

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่อง การศึกษารูปแบบกล่องพัสดุไปรษณีย์เพื่อทดสอบผลด้านการรับแรงกดทับและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยทำการค้นคว้าเอกสารดังต่อไปนี้

- 2.1 กระดาษลูกฟูก
- 2.2 การผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก
- 2.3 มาตรฐาน FEFCO
- 2.4 กระดาษกราฟท์
- 2.5 ประเภทกล่องลูกฟูก
- 2.6 การรับน้ำหนักของกล่องกระดาษลูกฟูก
- 2.7 การทดสอบกล่องกระดาษลูกฟูก
- 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระดาษลูกฟูก

รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์และสุภาวดี เทวสะโณ [4] ได้กล่าวถึงกระดาษลูกฟูกไว้ดังนี้

2.1.1 ขนาดของลอนลูกฟูก

แผ่นกระดาษลูกฟูกอาจมีโครงสร้างต่างๆ กันได้หลายแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของกระดาษ น้ำหนักมาตรฐาน และชนิดของลอนลูกฟูก แต่ส่วนที่เห็นแตกต่างกันชัดเจนทางโครงสร้างก็คือ ชนิดของลอนลูกฟูกที่ใช้ทำแผ่นกระดาษลูกฟูก โดยทั่วไปลอนลูกฟูกที่ใช้จะแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ ลอน เอ (A-flute) ลอน บี (B-flute) ลอน ซี (C-flute) และลอน อี (E-flute) ซึ่งลอนลูกฟูกแต่ละชนิดจะมีขนาดลอนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของลอน จำนวนลอนต่อเมตร ความสูงของลอนลูกฟูก และอัตราส่วนความยาวของกระดาษลูกฟูกต่อความยาวของกระดาษผิวกล่อง

ชนิดของลอน	จำนวนลอนต่อเมตร	ความสูงของลอน มิลลิเมตร	ความยาวกระดาษลูกฟูก ต่อ ความยาวกระดาษผิวกล่อง
A	120 ± 5	4.5 ± 0.25	1.55
B	170 ± 5	2.4 ± 0.25	1.36

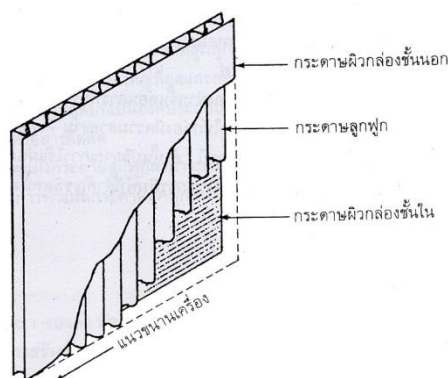
ตารางที่ 2.1 ชนิดของลอน จำนวนลอนต่อเมตร ความสูงของลอนลูกฟูก และอัตราส่วนความยาวของกระดาดลูกฟูกต่อความยาวของกระดาดผิวกล่อ (ต่อ)

ชนิดของลอน	จำนวนลอนต่อเมตร	ความสูงของลอนมิลลิเมตร	ความยาวกระดาดลูกฟูก ต่อความยาวกระดาดผิวกล่อ
C	140 ± 5	3.6 ± 0.25	1.42
E	310 ± 10	1.2 ± 0.25	1.30

ลอน A จะมีขนาดใหญ่ที่สุดตามด้วยลอน C ลอน B และลอน E ตามลำดับ ลอนที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ลอน C และลอน A ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุดจะทำให้แผ่นกระดาดลูกฟูกมีความหนาสูงที่สุด ซึ่งผลให้มีความสามารถในการต้านแรงเรียงซ้อนกันได้สูง ส่วนลอน B เหมาะใช้รับแรงที่กระทบกระแทกจากภายนอกหรือทางการพิมพ์ แผ่นกระดาดลูกฟูกแบ่งเป็น 4 แบบ โดยเรียงตามจำนวนชั้นของ กระดาดลูกฟูก ที่ประกอบเป็นชั้นกลางภายใน คือ หน้าเดียว สองหน้า สองชั้น และสามชั้น

2.1.2 ประเภทของกระดาดลูกฟูก

โดยทั่วไปกระดาดลูกฟูกมีลักษณะ โครงสร้างดังตัวอย่างรูปที่ 2.1



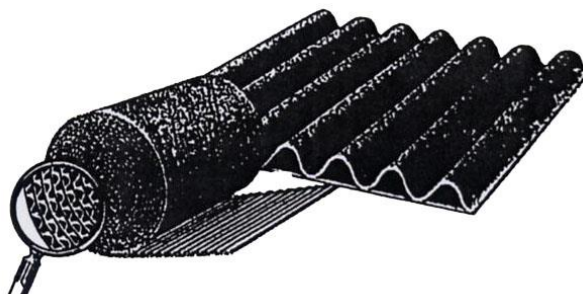
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแผ่นกระดาดลูกฟูก

ที่มา : วัสดุทางการพิมพ์, รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, สุภาวดี เทวสะโณ [4], หน้า 88

และกระดาดลูกฟูกมีการแบ่งประเภทของลูกฟูกออกเป็นลักษณะจำนวนชั้นที่ประกอบติดกันโดยรายละเอียดดังนี้

1. แผ่นกระดาดลูกฟูกหน้าเดียว (Single faced) หมายถึง แผ่นกระดาดลูกฟูกซึ่งประกอบ ด้วยกระดาด ลูกฟูก 1 แผ่น ซึ่งปิดทับด้านเดียวด้วยกระดาดผิวกล่อ (รูปที่ 2.1) ผลิตขึ้นเพื่อ ใช้ห่อของที่แตกง่าย เช่น หลอดไฟ และเครื่องแก้ว ก่อนนำของหรือสินค้าเหล่านี้ไปบรรจุในกล่อง อาจผลิต

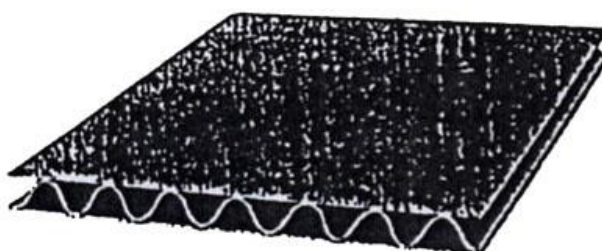
ออกมาเป็นม้วนหรือเป็นแผ่นกระดาศก็ได้ ขนาดของลอนลูกฟูกที่ใช้อาจเป็นแบบ A B C หรือ E ก็ได้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน ตัวอย่างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผ่นกระดาศลูกฟูกหน้าเดียว

ที่มา : วัสดุทางการพิมพ์, รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, สุภาวดี เทวสะโน [4], หน้า 89

