



บทความวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของความหนาและวัสดุคั่นกลางของกระจกนิรภัยหลายชั้นสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในกรณีชนคนเดินเท้า

กุลยศ สุวันทโรจน์ และ ศุภชัย หลักคำ*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สายประสิทธิ์ เกิดนิยม

ศูนย์วิจัยเฉพาะทางวิศวกรรมการประเมินและความปลอดภัยยานยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2836 3000 ต่อ 4138 อีเมล: supachai.l@rmupt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.02.005

รับเมื่อ 19 เมษายน 2564 แก้ไขเมื่อ 24 ธันวาคม 2564 ตอรับเมื่อ 18 มกราคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 11 กุมภาพันธ์ 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ปัจจุบันความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุระหว่างรถยนต์กับคนเดินเท้ามีมากขึ้น โดยเหยื่อที่เสียชีวิตส่วนใหญ่คือ คนเดินเท้าที่ถูกรถยนต์ชนจากด้านหน้า งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดความหนาของกระจก และวัสดุคั่นกลางของกระจกนิรภัยหลายชั้นที่เหมาะสมในกรณีการชนคนเดินเท้า และสำรวจความสามารถการรับแรงกระแทกของกระจกบานหน้าที่มีข้ออยู่ในรถโดยสาร โดยอาศัยสภาวะทดสอบอ้างอิงเกณฑ์การทดสอบ Pedestrian Protection (Euro NCAP) มาเป็นแนวทางในการออกแบบการทดสอบ ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (Head Injury Criterion; HIC) และค่าพลังงานที่เกิดขึ้นกับกระจกถูกนำมาพิจารณา โดยนำกระจกบานหน้ารถยนต์ที่มีขนาดความหนาที่แตกต่างกัน 9 ขนาด มาทำการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า กระจกหลายชั้นความหนา 8 มิลลิเมตร เสริมด้วยวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในกรณีการเกิดอุบัติเหตุที่มีความเร็วในการกระแทก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (HIC15) ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 496.25 นอกจากนี้ พบตัวอย่างการทดสอบที่น่าสนใจ และให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกันคือ กระจกหลายชั้นหนา 6 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร และกระจกหลายชั้นหนา 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ 558.67 และ 565.98 ตามลำดับ ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะของทั้งสองตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: กระจกนิรภัยหลายชั้น คนเดินเท้า เกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ

การอ้างอิงบทความ: กุลยศ สุวันทโรจน์, ศุภชัย หลักคำ และ สายประสิทธิ์ เกิดนิยม, “การศึกษาอิทธิพลของความหนาและวัสดุคั่นกลางของกระจกนิรภัยหลายชั้นสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในกรณีชนคนเดินเท้า,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 1-10, เลขที่บทความ 243-074970, ก.ค.-ก.ย. 2567.



A Study of Thickness and Interlayer of Laminated Glass for Bus Affecting Pedestrian Protection

Kullayot Suwantaraj and Supachai Lakkam*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

Saiprasit Koetniyom

Safety and Assessment Engineering Research Center, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2836 3000 Ext. 4138, E-mail: supachai.l@rmupt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.02.005

Received 19 April 2021 ; Revised 24 December 2021 ; Accepted 18 January 2022; Published online: 11 February 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Nowadays, the risk of accidents between cars and pedestrians is increasing. Most of the victims were pedestrians who were hit by cars from the front. The objectives of this research are to determine the thickness of the glass and the interlayer material of laminated glass that is suitable in the case of a pedestrian collision and explore the impact resistance of the bus windshield. The test conditions are referred to Pedestrian Protection regulation (Euro NCAP) as a guideline for the test method. Head Injury Criterion (HIC) and the energy generated to the glass are considered. The 9 different thickness of the windshields were test for this research. The test results discover that the 8 mm of laminated glass thickness reinforced with 1.14 mm of interlayer material is suitable in the case of accidents at 40 km/h of impact velocity. By means of HIC15, the test result is equal to 496.25. Moreover, there are interesting test samples with similar results, 6 mm of laminated glass thickness extra reinforced with 1.14 mm of interlayer material and 10 mm of laminated glass thickness extra reinforced with 1.14 mm of interlayer material, which are the head injury criteria 558.67 and 565.98 respectively. The head injury criterion of the two samples are not significantly different.

