้านเรขาคณิตเทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมเข้าด้วยกัน เป้าหมายของส่วนแรกของการวิจัย คือ การระบุรูปแบบการพับที่น่าสนใจซึ่งมีศักยภาพที่จะเปลี่ยนเป็นเปลือกผนังอาคารแผ่นพับที่ทำด้วยวัสดุแผ่นบาง ส่วนที่สองของการศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อความเข้าใจเชิงวิเคราะห์เกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตของรูปแบบการพับที่เลือกโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและตรวจสอบความแข็งแรง ดังนั้นวิธีการสร้างแบบจำลองรูปทรงเรขาคณิตของการพับจึงควรใกล้เคียงกับกระบวนการออกแบบของส่วนประกอบทางสถาปัตยกรรมจริง ทั้งในเรื่องการกำหนดลักษณะรูปแบบการติดตั้งที่คำนึงถึงรอยต่อในแต่ละแผ่นพับและส่วนสำหรับการวางตำแหน่งจุดรองรับ วิธีการที่กำหนดไว้นี้ช่วยให้สามารถสร้างรูปแบบการรับรู้ที่ซับซ้อนแต่ติดตั้งประกอบสำหรับการก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็วซึ่งสามารถปรับให้เข้ากับโครงการเฉพาะได้

ในท้ายที่สุดการเปลี่ยนรูปแบบจากสองมิติเป็นสามมิติของการสร้างแบบจำลองด้วยแผ่นกระดาษได้ปรับเปลี่ยนไป

สู่การเลือกใช้แผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตในการก่อสร้างส่วนเปลือกผนังอาคารจริง โดยด้วยความร่วมมืออย่างใกล้ชิดกับวิศวกรโครงสร้างในการออกแบบการเชื่อมต่อและจุดรับน้ำหนักโครงสร้างซึ่งได้รับการประเมินโดยการทดสอบการรับแรงจากในผลลัพธ์ของงานวิจัย

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การกำหนดรูปแบบการพับเพื่อทดสอบ

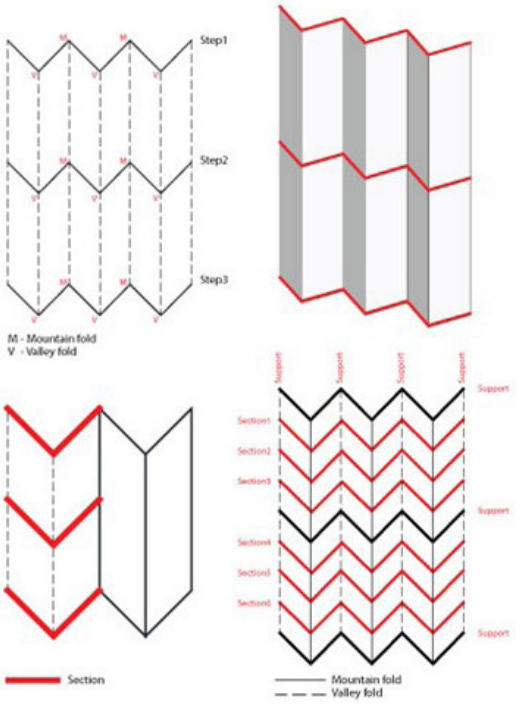
ทดสอบการพับ 3 รูปแบบ คือ การพับแบบลูกฟูกขนาน ซึ่งเป็นลักษณะการพับพื้นฐาน การพับแบบพลิกกลับซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโอริกามิ และการพับแบบพลิกกลับแนวทแยงซึ่งเป็นการรวมกันของทั้ง 2 รูปแบบ โดยกำหนดให้ทั้งหมดทุกแบบมีขนาดที่เท่ากัน และมีจุดรับน้ำหนักแบบเดียวกัน เพื่อทดสอบหารูปแบบการพับที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้กับการออกแบบเปลือกภายนอกอาคาร (Facade)

