

แนวทางการออกแบบกล่องพับได้: อิทธิพลของการออกแบบ ที่มีต่อความแข็งแรงของกันกล่องพับได้

อรณิศ ปันยารชุน *

ภาควิชาการออกแบบอุตสาหกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Oranis.p@chula.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์แรกของการศึกษานี้เพื่อสำรวจวิธีการทดลองทางเลือกต่างในการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุด ก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว วัตถุประสงค์ที่สองคือ เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงที่มากที่สุดของกันกล่องซึ่งมีรูปแบบที่แตกต่างกัน วัตถุประสงค์ที่สามคือเพื่อ ระบุอิทธิพลของการออกแบบโครงสร้างกันกล่องที่มีผลต่อความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่จะล้มเหลว และเพื่อกำหนดแนวทางการออกแบบแก่นักออกแบบโครงสร้างกล่องพับได้ อนึ่ง การศึกษานี้จะประกอบไปด้วยการทดลอง 3 วิธีการคือ การวัดโดยอาศัยลูกปืน การวัดโดยอาศัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการออกแรง ณ จุดกึ่งกลางฝาปิดของกันกล่อง และการวัดโดยอาศัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการออกแรง ณ จุดใกล้บริเวณของการล็อกของฝาปิดกันกล่อง การศึกษานี้ได้ดำเนินการประเมินวิธีการทดลองทางเลือก การวิเคราะห์อิทธิพลของการออกแบบ และการสังเคราะห์แนวทางการออกแบบโครงสร้างกล่องพับได้ตามลำดับ

คำสำคัญ: กล่องพับได้ กระจาด บรรจุกัมภ์ การออกแบบบรรจุกัมภ์ บรรจุกัมภ์กระจาด

* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.

Design Guidelines for Folding Cartons: Inuence of Designs on Strength of Their Folding Carton Bottoms

Oranis Panyarjun *

Department of Industrial Design, Faculty of Architecture, Chulalongkorn University

Oranis.p@chula.ac.th

Abstract

A study has been performed to explore the alternative experimental methods of measuring a maximum load of the carton bottom before failure occurs, to compare the box bottom strength with various design, to indicate some influences of box bottom design on maximum box strength, and also to establish some design guidelines for structural designers. This study consists of three experiments: measuring by using ball bearings, measuring by using Universal Testing machine with pulling at the center of the bottom panels, and measuring by using Universal Testing machine with pulling near the lock of the bottom panels. Evaluation of alternative methodologies, analysis of design influences of box failure and synthesis of the carton bottom design guidelines are conducted, respectively.

Keyword: Folding carton, paper, packaging, packaging design, paper packaging

บทนำ

อุตสาหกรรมกล่องพับได้ เริ่มต้นขึ้นใน ปี ค.ศ. 1839 เมื่อ Colonel Andrew Dennison เริ่มผลิตกล่องพับได้ในเชิงพาณิชย์เพื่อใช้ป้องกันความเสียหายของเครื่องประดับซึ่งจำหน่ายในร้านค้าปลีก และในกลางทศวรรษที่ 1890 เครื่องจักรอัตโนมัติได้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตกล่องพับได้ (Hunter 1978)

กล่องพับได้ หรือ Folding Carton เป็นกล่องที่ทำจากแผ่นกระดาษ ซึ่งสามารถถูกตัดและพับรอยสำหรับขึ้นรูปได้เป็นรูปทรงที่ออกแบบไว้ (Obolewicz 2009) กล่องพับได้เป็นกล่องที่มีขนาดกลางและขนาดเล็ก พบเห็นมากในการค้าปลีกไม่ว่าจะเป็นซูเปอร์มาร์เก็ต ร้านค้าปลีก การสั่งซื้อทางออนไลน์และไปรษณีย์ เป็นต้น กล่องพับได้ทำหน้าที่ในการป้องกันสินค้า การให้ข้อมูล ผลกระทบทางทัศนะ การอำนวยความสะดวกในการใช้งานและการ

* Assistant Professor, Ph.D.

ขนย้าย ด้วยต้นทุนที่มีประสิทธิภาพ (Kirwan 2013) อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่ากล่องพับได้ถูกใช้งานทั้งในเชิงของการป้องกันและสุนทรีย์ นอกจากการให้ต้นทุนที่มีประสิทธิภาพในแง่ต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้น กล่องพับได้ยังใช้วัสดุที่สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้และยั่งยืนแต่อย่างไรก็ตาม กล่องพับได้มีข้อจำกัดในการใช้งานคือสมบัติในการถนอมอาหาร เนื่องจากวัสดุที่ใช้และความสมบูรณ์ของการปิดผนึกของกล่องพับได้มีการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้ไม่ดีนัก (Riley 2012, 178-239)

กล่องพับได้มักบรรจุสินค้าที่มีความหลากหลาย เช่น สินค้าอาหาร ได้แก่ ซีเรียล อาหารแช่แข็ง อาหารแช่เย็น ไอศกรีม ขนมลูกกวาด ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ชา กาแฟ และอาหารแห้งอื่นๆ ไปจนกระทั่งบรรจุสินค้าที่ไม่ใช่อาหาร ได้แก่ ยา เวชภัณฑ์ สินค้าสุขภาพ น้ำหอม เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์ในห้องน้ำ เสื้อผ้า บุหรี่ ของเล่น เกม อุปกรณ์ซักล้างทำความสะอาด สินค้าจากกระดาษ สินค้าเครื่องใช้ในบ้านเรือน เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องกีฬา และอุปกรณ์พักผ่อนหย่อนใจ อุปกรณ์ทำสวน อุปกรณ์ดีไอวาย (Kirwan 2013, 265-267)

กล่องพับได้จะถูกขนย้ายไปยังผู้บรรจุหีบห่อในรูปแบบของการพับให้แบน ซึ่งอาจจะพิมพ์มาเรียบร้อยแล้วหรือติดกาต้มน้ำข้างไว้ให้พร้อมแล้ว เมื่อมีการบรรจุผลิตภัณฑ์ ผู้บรรจุหีบห่อจะตั้งกล่องพับได้ขึ้น บรรจุสินค้า และปิดผนึกด้วยแรงงานคน หรือ เครื่องจักร หรืออาจประกอบกันทั้งสองวิธีการ การทำให้แบนได้ของกล่องพับได้ก่อนการใช้งานถือเป็นอรรถประโยชน์ที่สำคัญในเชิงของการประหยัดพื้นที่ขณะขนย้ายและเก็บรักษา และเป็นจุดที่ทำให้แตกต่างระหว่างกล่องพับได้และกล่องคงรูป (setup box) (Kirwan 2013, 265-267)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่ารูปทรงของกล่องเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์หรือลักษณะเฉพาะของกล่องพับได้ ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Jiang และ Fu (2014) Qiu et al.

(2013) และ Sun และ Mou (2010) และ Chen et al. (2012) โดยที่งานวิจัยของ Jiang และ Fu (2014) มุ่งเน้นไปที่การทดสอบการปล่อยขึ้นกล่องตัวอย่างที่มีโครงสร้างทรงท่อนที่หลากหลายตกกระทบพื้น ในขณะที่ Qiu et al. (2013) คำนึงถึงตัวแปรการออกแบบรูปทรงในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายลักษณะเฉพาะของการพับกล่องโอริกามิ โดยผู้วิจัยขณะนี้ได้เลือกรูปทรงกล่องพับได้มา 3 รูปทรงคือ ทรงถาด ทรงเกเบิล (ทรงหลังคาบ้าน) และทรงแคชล็อก ส่วน Sun และ Mou (2010) ศึกษารูปทรงที่ไม่ใช่ถาด และรูปทรงที่ไม่ใช่ท่อนเพื่ออภิปรายลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง โดยให้ความสนใจต่อวิธีการพับ และได้วิเคราะห์โครงสร้างดังกล่าวท้ายสุด Chen et al. (2012) ได้อภิปรายโครงสร้างกล่องแบบเลื่อนออกด้านข้าง (slideway) ของกล่องพับได้

นอกจากนี้ยังพบว่ามีนักวิจัยได้ออกแบบกล่องพับได้แบบใหม่ๆ ขึ้นและตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ เช่น งานวิจัยของ Wu และ You (2011) งานวิจัยของ Haitao et al. (2010) และงานวิจัยของ Cho et al. (2007) โดยที่ Wu และ You (2011) เสนอออกแบบใหม่ที่มีฐานเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อที่ว่าเมื่อพับให้แบนราบแล้วจะคงรูป ในขณะที่ Hai et al. (2010) ออกแบบกล่องสำหรับอาหารจานด่วนชนิดพับให้แบนราบได้ด้วยโปรแกรม ArtiosCAD ผลงานการออกแบบนี้เรียบง่าย และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ และท้ายสุด Cho et al. (2007) พัฒนาบรรจุภัณฑ์กล่องพับได้ที่ไม่ต้องใช้ลวดเย็บกระดาษ