Keywords: Laminated Glass, Pedestrian, Head Injury Criterion

Please cite this article as: K. Suwantaraj, S. Lakkam, and S. Koetniyom, "A study of thickness and interlayer of laminated glass for bus affecting pedestrian protection," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 3, pp. 1–10, ID. 243-074970, Jul.-Sep. 2023 (in Thai).



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดอุบัติเหตุระหว่างคนเดินเท้าและรถโดยสารขนาดใหญ่ [1]

เพื่อสะท้อนให้เห็นความน่าเชื่อถือในการทำนาย และพบว่าพื้นผิวที่เข้าปะทะ และทางทางของคนเดินเท้าขณะถูกปะทะส่งผลต่อระดับความการบาดเจ็บมากกว่าความเร็วที่เข้าปะทะ

ในขณะที่พฤติกรรมการแตกของกระจกรถยนต์ถูกศึกษาโดย Xu และคณะ [4] โดยสามารถอธิบายผ่านกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ซึ่งพบว่า ความเร็วขนาดมว และจุดเริ่มต้นการแตก ส่งผลกระทบต่อความยาวและทิศทางการแตกของกระจก ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายหรือวิเคราะห์การแตกของกระจกได้ดีในกรณีการกระแทกที่ความเร็วไม่สูงมากนัก

นอกจากนี้ Xu และคณะ [5] ได้ศึกษาคุณสมบัติของกระจกนิรภัยแบบหลายแผ่นซ้อน ผ่านการใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงบันทึกภาพขณะการทดลอง โดยมีประเด็นที่น่าสนใจคือ ตำแหน่ง ความเร็ว และความแรงการเกิดรอยร้าวและแตกที่เกิดจากการกระแทกจากมวลขนาดเล็ก ซึ่งพบว่า กระจกนิรภัยแบบหลายแผ่นซ้อนสามารถลดการเกิดพฤติกรรมดังกล่าวได้ สำหรับขนาดและวัสดุของแผ่นคั่นกลางนั้นผลิตจาก polyvinyl-butylal (PVB) ถูกศึกษาโดย Valera และ Demarquette [6] ขนาดของฟิล์มดังกล่าวบางมากกว่า 0.2 ไมโครเมตร และสามารถทนแรงกระแทกได้มากกว่า 500 จูลต่อเมตร ทำให้กระจกที่ได้รับการเสริมความแข็งแรงจาก

ฟิล์มดังกล่าวมีความเหนียวและทนต่อการฉีกขาดอย่างมาก

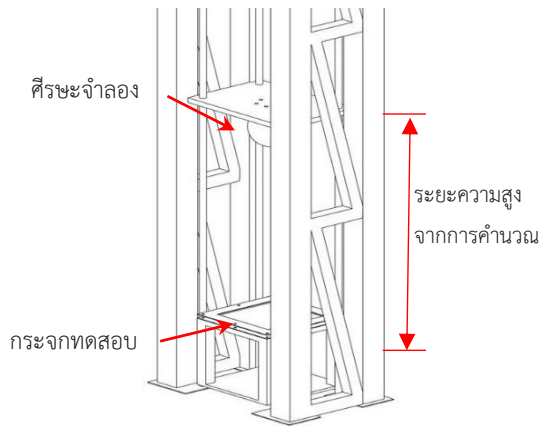
ในขณะเดียวกัน กระจกนิรภัยประเภทนี้ยังได้รับความสนใจ โดย Chen และคณะ [7] ได้ทำการทดสอบแบบปล่อยตกมวลน้ำหนักลงกระแทก โดยมุ่งเน้นประเด็นการศึกษาไปที่ความเร็วในการปะทะ และความหนาของแผ่นฟิล์มที่คั่นกลางระหว่างกระจก และพบว่า คุณสมบัติของฟิล์มคั่นกลางสามารถช่วยยับยั้งการแพร่กระจายการแตกของกระจกได้อีกทั้ง Peng และคณะ[8] ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป LS-Dyna ในการจำลองการแตกร้าวของของกระจกนิรภัยแบบหลายแผ่นซ้อนที่มีความหนา 5 และ 10 มิลลิเมตร และพบว่า ค่าความเครียดที่ทำให้กระจกแตกร้าวอยู่ที่ 50 เมกะปาสคาล