2.1.1 แบบลูกฟูกขนาน

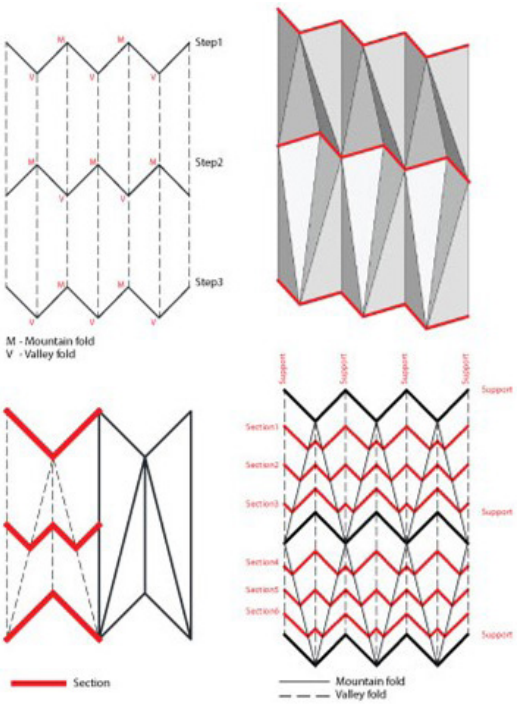
เป็นรูปแบบพื้นฐานของการพับแบบทั่วไป เป็นการขึ้นรูปของเส้นซิกแซกตามแนวเส้นตรง เป็นการพับแบบเข้าออกสลับไปมา ลักษณะการพับแบบนี้สามารถพบได้โดยทั่วไปในระบบอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น หลังคาและผนังเหล็กรีดลอน (Metal Sheet) โดยการพับแบบลูกฟูกขนานนี้จะมีลักษณะรอยตัดที่สม่ำเสมอเหมือกันตลอดแนวตั้งแต่ต้นถึงปลาย ไม่ว่าจะตัดในบริเวณใดเนื่องจากเป็นการพับในทิศทางเดียว เมื่อนำมาต่อกันจุดภูเขาและหุบเขาจะเชื่อมต่อตรงกันตามแนวดิ่งตลอดแนว ดังรูปที่ 5

2.1.2 การพับแบบพลิกกลับ

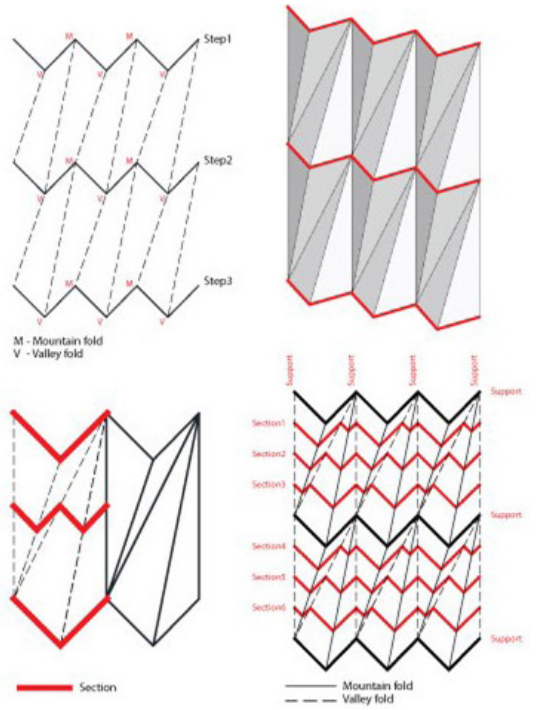
การพับแบบพลิกกลับเป็นรูปแบบการพับแบบโอริกามิรูปแบบเพชรที่มีการเชื่อมต่อกลับด้านจากภูเขาเป็นหุบเขาเป็นลักษณะการสะท้อนกลับจากการพับเข้าเป็นพับออกในระนาบเดียวกัน ทำให้เกิดการแบ่งจำนวนของรอยหยักการพับที่เพิ่มขึ้นจาก 1 พับ เป็น 2 พับ ในช่วงกลางแผ่น เมื่อนำมาต่อกัน การพับแบบพลิกกลับนี้จะมีลักษณะการต่อแบบกลับด้านสลับกัน โดยจะทำให้เกิดการรวมตัวพุ่งออกและหุบเข้าของภูเขาและหุบเขาที่มากขึ้นอันเป็นผลจากการกลับด้านของการพับ ดังรูปที่ 6




