# การออกแบบชิ้นส่วนรองรับการกระแทกสำหรับผลิตภัณฑ์

# Cushioning Design for Shock Isolation in Shipping Packages

วรุตม์ จันทรเนตร วิศิษฏ์ คุณาฤทธิพล วุฒิ บุณยวงศ์วิโรจน์ เอก ลิ่วเฉลิมวงศ์ และ ฐิติมา จินตนาวัน*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6610 โทรสาร 0-2252-2889 *อีเมล์ fmetjt@eng.chula.ac.th

Warut Jantaranate, Wisit Kunarittipol, Wut Boonyawongvirot, Ek Lewchalermwongse, and Thitima Jintanawan*
Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University
Phayathai Rd., Bangkok 10330, Thailand, *E-mail: fmetjt@eng.chula.ac.th

**Keywords**: Cushioning design, Shock, Packaging

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบวัสดุกันกระแทกสำหรับป้องกันผลิตภัณฑ์เพื่อไม่ให้ได้รับความเสียหายในระหว่างการขนส่ง โดยในการออกแบบเลือกวัสดุกันกระแทกนั้น จำเป็นต้องทราบถึงคุณลักษณะการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของวัสดุกันกระแทก เรียกว่า Dynamic Cushioning Curves ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความเร่งสูงสุดของก้อนมวลผลิตภัณฑ์หลังจากเกิดการกระแทก และ อัตราส่วนระหว่างมวลต่อพื้นที่ของผลิตภัณฑ์ (Mass Density) เมื่อก้อนมวลตกแบบอิสระบนวัสดุกันกระแทกจากความสูงที่กำหนด ความเร่งสูงสุดนี้จะบ่งบอกถึงขนาดของแรงสูงสุดที่ส่งจากพื้นมายังก้อนมวลผ่านวัสดุกันกระแทก ในการศึกษาเราทดสอบหา Dynamic Cushioning Curves ของวัสดุกันกระแทกตัวอย่างชนิด Low Density Polyethylene (LDPE-J4324) ที่มีความหนาต่างๆกัน จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ มวลของผลิตภัณฑ์ ความหนา และขนาดพื้นที่หน้าตัด ต่อค่าความเร่งสูงสุดที่จะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งความเข้าใจผลดังกล่าวสามารถนำไปสู่การเลือกออกแบบชนิดและขนาดของวัสดุกันกระแทกให้เหมาะสมในเงื่อนไขหนึ่งๆ ได้

**Abstract**

This research studies cushioning design for shock isolation in shipping packages. In the design, the *Dynamic Cushioning Curves* of cushioning materials, showing the maximum accelerations of the package mass due to the impact for various mass densities, are required. The maximum acceleration indicates the maximum force that transmitted from the floor to the package through the cushion. In this paper, the Dynamic Cushioning Curves of the Low Density Polyethylene (LDPE-J4324) foam are experimentally determined. The test results reveal effects of the designed parameters such as product mass, foam thickness and foam area on the maximum acceleration.