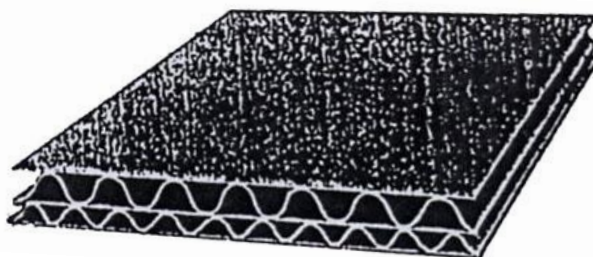
2. แผ่นกระดาศลูกฟูก 1 ชั้น หรือแผ่นกระดาศลูกฟูก 2 หน้า (single wall หรือ double faced) หมายถึง แผ่นกระดาศลูกฟูกซึ่งประกอบด้วยกระดาศลูกฟูก 1 แผ่นอยู่ตรงกลางระหว่างกระดาศผิวกล่อง 2 แผ่น ประกบติดกันด้วยสารยึดติด (รูปที่ 2.3) ผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุหีบในการทำกล่องกระดาศลูกฟูก เพื่อการขนส่งสินค้า ที่มีน้ำหนักบรรจุไม่มากนัก ใช้บรรจุของทั่วไปที่มีน้ำหนักไม่เกิน 35 กิโลกรัม ประมาณร้อยละ 90 ของกล่องกระดาศลูกฟูกจะผลิตโดยใช้แผ่นกระดาศลูกฟูกแบบนี้เป็นวัสดุหีบ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบอื่นเพื่อการบรรจุภายในกล่อง เช่น แผ่นรอง (pad) แผ่นกั้น (partition) แผ่นบุข้าง (liner) กรอบเสริม (shell) และกล่องไร้ฝา (tube) เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงของกล่อง ขนาดของลอนลูกฟูกที่ใช้อาจเป็นลอน A B C หรือ E ก็ได้ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผ่นกระดาศลูกฟูก 1 ชั้น

ที่มา : วัสดุทางการพิมพ์, รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, สุภาวดี เทวสะโน [4], หน้า 90

3. แผ่นกระดาดลูกฟูก 2 ชั้น (double wall corrugated) หมายถึง แผ่นกระดาดลูกฟูก ซึ่งประกอบด้วยกระดาดลูกฟูก 2 แผ่น กระดาดผิวกล่อ่ง 3 แผ่น ประกบติดกันด้วยสารยึดติด โดยเรียงชั้นตามลำดับจากข้างบนลงไป ดังตัวอย่างดังรูปที่ 2.4

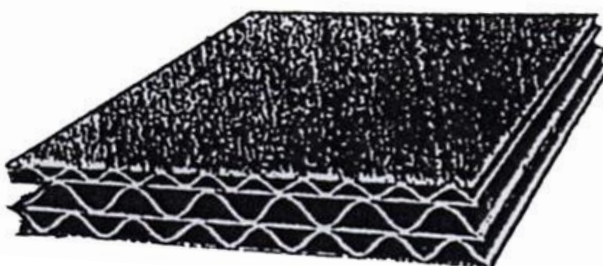


รูปที่ 2.4 แผ่นกระดาดลูกฟูก 2 ชั้น ลอนต่างชนิดกัน

ที่มา : วัสดุทางการพิมพ์, รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, สุภาวดี เทวสะโน [4], หน้า 91

กระดาดลูกฟูกที่ใช้ทั้ง 2 แผ่น จะมีขนาดลอนลูกฟูกที่ต่างกันอาจใช้ลอน A-B หรือ ลอน A-C หรือลอน B-C ก็ได้ ในภาพที่ ใช้ลอน A-B แผ่นกระดาดลูกฟูกแบบนี้สามารถรับแรงกดหรือแรงกระทำจากภายนอกได้ดี มีความแข็งแรงในการรับการเรียงซ้อนตัวสูง ใช้ทำกล่องกระดาดลูกฟูกที่มีน้ำหนักบรรจุมากได้ถึง 70 กิโลกรัม ใช้บรรจุสินค้าหนัก

4. แผ่นกระดาดลูกฟูก 3 ชั้น (triple wall corrugated) หมายถึง กระดาดลูกฟูกซึ่งประกอบ ด้วยกระดาดลูกฟูก 3 แผ่น กระดาดผิวกล่อ่ง 4 แผ่น ประกบติดกันด้วยสารยึดติด โดยวางเรียงชั้นกันตามลำดับจากข้างบนลงไป ตัวอย่างดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผ่นกระดาดลูกฟูก 3 ชั้น

ที่มา : วัสดุทางการพิมพ์, รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, สุภาวดี เทวสะโน [4], หน้า 92

กระดาดลูกฟูกทั้ง 3 แผ่นที่ใช้จะมีลอนขนาดต่างกัน ในภาพ เป็นลอน B-A-C ตามลำดับ หรืออาจใช้ลอนขนาดอื่นก็ได้ แผ่นกระดาดลูกฟูกแบบนี้ ใช้ทำกล่องกระดาดลูกฟูก ที่มีน้ำหนัก บรรจุ

สูงกว่าแบบแผ่น กระดาษลูกฟูก 2 ชั้น ใช้ในการบรรจุสินค้าหนัก อาจใช้ร่วมกับไม้ เพื่อเสริมความแข็งแรง ของกล่อง แผ่นกระดาษลูกฟูก 2 ชั้น และ 3 ชั้น จะใช้กระดาษลูกฟูกที่มี ขนาดลอนต่างกัน เพื่อให้ยึดหยุ่นตัวในการรองรับแรงกระทำจากภายนอก เช่น แรงกระทบกระแทก

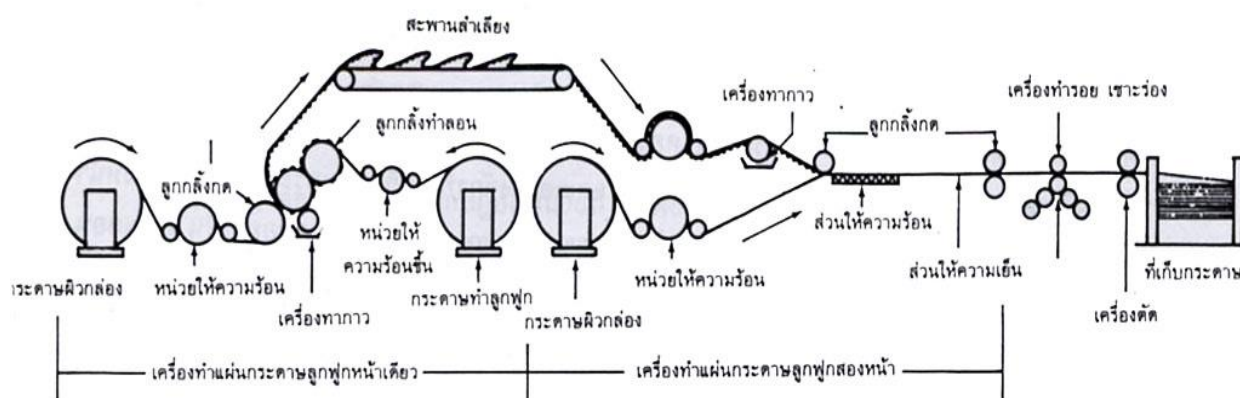
2.2 การผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก

เครื่องจักรผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก เรียกว่า คอรูเกเตอร์ จะมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ เครื่องจักรที่ใช้ผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว และเครื่องจักรที่ใช้ผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกสองหน้า ดังนั้น กระบวนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก สามารถแบ่ง ออกเป็น 2 ขั้นตอน ตามลักษณะการผลิต คือการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว และการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกสองหน้า