**รูปที่ 5** การพับแบบลูกฟูกขนาน




**รูปที่ 6** การพับแบบพลิกกลับ



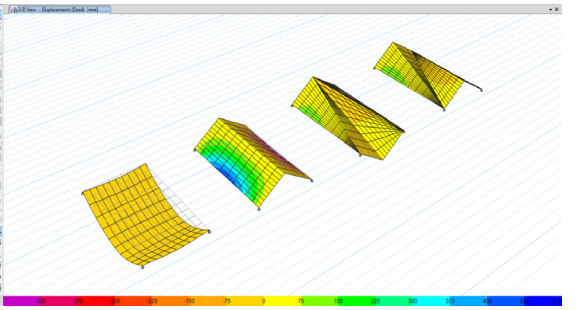

**รูปที่ 7** การพับแบบพลิกกลับแนวทแยง

2.1.3 การพับแบบพลิกกลับแนวทแยง

เป็นการรวมกันของรูปแบบการพับแบบลูกฟูกขนานและการพับแบบพลิกกลับ คือมีจุดต้นและจุดปลายที่หันไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดียวกับการพับแบบลูกฟูกขนาน แต่ในแนวทแยงมีการสลับกลับด้านของภูเขาและหุบเขาเช่นเดียวกับแบบการพับแบบพลิกกลับเพียงแต่เปลี่ยนจากแนวตรงกึ่งกลางมาเป็นแนวทแยงจากมุม และระหว่างกลางแผ่นมีจำนวนรอยหยักจากการพับที่เพิ่มขึ้นจาก 1 พับ เป็น 2 พับ ภาพรวมออกมาจึงมีลักษณะเหมือนว่าซับซ้อนเนื่องจากลวดลายแต่แท้จริงง่ายต่อการนำไปเรียงติดตั้งเพราะไม่ต้องสลับด้าน โดยเมื่อนำมาต่อกันยังสามารถคงองค์ประกอบของแนวต่อตรงปกติเพราะจุดต้นและจุดปลายเหมือนกัน แต่เมื่อต่อกันเรียบร้อยแล้วจะปรากฏการรับรู้ของสายตาในแนวทแยงที่ต่อเนื่องกันเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7

## 2.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

ทดสอบคุณสมบัติการพับทั้ง 3 รูปแบบ เปรียบเทียบกับแผ่นเรียบตรงปกติ เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของความแข็งแรง โดยกำหนดวัสดุเป็นแผ่นเหล็กบาง มีจุดยึดเพื่อถ่ายน้ำหนักที่มุมทั้ง 4 ด้าน โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ คือ ETABS ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบอาคาร [8] ด้วยการวิเคราะห์แบบไฟไนต์อิลิเมนต์ เพราะมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์หลักการของแผ่นพับที่แม้จะมีพื้นผิวคนละระนาบแต่ก็เป็นแผ่นเดียวเชื่อมต่อกันทั้งหมด นำเสนอเครื่องมือการสร้างแบบจำลองวัตถุโดยกำหนดคุณสมบัติและขนาดตามตารางที่ 1



**รูปที่ 8** ลักษณะการแอ่นตัว ของแผ่นพับแบบเดี่ยว

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติของแผ่นเหล็ก (Steel Plate)

| คุณสมบัติของแผ่นเหล็ก (Steel Plate) | ขนาด |
|---|---|
| 1) ความหนาวัสดุ | 0.5 มม. |
| 2) ความกว้าง | 1 ม. |
| 3) ความยาว | 1.5 ม. |
| 4) ความสูง (การพับ) | 0.5 ม. |

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ผลการทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ แบบแยกเดี่ยวแผ่นเดียวแล้วพับขึ้นรูป กำหนดขนาด กว้าง 1 เมตร ยาว 1.5 เมตร มีจุดรับน้ำหนัก 4 จุด บริเวณมุม ดังรูปที่ 8 และแบบต่อเป็นชุดที่ให้แต่ละการพับมีความต่อเนื่องกันเป็นเหมือนผืนผนัง ขนาดรวม กว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตร มีจุดรับน้ำหนัก 12 จุด กระจายตามช่วง เปรียบเทียบกับแบบแผ่นเรียบขนาดเท่ากันและจุดรับน้ำหนักในตำแหน่งเดียวกัน ดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 2** ผลการทดสอบการแอ่นตัวของแผ่นพับแบบเดี่ยว

