

การศึกษาแนวทางการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อค
โดยการเสริมยางพาราธรรมชาติ

คุณานนต์ ศักดิ์คำปัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



THE STUDY ON CRASHWORTHINESS IMPROVEMENT OF HELMET
USING NATURAL RUBBER

KUNANON SAKKAMPANG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2021
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาแนวทางการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคโดยการเสริมยางพาราธรรมชาติ สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะ คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และขอขอบคุณ คณาจารย์สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนในทุก ๆ เรื่องด้วยความปรารถนาดีเสมอมา

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องทุกท่านที่สนับสนุนและให้กำลังใจในงานวิจัยสำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอน้อมบูชาพระคุณบิดามารดาและบูรพาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน วิชาความรู้และให้ความเมตตาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด และเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้การศึกษาวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณานนต์ ศักดิ์คำปัง
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การศึกษาแนวทางการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อกโดยการเสริมยางพาราธรรมชาติ

ผู้วิจัย : คุณานันต์ ศักดิ์กำปัง

ชื่อปริญญา : ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

คำสำคัญ : การทดสอบแรงกระแทก, ภาวะโหลต, ความเร่ง, การบาดเจ็บที่ศีรษะ, ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาแนวทางการนำฟองน้ำยางพารามาใช้เพื่อประยุกต์ใช้ในหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ โดยผู้วิจัยได้เลือกหมวกแบบครึ่งใบ เต็มใบและเต็มใบปิดหน้ามาทำเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมเฉพาะพื้นที่ที่มีความหนา 1 cm และ 1.6 cm ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก โดยใช้น้ำหนักของหัวค้อนตกกระแทก 10 kg ที่ความเร็ว 4.85, 5.42, 5.94 และ 6.26 m/s เพื่อวิเคราะห์ผลของภาวะโหลตที่เกิดจากการกระแทก จากนั้นศึกษาการรับแรงกระแทกของหมวกโดยวิธีการตามมาตรฐานการทดสอบหมวกกันน็อกที่ความเร็ว 5.94 m/s สำหรับหมวกแบบครึ่งใบ ความเร็ว 7.67 m/s สำหรับหมวกแบบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้าเพื่อศึกษาความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration: P_{ACC}) และค่าการบาดเจ็บที่ศีรษะ (HIC) ซึ่งผลการทดลองทุกกรณีจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้การวิเคราะห์โดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) จากการศึกษาพบว่าหมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำยางพาราสามารถลดภาวะโหลตจากการกระแทกได้ในทุกกรณี ซึ่งสามารถลดภาวะโหลตสูงสุดได้ถึง 42.91 % โดยหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีความสามารถในการรับแรงกระแทกที่ดีที่สุด ในส่วนผลของการทดสอบความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) และค่าการบาดเจ็บที่ศีรษะ (HIC) ตามมาตรฐานการทดสอบหมวกกันน็อกพบว่าหมวกกันน็อกแบบเสริมฟองน้ำยางพาราสามารถลดค่าความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) และ HIC ลงได้โดยค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในออกขายเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) พบว่าผลมีความใกล้เคียงกันกับผลของการทดลองในทุกกรณี โดยมีความแตกต่างกันสูงสุดอยู่ที่ 20.32% สุดท้ายสามารถสรุปได้ว่าหมวกกันน็อกทุกแบบที่เสริมฟองน้ำยางพารามีผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในเชิงพาณิชย์ โดยหากพิจารณาในด้านของน้ำหนักและความสะดวกสบายในการสวมใส่นั้น หมวกกันน็อกแบบเสริมฟองน้ำยางพาราเฉพาะพื้นที่ที่มีความหนา 1 cm ก็มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากที่สุด

ABSTRACT

TITLE : THE STUDY ON CRASHWORTHINESS IMPROVEMENT OF HELMET USING
NATURAL RUBBER
AUTHOR : KUNANON SAKKAMPANG
DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY
MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING
ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAWALIT THINVONGPITUK, Ph.D.
KEYWORDS : IMPACT TEST, IMPACT LOAD, ACCELERATION, HEAD INJURY CRITERION,
FINITE ELEMENT ANALYSIS

The objective of this study was to examine the use of rubber sponge as an impact absorber in motorcycle helmets. There were three types of helmets used in this study: shorty, open-face helmet, and full-face helmet. The specimens were reinforced with two different patterns of rubber sponge: full area reinforcing and Oregon Aero reinforcing. The thickness of the rubber sponge were 1 cm and 1.6 cm. The reinforced helmets were examined by using impact testing machine and compared with the results of the commercial helmets. The 10-kg dropped hammer was freely dropped at the speed of 4.85, 5.42, 5.94 and 6.26 m/s to investigate the effect of the impact load. The impact load was then studied by a standard helmet test method at 5.94 m/s for shorty, and 7.67 m/s for open-face helmet, and full-face helmet., to study peak acceleration (P_{ACC}) and Head Injury Criterion (HIC) values. The results of all cases were analyzed and compared with FEA model. The results of this study revealed that the helmets that were reinforced with rubber sponges can reduce impact loads in all cases. The maximum load was raised up to 42.91%, in full-face helmets. As for the results of P_{ACC} and HIC values, the rubber sponge reinforced helmet can reduce the maximum acceleration (P_{ACC}) and HIC values to better than the standard value of the commercial. From the comparison of the results from FEA, it was found that the results were similar to the results of the experiments in all cases. Finally, it can be concluded that all helmets equipped with rubber sponge can reduce the impact load in the helmet, however, when considering the weight and the comfort of the users, The helmet with 1-cm rubber sponge reinforcement is most preferable for the users.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ข้อมูลพื้นฐาน ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ประเภทของหมวกกันน็อค	7
2.2 มาตรฐานการทดสอบหมวกกันน็อค	11
2.3 ยางธรรมชาติ	12
2.4 การผลิตฟองน้ำยางพารา	19
2.5 สารเคมีในการผลิตฟองน้ำยางพารา	22
2.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทก	24
2.7 หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	28
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 แนวทางการศึกษา	55
3.2 การเลือกประเภทหมวกกันน็อคและศีรษะจำลอง	56
3.3 การขึ้นรูปฟองน้ำยางพาราโดยกระบวนการดันลอย	58
3.4 ลักษณะของหมวกกันน็อคที่เสริมวัสดุฟองน้ำยางพารา	62
3.5 การทดสอบแรงกระแทกและความเร่งจากการกระแทก	64
3.6 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุของหมวกกันน็อค	69
3.7 การสร้างแบบจำลองหมวกกันน็อคเพื่อการศึกษาแบบจำลองทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์	72
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ผลการศึกษาการกระแทกของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ	77
4.2 ผลการศึกษาการกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ	83
4.3 ผลการศึกษาการกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า	90

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลของค่าความเร่ง (Acceleration) และ HIC จากการกระทบของหมวกกันน็อค	98
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 อภิปรายผลการทดลอง	111
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	112
5.3 ข้อเสนอแนะ	113
เอกสารอ้างอิง	114
ภาคผนวก	
ก ตารางผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลอง	121
ข ภาพแสดงภาระโหลดสูงสุดของแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี FEA	146
ค งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่	153
ประวัติผู้วิจัย	171

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 รูปแบบหมวกกันน็อกเสริมฟองน้ำยางธรรมชาติ	4
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	13
2.2 สมบัติบางอย่างของอีลาสโตเมอร์บางชนิด	17
2.3 สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ	19
2.4 สูตรในการทำยางฟองน้ำ	22
2.5 สารที่ทำให้เกิดฟอง	22
2.6 สารทำให้ยางคงรูป	23
2.7 สารตัวเร่ง	23
2.8 สารตัวเติม	24
2.9 สารตัวกระตุ้นและสารก่อเจล	24
2.10 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	35
2.11 ผลการทดสอบการดูดซับพลังงานเปลือกหมวกกันน็อก	41
2.12 ผลการทดสอบการดูดซับแรงในแต่ละระดับพลังงานการกระแทกเปลือกหมวกกันน็อก	42
2.13 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางในงานวิจัยของ S. Norhazariah et al.	45
2.14 ผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	47
2.15 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของหมวกกันน็อกเปรียบเทียบกับทดสอบด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของ G.D. Caserta et al.	49
2.16 ค่าความต่างระหว่างวิธีการทดลองและการสร้างแบบจำลอง M. Fahlstedt et al.	50
3.1 สารเคมีควบคุมปฏิกิริยา	58
3.2 สูตรน้ำยางชั้น (70%)	60
3.3 แสดงสูตรที่ใช้ขึ้นรูปฟองน้ำยางพารา	61
3.4 จำนวนรูปแบบหมวกกันน็อกเสริมฟองน้ำยางธรรมชาติแบบคลุมทั้งพื้นที่ทำการทดสอบ	63
3.5 คุณสมบัติวัสดุของ ABS Plastic	71
3.6 คุณสมบัติวัสดุของ EPS Foam	71
3.7 คุณสมบัติวัสดุของฟองน้ำยางพารา	72
4.1 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ	78
4.2 การเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดสูงสุดระหว่างการทดลองและแบบจำลองของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ	81
4.3 พฤติกรรมการรับแรงแบบกระแทกของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบกรณีต่าง ๆ	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.4	การเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดสูงสุดระหว่างการทดลองและแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ	88
4.5	พฤติกรรมการรับแรงแบบกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้ากรณีต่าง ๆ	91
4.6	การเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดสูงสุดระหว่างการทดลองและแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า	95
4.7	ผลของค่าความเร่งสูงสุดและ HIC ของหมวกแบบครึ่งใบ	101
4.8	ผลของค่าความเร่งสูงสุดและ HIC ของหมวกแบบเต็มใบ	106
4.9	ผลของค่าความเร่งสูงสุดและ HIC ของหมวกแบบเต็มใบ	110

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	หมวกกันน็อก	2
1.2	เครื่องทดสอบการกระแทก	5
2.1	หมวกกันนิรภัยแบบครึ่งใบ	7
2.2	ส่วนประกอบของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ	8
2.3	หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ	8
2.4	ส่วนประกอบของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ	9
2.5	หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า	9
2.6	ส่วนประกอบของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า	10
2.7	การทดสอบมาตรฐาน The snell memorial foundation (SNELL)	11
2.8	โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ	13
2.9	กระบวนการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไรเซชันของยางกับกำมะถันโดยเกิดปฏิกิริยา การเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ของซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน	15
2.10	ของการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross-link) ของซิส -1, 4 พอลิไอโซพรีนด้วยอะตอมของกำมะถัน (เม็ดสีดำ)	15
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain) ของยางที่ทำให้แข็ง และยางธรรมชาติ	16
2.12	น้ำยางข้น	18
2.13	ขั้นตอนการทำยางพองน้ำยางพารา	20
2.14	พองน้ำยางพารา	21
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการและระยะยุบตัว	25
2.16	ความแตกต่างระหว่างความเร่งกับความหน่วง	28
2.17	ลักษณะหน้าจอของโปรแกรม ABAQUS/CAE	30
2.18	ประเภทหมวกกันน็อกที่ใช้ในการแข่งขันกีฬาคีฬาเกิด	32
2.19	ชุดทดสอบรุ่น Hybrid III headform	33
2.20	ค่าความเร่งของการทดสอบหมวกกันน็อครถจักรยาน	33
2.21	ผลการศึกษาค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (HIC)	34
2.22	หมวกกันน็อกแบบเน็ตติ लाईนติ้ง (Netti Lighting) แบบเอ็มอีที คลอสโอเวอร์ (MET Crossover) และแบบเอ็มอีที คลอส (MET Kaos)	35
2.23	การทดสอบด้วยวิธีการปล่อยศีรษะที่สวมหมวกกันน็อกที่ใช้ในกีฬาสกิตกลงมากระแทก พื้นอย่างอิสระ	37
2.24	แบบจำลองหมวกกันน็อกยี่ห้อ CMS SUV และศีรษะจำลอง	38
2.25	ทิศทางของการกระแทกหมวกกันน็ออกจากการทดลองของ F.Fernandes	37
2.26	หมวกกันน็อกที่ใช้สำหรับการรบของทหาร	39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.27	แบบจำลองวิธีการทดสอบการกระแทกของ Nahum'm และ Yoganandan's	40
2.28	แท่นทดสอบการกระแทกและเปลือกหมวกกันน็อก	42
2.29	แบบจำลองเปลือกหมวกกันน็อกของตำรวจปราบจลาจล	43
2.30	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการกระแทก (Impact energy) และการดูดซับพลังงาน	44
2.31	แผ่นดูดซับแรงกระแทกรูปรีขั้วและการทดสอบ	45
2.32	แบบจำลองฟองน้ำยางพาราและการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	46
2.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของฟองน้ำยางพารา โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง A. Nomoto et al.	46
2.34	หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้าที่เสริมวัสดุอะลูมิเนียมรูปรีขั้วเป็นรับวัสดุช่วยรับแรงกระแทก	48
2.35	กรณีการกระแทกของหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่จักรยานที่ทำให้สมองเกิดการบาดเจ็บมากที่สุด 3 กรณี	50
2.36	ลักษณะของหมวกเป็น 3 แบบคือแบบไม่มีขอบ (Without rim) แบบมีขอบ 8 มิลลิเมตร และแบบมีขอบ 13 มิลลิเมตร	50
2.37	พลาสติกกรองในเปลือกหมวกเป็น 4 แบบ แบ่งเป็น Pattern A, Pattern B, Pattern C และ Pattern D	51
2.38	แบบจำลองในงานวิจัยของของ De-shin Liu และ Yao-Te Chen	52
2.39	ผลการศึกษาแบบจำลองหมวกที่มีการเจาะรู	52
2.40	ลักษณะการกระแทกของศีรษะที่ใช้ในงานวิจัยของ Afshari และ Rajaai	53
2.41	วิธีการทดสอบกระบังหน้าของหมวกกันน็อคมอเตอร์ไซด์	54
3.1	ขั้นตอนการศึกษางานวิจัย	55
3.2	รูปแบบของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ	56
3.3	รูปแบบของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ	56
3.4	รูปแบบของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า	57
3.5	ลักษณะศีรษะจำลองในการทดลอง	57
3.6	เครื่องชั่งสาร รุ่น BSA	58
3.7	เครื่องผสมสารเคมี	59
3.8	ถาดอะลูมิเนียม	59
3.9	ตู้อบความร้อน	62
3.10	ลักษณะฟองน้ำยางพารา	62
3.11	การเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่	63
3.12	การเสริมฟองน้ำยางพาราแบบแผ่นเฉพาะพื้นที่	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13	ไดอะแกรมลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing Machine)
3.14	การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบแรงกระแทก
3.15	ชุดทดสอบการดูดกลืนแรงกระแทก
3.16	การเชื่อมต่อที่จะทำการกระแทก
3.17	การปรับให้ศีรษะจำลองที่สวมหมวกทำการกระแทกที่มุม 35°
3.18	เครื่องทดสอบยกหมวกขึ้นไปให้ได้ที่สูง 3 เมตร
3.19	ลักษณะและขนาดของชิ้นงานที่เตรียมก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงของวัสดุ
3.20	ชุดทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ
3.21	การเตรียมวัสดุเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ
3.22	แบบจำลองหมวกกันน็อกแบบเต็มใบที่ใช้ในงานวิจัย
3.23	แบบจำลองของวัตถุในการกระแทกและรับแรงของ
3.24	การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบจำลองกรณีการทดสอบการกระแทกในกรณีการทดสอบการกระแทก
3.25	การกำหนดลักษณะ Mesh และรูปแบบของ Mesh ของวัสดุในแบบจำลองในกรณีการทดสอบการกระแทก
3.26	การกำหนดลักษณะ Mesh และรูปแบบของ Mesh ของวัสดุในแบบจำลองในกรณีการทดสอบความเร่งจากการกระแทก
3.27	การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบจำลองกรณีการทดสอบการกระแทกในกรณีการทดสอบความเร่งจากการกระแทก
4.1	พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของแบบจำลองหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ
4.2	การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลองของหมวกแบบครึ่งใบ
4.3	แบบจำลองแสดงพฤติกรรมกระแทกที่ภาระโหลดสูงสุดที่ความเร็ว 6.26 m/s ของหมวกนิรภัยแบบครึ่งใบ
4.4	พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของแบบจำลองหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ
4.5	การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลองของหมวกแบบเต็มใบ
4.6	แบบจำลองแสดงพฤติกรรมกระแทกที่ภาระโหลดสูงสุดที่ความเร็ว 6.26 m/s ของหมวกนิรภัยแบบเต็มใบ
4.7	พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของแบบจำลองหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า
4.8	การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า
4.9	แบบจำลองแสดงพฤติกรรมกระแทกที่ภาระโหลดสูงสุดที่ความเร็ว 6.26 m/s ของหมวกนิรภัยแบบเต็มใบปิดหน้า

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่ง (Acceleration) กับเวลาของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ	98
4.11	ค่า HIC ของการทดสอบหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ	99
4.12	ผลของแบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) ของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ	100
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่ง (Acceleration) กับเวลาของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ	102
4.14	ค่า HIC ของการทดสอบหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ	103
4.15	ผลของแบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ	104
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่ง (Acceleration) กับเวลาของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า	107
4.17	ค่า HIC ของการทดสอบหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า	107
4.18	ผลของแบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า	109

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
ABS	พลาสติกแบบอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน
ASTM	มาตรฐานการทดสอบวัสดุของประเทศสหรัฐอเมริกา
ANSYS	โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
CAD	เทคโนโลยีของการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยออกแบบ
C3D10M	รูปแบบของเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม 10 โหนด
CaCO ₃	แคลเซียมคาร์บอเนต
cm.	เซนติเมตร
DOT	มาตรฐานการขนส่งของกรมการขนส่งประเทศสหรัฐอเมริกา
DPG	ไดโพรไฟลีน ไกลคอล
DAI	ภาวะเนื้อเยื่อสมองฉีกขาด
EPS	โฟมโพลีสไตรีน
ECE	มาตรฐานองค์การตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานของสินค้ายุโรป
E _a	การดูดซับพลังงาน
E _s	การดูดซับพลังงานจำเพาะ
FEA	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
fps	ความเร็วในการบันทึกภาพหน่วยเป็นภาพต่อวินาที
g	กรัม
g/ml	กรัมต่อมิลลิเมตร
g/cm ³	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
HIC	ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บที่ศีรษะ
IARV	ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บที่ศีรษะแบบอ้างอิงของหมวกกันน็อครถจักรยาน
JIS	มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น
ksi	กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว
kN	กิโลนิวตัน
kg	กิโลกรัม
LFT	เทอร์โมพลาสติกไฟเบอร์ยาว
Ls-Dyna	ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Mesh	ขนาดของเอลิเมนต์ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
MPa	เมกะพาสคาล
m/s	เมตรต่อวินาที
m	เมตร
mm	มิลลิเมตร
ms	มิลลิวินาที

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
mm/min	มิลลิเมตรต่อนาที
P_{Cr}	ภาระไหลดวิกฤติ
P_{max}	ภาระไหลดสูงสุด
P_{mean}	ภาระไหลดเฉลี่ย
P_{ACC}	ความเร่งเชิงเส้นสูงสุด
Principle stress	ความเค้นแบบตั้งฉากในขณะที่ความเค้นแบบเฉือนเท่ากับศูนย์
phr	หน่วยการผสมยางโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่างๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก)
R3D4	รูปแบบของเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม 4 โหนด
r^2	ค่าที่บ่งบอกถึงความใกล้เคียงกันของข้อมูลในเส้นกราฟ
Snell	มาตรฐาน
SUFEHM	แบบจำลองสี่ระยะของมหาวิทยาลัยสตาร์บูร์ก
SSF	โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์
Stress	ความเค้นของวัสดุ
SDH	ภาวะเลือดออกในสมอง
von Mises stress	ผลรวมของความเค้น
Yield	ค่าความแข็งแรงครากของวัสดุ
ZDEC	ซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต
ZMBT	ซิงค์ 2-เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล
Wingstay L	สารป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับยาง
ZnO	ซิงค์ออกไซด์
ρ	ความหนาแน่น
E	มอดูลัสของวัสดุ
U	อัตราส่วนปัวซอง
มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีประชากรเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากทำให้เกิดความก้าวหน้าในด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี อุตสาหกรรม คมนาคม ฯลฯ ซึ่งในจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลต่อการคมนาคมเป็นอย่างมากเนื่องจากเมื่อมีประชากรเพิ่มขึ้นก็จำเป็นต้องมีการเดินทางโดยใช้รถยนต์ เครื่องบิน และเรือ มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเดินทางโดยรถเป็นหัวใจหลักทั้งในด้านการขนส่งในภาคอุตสาหกรรม การขนส่งด้านเกษตร การสัญจรไปมาของผู้คนภายในประเทศ มีรายงานของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรในปี 2557 พบว่าการเกิดอุบัติเหตุตามท้องถนนมีมากถึง 62,769 ครั้ง ยานพาหนะที่เกิดอุบัติเหตุสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ รถจักรยานยนต์ (35.64%) รถยนต์นั่ง (30.67%) และรถบรรทุกขนาดเล็ก (ปิคอัพ) (16.96%) (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2559: เว็บไซต์) จากรายงานดังกล่าวยังพบด้วยว่ามีผู้เสียชีวิตถึง 6,374 คน บาดเจ็บถึง 23,448 คน โดยเฉพาะรถจักรยานยนต์ที่เป็นพาหนะที่นิยมมากในประเทศไทย เนื่องจากจักรยานยนต์เป็นพาหนะที่มีขนาดเล็ก มีความคล่องตัวในการเดินทาง เคลื่อนตัวได้แม้การจราจรติดขัด สิ้นเปลืองพลังงานน้อย ราคาไม่สูง ด้วยเหตุนี้ทำให้อุบัติเหตุจากรถจักรยานยนต์มีเพิ่มขึ้น (สิริภัทร ขวัญเพชร, 2555) อีกทั้งหากเกิดอุบัติเหตุกับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์จะทำให้เกิดการบาดเจ็บมากกว่าพาหนะชนิดอื่น ๆ เนื่องจากจักรยานยนต์ไม่ได้มีอุปกรณ์ป้องกันเหมือนพาหนะอื่น ๆ ทำให้เมื่อเกิดอุบัติเหตุกับผู้ขับขี่จะทำให้ผู้ขับขี่ส่วนใหญ่ถูกเหวี่ยงตัวออกจากรถทำให้ศีรษะไปกระแทกหรือชนกับพื้นหรือวัตถุอื่น ๆ บริเวณข้างถนน

หมวกกันน็อกเป็นอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่สำคัญที่สุดของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดความรุนแรงจากการชนที่ศีรษะและภายในสมอง (A. L. DeMarco et al., 2010) การสวมหมวกกันน็อกช่วยลดโอกาสการเสียชีวิตเนื่องจากการบาดเจ็บที่ศีรษะได้ถึง 43% สำหรับผู้ขับขี่และ 58% สำหรับผู้ซ้อนท้าย (มูลนิธิไทยโรดส์, 2559: เว็บไซต์) ทั้งนี้หมวกกันน็อกที่ผู้ขับขี่สวมใส่นั้นจำเป็นต้องได้รับมาตรฐานตามกฎหมายในประเทศซึ่งในประเทศไทยนั้นตามท้องตลาดมักจะใช้หมวกกันน็อกที่เป็นมาตรฐานหลากหลาย เช่น มาตรฐาน DOT (Department of Transportation, 1998) มาตรฐาน Snell (Snell Memorial Foundation, 2005) มาตรฐาน ECE (Economic Commission for Europe, 2002) และมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย (มอก.) เป็นต้น โดยก่อนจะได้รับมาตรฐานเหล่านี้ผู้ผลิตจะนำหมวกกันน็อกไปทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อให้ได้การรับรองตามกฎหมายในประเทศ ซึ่งการทดสอบหมวกกันน็อกที่ผลิตขึ้นก่อนออกจำหน่าย ได้แก่ การทดสอบแรงกระแทกและความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก (Impact) ความทนทานต่อการเจาะทะลุจากวัตถุมีคม (Penetration) ความกระชับในการสวมใส่ (Retention) และการมองเห็นขณะสวมใส่ (Peripheral vision) ซึ่งอย่างน้อยควรมีค่า 120 องศา (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2559: เว็บไซต์) หมวกกันน็อกที่มีขายตามท้องตลาดจะแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ หมวกแบบครึ่งใบ หมวกกัน

นิรภัยแบบเต็มใบ และหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า ซึ่งแต่ละแบบมีลักษณะได้ดังภาพที่ 1.1 แม้ว่าหมวกกันนิรภัยเหล่านี้จะได้รับมาตรฐานและสามารถลดอุบัติเหตุที่เกิดกับสมองได้โดยงานวิจัยของ T. M. Rice et al. (2010) พบว่าผู้ขับขี่ที่มีการสวมใส่หมวกกันน็อกจะช่วยลดอุบัติเหตุที่เกิดกับคอได้ถึง 37% ลดการบาดเจ็บที่เกิดกับสมองได้ถึง 60% แต่จากงานวิจัยของ A. L. DeMarco et al. (2010) ที่ได้ทำการทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อกที่ความเร็วตั้งแต่ 0.9 ถึง 10.1 m/s พบว่าหากเกิดการชนและการกระแทกที่ความเร็วสูงอาจเป็นผลทำให้เกิดค่าความเร่งเชิงเส้น (Linear acceleration) สูงสุดถึง 500 g ได้เช่นกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยยังพบว่าความหนาของโฟมภายในหมวกกันน็อกก็มีผลต่อการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) โดยการดูดซับพลังงานที่ดีย่อมส่งผลดีต่อศีรษะของผู้ขับขี่หากเกิดอุบัติเหตุ



(ก) หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า (ข) หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ (ค) หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ

ภาพที่ 1.1 หมวกกันน็อก

ที่มา: Checkraka.com (2020: Website)

หมวกกันน็อครถจักรยานยนต์แบบทั่วไปตามท้องตลาดประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลัก 2 ส่วนคือ บริเวณเปลือกหมวกจะทำด้วยวัสดุที่เป็นพลาสติกผสม (Thermoplastic) ที่เป็นโพลีคาร์บอนเนต หรือ ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) ส่วนภายในจะเป็นวัสดุที่เป็นโฟม EPS (Expanded polystyrene) (P. K. Pinnoji et al., 2010) ซึ่งหากมองในด้านความสามารถในการรับแรงกระแทกและการดูดซับพลังงาน หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีที่สุดทั้งนี้เป็นเพราะวัสดุที่ใช้ทำเปลือกหมวกและความหนาของโฟมภายใน (D. R. Thom, 2006) หากพิจารณาในเรื่องของความหนาของโฟมภายในแล้วมีความเป็นไปได้ว่าหากมีวัสดุที่สามารถรับแรงกระแทกและดูดซับพลังงานได้ดีมาเสริมบริเวณช่องว่างระหว่างศีรษะผู้ขับขี่กับโฟมภายใน ก็มีความเป็นไปได้ที่จะมีผลทำให้หมวกกันน็อกมีประสิทธิภาพในการรับแรงได้มากขึ้น

ยางพาราหรือยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2534 จนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยในปี 2557 ประเทศไทยมีการส่งออกยางพาราประมาณ 3.8 ล้านตัน ในขณะที่ปี 2558 มีประมาณการส่งออกประมาณ 3.91 ล้านตัน (สวีณา พลพิช, 2559: เว็บไซต์) ลักษณะเด่นของยางธรรมชาติคือมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกมากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีความสมบัติที่ดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกันซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน (พงษ์ธร แซ่ฮ่วย, 2559:

เว็บไซต์) เช่น ยางรถยนต์ ฐานวางเครื่องยนต์และอุปกรณ์ที่ลดการสั่นสะเทือน เป็นต้น แต่ก่อนที่จะนำยางไปใช้ผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ นั้นจำเป็นจะต้องมีการผสมสารเคมีเช่น กำมะถัน สารตัวเร่งต่าง ๆ และจะถูกนำไปใช้ขึ้นรูปด้วยความร้อนและความดันสูง กระบวนการนี้เรียกว่า วูลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือเรียกว่า ยางคงรูป ซึ่งเป็นไฮเปอร์อีลาสติกและวิสโคไฮเปอร์อีลาสติก (ชาร์ฟ บาร์, 2553) โดยยางคงรูปมีความเหนียวแน่นมากขึ้นมีคุณสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงมากขึ้นและความยืดหยุ่นสูงเหมาะกับการนำไปใช้งาน ในปัจจุบันมักมีการนำยางธรรมชาติไปประยุกต์ใช้งานหลายรูปแบบ โดยมีงานวิจัยของ รัตนา ตันตเทอดธรรม, วุฒินันท์ คงพั๊ด และกล้าณรงค์ ศรีรอด (2553) ได้นำยางธรรมชาติมาผสมกับกาบมะพร้าวและทะเลสาปาล์มน้ำมันเป็นสารตัวเติมเสริมแรง พบว่าส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ได้แก่ มีมอดูลัสที่ระยะยืด 300% และความแข็งมากขึ้น ส่วนงานของ อาทิตย์ สวัสดิ์รักษา และคณะ (2552) พัฒนาวัสดุจากยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นวัสดุ ทดแทนอุปกรณ์ หนุนเส้นเท้าที่ทำจากยางสังเคราะห์และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ การทดสอบพบว่ายางดังกล่าวสามารถลดความแข็งของยางได้ดี สามารถดูดซับพลังงานได้สูง อีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์มีพื้นผิวที่สวยงาม ไม่มีรูพรุนและฟองอากาศในเนื้อของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น จากที่กล่าวมายางธรรมชาติจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัสดุรองรับการกระแทกได้เนื่องจากมีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อการฉีกขาดและมีราคาไม่แพง สามารถหาได้ในประเทศ

จากผลของการศึกษาเอกสารที่ผ่านมามีข้อสังเกตว่าหมวกกันน็อกที่ได้รับมาตรฐานต่าง ๆ ตามท้องตลาดนั้นแม้จะมีความปลอดภัยมากกว่าการไม่สวมใส่หมวกกันน็อก แต่ในบางครั้งก็เป็นที่น่าสังเกตว่าหมวกกันน็อกในบางรุ่นไม่สามารถป้องกันการกระแทกกระเทือนที่ศีรษะหรือดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้ดีพอ จึงเป็นแนวคิดที่จะศึกษาการนำหมวกกันน็อกมาเสริมวัสดุเพื่อให้สามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเอาวัสดุฟองน้ำยางธรรมชาติหรือฟองน้ำยางพาราที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีการดันลอย (Dunlop process) มาทำการเสริมเข้าไปภายในหมวกกันน็อกบริเวณช่วงต่อระหว่างศีรษะของผู้ขับขี่กับบริเวณโฝของหมวกเพื่อช่วยในการรับแรงกระแทกอีกหนึ่งชั้น โดยผู้วิจัยได้ทำการเลือกหมวกกันน็อก 3 แบบคือ หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ และหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า มาทำการดัดแปลงเสริมฟองน้ำยางพาราและทำการศึกษาโดยใช้การทดสอบแบบกระแทก (Impact test) เพื่อศึกษาผลของการดูดซับพลังงาน (Energy absorption) ภาระสูงสุด (Maximum load) ค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration) และค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (Head injury criteria value: HIC) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์มากขึ้นและเป็นการแก้ปัญหาการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุทางจราจรในประเทศไทยอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟองน้ำยางพารามาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อก

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อกที่เสริมด้วยฟองน้ำยางพาราโดยเปรียบเทียบกับหมวกกันน็อกแบบปกติ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

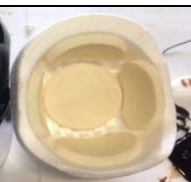
โครงการนี้มุ่งเน้นศึกษาความสามารถของวัสดุฟองน้ำยางธรรมชาติภายใต้แรงกระแทก ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานและพฤติกรรมการตอบสนองต่อการกระแทกของหมวกกันน็อกรถจักรยานยนต์โดยวิธีการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยมีเงื่อนไขของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

1.3.1 ตัวแปรต้น

1.3.1.1 หมวกกันน็อกที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ และหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

1.3.1.2 ทำการเสริมฟองน้ำยางพารา 2 ลักษณะ คือแบบคลุมทั้งพื้นที่ และแบบแผ่นเฉพาะเฉพาะพื้นที่