เนื่องจากกล่องพับได้ได้รับการขนส่งในสภาพแบนราบไปยังผู้บรรจุสินค้าและมีความต้องตั้งขึ้นเป็นกล่อง 3 มิติ ซึ่งกระทำโดยมือหรือเครื่องจักร จากประเด็นดังกล่าวจึงเป็นแรงบันดาลใจแก่นักวิจัยจำนวนหนึ่ง ซึ่งสนใจศึกษาการจำลองขั้นตอนพับตั้งกล่องพับได้รูปแบบใหม่ๆ ด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ และเชื่อมโยงไปสู่การใช้หุ่นยนต์ในการพับตั้งกล่อง 3 มิติ นักวิจัยกลุ่มนี้ได้แก่ Cannella et al. (2016) Lavalley et al. (2015) Wu และ You (2011) Liu และ Dai (2002) Lu และ Akella (2000) และ Mullineux และ Mathews (2010)

ดังนั้นจากผลการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่าแม้ว่านักวิจัยจำนวนหนึ่งจะนับเอารูปทรงของกล่องเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์หรือลักษณะเฉพาะของกล่องพับได้ แต่ก็ยังไม่มีใครสนใจศึกษาความสำคัญของการออกแบบโครงสร้างของกันกล่องที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของกันกล่อง ซึ่งผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าเป็นจุดสำคัญอันจะนำไปสู่ความล้มเหลวของกันกล่องสำหรับสมรรถนะในการบรรจุผลิตภัณฑ์ และการลดความหนาของกระดาษ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนและการใช้ทรัพยากรกระดาษอย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อสำรวจวิธีการทดลองเพื่อวัดค่าความแข็งแรงของกันกล่องแล้ว พบว่ายังไม่มีวิธีการทดลองที่มีมาตรฐานรองรับ และยังไม่มียกย่องรายใดทำการศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างกันกล่อง

จากเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มีวัตถุประสงค์แรกคือเพื่อสำรวจวิธีการทดลองทางเลือกต่างๆ ในการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว ส่วนวัตถุประสงค์ที่สองคือเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงที่มากที่สุดของกันกล่องซึ่งมีรูปแบบที่แตกต่างกัน วัตถุประสงค์ที่สามคือเพื่อระบุอิทธิพลของการออกแบบโครงสร้างกันกล่องที่มีผลต่อความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่จะล้มเหลว และเพื่อกำหนดแนวทางการออกแบบก้นกล่องพับได้โดยขอบเขตการวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่กล่องพับได้รูปแบบที่เป็นหลักเนื่องจากเป็นรูปแบบที่ใช้กันมาก

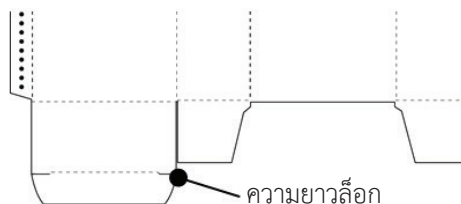
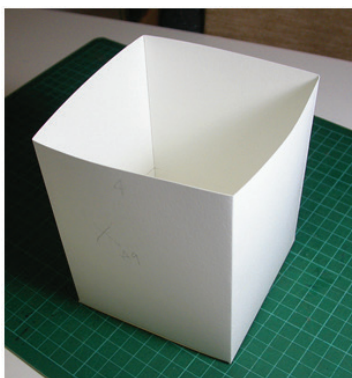
เป็นที่แพร่หลาย และมีรูปแบบของการล็อกบริเวณกันกล่องที่แตกต่างกัน

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

วิธีการทดลองประกอบด้วย 3 วิธีคือ การวัดโดยอาศัยลูกป็น การวัดโดยอาศัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการออกแรง ณ จุดกึ่งกลางฝาปิดของกันกล่อง และการวัดโดยอาศัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการออกแรง ณ จุดใกล้บริเวณของการล็อกของฝาปิดกันกล่อง

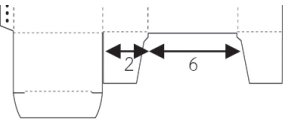
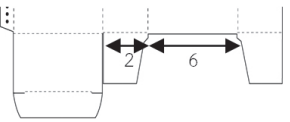
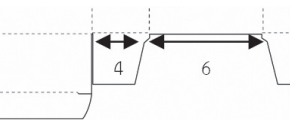
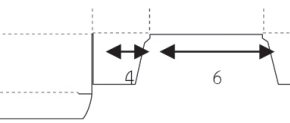
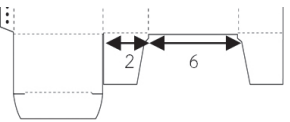
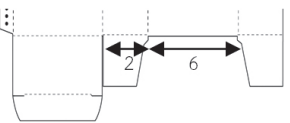
การทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 อาศัยวัสดุ และอุปกรณ์ ได้แก่ กระดาษ 100 ปอนด์ที่มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.2807 มม. เอ็นยิดปากกล่อง เทปกาว ห่วงโลหะ ลูกป็น ปากคิบนขนาดเล็ก และราวแขวนกล่องตัวอย่าง วิธีการทดลองเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างด้วยการนำกระดาษ 100 ปอนด์ มาร่างแบบตัดด้วยมือเป็นกล่องพับได้ที่มีรูปแบบของกันกล่องแบบเดียวกันคือฝาสอด แบบฝาสอด (tuck end) ดังภาพที่ 1 และตารางที่ 1 โดยมีมิติความสูงคงที่เท่ากับทุกกล่องคือ 5 นิ้ว และมีมิติความยาวคูณความกว้างที่แตกต่างกัน 3 ขนาด (6×2 นิ้ว, 6×4 นิ้ว, 4×4 นิ้ว) โดยเตรียมจำนวนซ้ำกันชนิดละ 3 ตัวอย่าง



ภาพที่ 1 ตัวอย่างกล่องพับได้ที่มีกันกล่องแบบ tuck end โดยปากกล่องไม่มีฝาปิด

ตารางที่ 1 ตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองชุดที่ 1

รหัส	รูปร่างแบบตัด	เส้นรอบรูปหน้าตัด (นิ้ว)	มิติกล่อง (L x W) (นิ้ว x นิ้ว)	ความยาวล็อก (ซม.)
A1		16	6 x 2	1
A2		16	6 x 2	1.5
A3		20	6 x 4	1
A4		20	6 x 4	1.5
A5		16	4 x 4	1
A6		16	4 x 4	1.5

จากนั้นใช้เอ็นรัดโดยรอบปากกล่องพับได้แล้วยึดเอ็นติดกับปากกล่องด้วยเทปกาว เว้นระยะที่ไม่ติดเทปกาวตรงบริเวณมุมของปากกล่อง เพื่อสอดหนังสือ แล้วจึงร้อยหนังสือขนาดใหญ่กับเอ็น บริเวณมุมของปากกล่องทั้ง 4 จุด ต่อมาร้อยหนังสือลงในห่วงโลหะ 1 อันทั้ง 4 เส้น ถุงพลาสติกจะได้รับการถูลงในตัวอย่างกล่องพับได้ ปากถูกมัดไว้กับหนังสือ

ขั้นตอนการทดลองคือการนำตัวอย่างกล่องพับได้ไปแขวนไว้บนราว ผู้วิจัยค่อยๆ คีบลูกป็นทีละ 3-5 ลูกบรรจุลงใน

ตัวอย่างกล่องพับได้อย่างเบาที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดแรงกระแทกที่ตัวกล่องดังภาพที่ 2 แล้วจึงสังเกตการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างกันกล่องของตัวอย่างกล่องพับได้ เมื่อฝาด้านนอกที่กันกล่องหลุดออกหรือขาดออกจากตัวกล่อง ยุติการใส่ลูกป็น จากนั้นแกะปมของถุงพลาสติกที่มัดไว้ที่หนังสือแล้วดึงถุงออกจากตัวอย่างกล่องเพื่อนำไปชั่งน้ำหนักลูกป็นทั้งหมด ที่ทำให้โครงสร้างกันกล่องล้มเหลว (เมื่อฝาด้านนอกของกันกล่องเปิดออกจากตัวกล่อง และถุงพลาสติกบรรจุลูกป็นหลุดออกมาให้ถือว่าเป็นจุดที่ทำให้โครงสร้างล้มเหลว)