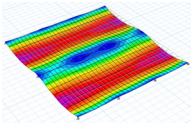
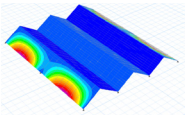
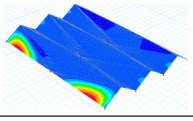
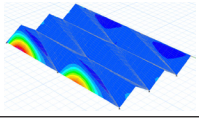
| ค่าแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวแผ่น | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **แผ่นพับแบบเดี่ยว** | **Ux** | **Uy** | **Uz** | **เปรียบเทียบคุณลักกษณะของแผ่น** |
| 1) แบบแผ่นเรียบปกติ | 0 | 0 | –509.83 | 1 |
| 2) แบบลูกฟูกขนาน | 13.05 | 0 | –15.59 | 0.029 |
| 3) แบบพลิกกลับ | 3.26 | 0 | –4.94 | 0.009 |
| 4) แบบพลิกกลับแนวทแยง | 3.52 | 0 | –5.35 | 0.010 |

3.1.1 แบบแผ่นเดี่ยว

พิจารณาการแอ่นตัวแบบแผ่นเดียว (Single Sheet) ทั้ง 3 รูปแบบ เปรียบเทียบกับแผ่นเรียบปกติ โดยพิจารณาค่าการแอ่นตัวแนวดิ่ง (Uz) พบว่า รูปแบบการพับแบบลูกฟูกมีค่าการแอ่นตัวมากที่สุด (1 : 0.029) รูปแบบการพับแบบพลิกกลับและรูปแบบการพับแบบพลิกกลับแนวทแยง มีค่าการแอ่นตัวน้อยที่สุดและใกล้เคียงกัน (1 : 0.009 และ 1 : 0.010) ดังตารางที่ 2

3.1.2 แบบแผ่นหลายแผ่นประกอบกัน

**ตารางที่ 3** รูปแบบการแอ่นตัวของแผ่นพับแบบต่อเป็นชุดประกอบกันทั้ง 3 แบบ เทียบกับแผ่นเรียบ

| **รูปแบบ** | **ลักษณะการแอ่นตัว** |
|---|---|
| 1) แผ่นเรียบปกติ |  |
| 2) การพับแบบลูกฟูกขนาน |  |
| 3) การพับแบบพลิกกลับ |  |
| 4) การพับแบบพลิกกลับแนวทแยง |  |

**ตารางที่ 4** ผลการทดสอบการแอ่นตัวของแผ่นพับแบบต่อเป็นชุดประกอบกัน

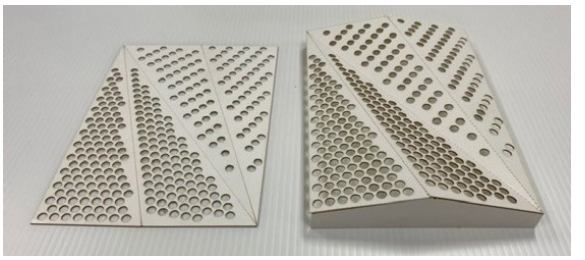
| ค่าแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักตัวแผ่น | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **แผ่นพับแบบต่อเป็นชุดประกอบกัน** | **Ux** | **Uy** | **Uz** | **เปรียบเทียบคุณลักกษณะของแผ่น** |
| 1) แบบแผ่นเรียบปกติ | 0 | 0 | –227.48 | 1 |
| 2) แบบลูกฟูกขนาน | 17.61 | 0 | –26.43 | 0.11 |
| 3) แบบพลิกกลับ | 3.38 | 0 | –5.10 | 0.022 |
| 4) แบบพลิกกลับแนวทแยง | 3.65 | 0 | –5.54 | 0.024 |

เมื่อมีความต่อเนื่องระหว่างกันทำให้เกิดความแข็งแรงที่มากขึ้น พิจารณาการแอ่นตัวแบบแผ่นผืน (Multi Sheet) จากการพับทั้ง 3 รูปแบบ เปรียบเทียบกับแผ่นเรียบปกติ โดยพิจารณาค่าการแอ่นตัวแนวดิ่ง (Uz) พบว่า หากเทียบกับแผ่นเรียบปกติ การพับแบบลูกฟูกให้แอ่นตัวที่น้อยกว่า (1 : 0.11) แต่การพับแบบพลิกกลับและการพับแบบพลิกกลับแนวทแยงนั้นมีความแข็งแรงกว่ามากเมื่อพิจารณาจากค่าการแอ่นตัว (1 : 0.022 และ 1 : 0.024) ดังตารางที่ 4