ตารางที่ 1.1 รูปแบบหมวกกันน็อกเสริมฟองน้ำยางธรรมชาติ

ความหนาของฟองน้ำยางพารา (เซนติเมตร)	ความสูงของการปล่อยหัวค้อน (เมตร)	ลักษณะของการเสริมฟองน้ำยางพารา		ประเภทของหมวกที่ใช้ในการทดสอบ
1.0	1.2	 แบบคลุมทั้งพื้นที่	 แบบแผ่นเฉพาะพื้นที่	1. หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ 2. หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ 3. หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า
	1.5			
	1.8			
	2.0			
1.6	1.2	 แบบคลุมทั้งพื้นที่	 แบบแผ่นเฉพาะพื้นที่	1. หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ 2. หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ 3. หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า
	1.5			
	1.8			
	2.0			

1.3.1.3 ความหนาของฟองน้ำยางธรรมชาติที่ใช้เสริมภายในหมวกกันน็อกที่ใช้สำหรับการทดลองคือ 1 และ 1.6 เซนติเมตร ลักษณะของการเสริมฟองน้ำยางพาราดังแสดงในตารางที่ 1.1

1.3.1.4 ในการศึกษาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะทำการกำหนดคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ประกอบหมวกกันน็อกและคุณสมบัติของฟองน้ำยางพาราที่นำมาใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine Dynamic Type รุ่น Instron 5567A

1.3.2 ตัวแปรตาม

1.3.2.1 เก็บข้อมูลของภาระสูงสุด (Maximum load) ค่าความเร่ง (Acceleration) และค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (HIC) ซึ่งจะเก็บข้อมูลทั้งกรณีที่เป็นการทดลองและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

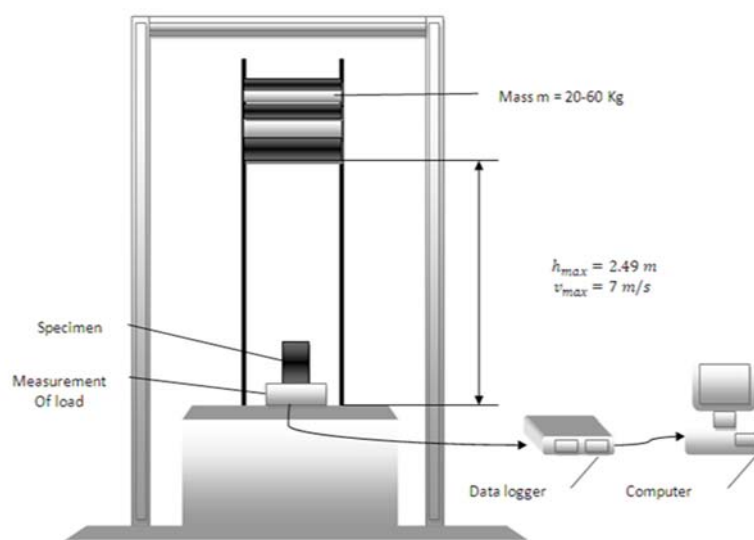
1.3.2.2 วิเคราะห์ลักษณะการเสียหายของหมวกกันน็อคจากการทดสอบ

1.3.2.3 นำผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ความหนาที่เพิ่มขึ้น

1.3.3 ปัจจัยควบคุม

ในการทดสอบนี้ใช้เครื่องทดสอบการกระแทกที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นหอสูงมีอุปกรณ์ติดตั้งหัวค้อนซึ่งสามารถยกขึ้นไปในระดับความสูงต่าง ๆ ดังภาพที่ 1.2 และมีปัจจัยควบคุมดังนี้

1.3.3.1 หัวค้อนที่ใช้ในการทดสอบใช้น้ำหนักที่ 10 กิโลกรัม



ภาพที่ 1.2 เครื่องทดสอบการกระแทก

1.3.3.2 ความสูงที่ใช้ในการทดสอบการกระแทกหมวกกันน็อคแบ่งเป็น 4 ระยะ คือ 1, 1.5, 1.8 และ 2 เมตร (m)

1.3.3.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมออบาคัส (ABAQUS) ซึ่งแบบจำลองประกอบด้วย 4 ส่วนดังนี้

- 1) เปลือกหมวกกันน็อคที่เป็นพลาสติก (Deformable)
- 2) โฟมภายในหมวกกันน็อค (Deformable)
- 3) ฟองน้ำยางพาราเสริมภายในหมวกกันน็อค (Deformable)
- 4) แผ่นกระแทก กำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) มีมวล และความเร็ว
- 5) ศีรษะจำลองรองรับชิ้นงาน กำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการเลือกหมวกกันน็อก 3 แบบคือ หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ และหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า มาทำการดัดแปลงเสริมฟองน้ำยางพาราและทำการศึกษาโดยใช้การทดสอบแบบกระแทก (Impact test) เพื่อศึกษาผลของ การดูดซับพลังงาน ภาระสูงสุด ค่าความเร่งเชิงเส้น และค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์มากขึ้น อีกทั้งยังมีความคาดหวังผลสำเร็จได้ดังนี้

- 1.4.1 ได้หมวกกันน็อกที่มีการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพของการรับแรงกระแทกที่สูงขึ้น
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการออกแบบของวิศวกร ที่จะใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับปัญหาของแรงกระแทก เช่น การกระแทกของหมวกกันน็อกเนื่องจากเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งจะช่วยลดการเสียชีวิตของผู้ขับขี่
- 1.4.3 ได้อุปกรณ์ดูดซับพลังงานที่มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูง
- 1.4.4 เป็นแนวทางในการวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์จากฟองน้ำยางพาราไปใช้ในเชิงพาณิชย์

บทที่ 2

ข้อมูลพื้นฐาน ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 เป็นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบหมวกกันน็อกและการสร้างแบบจำลองหมวกกันน็อก โดยมีรายละเอียดในประเด็นของ ประเภทของหมวกกันน็อก มาตรฐานการทดสอบหมวกกันน็อก ยางธรรมชาติ การผลิตฟองน้ำยางพารา สารเคมีในการผลิตฟองน้ำยางพารา ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทก หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ประเภทของหมวกกันน็อก

หมวกกันน็อกสำหรับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ หมวกกันน็อกแบบเต็มใบและหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า โดยแต่ละแบบก็จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ผู้ขับขี่จะเลือกใช้ ซึ่งแต่ละแบบมีลักษณะดังต่อไปนี้

2.1.1 หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

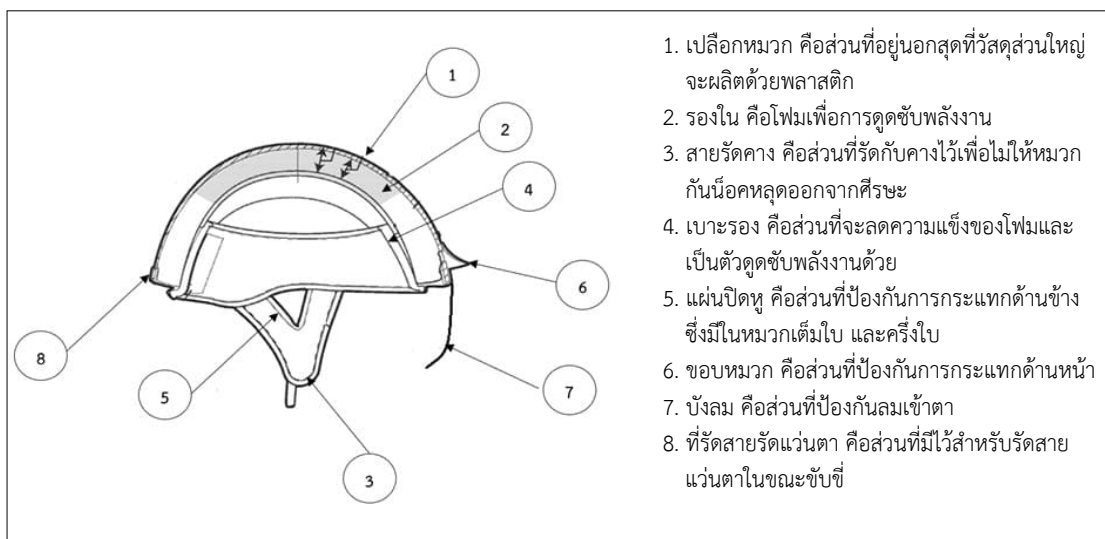
หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ เป็นหมวกกันน็อกที่เปลือกหมวกเป็นรูปครึ่งทรงกลมปิดด้านข้างและด้านหลังเสมอระดับหู ในกรณีที่มีบังลม บังลมต้องทำจากวัสดุโปร่งใสและไม่มีสี หมวกชนิดนี้สามารถป้องกันได้เฉพาะศีรษะส่วนบนเท่านั้น ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

ที่มา: Rider man (2020: Website)

หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 8 ส่วนหลัก ๆ ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งส่วนที่สำคัญคือ ส่วนของเปลือกหมวกและส่วนของรองใน ที่ใช้ในการดูดซับพลังงาน ซึ่งหมวกประเภทนี้จะมีการดูดซับพลังงานน้อยกว่าหมวกกันน็อกประเภทอื่น ๆ ดังงานวิจัยของ A. L. DeMarco et al. (2010)



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ
ที่มา: Federalregister.gov (2020: Website)

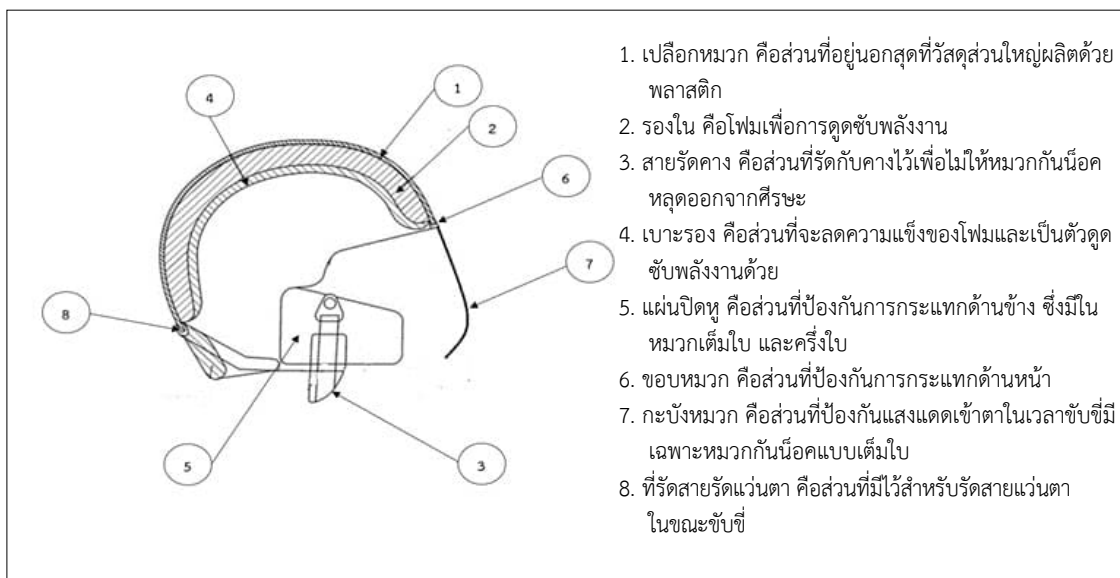
2.1.2 หมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

หมวกกันน็อคแบบเต็มใบ เป็นหมวกกันน็อคที่เปลือกหมวกเป็นรูปทรงกลมปิดด้านข้างและด้านหลังเสมอแนวขากรรไกรและต้นคอด้านหลัง ด้านหน้าเปิดเหนือคิ้วลงมาตลอดถึงปลายคาง ในกรณีที่มีบังลม บังลมต้องทำจากวัสดุโปร่งใสและไม่มีสี ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 หมวกกันน็อคแบบเต็มใบ
ที่มา: Boxzaracing.com (2020: Website)

ส่วนประกอบของหมวกกันน็อคประเภทนี้ประกอบด้วยเปลือกหมวกที่คลุมศีรษะทั้งหมด มีความแข็งแรงทนทานมากกว่าแบบครึ่งใบและสามารถทนทานต่อแรงกระแทกได้มากกว่าหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ โดยส่วนประกอบหลัก ๆ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ส่วนประกอบของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ
ที่มา: Federalregister.gov (2020: Website)

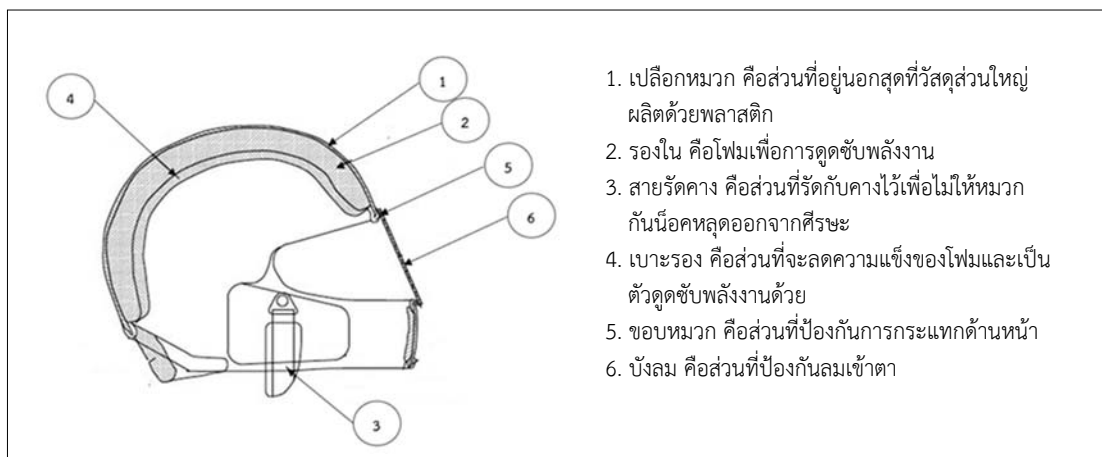
2.1.3 หมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า

หมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า เป็นหมวกที่มีเปลือกหมวกเป็นรูปทรงกลมปิดด้านข้าง ด้านหลัง ขากรรไกร และคาง ในกรณีที่มีบังลม บังลมต้องทำจากวัสดุโปร่งใสและไม่มีสี เป็นหมวกเต็มใบเปิดช่องตรงหน้า จะมีในส่วนตาเท่านั้นที่มองเห็นมีส่วนป้องกันปากและคางด้านหน้าดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 หมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า
ที่มา: Boxzaracing.com (2020: Website)

หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้ามีความทนทานต่อแรงกระแทกมากที่สุดเนื่องจากวัสดุโฟมความหนาค่อนข้างมากกว่าหมวกชนิดอื่น ๆ อีกทั้งยังมีรูปทรงมิดชิดกว่าหมวกชนิดอื่น โดยสามารถดูส่วนประกอบของหมวกชนิดนี้ได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า
ที่มา: Federalregister.gov (2020: Website)

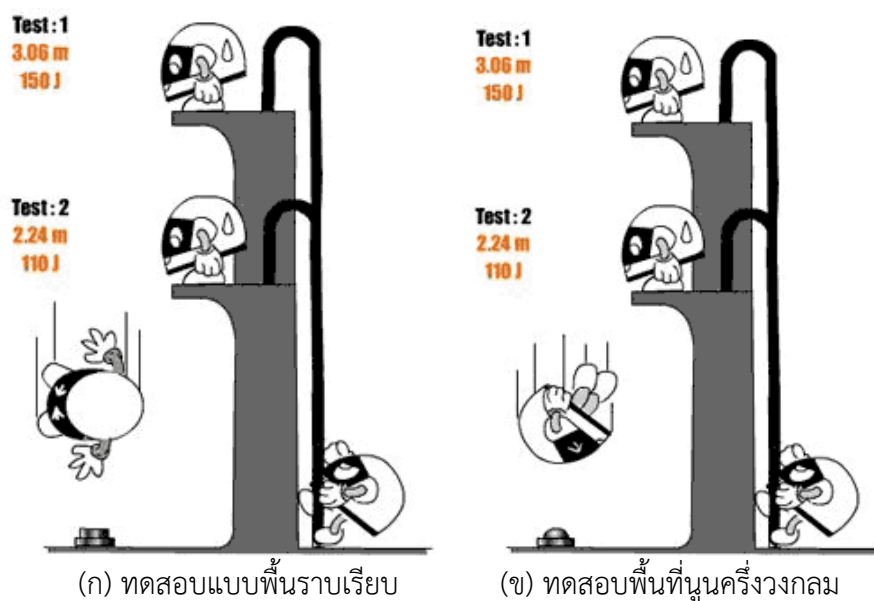
2.2 มาตรฐานการทดสอบหมวกกันน็อก

มาตรฐานของการทดสอบหมวกกันน็อก เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญในการที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพของหมวกกันน็อกของผู้ผลิตที่จะนำไปทำการค้าในเชิงพาณิชย์ อีกทั้งยังเป็นการสร้างความมั่นใจให้กับผู้เลือกซื้อ ซึ่งในการทดสอบมาตรฐานของหมวกกันน็อกสำหรับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ในประเทศไทยมีอยู่ 4 มาตรฐานที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ดังต่อไปนี้

2.2.1 มาตรฐาน The snell memorial foundation (SNELL)

มาตรฐาน The snell memorial foundation หรือเรียกว่ามาตรฐาน SNELL เป็นมาตรฐานที่ได้ชื่อว่าเข้มงวดที่สุด มีการปรับปรุงบ่อยที่สุด และมีผู้ให้ความเชื่อถือมากที่สุด เป็นที่ยอมรับมากที่สุดในยุโรป โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนคือ

การทดสอบส่วนที่ 1 คือทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อกที่ตกอย่างอิสระมากระทบพื้นราบเรียบโดยใช้บริเวณด้านข้างของหมวกกระแทกกับพื้นหรือเรียกว่า การทดสอบแบบพื้นราบเรียบ ดังภาพที่ 2.7 (ก) โดยการทดสอบมีทั้งหมด 2 ครั้งคือ ครั้งที่ 1 จะปล่อยหมวกกันน็อกจากความสูง 3.06 m จะต้องเกิดการดูดซับพลังงานมากกว่า 150 จูล ครั้งที่ 2 จะปล่อยหมวกกันน็อกจากความสูง 2.24 m จะเกิดการดูดซับพลังงานมากกว่า 110 จูล ส่วนในด้านของความเร่งเชิงเส้น (Linear acceleration) ต้องมีค่าไม่เกิน 300 g ในทุกกรณี หากผู้ผลิตสามารถผลิตหมวกกันน็อกได้อยู่ในเกณฑ์ข้างต้นนี้จะถือว่าทดสอบผ่านการทดสอบแบบพื้นราบเรียบ



ภาพที่ 2.7 การทดสอบมาตรฐาน The snell memorial foundation (SNELL)
ที่มา: Mocyc.com (2020: Website)

การทดสอบส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบหมวกกันน็อคที่ต่างกับแบบที่ 1 โดยผู้วิจัยเรียกการทดสอบแบบนี้ว่า การทดสอบพื้นที่นูนครึ่งวงกลม ดังภาพที่ 2.7 (ข) การทดสอบแบบนี้เป็นการปล่อยหมวกกันน็อคจากที่ความสูง 3.06 m และความสูง 2.24 m มากระทบกับพื้นรูปแบบนูนครึ่งวงกลม โดยครั้งที่ 1 จะปล่อยหมวกกันน็อคจากความสูง 3.06 m จะต้องเกิดการดูดซับพลังงานมากกว่า 150 จูล ครั้งที่ 2 จะปล่อยหมวกกันน็อคจากความสูง 2.24 m จะเกิดการดูดซับพลังงานมากกว่า 110 จูล ส่วนในด้านของความเร่งเชิงเส้น (Linear acceleration) ต้องมีค่าไม่เกิน 300 g เช่นเดียวกับการทดสอบแบบพื้นราบเรียบ

2.2.2 มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น

มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่นหรือเรียกว่า JIS เป็นมาตรฐานที่ประเทศญี่ปุ่นใช้ในการทดสอบหมวกกันน็อคโดยเป็นการทดสอบหมวกกันน็อคที่จะต้องผ่านมาตรฐานนี้ก่อนถึงจะวางจำหน่ายในประเทศญี่ปุ่นได้ มาตรฐานนี้จะมีการทดสอบที่ใกล้เคียงกับการทดสอบแบบมาตรฐาน SNELL โดยทำการทดสอบทั้งหมด 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 เป็นการปล่อยศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อคลงมากกระทบกับพื้นเหล็กเรียบที่มีความสูง 2.5 เมตร ส่วนการทดสอบครั้งที่ 2 จะเป็นการปล่อยศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อคมากกระทบกับแผ่นเหล็กเรียบที่มีความสูง 1.28 เมตร โดยถือว่าการทดสอบทั้ง 2 ครั้ง หากมีพลังงานการดูดซับพลังงานเกิน 150 จูล ถือว่าได้รับรองมาตรฐาน

2.2.3 มาตรฐานกรมการขนส่งประเทศสหรัฐอเมริกา

มาตรฐานกรมการขนส่งประเทศสหรัฐอเมริกาหรือ DOT เป็นมาตรฐานที่สหรัฐอเมริกาเป็นผู้กำหนดมาตรฐานในการใช้ทดสอบ โดยได้รับการยอมรับว่าเป็นมาตรฐานที่นิยมเช่นเดียวกับ SNELL แต่มีเกณฑ์ที่แตกต่างออกไป โดยนอกจากจะทดสอบมาตรฐานที่ตัวหมวกกันน็อคแล้ว มาตรฐาน DOT ยังตรวจสอบไปถึงคุณภาพโรงงานและความสามารถในการผลิตด้วยว่าเพียงพอต่อ

ความต้องการของตลาดหรือไม่ การทดสอบหมวกกันน็อคตามมาตรฐาน DOT เป็นการทดสอบการดูดซับพลังงานเมื่อหมวกกันน็อคกระทบกับแท่นทดสอบชนิดเรียบ (Flat Anvil) โดยวิธีการทดสอบจะนำหมวกกันน็อคสวมศีรษะจำลอง แล้วปล่อยลงมาในแนวตั้งที่ความสูงประมาณ 1.84 เมตร เพื่อให้กระแทกบนแท่นทดสอบแบบเรียบที่ความเร็ว 5.7 ถึง 6.0 เมตรต่อวินาที โดยจะมีเกณฑ์การตรวจสอบทดสอบคือการทดสอบการดูดกลืนแรงกระแทกจะต้องมีค่าความเร่งไม่เกิน 400 g ส่วนเวลาที่ใช้ในการเกิดความเร่งมีค่า 150 g ต้องไม่เกิน 4.0 ms และเวลาที่เกิดความเร่งในการกระแทกมีค่า 200 g ในช่วงเวลาต้องไม่เกิน 2.0 ms

2.2.4 มาตรฐานยุโรป

มาตรฐานยุโรปหรือ ECE มาตรฐานนี้เป็นที่นิยมมากในทวีปยุโรป มีวิธีการทดสอบที่ไม่แตกต่างจากของ SNELL และ DOT วิธีทดสอบแรงกระแทกจะดำเนินการในลักษณะที่คล้ายคลึงกับมาตรฐาน DOT ซึ่งจะทดสอบการตกของศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อคจากระดับความสูงลงมากระแทกกับพื้นราบเรียบ ค่าความเร่งสูงสุดที่ศีรษะที่อนุญาตให้ผ่านการทดสอบคือ 275 g ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้กับหมวกกันน็อคที่ใช้ในการแข่งขันรถจักรยานยนต์ในยุโรป จึงทำให้มาตรฐาน ECE 22.05 เป็นที่รู้จักและได้รับความไว้วางใจนั่นเอง และหมวกกันน็อคต้องผ่านเกณฑ์การทดสอบอื่น ๆ ดังนี้

2.2.4.1 การมองเห็นของผู้สวมใส่

2.2.4.2 การทดสอบการดูดกลืนแรงกระแทก

2.2.4.3 การทดสอบประสิทธิภาพ และความกระชับของสายรัดคาง

2.2.4.4 ความคงทนของส่วนหน้ากาก

2.2.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

มาตรฐานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหรือ มอก. เป็นมาตรฐานที่ประเทศไทยออกกฎเกณฑ์ขึ้นมาเพื่อให้เป็นมาตรฐานความสามารถในการดูดซับพลังงานของหมวกกันน็อคในประเทศไทยนั้นหากหมวกกันน็อคที่ไม่ผ่านการทดสอบมาตรฐานนี้ถือว่าผิดกฎหมายและไม่ผ่านมาตรฐานความปลอดภัย โดยทำการทดสอบการกระแทกของศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อคที่ความสูง 3 m โดยมีอุปกรณ์วัดความเร่งติดตั้งในศีรษะจำลอง รายงานค่าความเร่งของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้าต้องไม่เกิน 275 g และค่าการบาดเจ็บที่ศีรษะ (HIC) ต้องไม่เกิน 2,400 ส่วนหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบต้องไม่เกิน 400 g อีกทั้งมาตรฐาน มอก. ยังพิจารณาช่วงเวลาที่เกิดความเร่งมากกว่า 200 g ต้อง ไม่เกินเวลา 2.0 ms และช่วงเวลาที่เกิดความเร่งมากกว่า 150 g ในช่วงเวลาต้องไม่เกิน 4.0 ms

2.3 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติหรือในประเทศไทยเรียกว่า ยางพารา โดยในประเทศไทยนิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายที่บริเวณภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ ในด้านความนิยมในการปลูกต้นยางพาราในต่างประเทศนั้น ยางพาราถือเป็นพืชที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายในแถบประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และประเทศในแถบแอฟริกา โดยพันธุ์ของยางที่นิยมปลูกกันในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คือ พันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) ลักษณะของต้นยางนั้นเมื่อทำการกรีดที่ลำต้นจะมีน้ำสีขาวข้นเรียกว่า น้ำยางสด (Field latex) โดยในน้ำยางสดนี้จะมี

สารประกอบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35% และส่วนที่เป็นน้ำ 65% ในกรณีที่เป็นน้ำยางสดนั้นจะมีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml) มีความหนืดมีค่า 12-15 เซนติพอยส์ และมีค่า pH อยู่ที่ 6.5 – 7 (เสาวนีย์ ก่ออุทัยกุลรังษี, 2543)

2.3.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง

ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ (ดูย ลี และคณะ, 2558) นั้นมีส่วนประกอบของสารหลายชนิด เมื่อกรีดน้ำยางสดมาจากต้นยางนั้นจะพบว่าเป็นสารไม่บริสุทธิ์ โดยส่วนประกอบของน้ำยางจะมีเนื้อยางแห้งเป็นส่วนประกอบหลักอยู่ระหว่าง 25 - 45% ส่วนที่เหลือจะประกอบไปด้วยสารจำพวกโปรตีน เรซิน น้ำ ฯลฯ โดยสามารถดูส่วนประกอบของน้ำยางได้ดังตารางที่ 2.1

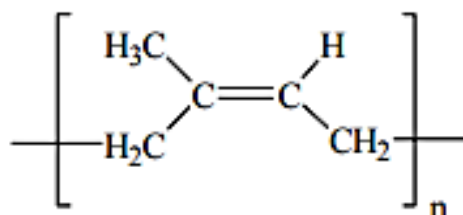
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	ปริมาณสาร (%)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	27-48
เนื้อยางแห้ง	25-45
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-1.25
ขี้เถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

ที่มา: ดูย ลี และคณะ (2558)

2.3.2 โครงสร้างโมเลกุลและสมบัติของยางธรรมชาติ

โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลกว้างทำให้ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติของการแปรรูปเป็นวัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลาย โดยจากภาพที่ 2.8 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ ซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุล ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (cis-1, 4-Polyisoprene) มากกว่า 99.99% มีหน่วยไอโซพรีน (Isoprene unit) ประมาณ 3,000-5,000 หน่วยต่อโมเลกุล (ดูย ลี และคณะ, 2558)



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ที่มา: ดูย ลี และคณะ (2558)

สมบัติของยางธรรมชาติ

2.3.2.1 ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการต้านทานแรงดึง มีความยืดหยุ่นสูงโดยไม่ต้องเติมแต่งสารเคมีเพื่อเสริมแรงใด ๆ ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมนิยมนำยางธรรมชาติที่ได้เติมแต่งสารเคมีมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ออกจำหน่าย เช่น ถุงมือที่ใช้ในทางการแพทย์ ถุงนิ้ว ยางรัดของ เป็นต้น

2.3.2.2 ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี ดังที่กล่าวมาแล้วว่ายางธรรมชาติมีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง เมื่อนำมาใช้งานที่ต้องทนทานต่ออุณหภูมินั้นก็ยังสามารถนำยางธรรมชาติไปผลิตเป็นวัสดุเพื่อใช้งานได้ เช่น ยางรถยนต์และยางล้อรถบรรทุก เมื่อใช้งานกับรถยนต์ก็จะพบว่าสามารถทนทานต่ออุณหภูมิของพื้นถนนที่ร้อนได้ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่ดีในด้านความเหนียวและทนทานต่อการใช้งานอีกด้วย

2.3.2.3 ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง เมื่อนำมาผลิตชิ้นงานใดที่ต้องมีการขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูปหรือการฉีดขึ้นรูปนั้น จะพบว่าการจะแกะชิ้นงานออกจากเบ้าขึ้นรูปนั้นจะเป็นไปได้ยากเนื่องจากชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดได้ง่าย แต่ยางธรรมชาตินั้นทนทานต่อการฉีกขาดได้ไม่ว่าจะที่อุณหภูมิการขึ้นรูปสูงหรือต่ำก็ตาม

2.3.2.4 ยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจะพบว่ายางธรรมชาตีก็น่ากลับคืนสู่รูปร่างเดิมหรืออาจมีรูปร่างที่เปลี่ยนไปจากเดิมเล็กน้อย

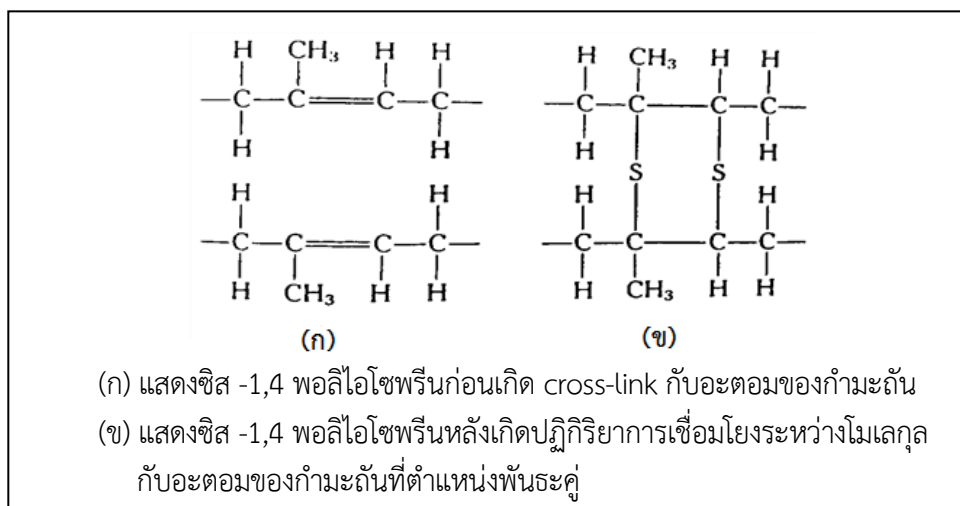
2.3.2.5 ยางธรรมชาติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรหรือเรียกว่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 1,015 โอห์ม-เซนติเมตร อีกทั้งค่าความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติยังมีค่าเท่ากับ 0.934 (ดุย ลี และคณะ, 2558) จึงสามารถลอยน้ำได้เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นห่วงยางหรือเสื้อชูชีพได้

2.3.2.6 ยางธรรมชาติมีความสามารถในการแปรรูปได้อย่างหลากหลายวิธี แม้ว่าจากคุณสมบัติของน้ำหนักรวมแล้วจะทำให้แปรรูปได้ยาก แต่เมื่อนำยางมาบดให้ละเอียดแล้วจะทำให้หน้าหนักรวมของยางธรรมชาติมีค่าลดลงและทำให้ยางมีความนิ่มมากขึ้น เมื่อนำไปอัดขึ้นรูปในเบ้าอัดจะทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย แต่ข้อควรระวังของการขึ้นรูปยางธรรมชาติคือ ต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปขังในยางที่บดละเอียดซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปได้ไม่เต็มแบบที่ต้องการ

2.3.2.7 เมื่อนำยางธรรมชาติมาผสมกับตัวทำละลายบางชนิดจะเกิดการพองตัวได้ โดยขึ้นกับความสามารถในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของตัวทำละลายนั้นจะทำให้ยางมีค่าการพองตัวมากน้อยเพียงใด ซึ่งการละลายยางธรรมชาติในตัวทำละลายก็มีข้อดีคือ จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติให้ยางมีความทนทานมากขึ้น อีกทั้งในบางครั้งยางธรรมชาตียังสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดได้

จากคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่มีข้อดีต่าง ๆ เช่น ในด้านความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อการฉีกขาด และในด้านการเป็นฉนวนที่ดี ปัจจุบันพบว่ามีการนำยางธรรมชาติไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียเนื่องจากยางธรรมชาติมีโมเลกุลที่เป็นพันธะคู่อยู่มากทำให้เมื่อโดนแสงแดด ออกซิเจนและค่าความร้อนสูงมาก ๆ จะทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าปกติ โดยวิธีการแก้ไขคือ การเติมสารเคมีในกลุ่มของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ลงไปในยางเพื่อยืดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์จากยางให้นานขึ้น นอกจากนี้ยางยังมีสภาพไม่ทนทานต่อต่อสารละลายไม่มีขั้ว เช่น การกัดกร่อนของสารจำพวกน้ำมัน เป็นต้น

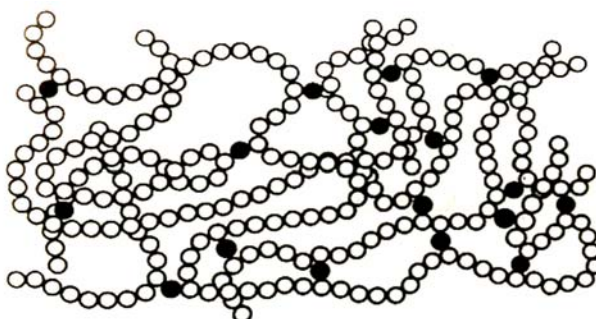
2.3.3 การทำยางให้แข็ง



ภาพที่ 2.9 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาล์คาร์ไนเซชันของยางกับกำมะถันโดยเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ของซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2557)

ใน ค.ศ. 1839 ชาลส์ กูดเยียร์ (Charles Goodyear) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้ค้นพบกระบวนการทำให้ยางแข็งตัวขึ้นโดยการผสมยางธรรมชาติเข้ากับกำมะถันและตะกั่วคาร์บอนเนต ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการทางเคมีเรียกว่า การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross-link) โดยเมื่อนำยางธรรมชาติมาผสมกับกำมะถันและตะกั่วคาร์บอนเนตจากนั้นให้ความร้อน ยางจะเปลี่ยนสถานะจากเทอร์โมพลาสติกเป็นอีลาสโตเมอร์ แม้ว่าศึกษาการนำยางมาผสมกับกำมะถันยังเป็นเรื่องซับซ้อนและอธิบายได้ยาก แต่จากภาพที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดขึ้นกับการผสมระหว่างยางกับกำมะถันคือพันธะคู่ในพอลิไอโซพรีนโมเลกุลจะเปิดตัวออกแล้วเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross-link) กับอะตอมของกำมะถัน (แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา, 2557)



ภาพที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross-link) ของซิส -1, 4 พอลิไอโซพรีน ด้วยอะตอมของกำมะถัน (เม็ดสีดำ)

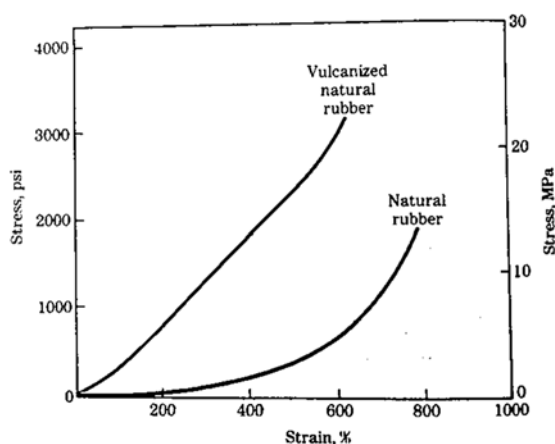
ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2557)

จากภาพที่ 2.10 แสดงการจับตัวกันระหว่างกำมะถัน (เม็ดสีดำ) กับยาง โดยยางที่เติมกำมะถันในปริมาณที่เหมาะสม จะเกิดพันธะโคเวเลนต์ของกำมะถันเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิไอโซพรีนในบางตำแหน่ง จึงทำให้ยางมีสมบัติที่ยืดหยุ่นขึ้นและจับตัวกันของเนื้อยางแน่นขึ้น ภาพที่ 2.11 แสดงถึงความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ที่เพิ่มขึ้นของยางที่ทำให้แข็งกับยางธรรมชาติ ข้อเสียของกระบวนการทำยางให้แข็งขึ้นคือการทำปฏิกิริยาที่ช้าระหว่างยางกับกำมะถันที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น เดิมฟิเลอร์ พลาสติไซเซอร์และแอนติออกซิแดนท์ ลงไประหว่างที่ทำปฏิกิริยาด้วย

การทำยางให้แข็งมากที่สุดนั้นจะสามารถเติมกำมะถันได้สูงสุดที่ 45% โดยน้ำหนัก ยางจะมีลักษณะแข็งและไม่โค้งงอ แต่โดยทั่วไปมักจะผสมกำมะถันลงไปเพียง 3% โดยน้ำหนักเท่านั้น จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 – 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเพียงพอทำให้เกิดการวัลคาไรซ์ (vulcanized) แบบอ่อนได้

ในระหว่างการทำปฏิกิริยาวัลคาไรซ์ในเซชัน (vulcanization) ต้องระวังไม่ให้ออกซิเจนหรืออากาศเข้าไปในกระบวนการมาก เนื่องจากออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนที่มีพันธะคู่ของโมเลกุลยางได้ซึ่งจะเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์จากยางที่ได้มีความเสียหายได้ หรืออีกวิธีทางแก้ไขคือการเติมแอนติออกซิแดนท์ลงไปในกระบวนการ

การเพิ่มความต้านทานแรงดึงของยางให้มากขึ้นทำได้โดยการเติมสารฟิลเลอร์เข้าไปในยาง โดยสารฟิลเลอร์จะมีคุณสมบัติทำให้ยางมีความแข็งแรงขึ้น โดยฟิลเลอร์ที่นิยมนำมาผสมกับยางคือ ผงถ่าน (Carbon black) ซึ่งยิ่งผงถ่านละเอียดมากจะยิ่งทำให้ยางมีค่าความต้านทานแรงดึงมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain) ของยางที่ทำให้แข็งและยางธรรมชาติ

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2557)

การเติมสารเคมีพวกซิลิกา เช่น แคลเซียมซิลิเกต ให้กับยางจะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดและการเสียดสี ในขณะที่การเติมดินเหนียวในยางจะช่วยทำให้ยางมีความแข็งแรงขึ้นได้

ในการผสมสารเคมีต่าง ๆ กับยางนั้น ทำให้เกิดอีลาสโตเมอร์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันหลายชนิด ในตารางที่ 2.2 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติที่ทำให้แข็งแล้วกับอีลาสโตเมอร์

สังเคราะห์อื่น ๆ ซึ่งจะพบว่าข้อดีของยางแต่ละชนิดคือสมบัติความยืดหยุ่นที่ค่อนข้างดี แต่เป็นที่น่าสังเกตว่ายางแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ค่อนข้างต่ำ ส่วนค่าความหนาแน่นและอุณหภูมิในการใช้งานจะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

ตารางที่ 2.2 สมบัติบางอย่างของอีลาสโตเมอร์บางชนิด

อีลาสโตเมอร์ (Elastomer)	ความต้านทาน แรงดึง (ksi)	ความยืดหยุ่น (%)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิการใช้งาน	
				ฟาเรนไฮต์ (F)	องศา เซลเซียส(°C)
ยางธรรมชาติ	2.5-3.5	750-850	0.93	-60 ถึง 180	-50 ถึง 82
ยางยางสไตรีน บิวตาไดอิน	0.2-3.5	400-600	0.94	-60 ถึง 180	-50 ถึง 82
ยางไนไตร์	0.5-0.9	450-700	1.00	-60 ถึง 250	-50 ถึง 120
ยางนีโอเพรน	3.0-4.0	800-900	1.25	-40 ถึง 240	-40 ถึง 115
ซิลิโคน	0.6-1.3	100-500	1.10-1.60	-178 ถึง 600	-115 ถึง 315

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2557)

2.3.4 น้ำยางข้น

น้ำยางข้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากต้นยางพาราโดยการกรีดที่บริเวณลำต้น ลักษณะของน้ำยางจะสีขาวข้น ดังภาพที่ 2.12 โดยน้ำยางที่ได้จะนิยมเรียกว่า น้ำยางสด ซึ่งน้ำยางสดจะมีเนื้อยางอยู่ประมาณ 25 -30% ของปริมาณน้ำยางที่ได้ เมื่อนำน้ำยางสดมาผ่านกระบวนการทางเคมีแล้วจะมีเนื้อยางเพิ่มขึ้นได้ถึง 55-60% โดยการแปรรูปน้ำยางสดก็มีกรรมวิธีหลายวิธีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.12 น้ำยางข้น

ที่มา: ILOVERUBBER99 (2020: website)

2.3.4.1 วิธีการให้ความร้อนเพื่อให้ น้ำระเหยออกหรือวิธีการระเหยน้ำ เป็นวิธีการที่นำน้ำ ยางสดไปให้ความร้อนรอบข้างถึงที่สามารถหมุนในแนวแกนนอนได้ เมื่อน้ำยางสดได้รับความร้อนจะ ทำให้น้ำที่ปนอยู่ในน้ำยางสดระเหยออกไป การให้ความร้อนเพื่อให้ส่วนที่เป็นน้ำระเหยออกไปเรียกว่า วิธีการระเหย (Evaporation method) ส่วนน้ำยางที่ได้เรียกว่ายางข้น (Evaporation latex)

2.3.4.2 วิธีการทำให้น้ำยางเกิดการแยกชั้นด้วยการเกิดครีม (Creaming process) โดย การใช้สารก่อครีม (Creaming agent) วิธีการนี้เป็นวิธีการไม่นิยมมากนักเนื่องจากมีความซับซ้อนและ ใช้เวลานาน โดยขั้นแรกเป็นการนำน้ำยางสดมาเก็บรักษาไว้ด้วยการใส่แอมโมเนีย จากนั้นก็เริ่มกรอง สิ่งเจือปนออกด้วยตะแกรงและใส่สารไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Diammonium phosphate, DAP) เพื่อลดปริมาณแมกนีเซียมในน้ำยาง ขั้นตอนต่อมาคือการนำน้ำยางไปกวนเข้ากับสารก่อครีม (Creaming agent) ในถังกวนและปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน น้ำยางที่ได้จะมีการแยกชั้นระหว่างน้ำ ยางข้น (Latex) กับน้ำ (หางน้ำยาง) วิธีการทำยางครีมมีข้อดีคือทำให้ปริมาณน้ำยางที่สูง ยิ่งปล่อยให้น้ำ ยางแยกชั้นนานเท่าใด ก็จะได้ปริมาณน้ำยางมากขึ้นตามไปด้วย โดยหากทิ้งน้ำยางให้แยกชั้นเป็น เวลา 4-5 วัน จะได้เนื้อยางสูงถึง 60%

2.3.4.3 วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าบวกจุ่มลงในน้ำยางที่เติม สารเคมีเพื่อให้เกิดความเสถียรในน้ำยาง อนุภาคที่เป็นเนื้อยางจะค่อย ๆ เคลื่อนที่ไปหาประจุบวก ส่วนน้ำและอนุภาคยางที่แขวนลอยที่มีอนุภาคเป็นลบจะเกิดการแยกชั้นออกจากกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่มี ความรวดเร็วในการแยกน้ำยาง แต่ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากต้นทุนในการผลิตสูง

2.3.4.4 วิธีการปั่น เป็นวิธีการที่ใช้อาศัยหลักการของแรงดึงดูดของโลก ซึ่งใช้หลักการ เพิ่มแรงดึงดูดโดยใช้การเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคยาง โดยการปั่นน้ำยางธรรมชาติที่ จัดอยู่ในสารพวกคอลลอยด์ (Colloid system) ที่มีอนุภาคของยางแขวนลอยกระจายตัวอยู่ใน ตัวกลางคือ เซรัม เมื่อมีการปั่นแยกน้ำยางธรรมชาติที่เป็นสารคอลลอยด์จะมีการเคลื่อนไหวแบบ บราวเนียน (Brownian movement) ทำให้อนุภาคของยางลอยขึ้นมาสู่ผิวหน้าของน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคยางมีมากกว่าเซรัม วิธีการปั่นน้ำยางมีข้อดีคือใช้เวลาในกระบวนการผลิตน้อยและได้ น้ำยางข้นประสิทธิภาพสูง ข้อเสียคือเครื่องมือมีราคาสูงและต้องทำการล้างทุกครั้งเมื่อใช้เสร็จ

2.3.4.5 การทำยางฟองน้ำ คือการใส่สารเคมีและให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติแล้วทำให้ ยางคงรูปหรือเรียกว่าวิธีวัลคาร์ไนซ์ด้วยสารเคมี โดยภายในเนื้อยางจะเกิดฟองอากาศหรือแก๊สขึ้นจึง ทำใหยางมีลักษณะฟองตัว ลักษณะจะคล้ายเบาะที่มีความนุ่มมาก ดังภาพที่ 2.14 โดยเทคนิคการผลิต ยางฟองน้ำแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีคือ

- 1) เทคนิคแบบดันลอป (Dunlop process)
- 2) เทคนิคแบบทาราเลย์ (Talalay process)
- 3) เทคนิคแบบรีเวิร์สเทค (Revertex process)

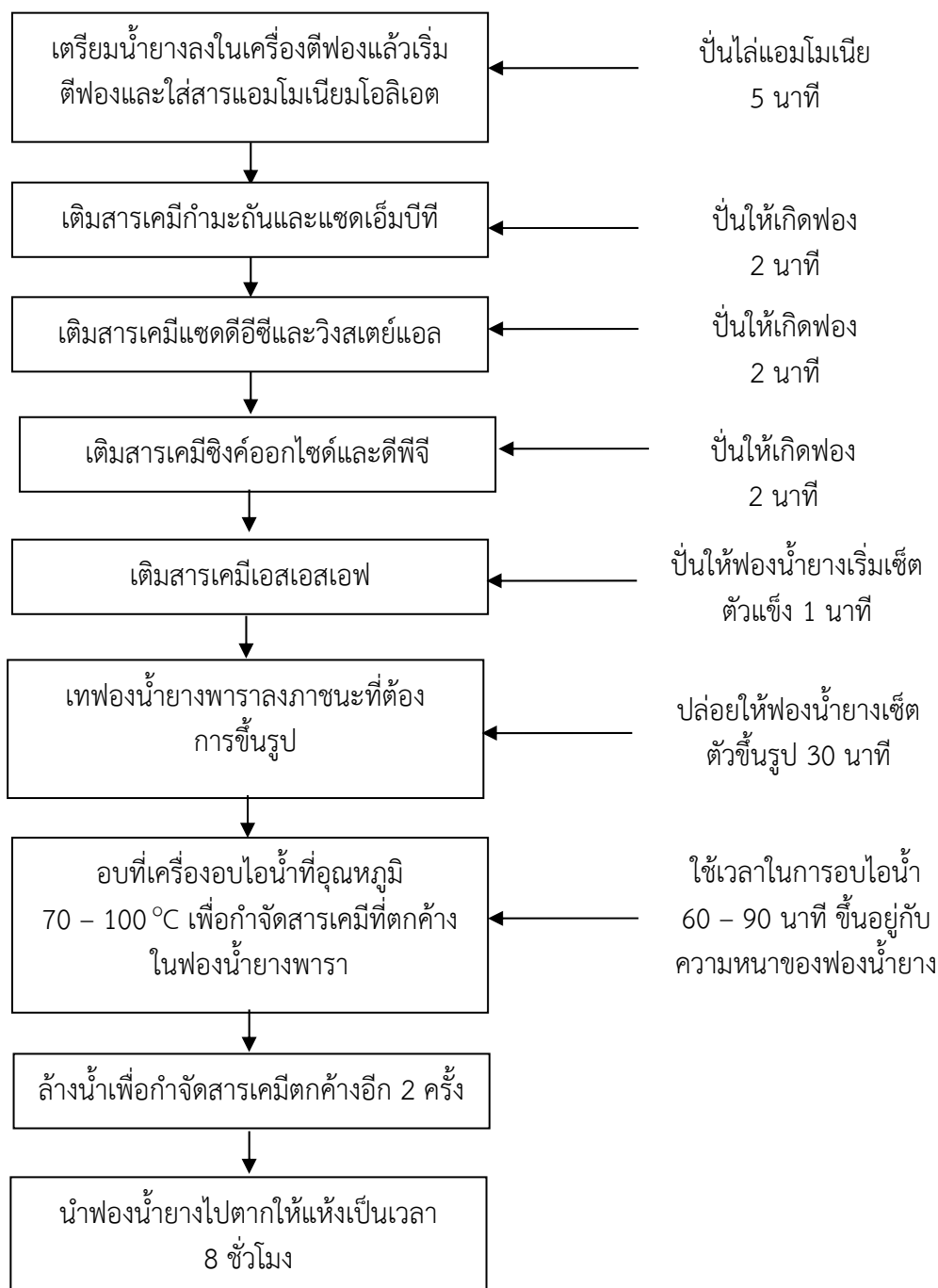
2.4 การผลิตฟองน้ำยางพารา

การผลิตฟองน้ำยางพาราในปัจจุบันนิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากฟองน้ำยางพารามีคุณสมบัติที่มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีและมีความยืดหยุ่นสูง ในประเทศไทยพบว่าการผลิตฟองน้ำยางพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น ที่นอน เบาะนั่ง หมอนหนุน วัสดุรับแรงกระแทก ฯลฯ ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการขึ้นรูปฟองน้ำยางพารามีวิธีการ 3 แบบคือ เทคนิคแบบดันลอป (Dunlop process) เทคนิคแบบทาราเลย์ (Talalay process) และเทคนิคแบบรีเวิร์สเทค (Revertex process) โดยวิธีที่นิยมกันมากเนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตสามารถหาได้ง่าย คือเทคนิควิธีดันลอป (Dunlop process) วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและใช้เครื่องมือในการผลิตไม่มาก จากภาพที่ 3.13 เป็นสูตรการปั่นหรือตีน้ำยางพาราคล้าย ๆ กับการตีแป้งขนมปัง เมื่อตีน้ำยางพาราแล้วจากนั้นจะทำการใส่สารเคมีลงไปเพื่อผสมให้เกิดการฟองตัวของน้ำยาง น้ำยางจะเกิดอากาศเข้าไปภายในยางและเกิดการฟองตัวและแข็งตัวอย่างช้า ๆ เป็นฟองน้ำยาง ในที่สุด โดยสารเคมีที่ใช้ในการผลิตฟองน้ำยางพาราด้วยวิธีดันลอป จะใช้สารเคมีดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ

สารเคมี-ดีเอสพี	หน้าที่
10% แอมโมเนียมโอเลเอต (Ammonium oleate)	สารช่วยให้เกิดฟอง
50% กำมะถัน (sulfur)	สารทำให้ยางคงรูป (แข็ง)
50% แซดดีอีซี (ZDEC)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
50% แซดเอ็มบีที (ZMBT)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
50% วิงสเตย์แอล (Wingstay L)	สารกันยางเสื่อม
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	สารกระตุ้นตัวเร่ง
33% ดีพีจี (DPG)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	สารช่วยให้ฟองจับตัว

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกุล (2559)



ภาพที่ 2.13 ขั้นตอนการทำฟองน้ำยางพารา
ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2559)

จากที่กล่าวมาแล้วว่าการขึ้นรูปฟองน้ำยางพาราด้วยวิธีดังกล่าวนั้น ข้อสำคัญสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความสม่ำเสมอในการตีฟองน้ำ ซึ่งพบว่าเป็นปัญหามากในการตีฟองน้ำยางเนื่องจากฟองพาราที่นำมาใช้ผลิตฟองน้ำนั้นมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน ทำให้ความเร็วในการตีฟองน้ำยางต้องใช้ความเร็วต่างกันเพื่อให้ได้ฟองน้ำยางพาราที่มีคุณสมบัติเหมือนกันในการนำไปใช้งาน วิธีการ

แก้ปัญหาคือ ต้องควบคุมความเร็วของการตีฟองน้ำให้เหมาะสม ความชำนาญของผู้ตีฟองน้ำมีส่วนอย่างมากในการทำให้ฟองน้ำอย่างพารามีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ผู้ต้องการ และอีกวิธีคือการปรับสารเคมีโพแทสเซียมโอเลตให้เหมาะสม เนื่องจากเคมีนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายน้ำสบู่ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับน้ำยางจะส่งผลถึงความเป็นรูปทรงของยางฟองน้ำ อีกปัญหาคือการหดตัวของฟองน้ำขณะที่รอให้ฟองน้ำเซตตัวในแม่แบบ วิธีการแก้คือการเติมสาร SSF และ DPG เข้าไปในกระบวนการผลิต และปัญหาที่พบบ่อยอีกหนึ่งปัญหาคือยางไม่เกิดการเซตตัวเป็นฟองน้ำเนื่องจากว่าความเข้มข้นของน้ำยางมีน้อยเกินไป วิธีการแก้ไขคือ การเพิ่ม SSF และ DPG เพื่อให้ยางมีการเซตตัวได้เร็วขึ้น แต่วิธีนี้อาจใช้ได้กรณีที่น้ำยางมีความเข้มข้นน้อยแต่ภายในน้ำยางก็ยังพอมีเนื้อยางอยู่บ้าง แต่หากน้ำยางไม่มีเนื้อยางหรือมีเนื้อยางน้อยมาก ๆ การเพิ่ม SSF และ DPG ก็ไม่สามารถทำใหยางเกิดฟองน้ำได้ ดังที่กล่าวมาเป็นตัวอย่างเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับการตีฟองน้ำอย่างพาราแต่ยังพบอีกหลายปัญหาซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ดังนั้นการจะตีฟองน้ำอย่างพาราให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการควรจะมีความชำนาญในการตีฟองน้ำและการทดสอบตีฟองหลาย ๆ ครั้งก็จะช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 2.14 ฟองน้ำอย่างพารา

จากปัญหาในการผสมสารเคมีให้กับน้ำยางเพื่อตีฟองน้ำอย่างพาราได้มีการคิดค้นส่วนผสมของสารเคมีสูตรพื้นฐานในการผสมฟองน้ำยางขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป โดยจะนิยมใช้ส่วนผสมตามหน่วยการผสมยางโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่าง ๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก (phr %) เดิมกำหนด 2.5 phr หมายความว่า ถ้ามียาง 100 ส่วน จะเติมกำหนด 2.5 ส่วน ทั้งนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารของเคมีเพื่อให้ได้ฟองน้ำที่มีคุณสมบัติตามความต้องการของผู้ผลิตและตามลักษณะงานที่ต้องการนำฟองน้ำไปใช้งาน โดยสามารถดูสูตรพื้นฐานของการผสมสารเคมีได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สูตรในการทำยางฟองน้ำ

สารเคมี	ปริมาณ (phr %)	
	น้ำยางชั้น	น้ำยางครีม
น้ำยาง	100	100
10% K-oleate	2	1
50% Sulfur	2	2
50% ZMBT	1	1
50% ZDEC	1	1
50% Wingstay-L	1	1
50% ZnO	5	5
33% DPG	2	3
12.5% SSF	1	1

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2559)

2.5 สารเคมีในการผลิตฟองน้ำยางพารา

2.5.1 ยางฟองน้ำ

ยางฟองน้ำ หรือโฟมลาเท็กซ์ คือวัสดุที่ทำจากน้ำยางธรรมชาติ ลักษณะส่วนพื้นผิวของฟองน้ำยาง (skin) นั้นจะมีลักษณะเรียบตามเบ้าพิมพ์หรือแม่แบบ ภายในมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนที่มีฟองอากาศอยู่ภายใน โดยรูพรุนนี้อาจจะเล็กหรือใหญ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตีฟองน้ำ

2.5.2 สารเคมีสำหรับผลิตยางฟองน้ำ

สารเคมีหลักที่ทำให้เกิดยางฟองน้ำคือสารที่ใช้ทำให้เกิดฟอง โดยจะผสมสารที่ทำให้เกิดฟองในน้ำยางธรรมชาติใช้ประมาณ 0.2-2 phr% ขึ้นอยู่กับความต้องการให้เกิดขนาดของฟองพรุนในฟองน้ำยาง ในกระบวนการดันลอปปกติจะใช้สารสบูร์คาร์บอกซิเลต ซึ่งชนิดที่ใช้มากที่สุดคือโอเลเอตและน้ำสบู่ โดยใช้เพียงชนิดเดียวหรือใช้ร่วมกัน อีกหนึ่งวิธีคือการเตรียมทำสารเกิดฟองโดยการเตรียมจากโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดโอลิกจะพบว่าใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 23.3% ผสมกับกรด 100% โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นปริมาณระหว่างน้ำและน้ำกลั่น โดยสามารถดูได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สารที่ทำให้เกิดฟอง

ส่วนประกอบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (%)
กรดโอลิก	100
น้ำกลั่น	402
โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	23.3
น้ำ	43

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2559)

2.5.3 สารช่วยฟองเสถียร

สารช่วยฟองเสถียร คือสารที่ต้องเติมลงไปพร้อม ๆ กับสารที่ช่วยให้ยางเกิดฟองโดยสารช่วยให้ฟองน้ำเสถียรจะช่วยเป็นตัวกระตุ้นให้ฟองน้ำยางพาราเกิดการเซตและแข็งตัว ในกระบวนการต้นลอปจะใช้สารหลัก ๆ อยู่ 4 ประเภท คือ

2.5.3.1 สาร Quaternary ammonium และ Betaines

2.5.3.2 สาร Amino และ Amine oxides

2.5.3.3 สาร Organic hydroxy

2.5.3.4 สาร Water-soluble hydrocolloids

2.5.4 สารทำให้ยางคงรูป

สารทำให้ยางคงรูปเป็นสารที่มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงและช่วยในการเซตตัวของฟองน้ำให้มากขึ้น สารที่ใช้ในการคงรูปน้ำยางธรรมชาติส่วนใหญ่จะใช้กัมมะถันเติมลงในน้ำยางประมาณ 2 phr% โดยผสมกับสารเบนโทไนต์ (Bentonite) และสารช่วยการกระจายตัว (Dispersing agent) ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สารทำให้ยางคงรูป

ส่วนประกอบ	ส่วนโดยน้ำหนัก (%)
กัมมะถัน	50
สารช่วยการกระจายตัว	1
สารเบนโทไนต์ (Bentonite)	1
น้ำ	48

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2559)

2.5.5 สารตัวเร่ง

สารตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาวัลคาไรซ์บางครั้งจะเกิดปฏิกิริยาข้ามมากจึงจำเป็นต้องใช้สารตัวเร่งเติมเข้าไปช่วยเร่งปฏิกิริยา ลดเวลาในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิทำปฏิกิริยาต่ำลง โดยสารตัวเร่งที่ใช้ในการผลิตยางพองน้ำคือ ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต และซิงค์เมอร์แคปโทเบนซัลไทอะโซล เตรียมในรูป 50% ดิสเพสชั่น ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สารตัวเร่ง

ส่วนประกอบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (%)
สารตัวเร่ง	50
สารช่วยการกระจายตัว	1
สารเบนโทไนต์	1
น้ำ	48

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2559)

2.5.6 สารตัวเติม

สารตัวเติมมีคุณลักษณะเพื่อให้ฟองน้ำมีความแข็งตัว แต่การแข็งตัวของฟองน้ำแบบนี้จะไม่ช่วยเพิ่มสมบัติความคงทนต่อแรงดึงหรือทนต่อแรงฉีกขาด การผสมสารตัวเติมทำได้โดยผสมสารเคมี ดังตารางที่ 2.8 ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 2.8 สารตัวเติม

ส่วนประกอบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (%)
สารตัวเติม	100
สารช่วยการกระจายตัว	2
น้ำ	35-45

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2559)

2.5.7 สารตัวกระตุ้นและสารก่อเจล

สารตัวกระตุ้นและสารก่อเจลที่ใช้ในการผลิตฟองน้ำจะนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นทั้งสารตัวกระตุ้นการคงรูปและเป็นสารก่อเจลของฟองยาง เตรียมในรูป 50% ดิสเพสชั่น ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สารตัวกระตุ้นและสารก่อเจล

ส่วนประกอบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (%)
Zinc oxide(low lead grade)	50
Dispersing agent	1
Soft water	49

ที่มา: วราภรณ์ ขจรไชยกูล (2559)

2.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทก

ในหัวข้อนี้จะเน้นกล่าวถึงตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของแรงกระแทกและความเสียหายที่เกิดจากการรับแรงกระแทก การดูดซับพลังงาน ค่าความเร่ง (Acceleration) และค่าการบาดเจ็บ (Head injury criterion: HIC) ที่เกิดกับศีรษะของมนุษย์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาการรับแรงกระแทกที่เกิดกับหมวกกันน็อกเครื่องบิน โดยมิตัวแปรในการศึกษาดังต่อไปนี้

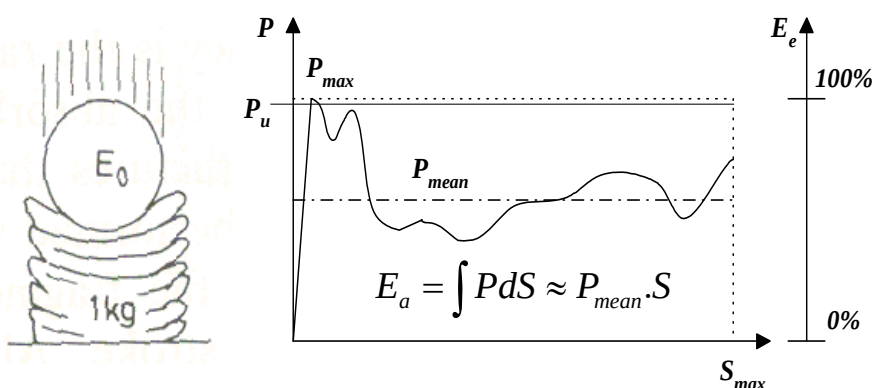
2.6.1 ภาระวิกฤติหรือภาระเสียหาย

ภาระวิกฤติ (Critical load or Collapse load), P_{cr} หมายถึง ภาระครั้งแรกที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายอย่างสังเกตเห็นได้ ณ จุดนี้เป็นตำแหน่งที่เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระและระยะยุบตัว (ภาพที่ 2.15) เริ่มตกลงหลังจากที่กราฟขึ้นสูงสุดในช่วงแรก ซึ่งภาระวิกฤตินี้

มีความสำคัญมากกับการออกแบบเพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายก่อนช่วงเวลาที่เหมาะสม แต่ในบางครั้งภาวะวิกฤติอาจจะมีค่าเท่ากับภาระสูงสุด (P_{max}) ก็ได้ ในกรณีของภาพที่ 2.15 นี้จะเห็นว่าภาระสูงสุดมีค่าเท่ากับภาวะวิกฤติหรืออาจกล่าวได้ว่าค่าภาวะวิกฤติก็คือ ค่าภาระที่สูงที่สุดครั้งแรก ก่อนที่เส้นกราฟจะตกลงและหลังจากช่วงนี้อาจมีค่าภาระสูงสุดที่สูงกว่าจุดนี้ก็ได้

2.6.2 ภาระสูงสุด

ภาระสูงสุด (Maximum load), P_{max} หมายถึง ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นในกราฟของค่าภาระและระยะยุบตัวตลอดช่วงเวลาการเสียหายของชิ้นงาน ซึ่งค่าของภาระสูงสุดควรจะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและไม่ต้องสูงมากจนเกินไปเพราะจะทำให้อัตราแรงไม่คงที่ เช่น การลดความเร็วอย่างทันทีทันใด อาจทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ด้วย



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระและระยะยุบตัว (Load - Displacement Curve)
ที่มา: Thinvongpituk (2002)

2.6.3 ภาระเฉลี่ย

ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load), P_{mean} หมายถึง ค่าของภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การชนกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว โดยมักเปรียบเทียบกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน ซึ่งค่าภาระเฉลี่ยนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ โดยทั่วไปแล้วค่าภาระเฉลี่ยควรมีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าพลังงานดูดซับที่สูงตามไปด้วย