มากไปกว่านั้น การศึกษารูปแบบดังกล่าวยังถูกนำไปใช้กับกระจกอากาศยานยนต์ โดย Wang และคณะ [9] โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแผ่นฟิล์มคั่นกลางที่ทำจากวัสดุ Poly methyl methacrylate (PMMA) ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระจกได้ดียิ่งขึ้น และมีแนวโน้มที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมในสภาวะอุณหภูมิ ตำแหน่ง และความเร็วการปะทะที่หลากหลายมากขึ้น สำหรับการศึกษาการกระแทกที่ความเร็วสูง Wang และคณะ [9] ได้จำลองมวลหนัก 1.8 กิโลกรัม พุ่งชนกระจกในแนวตั้งฉากที่ความเร็ว 155 เมตรต่อวินาที และหาความสามารถดูดซับแรงกระแทกในสภาวะดังกล่าวจากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป LS-Dyna

อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบการศึกษาใดจากการสำรวจวรรณกรรมที่เชื่อมโยงระหว่างระดับการบาดเจ็บของคนเดินเท้าที่เกิดจากการชนและขนาดความหนาที่เหมาะสมของกระจกหรือวัสดุคั่นกลาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการนำวัสดุดังกล่าวมาผลิตเป็นกระจกบานหน้าของรถโดยสารขนาดใหญ่ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาขนาดความหนาของกระจกและวัสดุคั่นกลางของกระจกนิรภัยหลายชั้น ที่เหมาะสมในกรณีการชนคนเดินเท้า โดยใช้ค่าระดับการบาดเจ็บของศีรษะ (Head Injury Criterion; HIC) เป็นตัวชี้วัด ซึ่งค่าดังกล่าวถูกใช้ในการบอกระดับการบาดเจ็บของคนเดินเท้าใน



รูปที่ 2 ชุดจำลองการกระแทกแบบปล่อยตก

การประเมินความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะตามมาตรฐานสากล Pedestrian Testing Protocol [10] และสำรวจความสามารถการรับแรงกระแทกของกระบอกบานหน้าของรถโดยสาร โดยใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามมาตรฐาน [10] มาเป็นแนวทางในการทดสอบหาค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (HIC) และค่าพลังงานที่เกิดขึ้นกับกระบอก

2.1 ชุดจำลองการกระแทกแบบปล่อยตก

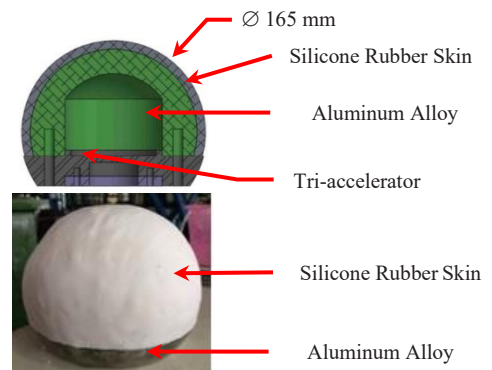
ชุดจำลองการกระแทกแบบปล่อยตก ดังรูปที่ 2 ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการทดลอง โดยกำหนดความเร็วในการกระแทก (40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 11.11 เมตรต่อวินาที) เป็นตัวแปรต้นและคำนวณระยะความสูงที่ใช้ในการทดสอบ โดยปล่อยศีรษะจำลองตกอย่างอิสระจากจุดหยุดนิ่งจากความสูงที่คำนวณได้ ดังสมการที่ (1)

$$s = \frac{v^2 - u^2}{2a} \quad (1)$$

โดยที่

v คือ ความเร็ว ณ จุดกระแทก (40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 11.11 เมตรต่อวินาที)

u คือ ความเร็ว ณ จุดปล่อยศีรษะจำลอง (เมตรต่อวินาที)



รูปที่ 3 ศีรษะจำลอง [11]

a คือ ความเร่ง (เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

s คือ ระยะความสูง (เมตร)

2.2 ศีรษะจำลอง

ศีรษะจำลองขนาดผู้ใหญ่ถูกออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ Solidworks เพื่อหาขนาด มวล และวัสดุที่นำมาใช้สร้างอวัยวะจำลอง ซึ่งตามข้อกำหนดของ Pedestrian Testing Protocol [10] กำหนดมวลศีรษะจำลองไว้ที่ 4.5 กิโลกรัม นอกจากนี้ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลถูกออกแบบใกล้เคียงกับจุดเซนทรอยด์มากที่สุด เพื่อลดการโคจรรอบตัวเองระหว่างถูกปล่อยออกจากชุดทดสอบ ดังรูปที่ 3 อย่างไรก็ตาม ศีรษะจำลองกับอุปกรณ์ส่วนควบที่ต้องเคลื่อนที่มีมวลรวมกัน 5 กิโลกรัม