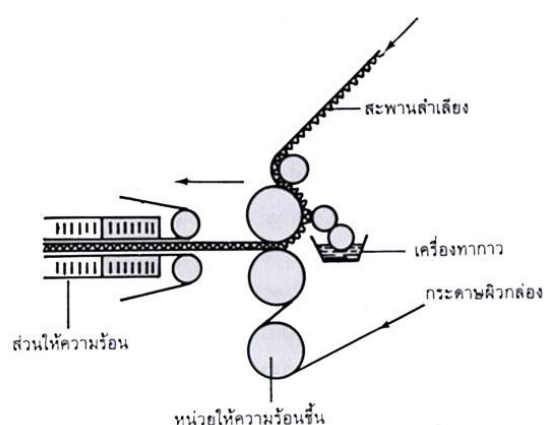
1. ขั้นตอนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียวในขั้นตอนนี้กระดาษลูกฟูก จะถูกนำมาทำให้ร้อนขึ้น เพื่อเพิ่มความชื้น แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นลอนลูกฟูก ด้วยการผ่านระหว่างลูกกลิ้งทำลอน 2 ลูก กระดาษทำลูกฟูกที่ขึ้นลอนแล้วเรียกว่า กระดาษลูกฟูก กระดาษลูกฟูกจะเคลื่อนตัวไปปรับกาวที่เครื่องทากาว โดยกระดาษลูกฟูกจะถูกทากาวตรงจุดสูงสุดของลอน เมื่อผ่านการทากาวแล้วจึงเคลื่อนตัวต่อไปปรับ กระดาษผิวกล่องมาปิดทับลอนด้านที่ทากาวจะได้แผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว

2. ขั้นตอนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกสองหน้า ขั้นตอนนี้จะต่อเนื่องจากขั้นตอนแรก หลังจากได้แผ่นกระดาษลูกฟูก หน้าเดียวแล้ว แผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียวจะเคลื่อนตัวต่อไป บนสายพานลำเลียง แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทากาว ตัวที่สอง ที่จะทากาวบนลอนลูกฟูกด้านที่เหลือ เมื่อทาแล้วจึงเคลื่อนตัวต่อไปเพื่อรับกระดาษผิวกล่องมาปิดทับผิวหน้าที่ทากาวนั้น ก็จะได้แผ่นลูกฟูกสองหน้า หรือแผ่นกระดาษลูกฟูก 1 ชั้น แผ่นกระดาษลูกฟูก จะเคลื่อนตัวต่อไปยังส่วน ให้ความร้อน เพื่ออบกระดาษให้แห้งแล้วจึงผ่านเข้าสู่ส่วนทำความเย็นเพื่อให้กระดาษเย็นลงเป็นการสิ้นสุด กระบวนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ได้จะถูกนำไปทำร่องและตัดเป็นแผ่น ตามขนาดที่ต้องการ เพื่อขึ้นรูปเป็นกล่องกระดาษลูกฟูกต่อไป

การผลิตกระดาษลูกฟูกไม่ว่าจะเป็นแบบ 1 ชั้น 2 ชั้น หรือ 3 ชั้น จะต้องเริ่มต้นจากการทำแผ่นกระดาษลูกฟูก หน้าเดียวขึ้นมาก่อนเสมอ แล้วจึงปิดทับหน้าที่สองด้วยกระดาษผิวกล่องอีกชั้นหนึ่ง ถ้าเป็นการทำแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 2 ชั้น หรือ 3 ชั้น จะมีเครื่องจักรสำหรับทำแผ่นกระดาษลูกฟูก หน้าเดียว 2 หรือ 3 ตัวตามลำดับ



รูปที่ 2.6 เครื่องผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก หรือคอรูเกเตอร์ และทิศทางของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ผลิต
ที่มา : วัสดุทางการพิมพ์, รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, สุภาวดี เทวสะโณ [4] , หน้า 100



รูปที่ 2.7 เครื่องทำแผ่นกระดาษลูกฟูกสองหน้า

ที่มา : วัสดุทางการพิมพ์, รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์, สุภาวดี เทวสะโณ [4] , หน้า 100

การทำแผ่นกระดาษลูกฟูกให้ได้ความแข็งแรงทางโครงสร้างที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 3 ประการด้วยกันคือ

1. ความแข็งแรงและคุณภาพของกระดาษที่ใช้เป็นวัตถุดิบ
2. ความคงรูปของลอนลูกฟูก
3. ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างกระดาษลูกฟูกและกระดาษผิวกลิ้งที่ปิดผิวด้านทั้งสองด้าน ซึ่งเกิดจากการใช้กาวทาที่จุดสูงสุดของลอนลูกฟูก แล้วนำไปประกบติดกับ กระดาษผิวกลิ้ง

2.3 มาตรฐาน FEFCO

2.3.1 ประวัติ FEFCO

FEFCO (The European Federation of Corrugated Board Manufacturers) คือสมาพันธ์ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกแห่งยุโรป ซึ่งเป็นองค์กรไม่แสวงหาผลกำไร เป็นตัวแทนของกลุ่มผลประโยชน์อุตสาหกรรมทั่วยุโรปและเป็นตัวแทนแสดงปัญหาในวงกว้างตั้งแต่ปัญหาทางเทคนิคไปถึงคำถามในเชิงเศรษฐกิจ สมาพันธ์ผู้ผลิตกระดาษลูกฟูกแห่งยุโรป (FEFCO) จัดตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1952 มีสำนักงานใหญ่ตั้งอยู่ที่เมือง บรัสเซล กลุ่มสมาพันธ์ผู้ผลิตกระดาษลูกฟูกแห่งยุโรปมีสมาชิกทั้งหมดประกอบไปด้วย 24 กลุ่มประเทศสมาชิกระดับชาติ กลุ่มสมาชิกระดับตัวแทน และสมาชิกที่เกี่ยวข้อง

บทบาทหน้าที่ของสมาพันธ์คือ 1) ตรวจสอบปัญหาทางด้านเศรษฐกิจ การเงิน เทคนิค และการตลาดของกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในอุตสาหกรรมการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก 2) วิเคราะห์ปัจจัยทุกด้านที่มีผลต่ออุตสาหกรรม และ 3) เพื่อส่งเสริมและพัฒนาภาพลักษณ์ของกลุ่มอุตสาหกรรมให้ดียิ่งขึ้น สมาพันธ์ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษลูกฟูกแห่งยุโรป (FEFCO) มีสำนักงานใหญ่ตั้งอยู่ที่เมืองบรัสเซล และการจัดตั้งกลุ่มนานาชาติอยู่ภายใต้การควบคุมของกฎหมายของประเทศเบลเยียม [5]