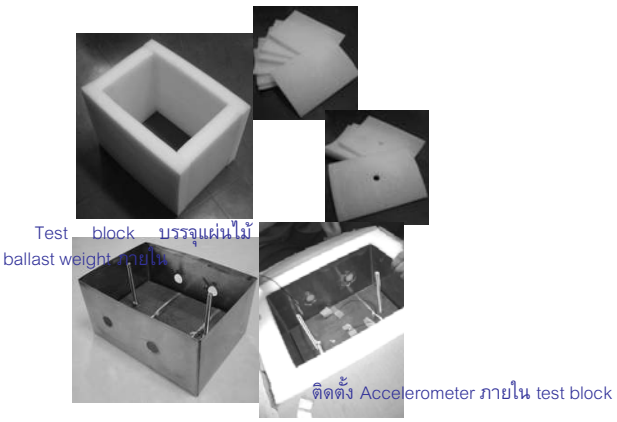
## 1. บทนำ

บทความนี้ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุกันกระแทก สำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันความเสียหายจากแรงกระแทก ที่ส่งผ่านไปยังผลิตภัณฑ์ คุณลักษณะที่สำคัญข้อหนึ่งคือการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของวัสดุกันกระแทก เป็นที่รู้จักในทางอุตสาหกรรมว่า Dynamic Cushioning Curves ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความเร่งสูงสุด (ในหน่วย G's) ของบรรจุภัณฑ์ที่รองรับด้วยวัสดุกันกระแทก เมื่อเกิดการกระแทก กับค่ามวลรวมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Mass Density) ที่เปลี่ยนไป ณ สภาวะ ความสูงของการตกและความหนาของวัสดุกันกระแทก ต่างๆ ความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขนาดมวลค่าหนึ่งๆ นั้นบ่งบอกถึงแรงสูงสุดที่ส่งถ่ายจากพื้นไปยังผลิตภัณฑ์โดยผ่านวัสดุกันกระแทก ดังนั้นถ้าเราเลือกวัสดุกันกระแทกที่มีคุณสมบัติเหมาะสมความเร่งหรือแรงดังกล่าวจะมีระดับลดลงได้ ดังนั้นกราฟ Dynamic Cushioning Curves นี้จึงเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบเพื่อเลือกชนิด และ ขนาดของวัสดุกันกระแทกที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบหา Dynamic Cushioning Curves ของวัสดุกันกระแทกตัวอย่าง และวิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากแบบจำลอง [2] เพื่อให้เข้าใจถึงผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ มวลของผลิตภัณฑ์ ความหนาและขนาดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุกันกระแทกต่อค่าความเร่งสูงสุดที่จะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ รวมถึงพิจารณานำข้อมูล Dynamic Cushioning Curves ที่ได้จากการทดสอบนี้ไปใช้ออกแบบเลือกขนาดโฟมที่เหมาะสม

สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ได้จริง

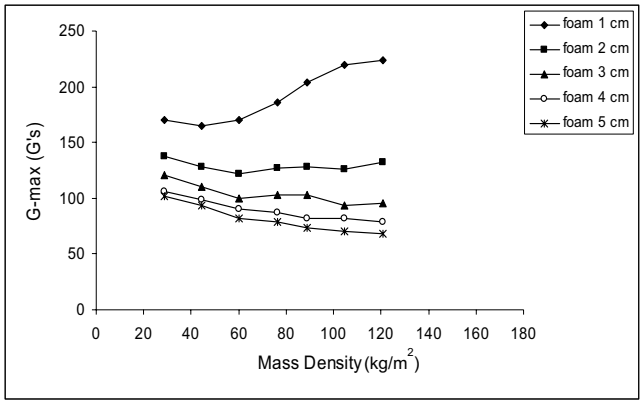
**2. การทดสอบหา Dynamic Cushioning Curves**



รูปที่ 1. บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบและการทดสอบ

รูปที่ 1 แสดงบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และการติดตั้งการทดสอบ เราทำการทดสอบเพื่อหา Dynamic Cushioning Curves สำหรับวัสดุโฟมกันกระแทกตัวอย่างชนิด Low Density Polyethylene (LDPE-J4324) หรือมีชื่อทางการค้าว่า ETHAFOAM โดยได้เริ่มต้นออกแบบการทดสอบระบบบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างเมื่อรับแรงกระแทกจากการปล่อยตกอิสระ (Free-Fall Package Drop Test) ตามมาตรฐาน ASTM-D 4168-95 [1] ในการทดสอบเราได้ทำการออกแบบกลไกการปล่อยกล่องบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างให้ตกแบบอิสระดังแสดงในรูปที่ 1 และทำการทดสอบปล่อยมวลทดสอบขนาดต่างๆ ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ซึ่งภายในรองรับด้วยวัสดุกันกระแทก ดังรูปที่ 1 จากระดับความสูงที่กำหนด และวัดค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์โดยตัววัดสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ที่ติดตั้งบนมวลทดสอบ สัญญาณความเร่งนี้จะส่งไปที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณพลวัต (Dynamic Signal Analyzer) เพื่อแสดงผล