2.6.4 พลังงานดูดซับ

พลังงานดูดซับ (Energy absorption) E_a หมายถึง ค่าพลังงานที่ชิ้นงานสามารถดูดซับได้ตลอดการชนกระแทกหรือการยุบตัว ซึ่งหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟระหว่างภาระที่ใช้กับระยะยุบตัวที่ได้จากการชนกระแทกของชิ้นงานหรือโครงสร้าง จากภาพที่ 2.15 เป็นกราฟแสดงค่าภาระที่ใช้และระยะยุบตัวจากตัวอย่างการทดสอบการชนของเหล็กชนิดหนึ่ง จากกราฟแสดงค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ คือ ค่าการดูดซับพลังงานจากการชนของชิ้นงาน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$E_a = \int P dS \quad (2.1)$$

โดยที่	E_a	คือ พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ได้
	P	คือ ภาระที่กระทำกับชิ้นงาน
	dS	คือ การเปลี่ยนแปลงระยะยวบตัวของชิ้นงาน

จากภาพที่ 2.15 เนื่องจากเส้นกราฟของภาระและระยะการยวบตัวไม่คงที่สม่ำเสมอตลอดระยะเวลาที่เกิดการชนกระแทก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงแนะนำให้ใช้การประมาณจากค่าภาระเฉลี่ยตามหลักของ mean - value theorem ในการหาค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุ จากการชนกระแทกซึ่งหาค่าได้โดยใช้สมการที่ (2.2)

$$E_a = P_{mean} \cdot S \quad (2.2)$$

โดยที่	E_a	คือ พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ได้
	P_{mean}	คือ ภาระที่กระทำกับชิ้นงาน
	S	คือ ระยะที่วัสดุชิ้นงานยวบตัวได้จากเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย

2.6.5 พลังงานดูดซับจำเพาะ

พลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption) E_s หมายถึง ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างหนึ่ง ๆ เทียบกับน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ในการหาค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะที่เกิดจากการชนกระแทกนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการชน ปกติทั่วไปชิ้นงานจะสามารถดูดซับพลังงานได้ตามความสามารถของตัวมันเอง เมื่อชิ้นงานเริ่มดูดซับพลังงานจากการชนกระแทก ตัวมันเองจะเริ่มยวบตัวหรือพับตัวจนกระทั่งไม่สามารถยวบตัวต่อได้อีก ลักษณะเช่นนี้หมายถึง วัสดุชิ้นงานนั้นได้ดูดซับพลังงานได้เต็มที่แล้ว ดังนั้นแรงที่เหลืออยู่ก็จะถูกส่งไปยังชิ้นส่วนที่เราต้องการปกป้องให้ความปลอดภัย เช่น ร่างกายของมนุษย์ในห้องผู้โดยสาร ปกติแล้วเรามักพิจารณาการดูดซับพลังงานโดยเทียบกับมวลของตัวโครงสร้างเอง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานมีมวลมากเกินไปกล่าวคือ แม้ว่าชิ้นงานจะสามารถดูดซับพลังงานได้มาก แต่ถ้าชิ้นงานมีมวลที่มากเกินไปก็อาจไม่เหมาะสมกับโครงสร้างบางชนิด ตัวอย่างเช่น โครงสร้างของรถยนต์หรือยานพาหนะอื่น ๆ ซึ่งค่าพลังงานดูดซับจำเพาะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$E_s = \frac{\int P dS}{mass} \approx \frac{P_{mean} \cdot S}{mass} \quad (2.3)$$

โดยที่	E_s	คือ	การดูดซับพลังงานจำเพาะ
	$mass$	คือ	มวลของชิ้นงาน
	P_{mean}	คือ	ภาระเฉลี่ย
	S	คือ	ระยะที่วัสดุชิ้นงานยุบตัวได้จากเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย

2.6.6 ค่าความเร่ง

ความเร่ง (Acceleration) คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อเวลาที่ทิศทางเพิ่มขึ้นที่มีทิศทางเพิ่มขึ้น มีหน่วยเป็น ฟุต/วินาที² หรือเมตร/วินาที² อัตราเร่งที่นิยมใช้กันคือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) ซึ่งใช้อักษรย่อ g มีค่าคงที่เท่ากับ 32.2 ฟุต/วินาที² หรือ 9.8 เมตร/วินาที² ดังนั้นจึงกำหนดขนาดของแรง ที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ อัตราเร่ง 3.2 ฟุต/วินาที² ให้มีค่าเท่ากับ 1 g ชนิดของอัตราเร่ง มี 3 แบบ คือ

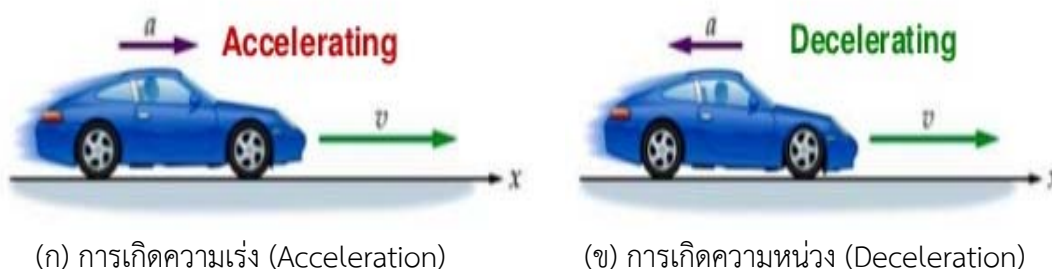
2.6.6.1 ความเร่งที่เป็นเส้นตรง (Linear Acceleration) คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ไม่มีการเปลี่ยนทิศทาง เช่น การวิ่งขึ้นจากสนามบินของเครื่องบิน การลงสนามบินของเครื่องบิน หรือการดีดตัวออกจากเครื่องบินของเก้าอี้ดีด เป็นต้น

2.6.6.2 ความเร่งที่เกิดจากการเลี้ยวในแนวโค้ง (Radial Acceleration) คือ การเปลี่ยนทิศทาง โดยมีความเร็วคงที่ ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เช่น การเลี้ยวด้วยความเร็วคงที่ของเครื่องบิน เป็นต้น

2.6.6.3 ความเร่งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางการเลี้ยว (Angular Acceleration) คือ การเลี้ยวของเครื่องบินที่เปลี่ยนแปลง ทั้งความเร็ว และทิศทาง แรง g ที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมของอัตราเร่งชนิดแรก และชนิดที่สองรวมกัน การบินในท่าวงกลมทางตั้ง (loop) เป็นต้น

2.6.7 ค่าความหน่วง

ค่าความหน่วง (Deceleration) คือการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่อเวลาที่มีทิศทางลดลง จากภาพที่ 2.16 เมื่อขั้วรถยนต์ที่มีความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากพิจารณาความเร่งที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ ดังภาพที่ 2.16 (ก) จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับความเร่งนั้นเรียกว่า ความเร่ง (Acceleration) ส่วนภาพที่ 2.16 (ข) จะพบว่าหากมีความเร่งเกิดขึ้นในทิศทางใดเมื่อมีการสะท้อนกลับก็จะมีค่าความเร่งเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามเรียกว่า ความหน่วง (Deceleration) ดังนั้นกล่าวได้ว่าถ้าให้ทิศความเร่งในการเคลื่อนที่เป็นบวก ความหน่วงจะมีเครื่องหมายเป็นลบ



ภาพที่ 2.16 ความแตกต่างระหว่างความเร่งกับความหน่วง
ที่มา: T. M. Gondal (2019: Website)

2.6.8 ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ

ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (Head injury criterion: HIC) เป็นค่าที่นำมาใช้บอกถึงอันตรายที่เกิดขึ้นกับศีรษะ หากเกิดการชนหรือการกระแทกค่าเกณฑ์การบาดเจ็บที่ศีรษะ(HIC) ค่าที่น้อยกว่า 500–1,000 ถือว่าปลอดภัย สำหรับมนุษย์แต่หากค่า HIC มีค่ามากกว่า 1,000 แสดงว่ามีโอกาสเกิดการบาดเจ็บที่ศีรษะมาก โดยการวิเคราะห์จะสามารถหาได้จากช่วงเวลาที่เกิดความเร่งสูงสุดจากการกระแทก 2 ช่วงเวลาและนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.4)

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\} \quad (2.4)$$

โดยที่ a คือ ความเร่งที่เป็นเส้นตรง
 t₁, t₂ คือ ช่วงเวลาที่เกิดความเร่งสูงสุด โดย t₁ < t₂

2.7 หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม มีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริมปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่าง ๆ ได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น โดยปกติแล้วปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม ค่าของผลเฉลยแม่นยำซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีขนาดต่าง ๆ กันและเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ของรูปร่างปัญหานั้น หรือค่าผลเฉลยแม่นยำประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าจำนวนมากต่าง ๆ ดังกล่าวซึ่งปัญหาในทางปฏิบัติสามารถดำเนินการได้โดย ทำการเปลี่ยนค่าแม่นยำทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ ด้วยการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นออกเป็นเอลิเมนต์ ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์นั้น

จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้น ๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเริ่มต้นจากการพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์ แล้วทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์แสดงตัวอย่างของรูปร่างเมชและเอลิเมนต์โดยสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่ ฉะนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมานี้ประกอบกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งความหมายทางกายภาพของการทำเช่นนี้ ก็คล้ายกับการนำเอาทุก ๆ เอลิเมนต์มารวมกันเข้า ก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะของปัญหาทั้งหมดจากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงในสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการทั้งหมด ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่าง ๆ ของรูปร่างปัญหา

2.7.1 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการศึกษาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มีดังนี้

2.5.1.1 ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing phase)

- 1) การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric construction)
- 2) การแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ต่อกันโดยแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยโหนด (Discretization)

2.5.1.2 การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ (Shape function) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมทางกายภาพของเอลิเมนต์หรือผลเฉลยของเอลิเมนต์

- 1) สร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์
- 2) กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นสภาวะโหนดและสภาวะขอบเขตให้กับปัญหา
- 3) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

2.5.1.3 ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution phase) การแก้หาคำตอบของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้นซึ่งคำตอบคือค่าการกระจัดที่โหนดต่าง ๆ

2.4.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post processing phase) การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติมเช่นเราอาจอยากจะทำหาค่าความเค้นหลักเป็นต้น

2.7.2 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา

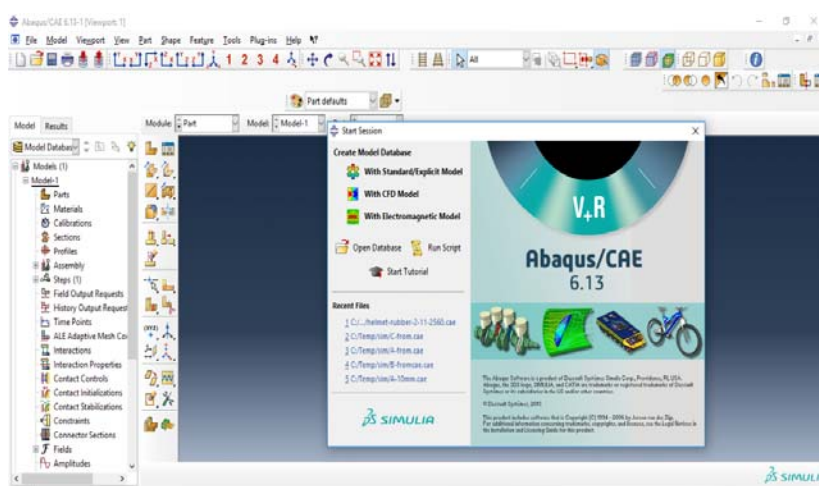
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ชื่อ ABAQUS ซึ่งมีลักษณะหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมเป็นดังภาพที่ 2.17 เป็นเครื่องมือหลักในการวิจัย ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจกับการใช้งานโปรแกรมนี้เสียก่อน โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมคำนวณที่อาศัยหลักการของ FEA ในการคำนวณและวิเคราะห์ผล เป็นหนึ่งในโปรแกรมด้าน FEA ที่นิยมใช้งานทั้งในส่วนของงานวิจัย และภาคอุตสาหกรรม สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น ปัญหาด้านการชน การสั่นสะเทือน ความร้อน ของไหล และการเสียหายแบบต่าง ๆ เป็นต้น โปรแกรมนี้ประกอบไปด้วยส่วนหลักของโปรแกรมที่สำคัญดังนี้

2.7.2.1 ส่วนของการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนนี้เป็นการสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อเตรียมการทดสอบ โดยสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบแรกโดยการใช้ ABAQUS/CAE ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับการเขียนรูปในโปรแกรมเขียนแบบหรืออาจจะเขียนจากโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับทางด้านการเขียนแบบ (CAD) เช่น Solid Work ก็ได้

แล้วจึงดึงเข้ามาใช้ในโปรแกรม ABAQUS/CAE แบบที่สองเขียนโดยการใช้คำสั่งในภาษาของโปรแกรม ABAQUS

ในส่วนนี้นอกจากจะต้องสร้างภาพของโครงสร้างให้มีขนาดและลักษณะเหมือนจริงแล้ว ยังต้องทำการใส่เงื่อนไขอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติของวัสดุ เงื่อนไขขอบเขต ลักษณะของภาระที่กระทำ เงื่อนไขของผิวสัมผัส ชนิดของเอลิเมนต์ จำนวนของเอลิเมนต์ ชนิดของการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ต้องการเก็บ เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรมจะมีผลต่อการคำนวณและผลที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่าง ๆ ที่จำเป็น และทำการสอบเทียบโปรแกรมกับผลการทดลองเพื่อให้มั่นใจว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถใช้งานได้จริง



ภาพที่ 2.17 ลักษณะหน้าจอของโปรแกรม ABAQUS/CAE

2.7.2.2 ส่วนของการคำนวณผล

ส่วนนี้คือขั้นตอนการประมวลผล โดยโปรแกรมจะนำข้อมูลและเงื่อนไขที่สร้างไว้ในแบบจำลองมาทำการคำนวณและประมวลผลตามวิธีการที่ได้เขียนไว้ในโปรแกรมส่วนแรก ในส่วนนี้สามารถทำได้สองวิธี คือ วิธีแรกโดยใช้ ABAQUS/CAE วิธีที่สองโดยการใช้ ABAQUS/Command ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตามที่ได้กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของตัวแปรต่าง ๆ

2.7.2.3 ส่วนของการแสดงผลของโปรแกรม

ส่วนของการแสดงผลคือส่วนที่โปรแกรมแสดงผลการคำนวณที่ได้ออกมา โดยอาจแสดงผลในรูปแบบของภาพขึ้นงานในลักษณะต่าง ๆ การกระจายตัวของตัวแปรที่ต้องการ หรือกราฟ เป็นต้น ในโปรแกรมนี้ส่วนที่ใช้แสดงผล คือ ABAQUS/Viewer โดยจะนำข้อมูลหรือผลที่ได้จากการประมวลผลในส่วน 2 เรียกว่าไฟล์ ODB มาเปิดแสดงผล เพื่อทำการบันทึกค่าตัวแปรต่าง ๆ รวมถึงข้อมูลที่โปรแกรมทำบันทึกไว้ขณะทำการทดสอบ จากนั้นจะนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับต่อไป

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. L. DeMarco et. al. (2010) ศึกษาถึงความรุนแรงที่เกิดขึ้นกับการกระแทกของหมวกกันน็อคของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ในแต่ละระดับพลังงานของการชน (Impact Energy) ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเลือกหมวกกันน็อคที่ได้รับมาตรฐานการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ 4 แบบหลัก ๆ คือ แบบรูปถั่ว (Beanie) แบบครึ่งใบ (Shorty) แบบเต็มใบ (Open face) และแบบเต็มใบปิดหน้า (Full-face) มาทำการทดสอบโดยวิธีการปล่อยหมวกลงมากระแทกพื้นอย่างอิสระ (Drop test) ที่ความเร็วของวัตถุที่ตกสู่พื้นตั้งแต่ 0.9 - 10.1 m/s (ที่พลังงานการกระแทก 2 - 260 จูล ความสูงของการทดสอบที่ 0.04 - 5.2 m) เพื่อศึกษาค่าของความเร่ง (Acceleration) ในแต่ละระดับพลังงานการชนเพื่อนำค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration) มาวิเคราะห์เป็นสมการเชิงเส้น จากการทดสอบพบว่าหมวกกันน็อคแบบรูปถั่ว (Beanie) มีค่าความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration) สูงถึง 852 g ที่ระดับพลังงานการชน 29 จูล ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก หมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ (Shorty) มีค่าความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration) ที่ 344 g ที่ระดับพลังงานการชน 256-260 จูล ส่วนหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ (Open face) และแบบเต็มใบปิดหน้า (Full-face) มีค่าความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration) ต่ำกว่า 400 g ที่ระดับพลังงานการชนที่สูงสุด (260 จูล) ซึ่งจากผลการทดสอบผู้วิจัยได้วิเคราะห์ว่า ความหนาแน่นวัสดุที่ใช้ทำหมวกกันน็อคมีผลต่อการเกิดค่าความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration) ส่วนการที่หมวกกันน็อคที่ไม่มีความหนาแน่นกระแทกภายในอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ได้

T.Y. Pang, A. Subic and M. Takla (2013) ทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อค ที่ใช้ในการแข่งขันกีฬาคิกบ็อกซิ่ง (Cricket) โดยใช้เครื่องทดสอบ 2 แบบคือ แบบวิธีการปล่อยวัตถุอย่างอิสระมากระแทกกับหมวกกันน็อค (2-Wire drop test) และวิธีใช้เครื่องยิงวัตถุไปกระแทกกับหมวกกันน็อค (Pitching machine) โดยทั้งสองแบบมีข้อแตกต่างกัน คือแบบวิธีการปล่อยวัตถุอย่างอิสระมากระแทกกับหมวกกันน็อค เป็นลักษณะการปล่อยลูกคิกบ็อกซิ่งตกลงมากระแทกบนหมวกกันน็อคซึ่งส่วนใหญ่มักจะเป็นการทดสอบแบบนี้ แต่เนื่องจากความสมจริงในการทดสอบผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องทดสอบให้สมจริงมากยิ่งขึ้นคือแบบยิงวัตถุไปกระแทกกับหมวกกันน็อค ซึ่งแบบนี้จะเป็นวิธีการยิงลูกคิกบ็อกซิ่งที่มีความเร็วประมาณ 6 - 44 m/s มากระแทกกับหมวกกันน็อค ซึ่งจะเป็นการทดสอบที่จำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในกรณีที่ผู้เล่นยิงลูกคิกบ็อกซิ่งมาโดนบริเวณศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อคของผู้เล่นฝ่ายตรงข้าม โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบทั้ง 2 วิธีและนำมาเปรียบเทียบกันโดยตรวจสอบผลการทดลองในเรื่องของ ความเร่ง (Acceleration) ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (Head injury criterion, HIC) และการดูดซับพลังงานและได้ทำการทดสอบหมวกกันน็อค 3 แบบคือแบบ N1 M2 และ P3 ดังภาพที่ 2.18 และได้ทำการวิเคราะห์บริเวณของศีรษะที่เกิดการชนใน 3 ลักษณะบริเวณที่เกิดการชนคือ ด้านหน้าศีรษะ ด้านข้างศีรษะและด้านหลังศีรษะ

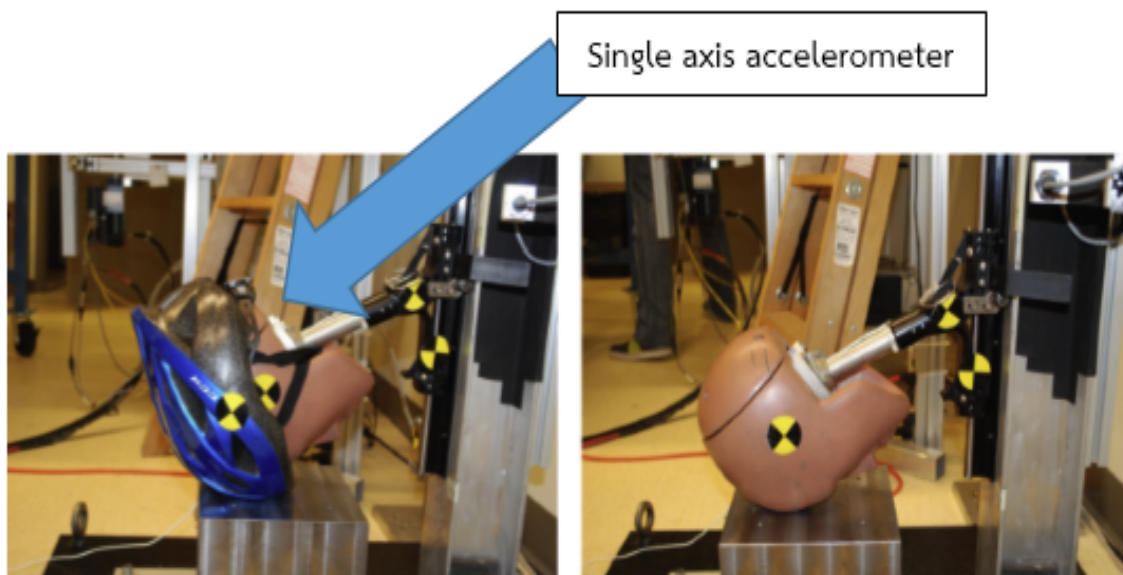


ภาพที่ 2.18 ประเภทหมวกกันน็อกที่ใช้ในการแข่งขันกีฬาคีฬาเคาะเหล็ก

ที่มา: T.Y. Pang, A. Subic and M. Takla (2013)

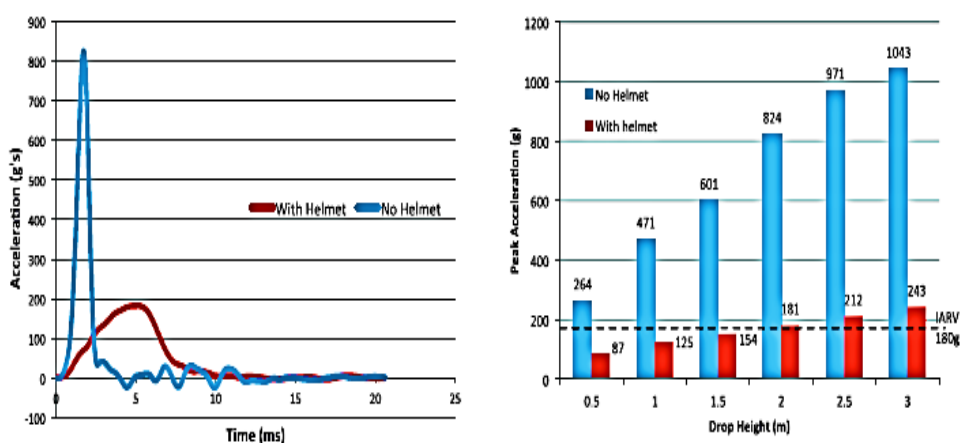
ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าค่าการดูดซับพลังงาน ค่าความเร่ง และค่า HIC ของหมวกทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จากงานวิจัยพบว่ามีผลแตกต่างของผลการทดลองระหว่างการใช้วิธีการทดสอบ 2 แบบ งานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการนำเสนอการทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อก โดยวิธีใช้เครื่องยิงวัตถุไปกระทบกับหมวกกันน็อก ซึ่งเป็นการทดสอบที่ค่อนข้างเหมือนจริง แต่ทั้งนี้การวิจัยในครั้งนี้ไม่ได้เป็นการเสนอให้เปลี่ยนวิธีการเป็นเพียงแค่การนำเสนอวิธีการทดสอบแบบใหม่เท่านั้น

P. Crompton and et al. (2014) ทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อครถจักรยานโดยต้องการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในการเกิดอุบัติเหตุระหว่างผู้ที่สวมใส่หมวกกันน็อกกับผู้ที่ไม่สวมใส่หมวกกันน็อกในประเทศแคนาดา เนื่องจากว่าในประเทศแคนาดาในปัจจุบันมีผู้ขับขี่จักรยานเป็นจำนวนมากทั้งในด้านการเดินทางหรือการออกกำลังกาย โดยส่วนใหญ่แล้วผู้คนมักจะสวมใส่หมวกกันน็อกเวลาขี่จักรยาน เนื่องจากความไม่มั่นใจว่าหมวกกันน็อกจะช่วยลดการบาดเจ็บที่ศีรษะได้ อีกทั้งยังไม่สะดวกในการใส่เนื่องจากที่บริเวณหมวกกันน็อครถจักรยานจะมีลักษณะเป็นรู เวลาที่ขี่จักรยานมีความรู้สึกเหมือนหมวกที่ด้านลมจะทำให้รถหมุนตลอดเวลา จึงเป็นแนวคิดของผู้วิจัยที่จะทำการทดสอบการเกิดอุบัติเหตุระหว่างคนที่ใส่หมวกและไม่ใส่หมวกว่ามีผลกระทบต่อศีรษะอย่างไร การวิจัยใช้เครื่องทดสอบแบบปล่อยศีรษะที่สวมหมวกกันน็อกตกลงมากระแทกพื้นอย่างอิสระ รุ่น Hybrid III headform ซึ่งมีลักษณะของการปล่อยศีรษะจำลองลงจากที่สูงประมาณ 3 -5 m มากระทบกับบริเวณพื้นราบเรียบ ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ชุดทดสอบรุ่น Hybrid III headform
ที่มา: P. Cipton and et al. (2014)

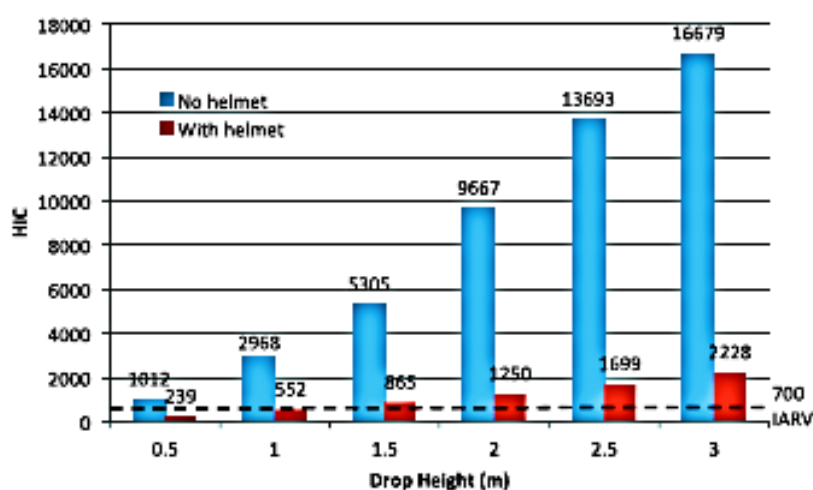
ผู้วิจัยทำการวัดค่าความเร่ง (Acceleration) ค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (Head injury criterion: HIC) อีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบถึงความสามารถการเกิดอุบัติเหตุที่รุนแรงต่อสมอง ดังแสดงในภาพที่ 2.20 ผลการทดลองพบว่าหากค่าความแตกต่างระหว่างการใส่หมวกกับไม่ใส่หมวก มีค่าความเร่ง (Acceleration) ต่างกันค่อนข้างมาก



ภาพที่ 2.20 ค่าความเร่งของการทดสอบหมวกกันน็อครถจักรยาน
ที่มา: P. Cipton and et al, 2014)

หากสังเกตจากรูปกราฟเส้นจะพบว่าค่าความเร่ง (Acceleration) มีค่าสูงสุดที่เวลา 0-5 ms และจะลดลงมาเป็น 0 ในช่วงเวลา 15-20 ms ซึ่งหากมองจากกราฟแท่งจะพบว่าหากไม่ใส่หมวก

กันน็อคจะเกิดความเร่ง (Acceleration) สูงมากทุก ๆ ความสูงที่ทำการทดสอบ ส่วนค่าที่เป็นเกณฑ์ ประเมินการบาดเจ็บ (The injury assessment reference value: IARV) นั้นเป็นค่ามาตรฐานที่ทำการเปรียบเทียบว่าที่เวลาภายใน 15 ms ค่าการกระทบต่อสมองจะต้องไม่เกิน 180 g และค่า HIC ต้องไม่เกิน 700 หากเกินอาจเป็นอันตรายต่อสมองได้ ในภาพที่ 2.21 เป็นผลการทดสอบค่าของ HIC เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอันตรายที่เกิดขึ้นกับศีรษะหรือสมองของมนุษย์ พบว่าศีรษะจำลองที่ไม่ได้มีการใส่หมวกกันน็อคจะมีค่า HIC สูงมากเมื่อเทียบกับศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อค โดยมีแบบจำลองที่ไม่สวมหมวกมีค่า HIC สูงกว่าแบบจำลองที่สวมหมวกในทุก ๆ ความสูงที่ทำการทดสอบและเช่นเดียวกันค่ามาตรฐาน IARV ของ HIC ที่ 15 ms จะต้องไม่เกิน 700 แต่จะสังเกตได้ว่าแบบจำลองที่ไม่ได้สวมหมวกกันน็อคมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานทุก ๆ ความสูง ดังนั้นจึงสรุปว่าการสวมหมวกกันน็อคสามารถลดการกระทบต่อสมองได้เป็นอย่างมาก



ภาพที่ 2.21 ผลการศึกษาค่าเกณฑ์การบาดเจ็บของศีรษะ (HIC)
ที่มา: P. Cipton and et al (2014)

H. Mustafa and et al. (2015) วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมของหมวกกันน็อครถจักรยาน โดยใช้วิธีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยผู้วิจัยได้ทำการเลือกหมวกกันน็อคมาทำการวิเคราะห์ 3 แบบคือ แบบเน็ตติ लाईटिंग (Netti Lighting) แบบเอ็มอีที คลอสโอเวอร์ (MET Crossover) และแบบเอ็มอีที คลอส (MET Kaos) โดยมีลักษณะดังภาพที่ 2.22

ผู้วิจัยวิเคราะห์ถึงวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปหมวกแต่ละแบบและทำการวิเคราะห์การกระแทกของหมวกที่ 3 ด้านคือ กระแทกทางด้านหน้า กระแทกทางด้านข้างและกระแทกทางด้านหลัง จากนั้นจะทำการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) ส่วนการทดสอบหมวกกันน็อคในห้องปฏิบัติการจะใช้วิธีแบบปล่อยศีรษะที่สวมหมวกกันน็อคตกลงมากระแทกพื้นอย่างอิสระ (2-Wire drop test) จากความสูง 1.5 m มากระทบกับบริเวณพื้นทั้งนี้ผลการทดลองที่นำไปวิเคราะห์คือ ค่าความเร่ง (Acceleration) เวลาที่เกิดการกระแทก (Impact duration) สัมประสิทธิ์สหพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient, r) ซึ่งเป็นค่าที่

วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของเส้นกราฟระหว่างวิธีทั้งแบบจำลอง FEA เพื่อเปรียบเทียบกับทดสอบในห้องปฏิบัติการและค่าที่แสดงถึงความเหมาะสมสำหรับการนำข้อมูลไปใช้ (correlation coefficient, r^2)



ภาพที่ 2.22 หมวกกันน็อคแบบเน็ตติ ไลน์ดิง (Netti Lighting) แบบเอ็มอีที คลอสโอเวอร์ (MET Crossover) และแบบเอ็มอีที คลอส (MET Kaos)
ที่มา: H. Mustafa and et al. (2015)

ตารางที่ 2.10 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Helmet model/ location	Peak linear acceleration		Impact duration		Peak score (%)	Time score (%)	Pearson correlation coefficient (r)	Correlation coefficient (r^2)
	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation				
Netti Lightning/Top	176.0	170.0	10.3	11.5	96.2	88.3	0.95	0.91
MET Crossover/Top	195.5	190.5	8.7	9.1	97.2	95.6	0.88	0.77
MET Kaos/Top	153.0	176.4	10.3	10.2	86.7	99.0	0.80	0.64
Netti Lightning/Side	183.5	193.0	8.5	8.7	94.8	97.6	0.98	0.97
MET Crossover/Side	195.0	208.1	9.1	7.6	93.3	83.5	0.94	0.87
MET Kaos/Side	163.0	170.1	8.6	7.7	97.0	89.5	0.91	0.82
Netti Lightning/Front	153.5	151.4	8.7	9.8	96.4	88.8	0.98	0.97
MET Crossover/Front	163.5	171.7	8.4	9.0	95	92.9	0.98	0.98
MET Kaos/Front	156.0	169.1	8.2	8.6	91.6	95.3	0.89	0.79