### 3.2 ต้นแบบจำลองขนาดเล็ก

การสร้างต้นแบบมีเป้าหมายเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของโครงสร้างกระดาษพับตามรูปทรงเรขาคณิตที่นำเสนอ ทดลองตามกระบวนการสร้างเปลือกอาคารเริ่มจากการสร้างชิ้นงานรูปแบบสองมิติ แล้วจึงพับให้เป็นสามมิติ จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ของการต่อแต่ละหน่วยเข้าหากันเพื่อศึกษารอยต่อระหว่างกันของแต่ละชิ้นงานและปรับความหนาของมิติให้พอดีกับความหนาผนังอาคารสำนักงานโดยทั่วไป คือ ระหว่าง 10–20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 9

สร้างหุ่นจำลองขนาดมาตราส่วน 1 : 10 กำหนดขนาดต่อหน่วย กว้าง 100 เซนติเมตร สูง 150 เซนติเมตร หนา 10 เซนติเมตร แล้วนำมาติดตั้งต่อกันเป็นผืนผนัง โดยกำหนดจุดยึดเพื่อรับน้ำหนักไว้ 4 จุด ในบริเวณมุมของแต่ละชิ้นงาน ผลที่ได้คือ แม้จะมีการกำหนดความแตกต่างของความสูงต่ำ



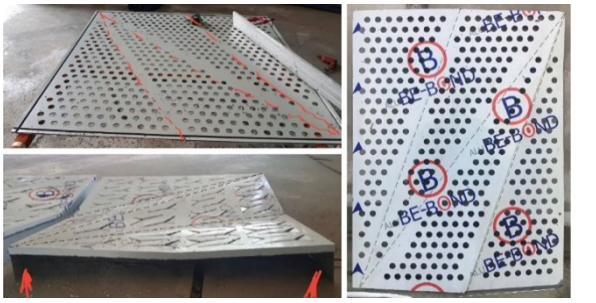
**รูปที่ 9** หุ่นจำลองกระดาษแบบสองมิติก่อนและสามมิติหลังการพับขึ้นรูป

**รูปที่ 10** การพับขึ้นรูปแบบต่อประกอบรวม

จากการพับที่น้อยแต่เมื่อนำมาต่อกันก็ยังคงเห็นลักษณะของการพับที่ต่อเนื่องได้ ดังรูปที่ 10

### 3.3 จากกระดาษพับสู่เปลือกผนังอาคารภายนอก

ด้วยความร่วมมือกับบริษัทกิจรุ่งโรจน์เจริญยนต์ ผู้ดำเนินธุรกิจยานยนต์ที่ต้องการปรับปรุงสำนักงานใหม่ในจังหวัดนครปฐม รูปแบบเปลือกผนังอาคารพับแบบพลิกกลับแนวทแยงได้ถูกพิจารณาว่ามีความเหมาะสมมากกว่าเพราะนอกเหนือจากเรื่องของความแข็งแรงแล้ว เส้นสายแนวทแยงของรูปทรงสามเหลี่ยมเอียงให้ความรู้สึก