**3. ผลทดสอบ Dynamic Cushioning Curves และอภิปราย**




รูปที่ 2. Dynamic Cushioning Curves สำหรับ ETHAFOAM ทดสอบที่ระยะตกพื้น 64 cm

รูปที่ 2 แสดงหนึ่งชุดตัวอย่างของ Dynamic Cushioning Curves จากการทดสอบ ETHAFOAM ความหนาขนาดต่างๆ ที่ระดับความสูง 64 เซนติเมตร กราฟในรูปที่ 2 นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

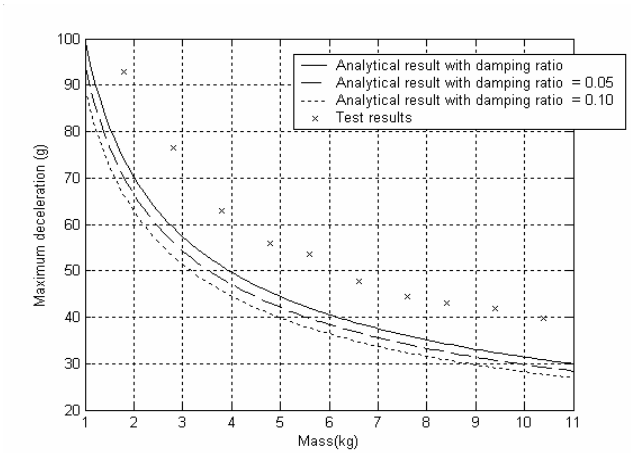
1) สำหรับโฟมหนา 4 และ 5 เซนติเมตร และมากกว่า ค่าความเร่งสูงสุดจะลดลง เมื่อเพิ่มมวลทดสอบหรือเพิ่ม Mass Density ซึ่งลักษณะกราฟดังกล่าว สอดคล้องกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบ Mass-spring-damper หนึ่งองศาอิสระ [2] ดังแสดงผลการทดสอบและผลการทำนายจากแบบจำลองเปรียบเทียบกันในรูปที่ 3

2) สำหรับโฟมที่มีความหนา 2 และ 3 เซนติเมตรนั้น จาก Dynamic Cushioning Curves ในรูปที่ 2 พบว่า การเปลี่ยนมวลทดสอบหรือ Mass Density ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเร่งสูงสุด

3) สำหรับโฟมที่หนา 1 เซนติเมตรนั้น จาก Dynamic Cushioning Curves ในรูปที่ 2 พบว่า ค่าความเร่งสูงสุดกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมวลทดสอบ หรือ Mass Density เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวให้ผลที่ตรงข้ามกับลักษณะแรก การที่โฟมที่มีขนาดบางให้ผลในลักษณะนี้น่าจะเป็นเพราะเมื่อโฟมบางรับแรงกระทำสูงๆ หรือที่ Mass Density สูงๆ อาจจะมีระยะยุบตัวที่ทำให้เกิดความเครียดสูงเกินช่วงคุณสมบัติ Linear Elastic ที่พิจารณา ซึ่งในช่วงนี้ค่าสัมประสิทธิ์สปริงของโฟมอาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และส่งผลให้ค่าความเร่งสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อ เพิ่ม Mass Density

เมื่อเปรียบเทียบกราฟแต่ละเส้นที่ความหนาโฟมต่างๆ ในรูปที่ 2

พบว่าการเพิ่มความหนาโฟมจะทำให้ค่าความเร่งสูงสุดลดลง โดยผลดังกล่าวนี้ จะมีนัยสำคัญเมื่อโฟมมีความหนาไม่มากเท่านั้น



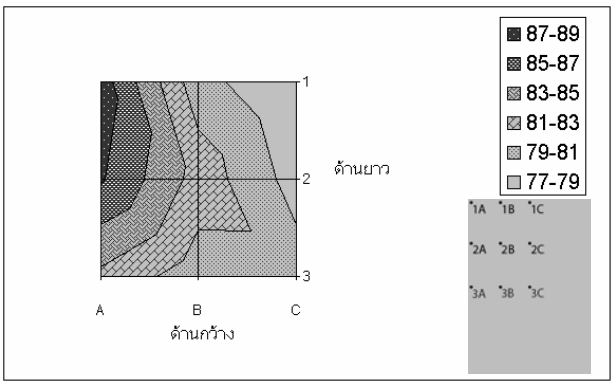

รูปที่ 3. เปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการทำนายค่าความเร่งสูงสุดด้วยแบบจำลอง (สำหรับโฟมหนา 15 ซ.ม. และปล่อยตกจาก ระยะสูง 79 ซ.ม.)

