



การศึกษาอิทธิพลของความหนาและวัสดุคั่นกลางของกระจกนिरภัยหลายชั้นสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในกรณีชนคนเดินเท้า

กุลยศ สุวันทโรจน์ และ ศุภชัย หลักคำ*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สายประสิทธิ์ เกิดนิยม

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน 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 คนเดินเท้า ที่ถูกรถยนต์ชนจากด้านหน้า งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดความหนาของกระจก และวัสดุคั่นกลางของกระจกนिरภัยหลายชั้นที่เหมาะสมในกรณีการชนคนเดินเท้า และสำรวจความสามารถการรับแรงกระแทกของกระจกบานหน้าที่มีใช้อยู่ในรถโดยสาร 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: กระจกนिरภัยหลายชั้น คนเดินเท้า เกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ

การอ้างอิงบทความ: กุลยศ สุวันทโรจน์, ศุภชัย หลักคำ และ สายประสิทธิ์ เกิดนิยม, “การศึกษาอิทธิพลของความหนาและวัสดุคั่นกลางของกระจกนिरภัยหลายชั้นสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในกรณีชนคนเดินเท้า,” 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

Automotive Safety and Assessment Engineering, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering, 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).

1. บทนำ

ปัจจุบัน เป็นที่ยอมรับว่าการขนส่งสาธารณะจำเป็นต้องใช้รถโดยสารขนาดใหญ่เป็นหลัก ทั้งการเดินทางในเมืองและระหว่างเมือง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมการประกอบรถโดยสารขนาดใหญ่ในประเทศ อย่างไรก็ตามรถโดยสารขนาดใหญ่ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีการแข่งขันด้านราคาอย่างรุนแรง เป็นเหตุทำให้ผู้ประกอบการภายในประเทศต้องปรับตัวเพื่อการแข่งขัน ดังนั้น วิธีการลดต้นทุนจากการประกอบรถโดยสารเป็นสิ่งจำเป็นในสถานการณ์ปัจจุบัน

กระจกรถโดยสารเป็นหนึ่งในชิ้นส่วนที่จะต้องทำการผลิตจากโรงงานผลิตเพื่อใช้เป็นชิ้นส่วนในการประกอบรถโดยสาร ซึ่งกินพื้นที่ตัวรถโดยสารมากถึงไม่ต่ำกว่าร้อยละ 30 ในแต่ละคัน ถึงแม้ต้นทุนของกระจกจะไม่สูงมากเมื่อเทียบกับต้นทุนของเครื่องยนต์และตัวถังรถโดยสาร แต่ก็นับได้ว่าเป็นรายการวัสดุที่มีต้นทุนสูงเป็นรายการต้นๆ ในหมวดอุปกรณ์ระดับยนต์ ในขณะที่กฎหมายบังคับให้กระจกบานหน้ารถต้องใช้กระจกนิรภัยชนิดซ้อนหลายชั้น (Laminated Glass) แต่ไม่ได้กำหนดถึงขนาดความหนา หรือจำนวนการขึ้นซ้อนของกระจกไว้ อีกทั้งขนาดพื้นที่ของกระจกบานหน้ารถโดยสารมีขนาดใหญ่ ความกังวลในด้านความแข็งแรงของกระจกจึงอาจทำให้ผู้ประกอบการตัดสินใจใช้กระจกหนาเกินความจำเป็น หรือผู้ประกอบการบางรายที่ต้องการลดต้นทุนการประกอบรถโดยสารอาจเลือกขนาดความหนาของกระจกที่บางเกินไป ซึ่งประเด็นดังกล่าวเป็นประเด็นที่หาคำตอบไม่ได้ถึงความเหมาะสมของขนาดกระจก

จากข้อมูลอุบัติเหตุทางถนนของบริษัทประกันภัยแห่งหนึ่ง [1] เปิดเผยให้เห็นสถิติอุบัติเหตุระหว่างปี 2554–2556 เกิดอุบัติเหตุกับรถโดยสารขนาดใหญ่ทั้งหมด 97 ครั้ง โดยมี 47 ครั้ง เกิดขึ้นในชุมชนเมืองและคูร์ณีคือคนเดินเท้า ถึงแม้จะเป็นอุบัติเหตุที่ไม่บ่อยครั้งเมื่อเทียบกับรถโดยสารขนาดเล็ก แต่ระดับความรุนแรงและความเสียหายจากอุบัติเหตุรถโดยสารขนาดใหญ่ นั้นมากกว่าหลายเท่า และส่งผลถึงชีวิตเกือบทุกกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ สำหรับประเทศไทย คณะรัฐมนตรีได้มีมติกำหนดให้ปี 2554–2563 เป็นทศวรรษ