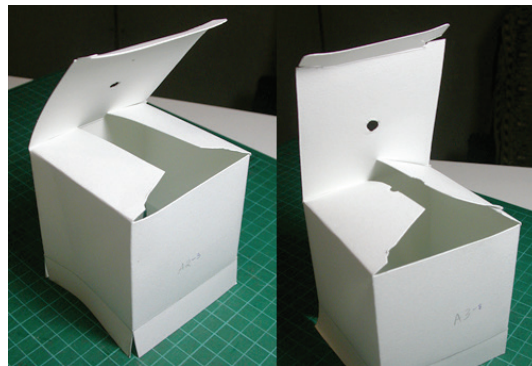


ภาพที่ 2 การหย่อนลูกป็นลงกล่องตัวอย่างด้วยการใช้ปากคีบ

การทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 อาศัยวัสดุ และอุปกรณ์ ได้แก่ กระดาษ 100 ปอนด์ที่มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.2807 มม. กระดาษอาร์ตการ์ดที่มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.4946 มม. เครื่องมือที่ใช้ในการตัดตัวอย่างเพื่อควบคุมคุณภาพให้มีความเหมือนสม่ำเสมอคือ เครื่องตัดตัวอย่างยี่ห้อ Kongsberg รุ่น XE 10 โดยบริษัท Esko-Graphic Ltd. ประเทศสิงคโปร์ (www.esko.com) แทนียัดตัวอย่างปากกล่องพับได้ผลิตโดยศูนย์บรรจุหีบห่อไทย ตระขอปลายอีกด้านเป็นสกรู เครื่อง Universal Testing Machine ของยี่ห้อ Instron และเชือกยึดกับเครื่อง Universal Testing Machine ของยี่ห้อ Instron

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคือนำกระดาษ 2 ชนิด (กระดาษ 100 ปอนด์ และกระดาษอาร์ตการ์ด) มาตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างแล้วพับขึ้นรูปกล่องพับได้ด้วยรูป



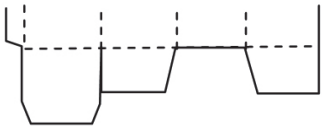
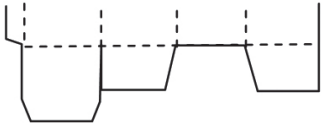
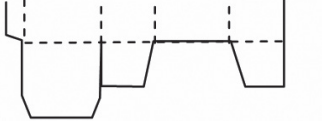
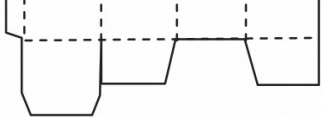
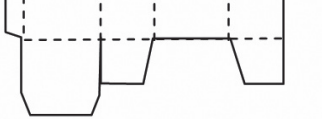
ภาพที่ 3 ฝาด้านในของกันกล่อง 2 แบบ

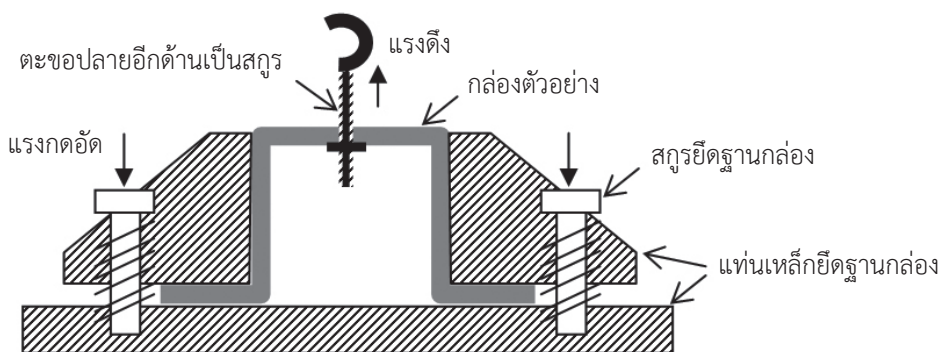
แบบฝาสอด (tuck end) ที่มีหน้าตัด 2 ลักษณะคือหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (3 x 3 นิ้ว) และหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (3 x 2 นิ้ว) และสร้างฝาด้านในของกันกล่อง 2 แบบ (แบบที่ฝาด้านในทั้ง 2 ฝั่งวิ่งมาบรรจบกันพอดีตรงกลาง และฝาด้านในทั้ง 2 ฝั่งไม่บรรจบกัน) ดังภาพที่ 3 และตารางที่ 2 ตัวอย่างทั้งหมดมี 5 ชุดในแต่ละชุดมีจำนวนที่ซ้ำกัน 8 ชิ้นตัวอย่าง ก่อนการวัดให้น้ำกล่องตัวอย่างเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 27 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 3)

จากนั้นตัดปากกล่องให้ต่ำลงมาจากขอบบน 2 ซม. ที่บริเวณมุมของปากกล่อง แล้วพับแบะออกทำมุม 90 องศากับตัวกล่อง เพื่อให้ยึดติดกับแท่นยึดตัวอย่างปากกล่องพับได้ที่ช่วยในการต้านแรงดึงของเครื่องจากทิศตรงกันข้าม ต่อมาคว่ำหัวตัวอย่าง นำฝาของกันกล่องหงายขึ้น เเจาะรูกึ่งกลางฝาด้านนอกของกันกล่อง แล้วจึงสอดตะขอด้านที่ปลายอีกด้านเป็นสกรูลงในฝาด้านนอกของกันกล่องดังภาพที่ 4

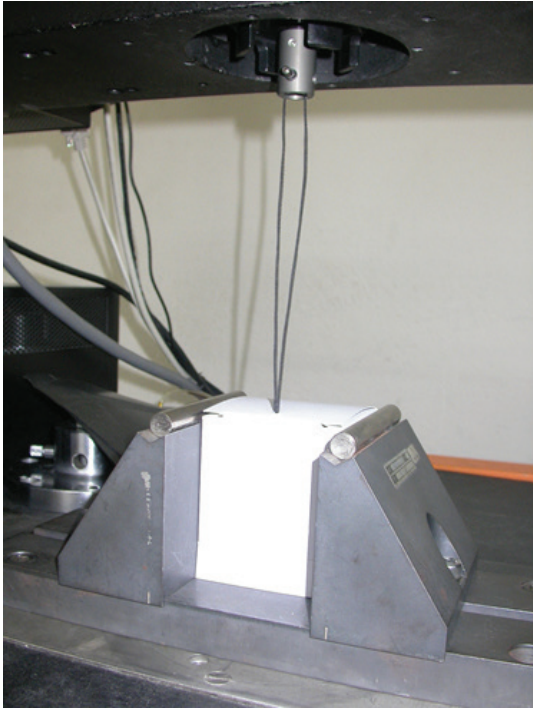
ขั้นตอนในการทดลองที่ 2 คือยึดกึ่งกลางกล่องตัวอย่างด้วยเชือกที่เชื่อมโยงกับหัวจับของเครื่อง Universal Testing Machine แล้วตั้งเครื่อง Universal Testing Machine ที่ความเร็ว 100 มม.ต่อนาที ต่อจากนั้นเดินเครื่อง Universal Testing Machine เครื่องจะเริ่มดึงเชือกจนฝาลุดจึงจะหยุด ดังภาพที่ 5

ตารางที่ 2 ตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองชุดที่ 2

รหัส	รูปร่างแบบตัด	ชนิดกระดาษ	หน้าตัดกล่อง	ลักษณะฝารองด้านใน
A2		100 ปอนด์	3 x 3 นิ้ว	ไม่บรรจุบกัณ
A3		100 ปอนด์	3 x 3 นิ้ว	บรรจุบกัณ
A4		100 ปอนด์	3 x 2 นิ้ว	บรรจุบกัณ
A5		อาร์ตการ์ด	3 x 3 นิ้ว	บรรจุบกัณ
A6		อาร์ตการ์ด	3 x 2 นิ้ว	บรรจุบกัณ



ภาพที่ 4 การยึดกล่องไว้ที่แท่นยึดตัวอย่างโดยคว่ำก้นกล่องขึ้นด้านบน



ภาพที่ 5 การใช้เครื่อง Universal Testing Machine ดึงกันกล่องตัวอย่าง

การทดลองที่ 3

การทดลองที่ 3 อาศัยวัสดุ และอุปกรณ์ ได้แก่ กระดาษขาวเทาชนิดบางที่มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.3928 มม. เครื่องมือที่ใช้ในการตัดตัวอย่างเพื่อควบคุมคุณภาพให้มีความเหมือนสม่ำเสมอคือ เครื่องตัดตัวอย่างยี่ห้อ Kongsberg รุ่น XE 10 โดยบริษัท Esko-Graphic Ltd. ประเทศสิงคโปร์ (www.esko.com) แผ่นยึดตัวอย่างปากกล่องพับได้ผลิตโดยศูนย์บรรจุหีบห่อไทย ตะขอปลายอีกด้านเป็นสกรู เครื่อง Universal Testing Machine ของยี่ห้อ Instron และเชือกยึดกับเครื่อง Universal Testing Machine ของยี่ห้อ Instron