จากการเปรียบเทียบผลทดสอบ Dynamic Cushioning Curves และผลการทำนายความเร่งสูงสุดด้วยแบบจำลอง Mass-spring-damper หนึ่งองศาอิสระ [2] ดังแสดงในรูปที่ 3 นั้น สามารถอภิปรายสรุปได้ดังนี้

แบบจำลองที่มีลักษณะง่ายนี้ จะสามารถใช้ทำนายลักษณะเชิงคุณภาพ (qualitative prediction) ของค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ และใช้ศึกษาผลของตัวแปร ต่างๆ ที่มีต่อความเร่งได้ตามที่อภิปรายใน [2] โดยแบบจำลองนี้สามารถทำนายแนวโน้มของ ความเร่งสูงสุดได้ดี สำหรับกรณี ETHAFOAM ที่มีความหนา 5 เซนติเมตร ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 3 นั่นคือลักษณะความเร่งสูงสุดจะลดลงเมื่อเพิ่มมวลมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวยังไม่สามารถใช้ทำนายค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นได้แม่นยำ จะเห็นได้จากค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงที่ได้จากการทดสอบในรูปที่ 3 นั้น มีค่าแตกต่างไปจากค่าที่ได้จากแบบจำลอง ทั้งนี้เนื่องจากสมมติฐานต่างๆ ที่กำหนดขึ้น กล่าวคือ เราจำลองวัสดุกันกระแทกด้วย Linear Spring และ Linear Damper อย่างง่าย โดยค่าสัมปสิทธิ์สปริงสามารถหาได้จากการทดสอบ และค่า Damping Coefficient ของวัสดุกันกระแทก สมมติโดยกำหนดให้ระบบมีค่า Damping Ratio คงที่ที่ค่าต่างๆ ในระบบจริงวัสดุโฟมกันกระแทกน่าจะมีลักษณะเป็น Viscoelastic Material โดยคุณสมบัติของสปริงและแดมเพอร์จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และอุณหภูมิ ในแบบจำลองยังกำหนดลักษณะแรงที่กระทำกับมวลเป็นการดล (Ideal Impulse) แต่แรงที่กระทำกับผลิตภัณฑ์ขณะตกกระแทกพื้นนั้น อาจจะมีลักษณะต่างไปจากแรงดังกล่าวขึ้นกับลักษณะพื้นที่ตกกระทบด้วย

**4. การออกแบบชิ้นส่วนรองรับการกระแทก**

ในทางปฏิบัติเราสามารถนำผลของ Dynamic Cushioning Curves จากการทดสอบวัสดุ LDPE-J4324 สำหรับความหนาขนาดต่างๆกันนี้มาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเลือกขนาด และ รูปทรงที่เหมาะสมของวัสดุกันกระแทกสำหรับผลิตภัณฑ์หนึ่งๆตามเกณฑ์ที่ต้องการได้ และเมื่อเราเลือกขนาดและรูปทรงของวัสดุกันกระแทกตามที่ได้ออกแบบมาแล้ว จึงจะทำการทดสอบกับบรรจุภัณฑ์อีกครั้งเพื่อยืนยันความถูกต้อง เพื่อเป็นตัวอย่างในการออกแบบดังกล่าวเราพิจารณาผลิตภัณฑ์รูปทรงเหลี่ยมชิ้นหนึ่ง มีมวลขนาด 3.80 กิโลกรัม พื้นที่หน้าตัดขนาด 0.21×0.30 ตารางเมตร ความสูงที่ตกกระแทกพื้นเท่ากับ 64 เซนติเมตร และกำหนดให้มีค่า g-factor (ค่าความเร่งสูงสุดที่ผลิตภัณฑ์รับได้โดยไม่เกิดความเสียหาย) เท่ากับ 80 G's