2.3 อุปกรณ์วัดความเร่งความถี่สูงแบบ 3 แกน

อุปกรณ์วัดความเร่งความถี่สูงแบบ 3 แกน ดังรูปที่ 4 เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ตรวจวัดอัตราเร่งและอัตราหมุนขณะที่ศีรษะจำลองกระแทกกับกระบอก เพื่อนำไปคำนวณค่า HIC ซึ่งถูกใช้เป็นตัวชี้วัดระดับการบาดเจ็บในการประเมินความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะ ดังสมการที่ (2) นอกจากนี้ ยังสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมอัตราเร่ง และอัตราหมุนเพื่อบ่งชี้ความสามารถรับแรงกระแทกสูงสุดที่กระบอกสามารถรับได้ก่อนเกิดการแตก โดยมีข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 อุปกรณ์วัดความเร่งความถี่สูงแบบ 3 แกน

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\} \quad (2)$$

โดยที่

HIC คือ Head Injury Criterion

 $\max_{t_1, t_2}$ คือ ความเร่งสูงสุดระหว่างเวลา t_1 และ t_2 t_1 คือ เวลาเริ่มการบันทึกผลทดลอง (วินาที) t_2 คือ เวลาสิ้นสุดการบันทึกผลทดลอง (วินาที) a คือ อัตราเร่งหรืออัตราห้วงขณะทดลอง (G ≈ 9.81 เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

$$E = mgh \quad (3)$$

โดยที่

 E คือ พลังงานที่ปล่อยตก (จูล) m คือ มวลศีรษะจำลอง (กิโลกรัม) g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง) h คือ ระยะความสูงที่ปล่อยศีรษะจำลอง (เมตร)

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดความเร่ง

ข้อมูลจำเพาะ	ค่าวัด
อัตราเร่งที่สามารถรับได้	$\pm 9,807 \text{ m/s}^2 (\pm 1,000 \text{ G})$
ความถี่ในการเก็บข้อมูล	1 Hz ถึง 20 kHz
Hysteresis	ภายใน $\pm 1\% \text{ RO}$
ช่วงอุณหภูมิที่ปลอดภัย ($^{\circ}\text{C}$)	-15 ถึง 65
ผลของอุณหภูมิต่อความสมดุล ($^{\circ}\text{C}$)	ภายใน $\pm 1\% \text{ RO}$
ผลของอุณหภูมิในการส่งออก ($^{\circ}\text{C}$)	ภายใน $\pm 1\% \text{ RO}$
เกินพิกัดที่ปลอดภัย	300%
ช่วงความถี่ตอบสนอง (Hz)	ไฟฟ้ากระแสตรง 5 Hz ที่ 23°C (ความไวของค่าเบี่ยงเบน $\pm 10\%$)
ความไวของคลื่นตามขวาง	2% หรือน้อยกว่า
น้ำหนัก (g)	45
ขนาดภายนอก (mm)	$30 \times 38 \times 16$

2.4 สถานะการทดลอง

จากการคำนวณหาระยะความสูงที่ใช้ปล่อยศีรษะจำลอง (ตัวแปร s จากสมการที่ (1)) มีค่าเท่ากับ 6.3 เมตร ดังนั้นการคำนวณค่าพลังงานจากมวลของศีรษะจำลองที่มี

ค่า 4.5 กิโลกรัม ซึ่งหาค่าพลังงานที่ใช้ในการปล่อยตกและคำนวณได้จากพลังงานศักย์ ดังสมการที่ (3) ซึ่งมีสถานะการทดลองดังตารางที่ 2 อย่างไรก็ตาม ในกรณีกระจกที่ไม่สามารถรับแรงกระแทกได้ด้วยความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กระจกเกิดการทะลุ) จะต้องปรับลดระยะความสูงในการทดลองกรณีดังกล่าว (ความเร็ว > 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) เพื่อหาค่าพลังงานสูงสุดที่กระจกสามารถรับได้ก่อนเกิดการทะลุของกระจก