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เริ่มจากนำกระดาษขาวเทาชนิดบางมาตัดแล้วพับขึ้นรูปกล่องพับได้ ที่มีหน้าตัด 1 ขนาด (3 x 3 นิ้ว) ฝาด้านในของกันกล่องวิ่งมาชนกันพอดี

ตรงกลาง ตัวอย่างทั้งหมดมี 7 ชุด ซึ่งแตกต่างกันตามรูปแบบของกันกล่อง 7 แบบ (A1, B1, C1, D1, E1, F1, G1) ดังตารางที่ 3 ในแต่ละชุดมีจำนวนที่ซ้ำกัน 5 ชิ้นตัวอย่างก่อนการวัดให้นำกล่องตัวอย่างเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 27 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขั้นตอนในการทดลองที่ 3 ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนในการทดลองที่ 2 แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่จุดดึงฝากันกล่องขึ้นให้เลื่อนมาไว้ใกล้ขอบที่มีลิ้นแทน (ตารางที่ 3)

ขั้นตอนการทดลองทำเช่นเดียวกับการทดลองชุดที่ 2 แต่แตกต่างกันตรงที่รูที่เจาะอยู่ใกล้กับล็อกของกันกล่อง

ผลการทดลอง

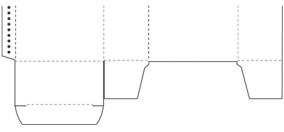
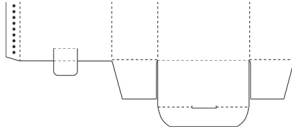
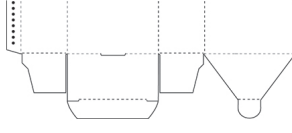
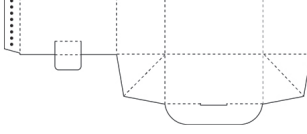
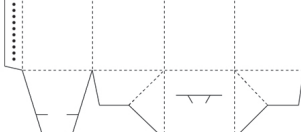
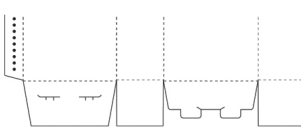
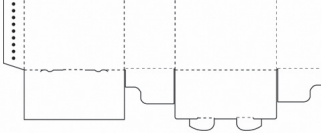
ผลการทดลองที่ 1:

ผลการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว

ผลการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของการทดลองชุดที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4

จากผลการทดลองที่ 1 พบว่าเมื่อความยาวล็อกเพิ่มขึ้นสำหรับกล่องตัวอย่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวจะลดลง แต่อย่างไรก็ดี เมื่อความยาวล็อกเพิ่มขึ้นสำหรับกล่องตัวอย่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวกลับเพิ่มขึ้น และในกรณีที่ความยาวของเส้นรอบรูปของหน้าตัดกล่องตัวอย่างทั้งหมดมีค่าเท่ากัน ดังเช่นการเปรียบเทียบผลของตัวอย่าง A1 และ A5 และการเปรียบเทียบผลของตัวอย่าง A2 และ A4 เมื่อรูปร่างของหน้าตัดกล่องมีรูปร่างเข้าใกล้สี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวจะเพิ่มขึ้น 2 เท่าและ 3 เท่าตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม การ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองชุดที่ 3

รหัส	รูปร่างแบบตัด	ชื่อแบบกันกล่อง
A1		(Tuck end) ฝาสอด
B1		(Tuck and Tongue) ฝาสอดและลิ้น
C1		(Mailer Lock) ล็อกชนิดไปรษณีย์
D1		(Bellows (Gusset) Tuck) ฝาชนิดจับจีบ
E1		ไม่มีชื่อ
F1		ไม่มีชื่อ
G1		ไม่มีชื่อ

เพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปหน้าตัดกล่องส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวลดลงดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบผลของตัวอย่าง A3 และ A5 และการเปรียบเทียบผลของตัวอย่าง A4 และ A6

ตารางที่ 4 ผลการวัดค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของการทดลองที่ 1

รหัส	เส้นรอบรูปหน้าตัด (นิ้ว)	มิติกล่อง (L x W) (นิ้ว x นิ้ว)	ความยาวล็อก (ซม.)	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว (กรัม)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
A1	16	6 x 2	1	631.33	168.54	26
A2	16	6 x 2	1.5	582.67	40.08	6
A3	20	6 x 4	1	1363.67	135.54	9
A4	20	6 x 4	1.5	602	206.12	34
A5	16	4 x 4	1	1578.33	137.59	8
A6	16	4 x 4	1.5	1646.67	434.37	26

ผลการทดลองที่ 2:

ผลการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว

ผลการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของการทดลองชุดที่ 2 แสดงดังตารางที่ 5

จากผลการทดลองที่ 2 พบว่าลักษณะของฝารองด้านในมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว กล่าวคือเมื่อลักษณะของฝารองด้านในมาบรรจบกันค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวจะมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของกล่องตัวอย่างที่มีลักษณะของฝารองด้านในไม่บรรจบกันอยู่ประมาณ 2 เท่า (0.78 ของ A2 เทียบกับ 2.04 ของ A3) นอกจากนี้รูปร่างหน้าตัดก็มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว จะเห็นได้จากการเปรียบเทียบผลของ

ตัวอย่าง A3 และ A4 และผลของตัวอย่าง A5 และ A6 ซึ่งพบว่าเมื่อหน้าตัดกล่องลดขนาดลงเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ชนิดกระดาษมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว ดังจะพบได้จากผลการเปรียบเทียบตัวอย่าง A3 และ A5 และผลการเปรียบเทียบตัวอย่าง A4 และ A6 พบว่ากระดาษ 100 ปอนด์จะให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวสูงกว่ากระดาษอาร์ตการ์ด

ผลการทดลองที่ 3:

ผลการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว

ผลการวัดค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของการทดลองชุดที่ 3 แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการวัดค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของการทดลองที่ 2

รหัส	ชนิดกระดาษ	หน้าตัดกล่อง	ลักษณะฝา รองด้านใน	ค่าความแข็งแรง เฉลี่ยที่มากที่สุด ก่อนที่โครงสร้างกัน กล่องจะล้มเหลว (kgf)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ร้อยละ ของค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
A2	100 ปอนด์	3 x 3 นิ้ว	ไม่บรรจบกัน	0.78	0.16	20
A3	100 ปอนด์	3 x 3 นิ้ว	บรรจบกัน	2.04	0.46	22
A4	100 ปอนด์	3 x 2 นิ้ว	บรรจบกัน	4.82	1.21	25
A5	อาร์ตการ์ด	3 x 3 นิ้ว	บรรจบกัน	0.72	0.1	13
A6	อาร์ตการ์ด	3 x 2 นิ้ว	บรรจบกัน	1.1	0.26	23

หมายเหตุ: ไม่มี A1

ตารางที่ 6 ผลการวัดค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของการทดลองที่ 3

รหัส	ชื่อแบบกันกล่อง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่ มากที่สุดก่อนที่โครงสร้าง กันกล่องจะล้มเหลว (kgf)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ร้อยละของค่าเบี่ยง เบนมาตรฐาน
A1	(Tuck end) ฝาสอด	0.45	0.05	11
B1	(Tuck and Tongue) ฝาสอดและลิ้น	0.47	0.1	21
C1	(Mailer Lock) ล็อกชนิดไปรษณีย์	0.39	0.22	27
D1	(Bellows (Gusset) Tuck) ฝาชนิดจับบีบ	1.03	0.72	35
E1	ไม่มีชื่อ	0.89	0.50	26
F1	ไม่มีชื่อ	0.38	0.07	6
G1	ไม่มีชื่อ	1.79	0.38	8

จากการศึกษาผลของการทดลองที่ 3 พบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวที่สูงที่สุดคือ กันกล่องแบบ G1 (ไม่มีชื่อ) ตามมาด้วย กันกล่องแบบ D1 (Bellows (Gusset) Tuck) และลำดับที่ 3 คือ กันกล่องแบบ E1 (ไม่มีชื่อ)