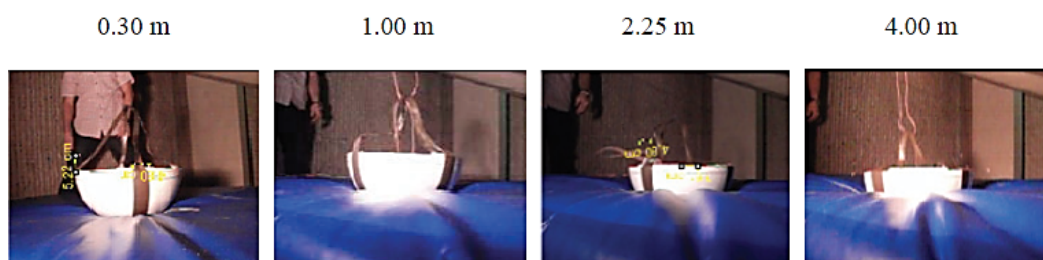
ที่มา: H. Mustafa and et al. (2015)

จากตารางที่ 2.10 คือผลการทดลองโดยใช้แบบจำลอง FEA เปรียบเทียบกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกัน การหาค่าความเร่ง เวลาที่เกิดการกระแทกสัมประสิทธิ์สหพันธ์แบบเพียร์สัน (r) และความเหมาะสมสำหรับการนำข้อมูลไปใช้ (r^2) เป็นข้อมูลที่

สามารถเชื่อถือได้ โดยจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการนำกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและการทดสอบจริง มาทำการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติทำให้ผลการทดลองน่าเชื่อถือมากขึ้น

R. C. Butz and et al. (2015) นำเสนอการวิเคราะห์หมวกกันน็อคที่เกิดอุบัติเหตุจากการกระแทก โดยที่ที่มีความสนใจในเรื่องของการติดอุปกรณ์เสริมไว้ที่หมวกนั้นคือกล้องบันทึกการเดินทาง ซึ่งเป็นที่นิยมกันมากในหมวกกันน็อคจักรยาน โดยผู้วิจัยคิดว่าการติดกล้องเสริมนั้นอาจมีผลให้เกิดปัญหาในการสวมใส่เพราะการติดอุปกรณ์เสริมจะทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกบริเวณที่ติดกล้อง จึงได้ทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อคเวลาที่ติดกล้องเปรียบเทียบกับหมวกกันน็อคที่ไม่ติดกล้อง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้วิธีการแบบปล่อยอิสระที่สวมหมวกกันน็อคตกลงมากระแทกพื้นอย่างอิสระ (2-wire drop test) โดยใช้เครื่อง Hybrid III headform ทำการทดสอบหาค่าของ แรงที่กระทำต่อศีรษะมนุษย์ ความเร่งที่เป็นเส้นตรง (Linear Acceleration), ความเร่งที่เกิดจากการเลี้ยวในแนวโค้ง (Radial Acceleration) ความเร็วเชิงเส้นของหมวกที่กระแทกกับพื้น และความเร็วในแนววิถีโค้งของหมวกที่กระแทกกับพื้น โดยเปรียบเทียบความเร็วในการทดสอบการกระแทกเป็น ความเร็วต่ำ (Low Velocity) ประมาณ 4 m/s และความเร็วสูง (High Velocity) ประมาณ 6 m/s ทำการทดสอบตัวอย่างละ 6 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่าหมวกที่ติดกล้องมีค่าของความเร่งที่เป็นเส้นตรงต่ำกว่าหมวกกันน็อคที่ไม่ติดกล้อง ส่วนค่าความเร่งที่เกิดจากการเลี้ยวในแนวโค้งนั้น หมวกกันน็อคที่ติดกล้องในช่วงความเร็วต่ำ 4 m/s จะมีค่าต่ำกว่าหมวกที่ไม่ติดกล้อง แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นที่ 6 m/s หมวกกันน็อคที่ติดกล้องจะมีค่าความเร่งที่เกิดจากการเลี้ยวในแนวโค้งที่สูงกว่าหมวกที่ไม่ติดกล้อง ซึ่งแตกต่างกับแรงที่ส่งผลภายในศีรษะจำลองที่ค่าของแรงที่เกิดขึ้นภายในศีรษะจำลองมีค่าแรงของหมวกที่ติดกล้องต่ำกว่าหมวกที่ไม่ติดกล้องทุก ๆ ความเร็ว

S. Maw V. Lun and A. Clarke (2012) ศึกษาแรงกระแทกที่เกิดขึ้นภายในหมวกกันน็อคสำหรับใช้ในกีฬาสกีแบบความเร็วสูง โดยกีฬาประเภทนี้มักเกิดอุบัติเหตุขึ้นบ่อยครั้ง แต่จะเป็นอุบัติเหตุในลักษณะของศีรษะที่ไปกระแทกกับเบาะกันกระแทกที่ขอบสนาม โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการทดสอบถึงความแตกต่างของหมวกกันน็อคที่มีขนาดและรูปทรงที่ต่างกันว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อการกระแทกบนแผ่นกันกระแทก (Crash pads) โดยทั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการปล่อยอิสระจำลอง ที่สวมหมวกกันน็อคตกลงมากระแทกพื้นอย่างอิสระมาทำการทดสอบ เพื่อต้องการทราบผลของค่าความหน่วง (Deceleration) โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 คือ การเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหมวกเป็น 4 ขนาด คือ 4 นิ้วหรือ 10.2 cm 6 นิ้วหรือ 15.2 cm 7.75 นิ้วหรือ 19.8 cm และ 12 นิ้วหรือ 30.5 cm มาทำการทดสอบแบบปล่อยอิสระที่สวมหมวกกันน็อคตกลงมากระแทกพื้นอย่างอิสระที่ระยะความสูง 0.30 m 1.00 m 2.25 m และ 4.00 m ดังภาพที่ 2.23 เพื่อบันทึกผลของค่าความหน่วง (Deceleration)

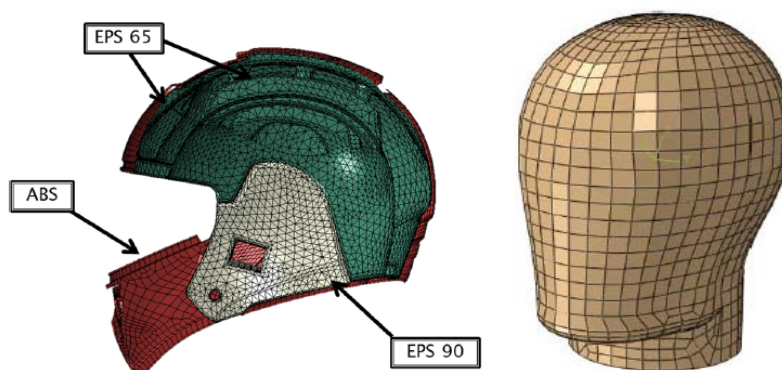


ภาพที่ 2.23 การทดสอบด้วยวิธีการปล่อยศีรษะที่สวมหมวกกันน็อคที่ใช้ในกีฬาสกิตกลงมา กระแทกพื้นอย่างอิสระ

ที่มา: S. Maw, V. Lun and A. Clarke (2012)

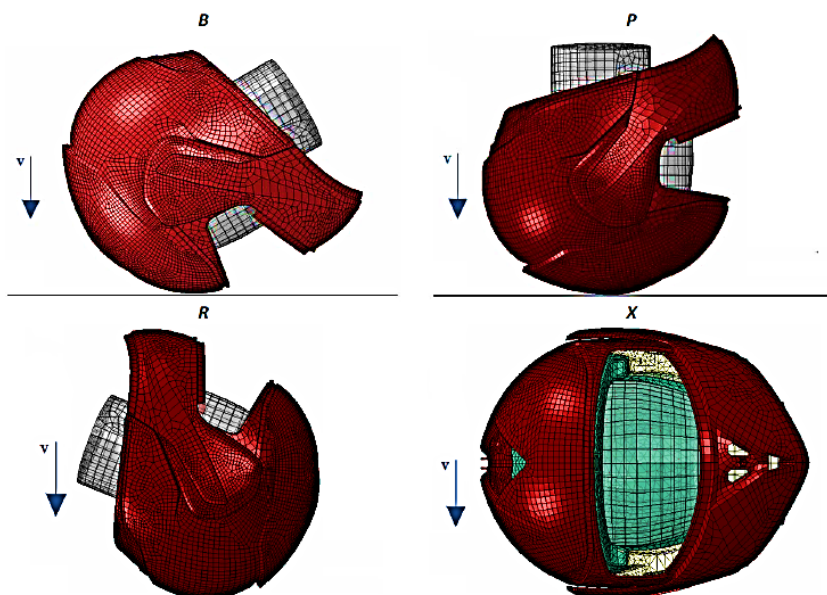
ส่วนที่ 2 คือการเลือกรัศมีความโค้งของขอบหมวกมาทำการพิจารณา โดยแต่ละรัศมีความโค้งจะใช้หมวกขนาด 8 นิ้ว มาทำการทดสอบเพิ่มอีกด้วยกำหนดรัศมีความโค้งเป็น 5 ขนาดความโค้งคือ 4, 6, 7.75, 12 และ 15 นิ้ว จากการทดสอบผลของขนาดและความโค้งของหมวกที่มีผลต่อการกระแทกของหมวกกันน็อคที่ใช้ในกีฬาสกิต ผู้วิจัยพบว่าหมวกกันน็อคขนาดเล็กและขนาดรัศมีความโค้งไม่มากจะมีค่าความหน่วง (Deceleration) ต่ำกว่าหมวกที่มีขนาดและรัศมีความโค้งสูง ทั้งนี้ผู้วิจัยคิดว่าน่าจะเป็นผลมาจากความเร็วที่หมวกขนาดเล็กน้ำหนักไม่มากจะมีความเร็วในการกระแทกที่น้อยกว่าหมวกขนาดใหญ่

F. Fernandes and et al. (2013) นำเสนอการใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองการทดสอบประสิทธิภาพของหมวกกันน็อคที่ใช้ในการขับขี่ รถจักรยานยนต์ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ยี่ห้อ CMS SUV Apribile โดยมีการสร้างรูปแบบหมวกกันน็อคดังในภาพที่ 2.24 โดยผู้วิจัยต้องการตรวจสอบการทดลองในวิธีการทดสอบหมวกกันน็อคตามมาตรฐาน ECE R22.05 เปรียบเทียบการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยข้อดีของการใช้วิธีการสร้างแบบจำลองคือการลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบและเป็นวิธีการทำนายผลที่แม่นยำ โดยงานวิจัยนี้มีขั้นตอนแรกคือการวิเคราะห์ค่าของความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วนที่นำมาใช้ในการผลิตหมวกกันน็อค โดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทาง FEA ขั้นตอนที่ 2 คือการวิเคราะห์ค่าของ ความเร่ง (Acceleration) ค่าของ HIC โดยศึกษาถึงลักษณะการชนใน 4 ด้านของหมวกกันน็อคเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ FEA สุดท้ายคือการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เป็นอันตรายเสี่ยงในการเกิดการบาดเจ็บต่อสมองโดยใช้แบบจำลองศีรษะที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยสตราสบูร์ก (Strasbourg University) จากการทดสอบหมวกกันน็อคตามแบบมาตรฐาน ECE R22.05 และการตรวจสอบโดยวิธีการสร้างแบบจำลอง FEA นั้น ผู้วิจัยได้ทำการนำเอาวัสดุที่ใช้ทำหมวกกันน็อคมาทำการทดสอบคุณสมบัติที่เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) และนำข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผล จากนั้นนำแบบจำลองของหมวกกันน็อคและศีรษะขึ้นเพื่อทำการทดสอบหาค่าความเร่ง (Acceleration) และผลของ HIC ทั้งวิธีการทดลองและวิธีการสร้างแบบจำลอง FEA ผลจากการทดสอบพบว่าค่าความเร่ง (Acceleration) และผลของ HIC มีผลที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.24 แบบจำลองหมวกกันน็อกยี่ห้อ CMS SUV และศีรษะจำลอง
ที่มา: F. Fernandes et al. (2013)

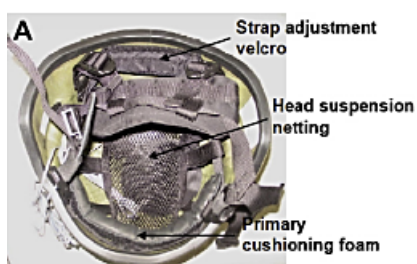
ส่วนในด้านการบาดเจ็บที่เกิดกับสมองพบว่าการใช้แบบจำลองศีรษะที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยสตรัสบูร์ก (Strasbourg university finite element head model) หรือที่ใช้ชื่อย่อว่า SUFEHM ในการทำนายผล พบว่าหมวกกันน็อกที่ได้รับมาตรฐานใช้งานบนท้องถนนจะมีผลการทำนายความเป็นไปได้ของการบาดเจ็บต่อสมองสูงแม้จะมีค่าความเร่ง (Acceleration) และค่า HIC ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ ECE R22.05 กำหนดไว้ จึงกล่าวได้ว่าหมวกกันน็อกที่ใส่กันตามท้องถนนหากเกิดอุบัติเหตุก็มีโอกาสที่เกิดการบาดเจ็บภายในสมองได้ แม้หมวกนั้นจะได้รับมาตรฐานการทดสอบมาแล้วก็ตาม



ภาพที่ 2.25 ทิศทางของการกระทบหมวกกันน็อกจากการทดลองของ F. Fernandes
ที่มา: F. Fernandes et al. (2013)

D. Krzeminski et al. (2014) ศึกษาการขึ้นรูปของวัสดุที่ใช้หมวกกันน็อคสำหรับกีฬามอเตอร์สปอร์ต เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตหมวกกันน็อคเน้นการผลิตทำหมวกกันน็อค แต่ไม่ได้คำนึงถึงคุณภาพของวัสดุที่ผลิตขึ้น ผู้วิจัยจึงเน้นศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบผิวของวัสดุที่ใช้ทำเปลือกหมวก เมื่อมีการใช้สารเคลือบแผ่นเปลือกหมวกที่ชื่อว่า เอ็น-บิวทิล อะซิเตด (n-Butyl acetate) ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอถึงวิธีการเคลือบผิวเปลือกหมวกที่ต่างกัน 4 วิธี คือ (1) วิธีใช้สเปรย์พ่น (2) ใช้วิธีการชุบลงในอ่างที่มีสารเอ็น-บิวทิล อะซิเตด (n-Butyl acetate) (3) แช่ลงในอ่าง เอ็น-บิวทิล อะซิเตด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (4) แช่ลงในอ่าง เอ็น-บิวทิล อะซิเตดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารเอ็น-บิวทิล อะซิเตด โดยเมื่อทำการเคลือบสารเคมีเสร็จแล้วจะทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในเรื่องของ สี การเสียรูปของแผ่นเปลือกหมวก ความทนทานต่ออุณหภูมิ ทดสอบแรงดึง และการรับแรงกด เพื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการเคลือบสารเคมีว่าวิธีไหนเหมาะสมในการใช้งานในการเคลือบเปลือกหมวกกันน็อคมากที่สุด สุดท้ายจากการทดลองสรุปได้ว่าการเติมสารเอ็น-บิวทิล อะซิเตด ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการเคลือบผิวเปลือกหมวกกันน็อค พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมสารเอ็น-บิวทิล อะซิเตดด้วยวิธีใด ๆ ก็ตามจะมีความความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นประมาณ 4% ทุกวิธี ส่วนในด้านของค่าความทนทานต่อความดุดและการคายความร้อนของชิ้นงานที่มีการเคลือบผิวชิ้นงานจะมีความดุดความร้อนมากขึ้น และ ความดุดความร้อนของวัสดุที่เพิ่มขึ้นนั้นจะมีผลต่อความสามารถของคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ลดลง

L. B. Tan et al. (2012) ได้ศึกษาความสามารถในการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนที่มีความเร็ว 200 เมตรต่อวินาที ปะทะกับหมวกกันน็อคที่ใช้ในการรบของทหาร โดยผู้วิจัยได้ทำการแบ่งหมวกทหารเป็น 2 แบบคือ แบบสายรัดที่ศีรษะ (Strap-netting system) และแบบแผ่นโฟมรองรับแรงกระแทก (The oregon aero: OA) ดังภาพที่ 2.26



(ก)

(ก) แบบสายรัดที่ศีรษะ



(ข)

(ข) แบบแผ่นโฟมรองรับแรงกระแทก

ภาพที่ 2.26 หมวกกันน็อคที่ใช้สำหรับการรบของทหาร

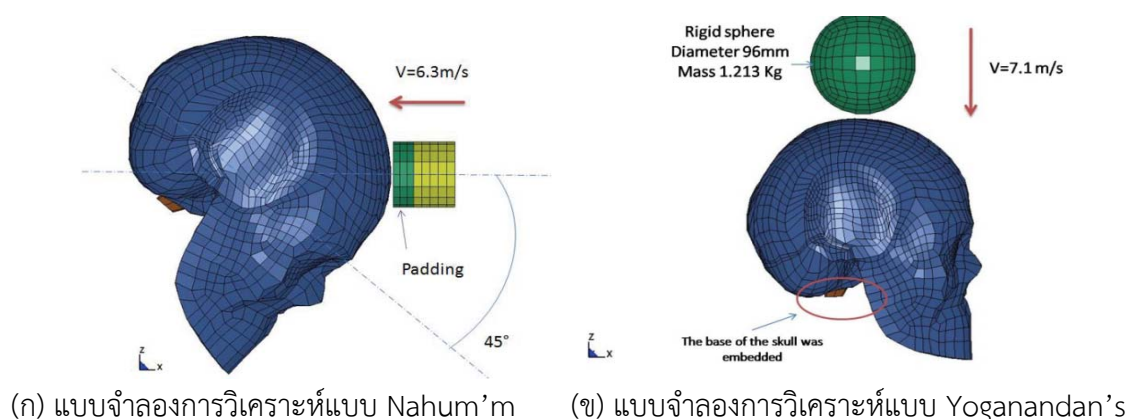
ที่มา: L. B. Tan et al. (2012)

ซึ่งแบบของหมวกกันน็อคทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันตรงที่แบบสายรัดที่ศีรษะจะเป็นลักษณะผ้าที่รัดกับศีรษะไว้เวลาสวมใส่ แต่แบบแผ่นโฟมรองรับแรงกระแทกเป็นลักษณะของแผ่นโฟม 7 แผ่นมารองรับศีรษะเอาไว้รอบศีรษะ โดยการวิเคราะห์ในบทความนี้เริ่มจากการสร้างชุดในการทดสอบที่มีลักษณะเป็นเครื่องยิงกระสุนปืนทรงกลมที่มีน้ำหนัก 11.9 กรัม ด้วยความเร็วมากกว่า 200 เมตรต่อวินาที เข้าใส่หมวกกันน็อคที่มีศีรษะจำลองใน 2 ด้านคือ ด้านหน้าของหมวกและด้านข้างของหมวก

เพื่อศึกษาผลกระทบของการดูดซับพลังงาน ค่าความเร่ง (Acceleration) ลักษณะของหลุมที่เกิดขึ้นจากการยิงกระสุนและการทะลุของกระสุนที่พุ่งเข้าไปเจาะหมวกกันน็อค โดยผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการทดสอบระหว่างผลจากการทดลองกับโปรแกรมสร้างแบบจำลอง โดยส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองคือโปรแกรม Abaqus.cae เพื่อเป็นการทำนายผลและเป็นการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง จากการทดลองระหว่างการใช้อิทธิกรสร้างแบบจำลอง และการทดลองในห้องปฏิบัติการมีผลที่ใกล้เคียงกัน

เนื่องจากผลของค่าคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ และจากการทดลองทำให้พบว่าวิธีการ FEA สามารถใช้ในการทำนายผลของการกระทบของกระสุนที่มีต่อหมวกกันน็อคได้ โดยวิธี FEA นี้มีข้อดีคือลดเวลาในการทดสอบ ลดการปฏิบัติในห้องทดลองซึ่งเสียค่าใช้จ่ายและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพหากต้องการออกแบบหมวกกันน็อคใหม่ขึ้นเพื่อใช้งานต่อไปในอนาคต

D. Caroline and W. Remy (2013) ทำการศึกษาแบบจำลองศีรษะที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยสตรัสบูร์ก (Strasbourg university finite element head model, SUFEHM) มาทำการวิเคราะห์คาดการณ์ความรุนแรงของการบาดเจ็บภายในศีรษะด้วยโปรแกรม Ls-Dyna โดยแบบจำลอง SUFEHM เป็นแบบจำลองที่ใช้ค่าของ Von mises stress และค่าของ Strain energy มาทำการวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงของการบาดเจ็บ ผู้วิจัยได้ทำการนำเอาการวิเคราะห์เหตุการณ์จำลองและทดสอบในห้องปฏิบัติการ 2 ส่วนของการเกิดการกระทบคือการวิเคราะห์แบบ Nahum'm มาวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นกับภายในสมองและการวิเคราะห์การบาดเจ็บโดยวิธีจำลองแบบ Yoganandan's มาทำการวิเคราะห์แรงและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับส่วนกะโหลกศีรษะ โดยวิธีการทดสอบโดยใช้แบบจำลอง Nahum'm คือการใช้หัวค้อนพุ่งเข้าไปชนบริเวณส่วนหน้าของศีรษะโดยที่แบบจำลองศีรษะที่ทำมุมเอียง 45 องศา ดังภาพที่ 2.27 (ก) ส่วนวิธีจำลองแบบ Yoganandan's คือการปล่อยวัตถุทรงกลมมากระทบกับศีรษะบริเวณด้านบน ดังภาพที่ 2.27 (ข)



ภาพที่ 2.27 แบบจำลองวิธีการทดสอบการกระทบของ Nahum'm และ Yoganandan's
ที่มา: D. Caroline and W. Remy (2013)

จากนั้นผู้วิจัยได้เลือกชนิดของการบาดเจ็บสมองจาก 59 กรณี (อุบัติเหตุจากมอเตอร์ไซด์ อเมริกันฟุตบอล การเกิดการชนในขณะที่ผู้ถูกชนเดินตามท้องถนน) มาทำการจัดหมวดหมู่ความรุนแรงของการบาดเจ็บเป็น 2 อย่างคือ แบบที่เนื้อสมองเกิดการฉีกขาด (Diffuse axonal injuries: DAI) และแบบที่มี

ภาวะเลือดออกในสมอง (Subdural Haematomas: SDH) และทำการวิเคราะห์ค่าผลรวมของความเค้น (Von mises stress) ที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บขั้น DAI คือเท่าใดและค่าที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บขั้น SDH คือเท่าใด โดยการวิเคราะห์ตามวิธีแบบของนาฮุม (Nahum's impact) และ ยอกานันดาล (Yoganandan's) ผู้วิจัยพบผลที่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าสูงสุดของผลรวมของความเค้น (Von mises stress) ที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บแบบ DAI บ้างเล็กน้อยคือ 28 kPa และค่าที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บแบบ DAI ที่รุนแรงมีค่าสูงสุดที่ 53 kPa ส่วนค่าต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บแบบ ภาวะเลือดออกในสมอง (SDH) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ค่าของพลังงานความเครียด (Strain Energy) ที่ 4,950 มิลลิจูล

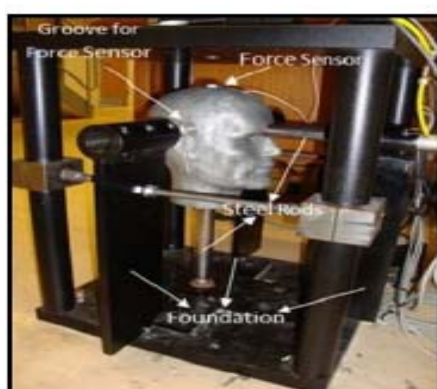
B. Zahid and X. Chen (2013) ได้ศึกษาการขึ้นรูปเปลือกหมวกกันน็อกสำหรับตำรวจปราบจลาจลโดยใช้วัสดุสิ่งทอที่เป็นแผ่นเคฟล่า (Kevlar – 49) แบบลูกโซ่ (angle-interlock fabric) ผู้วิจัยได้ทำการนำแผ่นเคฟล่า (Kevlar – 49) มาทำการวางซ้อนกันเพื่อขึ้นรูปเป็นลักษณะมุมการวางทับซ้อนกัน 5 แบบคือ 1 แผ่น (FS) แบบ 2 แผ่นมุม 0, 0 องศา (FDS) แบบ 2 แผ่นมุม 0, 90 องศา (FDD) แบบ 3 แผ่น (FTS) และแบบ 3 แผ่นมุม 0, 90, 0 องศา (FTD) โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานและความสามารถในการรับแรงของวัสดุที่ใช้ทำเปลือกหมวกทั้ง 5 แบบ โดยผู้วิจัยขึ้นรูปหมวกกันน็อกเป็นดังภาพที่ 2.28 และทำการทดสอบการกระแทกโดยการปล่อยยว้สดุมวล 4.66 kg ลงมากระแทกบริเวณกึ่งกลางของหมวกโดยความรุนแรงการกระแทกแบ่งเป็น 3 ระดับพลังงานคือ 5.6, 15.6 และ 25.6 จูล ตามลำดับ

ตารางที่ 2.11 ผลการทดสอบการดูดซับพลังงานเปลือกหมวกกันน็อก

Sample	Impact energy (J)	Energy absorbed (J)	Normalised energy absorbed (J)
FS	5.59	3.825	3.978
FDS	5.56	4.020	2.110
FDD	5.53	4.037	2.140
FTS	5.58	4.026	1.472
FTD	5.63	4.162	1.498
FS	15.62	9.961	10.358
FDS	15.58	9.946	5.221
FDD	15.53	9.946	5.272
FTS	15.51	9.976	3.648
FTD	15.47	9.953	3.582
FS	25.61	16.597	17.258
FDS	25.61	17.016	8.933
FDD	25.59	16.771	8.889
FTS	25.52	16.705	6.108
FTD	25.41	17.839	6.421

ที่มา: B. Zahid and X. Chen (2013)

จากการทดสอบพบว่าแผ่นแบบ FS มีการดูดซับพลังงานได้น้อยที่สุดเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยที่สุด ส่วนแผ่นแบบ FTD มีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูงที่สุดเนื่องจากมีความหนามากที่สุด สอดคล้องกับในด้านการรับแรงของวัสดุที่แบบ FS มีการส่งผ่านแรงไปถึงศีรษะถึง 8.73 kN ส่วนแบบ FTD การส่งผ่านแรงไปถึงศีรษะที่ 2.67 kN ที่ระดับพลังงาน 5.6 จูล เช่นเดียวกับที่ระดับพลังงานการชนอีก 2 ระดับที่ความหนาของแผ่นเคล้าแบบ 3 ชั้น จะสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าแบบชั้นเดียวดังตารางที่ 2.11 และ 2.13



(ก) แท่นทดสอบแรงกระแทก



(ข) เปลือกหมวกกันน็อคที่ทำจากแผ่นเคล้า

ภาพที่ 2.28 แท่นทดสอบการกระแทกและเปลือกหมวกกันน็อค
ที่มา: B. Zahid and X. Chen (2013)

ตารางที่ 2.12 ผลการทดสอบการดูดซับแรงในแต่ละระดับพลังงานการกระแทกเปลือกหมวกกันน็อค

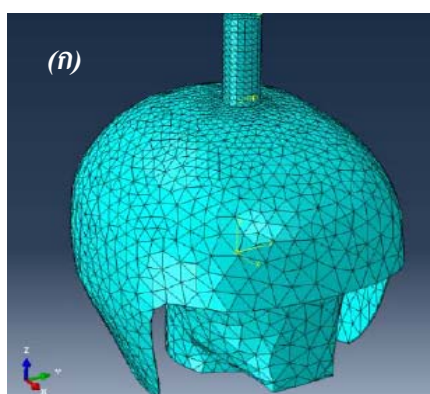
Sample	Impact energy (J)	Impact force without specimen (kN)	Force transmitted (kN)	Normalized force transmitted (kN)	Normalized attenuation factor (%)
FS	5.59	9.242	8.253	8.737	5.466
FDS	5.56	9.242	7.643	4.080	55.857
FDD	5.53	9.242	7.613	4.103	55.600
FTS	5.58	9.242	7.643	2.842	69.253
FTD	5.63	9.242	7.584	2.776	69.967
FS	15.62	15.513	14.311	14.813	4.510
FDS	15.58	15.513	13.721	7.170	53.784
FDD	15.53	15.513	13.692	7.224	53.435
FTS	15.51	15.513	13.544	4.929	68.224
FTD	15.47	15.513	13.397	4.800	69.061
FS	25.61	19.666	18.649	19.214	2.300

ตารางที่ 2.12 ผลการทดสอบการดูดซับแรงในแต่ละระดับพลังงานการกระแทกเปลือกหมวกกันน็อก (ต่อ)

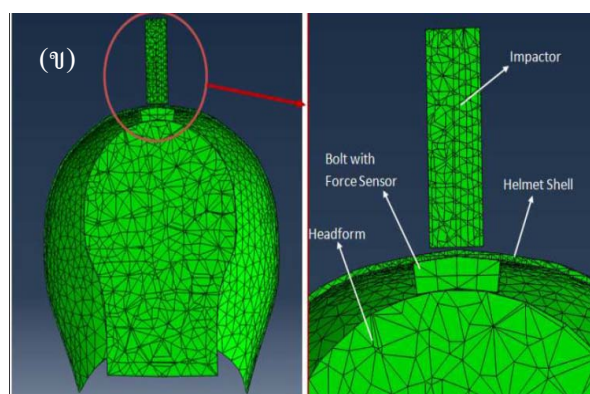
Sample	Impact energy (J)	Impact force without specimen (kN)	Force transmitted (kN)	Normalized force transmitted (kN)	Normalized attenuation factor (%)
FDS	25.61	19.666	18.088	9.379	52.311
FDD	25.59	19.666	18.000	9.423	52.083
FTS	25.52	19.666	18.038	6.522	66.837
FTD	25.41	19.666	18.029	6.410	67.408

ที่มา: B. Zahid and X. Chen (2013)

B. Zahid and X. Chen (2013) ได้ทำการสร้างแบบจำลองเปลือกหมวกกันน็อกของตำรวจปราบจลาจลเพื่อทำการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับพลังงานโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการกระแทกของเปลือกหมวก 3 ด้านของบริเวณศีรษะที่สวมหมวกกันน็อกคือ ด้านบนศีรษะ ด้านข้างศีรษะและด้านหลังศีรษะ โดยพลังงานการกระแทกที่ 5.6 15.6 และ 25.6 จูล เพื่อทดสอบหาค่าการดูดซับพลังงานและแรงกระแทกที่เกิดสูงสุดภายในศีรษะจำลอง จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองเปลือกหมวกและศีรษะจำลองขึ้นเพื่อใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทดลองจริง โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองดังภาพที่ 2.29 (ก) และกำหนดบริเวณที่มีการกระแทกโดยแท่งโลหะดังภาพที่ 2.29 (ข)



(ก) แบบจำลองเปลือกหมวกกันน็อก

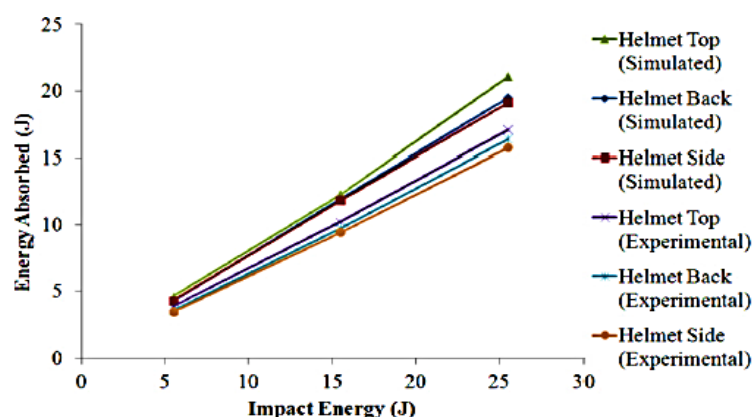


(ข) แบบจำลองการกระแทกเปลือกหมวกกันน็อก

ภาพที่ 2.29 แบบจำลองเปลือกหมวกกันน็อกของตำรวจปราบจลาจล

ที่มา: B. Zahid and X. Chen (2013)