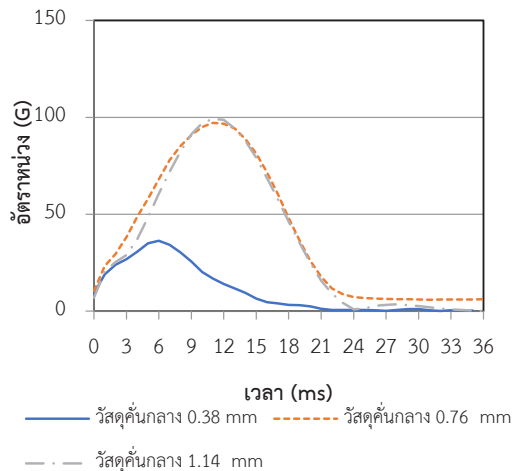
ตารางที่ 2 สถานะการทดสอบเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ

ความหนาวัสดุคั่นกลาง (mm)*	ความหนากระจก (mm)*	ความเร็ว (km/h)	ความสูง (m)	มวลศีรษะจำลอง (kg)
0.38	6, 8, 10	40	6.3	4.5
0.76				
1.14				

*หมายเหตุ: ขนาดของกระจกนิรภัยและวัสดุคั่นกลางที่ถูกผลิตและมีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเด็น คือ 1) เกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (HIC15) ซึ่งทดลองที่ความเร็วการกระแทก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยบันทึกผลการทดลองในช่วงระยะเวลาการกระแทก 0 ถึง 15 มิลลิวินาที ซึ่งเป็นค่าที่ถูกกำหนดตามหลักมานุษยวิทยาและชีวกลศาสตร์ของผู้ป่วย [10] และ 2) ความสามารถในการต้านทานพลังงานที่กระจกรองรับได้



รูปที่ 5 ผลการทดสอบกระชกที่ขนาดความหนา 6 มิลลิเมตร

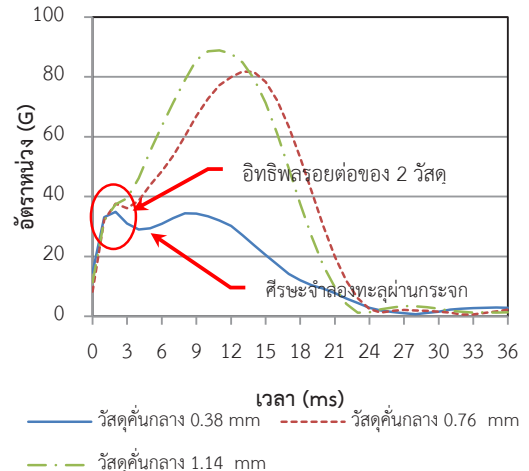
3.1 เกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ

3.1.1 ผลการทดสอบกระชกความหนา 6 มิลลิเมตร

จากผลการทดสอบกระชกขนาด 6 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าอัตราเร่งที่เกิดจากการกระแทกระหว่างศีรษะจำลอง (ซึ่งถูกนำไปคำนวณเป็นค่า HIC) และกระชก 6 มิลลิเมตร ที่เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร มีค่าสูงสุดคือ 99.23 G ที่เวลา 11 มิลลิวินาที และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 434.22 ในขณะที่ผลการทดสอบกระชก 6 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.76 มิลลิเมตร สามารถตรวจวัดอัตราเร่งได้ 97.14 G ที่เวลา 11 มิลลิวินาที และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 496.60 สำหรับผลการทดสอบกระชก 6 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.38 มิลลิเมตร ศีรษะจำลองได้กระแทกและทะลุผ่านขึ้นกระชก ทำให้อัตราเร่งเพียง 36.29 G ที่เวลา 9 มิลลิวินาที และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 23.05 ดังรูปที่ 5

3.1.2 ผลการทดสอบกระชกความหนา 8 มิลลิเมตร

จากผลการทดสอบกระชกขนาด 8 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าอัตราเร่งที่เกิดจากการกระแทกระหว่างศีรษะจำลอง และกระชก 8 มิลลิเมตร ที่เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร ที่เวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราเร่งได้ 37.44 G และเกิดอัตราเร่งสูงสุดคือ 88.78 G ที่เวลา 11 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15