ในผลการทดลองที่ 3 นี้ผู้วิจัยได้ค้นหาวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยอาศัยวิธีการเชิงคุณภาพและวิธีการเชิงปริมาณประกอบกัน โดยตั้งชื่อให้ว่า ดัชนีความแข็งแรงของกันกล่อง (Bottom Strength Index, BSI) ซึ่งมีหลักการคือการเทียบผลต่างเชิงปริมาณ (ตัวเลข) ในรูปของร้อยละ และผลต่างเชิงคุณภาพ (รายละเอียดภาพแบบตัดที่แตกต่าง) เพื่อบ่งชี้ระดับผลกระทบของตัวแปรต้นเชิงคุณภาพที่มีต่อค่าความแข็งแรงของโครงสร้างกันกล่อง การตัดสินใจดัชนีความแข็งแรงของกันกล่องมีขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการจัดกลุ่มตัวอย่างตามความคล้ายคลึงกันของวิธีการออกแบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่าง

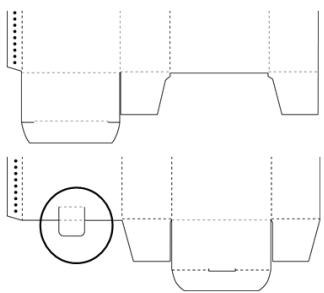
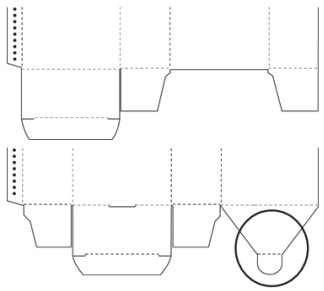
ของวิธีการออกแบบ ผลการจัดกลุ่มตัวอย่างตามความคล้ายคลึงกันของวิธีการออกแบบ สามารถจัดจำแนกกลุ่มเป็น 5 กลุ่มดังตารางที่ 7

ในขั้นตอนที่ 2 เป็นการหาค่าร้อยละของผลต่างของค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวของแต่ละคู่ โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยของทั้งคู่ มีสูตรดังนี้

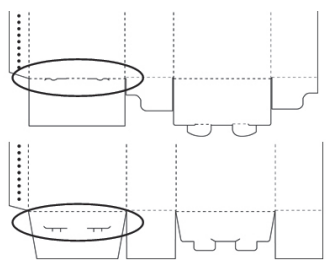
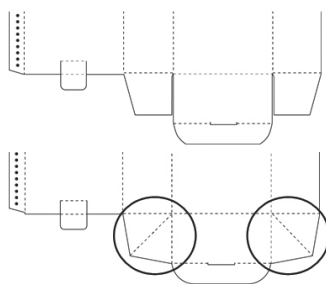
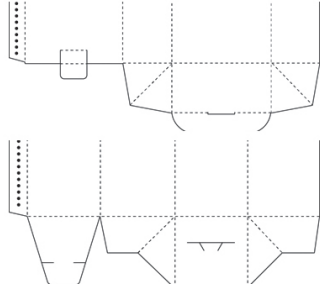
$$Y (BSI) = \frac{(X_1 - X_2)}{(X_1 + X_2) / 2} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

โดยที่ Y หรือ BSI เท่ากับค่าร้อยละของผลต่างของค่าความแข็งแรงที่มากที่สุด X_1 เท่ากับค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดของตัวอย่างที่ 1 และ X_2 เท่ากับค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดของตัวอย่างที่ 2 ทั้งนี้หากคู่แบบตัดตัวอย่างเหมือนกันทุกประการ ค่า BSI จะเท่ากับศูนย์

ตารางที่ 7 ผลการจัดกลุ่มตัวอย่างตามความคล้ายคลึงกันของวิธีการออกแบบ

คู่ที่	คู่	ภาพเปรียบเทียบ	ความเหมือน	ความแตกต่าง
1	A1 & B1		1 ฝานอกพร้อมลิ้น และ 2 ฝาใน	B1 มีการเพิ่ม 3D ลิ้น และ 1 ช่องเสียบลิ้นที่ สันขอบของฝาด้านนอก ที่อยู่ฝั่งตรงข้าม
2	A1 & C1		1 ฝานอกด้วยลิ้น และ 2 ฝาใน	C1 มีการเพิ่มฝานอก พร้อมลิ้น

ตารางที่ 7 ผลการจัดกลุ่มตัวอย่างตามความคล้ายคลึงกันของวิธีการออกแบบ (ต่อ)

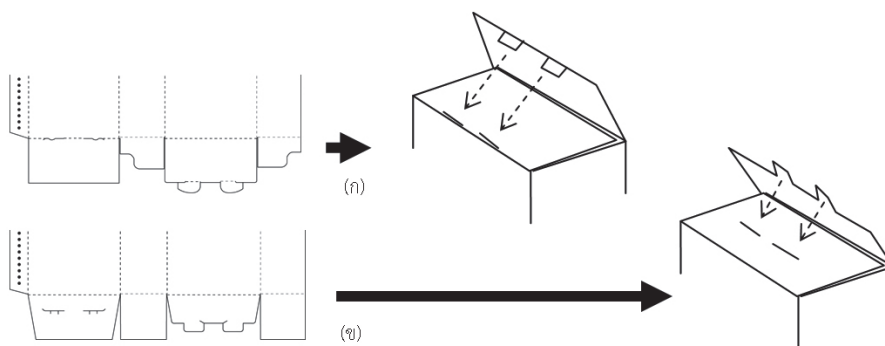
คู่ที่	คู่	ภาพเปรียบเทียบ	ความเหมือน	ความแตกต่าง
3	G1 & F1		2 ฝานอกพร้อม 2 ลี้น และ 2 ช่องเสียบลีน และ 2 ฝาใน	2 ช่องเสียบลีนของ G1 อยู่ที่สันขอบของฝานอก ผึ่งตรงกันข้าม ในขณะที่ 2 ช่องเสียบลีนของ G1 อยู่ที่ใกล้กึ่งกลางบน ระนาบของฝานอกผึ่ง ตรงข้าม
4	B1 & D1		1 ฝานอกพร้อมช่อง เสียบลีนและ 2 ฝาใน	2 จับจีบของ D1
5	D1 & E1		1 ฝานอกพร้อม 2 จับจีบ	1 ลี้นของ D1 และ 1 ฝานอกพร้อม 1 ลี้นใน ตัวที่มี 2 รอยบากด้าน ข้างของ E1

ผลที่ได้รับแสดงในตารางที่ 8 ลำดับของร้อยละของผลต่างของค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนโครงสร้างกันกลองจะล้มเหลวของคู่ G1 กับ F1 สูงสุดตามมาด้วยคู่ B1 กับ D1 คู่ A1 กับ C1 คู่ D1 กับ E1 และคู่ A1 กับ B1 โดยตัวแปรที่ทำให้คู่ G1 กับ F1 มีร้อยละของผลต่างสูงสุดนั้นมีสาเหตุมาจากการมีล็อก 3 มิติจำนวน 2 ตำแหน่ง และตัวแปรรวมของเกือบทุกกลุ่มที่เป็นสาเหตุของความแตกต่างมาจากการมีล็อก 3 มิติ ตัวอย่างของล็อก 3 มิติเปรียบเทียบกับตัวอย่างล็อก 2 มิติแสดงดังภาพที่ 6 ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าตัวแปรต้นที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของกันกลอง ได้แก่ มิติของการพับล็อก จำนวนของล็อก และ

การจับจีบ แต่อย่างไรก็ดี ก็ยังไม่อาจสรุปสาเหตุของคู่ที่ให้ค่าร้อยละของผลต่างของค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดอย่างเด่นชัดได้ (G1 กับ F1) เนื่องจากความแตกต่างเชิงคุณภาพของคู่ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรต้นถึง 2 ตัวด้วยกันคือ มิติของการพับล็อก และจำนวนของล็อก แต่หากพิจารณาคู่ อื่น จะพบว่าค่าร้อยละของผลต่างของค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดที่มาจากสาเหตุของตัวแปรมิติของล็อกที่จำนวนน้อยที่สุดคือ ล็อก 3 มิติ 1 ล็อกนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ผู้วิจัยจึงเสนอข้อสันนิษฐานว่าการอาศัยล็อก 3 มิติแต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่มีประสิทธิภาพสูงเท่ากับการอาศัยตัวแปรต้นตัวอื่นเข้าร่วมด้วย (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 ลำดับของร้อยละของผลต่างของค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว

อันดับที่	ร้อยละของผลต่างของค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลว (kgf)	คู่ตัวอย่างเปรียบเทียบ	ตัวแปรที่แตกต่างกัน
1	130	คู่ที่ 3: G1 กับ F1	มีลิ้น 3 มิติและมีลิ้น 2 มิติ 2 ตำแหน่ง
2	70	คู่ที่ 4: B1 กับ D1	มีการจับจีบบริเวณมุม (Gusset)
3	14	คู่ที่ 2: A1 กับ C1	มีลิ้น 3 มิติของฝาด้านที่ 4 จำนวน 1 ตำแหน่ง
	14	คู่ที่ 5: D1 กับ E1	มีลิ้นแบบ 3 มิติจำนวน 1 ตำแหน่งและมีลิ้นแบบ 2 มิติจำนวน 1 ตำแหน่ง
4	4	คู่ที่ 1: A1 กับ B1	มีลิ้น 3 มิติจำนวน 1 ตำแหน่ง