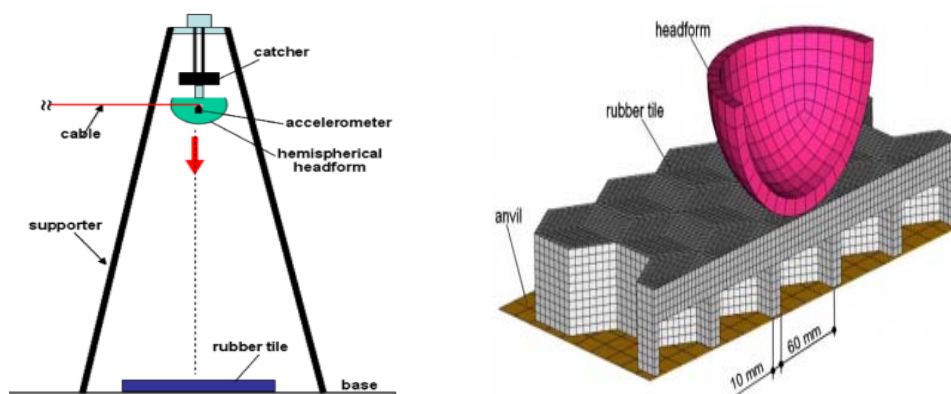
จากการทดสอบเปรียบเทียบผลการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังภาพที่ 2.30 ส่วนการส่งผ่านแรงแม้จะมีผลการจำลองที่ต่างจากการทดลองแต่ก็มีผลที่เป็นแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบคือยิ่งระดับพลังงานการชนมากขึ้นการส่งผ่านแรงก็จะมากตามไปด้วย



ภาพที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการกระแทก (Impact energy) และการดูดซับพลังงาน

ที่มา: B. Zahid and X. Chen (2013)

T.J. Huang and L.T. Chang (2009) ทำการออกแบบและสร้างแผ่นยางดูดซับแรงกระแทกที่ใช้ในสวนสาธารณะเด็ก เนื่องจากปัญหาเด็กเล็กเล่นอุปกรณ์ในสวนสาธารณะและเกิดหกล้มศีรษะกระแทกพื้น โดยผู้วิจัยได้ทำการใช้แผ่นกระเบื้องยางเป็นพื้นด้านบนและด้านล่างจะเป็นลักษณะแผ่นดูดซับแรงกระแทกรูปรังผึ้ง ซึ่งแผ่นรังผึ้งได้ทำการแบ่งเป็น 4 แบบ ตามความหนาของชั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในรังผึ้ง คือ 1:3 1:4 1:5 และ 1:6 ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.31 ในการทดสอบผู้วิจัยได้ใช้วิธีการกระแทกพื้นอย่างอิสระ (Drop test) โดยปล่อยศีรษะจำลองลงมาจากที่สูงเพื่อกระทบกับแผ่นรังผึ้งรับแรงกระแทกที่ความเร็ว 4.4, 6.2 และ 7.6 m/s ตามลำดับ เพื่อทดสอบหาค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration) และ HIC ของศีรษะจำลอง อีกทั้งการทดลองนี้ยังได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลอีกด้วย



ภาพที่ 2.31 แผ่นดูดซับแรงกระแทกรูปถังปิ้งและการทดสอบ
ที่มา: T. J. Huang and L. T. Chang (2009)

ผลการทดลองพบว่าแผ่นรับแรงกระแทกรูปถังปิ้งแบบความหนาแน่น 1:6 มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีที่สุดโดยมีค่า Peak acceleration ที่ 166 g ส่วนกรณีที่ไม่มีแผ่นรับแรงกระแทกมีค่าสูงถึง 239 g ที่ความเร็วการกระแทก 5.9 เมตรต่อวินาที ส่วนที่ความเร็วอื่น ๆ ก็มีค่าเป็นแนวโน้มเดียวกัน ในด้านค่า HIC ก็สอดคล้องกับค่าความเร่งสูงสุด (Peak acceleration) ที่แผ่นความหนาแน่น 1:6 มีค่า HIC ที่ 1,247 ส่วนกรณีไม่มีแผ่นรับแรงสูงถึง 3,903 ที่ความเร็วการกระแทก 5.9 เมตรต่อวินาที ผลเช่นเดียวกับทุกอัตราความเร็วอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นยางรับแรงกระแทกมีข้อดีอย่างมากในการช่วยรับแรงกระแทก

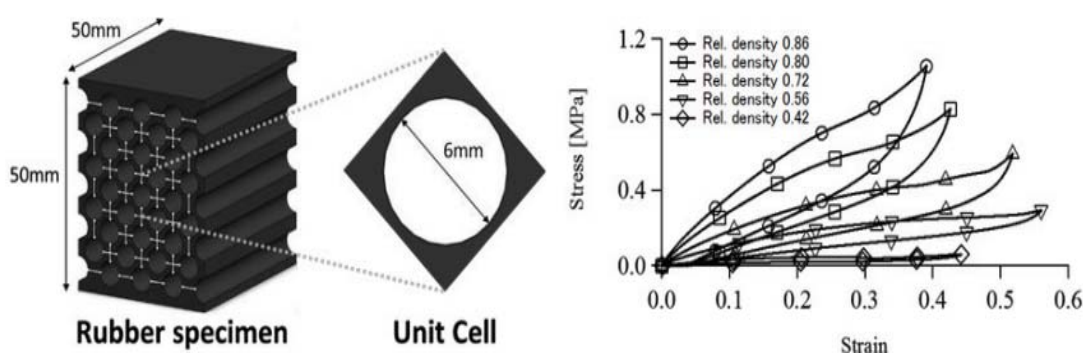
S. Norhazariah et al. (2015) ทำการศึกษาทำปฏิกิริยาวัลคาร์ไนซ์ของน้ำยางพาราโดยใช้สารเติมแต่งคือสารคอลลาจีแนน (Carrageenan) โดยผู้วิจัยได้ทำการแบ่งการทดลองเป็น 3 วิธีคือ (1) การทดลองโดยใช้วิธีควบคุมอุณหภูมิห้องไม่เติมสารใด ๆ ทั้งสิ้น (Control) (2) วิธีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 °C เติมสารคอลลาจีแนน (Method 1) (3) วิธีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติเติมสารคอลลาจีแนน (Method 2) เพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่นและความหนาแน่นที่เกิดขึ้นของยางแผ่น โดยการทดลองพบว่า วิธีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติเติมสารคอลลาจีแนน (Method 2) ให้คุณสมบัติที่ดีที่สุดในด้านความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (Crosslink density) ที่ 8.55×10^{-5} 2M/c และมีค่าแรงดึง (Tensile) และความยืดหยุ่นที่ดีกว่าอีก 2 วิธีดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางในงานวิจัยของ S. Norhazariah

Properties	Control	Method 1	Method 2
M ₁₀₀ (MPa)	1.072	0.494	0.71
M ₃₀₀ (MPa)	4.497	1.06	1.374
Tensile strength (MPa)	27.28	6.54	17.88
Elongation at break (%)	1258	928	1168
Tear strength (N/mm)	44.66	33.88	61.38

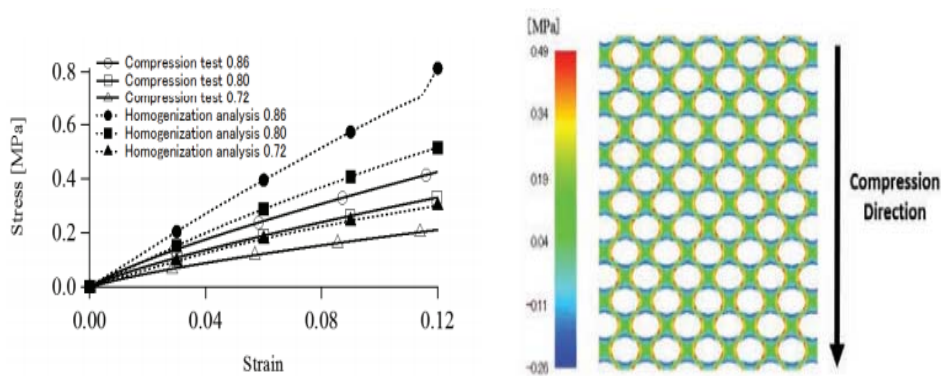
ที่มา: S. Norhazariah et al. (2015)

A. Nomoto et al. (2016) ศึกษาค่าความเค้นและความเครียดของฟองน้ำยางพาราด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของฟองน้ำยางพาราแบบ 2 มิติ โดยศึกษาฟองน้ำยางพาราที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่าง ๆ คือ 0.42, 0.56, 0.72, 0.80 และ 0.86 เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศคือ 1, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในกรณีที่มีรูพรุนสม่ำเสมอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 แบบจำลองฟองน้ำยางพาราและการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ
ที่มา: A. Nomoto et al. (2016)

โดยการทดสอบจะทดสอบการบีบอัดของวัสดุเพื่อทดสอบหาค่าของคุณสมบัติวัสดุเพื่อเทียบกับผลการทดลอง โดยผลการทดลองจากภาพที่ 2.33 พบว่าการศึกษาโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองมีค่าแตกต่างกันพอสมควรเนื่องจากคุณสมบัติที่ใส่ในโปรแกรมอาจมีค่าที่ผิดพลาดเกิดขึ้น



ภาพที่ 2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของฟองน้ำยางพาราโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง A. Nomoto et al.
ที่มา: A. Nomoto et al. (2016)

ฐิตินันท์ รัตนพรหม (2555) ศึกษาทดลองใช้เถ้าลอยเป็นสารเสริมแรงในฟองน้ำยางโดยศึกษาผลของปริมาณเถ้าลอยต่อสมบัติของฟองน้ำยาง ได้แก่วัสดุโครงสร้างรูพรุนของฟองน้ำยาง ความหนาแน่น ความแข็งตัว ค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัด เปอร์เซ็นต์การหดตัวและการยุบตัว ฟองน้ำยางเตรียมด้วยกระบวนการดันลอย ปริมาณเถ้าลอยที่ศึกษา คือ 0, 2 และ 4 phr จากการทดลองพบว่า

เมื่อเติมเถ้าลอยลงไป ผิวหน้าตัดของยางพองน้ำยาบมีเซลล์อากาศใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นเถ้าลอยมีผลทำให้ความหนาแน่นของพองน้ำยางเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาแน่นของพองน้ำยางที่ได้จากการทดลอง อยู่ในช่วง $0.13 - 0.26 \text{ g/cm}^3$ ปริมาณเถ้าลอยที่ 4 phr มีความหนาแน่นมากที่สุดและความแข็งตัวเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวเนื่องจากการกดอัดลดลง เปอร์เซ็นต์การหดตัวและการยุบตัวเพิ่มขึ้น โดยพองน้ำยางที่เติมเถ้าลอยประมาณ 2 phr จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ RU 20 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

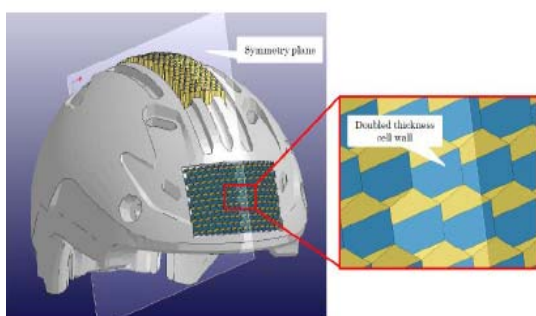
ปริมาณเถ้าลอย	0 phr	2 phr	4 phr
แรงกดที่ทำให้ยางพองน้ำลดลง 25% ก่อนอบด้วยความร้อน (กิโลปาสคาล)	0.81	2.39	0.14
ค่าแรงกดที่เปลี่ยนไปหลังการอบด้วยความร้อน (%)	12.09%	12.06%	0.80%
ค่าความหนาที่ลดลงจากความหนาเดิมหลังผ่านการอัด (%)	13.33%	4.66%	11.33%
ระยะยุบตัวที่เปลี่ยนไปจากระยะยุบตัวเดิมหลังจากผ่านการอัด (%)	28%	12%	24%

ที่มา: จิตินันท์ รัตนพรหม (2555)

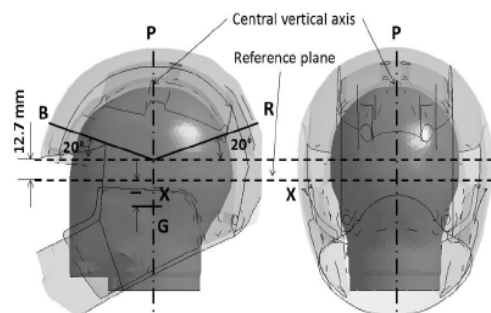
สุวิมล เทียกทุม และหทัยนุช จันทรชัยภูมิ (2559) ศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากเกลบผสมพองน้ำยางธรรมชาติเพื่อการขนส่งมะม่วงน้ำดอกไม้สำหรับใช้เป็นทางเลือกของวัสดุกันกระแทกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทนการใช้โฟมพอลีสไตรีนและเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์อีกด้วย โดยผู้วิจัยได้ผลิตวัสดุกันกระแทกด้วยกระบวนการแบบดันลอป ซึ่งมีการควบคุมตัวแปร ได้แก่ ปริมาณและขนาดของเกลบ ปริมาณน้ำยาพารา ปริมาณสารเคมี เวลาผลิต ความเร็วรอบและอุณหภูมิ จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์การหดตัว เปอร์เซ็นต์การคืนตัวเนื่องจากแรงอัดและเปอร์เซ็นต์การกระเด็นตัวของวัสดุกันกระแทกที่ผลิตขึ้นมา ซึ่งจากการวิจัยพบว่าวัสดุกันกระแทกที่มีปริมาณเกลบ 30 กรัมของส่วนผสมทั้งหมด เป็นสูตรที่ดีที่สุดในการผลิต โดยมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเท่ากับ 19.96% การคืนตัวเนื่องจากแรงอัดเท่ากับ 18% และเปอร์เซ็นต์การกระเด็นตัวเท่ากับ 48.16% จากผลการทดสอบโดยรวมจึงสรุปได้ว่าวัสดุกันกระแทกจากเกลบผสมพองน้ำยางธรรมชาติที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมานั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่าไม่ก่อให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูงกว่าโฟม พอลีสไตรีนมาก

พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ และคณะ (2552) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยางพองน้ำชนิดตันที่เตรียมได้จากน้ำยางธรรมชาติเพื่อลดต้นทุน โดยใช้พองน้ำชนิดแอมโมเนียสูงและสารตัวเติม 50% แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 30 phr สำหรับ กระบวนการเตรียมยางพองน้ำนั้นใช้วิธีการเตรียมแบบดันลอป โดยมีลำดับการเติม CaCO_3 ก่อนและหลังการเติม K-oleate พบว่าวิธีการเติม CaCO_3 ก่อนการเติม

K-oleate ช่วยทำให้สมบัติโดยรวมของยางพองน้ำดีขึ้นแต่ตัวอย่างยางพองน้ำที่ได้มีผิวหน้าของตัวอย่างยางพองน้ำไม่เรียบเนียน มีลักษณะเป็นหลุมตื้น ๆ ลักษณะพองยางไม่สม่ำเสมอและยางพองน้ำมีการยุบตัวและเมื่อปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นตัวอย่างยางพองน้ำมีการยุบตัวมากขึ้นเห็นได้ชัดที่ปริมาณ CaCO_3 10, 20 และ 30 phr สำหรับวิธีการเติม CaCO_3 หลังการเติม K-oleate ตัวอย่างยางพองน้ำที่เติม CaCO_3 20 phr และ 30 phr ตัวอย่างที่ได้ค่อนข้างแข็งหยาบและมีการยุบตัวขณะที่การเติม CaCO_3 ที่ปริมาณ 5 และ 10 phr จะได้ตัวอย่างยางพองน้ำที่มีลักษณะทั่วไปค่อนข้างดีกล่าวคือผิวหน้าของตัวอย่างยางพองน้ำเรียบเนียนและ ลักษณะพองยางค่อนข้างสม่ำเสมอเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบอื่นจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างยางพองน้ำ ที่เติม CaCO_3 10 phr มีสมบัติความแข็งและดัชนีความแข็งเชิงกลดีกว่าตัวอย่างยางพองน้ำที่เติม CaCO_3 5 phr ขณะที่ตัวอย่างยางพองน้ำที่เติม CaCO_3 5 phr มีสมบัติความทนแรงอัดซ้ำคงที่การยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการบ่มเร่งดีกว่าตัวอย่างยางพองน้ำที่เติม CaCO_3 10 phr และเมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มา เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1425-2540 พบว่ายางพองน้ำที่เติม CaCO_3 5 phr จะมีสมบัติที่ผ่านตามาตรฐาน



(ก) แบบจำลองหมวกกันน็อคที่เสริมวัสดุอะลูมิเนียมรูปร่าง



(ข) บริเวณที่ทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อค

ภาพที่ 2.34 หมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้าที่เสริมวัสดุอะลูมิเนียมรูปร่างเป็นรับวัสดุช่วยรับแรงกระแทก

ที่มา: G. D. Caserta et al. (2008)

G. D. Caserta et al. (2008) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้าที่เสริมวัสดุอะลูมิเนียมรูปร่างเป็นรับวัสดุช่วยรับแรงกระแทกภายในโหมของหมวกกันน็อคสำหรับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ โดยแบบจำลองได้ทำการออกแบบการฝังรูปร่างไว้ที่บริเวณด้านหน้า ด้านบนและด้านหลังของหมวกกันน็อค ดังภาพที่ 2.34 (ก) และทำการทดสอบโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

นักวิจัยได้ทำการศึกษาค่าความเร่ง (Acceleration) การกระแทกของหมวกทั้ง 3 ด้าน ที่บริเวณจุด P B และ R ดังภาพที่ 2.34 (ข) มีการกระแทกกับพื้น 2 ลักษณะคือ ราบเรียบ (Flat Anvil) และพื้นขรุขระ (Kerbstone Anvil) กระแทกที่ความเร็ว 7.5 m/s จากผลการทดลองพบว่าที่บริเวณด้านบนของหมวกกันน็อคจะมีค่าความเร่งจากการกระแทกสูงที่สุดที่ 206 g ส่วนด้านส่วนด้านหน้าที่ 182 g

และด้านหลังที่ 202 g ที่บริเวณพื้นถนนแบบราบเรียบ ส่วนในแบบพื้นถนนแบบขรุขระ (Kerbstone Anvil) มีค่าความเร่งสูงสุดเมื่อการกระทบทางด้านบนที่ 184 g ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบการทดลองกับการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความสอดคล้องกันดังตารางที่ 2.15

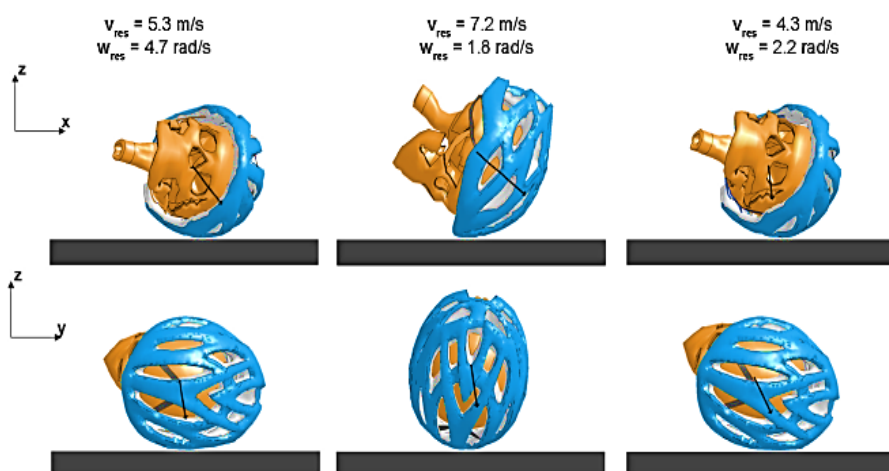
ตารางที่ 2.15 ผลการทดสอบค่าความเร่งของหมวกกันน็อคเปรียบเทียบกับทดสอบด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของ G.D. Caserta et al.

Impact point	Flat anvil		Kerbstone anvil	
	FEA prediction [g]	Experimental [g]	FEA prediction [g]	Experimental [g]
B	199 (+9.4%)	182	150 (+6.0%)	141
P	203 (-1.5%)	206	156 (-16.0%)	184
R	194 (-4.0%)	202	140 (+2.9%)	136

ที่มา: G.D. Caserta et al. (2008)

M. Fahlstedt, P. Halldin and S.K. Neuronic. (2016) ศึกษากรณีการกระทบของหมวกกันน็อคของผู้ขับขี่จักรยานที่ทำให้สมองเกิดการบาดเจ็บมากที่สุด 3 กรณีที่ทำการเก็บข้อมูลโดยกลุ่มนักวิจัยที่ใช้ชื่อว่า KU Leuven มาทำการทดสอบโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้ทำการเลือกกรณีศึกษาคือ case 4 case 15 และ case 58 ดังภาพที่ 2.35 มาทำการทดสอบผล 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ 1 กลุ่มค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นตรวจสอบค่า ความเร่งเชิงเส้น (Linear acceleration) ความเร่งที่มีทิศทางการเลี้ยว (Angular acceleration) และความเร็วในวิถีโค้ง (Angular velocity) ส่วนกลุ่มที่ 2 เวลาที่ทำให้เกิดค่าความเร่งสูงสุด เพื่อเปรียบเทียบการบาดเจ็บที่เกิดขึ้นกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกหมวกกันน็อคของผู้ขับขี่จักรยานที่ผลิตโดยวัสดุ 3 ชั้น คือ พลาสติกภายในหมวก เปลือกหมวก และโฟมด้านในของหมวก ซึ่งแต่ละชั้นก็จะมีคุณสมบัติวัสดุที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่ามีความใกล้เคียงกันระหว่างผลการทดลองและผลการสร้างแบบจำลอง โดยคิดเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ตารางที่ 2.16



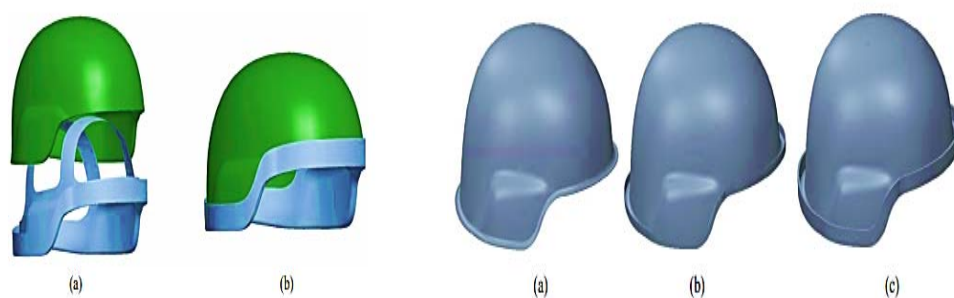
ภาพที่ 2.35 กรณีการกระแทกของหมวกกันน็อคของผู้ขับขี่จักรยานที่ทำให้สมองเกิดการบาดเจ็บมากที่สุด 3 กรณี

ที่มา: M. Fahlstedt, P. Halldin and S.K. Neuronc (2016)

ตารางที่ 2.16 ค่าความต่างระหว่างวิธีการทดลองและการสร้างแบบจำลอง M. Fahlstedt, P. Halldin and S.K. Neuronc

	Ratio of peak value			Ratio of timing of peak value (%)		
	Linear acceleration	Linear acceleration	Angular acceleration	Linear acceleration	Linear acceleration	Angular velocity
Back	85%	98%	83%	80%	79%	78%
Lateral	94%	96%	94%	98%	96%	85%
Pitched	94%	86%	94%	54%	61%	90%
Radial	94%	-	-	99%	-	-
Average	92%	93%	90%	83%	79%	84%

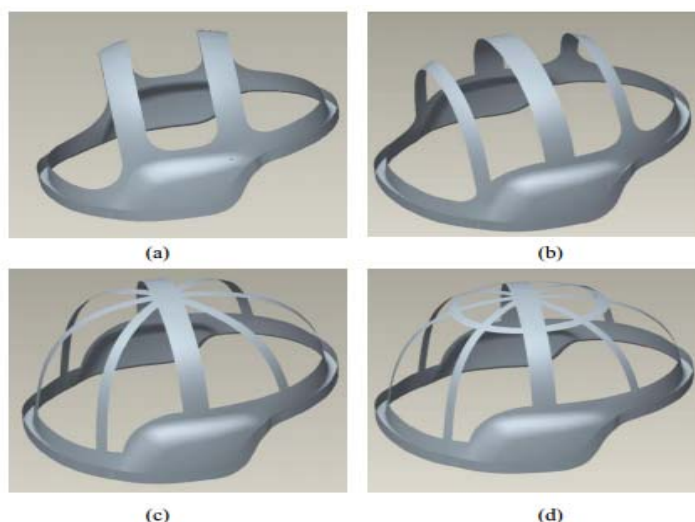
ที่มา: M. Fahlstedt, P. Halldin and S.K. Neuronc (2016)



ภาพที่ 2.36 ลักษณะของหมวกเป็น 3 แบบคือแบบไม่มีขอบ (Without rim) แบบมีขอบ 8 มิลลิเมตร และแบบมีขอบ 13 มิลลิเมตร

ที่มา: H. Ning et al. (2017)

H. Ning et al. (2017) ศึกษาการออกแบบและการสร้างหมวกกันน็อคทหารโดยใช้วัสดุพลาสติกแบบ Long fiber thermoplastic (LFT) ที่มีการเสริมเส้นใยคาร์บอนเพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของเปลือกหมวก ในการศึกษาครั้งนี้ยังศึกษาถึงกรรมวิธีการขึ้นวัสดุรองในหมวกโดยได้แบ่งลักษณะของหมวกเป็น 3 แบบคือแบบไม่มีขอบ (Without rim) แบบมีขอบ 8 mm (8 mm deep rim) และแบบมีขอบ 13 mm (13 mm deep rim) ดังภาพที่ 2.36 ในการทดสอบยังเลือกแบบของพลาสติกรองในเปลือกหมวกเป็น 4 แบบ แบ่งเป็น Pattern A Pattern B Pattern C และ Pattern D ดังภาพที่ 2.37 โดยจะทำการกดขึ้นส่วนรองในเปลือกหมวกที่น้ำหนัก 450 N



ภาพที่ 2.37 พลาสติกรองในเปลือกหมวกเป็น 4 แบบ แบ่งเป็น Pattern A, Pattern B, Pattern C และ Pattern D

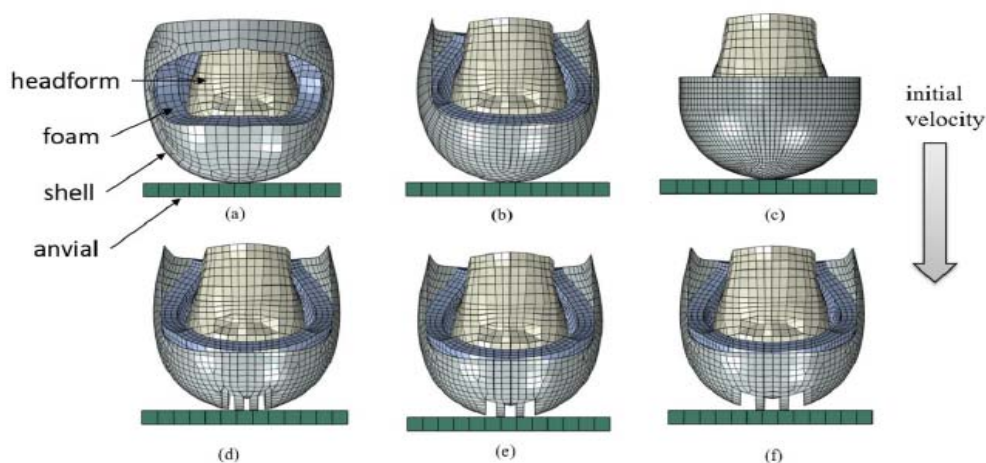
ที่มา: H. Ning et al. (2017)

โดยจากการศึกษาพบว่าชิ้นส่วน Pattern C เป็นชิ้นส่วนที่มีความทนทานต่อแรงกดมากที่สุด โดยพบว่าแบบมีขอบ 13 mm สามารถต้านทานต่อการโก่งตัวได้มากกว่าแบบไม่มีขอบถึง 60% ในด้านน้ำหนักพบว่าถ้าน้ำหนักของเปลือกหมวกมีความแตกต่างกันเล็กน้อยกับแบบที่มีชายตามท้องตลาด ในส่วนรองหมวกภายในเมื่อใช้วัสดุวัสดุประกอบที่มีการเส้นใยแก้ว (Long fiber thermoplastic: LFT) จะมีน้ำหนักมากกว่าเดิม 40% และสุดท้ายการทดสอบเมื่อนำรองในเปลือกหมวกมาใส่กับเปลือกหมวกนั้นพบว่ามีความทนทานต่อการโก่งตัวมากขึ้นถึง 67% เมื่อน้ำหนักมีเพิ่มขึ้น 20% ในงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์ผลของการทดลองว่าสอดคล้องกับการทดสอบโดยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์อีกด้วย

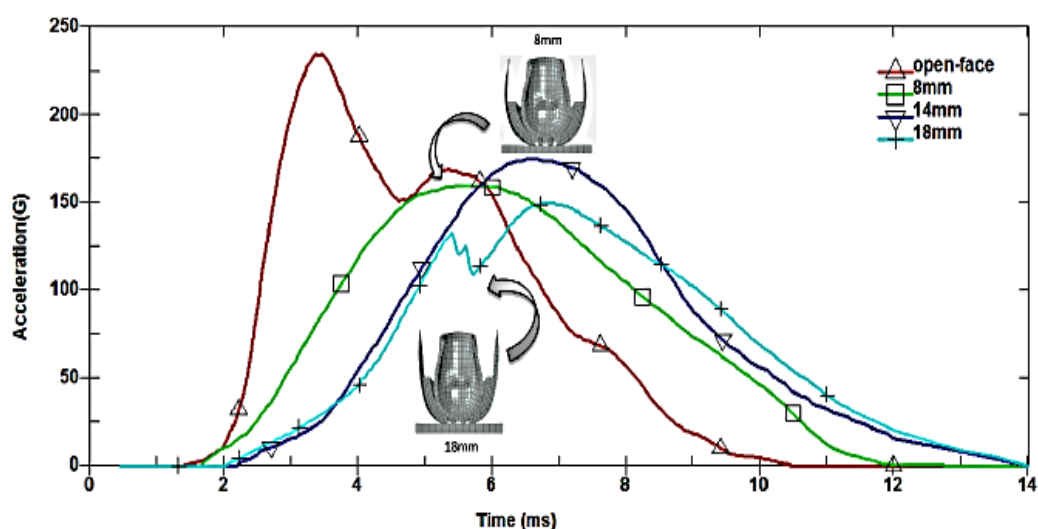
S. Gupta et al. (2017) ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสมอง คือโรคเลือดออกในสมอง เมื่อเกิดอุบัติเหตุในการใช้รถจักรยานยนต์ในประเทศกัมพูชา โดยได้ทำการศึกษาลงถึงโอกาสที่จะเกิดเลือดออกในสมองของผู้ประสบอุบัติเหตุในช่วงเดือน พฤศจิกายน ค.ศ. 2013–มีนาคม ค.ศ.2016 พบว่าการเกิดอุบัติเหตุโดยไม่สวมหมวกกันน็อคมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเลือดคั่งในสมองมากกว่าการสวมหมวกกันน็อค โดยผู้ประสบอุบัติเหตุที่ไม่สวมหมวกกันน็อคบาดเจ็บเล็กน้อยถึง 43.7% บาดเจ็บสาหัสที่ต้อง

ผ่าตัดสมอง 39.6% สูงกว่าผู้ประสบอุบัติเหตุที่สมองใส่หมวกกันน็อก โดยผู้ที่สมองใส่หมวกกันน็อกมีอาการบาดเจ็บเล็กน้อย 11.8% บาดเจ็บสาหัสที่ต้องผ่าตัดสมอง 16.7%

De-shin Liu and Yao-Te Chen (2017) ทำการศึกษาแบบจำลองของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้าที่มีการเจาะช่องในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทำการศึกษาลักษณะการกระแทกโดยวิธีการกระแทกแบบ Drop Test เพื่อทดสอบหาความเร่งของการกระแทก โดยใช้ความเร็วของการกระแทกที่ 598.9 m/s โดยช่องมีความยาวของช่องที่ 150 mm ความกว้างขนาด 8, 14, และ 18 mm ดังภาพที่ 2.38 ในส่วนของแบบจำลองนั้นผู้วิจัยได้ทำการเลือกหมวกกันน็อกที่มีเปลือกหมวกผลิตจากวัสดุ ABS Plastics ส่วนโพนัด้านในนั้นทำด้วยวัสดุโพนัด EPS โดยวัสดุที่ใช้ในการใส่คุณสมบัติในแบบจำลอง