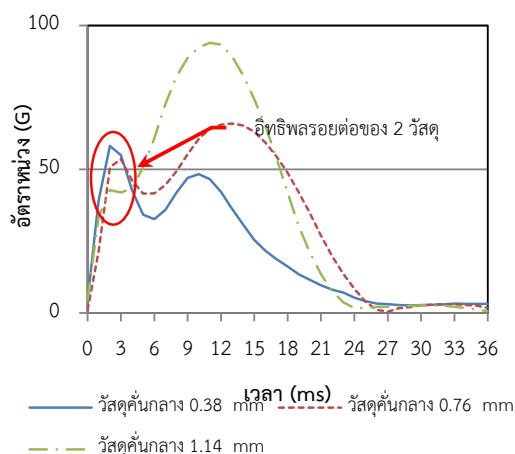
รูปที่ 6 ผลการทดสอบกระชกที่ขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร

เท่ากับ 416.06 ในขณะที่ผลการทดสอบกระชก 8 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.76 มิลลิเมตร ที่เวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราเร่งได้ 37.65 G และเกิดอัตราเร่งสูงสุดคือ 81.63 G ที่เวลา 14 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 307.02 สำหรับผลการทดสอบกระชก 8 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.38 มิลลิเมตร ที่เวลา 1 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราเร่งได้ 34.91 g ศีรษะจำลองได้กระแทกและทะลุผ่านขึ้นกระชก และทำให้อัตราเร่งที่เกิดขึ้นเหลือเพียง 34.73 G ที่เวลา 8 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 56.54 ดังรูปที่ 6

นอกจากนี้ เป็นที่น่าสังเกตได้ว่าค่ายอดของอัตราเร่งที่เกิดขึ้นช่วงแรกในช่วงเวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) อาจเกิดจากอิทธิพลของรอยต่อความสามารถการรับแรงกระแทกของกระชกและวัสดุคั่นกลางซึ่งอยู่ที่ช่วงระหว่าง 34 ถึง 37 G

3.1.3 ผลการทดสอบกระชกความหนา 10 มิลลิเมตร

จากผลการทดสอบกระชกขนาด 10 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าอัตราเร่งที่เกิดจากการกระแทกระหว่างศีรษะจำลอง และกระชก 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร ที่เวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราเร่งได้ 42.78 G และสูงสุดคือ 93.99 G ที่เวลา 11 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ



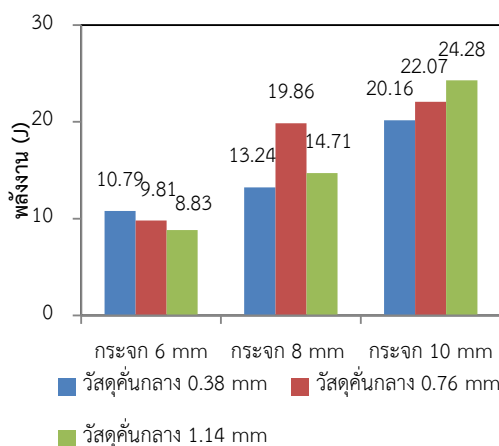
รูปที่ 7 ผลการทดสอบกระจุกที่ขนาดความหนา 10 มิลลิเมตร

429.16 ในขณะที่ผลการทดสอบกระจุก 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.76 มิลลิเมตร ที่เวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราหน่วยได้ 50.72 G และสูงสุดคือ 65.89 G ที่เวลา 13 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 223.04 สำหรับผลการทดสอบกระจุก 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.38 มิลลิเมตร ที่เวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราหน่วยสูงสุดคือ 58.11 G และศีรษะจำลองได้กระแทกและทะลุผ่านขึ้นกระจุก และทำให้อัตราหน่วยที่เกิดขึ้นเหลือเพียง 36.29 G ที่เวลา 9 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 23.05 ดังรูปที่ 7

สำหรับพฤติกรรมที่อาจเกิดจากอิทธิพลของรอยต่อความสามารถรับแรงกระแทกของกระจุกและวัสดุคั่นกลาง มีลักษณะคล้ายกับกระจุกความหนา 8 มิลลิเมตร และชัดเจนขึ้นโดย มีอัตราหน่วยอยู่ที่ช่วงระหว่าง 42 ถึง 58 G

3.2 ความสามารถในการรับพลังงานสูงสุดของกระจุก

การทดสอบความสามารถการรับพลังงานสูงสุดที่กระจุกรองรับได้ ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานคือมวลและความสูงการปล่อยตกของวัตถุ ซึ่งค่าดังกล่าวอาศัยการคำนวณจากสมการที่ (3) และทำการนำกระจุกหลายชั้นที่ความหนา 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งเสริมวัสดุคั่นกลางขนาดความหนา 0.38, 0.76 และ 1.14