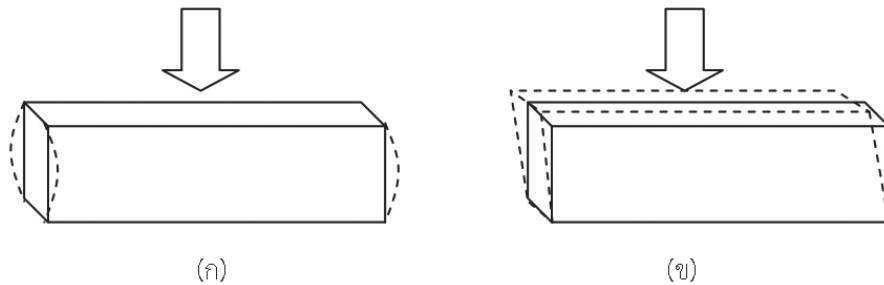


ภาพที่ 6 ตัวอย่างลิ้น 3 มิติ (ก) และลิ้น 2 มิติ (ข)

ผลการสังเคราะห์ทฤษฎีกลไกความล้มเหลวในการคลายลิ้น

จากการสังเกตพฤติกรรมความล้มเหลวของโครงสร้างกันกล่องทั้งจากทั้งโดยมือและการทดลอง พบว่าเมื่อกล่องพับได้รับแรงดึงที่มากกระทำเพื่อปลดลิ้น ฝากล่องจะ

เปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อให้หลุดออกจากกลไกการล็อก ผลการสังเกตพฤติกรรมดังกล่าวได้นำมาเปรียบเทียบกับข้อค้นพบของ Panyarjun (1998) ที่กล่าวว่าขณะการทดสอบการกดอัดของกล่องถูกผูกจากภายนอก จะเกิดความล้มเหลวของโครงสร้างอยู่ 2 ลักษณะคือ การบวม (bulging) และการล้ม (tipping) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 (ก) การบวม (ข) การล้มน้ำ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Panyarjun 1998

แต่อย่างไรก็ดี การโยงพื้นความรู้จากข้อค้นพบของ Panyarjun (1998) เพื่อสังเคราะห์ทฤษฎีกลไกความล้มเหลวของการคลายล็อก มีข้อพิจารณาด้วยกัน 3 ประเด็น คือ ลักษณะของแรงที่มากระทำซึ่งอ้างอิงจากการจำลองสถานการณ์จริง ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างกล่องพับได้ และวิธีการออกแบบกันกล่อง

ประเด็นแรกเริ่มพิจารณาจากลักษณะของแรงที่มากระทำ การทดลองทั้ง 3 นี้แตกต่างจากการทดลองด้วยแรงกดอัดต่อกล่องลูกฟูก เนื่องจากการทดลองดังกล่าวเป็นการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายกล่องเดี่ยวๆ ทั้งก่อนและหลังการรวมหน่วยเพื่อการขนส่งหรือเก็บรักษาในโกดัง ดังนั้นแรงที่มากระทำจึงเป็นแรงดึงจากภายนอก หรืออีกนัยหนึ่งในทางกลับกันคือแรงกดอัดจากภายใน (เนื่องด้วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ภายใน) เพื่อให้ฝากล่องเปิด ดังนั้นสถานการณ์ที่เกิดขึ้นกับกล่องพับได้ก่อให้เกิดแรงกระทำ 2 ประเภทซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ภายใน คือ แรงกระทำ ณ จุดใดจุดหนึ่งของกันกล่อง และแรงกระทำทั่วบริเวณกันกล่อง ถ้าผลิตภัณฑ์มีขอบคม หรือพื้นผิวเป็นส่วนโค้งเว้า กรณีนี้ให้ถือว่าเป็นแรงกระทำ ณ จุดใดจุดหนึ่งของกันกล่อง แต่ถ้าผลิตภัณฑ์เป็นแท่งของของแข็งที่มีผิวแบนราบ กรณีนี้ให้นับว่าเป็นแรงกระทำทั่วบริเวณกันกล่อง และในทางทฤษฎี แรงกระทำ ณ จุดใดจุดหนึ่งมีแนวโน้มว่าจะทำให้กันกล่องบวมมากกว่าแรงกระทำทั่วบริเวณกันกล่อง แต่อย่างไรก็ดี การจำลองการทดลองสำหรับแรงดึงที่กระทำทั่วบริเวณกันกล่องเพื่อให้สอดคล้องกับกรณีหลังกระทำได้อย่าง

ประเด็นที่ 2 เกี่ยวข้องกับลักษณะเฉพาะของโครงสร้างกล่องพับได้ เนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติแตกต่างจากวัสดุวิศวกรรมอื่นๆ ดังนั้นพฤติกรรมความล้มเหลวของโครงสร้างกันกล่องไม่อาจอ้างอิงกับพฤติกรรมความล้มเหลวของโครงสร้างจากวัสดุวิศวกรรมอื่นๆ ได้ กล่าวคือ โครงสร้างกล่องพับได้ประกอบไปด้วยผนังบางและข้อต่อที่ยึดหยุ่นได้ (บานพับหรือรอยพับ) ซึ่งง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงมุมของผนัง 2 ผนัง เนื่องจากพลังงานที่กล่องได้รับจะใช้หมดไปกับความพยายามในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อคลายล็อก ลักษณะของความล้มเหลวจะเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ มุมองศาระหว่างผนังที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่แรงกระทำ (โดยเฉพาะเมื่อสินค้าภายในไม่คงรูป) และการบวมที่ฝา

ในการทดลองที่ 1 ผนังทุกๆ ผนัง รวมทั้งฝากันกล่องจะเป็นอิสระ เนื่องจากไม่ได้สัมผัสกับอุปกรณ์การวัดใดๆ ดังนั้นมุมองศารอบแกนข้อต่อแนวตั้งทั้ง 4 และแนวนอนทั้ง 4 แปรผันแตกต่างกันไปตามระยะเวลาที่ลูกปืนได้รับการปล่อยลงในกล่อง ดังนั้นจากเหตุการณ์ดังกล่าวจึงไม่อาจกล่าวว่านี้คือการล้มน้ำ ส่วนฝากันกล่องจะบวมเนื่องจากน้ำหนักของลูกปืนที่ค่อยๆ ดันออก ผลจากเหตุการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การพับหักงอหรือบิดเบือนของรูปร่างเส้นให้มีขนาดเล็กลงเพื่อหลุดลอดออกจากกลไกการขัดกันของการล็อกหรือช่องเสียบล้นมีขนาดหลวมขึ้นจากการบวมหรือฉีกขาดส่วนในการทดลองที่ 2 และ 3 ขนาดของตัวอย่างกล่องมีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างกล่องในการทดลองที่ 1 และได้รับการควบคุมโดยแท่นยึดตัวอย่างปากกล่องพับได้ผลิตโดย

ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย ดังนั้นมุมรอบข้อต่อในแนวตั้งจะได้รับการควบคุมให้คงที่ และการบวมของผนังในแนวตั้งจะไม่เกิดขึ้น การบวมจะเกิดขึ้นเฉพาะฝากันกล่องแนวนอนเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอสรุปว่ากลไกความล้มเหลวในการคลายล็อกเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ การบวม และการพับหักงอ

ประเด็นสุดท้ายคือวิธีการออกแบบกันกล่อง กล่าวคือจากข้อค้นพบจากการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าล็อก 3 มิติได้เปรียบกว่าล็อก 2 มิติตรงที่เป็นอุปสรรคต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่า ลักษณะการขัดกันของล็อก 3 มิติมีความยากทั้งต่อการบวมและการพับหักงอเนื่องจากล็อก 3 มิติอยู่ในลักษณะที่พับงออยู่แล้ว ในทำนองเดียวกับการจับจีบบริเวณมุมของกันกล่องเองก็ช่วยยึดให้โครงสร้างกันกล่องคงรูปและยากต่อการขยับเขยื้อนเพื่อคลายล็อก