2.3.2 รหัสรูปแบบกล่องมาตรฐาน FEFCO

เนื่องจากกล่องกระดาษลูกฟูกมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง จึงมีการผลิตกล่องออกมามากมายหลายรูปแบบที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ดังนั้น FEFCO จึงได้กำหนดรหัสอ้างอิงรูปแบบกล่องลูกฟูก มีการใช้สัญลักษณ์ที่เข้าใจง่ายเป็นสากลแทนรายละเอียดและส่วนประกอบต่างๆ ของกล่องกระดาษลูกฟูกเพื่อใช้ในการสื่อสารอย่างเป็นระบบระหว่างผู้ผลิตกล่องกับผู้สั่งซื้อกล่องให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น และสามารถขอเอกสารรหัสนี้ได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย [6] โดย FEFCO แบ่งประเภทกล่องลูกฟูกไว้ 8 ประเภทตามรหัสดังนี้

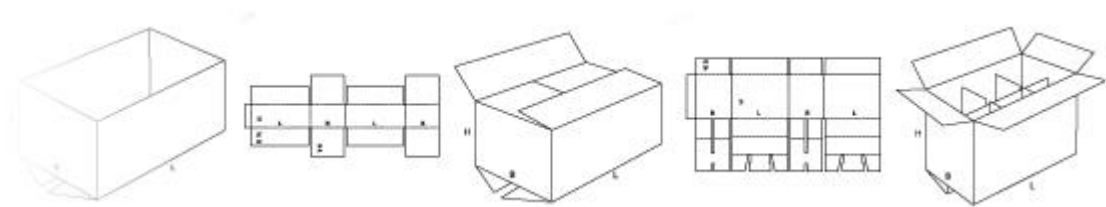
2.3.2.1 รหัส 01: กระดาษลูกฟูกเชิงพาณิชย์แบบม้วนและแบบแผ่น



รูปที่ 2.8 กระดาษลูกฟูกเชิงพาณิชย์แบบม้วนและแบบแผ่น

2.3.2.2 รหัส 02: กล่องประเภท slotted

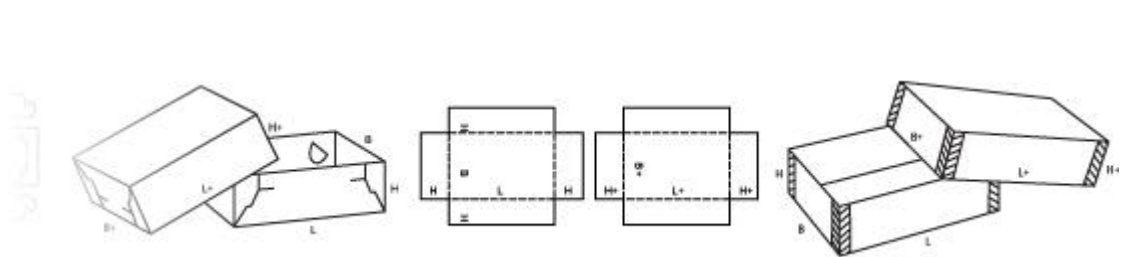
ประกอบด้วยกล่องที่ด้านหนึ่งจะติดด้วยกาว (แบบเย็บหรือเป็นเทปกาว) ผู้ผลิตจะรวบส่วนด้านบนและล่างของกล่องเข้าด้วยกันและการจัดส่งแบบพับเรียบและพร้อมใช้งานและมีรูปแบบแบบกล่องสำหรับการใช้แบบปิดด้วย



รูปที่ 2.9 กล่องประเภท slotted

2.3.2.3 รหัส 03: กล่องประเภท Telescope

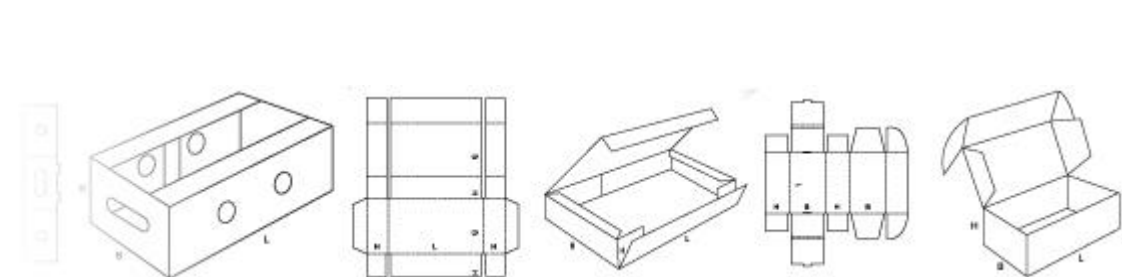
ประกอบด้วยกล่องกระดาษที่มีจำนวนชิ้นกล่องมากกว่าหนึ่งชิ้น แบ่งเป็นตัวกล่อง และตัวฝากล่อง



รูปที่ 2.10 กล่องประเภท Telescope

2.3.2.4 รหัส 04: กล่องหรือถาดประเภท Folder

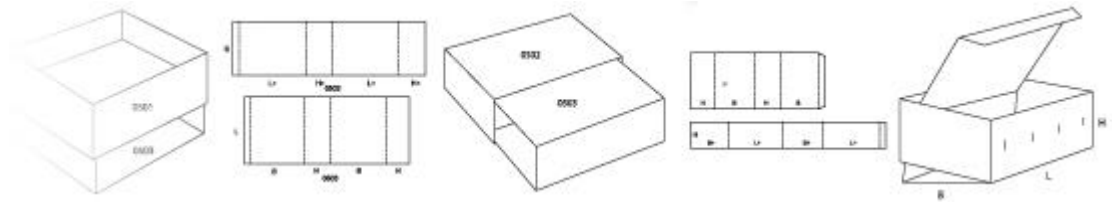
มักจะประกอบด้วยชิ้นส่วนของกล่องเพียงหนึ่งชิ้น ด้านล่างของกล่องจะสามารถพับขึ้นรูปกล่องได้เป็นสองด้านหรือทุกด้านรวมทั้งฝารอบ หรือตัวจับและอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบแต่ละผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.11 กล่องประเภท Folder

2.3.2.5 รหัส 05: กล่องประเภท Slide

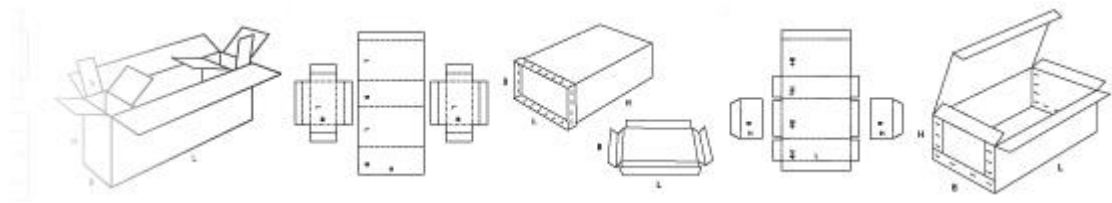
ประกอบด้วยชิ้นส่วนของกล่องหลายชิ้นส่วน ตัวกล่องจะมีแขนของกล่องเพื่อเลื่อนไปในทิศทางที่แตกต่างกัน กล่องประเภทนี้ยังรวมถึงตัวกล่องด้านนอกอีกด้วย