แห่งความปลอดภัยทางถนน และให้ศูนย์อำนวยการความปลอดภัยทางถนนจัดทำแผนปฏิบัติการ “ทศวรรษแห่งความปลอดภัยทางถนน ปี 2554–2563” โดยมีเป้าหมายลดอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนนต่ำกว่า 10 คนต่อประชากรหนึ่งแสนคนในปี 2563 เพื่อให้ทุกภาคส่วนมีทิศทางการดำเนินงาน และการแก้ไขปัญหาอุบัติเหตุทางถนนประสบผลสำเร็จเป็นรูปธรรมชัดเจน เนื่องจากข้อมูลของศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยบนท้องถนนพบว่าการเกิดอุบัติเหตุในแต่ละครั้งมีผู้เสียชีวิตเฉลี่ย 0.42 ราย บาดเจ็บสาหัสเฉลี่ย 0.9 ราย บาดเจ็บเล็กน้อยเฉลี่ย 2.69 ราย กรมทางหลวงได้รายงานมูลค่ารวมความสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 2,300,000 บาทต่อครั้ง โดยในแต่ละปีมีการเกิดอุบัติเหตุเฉลี่ย 3,500–4,000 ครั้ง คิดเป็นค่าความเสียหายปีละไม่ต่ำกว่า 8,000–9,000 ล้านบาท และมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.55 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ โดยอุบัติเหตุส่วนใหญ่เกิดขึ้นในเขตเมือง

การศึกษาศิลปะการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารขนาดใหญ่โดย ศุภชัย และคณะ [2] พบว่า อุบัติเหตุที่เกิดจากรถโดยสารขนาดใหญ่มีส่งผลกระทบรุนแรงกว่า และมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในการขับขีในชุมชนเมือง อันเนื่องมาจากทัศนวิสัยที่ไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับรถโดยสารขนาดเล็ก และแม้ว่าจะมีการพัฒนาขึ้นส่วนเพื่อความปลอดภัยของรถโดยสารขนาดเล็ก แต่ก็มีเพียงการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่ความปลอดภัยของตัวผู้โดยสารเท่านั้น แต่ยังขาดการศึกษาค่าการดูดซับพลังงานที่เหมาะสมในกรณีการชนคนเดินเท้า ซึ่งมีความจำเป็นมากกว่าในกรณีรถโดยสารขนาดใหญ่ เนื่องจากมีโอกาสเกิดการปะทะระหว่างศีรษะคนเดินเท้ากับกระจกบานหน้าของรถโดยสารขนาดใหญ่ได้ง่ายมาก ในสถานะการจราจรที่คับคั่งในชุมชนเมือง และส่งผลกระทบรุนแรงถึงขั้นเสียชีวิตได้ง่าย เนื่องจากมวลรถโดยสารขนาดใหญ่มีขนาดมากเมื่อเปรียบเทียบกับรถโดยสารขนาดเล็ก ดังรูปที่ 1

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้ทำนายระดับการบาดเจ็บของคนที่คนเดินเท้าควบคู่ไปกับการทดสอบ โดย Untaroiu และคณะ [3] ซึ่งทำการจำลองการชนท่าต่างๆ ประกอบกับการทดสอบจริง



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดอุบัติเหตุระหว่างคนเดินเท้าและรถโดยสารขนาดใหญ่ [1]

เพื่อสะท้อนให้เห็นความน่าเชื่อถือในการทำนาย และพบว่าพื้นผิวที่เข้าปะทะ และทางทงของคนเดินเท้าขณะถูกปะทะ ส่งผลต่อระดับความการบาดเจ็บมากกว่าความเร็วที่เข้าปะทะ