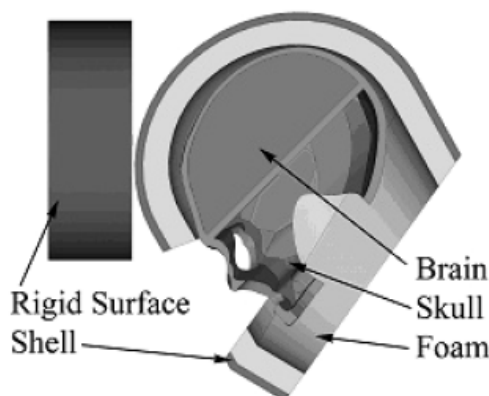
ภาพที่ 2.38 แบบจำลองในงานวิจัยของของ De-shin Liu และ Yao-Te Chen
ที่มา: De-shin Liu and Yao-Te Chen (2017)



ภาพที่ 2.39 ผลการศึกษาแบบจำลองหมวกที่มีการเจาะช่อง
ที่มา: De-shin Liu and Yao-Te Chen (2017)

จากภาพที่ 2.39 ผลการศึกษาแบบจำลองพบว่าในการเปรียบเทียบในส่วนของหมวกกันน็อคที่ยังไม่ได้ทำการเจาะร่อง หมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีค่าความแรงของการกระแทกอยู่ที่ 197 g ส่วนหมวกแบบเต็มใบจะมีค่าความแรงอยู่ที่ 235 g และหมวกแบบครึ่งใบจะมีค่าความแรงอยู่ที่ 303 g หากมองในด้านเฉพาะหมวกกันน็อคแบบเต็มใบที่มีการเจาะร่องกับหมวกที่ไม่ได้มีการเจาะร่องพบว่าหมวกที่มีการเจาะร่อง 8 mm จะมีค่าความแรงสูงสุดอยู่ที่ 160 ส่วนหมวกที่มีการเจาะร่องขนาด 14 mm และ 18 mm จะมีค่าความแรงสูงสุดอยู่ที่ 175 และ 150 g ตามลำดับ

Afshari and Rajaai (2008) ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นภายในสมองที่มีผลเนื่องจากการกระแทกของศีรษะในกรณีที่มีมนุษย์ไม่สวมใส่หมวกกันน็อคเปรียบเทียบกับกรณีที่มีมนุษย์สวมหมวกกันน็อคโดยการศึกษาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ผลของความเร่ง ความเค้น แรงดันภายในศีรษะจำลอง โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์แบบจำลองดังภาพที่ 2.40 ความเร็วในการกระแทกที่ 8.28 m/s

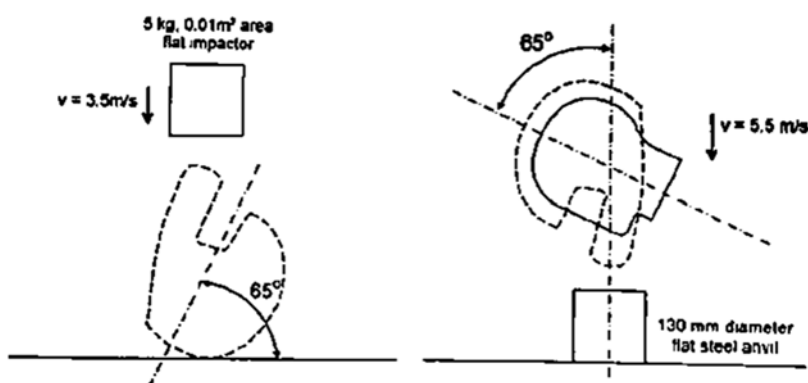


ภาพที่ 2.40 ลักษณะการกระแทกของศีรษะที่ใช้ในงานวิจัยของ Afshari and Rajaai
ที่มา: A. Afshari and S.M. Rajaai (2008)

จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ไม่ได้สวมหมวกกันน็อคจะมีค่าความแรงสูงกว่าแบบจำลองที่สวมหมวกกันน็อคโดยกรณีสวมหมวกกันน็อคจะมีค่าความแรงที่เกิดขึ้นที่ 1,180 g ส่วนกรณีไม่สวมหมวกกันน็อคจะมีความแรงที่ 280 g สอดคล้องกับความดันที่เกิดขึ้นภายในสมองที่มีค่าความดันภายในแตกต่างกันสูงสุดที่ 31%

ฐาปนักร ไชยคำภา และเอกชัย ชัยชนะศิริ (2561) ได้ทำการจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบเปิดหน้าสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ยานยนต์ที่บริเวณด้านหน้าของหมวกกันน็อคและทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบการกระแทกจริงกับการจำลองจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในศีรษะทดสอบซึ่งได้จากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกับผลการทดสอบจริง 5.95% ดังนั้นการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกกันน็อคสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางขั้นต้นในการออกแบบหมวกกันน็อคได้ ซึ่งจะ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบหมวกเพื่อมาทดสอบจริงได้

S. F. Khosroshashi, M. Ghajari and U. Galvanetto (2015) ทำการศึกษาการออกแบบกระบังหน้าของหมวกกันน็อค โดยการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยเลือกการทดสอบแบบ Snell M2015 และ ECE 22.05 มาทำการจำลองแบบ 2 วิธีการทดสอบคือการกระแทกที่บริเวณกระบังหน้าโดยตรงกับการกระแทกที่หมวกกันน็อคตกลงมาด้วยความเร็วมากระแทกกับพื้น ดังภาพที่ 2.41 และผู้วิจัยได้ทำการกำหนดความหนาของกระบังหน้าที่ 0.445, 0.465, 0.485, 0.505 และ 0.525 mm โดยใช้โปรแกรม Ls-Dyna ทำการวิเคราะห์หาค่าของ ความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration) ค่าการบาดเจ็บที่ศีรษะ (HIC) และระยะยุบตัวของชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่าความหนาที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความเร่งสูงสุด การบาดเจ็บที่ศีรษะ และระยะยุบตัวของชิ้นงาน มีค่าน้อยลง ในส่วนผลที่ได้จากแบบจำลองก็สามารถที่จะนำไปใช้เพื่อประเมินผลที่เกิดกับการบาดเจ็บที่ศีรษะเป็นหลักในด้านการบาดเจ็บที่อยู่ภายในกะโหลกศีรษะและกระดูกสันหลัง



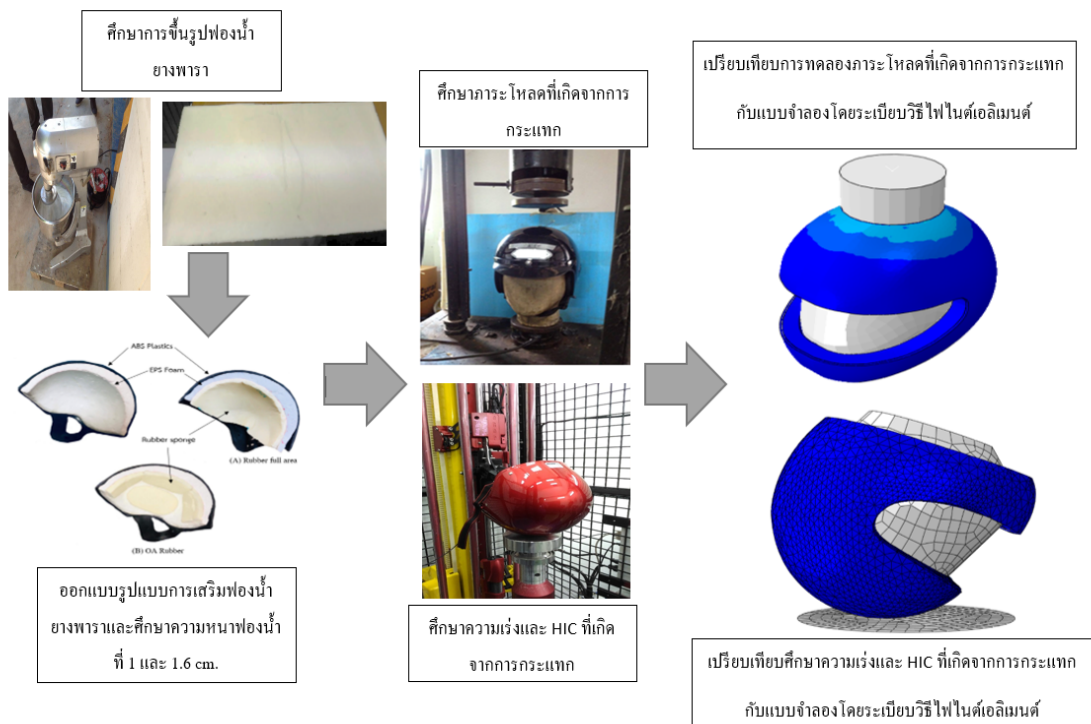
ภาพที่ 2.41 วิธีการทดสอบกระบังหน้าของหมวกกันน็อครถมอเตอร์ไซด์

ที่มา: S.F. Khosroshashi, M. Ghajari and U. Galvanetto (2015)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แนวทางการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ฟองน้ำยางพารามาใช้เพื่อรับแรงกระแทกภายในหมวกกันน็อกสำหรับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ ขั้นตอนการศึกษาจะทดสอบใน 2 ส่วนหลัก ๆ คือการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการและจะนำมาเปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยขั้นตอนของการทดลองนั้นจะทำการเลือกหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้า มาทำการเสริมฟองน้ำยางพาราที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการดันลอยโดยการเสริมฟองน้ำจะเป็นการออกแบบรูปแบบการเสริมฟองน้ำที่ทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้ดีที่สุด อีกทั้งยังศึกษาถึงค่าความหนาของฟองน้ำที่มีผลของภาระโหลดที่เกิดจากแรงกระแทก ส่วนอีกหนึ่งการทดลองคือการทดสอบแรงกระแทกเพื่อศึกษาผลของค่าความเร่งและการบาดเจ็บที่ศีรษะ (HIC) ตามมาตรฐานของหมวกกันน็อกที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ส่วนในด้านการทดลองโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) จะทำการสร้างแบบจำลองหมวกกันน็อกและทำการศึกษาวิเคราะห์ในโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองจริงและการสร้างแบบจำลอง ซึ่งรายละเอียดของงานวิจัยนี้จะแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษางานวิจัย

3.2 การเลือกประเภทหมวกกันน็อกและศีรษะจำลอง

3.2.1 หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

หมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ เป็นหมวกรูปครึ่งทรงกลมที่ปิดด้านข้างและด้านหลังศีรษะเสมอระดับหูของผู้ขับขี่ หมวกชนิดนี้สามารถป้องกันได้เฉพาะศีรษะส่วนบนเท่านั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกขนาดของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบเส้นรอบศีรษะที่ 54 cm และความสูงของหมวกกันน็อกอยู่ที่ 18 cm ความหนาของพลาสติกอยู่ 4 mm และความหนาของโฟมภายในหมวกกันน็อก 27 mm โดยสามารถดูรูปแบบของหมวกได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 รูปแบบของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

3.2.2 หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ



ภาพที่ 3.3 รูปแบบของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ

หมวกกันน็อกแบบเต็มใบ เป็นหมวกรูปทรงกลมปิดด้านข้างด้านหลังเสมอแนวขากรรไกรและต้นคอด้านหลังด้านหน้าเปิดเหนือคิ้วลงมาตลอดถึงปลายคางดังภาพที่ 3.3 ขนาดของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดวัดรอบศีรษะจะอยู่ที่ 65 cm ความสูง 25 cm และความหนาของพลาสติก 4 mm ส่วนภายในเปลือกหมวกมีโฟมที่มีความหนาภายในหมวกกันน็อก 27 mm โดยสามารถดูรูปแบบของหมวกได้ดังภาพที่ 3.3

3.2.3 หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

หมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้าจะที่มีความทนทานและทนต่อแรงกระแทกมากที่สุด เนื่องจากวัสดุโฟมความหนาแน่นค่อนข้างมากกว่าหมวกชนิดอื่น ๆ และอีกทั้งยังมีรูปทรงมิดชิดกว่าชนิดอื่น ขนาดของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบที่ใช้ในงานวิจัยนี้วัดรอบศีรษะอยู่ที่ 65 cm ความสูง 30 cm ความหนาของพลาสติก 4.5 mm ความหนาของโฟมภายในหมวกกันน็อก 27 mm โดยมีลักษณะของหมวกเป็นดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 รูปแบบของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

3.2.4 ศีรษะมนุษย์จำลอง

ภาพที่ 3.6 เป็นลักษณะศีรษะจำลองของมนุษย์ในงานวิจัยนี้มีใช้ศีรษะจำลองที่ทำจากไม้ มีลักษณะใกล้เคียงกับศีรษะมนุษย์จริง โดยมีน้ำหนัก 3 kg ขนาดของเส้นรอบศีรษะอยู่ระหว่าง 53 cm และความสูงวัดจากคางถึงหน้าผากจะอยู่ที่ 20 cm ดังภาพที่ 3.5 ซึ่งข้อดีของการใช้ศีรษะจำลองที่คล้ายกับศีรษะมนุษย์จริงคือ เป็นตัววัดหมวกกันน็อกให้หมวกสามารถรับแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพและใกล้เคียงกับลักษณะของการเกิดอุบัติเหตุจริง



ภาพที่ 3.5 ลักษณะศีรษะจำลองในการทดลอง

3.3 การขึ้นรูปฟองน้ำยางพาราโดยกระบวนการดันลอป

การศึกษานี้ใช้การขึ้นรูปฟองน้ำยางพาราด้วยกระบวนการดันลอป กระบวนการผลิตโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติแบบดันลอปนั้นอาศัยหลักการตีน้ำยางให้เกิดฟองอากาศ และใช้สารก่อเจลอย่างช้าๆ ที่มีชื่อว่า โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (sodium silicofluoride) ในการทำให้ฟองเซตตัว กระบวนการดันลอปสามารถประยุกต์ใช้ให้มีต้นทุนที่ต่ำได้และไม่ซับซ้อน

3.3.1 อุปกรณ์ขึ้นรูปฟองน้ำยางพารา

ในการขึ้นรูปฟองน้ำยางพารานั้นจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์และสารเคมีต่าง ๆ เพื่อช่วยในการขึ้นรูปน้ำยางพาราขึ้นให้เป็นฟองน้ำเพื่อใช้รับแรงกระแทก โดยอุปกรณ์และสารเคมีจะประกอบด้วย

ตารางที่ 3.1 สารเคมีควบคุมปฏิกิริยา

สารเคมี-ดิสเพนส์ชัน	หน้าที่
10% แอมโมเนียมโอเลเอต (Ammonium oleate)	สารช่วยให้เกิดฟอง
50% กำมะถัน (sulfur)	สารทำให้ยางคงรูป (แข็ง)
50% แซตดีอีซี (ZDEC)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
50% แซตเอ็มบีที (ZMBT)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
50% ริงสเตย์แอล (Wingstay L)	สารกันยางเสื่อม
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	สารกระตุ้นตัวเร่ง
33% ดีพีจี (DPG)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	สารช่วยให้ฟองจับตัว

3.3.1.1 สารเคมีควบคุมปฏิกิริยา สารเคมีควบคุมปฏิกิริยาของการทำฟองน้ำยางพารา ซึ่งต้องควบคุมปริมาณสารตามสูตร ดังตารางที่ 3.1 และส่งผลต่อคุณภาพของฟองน้ำยางพารา

3.3.1.2 เครื่องชั่งสาร รุ่น BSA (BSA Series Balances) เครื่องชั่งแบบดิจิตอลที่สามารถวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูงตั้งแต่ 0.1 มิลลิกรัม ถึง 8,200 กรัม ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องชั่งสาร รุ่น BSA

3.3.1.3 เครื่องผสมสารเคมี ใช้ในการผสมสารเคมีกับน้ำอย่างให้ผสมเข้ากันในทุกพื้นที่และใช้ในการตีเพื่อให้เกิดฟองยาง มีลักษณะดังภาพที่ 3.7 โดยเครื่องผสมสารเคมีจะสามารถปรับความเร็วได้ 3 ระดับ คือ ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาที และความเร็วรอบ 360 รอบต่อนาที



ภาพที่ 3.7 เครื่องผสมสารเคมี

3.3.1.4 ถาดสำหรับเหน้ำยางครีม เป็นถาดที่ทำจากวัสดุอะลูมิเนียม ดังภาพที่ 3.8 สามารถกระจายความร้อนได้ดีขณะที่ทำการอบฟองน้ำยางพารา



ภาพที่ 3.8 ถาดอะลูมิเนียม

3.3.1.5 ตู้อบความร้อน เป็นตู้อบโดยใช้ไอน้ำให้ความร้อน ดังภาพที่ 3.9 โดยการอบฟองน้ำยางจะอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.9 ตู้อบความร้อน

3.3.2 สูตรคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น (% phr)

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น % phr (Parts per hundred of rubber) คือหน่วยการผสมยาง โดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่าง ๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วนใช้ในการออกสูตรยาง เช่น เติมสารกำมะถัน 2.5 phr หมายความว่าถ้าใช้น้ำยาง 100 ส่วน จะเติมกำมะถัน 2.5 phr ส่วนโดยสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1) ดังต่อไปนี้

$$\% \text{ สารเคมีที่ใช้จริง} = (\% \text{ phr} \times 100) / (\% \text{ ของสารเคมี}) \quad (3.1)$$

ในงานวิจัยนี้จะใช้ปริมาณสารเคมีในการขึ้นรูปฟองน้ำยางพารา ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรน้ำยางชั้น (70%)

สารเคมี	% สารเคมี	% phr	% สารเคมีที่ใช้จริง
1. Ammonium oleate	10	2	20
2. sulfur	50	2	4
3. ZDEC	50	1	2
4. ZMBT	50	1	2
5. Wingstay L	50	1	2
6. DPG	33	2	6.06
7. ZnO	50	5	10
8. SSF	12.5	8	64

3.3.3 การขึ้นรูปยางครีม

การทำยางครีม คือ การใส่สารก่อครีมลงไปในน้ำยางสดทิ้งไว้ 1 - 2 วัน น้ำยางสดจะแยกออกเป็น 2 ชั้น คือชั้นน้ำยางที่ความเข้มข้นสูงและชั้นที่มีน้ำยางความเข้มข้นต่ำหรือที่เรียกว่า หางน้ำยาง ซึ่งวิธีการทำยางครีมนำน้ำยางครีมทำได้โดยมาผสมกับกำมะถัน สารตัวเติม สารตัวเร่ง สารตัวกระตุ้นและสารป้องกันน้ำยางเสื่อมสภาพ จะได้เป็นน้ำยางครีมหรือน้ำยางคอมปาวด์ จากนั้นจะนำน้ำยางครีมมาทำการผสมสารเคมี เพื่อที่จะขึ้นรูปเป็นฟองน้ำยางพาราโดยจะมีวิธีการขึ้นรูปดังต่อไปนี้

สูตรใช้ในการทำยางครีม ในงานวิจัยนี้จะคำนวณจากน้ำยางชั้นที่ 1,000 กรัม โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2) และ (3.3)

$$\% \text{ ยางครีม} = \frac{\% \text{ น้ำยางชั้น}}{\% \text{ สารเคมีทั้งหมด}} \quad (3.2)$$

$$\% \text{ ของสารที่ใช้จริง} = \% \text{ ของสารที่ใช้} \times \% \text{ ยางครีม} \quad (3.3)$$

ตัวอย่างการคำนวณ เช่น

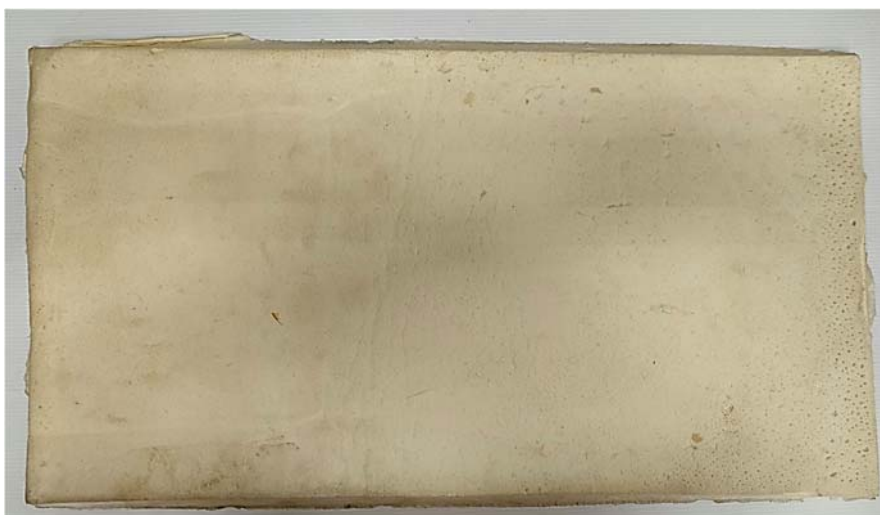
$$\text{หา } \% \text{ ยางครีม} = 1,000 = \frac{4.8 \%}{210.07}$$

$$\text{หา } \% \text{ ของยางน้ำชั้น} = 167.4 \times 4.8 = 803.52 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ขึ้นรูปฟองน้ำยางพารา

สารเคมี	% ของสารที่ใช้ / น้ำหนัก 1,000 กรัม	% ของสารที่ใช้จริง / น้ำหนัก 1,000 กรัม
1. น้ำยางชั้น	167.40	803.52
2. K-oleale	10.18	48.86
3. Sulfer	5.05	24.24
4. ZMBT	2.04	9.79
5. ZDEC	2.07	9.94
6. Wingstay l	2.54	12.19
7. DPG	3.49	16.75
8. ZnO	15.04	72.19
9. SSF	2.26	10.848

ในตารางที่ 3.3 แสดงถึงปริมาณเต็มสารเคมีที่ใช้จริงต่อด้วยน้ำหนักรวมของสารเคมีทั้งหมด 1,000 กรัม โดยหลังจากการผ่านกระบวนการผสมสารเคมีในเครื่องผสมสารเคมีตามขั้นตอนดังขั้นตอนในภาพที่ 2.13 แล้ว จะนำไปอบด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเพื่อให้ได้ฟองน้ำยางพารา ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ลักษณะฟองน้ำยางพารา

3.4 ลักษณะของหมวกกันน็อคที่เสริมวัสดุฟองน้ำยางพารา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งลักษณะในการนำฟองน้ำยางพาราเข้ามาเสริมเป็น 2 ลักษณะโดยในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า แบบแผ่นวงกลมขนาดเล็กและแบบคลุมทั้งพื้นที่ โดยในการเสริมแผ่นฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่จะเสริมที่ความหนา 1 cm (ภาพที่ 3.11 (ก)) และ 1.6 cm (ภาพที่ 3.11 (ข)) โดยจะนำมาทดสอบการกระแทกของหัวค้อนที่ความสูง 1.2, 1.5, 1.8 และ 2.0 m โดยเมื่อเสริมฟองน้ำยางพาราจะมีลักษณะ ดังภาพที่ 3.11 (ค)



(ก) เสริมฟองน้ำ 1 cm



(ข) เสริมฟองน้ำ 1.6 cm

ภาพที่ 3.11 การเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่



(ค) ลักษณะการผ่าครึ่งของหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่

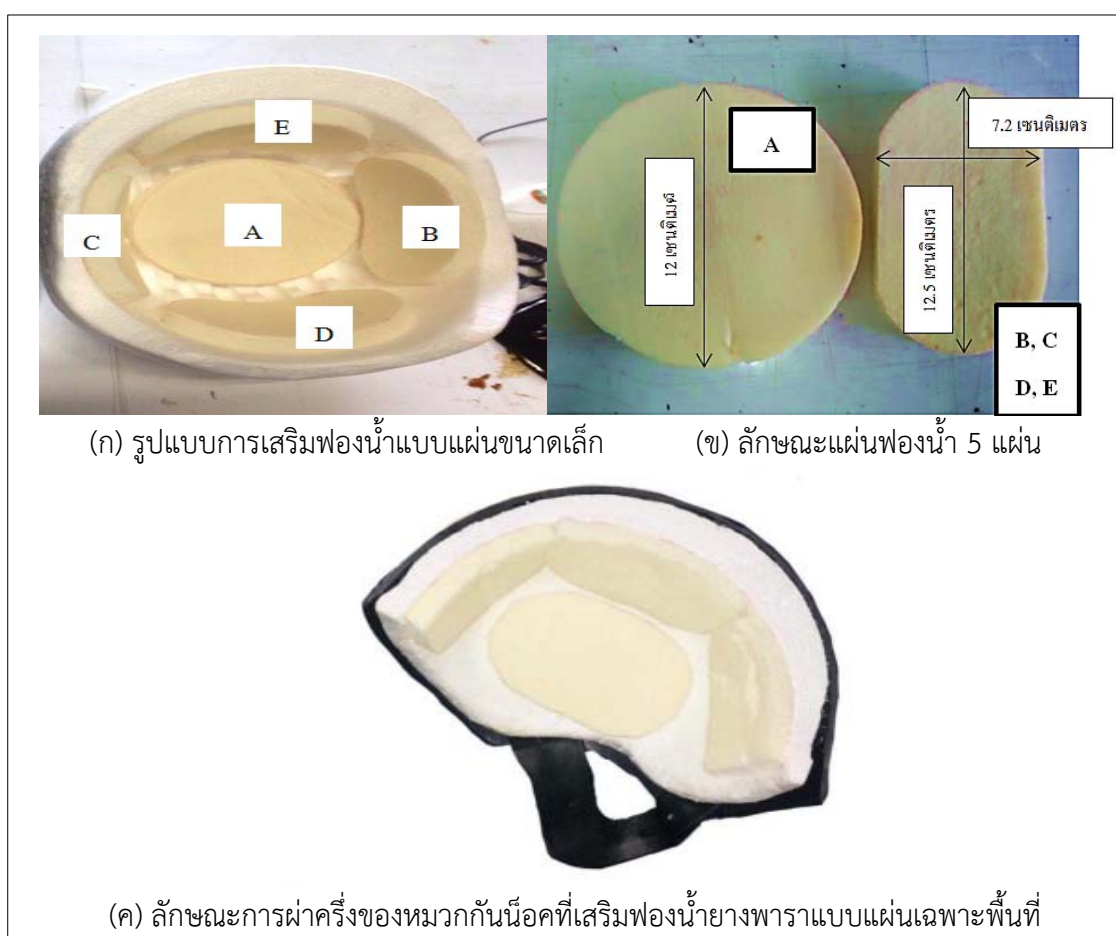
ภาพที่ 3.11 การเสริมฟองน้ำอย่างพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ (ต่อ)

ตารางที่ 3.4 จำนวนรูปแบบหมวกกันน็อคเสริมฟองน้ำอย่างธรรมชาติแบบคลุมทั้งพื้นที่ทำการทดสอบ

ประเภทหมวกกันน็อค เต็มใบ	จำนวนครั้งที่ทดสอบ/ความหนาของแผ่นยางที่ใช้เสริม			
	ไม่เสริม	ความหนา 1 เซนติเมตร	ความหนา 1.6 เซนติเมตร	ความสูงของการ ปล่อยหัวค้อน
 หมวกกันน็อคที่เสริม ฟองน้ำอย่างพารา แบบคลุมทั้งพื้นที่	ทำการ ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง	ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง	ทำการทดสอบ ซ้ำ 3 ครั้ง	1.2 1.5 1.8 และ 2 เมตร
 หมวกกันน็อคที่เสริม ฟองน้ำอย่างพารา แบบแผ่นเฉพาะพื้นที่		ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง	ทำการทดสอบ ซ้ำ 3 ครั้ง	1.2 1.5 1.8 และ 2 เมตร

ทั้งนี้ลักษณะของหมวกกันน็อคแต่ละชนิดและเงื่อนไขการทดลองในกรณีของการเสริมแผ่นฟองน้ำยางพาราแบบเต็มทั้งพื้นที่ที่สรุปและแสดงในตารางที่ 3.4

ในส่วนการทดสอบหมวกกันน็อคที่เสริมวัสดุฟองน้ำยางพาราแบบแผ่นวงกลมขนาดเล็กเฉพาะพื้นที่ก็ได้มีการเสริมที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm โดยใช้แผ่นที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟองน้ำ 5 แผ่นเสริมภายในหมวกกันน็อคดังภาพที่ 3.12 (ก) ส่วนขนาดของแผ่นฟองน้ำที่ได้ทำการเสริมจะมีขนาดแผ่น ดังภาพที่ 3.12 (ข) และสามารถดูลักษณะการเสริมแผ่นฟองน้ำยางพาราได้จากภาพที่ 3.12 (ค)



ภาพที่ 3.12 การเสริมฟองน้ำยางพาราแบบแผ่นเฉพาะพื้นที่

3.5 การทดสอบแรงกระแทกและความเร่งจากการกระแทก

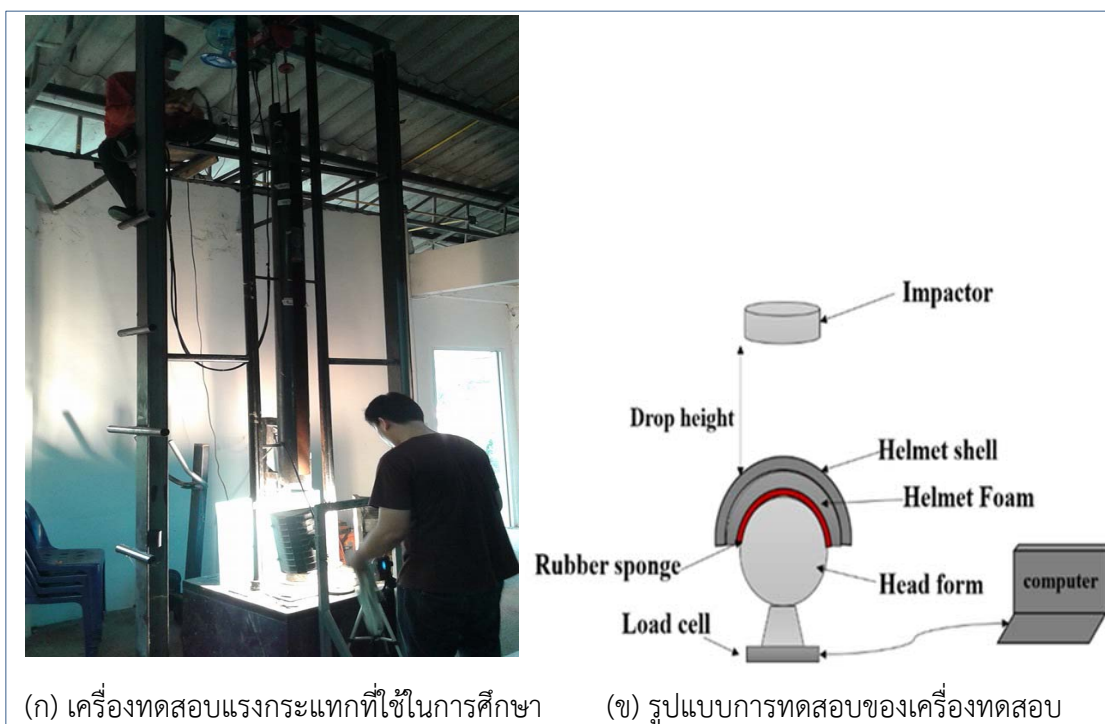
3.5.1 เครื่องทดสอบการกระแทก (Impact Testing Machine)

เครื่องทดสอบการกระแทกที่ใช้ในการศึกษาทดลองนี้มีความสูงอยู่ที่ 2.49 m ดังแสดงในภาพที่ 3.13(ก) ซึ่งมีอุปกรณ์ประกอบด้วยหัวค้อนที่สามารถปรับระดับความสูงต่าง ๆ ได้ และปล่อยให้ตกลงมาอย่างอิสระเพื่อให้กระทบกับตำแหน่งชิ้นงานฐานด้านล่างของเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2.13 (ข) ซึ่งหัวค้อนสามารถปรับเปลี่ยนมวลได้ตั้งแต่ 3-60 kg โดยในการทดลองนี้จะใช้น้ำหนักหัวค้อนที่ 10 kg มาทดสอบการกระแทกในหมวกกันน็อคทุกกรณี

การทดสอบแรงกระแทกจะเป็นการนำหมวกกันน็อกที่ไม่เสริมพองน้ำยางพาราและหมวกกันน็อกที่ได้ทำการเสริมพองน้ำยางพาราเข้าไปภายในหมวกกันน็อกเรียบร้อยแล้ว ขนาดความหนา 1 cm และ 1.6 cm มาทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงกระแทก ที่ความสูง 1.2 ($V = 4.42 \text{ m/s}$) 1.5 ($V = 5.42 \text{ m/s}$) 1.8 ($V = 5.94 \text{ m/s}$) และ 2 m ($V = 6.26 \text{ m/s}$) โดยจะแบ่งหมวกกันน็อกออกเป็น 5 ประเภทคือ หมวกที่ไม่ได้ทำการเสริมพองน้ำ (H1) หมวกเสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งศีรษะ 1 cm (H2) หมวกเสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งศีรษะ 1.6 cm (H3) หมวกเสริมพองน้ำแบบแผ่นวงกลมขนาดเล็ก 1 cm (H4) หมวกเสริมพองน้ำแบบแผ่นวงกลมขนาดเล็ก 1.6 cm (H5) ซึ่งหมวกกันน็อกในแต่ละใบจะทำการทดสอบอย่างละ 3 ครั้ง หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์กราฟ เพื่อศึกษาหาค่าของความสามารถในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อก ผลตกกระทบของหมวกกันน็อกที่นำพองน้ำยางพารามาเป็นวัสดุเสริม และประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นของหมวกหมวกกันน็อกแต่ละประเภท