รูปที่ 2.12 กล่องประเภท Slide

2.3.2.6 รหัส 06: กล่องประเภท Rigid

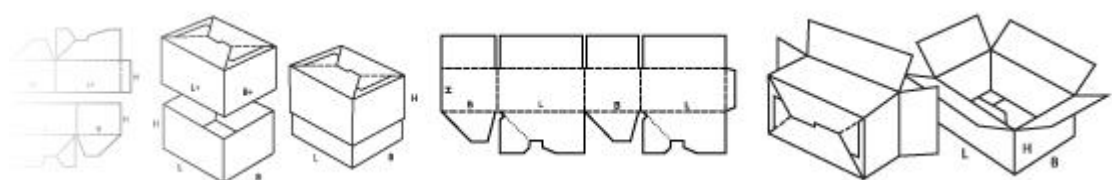
ประกอบด้วยชิ้นส่วนของกล่องสองชิ้นที่แยกออกจากตัวกล่องหลัก การขึ้นรูปกล่องต้องใช้การเย็บติดก่อนการใช้งาน



รูปที่ 2.13 กล่องประเภท Rigid

2.3.2.7 รหัส 07: กล่องประเภท Ready-glued

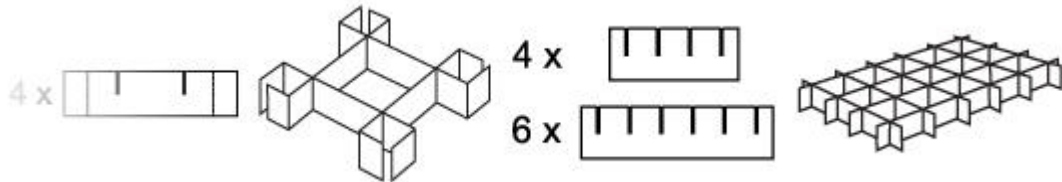
ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักหนึ่งชิ้น การจัดส่งแบบพับเรียบและพร้อมใช้งานด้วยการขึ้นรูปแบบง่าย



รูปที่ 2.14 กล่องประเภท Ready-glued

2.3.2.8 รหัส 09: การออกแบบด้านใน Interior fitments

เป็นการแบ่งพื้นที่ด้านในกล่อง ด้วยแผ่น pad หรือตัวแบ่งพื้นที่กล่อง ขึ้นอยู่กับการออกแบบเพื่อให้เข้า กับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการ ชิ้นส่วนของกล่องจึงมีปริมาณต่างกัน



รูปที่ 2.15 การออกแบบด้านใน Interior fitments

2.4 กระดาษkraft

กระดาษkraft (Kraft Paper) คือ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเคมี (Chemical Pulp) ที่ได้จากกระบวนการ kraft (Kraft Process) เป็นการใช้เทคโนโลยีในการแปลงสภาพจาก เนื้อไม้เป็นเยื่อกระดาษไม้ (Wood Pulp) โดยใช้สารเคมีและความร้อนในการแยกเยื่อและขจัดลิกนิน เยื่อกระดาษที่ได้จาก กระบวนการkraft นี้ จะได้กระดาษที่มีความแข็งแรงหรือเหนียวกว่ากระดาษชนิดอื่น โดยปกติ กระดาษkraft จะมีสีน้ำตาล ตามสีของเนื้อ ไม้ที่นำมาผลิต แต่สามารถนำมาฟอกสีให้มีย่นสีขาวได้

กระดาษkraft เป็นกระดาษที่มีความเหนียวและแข็งแรงกว่ากระดาษธรรมดา สามารถป้องกันแรงอัด และการฉีกขาดจากการกระทบกระแทกจากภายนอกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการ ด้านทานการเปียกน้ำ ด้านทานการเปื้อนน้ำมัน ด้านทาน การเสียดสี มีน้ำหนักกระดาษมีความหนา และมีความเรียบสม่ำเสมอ สามารถติดกาวได้ดี และเหมาะสำหรับการพิมพ์ จากคุณลักษณะที่เด่น ของกระดาษkraft ดังกล่าว แล้ว ทำให้สามารถนำมาแปรรูปเป็นบรรจุภัณฑ์และภาชนะหีบห่อได้ อย่างเหมาะสม ทั้งด้าน การผลิต การบรรจุและการขนส่ง นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาหมุนเวียน ใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตกระดาษได้อีก ช่วยให้ลดปัญหามลพิษด้านสภาวะแวดล้อมลงได้ระดับหนึ่ง ดังนั้น กระดาษkraft จึงเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรม [7]

2.4.1 ชนิดของกระดาษkraft

กระดาษkraft ที่เรานำมาทำแผ่นกระดาษลูกฟูก มีหลายประเภท หลากสีสัน และคุณภาพ การนำไปใช้งานก็แตกต่างกัน โดยหลักๆเกรดกระดาษที่ใช้ มีดังต่อไปนี้

2.4.1.1 KS กระดาษกราฟที่สีขาวสำหรับทำผิวกล่องน้ำหนักมาตรฐาน : 170 กรัม/ตารางเมตร มีความเรียบ สะอาด เหมาะสำหรับกล่องที่เน้นความสวยงามและ ช่วยให้การพิมพ์ที่มีสีสดชัดเจน ดูโดดเด่น เพิ่มคุณค่าให้สินค้าที่บรรจุภายใน นอกจากนี้ กระดาษ KS ยังมีความแข็งแรงสูง สามารถปกป้องสินค้าได้ดี นิยมใช้สำหรับ กล่องเครื่องใช้ไฟฟ้า สินค้าเพื่อการส่งออก และ กล่องอุปโภคบริโภค ที่ต้องการบ่งบอกถึงควมมีระดับของสินค้า เป็นต้น



รูปที่ 2.16 กระดาษกราฟชนิด KS

2.4.1.2 KA กระดาษกราฟสีเหลืองทองสำหรับทำผิวกล่องน้ำหนักมาตรฐาน : 125, 150, 185, 230 กรัม/ตารางเมตร มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ สามารถรองรับน้ำหนักได้ดีเยี่ยม และเป็นสีที่นิยมใช้กันมากในประเทศเหมาะสำหรับ สินค้าอะไหล่ยนต์ อาหารกระป๋องกล่องเฟอร์นิเจอร์ ที่ต้องการความมั่นใจในเรื่องความแข็งแรงทุกรูปแบบ ทั้งการเรียงซ้อน และการป้องกันการกระแทก



รูปที่ 2.17 กระดาษกราฟชนิด KA

2.4.1.3 KI กระดาษกราฟสีน้ำตาลอ่อนสำหรับทำผิวกล่องน้ำหนักมาตรฐาน : 125, 150, 185 กรัม/ตารางเมตร สีส่อนสบายตา เหมาะกับงานพิมพ์ภาพหรือตัวหนังสือ ให้มีสีสวยงามด้านการพิมพ์เป็นรองเพียงกระดาษ KS เท่านั้นนิยมใช้กับสินค้าที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากเท่า KA เหมาะกับกล่องสินค้าทั่วไปเช่น กล่องอาหารสำเร็จรูป กล่องเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการพิมพ์เป็นภาพสี เป็นต้น