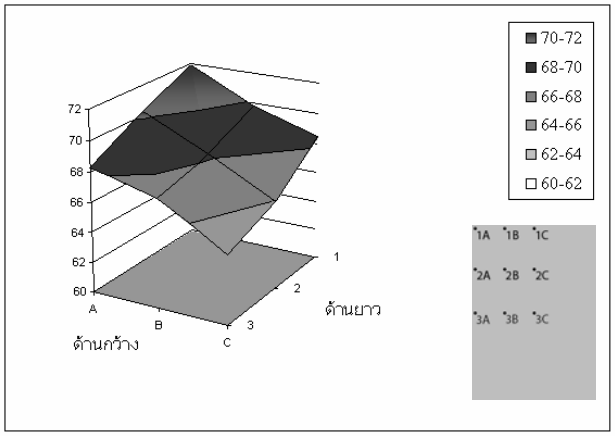

รูปที่ 4. ค่าความเร่งสูงสุด (G's) ณ ตำแหน่งต่างๆบนพื้นที่รองรับสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบ รองรับด้วย วัสดุ LDPE-J4324 ความหนา 5.0 เซนติเมตร เต็มพื้นที่

เริ่มต้นถ้าเราออกแบบโฟมหนา 5.0 เซนติเมตร ให้รองรับเต็มพื้นที่ จะพบว่าด้วยขนาด Mass Density และความหนาโฟมนี้จะส่งผลให้ความเร่งสูงสุดบริเวณจุดกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์ ประมาณ 80 G's ดังพิจารณาจากผล Dynamic Cushioning Curves ในรูปที่ 2 และเมื่อวัดค่าความเร่งสูงสุดที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิว จะพบว่ามีค่ามากสุดบริเวณขอบ ซึ่งให้ค่าสูงถึง 90 G's ดังแสดงในรูปที่ 4 และค่าดังกล่าวสูงเกินเกณฑ์ที่กำหนด

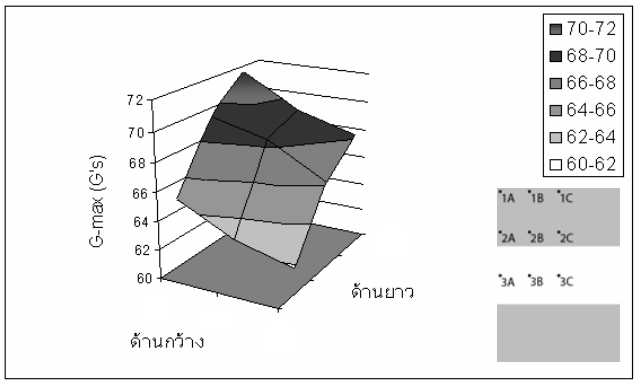
วิธีแรกที่จะทำให้โฟมสามารถกันกระแทกได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการนั้น ทำได้โดยการเพิ่มความหนาของโฟมจาก 5.0 เซนติเมตร เป็น 7.5 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อทำการทดสอบพบว่าโฟมหนา 7.5 เซนติเมตร จะทำให้ความเร่งสูงสุดลดลงมาอยู่ในช่วง 70-72 G's ดังแสดงผลในรูปที่ 5

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาข้อมูล Dynamic Cushioning Curve ของโฟมที่ความหนา 5.0 เซนติเมตร ในรูปที่ 2 พบว่า ค่าความเร่ง

สูงสุดมีแนวโน้มลดลงหากค่า Mass Density เพิ่มขึ้น ดังนั้นเราจึงพิจารณาลดความเร่งของผลิตภัณฑ์ได้อีกวิธี โดยการลดพื้นที่ผิวสัมผัสที่รองรับแรงกระแทกลงเพื่อทำให้ค่า Mass Density เพิ่มขึ้น ในกรณีนี้เราสามารถออกแบบลดพื้นที่โดยใช้โฟมขนาดเท่ากันสองชิ้นรองรับเพียงสองในสามของเนื้อที่เดิม แทนที่จะรองรับเต็มพื้นที่ และเมื่อทดสอบจริงพบว่าความเร่งสูงสุดลดลงมาอยู่ในช่วง 70-72 G's เช่นกัน ผลการทดสอบกับลักษณะการรองรับดังกล่าวแสดงในรูปที่ 6