รูปที่ 8 ค่าความสามารถการรับพลังงานสูงสุดของกระจุก

มิลลิเมตร มาทำการทดสอบ

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความสามารถการต้านทานพลังงานที่กระจุกสามารถรับได้ พบว่าที่ความหนากระจุก 10 มิลลิเมตร สามารถต้านทานพลังงานได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระจุกความหนา 6 และ 8 มิลลิเมตร โดยกระจุกความหนา 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14, 0.76 และ 0.38 มิลลิเมตร สามารถรับพลังงานได้ 23.28, 22.07 และ 20.16 จูล ตามลำดับ

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลการทดสอบจำเป็นต้องตั้งอยู่บนสมมติฐานความสามารถรับแรงกระแทกศีรษะจำลองได้โดยที่ศีรษะจำลองต้องไม่ทะลุวัสดุคั่นกลาง เนื่องจากการทะลุผ่านวัสดุคั่นกลางมีโอกาที่จะได้รับการบาดเจ็บจากการบาดเจ็บของศีรษะกระจุกและเสียชีวิตได้จากบาดแผลดังกล่าวมากกว่าการถูกกระแทกจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบาดเจ็บของศีรษะคือความหนาของวัสดุคั่นกลาง โดยกระจุกหลายชั้นที่เสริมด้วยวัสดุคั่นกลางความหนา 1.14 มิลลิเมตรสามารถรับแรงกระแทกศีรษะจำลองได้โดยไม่ทะลุวัสดุคั่นกลาง ทั้งความหนากระจุก 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการบาดเจ็บของศีรษะ (HIC15) ที่ได้คือ 558.67, 496.25 และ 565.98 ตามลำดับ อีกทั้งความเสียหายของกระจุกหลายชั้นมีลักษณะความเสียหายใกล้เคียงกัน จากผลการทดสอบ

ดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าความแปรปรวน (Sig) ของค่า HIC15 เท่ากับ 38.22 และ 0.02 ตามหลักสถิติศาสตร์ได้ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Anova) ซึ่งผลลัพธ์ของค่าดังกล่าวจัดเป็นข้อมูลกลุ่มเดียวกัน โดยมีระดับความเชื่อถือที่ 95% และมีระดับนัยสำคัญไม่เกิน 0.05 ดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะที่ HIC15

ขนาด กระบอก (mm)	ความ หนาวัสดุ คั่นกลาง (mm)	อัตรา น้ำหนักสูงสุด ระยะที่ 1 (G)	อัตรา น้ำหนักสูงสุด ระยะที่ 2 (G)	HIC15	ลักษณะ การแตก
6	0.38	-	36.29	25.85	ทะลุ
	0.76	-	97.14	626.97	กึ่งทะลุ
	1.14	-	99.23	558.67	ไม่ทะลุ
8	0.38	34.91	34.37	66.83	ทะลุ
	0.76	37.65	81.63	419.99	กึ่งทะลุ
	1.14	37.44	88.78	496.25	ไม่ทะลุ
10	0.38	58.11	48.31	127.75	ทะลุ
	0.76	50.72	65.89	324.88	กึ่งทะลุ
	1.14	42.78	93.99	565.98	ไม่ทะลุ

ในขณะที่การทดสอบกระบอกความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร เสริมด้วยวัสดุคั่นกลางความหนา 0.76 มิลลิเมตร ได้ค่า HIC15 คือ 626.97, 419.99 และ 324.88 ตามลำดับ ซึ่งมีการกระจายตัวของข้อมูลค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับผล

การทดสอบของกระบอกหลายชิ้นเสริมด้วยวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าความแปรปรวน (Sig) ของค่า HIC15 เท่ากับ 154.45 และ 0.061 ตามลำดับ และถูกตั้งสมมติฐานว่าค่า HIC15 ไม่เป็นค่ากลุ่มเดียวกัน นอกจากนี้ผลการทดสอบมีความเป็นไปได้ว่าวัสดุคั่นกลางไม่สามารถรับแรงกระแทกจากศีรษะจำลองได้ทั้งหมด ทำให้เกิดการฉีกขาดของวัสดุคั่นกลาง และสาเหตุให้มีลักษณะความเสียหายแตกต่างกันออกไปขึ้นกับความหนาของกระบอก