ผลการประเมินวิธีการทดลอง

ในการเปรียบเทียบวิธีการทดลองระหว่างด้วยเครื่องมือและด้วยการทดลอง พบว่าช่วงของค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองที่ 1 อยู่ระหว่าง 6 ถึง 34 ส่วนช่วงของค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองที่ 2 ระหว่าง 13 ถึง 25 และช่วงของค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองที่ 3 ระหว่าง 6 ถึง 35 จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองด้วยมือแทบจะไม่แตกต่างจากค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองด้วยเครื่องมือ

ทั้งนี้ต่อประเด็นที่ว่าความเหมาะสมในการใช้งานวิธีการทดลองทั้ง 2 ประเภท (มือและเครื่องมือ) ผลการศึกษาแสดงว่าการนำวิธีการทั้ง 2 ประเภทไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพของผลิตภัณฑ์ หากต้องการการจำลองการรับแรงที่มากระทำเป็นจุด ควรเลือกใช้การทดลองด้วยเครื่องมือ แต่หากต้องการการจำลองการรับแรงที่มากระทำในลักษณะกระจายทั่ว ควรเลือกใช้การทดลองด้วยมือ แต่อย่างไรก็ดี ข้อจำกัดของวิธีการทดลองด้วยมือคือ

ความยากในการปล่อยลูกปืนตกลงในกล่องอย่างกระจายสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกล่องมีขนาดหน้าตัดใหญ่

จากประเด็นความแตกต่างของเงื่อนไขการทดลอง พบว่าวิธีการทดลองด้วยมือส่งผลให้เกิดผนังแนวตั้งที่ยึดหยุ่นขณะที่วิธีการทดลองด้วยเครื่องมือผนังในแนวตั้งจะได้รับการควบคุมให้ไม่เปลี่ยนแปลงมุมรอบข้อต่อแนวตั้ง ทั้งนี้วิธีการทดลองด้วยมือมีแนวโน้มในการเข้ากันได้กับสถานการณ์จริงในกรณีของการขนย้ายกล่องด้วยมือก่อนการรวมหน่วยเพื่อการขนส่งหรือระหว่างการจัดชั้นจัดแสดงในร้านค้าปลีก และในกรณีกล่องพับได้ที่บรรจุสินค้าที่มีความยืดหยุ่น เช่น นมผง ธัญพืช เครื่องดื่มผง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดี วิธีการทดลองด้วยมืออาจให้ค่าความแข็งแรงของกันกล่องที่ต่ำกว่าความเป็นจริงในกรณีที่ผลิตภัณฑ์เป็นทรงก้นตันที่มีขนาดและรูปร่างพอดีกับรูปทรงกล่อง

หากเปรียบเทียบวิธีการทดลองทั้ง 2 วิธีกับสถานการณ์จริงโดยละเอียดเกณฑ์ของลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ พบว่าวิธีการทดลองด้วยมือสอดคล้องกับสถานการณ์จริงของการเคลื่อนย้ายกล่องต่างๆ มากกว่าวิธีการทดลองด้วยเครื่องมือ เนื่องจากในทางปฏิบัติ การเคลื่อนย้ายด้วยมือไม่มีการประคองด้านข้างอย่างสมบูรณ์เหมือนการรวมหน่วยเพื่อการขนส่งด้วยยานพาหนะ

จากผลการวิเคราะห์ความผิดพลาดจากการทดลองที่ 1 พบว่าความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นจากการใช้วัสดุที่ยึดหยุ่น (หนังสติค) ระยะระหว่างปากกล่องและจุดรวมของหนังสติคจากทั้ง 4 มุม รูปทรงของกลุ่มก้อนของลูกปืนภายในกล่องที่แปรผันในทุกๆ ตัวอย่างและควบคุมไม่ได้ ขอบปากกล่องที่เป็นอิสระ ซึ่งแตกต่างจากสถานการณ์จริงที่ขอบปากกล่องเป็นรอยพับ รวมถึงการไม่มีการเก็บตัวอย่างก่อนการทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ก่อนเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แต่ทั้งนี้อย่างน้อยที่สุดตัวเลขที่ได้รับก็สามารถแสดงการเปรียบเทียบกันเองท่ามกลางตัวแปรต้นต่างๆ ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอว่าวิธีการทดลองด้วยมือเป็นทางเลือกหนึ่งในกรณีของผู้ที่ไม่มีห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ที่ต้องการประเมิน

ความแข็งแรงของกันกล่องที่ออกแบบใหม่เบื้องต้น เช่น บริษัทออกแบบ นักออกแบบอิสระ โรงเรียนสอนทางด้านการออกแบบ เป็นต้น

ข้อเสนอแนะในอนาคต

การทดลองในอนาคตสามารถจัดการทดลองทั้งมือและเครื่องมือด้วยตัวแปรต่างๆ และ เงื่อนไขชุดเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้รับจากทั้ง 2 วิธี อนึ่ง วิธีการทดลองที่ 1 ควรเปลี่ยนจากหนังสือเป็นเชือกแทนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากคุณสมบัติความยืดหยุ่น ตัวแปรที่ควรเพิ่มเติม อาทิเช่น ขนาดและรูปร่างพื้นที่หน้าตัดที่หลากหลายขึ้น จำนวนซ้ำที่เพิ่มขึ้น ความหนาที่หลากหลย ตำแหน่งของแรงที่กระทำเฉพาะจุด เป็นต้น

ผลการสังเคราะห์แนวทางการออกแบบกันกล่อง

ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการออกแบบกันกล่องโดยเรียงลำดับตามความสำคัญดังนี้

1. ออกแบบโดยคำนึงถึงลักษณะเฉพาะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก
2. ออกแบบโดยคำนึงถึงความยากในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อคลายล็อก
3. ออกแบบโดยคำนึงถึงรูปร่างและขนาดหน้าตัดของกล่องให้กระชับที่สุด
4. ออกแบบโดยคำนึงถึงการหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของระบบต่างๆในโครงสร้างกล่อง
5. พิจารณาการชั่งน้ำหนักระหว่างสมรรถนะเชิงการป้องกันผลิตภัณฑ์ต่อการคลายล็อกและการเป็นมิตรต่อผู้ใช้งานในเชิงของการอำนวยความสะดวกในการเปิด หากกล่องได้ปิดผนึกแน่นหนาจะส่งผลทำให้ผู้ใช้งานเปิดออกยาก และจะนำมาซึ่งความไม่พึงพอใจต่อสินค้าตามมา

ภายหลังจากออกแบบกันกล่องและทดลองขึ้นรูปกันกล่องตัวอย่างแล้ว จำเป็นต้องมีการประเมินผลงานการออกแบบด้วยวิธีการทดลองที่เหมาะสมกับลักษณะของแรงที่มากระทำ ซึ่งควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น มิติกล่อง ความหนา และเกรดกระดาช เป็นต้น ส่วนตัวแปรต้นคือผลงานออกแบบทางเลือกต่างๆ หลังจากการวัดผลค่าความแข็งแรงของกันกล่องเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างจะล้มเหลว ให้เลือกใช้ผลงานการออกแบบกันกล่องที่มีความแข็งแรงสูงสุด จากนั้นทดลองลดความหนาของกระดาชลงหลายๆ ความหนา (ตามแต่ความหนาของกระดาชจะมีวงจำหน่ายในท้องตลาด) แล้ววัดค่าความแข็งแรงของกันกล่องเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างจะล้มเหลว จากนั้นให้เลือกใช้ความหนาที่น้อยที่สุดที่ให้ค่าความแข็งแรงของกันกล่องเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างจะล้มเหลว ที่สูงกว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ภายใน แต่ทั้งนี้การเลือกใช้ความหนาดังกล่าวต้องพิจารณาความต้องการของบรรจภัณฑ์ต่อการรับแรงกดอัดเมื่อวางซ้อนกันขณะขนส่งและเก็บรักษาในโกดังสินค้าประกอบกันด้วย

สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้ได้เสนอแนะวิธีการทดลองการวัดค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวไว้ 2 วิธีการหลักๆ คือการใช้มือ และการใช้เครื่องมือ วิธีการทดลองด้วยการใช้มือเหมาะสำหรับกรณีการจำลองแรงที่กระจายทั่วบริเวณกันกล่อง ได้แก่ กล่องพับได้ที่บรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นผิวเรียบแบน ในขณะที่วิธีการทดลองด้วยการใช้เครื่องมือเหมาะสำหรับกรณีการจำลองแรงที่กระทำเฉพาะจุด ได้แก่ การแกะกล่องด้วยมือ หรือกล่องที่บรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีขอบแหลมคม

ในการออกแบบโครงสร้างกันกล่องแบบฝาสอดในการทดลองที่ 1 และ 2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่โครงสร้างกันกล่องแบบฝาสอดจะล้มเหลวคือ ความยาวการบากล็อก รูปร่างหน้าตัดกล่อง ชนิดกระดาช ลักษณะฝารองด้านใน และความยาวของเส้นรอบรูปหน้าตัดกล่อง ความยาวการบากล็อกแปรผกผัน