รูปที่ 5. ค่าความเร่งสูงสุด (G's) ณ ตำแหน่งต่างๆบนพื้นที่รองรับสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบ รองรับด้วย วัสดุ LDPE-J4324 ความหนา 7.5 เซนติเมตร เต็มพื้นที่




รูปที่ 6. ค่าความเร่งสูงสุด (G's) ณ ตำแหน่งต่างๆบนพื้นที่รองรับสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบ รองรับด้วย วัสดุ LDPE-J4324 ความหนา 5.0 เซนติเมตร สองในสามของพื้นที่เต็ม

ทั้งสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้น สามารถที่จะลดค่าความเร่งสูงสุดของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้จริง แต่วิธีที่เหมาะสมกว่าในกรณีนี้ คือการลดพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุกันกระแทก เนื่องจากวิธีการเพิ่มความหนาโฟมนั้น จะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีก ในขณะที่วิธีลดพื้นที่นั้น เราเพียงแค่ใช้โฟมความหนาเดิมที่มีอยู่มาตัดเพื่อลดพื้นที่ลง จึงทำให้สามารถประหยัดโฟมที่จะต้องใช้ได้ดีกว่า และหากคำนึงถึงในแง่การผลิตจริง ซึ่งสินค้าที่จะทำการบุด้วยวัสดุกันกระแทกนั้น จะมีการผลิตคราวละมากๆ ดังนั้นวิธีนี้สามารถช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอันมาก อีกทั้งยังทำให้ขนาดบรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบเล็กลงกว่าวิธีการเพิ่มความหนาวัสดุกันกระแทกอีกด้วย

## 5. สรุป

เราสามารถออกแบบการทดสอบและทดสอบหา Dynamic Cushioning Curves สำหรับวัสดุกันกระแทกได้ ผลทดสอบ Dynamic Cushioning Curves นี้จะใช้ประกอบในการออกแบบขนาด และรูปทรง ของวัสดุกันกระแทกสำหรับผลิตภัณฑ์จริงต่อไป จากการทดสอบวัสดุโฟม LDPE-J4324 ที่ความหนาขนาดต่างๆ พบว่าลักษณะ Dynamic Cushioning Curves มี 3 ลักษณะ กล่าวคือ

1) โฟมที่มีความหนา 4 เซนติเมตรขึ้นไป ค่าความเร่งสูงสุดจะลดลงเมื่อเพิ่มค่า Mass Density

2) โฟมที่มีความหนา 2 - 3 เซนติเมตรนั้น การเปลี่ยน Mass Density ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเร่งสูงสุด

3) โฟมบางขนาด 1 เซนติเมตรหรือต่ำกว่า ให้ค่าความเร่งสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่ม Mass Density

หากลักษณะของ Dynamic Cushioning Curves ที่พบมีแนวโน้มที่มีค่าความเร่งสูงสุดลดลงเมื่อเพิ่ม Mass Density เราสามารถเลือกออกแบบรูปทรงวัสดุกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์ให้มีพื้นที่รองรับลดลง เพื่อเป็นการเพิ่ม Mass Density ซึ่งในกรณีนี้จะสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดลงได้และเป็นการลดต้นทุนไปในเวลาเดียวกันด้วย

## เอกสารอ้างอิง

[1] *ASTM D 4168-95*: Standard Test Methods for Transmitted Shock of Foam-in-Place Cushioning Materials, ASTM International, June 1995.

[2] ศรัทธา เกาะไพศาลสุขวัฒนา นครินทร์ จักร์เพ็ชร นพพร ฉายแก้ว นิวัฒน์ ครุวรรณ และ ฐิติมา จินตนาวัน, 2547. การวิเคราะห์และทดสอบชิ้นส่วนกันกระแทกสำหรับบรรจุภัณฑ์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18.