รูปที่ 2.18 กระดาษกราฟท์ชนิด KI

2.4.1.4 KP กระดาษกราฟท์สีน้ำตาลสำหรับทำฟิวกล่องน้ำหนักมาตรฐาน : 175, 275 กรัม/ตารางเมตร มีโทนสีใกล้เคียงกับกระดาษต่างประเทศเป็นที่ยอมรับกันในสากล เหมาะกับการใช้ผลิตกล่องสำหรับสินค้าส่งออกทุกชนิด



รูปที่ 2.19 กระดาษกราฟท์ชนิด KP

2.4.1.5 KT กระดาษกราฟท์สีน้ำตาลสำหรับทำฟิวกล่องน้ำหนักมาตรฐาน : 125, 150 กรัม/ตารางเมตร ผลิตจากเยื่อ Recycled 100% เพื่อส่งเสริมด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมแต่ยังคงความสวยงามและความแข็งแรง มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องการวางเรียงซ้อน เหมาะกับสินค้าส่งออกที่ระบุให้ใช้กล่องที่ทำจากเยื่อ Recycled ทั้งหมด



รูปที่ 2.20 กระดาษกราฟท์ชนิด KT

2.4.1.6 CA กระดาษกราฟที่สำหรับทำลอนลูกฟูกน้ำหนักมาตรฐาน : 105, 125 กรัม/ตารางเมตร มีคุณสมบัติความแข็งแรงในการป้องกันแรงกระแทกสำหรับทำลอนลูกฟูกขนาดต่างๆได้ทุกลอนให้ได้คุณภาพสูงความแข็งแรงสัมพันธ์กับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ นอกจากนี้ กระดาษ CA ยังนิยมนำมาใช้ทำเป็นกระดาษทำผิวกล่องด้านหลังเพื่อลดต้นทุนอีกด้วย



รูปที่ 2.21 กระดาษกราฟชนิด CA

2.4.2 ค่าความแข็งแรงของกระดาษแต่ละชนิด Kraft Liner Board Specification

ตารางที่ 2.2 ค่าความแข็งแรงของกระดาษกราฟแต่ละชนิด

เกรดกระดาษ Paper Grade	น้ำหนัก/กรัม Basic Weight (g/m ² +/- 4%)	ค่าแรงกดวงแหวน Ring Crush (N/152.4 mm) Min.	ค่าความต้านทาน แรงดัน ทะลุ Burst (KPa) Min.	ระดับ ความชื้น Moisture (%)
KA125	125	160-170	390-400	6-9
KA150	150	210-220	460-490	6-9
KA185	185	280-300	520-560	6-9
KA230	230	380-410	640-680	6-9
KI125	125	125-155	300-350	6-9
KI150	150	170-200	370-440	6-9
KI185	185	230-260	460-540	6-9

ตารางที่ 2.2 ค่าความแข็งแรงของกระดาษกราฟแต่ละชนิด (ต่อ)

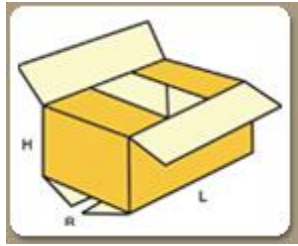
เกรดกระดาษ Paper Grade	น้ำหนัก/กรัม Basic Weight (g/m ² +/- 4%)	ค่าแรงกดวงแหวน Ring Crush (N/152.4 mm) Min.	ค่าความต้านทาน แรงดัน ทะลุ Burst (KPa) Min.	ระดับ ความชื้น Moisture (%)
KP175	175	210	410	6-9
KP275	275	345	600	6-9
KT125	125	140	275	6-9
KT150	150	190	350	6-9
TA125	125	150-155	275-320	6-9
TA150	150	200-215	350-375	6-9

2.5 ประเภทกล่องลูกฟูก

ประเภทของกล่องลูกฟูกใน [8] จำแนกได้ดังนี้

2.5.1 กล่องแบบ RSC (Regular Slotted Container)

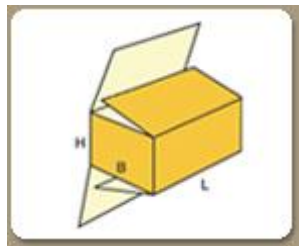
นิยมใช้มากกว่ากล่องชนิดอื่นๆ เนื่องจากผลิตได้ง่ายจากกระดาษแผ่นเดียว สิ้นเปลืองวัสดุน้อย มีฝาเปิดปิดที่กว้างเท่ากัน โดยฝากล่องแผ่นนอกบรรจบกันที่กึ่งกลางกล่องตามด้านยาวของฝากล่อง ฝากล่องแผ่นใน เว้นช่องห่างตามความสัมพันธ์ของด้านกว้างและด้านยาวของกล่อง สามารถขนส่งให้ลูกค้าเป็นแผ่นราบเสมอกัน ซึ่งคลี่ออกพับเป็นกล่องได้ทันที ซึ่งง่ายต่อการบรรจุและปิดกล่อง กล่อง RSC สามารถดัดแปลงขนาดเพื่อขนส่งผลิตภัณฑ์ได้เกือบทุกชนิด และสามารถใส่แผ่นรองเสริมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้



รูปที่ 2.22 กล่องแบบ RSC

2.5.2 กล่องแบบ FOL (Full Overlap Slotted Container หรือ Full Overlap Container)

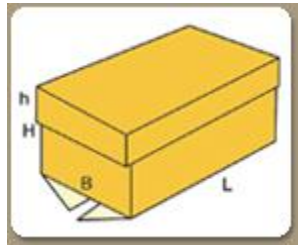
มีฝาทุกด้านเปิดปิดกว้างเท่ากัน ฝากล่องแผ่นนอกกว้างเท่ากับด้านกว้างของกล่อง ทำให้ทับกันสนิท การซ้อนทับกันของฝาเปิดแผ่นนอกทั้งด้านบนและด้านล่าง จะช่วยเสริมความแข็งแรงของกล่อง เมื่อมีการวางซ้อนกัน จึงเหมาะสำหรับบรรจุสิ่งของที่น้ำหนักมาก อีกทั้งยังช่วยด้านทานการ handling ที่ไม่ปราณีได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.23 กล่องแบบ FOL

2.5.3 กล่องแบบ HSC (Half Slotted Container with Cover)

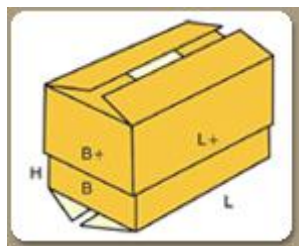
ประกอบ ด้วย 2 ส่วน ฝารอบและตัวกล่อง เป็นกล่องสลอตมีฝาเปิดปิดด้านเดียว ไม่มีฝาเปิดปิดในตัว โดยกล่องจะถูกปิดด้วยฝารอบต่างหาก ฝารอบยื่นครอบตัวกล่องน้อยกว่าสองในสามของความสูงของตัวกล่อง ฝารอบลักษณะเดียวกันกับ design style หรือ เป็นแบบ half-slotted style ก็ได้ เมื่อต้องการทั้งการขนส่ง และตั้งโชว์ และในงานที่ต้องเปิดปิดฝารอบบ่อยครั้ง สำหรับฝารอบแบบ half slotted style นั้นใช้มากในอุตสาหกรรม แบตเตอรี่, ตู้เย็น, เครื่องซักผ้า ฯลฯ