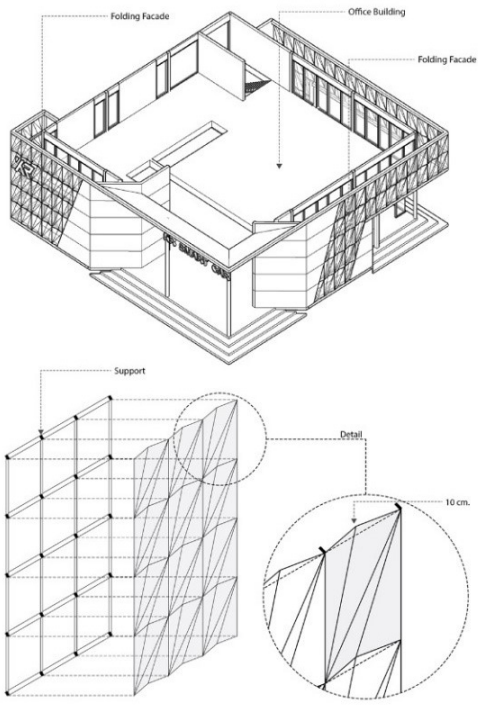


**รูปที่ 11** แผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตสองมิติก่อนและสามมิติหลังพับขึ้นรูป

**รูปที่ 12** การวางแนวรอยต่อระหว่างแผ่นพับแต่ละชิ้นก่อนติดตั้งกับอาคาร

ที่มีพลวัต (Dynamic) เคลื่อนไหวจึงมีความเข้ากันได้กับภาพลักษณ์ที่เกี่ยวกับธุรกิจยานยนต์ได้ดีกว่า การเลือกวัสดุและเทคนิคที่เหมาะสมถูกพิจารณาจากวัสดุที่มีความคล้ายคลึงกับกระดาษที่แม้จะมีการพับแบ่งแล้วแต่ก็ยังเป็นพื้นผิวชิ้นเดียวกัน ดังรูปที่ 11 สุดท้ายแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตถูกเลือกให้นำมาใช้สำหรับโครงการนี้ เนื่องด้วยความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา อีกทั้งยังมีความเงาวาวสวยงาม และสามารถกรีดร่องพับและเจาะรูได้จากโรงงาน ด้วยเครื่อง CNC ทำการกรีดร่องตัว V บนแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต โดยที่ยังคงความเป็นแผ่นเดียวกันไม่ขาดจากกัน จากนั้นจึงพับขึ้นรูป 3 มิติ ตามจำนวนที่ต้องการ ก่อนนำไปติดตั้งกับจุดยึดรับตามตำแหน่งที่ได้เตรียมไว้ในหน้างานก่อสร้าง ดังรูปที่ 12

ผู้วิจัยเสนอการใช้ผนังอาคารแบบซ้อนกัน 2 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยเว้นเป็นที่ว่างระหว่างกลางของผนังชั้นในและผนังชั้นนอกเพื่อทำหน้าที่กันความร้อนไม่ให้เข้าสู่อาคารโดยตรง ผนังชั้นในส่วนที่เป็นพื้นที่สำนักงานเป็นวัสดุผนัง




**รูปที่ 13** รูปแบบและวิธีการติดตั้งเปลือกผนังพับ ในส่วนผนังชั้นนอก

เหล็กรีดลอนภายในใส่ฉนวนกันความร้อน และผนังชั้นนอกเป็นเปลือกอาคารแผ่นพับแบบพลิกกลับแนวทแยงแบบเจาะรู ทำหน้าที่กรองแสงแดดจากภายนอกและสร้างภาพลักษณ์ใหม่แก่สำนักงาน เมื่อติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ผลที่ได้คือผนังอาคารที่มีความสูงต่ำของพื้นผิวที่เงาวาว มีมิติของการพับแบบลื่นไหลต่อเนื่องยาวตลอดรอบตัวอาคาร และมีความสามารถรับแรงได้อย่างดี ดังรูปที่ 14

## 4. อภิปรายผลและสรุป

จากการศึกษาและทดสอบการนำไปใช้ของเปลือกอาคารแผ่นพับแบบพลิกกลับ ได้แบ่งข้อสรุปออกเป็น 3 ประเด็น ได้แก่

### 4.1 การใช้รูปแบบการพับแบบพลิกกลับกับเปลือกอาคาร

สำหรับงานสถาปัตยกรรม การนำเทคนิคการพับแบบพลิกกลับไปใช้ในงานออกแบบเปลือกอาคารไม่เพียงแต่จะมี

**รูปที่ 14** เปลือกอาคารแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตพับแบบพลิกกลับแนวทแยงเมื่อติดตั้งกับอาคารเรียบร้อยแล้ว

ความสวยงามแต่ยังคงผสานเรื่องความแข็งแรงไว้ด้วยเพราะนอกเหนือจากรูปทรงการพับแบบสามมิติที่มีความต่อเนื่องน่าสนใจ มีระนาบที่สูงต่ำแตกต่างกันแต่ต่อเนื่องกันของแต่ละพื้นผิวนั้นได้นำไปสู่ผลของแสงที่สาดและเงาที่ตกกระทบต่ออาคารให้มีรูปแบบและเอกลักษณ์เฉพาะตัวของอาคารหลังนี้แล้ว ในด้านความแข็งแรงการพับทำให้เกิดความสูงต่ำในระนาบเดียวกัน (Amplitude) ทำให้ความสามารถในการรับแรงกดที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการพับแบบต่อเนื่องยังสร้างการเรียงต่อที่ลงตัวไม่เกิดช่องว่าง (Tessellation) ทำให้มีการยึดโยงระหว่างชิ้นงานที่ลงตัวไม่มีช่องว่างระหว่างกัน ซึ่งทำให้เพิ่มความแข็งแรงเพิ่มอีกทางหนึ่งด้วย