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

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

ฟิล์มดังกล่าวมีความเหนียวและทนต่อการฉีกขาดอย่างมาก

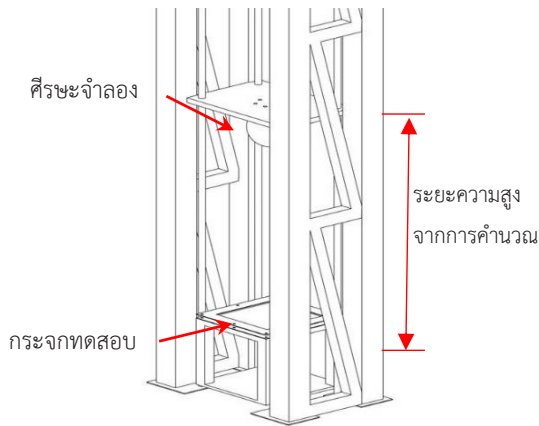
ในขณะเดียวกัน กระจกนิรภัยประเภทนี้ยังได้รับความสนใจ โดย Chen และคณะ [7] ได้ทำการทดสอบแบบปล่อยตกมวลน้ำหนักลงกระแทก โดยมุ่งเน้นประเด็นการศึกษาไปที่ความเร็วในการปะทะ และความหนาของแผ่นฟิล์มที่คั่นกลางระหว่างกระจก และพบว่า คุณสมบัติของฟิล์มคั่นกลางสามารถช่วยยับยั้งการแพร่กระจายการแตกของกระจกได้อีกทั้ง Peng 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 สำหรับการศึกษากการกระแทกที่ความเร็วสูง 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] และสำรวจความสามารถการรับแรงกระแทกของกระจกบานหน้าของรถโดยสาร โดยใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามมาตรฐาน [10] มาเป็นแนวทางในการทดสอบหาค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (HIC) และค่าพลังงานที่เกิดขึ้นกับกระจก

2.1 ชุดจำลองการกระแทกแบบปล่อยตก

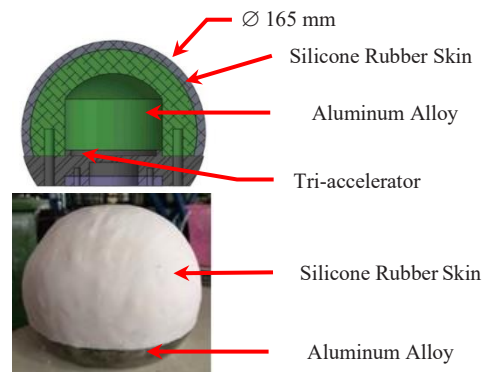
ชุดจำลองการกระแทกแบบปล่อยตก ดังรูปที่ 2 ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการทดลอง โดยกำหนดความเร็วในการกระแทก (40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 11.11 เมตรต่อวินาที) เป็นตัวแปรต้นและคำนวณระยะความสูงที่ใช้ในการทดสอบ โดยปล่อยศีรษะจำลองตกอย่างอิสระจากจุดหยุดนิ่งจากความสูงที่คำนวณได้ ดังสมการที่ (1)

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

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 เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ตรวจวัดอัตราเร่งและอัตราท่วงขณะที่ศีรษะจำลองกระแทกกับกระจก เพื่อนำไปคำนวณค่า HIC ซึ่งถูกใช้เป็นตัวชี้วัดระดับการบาดเจ็บในการประเมินความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะ ดังสมการที่ (2) นอกจากนี้ ยังสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมอัตราเร่ง และอัตราท่วงเพื่อบ่งชี้ความสามารถการรับแรงกระแทกสูงสุดที่กระจกสามารถรับได้ก่อนเกิดการแตก 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 อัตราเร่งหรืออัตราหนึ่งวงขณะทดลอง ($G \approx 9.81$ เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

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

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

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 สภาวะการทดลอง

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

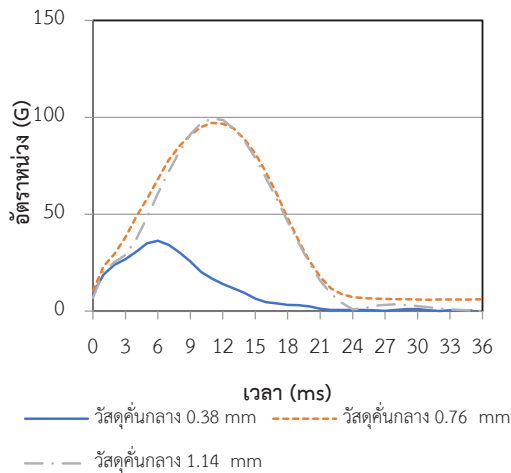
ตารางที่ 2 สภาวะการทดสอบเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ

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) ความสามารถการต้านทานพลังงานที่กระจกรองรับได้



รูปที่ 5 ผลการทดสอบกระชกที่ขนาดความหนา 6 มิลลิเมตร

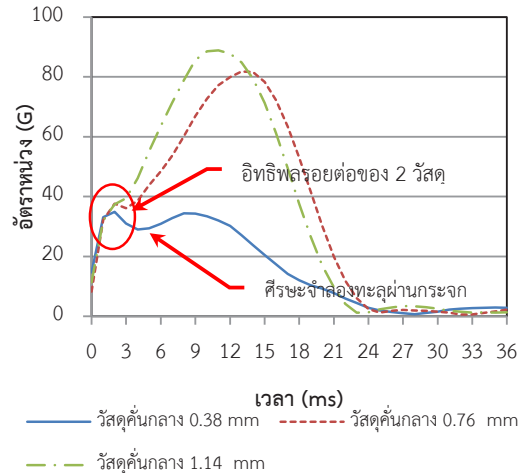
3.1 เกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ

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 และสามารถคำนวณหา ค่า HIC15 เท่ากับ 434.22 ในขณะที่ผลการทดสอบกระชก 6 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.76 มิลลิเมตร สามารถตรวจวัดอัตราเร่งได้ 97.14 G ที่เวลา 11 มิลลิวินาที และสามารถคำนวณหา ค่า HIC15 เท่ากับ 496.60 สำหรับผลการทดสอบกระชก 6 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.38 มิลลิเมตร ศีรษะจำลองได้กระแทกและทะลุผ่านขึ้นกระชก ทำให้อัตราเร่งเพียง 36.29 G ที่เวลา 9 มิลลิวินาที และสามารถคำนวณหา ค่า 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) และสามารถคำนวณหา ค่า HIC15



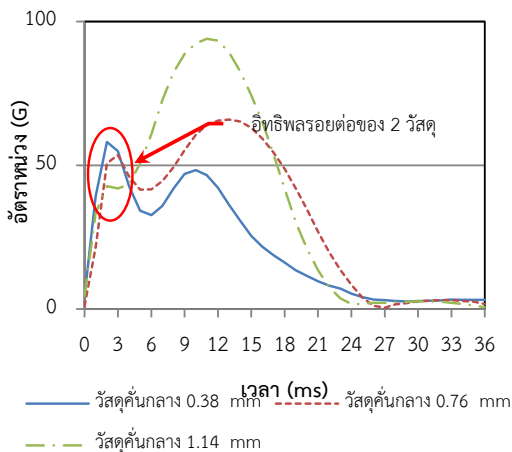
รูปที่ 6 ผลการทดสอบกระชกที่ขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร

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) และสามารถคำนวณหา ค่า 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) และสามารถคำนวณหา ค่า HIC15 เท่ากับ 56.54 ดังรูปที่ 6

นอกจากนี้ เป็นที่น่าสังเกตได้ว่าค่ายอดของอัตราเร่งที่เกิดขึ้นช่วงแรกที่ช่วงเวลา 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) และสามารถคำนวณหา ค่า HIC15 เท่ากับ 429.16



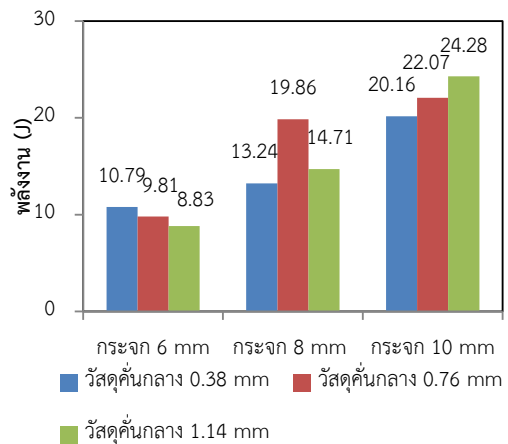
รูปที่ 7 ผลการทดสอบกระจกที่ขนาดความหนา 10 มิลลิเมตร