รูปที่ 2.24 กล่องแบบ HSC

2.5.4 กล่องแบบ PTHS (Half Slotted Box with Half Slotted Partial Cover)

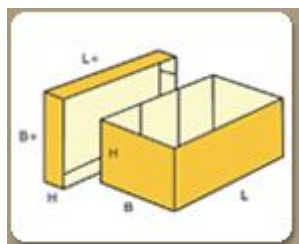
ประกอบด้วยกล่อง 2 ชั้น คือ ฝาครอบกับตัวกล่องซึ่งต่างก็เป็นแบบ slotted style ทนต่อการโก่งตัวและบวมโศ่งอ (bulging & bulking) เมื่อกล่องได้รับน้ำหนักทับมาก บางครั้ง ผู้ผลิตก็ตั้งใจที่จะให้มีการบรรจุสินค้ามากเกินไป (over-packed) แต่กล่องก็สามารถรับน้ำหนักได้ดี



รูปที่ 2.25 กล่องแบบ PTHS

2.5.5 กล่องแบบ FPF (Five Panel Folder)

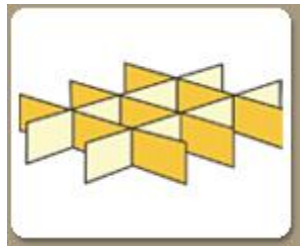
ลักษณะเหมือนกล่อง RSC แต่ความสูงน้อยมาก เมื่อเทียบกับความยาวปิดเป็นรูปกล่องโดยใช้เทปปิด ทั้งสองปลายกล่องให้ความทนทานดีเนื่องจากมีฝาปิด เหมาะเป็นภาชนะสำหรับขนส่งสิ่งของที่เป็นของแท่งยาวๆ เช่น หวาย ลูกกลิ้ง รั้ว และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 2.26 กล่องแบบ FPF

2.5.6 ส่วนประกอบต่างๆ ภายในกล่อง (Partitions and Pads)

ชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ภายในกล่อง ใช้สำหรับแบ่งกั้นและลดแรงกระแทกระหว่างวัตถุ อีกทั้งยังช่วยลดช่องว่างระหว่างสิ่งของที่บรรจุอยู่ในกล่อง แผ่นรองทำจากแผ่นกระดาษลูกฟูกแผ่นเดียวตามความต้องการใช้งาน สามารถนำมาทำเป็นแผ่นกั้นสิ่งของ หรือใช้รองสิ่งของในแต่ละชั้น ทำให้สิ่งของได้รับการปกป้องมากยิ่งขึ้นระหว่างการขนส่ง ใ้ในกล่องผลิตขึ้นจากการวางสับกันของแผ่นกระดาษลูกฟูก นิยมใช้มากสำหรับสิ่งของที่บอบบาง แดง่าย เช่น เครื่องแก้ว ขวด แจกัน ต่างๆ เมื่อขึ้นรูปใ้ใน จะช่วยเสริมให้กล่องมีความแข็งแรงและอยู่ทรงมากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.27 ชิ้นส่วนภายในกล่องสำหรับแบ่งกั้นและลดการกระแทก

2.6 การรับน้ำหนักของกล่องกระดาษลูกฟูก

ปัจจัยในการรับน้ำหนักของกล่องกระดาษลูกฟูก [9]

2.6.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดมิติของกล่อง

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูกจะเริ่มต้นจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตแผ่นลูกฟูก (Corrugator) โดยแผ่นกระดาษลูกฟูกจะถูกพับรอย (Score Line) ซึ่งเป็นส่วนสูงของกล่อง และจะนำไปพับรอย (Crease) ที่เครื่องพิมพ์เพื่อเป็นความกว้างและยาวของกล่อง หลังจากนั้นจะเจาะร่อง (Slotted) เพื่อทำเป็นฝาและก้นกล่อง และตัดเป็นส่วนลิ้นกาวกล่องซึ่งจะทากาว หรือเย็บลวด ประกอบเป็นกล่องสำเร็จรูปต่อไป กล่องกระดาษลูกฟูกที่ได้จะมีความแข็งแรงในการรองรับน้ำหนักบรรจุ และรองรับน้ำหนักในการวางเรียงซ้อนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสำคัญๆ ที่เกี่ยวข้อง 2 ประการ คือ

1. เมื่อกล่องมีความสูงมากขึ้นจะมีผลให้ Box compression ลดลง และเมื่อกล่องมีผลบวกของด้านกว้างและยาวลดลง ก็จะมีผลให้ Box Compression ลดลงด้วย
2. อัตราส่วน ด้านสูง : ด้านกว้าง และด้านยาว : ด้านกว้าง จะมีผลต่อความสามารถในการเรียงซ้อนของกล่อง โดยที่กล่องนั้นๆ มีโครงสร้างและปริมาตรบรรจุเดียวกัน

2.6.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่บรรจุกล่อง

2.6.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงแน่นอน

ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงแน่นอน หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงที่สามารถจัดรูปแบบการจัดเรียงตัวที่แน่นอน เป็นระเบียบ สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. สินค้าที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักขณะวางเรียงซ้อนได้ด้วยตัวเอง เช่น ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุกระป๋อง ขวด และหนังสือ เป็นต้น กล่องที่ใช้บรรจุผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ไม่จำเป็นต้องมีคุณภาพทางด้าน Box Compression Strength สูงมาก แต่ต้องการให้มีความแข็งแรงเพียงพอในการรองรับน้ำหนักสินค้าที่บรรจุ และมีขนาดของกล่องที่ให้การบรรจุที่กระชับ

2. สินค้าที่มีความสามารถในการรองรับน้ำหนักขณะวางเรียงซ้อนได้บางส่วน เช่น กระดาษ เช็ดหน้า ที่บรรจุกล่องเล็ก กระดาษชำระ เป็นต้น ตัวสินค้าหรือกล่องเล็กที่บรรจุมีความแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักได้บางส่วน กล่องที่ใช้จึงจำเป็นต้องเพิ่มคุณภาพทางด้าน Box Compression Strength ให้สูงเพียงพอ

2.6.2.2 ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงไม่แน่นอน

ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงไม่แน่นอน หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ไม่คงรูปสามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้ง่าย เช่น ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็น ผง เม็ด หรือของเหลว เป็นต้น กล่องที่ใช้บรรจุสินค้าพวกนี้ต้องมีความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength) จากภายในกล่อง ซึ่งจะทำให้กล่องบวม ยุบเสียหายได้ง่าย และต้องมีคุณภาพทางด้าน Stacking Strength ที่สูงเพียงพอต่อการรับน้ำหนักที่วางเรียงซ้อนกัน

2.7 การทดสอบกล่องกระดาษลูกฟูก

2.7.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติในด้านความแข็งแรงของภาชนะบรรจุที่ทำจากกระดาษ สมาชิก รุ่งอินทร์ [10] ได้กล่าวไว้ดังนี้

การต้านแรงกด (compression strength)