### 4.2 เปรียบเทียบความแข็งแรงของการพับแผ่นผนังทั้ง 3 รูปแบบ

โดยจากตัวอย่างเมื่อทำการทดสอบความแข็งแรง จากการแอ่นตัวเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบแบนสองมิติปกติ การพับทั้ง 3 รูปแบบ คือ การพับแบบลูกฟูกขนาน การพับแบบพลิกกลับ และการพับแบบพลิกกลับแนวทแยง มีค่าอยู่ที่ 1 : 0.11, 1 : 0.022 และ 1 : 0.024 พบว่า การพับนั้นทำให้เกิดความแข็งแรงเพราะการพับทำให้โครงสร้างกลายเป็น

สามมิติ โดยการพับแบบพลิกกลับและการพับแบบพลิกกลับแนวทแยงจะให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าการพับแบบลูกฟูกขนานในขนาดที่เท่ากัน เพราะแม้จะมีลักษณะจุดปลายเหมือนกัน แต่ในช่วงกลางมีการแบ่งพับเพิ่มอีกทีหนึ่ง จึงทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าการพับแบบลูกฟูกขนานที่ไม่มีการแบ่งพับเพิ่มขึ้นในช่วงกลาง

### 4.3 ข้อเสนอแนะในการใช้เปลือกอาคารแผ่นพับแบบพลิกกลับด้วยแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต

แผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตเจาะรูแบบกรีดร่องพับ มักถูกเลือกนำไปใช้กับอาคารในปัจจุบันเพราะความสามารถของวัสดุที่สามารถเจาะรูได้จากโรงงาน รูเหล่านี้ช่วยทำให้มีวัสดุน้ำหนักเบาและลดแรงปะทะของลมได้ แผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตแบบกรีดร่องพับยังมีข้อดีในเรื่องของการขนส่งที่สามารถลดพื้นที่เพราะสามารถขนส่งมาในลักษณะแผ่นเรียบแบนสองมิติแล้วจึงนำมาประกอบที่หน้างานก่อสร้างให้เป็นรูปทรงสามมิติภายหลังได้ โดยยังคงมีความแข็งแรงต่อเนื่องเป็นชิ้นเดียวต่อเนื่องกัน การพับแบบพลิกกลับอาจดูซับซ้อนแต่หากกำหนดจุดการติดตั้งที่แน่นอนการพับเป็นไปอย่างถูกต้องตามรูปแบบ อีกประการหนึ่งที่ควรคำนึงคือแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตเมื่อพับจะมีด้านหน้าและด้านหลัง ในส่วนด้านหลังที่เป็นตำแหน่งยึดกับโครงเคร่ามักมีความไม่สวยงาม ดังนั้นหากมีบริเวณที่อยู่ในอาคารแล้วสามารถมองเห็นควรต้องวางแนวโครงเคร่าสำหรับติดตั้งยึดเกาะนี้ให้เรียบร้อยเป็นระเบียบ หรือเพิ่มผนังซ้อนชั้นเพิ่มขึ้นไปเพื่อปิดบังโครงเคร่านี้

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทกิจรุ่งโรจน์เจริญยนต์ที่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลและเอื้ออำนวยโอกาสในการนำผลการออกแบบและทดสอบแผ่นพับแบบพลิกกลับไปใช้กับการปรับปรุงอาคารสำนักงานใหญ่ จังหวัดนครปฐม

### เอกสารอ้างอิง

[1] R. J. Lang, *The complete book of Origami: step by step instructions in over 1000 diagrams*, Courier Dover Publications, 1988, pp. 1–4.

[2] P. Jackson, *Folding techniques for designers from sheet to form*, Laurance Publishig Ltd., 2011, pp. 15–18.

[3] P. Engel, *Folding the Universe: Origami from Angelfish to Zen*, General Publishing Company Ltd., 1989, pp. 7–9.

[4] H. Buri and Y. Weinand, *Origami- folded plate structures*, Architecture, Infoscience EPFL scientific publications, 2008.

[5] Y. Nishiyama, "Miura folding: applying origami to space exploration," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 79, no. 2, pp. 269–279, 2012.

[6] I. Garibi, *Origami tessellations for everyone*, Sef Publishig, 2018, pp. 11–12.

[7] M. Stavric and A. Wiltsche, "Quadrilateral patterns for rigid folding structures," *International Journal of Architectural Computing*, vol. 12, pp. 61–79, 2014.

[8] Computers and Structures. (2021). ETABS license number #*14FUN456QKUEAEM. New York. USA [Online]. Available: https://www.csiamerica.com/products/etabs