ต่อค่าความแข็งแรงมากที่สุดก่อนที่จะโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวในกรณีของกล่องตัวอย่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่อย่างไรก็ดี ความยาวการบากล็อกแปรผันตรงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุดก่อนที่จะโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวสำหรับกรณีกล่องตัวอย่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วนตัวแปรด้านรูปร่างหน้าตัดกล่องและความยาวของเส้นรอบรูปหน้าตัดกล่อง สามารถให้เหตุผลตามหลักการของคานในทฤษฎีฟิสิกส์ว่า เมื่อแรงที่มากกระทำดังฉากกับแกนของแรงที่ห่างจากจุดหมุนที่สั้นกว่า จะมีค่ามากกว่าแรงที่มากกระทำดังฉากที่ปลายคานด้านที่แกนของแรงยาวกว่า ดังนั้นหากเส้นรอบรูปลดลง จะทำให้แกนของแรงที่มากกระทำสั้นลง ค่าความแข็งแรงก่อนที่จะโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้น และท้ายสุดลักษณะผารองด้านในที่ไม่บรรจบกันจะช่วยยันโครงสร้างกันกล่องให้คงรูปมากขึ้น เมื่อโครงสร้างคงรูปจะยากต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อคลายล็อก ในทางตรงกันข้ามลักษณะผารองด้านในที่ไม่บรรจบกันจะมีช่องว่างให้โครงสร้างขยับเขยื้อนเมื่อมีแรงมากกระทำ จึงง่ายต่อการหลุดออกของล็อก

จากผลสังเกตการณ์ในการทดลองที่ 3 พบว่ากลไกความล้มเหลวในการคลายล็อกเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ การบวมและการพับหักงอ และจากผลการทดลองพบว่าตัวแปรต้นพื้นฐานต่างๆ ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อค่าความแข็งแรงที่มากที่สุดก่อนที่จะโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวในการออกแบบโครงสร้างกันกล่องแบบอื่นๆ ที่มีอยู่ในท้องตลาด ได้แก่ รูปแบบวิธีการล็อก จำนวนล็อก การจับจีบ กล่องที่มีโครงสร้างกันกล่องที่แข็งแรงที่สุดคือกล่องที่มีการใช้ล็อกแบบ 3 มิติ จำนวนล็อก 3 มิติแปรผันตรงกับค่าความแข็งแรงมากที่สุดก่อนที่จะโครงสร้างกันกล่องจะล้มเหลวกล่องที่มีโครงสร้างกันกล่องที่แข็งแรงรองลงมาคือการใช้การจับจีบบริเวณมุมของกันกล่อง เหตุผลในการอธิบายวิธีการ ล็อกแบบ 3 มิติแข็งแรงกว่าวิธีการล็อกแบบ 2 มิติคือความพยายามในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างกันให้คลายล็อกของล็อก 3 มิติมีมากกว่าความพยายามในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างกันให้คลายล็อกของล็อก 2 มิติ และในทำนองเดียวกัน การจับจีบบริเวณมุมของกันกล่องช่วยให้กล่อง

คงรูปและยากแก่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อคลายล็อก แต่อย่างไรก็ดี ในการออกแบบโครงสร้างกันกล่องใหม่ ไม่จำเป็นต้องอ้างอิงตัวแปรต้นพื้นฐานทั้ง 3 ตัวแปรนี้เท่านั้น นักออกแบบสามารถสร้างสรรค์ตัวแปรต้นใหม่ๆ ให้เกิดขึ้นได้โดยอาศัยแนวทางการออกแบบกันกล่องที่ผู้วิจัยสังเคราะห์ขึ้น แล้วจึงนำมาทดสอบเพื่อหาดัชนีความแข็งแรงของกันกล่อง (Bottom Strength Index, BSI)

อนึ่งการค้นหาดัชนีความแข็งแรงของกันกล่อง ซึ่งเป็นวิธีการในการเทียบระหว่างผลต่างเชิงปริมาณในรูปของร้อยละ และผลต่างเชิงคุณภาพ เพื่อแสดงระดับผลกระทบของตัวแปรต้นเชิงคุณภาพที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างกันกล่อง สามารถช่วยในการค้นหาตัวแปรต้นเชิงคุณภาพ และเรียงลำดับความสำคัญของตัวแปรต้นเชิงคุณภาพได้อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ

ผลการสังเคราะห์แนวทางการออกแบบกันกล่องโดยเรียงลำดับตามความสำคัญ สรุปได้ว่า ลำดับแรกคือการออกแบบโดยคำนึงถึงลักษณะเฉพาะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ลำดับที่ 2 คือ การออกแบบโดยคำนึงถึงความยากในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อคลายล็อก ลำดับที่ 3 คือการออกแบบโดยคำนึงถึงรูปร่างและขนาดหน้าตัดของกล่องให้กระชับที่สุด ลำดับที่ 4 คือการออกแบบโดยคำนึงถึงการหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของระนาบต่างๆ ในโครงสร้างกล่อง ลำดับสุดท้ายคือการขังน้ำหนักระหว่างสมรรถนะเชิงการป้องกันผลิตภัณฑ์ต่อการคลายล็อกและการเป็นมิตรต่อผู้ใช้งานในเชิงของการอำนวยความสะดวกในการเปิด หากออกแบบให้กันกล่องล็อกกันอย่างแน่นหนา ผู้บริโภคจะประสบปัญหาในการแกะออก อันจะนำมาซึ่งความไม่พึงพอใจต่อสินค้าในที่สุด

ท้ายสุดผลงานวิจัยนี้ก่อให้เกิดอรรถประโยชน์ในเชิงของวิศวกรรมศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างกันกล่อง การลดปริมาณการใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักมาก การลดความผิดพลาดในการตัดสินใจเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ การลดต้นทุนการใช้ทรัพยากร เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้จะไม่สำเร็จได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากภาควิชาการออกแบบอุตสาหกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

- Cannella, F., et la. "Origami Carton Folding Analysis Using Flexible Panels." *Mechanisms and Machine Science* 36, (2016): 95-106.
- Cho, Y.M., Um, G.J., and Kim, J.M. "The Development of Design Structure for Environmental Friendly Non-Staple Boxes and Cases Made by the Carton and Corrugated Paperboard." *Palpu Chongi Gisul/Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry* 39, 1 (2007): 69-77.
- Haitao, Q., Lili, P., and Yan, W. "Based on ArtiosCAD Analysis of Development and Design of Collapsible Fast-Food Boxes." Paper presented at the 2010IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, CAID and CD, Yiwu, 2010.
- Hunter, D. *Papermaking: The History and Technique of an Ancient Craft*. New York: Dover, 1978.
- Jiang, D.S., and Fu, C.Y. "Study on Different Folding Carton Damaged in Drop Condition." *Applied Mechanics and Materials* 469 (2014): 221-224.
- Kirwan, M.J. *Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology*. 2nd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2013.
- Lavalle, M., et la. "New Test Rig for Creased Paper Investigation to Confectionery Industry Reconfigurable Folders." In Paper presented at the 20th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2015, Luxembourg, 2015.
- Liu, H. and Dai, J.S. "Carton Manipulation Analysis Using Configuration Transformation." In Paper presented at the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science 216, 5 (2002): 543-555.
- Lu, L. and Akella, S. "Folding Cartons with Fixtures: A Motion Planning Approach." *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 16, 4 (2000): 346-356.
- Mullineux, G. and Mathews, J. "Constraint-Based Simulation of Carton Folding Operations." *Computer-Aided Design* 42 (2010): 257-265.
- Obolewicz, P. "Carton, Folding." In *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, Kit L., edited. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.
- Panyarjun, O. "Prediction of Bending Strength of Long Corrugated Boxes." Master Thesis, Michigan State University, 1998.

Qiu, C., Aminzadeh, V., and Dai, J.S. “Kinematic Analysis and Stiffness Validation of Origami Cartons.” *Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME* 135, 11 (2013).

Riley, A. “Paper and Paperboard Packaging.” In *Packaging Technology: Fundamentals, Materials and Processes*, Anne Emblem and Henry Emblem, edited, 178-239. Cambridge: Woodhead, 2012.

Sun, C. and Mou, X. “*Research on the Structure of Non-Tube and Non-Tray Folding Carton.*” In Paper presented at the 17th IAPRI World Conference on Packaging 2010, Tianjin, 2010.

Wu, W. and You, Z. “A Solution for Folding Rigid Tall Shopping Bags.” In *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* 467, 2133 (2011): 2561-2574.