ในขณะที่ผลการทดสอบกระจก 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.76 มิลลิเมตร ที่เวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราเร่งได้ 50.72 G และสูงสุดคือ 65.89 G ที่เวลา 13 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 223.04 สำหรับผลการทดสอบกระจก 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 0.38 มิลลิเมตร ที่เวลา 2 มิลลิวินาที (ระยะที่ 1) สามารถตรวจวัดอัตราเร่งสูงสุดคือ 58.11 G และศีรษะจำลองได้กระแทกและทะลุผ่านขึ้นกระจก และทำให้อัตราเร่งที่เกิดขึ้นเหลือเพียง 36.29 G ที่เวลา 9 มิลลิวินาที (ระยะที่ 2) และสามารถคำนวณค่า HIC15 เท่ากับ 23.05 ดังรูปที่ 7

สำหรับพฤติกรรมที่อาจเกิดจากอิทธิพลของรอยต่อความสามารถรับแรงกระแทกของกระจกและวัสดุคั่นกลาง มีลักษณะคล้ายกับกระจกความหนา 8 มิลลิเมตร และชัดเจนขึ้นโดย มีอัตราเร่งอยู่ที่ช่วงระหว่าง 42 ถึง 58 G

3.2 ความสามารถรับพลังงานสูงสุดของกระจก

การทดสอบความสามารถรับพลังงานสูงสุดที่กระจกรองรับได้ ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานคือมวลและความสูงการปล่อยตกของวัตถุ ซึ่งค่าดังกล่าวอาศัยการคำนวณจากสมการที่ (3) และทำการนำกระจกหลายชั้นที่ความหนา 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งเสริมวัสดุคั่นกลางขนาดความหนา 0.38, 0.76 และ 1.14



รูปที่ 8 ค่าความสามารถการรับพลังงานสูงสุดของกระจก

มิลลิเมตร มาทำการทดสอบ

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความสามารถการต้านทานพลังงานที่กระจกสามารถรับได้ พบว่าที่ความหนากระจก 10 มิลลิเมตร สามารถต้านทานพลังงานได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกความหนา 6 และ 8 มิลลิเมตร โดยกระจกความหนา 10 มิลลิเมตร เสริมวัสดุคั่นกลาง 1.14, 0.76 และ 0.38 มิลลิเมตร สามารถรับพลังงานได้ 23.28, 22.07 และ 20.16 จูล ตามลำดับ

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลการทดสอบจำเป็นต้องตั้งอยู่บนสมมติฐานความสามารถรับแรงกระแทกศีรษะจำลองได้โดยที่ศีรษะจำลองต้องไม่ทะลุวัสดุคั่นกลาง เนื่องจากการทะลุผ่านวัสดุคั่นกลางมีโอกาที่จะได้รับการบาดเจ็บจากการบาดเจ็บของเศษกระจกและเสียชีวิตได้จากบาดแผลดังกล่าวมากกว่าการถูกกระแทกจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการบาดเจ็บของศีรษะคือความหนาของวัสดุคั่นกลาง โดยกระจกหลายชั้นที่เสริมด้วยวัสดุคั่นกลางความหนา 1.14 มิลลิเมตรสามารถรับแรงกระแทกศีรษะจำลองได้โดยไม่ทะลุวัสดุคั่นกลาง ทั้งความหนากระจก 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการบาดเจ็บของศีรษะ (HIC15) ที่ได้คือ 558.67, 496.25 และ 565.98 ตามลำดับ อีกทั้งความเสียหายของกระจกหลายชั้นมีลักษณะความเสียหายใกล้เคียงกัน 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 และเป็นสาเหตุให้มีลักษณะความเสียหายแตกต่างกันออกไปขึ้นกับความหนาของกระบอก

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 เพื่อต้องการเพิ่มตัวเลือกในการใช้วัสดุที่มีความหลากหลายในแง่อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งจะได้รับค่าเกณฑ์การบาดเจ็บที่ศีรษะที่แตกต่างกัน

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).