สำหรับการวิเคราะห์ความเหมาะสมกระบอกที่มีความสามารถต้านทานแรงกระแทกในกรณีการชนคนเดินเท้า พบว่ากระบอกหลายชิ้นความหนา 8 มิลลิเมตร เสริมด้วยวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในกรณีการเกิดอุบัติเหตุที่มีความเร็วในการกระแทก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากค่าเกณฑ์การบาดเจ็บศีรษะ (HIC15) ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 496.25 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดโดยที่ศีรษะจำลองไม่ทะลุผ่านกระบอก อย่างไรก็ตาม มีตัวอย่างการทดสอบที่น่าสนใจและให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกันคือ กระบอกหลายชิ้นหนา 6 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร และ กระบอกหลายชิ้นหนา 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเกณฑ์การบาดเจ็บศีรษะ 558.67 และ 565.98 ตามลำดับ ดังนั้นผู้ทำการทดสอบได้นำข้อมูลกระบอกหลายชิ้นเสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14 มิลลิเมตร มาวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักสถิติศาสตร์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ ซึ่งให้ผลลัพธ์ของค่าดังกล่าวจัด

ตารางที่ 4 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความแปรปรวนของกระบอกที่มีวัสดุคั่นกลางขนาด 1.14 มิลลิเมตร

One-sample Statistics						
	N	Mean	Std. Deviation		Std. Error Mean	
HIC	3	540.31	38.322		22.125	
One-sample Test						
	Test Value = 540.31					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
HIC	24.421	2	.02	540.31	-95.20	95.20

เป็นข้อมูลกลุ่มเดียวกัน เพื่อต้องการเพิ่มตัวเลือกในการใช้วัสดุให้มีความหลากหลายในแง่อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งจะได้รับค่าเกณฑ์การบาดเจ็บศีรษะที่แตกต่างกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยมีความยินดีที่จะกล่าวขอบคุณต่อโครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ วท. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dhipaya Insurance Public Company Limited, "Database of accidental information record between January 2012 and July 2013," Dhipaya Insurance Public Company Limited, Bangkok, Thailand, 2013 (in Thai).
- [2] S. Lakkam and S. Koetniyom, "Investigation of accident scenarios between pedestrians and city buses in Thailand," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 12, pp. 3076–3088, 2015.
- [3] C. D. Untaroiu, M. U. Meissner, J. R. Crandall, Y. Takahashi, M. Okamoto, and O. Ito, "Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 210–219, 2009.
- [4] J. Xu, Y. Li, X. Chen, Y. Yan, D. Ge, M. Zhu, and B. Liu, "Characteristics of windshield cracking upon low-speed impact: Numerical simulation based on the extended finite element method," *Computational Materials Science*, vol. 48, no. 3, pp. 582–588, 2010.
- [5] J. Xu, Y. Sun, B. Liu, M. Zhu, X. Yao, Y. Yan, Y. Li, and X. Chen, "Experimental and macroscopic investigation of dynamic crack patterns in PVB laminated glass sheets subject to light-weight impact," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 6, pp. 1605–1612, 2011.
- [6] T. S. Valera and N. R. Demarquette, "Polymer toughening using residue of recycled windshields: PVB film as impact modifier," *European Polymer Journal*, vol. 44, no. 3, pp. 755–768, 2008.
- [7] J. Chen, J. Xu, X. Yao, B. Liu, X. Xu, Y. Zhang, and Y. Li, "Experimental investigation on the radial and circular crack propagation of PVB laminated glass subject to dynamic out-of-plane loading," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 112–113, pp. 26–40, 2013.
- [8] Y. Peng, J. Yang, C. Deck, and R. Willinger, "Finite element modeling of crash test behavior for windshield laminated glass," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 57, pp. 27–35, 2013.
- [9] J. Wang, Y. Xu, and W. Zhang, "Finite element simulation of PMMA aircraft windshield against bird strike by using a rate and temperature dependent nonlinear viscoelastic constitutive model," *Composite Structures*, vol. 108, pp. 21–30, 2014.
- [10] Pedestrian Testing Protocol. (2016, January). EURO New Car Assessment Programs. Euro NCAP. Leuven, Belgium [Online]. Available: <http://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/pedestrian-protection/>
- [11] S. Lakkam, A. Tempiem, P. Boonyalai, and V. Voranavin, "A feasibility study of a pedestrian crash simulator powered by ironless linear motor," *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 1, pp. 79–88, 2017 (in Thai).