หมายถึงความสามารถของภาชนะบรรจุในการต้านแรงกดที่กระทำบนภาชนะบรรจุด้วยอัตราเร็วอย่างสม่ำเสมอจนภาชนะเสียรูป มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หรือกิโลกรัมแรง (kgf) ถึงแม้ว่าการทดสอบนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงของภาชนะบรรจุเมื่อเรียงซ้อนกันก็ตาม แต่ค่าที่ได้ก็ไม่ได้บอกถึงน้ำหนักในการเรียงซ้อนจริงๆ เพราะในทางปฏิบัติจำเป็นต้องมีตัวคูณเพื่อความปลอดภัย (safety

factor) ที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่ความชื้นในสภาวะอากาศ ระยะเวลาในการเก็บ รูปแบบในการเรียงซ้อน ลักษณะของการขนถ่าย อย่างไรก็ดี คุณสมบัตินี้จำเป็นต้องมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและกำหนดคุณภาพของภาชนะบรรจุเพื่อการขนส่ง เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องกด (compression tester) มาตรฐานที่ใช้ได้แก่ ISO 2872 และ ASTM D 642 เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัยภัทร สิริพลวัฒน์ [11] ได้ทำการศึกษาเรื่องการพัฒนาสูตรการคำนวณค่าความแข็งแรงกลองกระดาษลูกฟูก ได้ผลการวิจัยดังนี้ ในการคำนวณค่าความแข็งแรงของกลอง (BCT) จะมีการใช้สูตรการคำนวณที่ชื่อว่า สูตร McKee โดยมีสมการ คือ $BCT = 5.87 \times ECT \times (ZH)^{1/2}$ (ECT = ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเซ็นติเมตร, Z = เส้นรอบรูปของกลอง มีหน่วยเป็นเซ็นติเมตร, H = ความสูงของลอนกระดาษลูกฟูก มีหน่วยเป็นเซ็นติเมตร) ซึ่งจากสมการของ McKee นี้จะพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงกลอง (BCT) มีดังนี้ 1. ปริมาณน้ำหนักกระดาษที่ใช้ผลิตกลอง เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า ECT ในสมการ 2. ลอนกระดาษที่ใช้ผลิตกลอง เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า ECT และ H ในสมการ 3. เส้นรอบรูปกลอง เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Z ในสมการ จากสูตรของ McKee ในข้างต้น เมื่อนำมาคำนวณค่า ความแข็งแรงกลอง (BCT) พบว่า มีความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 32.82 % ซึ่งอาจจะเกิดจากปัจจัยอื่นๆ ที่ยังไม่ได้ระบุนรวมอยู่ในสูตรที่ใช้กันอยู่ จึงนำไปสู่การศึกษา ทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงกลองเพิ่มเติม และจากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงกลอง (BCT) ที่ยังไม่ได้ระบุอยู่ในสูตรของ McKee อย่างมีนัยสำคัญมีอยู่ 2 ปัจจัย คือ 1. ความสูงของกลองที่ขนาดเส้นรอบรูปกลองคงที่หรืออัตราส่วนความสูงของกลองต่อขนาดเส้นรอบรูปกลอง (Height หรือ Height/Perimeter Ratio) 2. อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของกลอง (Length/Width Ratio)

อลิษา ทองพิมพ์ อิศราภา นาคโสมกุล และ ดำรงพล คำแหงวงศ์ [12] ได้ทำการศึกษาเรื่องการออกแบบภาชนะบรรจุเพื่อการขนส่งสัมภาระของดี ได้ผลการศึกษาดังนี้ จากปัญหากล่องยุบตัวเนื่องจากแรงกดทับในระหว่างการจัดเก็บและการขนส่งทางเรือ จึงได้ทำการออกแบบกล่องกระดาษลูกฟูกชนิดสองชั้น จำนวน 7 แบบ ได้แก่ กลอง BC เป็นกล่องแบบ Full telescope box ทั่วไป, BCC เป็นกล่องแบบ Full telescope box ที่เสริมความแข็งแรงที่มุมทั้ง 4 มุมของกลอง กลอง WC เป็นกล่องแบบ Wrap around ทั่วไป กลอง WC 4 เป็นกล่องแบบ Wrap around ที่เสริมมุมเข้าไปทั้ง 4 มุมของกลอง กลอง WC 6 เป็นกล่องแบบ Wrap around ที่เสริมมุมเข้าไปทั้ง 4 มุมและเสริมคอด้าน 2 คอด้านด้านข้างของกลอง กลอง WC 8 เป็นกล่องแบบ Wrap around ที่เสริมมุมเข้าไปทั้ง 4 มุมและเสริมคอด้าน 4 คอด้านด้านข้างของกลอง และสุดท้ายคือกลอง NDB เป็นกล่องสองชั้น ตัวกล่องเลียนแบบกลอง WC 8 และฝากล่องเลียนแบบกลอง BC

ผลการทดสอบพบว่า การขนส่งโดยกล่องชนิด NDB มีความต้านทานต่อแรงกดทับและการวางเรียงซ้อนสูงสุด มีประสิทธิภาพในการบรรจุและจัดวางเรียงบนแท่นรองรับสินค้ามากที่สุด ขณะที่กล่องชนิดอื่นเดี่ยวแบบ WC มีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อแรงกดทับต่ำจึงไม่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการขนส่ง

เจนยุทธ ศรีหิรัญ [13] ได้ทำการศึกษาเรื่องการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนขนาดกล่องกระดาษลูกฟูกต่อความต้านทานแรงกดในแนวดิ่งโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลการวิจัยดังนี้ จากการทดสอบด้วยวิธี FEA พบว่าชนิดของลอนลูกฟูกรวมทั้งการเปลี่ยนขนาดด้านยาว ด้านกว้าง และด้านสูงของกล่อง มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า BCT โดยพบว่าเมื่อความสูงของลอนเพิ่มขึ้นจากลอน B เป็นลอน C และความยาวของเส้นรอบรูปของกล่องเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่า BCT จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบด้วยวิธี FEA มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเทียบตำแหน่งความเสียหายบนระนาบกล่อง (ระยะ YR1 R และ YR2R) ทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการและโดยวิธี FEA พบว่ามีผลที่สอดคล้องกัน ในการทดสอบโดยวิธี FEA นั้นหากเปรียบเทียบลักษณะการกระจายความเค้นบนระนาบกล่องที่มีขนาดแตกต่างกันพบว่ามีลักษณะการกระจายความเค้นคล้ายคลึงกันแต่ตำแหน่งความเข้มของความเค้นจะต่างกันไป จากการเปรียบเทียบกล่อง RSC กับกล่องไรีไฟ (tube) พบว่ากล่องไรีไฟที่มีขนาดเท่ากันโดยส่วนใหญ่สามารถรับแรงกดได้มากกว่ากล่อง RSC อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และจากผลโดยรวมพบว่าค่า BCT ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงกว่าการทดสอบด้วยวิธี FEA และค่า BCT จากวิธี FEA มีค่ามากกว่าจากการคำนวณด้วยสูตร McKee โดยค่า BCT ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี FEA ถือว่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริงและค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมและเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น