3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบแรงกระแทก

เครื่องทดสอบการกระแทกที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นหอสูง ดังแสดงในภาพที่ 3.13 (ก) โดยหอสูงนี้มีความสูง 2.49 m มีอุปกรณ์ติดตั้งหัวค้อนซึ่งสามารถยกขึ้นไปในระดับความสูงต่าง ๆ ก่อนปล่อยให้ตกอย่างอิสระ (Free falling) เพื่อตกกระทบชิ้นงานด้านล่างที่ฐานด้านล่างของเครื่องดังภาพที่ 3.13 (ข) ได้ติดตั้ง Load Cell เพื่อบันทึกค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกระแทกของชิ้นงานและหัวค้อน โดย Load Cell ดังกล่าวสามารถบันทึกข้อมูลได้ที่ความถี่สูงสุดถึง 10,000 ค่าต่อวินาที หัวค้อนที่ใช้ในการทดสอบสามารถเปลี่ยนน้ำหนักได้ระหว่าง 10 kg



ภาพที่ 3.13 ไตอะแกรมลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing Machine)

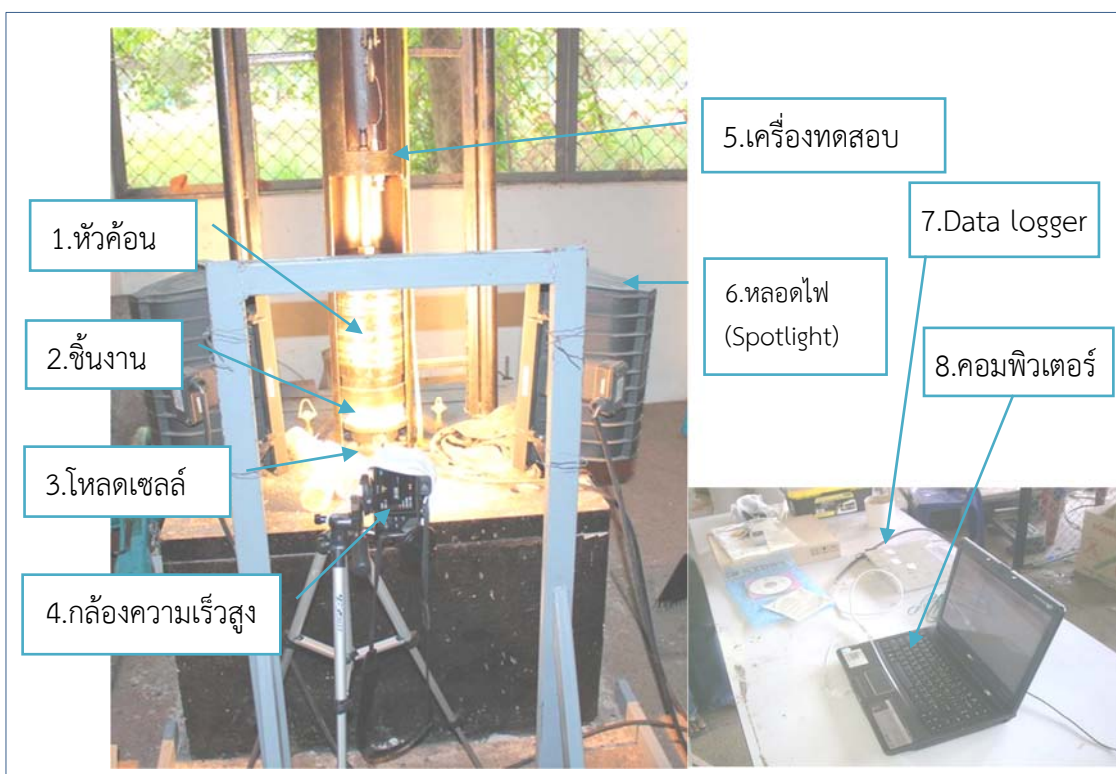
ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรมในการบันทึกข้อมูลที่มีชื่อว่า KYOWA DCS 100A ดังภาพที่ 3.14 โหลดเซลล์ที่ใช้ในการวัดแรงมีความสามารถรับแรงกระทำสูงสุดได้ 200 kN ของ KYOWA Model LC-20TV และอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณของไฟฟ้า คือ Data logger ชนิด PCD-300 Series 47 สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบแรงกระทำมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.2.1 เชื่อมต่อสายโหลดเซลล์เข้ากับ Data logger และต่อสายเคเบิลจาก Data logger เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์

3.5.2.2 ชั่งน้ำหนักของหัวค้อน ทำได้โดยนำหัวค้อนวางบนโหลดเซลล์ จากนั้นเพิ่มหรือลดน้ำหนักที่ต้องการทดสอบ ในการศึกษานี้มีหัวค้อนน้ำหนัก 10 kg

3.5.2.3 ติดตั้งกล้องความเร็วสูง เพื่อใช้ในการบันทึกพฤติกรรมการตอบสนองขึ้นงาน โดยบันทึกเป็นภาพเคลื่อนไหว สำหรับการปรับตั้งค่าในโปรแกรมมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ความละเอียดในการบันทึกภาพเคลื่อนไหว คือ 1,000 fps
- 2) ความเร็วชัตเตอร์ คือ 1,250 ภาพต่อวินาที
- 3) สมดุลแสงสีขาว คือ Manual
- 4) รูรับแสง คือ 5.0
- 5) ความไวแสง คือ 400



ภาพที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเครื่องทดสอบแรงกระทำ

3.5.2.4 ติดตั้งหลอดไฟ (Spotlight) เพื่อเพิ่มความสว่างให้กับชิ้นงาน ในการศึกษาชิ้นใช้หลอดไฟขนาด 1500 วัตต์ ทั้งหมด 2 หลอด

3.5.2.5 ขั้นตอนการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ดึงหัวค้อนด้วยรอกมอเตอร์ไฟฟ้า ตามความสูงที่ต้องการทดลอง สำหรับในการศึกษาชิ้นใช้ความสูงระหว่างปลายชิ้นงานและปลายหัวค้อนเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 m
- 2) วางชิ้นงานในระดับกึ่งกลาง บนฐานรองรับแรงกระแทก
- 3) ปลดปล่อยหัวค้อนกระแทกต่อชิ้นงาน
- 4) บันทึกกราฟในช่วงระหว่างกระแทกจากโปรแกรม
- 5) บันทึกภาพเคลื่อนไหวด้วยกล้องความเร็วสูง
- 6) วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.5.3 เครื่องทดสอบความแรงของการกระแทก (Impact absorption testing machine)

เครื่องทดสอบความแรงของการกระแทกของหมวกกันน็อค สำหรับหมวกกันน็อคที่ทำการเสริมวัสดุฟองน้ำยางพาราแล้วจะนำมาทดสอบหาค่าของผลกระทบทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงและเวลากับค่าของ HIC โดยจากภาพที่ 3.15 เป็นชุดทดสอบการดูดกลืนแรงกระแทก (Impact absorption testing machine) จากห้องปฏิบัติการของศูนย์ทดสอบยานยนต์ สถาบันยานยนต์ ซึ่งสามารถทดสอบหมวกกันน็อคตามแบบการทดสอบของมาตรฐาน ECE 22.05 โดยวิธีการทดสอบคือจะนำหมวกกันน็อคสวมศีรษะจำลอง แล้วปล่อยลงมาในแนวตั้งที่ความสูงประมาณ 3.00 m เพื่อให้กระแทกบนแท่นทดสอบแบบเรียบที่ความเร็ว 7.67 m/s ในกรณีหมวกแบบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้า ส่วนความเร็วในการกระแทก 5.94 m/s ใช้กับหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบจากนั้นจะแสดงผลของความแรงออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.15 ชุดทดสอบการดูดกลืนแรงกระแทก

3.5.4 ขั้นตอนการทดสอบความแรงจากการกระแทก

การทดสอบความแรงจากการกระแทกจะเป็นการนำหมวกกันน็อกที่ไม่เสริมฟองน้ำยางพาราและหมวกกันน็อกที่ได้ทำการเสริมฟองน้ำยางพาราเข้าไปภายในหมวกกันน็อกเรียบร้อยแล้ว ขนาดความหนา 1 cm และ 1.60 cm มาทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงกระแทก ที่ความสูง 3 m โดยจะแบ่งหมวกกันน็อกคือหมวกกันน็อกเต็มใบ ซึ่งหมวกกันน็อกในแต่ละใบจะทำการทดสอบอย่างละ 3 ครั้ง ซึ่งรวมทั้งหมดสิ้น 45 กรณี คือทดสอบบริเวณกระแทกด้านหน้า หลังจากนั้นจะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์กราฟ เพื่อศึกษาหาค่าของความสามารถในการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อก ผลตกกระทบของหมวกกันน็อกที่นำฟองน้ำยางพารามาเป็นวัสดุเสริม และประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นของหมวกกันน็อกแต่ละประเภท โดยวิธีการทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.5.4.1 การกระแทกบริเวณด้านหน้า

1) เตรียมหมวกกันน็อกที่ใช้ในรถจักรยานยนต์แบบเต็มใบ โดยทำการตรวจสอบและเช็คจุดที่จะทำการกระแทกให้เป็นจุดเดียวกันทุกใบ ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 การเช็คจุดที่จะทำการกระแทก

2) นำมาสวมใส่ที่ศีรษะจำลองที่ใช้ในการรับแรงกระแทก โดยปรับให้ศีรษะจำลองที่สวมหมวกทำการกระแทกที่มุม 35° เพื่อเตรียมการกระแทก ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 การปรับให้ศีรษะจำลองที่สวมหมวกทำการกระแทกที่มุม 35°

3) ใช้คำสั่งให้เครื่องทดสอบยกหมวกขึ้นไปให้ได้ความสูง 3 m ในกรณีหมวกแบบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้า ส่วนหมวกแบบครึ่งใบจะปรับที่ความสูง 1.8 m เพื่อเตรียมการทดสอบ เครื่องจะทำการให้สัญญาณในการทดสอบ ดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 เครื่องทดสอบยกหมวกขึ้นไปให้ได้ความสูง 3 เมตร

5) เมื่อเครื่องทดสอบให้สัญญาณในการพร้อมทดสอบแล้ว ผู้วิจัยจะทำการให้คำสั่งปล่อยหมวกกันน็อคลงมาอย่างอิสระตกลงมากระทบกับพื้น

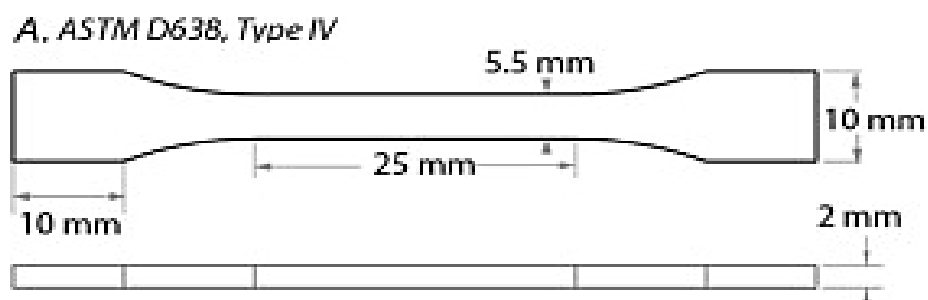
6) คอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลของความเร่งและค่าการบาดเจ็บที่ศีรษะออกมาในรูปของข้อมูลตัวเลข โดยชุดทดสอบที่ใช้จากสถาบันยานยนต์นั้นสามารถบันทึกค่า HIC จากการทดสอบแต่ละครั้งได้โดยบันทึกและแสดงผลแบบอัตโนมัติผ่านคอมพิวเตอร์

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\} \quad (3.4)$$

a = Linear acceleration, t_1, t_2 = Peak Linear acceleration Time, $t_1 < t_2$

3.6 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุของหมวกกันน็อค

เครื่องทดสอบที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมีชื่อว่า Universal Testing Machine Dynamic Type รุ่น Instron 5567A ความสามารถในการกด 100 kN ดังแสดงในภาพที่ 3.20 จากห้องปฏิบัติการทดสอบคณะวิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งหลักการทำงานของเครื่อง โดยใช้แรงดันน้ำมันในการขับเคลื่อนกดหัวทดสอบให้เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดแรงกระทำบนชิ้นงานภายใต้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม แรงที่เกิดขึ้นจะถูกวัดโดยโหลดเซลล์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบจะถูกวัดโดยระยะการเคลื่อนที่ของ Actuator หรือ Extensometer ลักษณะของชิ้นงานที่ต้องเตรียมก่อนทำการทดสอบจะมีรูปร่างคล้ายกับดัมเบล โดยมีขนาดดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 ลักษณะและขนาดของชิ้นงานที่เตรียมก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงของวัสดุ



(ก) เครื่องทดสอบแรงดึง

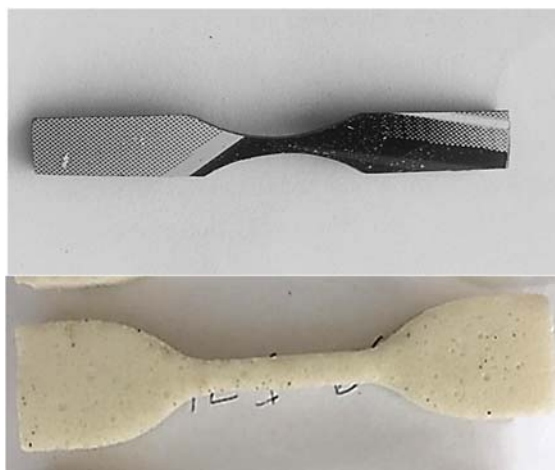


(ข) การจับยึดชิ้นงาน

ภาพที่ 3.20 ชุดทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ในขั้นของการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในงานวิจัยนี้ จะเป็นการเตรียมชิ้นงานในการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของเปลือกที่ทำจากพลาสติกชนิด Acrylonitrile butadiene styrene (ABS Plastic) และฟองน้ำยางพาราที่ใช้เสริมในหมวกกันน็อก ทั้ง 3 แบบ แบบครึ่งใบ เต็มใบและเต็มใบปิดหน้า จะทำการตัดชิ้นงานตามมาตรฐาน (ASTM-D638-2010) ให้มีลักษณะดังภาพที่ 3.21(ก) โดยในการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลจะทำการด้วยการดึงตัวชิ้นงานด้วยความเร็ว 50 mm/min เมื่อชิ้นงานขาดจากกันก็จะทำการเก็บผลการทดสอบ เช่น ความเค้นความเครียด วัสดุพลาสติกที่ใช้ทำเปลือกหมวกกันน็อกนั้นผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน ดังตารางที่ 3.5 จากการทดลองพบว่าค่าความเค้นสูงสุดคือ 46.77 MPa และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นคือ 1.983 GPa ส่วนฟองน้ำยางพารานั้นจะมีค่า ค่าความเค้นสูงสุดคือ 0.25 MPa และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นคือ 0.03826 MPa ดังตารางที่ 3.7 ในส่วนของโฟมรองในหมวกกันน็อกนั้นทำจากวัสดุ Expanded Polystyrene Foam (EPS Foam) จะเป็นการเตรียมวัสดุเป็นสี่เหลี่ยมเพื่อจะทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของโฟมโดยจะทำการกดชิ้นงานดังภาพที่ 3.21 (ข) จากนั้นก็ทำการเก็บข้อมูลที่ต้องการ ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับระยะการยืดตัวของชิ้นงาน จากตารางที่ 3.6 การทดสอบพบว่าชิ้นงานสามารถรับภาระต่าง ๆ ดังนี้ Maximum

Compressive load คือ 640.10 N ค่า Compressive Strength คือ 0.42 MPa ค่า Modulus (Young's Modulus) คือ 14.73 MPa และค่า Compressive strain at Break 55.30 %



(ก) การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของเปลือกหอยก้นน็อค



(ข) การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของโฟมหอยก้นน็อค

ภาพที่ 3.21 การเตรียมวัสดุเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติวัสดุของ ABS Plastic

Property	Description	Value
ρ	Density (kg/m ³)	1500
E	Young's modulus (GPa)	1.983
ν	Poisson's ratio	0.3

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติวัสดุของ EPS Foam

Description	Value
Density (kg/m ³)	150
Modulus (Young's Modulus) (MPa)	21.09
Compressive strength (MPa)	4.20
Maximum Compressive load (N)	1050.72
Compressive strain at Break (Standard) (mm/mm)	0.936

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติวัสดุของฟองน้ำยางพารา

Property	Description	Value
ρ	Density (kg/m ³)	100
E	Young's modulus (MPa)	0.03826
ν	Poisson's ratio	0.4

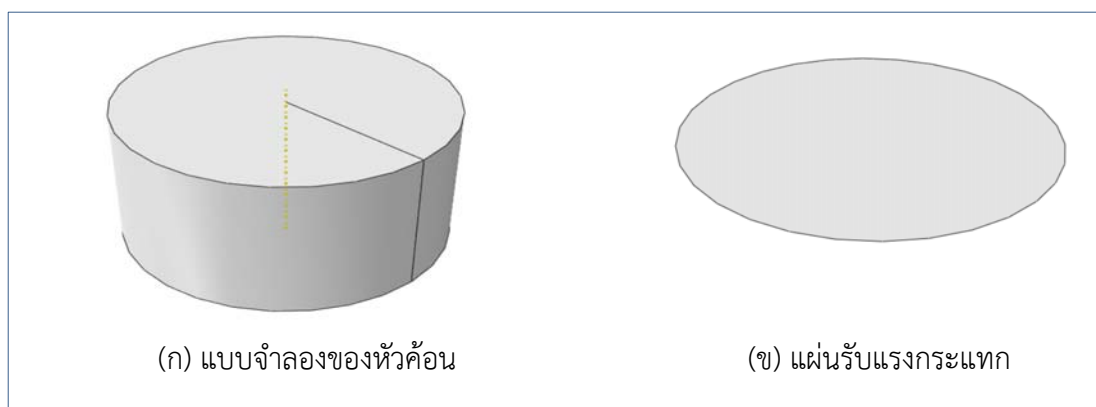
3.7 การสร้างแบบจำลองหมวกกันน็อคเพื่อการศึกษาแบบจำลองทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำยางพาราโดยจะทำการศึกษาผลจากแบบจำลองทาง FEA เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง จากนั้นจะนำผลจากการสร้างแบบจำลองไปขยายผลต่อไปเพื่อให้ได้รูปแบบของหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำยางพาราที่สามารถรับแรงกระแทกสูง ทั้งนี้ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองทำได้โดยการสร้างหมวกกันน็อคในโปรแกรม Solid works ให้มีขนาดเหมือนกับชิ้นงานจริง ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2 โดยจะทำการแยกชิ้นส่วนเป็น เปลือกหมวก โฟมรองในและฟองน้ำยางพาราดังแสดงในตัวอย่างของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้าที่เสริมด้วยฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบแผ่นวงกลมขนาดเล็กในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 แบบจำลองหมวกกันน็อคแบบเต็มใบที่ใช้ในงานวิจัย

จากภาพที่ 3.22 เป็นตัวอย่างแบบจำลองหมวกกันน็อคแบบเต็มใบที่สร้างและถูกนำมาใช้วิเคราะห์ในโปรแกรม ABAQUS โดยภาพที่ 3.22 (ก) เป็นลักษณะของเปลือกหมวกกันน็อคที่มีความหนา 4 mm โดยในสร้างแบบจำลองเปลือกหมวกจะไม่มีกรวดกระຈกบังหน้าของหมวกกันน็อคเนื่องจากในการทดสอบนั้นผู้วิจัยไม่ได้นำกระຈกนิรภัยมาใส่ในการทดลองจริงด้วย ส่วนภาพที่ 3.22 (ข) เป็นลักษณะของโฟมรองในหมวกกันน็อคซึ่งมีความหนา 27 mm รูปร่างค่อนข้างมีส่วนโค้งมากในบางส่วน ภาพที่ 3.22 (ค) เป็นลักษณะของแผ่นฟองน้ำยางพาราที่มีความคล้ายกับโฟมรองในแต่มีความหนาน้อยกว่า โดยจะกำหนดความหนาของแผ่นฟองน้ำยางที่ 1 และ 1.6 cm ตามรูปแบบที่ใช้ในการทดสอบจริง



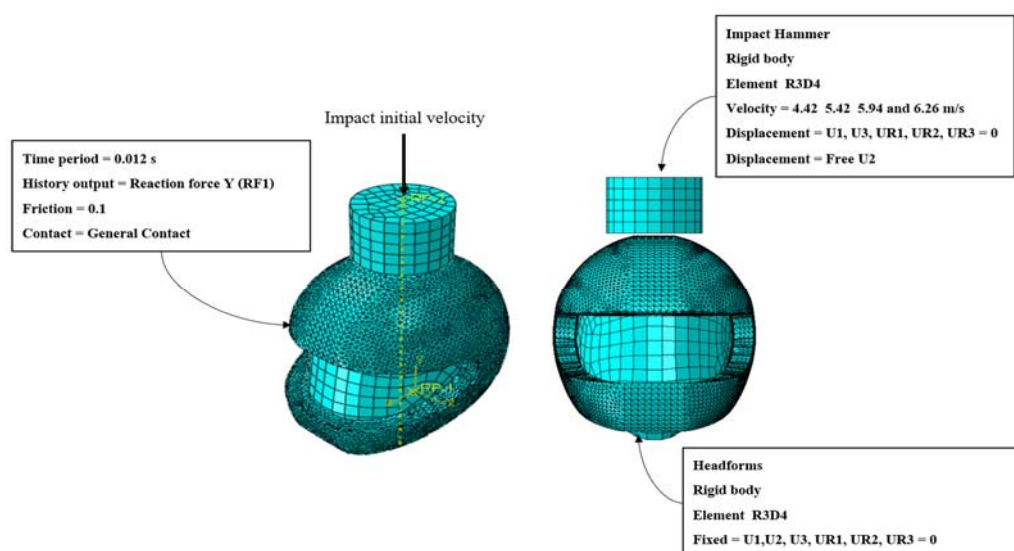
ภาพที่ 3.23 แบบจำลองของวัตถุในการกระแทกและรับแรงของ

เมื่อนำมาใช้ในโปรแกรม ABAQUS แล้วนั้น เนื่องจากการวิเคราะห์แบบจำลองในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบมีวัตถุที่มีความเร็วมากระแทกกับวัตถุที่เราต้องการจะศึกษาหรือในโปรแกรมจะเรียกว่า Dynamic/Explicit โดยจะต้องสร้างแบบจำลองของวัตถุ (หัวค้อน) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm ความสูง 100 mm ดังภาพที่ 3.23 (ก) และแผ่นรับแรงกระแทกได้วัตถุที่เราจะศึกษา โดยมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 500 x 500 mm ดังภาพที่ 3.23 (ข) ส่วนขั้นตอนในการวิเคราะห์จะแบบจำลองจะทำการวิเคราะห์ 2 รูปแบบการจำลองคือวิเคราะห์แบบจำลองในกรณีที่หัวค้อนตกลงมากระแทกกับศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อคโดยใช้ความเร็วการกระแทกที่ $V = 4.42, 5.42, 5.94$ และ 6.26 m/s โดยคำนวณจากความสูงของเสาในการกระแทกและใช้สมการ $V = \sqrt{2gh}$ โดยที่ค่า $g = 9.81$ m/s² และใช้ความสูง $h = 1.2, 1.5, 1.8$ และ 2 m ตามลำดับ โดยรูปแบบของการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลของภาระโหลดจากการทดลองและการสร้างแบบจำลอง ส่วนอีกหนึ่งกรณีคือจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองศีรษะที่สวมหมวกกันน็อคตกลงมากระแทกกับพื้นที่มีความเร็ว 7.67 m/s ในกรณีหมวกแบบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้า ส่วนความเร็วในการกระแทก 5.94 m/s ใช้กับหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ เพื่อเปรียบเทียบผลของค่าความเร่งจากการกระแทกและค่า HIC ระหว่างการทดลองและแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดของการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

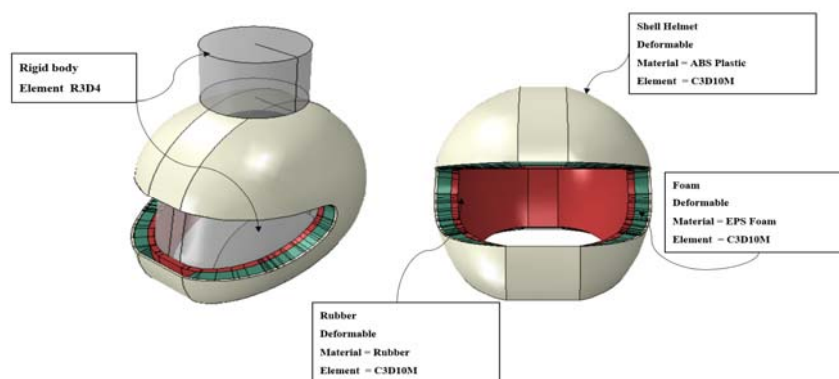
3.7.1 การวิเคราะห์แบบจำลองหมวกกันน็อคในกรณีการทดสอบการกระแทก (Impact Load)

ในการศึกษาแบบจำลองหมวกกันน็อคกรณีนี้ที่หัวค้อนตกลงมากระแทกกับศีรษะจำลองที่สวมหมวกกันน็อคโดยใช้ความเร็วการกระแทกที่ $V = 4.42, 5.42, 5.94$ และ 6.26 m/s จำใช้การวิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS.CAE โดยการจำลองนั้นจะใช้วิธีการอ้างอิงรูปแบบและลักษณะของ

การทดลองที่ห้องปฏิบัติการ โดยจากภาพที่ 3.24 เป็นการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยกำหนดให้หัวค้อนที่ถูกกำหนดให้เป็นของแข็ง (Rigid body) นั้นตกลงในแนวแกน Y (Free U2) ที่มีการกำหนดน้ำหนักที่ 10 kg มากระทบกับศีรษะจำลองที่เป็นของแข็ง (Rigid body) ที่สวมแบบจำลองหมวกกันน็อก โดยจะกำหนดให้ศีรษะจำลองนั้นไม่เกิดการเคลื่อนที่ใด ๆ ($U1, U3, UR1, UR2, UR3 = 0$) ในการศึกษาจะกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานของผิวสัมผัสของชิ้นงานนั้นมีค่าเท่ากับ 0.1 และจะเก็บผลของภาระโหดจากการกระทบที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของศีรษะจำลองที่จุด RF1 ภาพที่ 3.25 เป็นลักษณะ Mesh และขนาด Mesh ของวัสดุในแบบจำลอง โดยหัวค้อนและศีรษะจำลองจะทำการกำหนด Mesh เป็นรูปแบบ 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral (R3D4) ขนาด 20 mm เนื่องจากการกำหนดรูปแบบของของแข็งเกร็งนั้นในโปรแกรมจะไม่คิดการเสียหายของวัตถุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ Mesh ที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์แบบจำลอง ส่วนในกรณีของเปลือกหมวก โฟมรองใน และฟองน้ำยางพาราจะถูกกำหนดให้เป็น Deformable โดยมีรูปแบบของ Mesh เป็นแบบ 10-node modified quadratic tetrahedron (C3D10M) ทั้ง 3 วัสดุส่วนขนาดของ Mesh ของเปลือกหมวก โฟมรองใน และฟองน้ำยางพารา จะใช้ขนาด Mesh ที่ 10 mm สาเหตุของการกำหนด Mesh แบบ C3D10M ซึ่งเป็นลักษณะ node แบบ quadratic ที่สามารถวิเคราะห์แบบจำลองที่มีลักษณะความโค้งของวัสดุได้ดีกว่า node แบบอื่น ๆ หากพิจารณาที่เปลือกหมวก โฟมและฟองน้ำยางพาราจะพบว่าวัสดุนี้มีความโค้งตามรูปลักษณะของศีรษะ ฉะนั้นการกำหนด Mesh แบบ C3D10M ซึ่งเป็นลักษณะ node แบบ quadratic จะช่วยลดปัญหาวิเคราะห์ผลของโปรแกรมได้ดีที่สุด การตั้งนี้การกำหนดขนาดนั้นจะพิจารณาตามความเหมาะสมของขนาดชิ้นงานและเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์



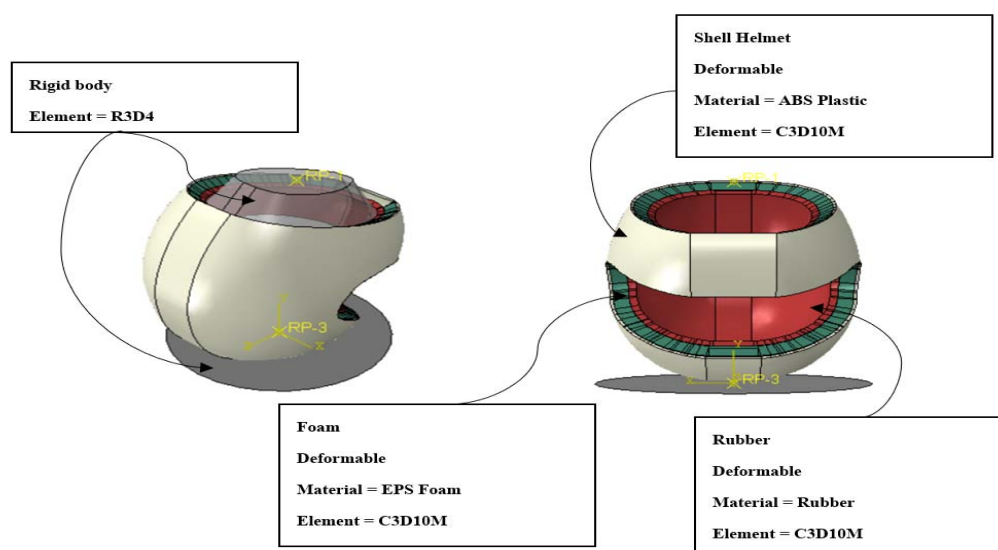
ภาพที่ 3.24 การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบจำลองกรณีการทดสอบการกระทบในกรณีการทดสอบการกระทบ



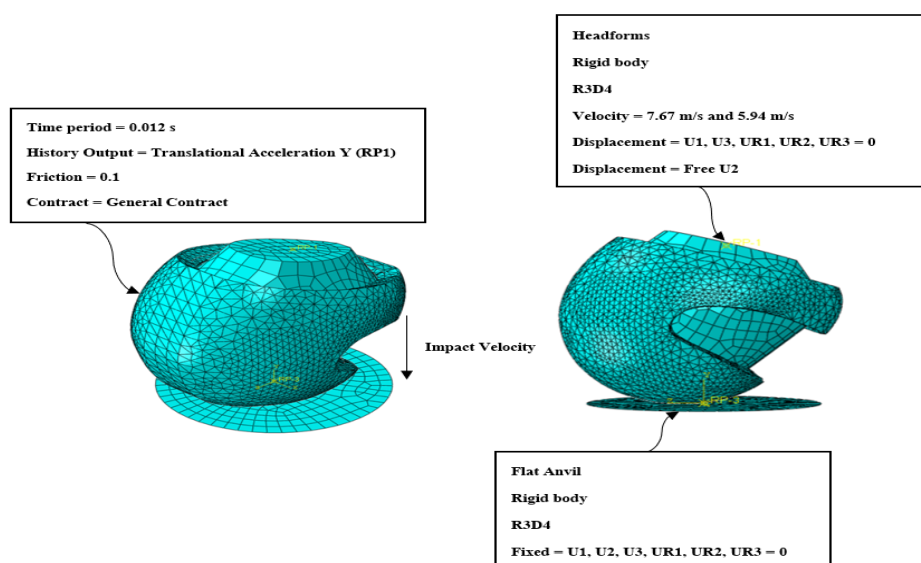
ภาพที่ 3.25 การกำหนดลักษณะ Mesh และรูปแบบของ Mesh ของวัสดุในแบบจำลองในกรณีการทดสอบการกระแทก

3.7.2 การวิเคราะห์แบบจำลองหมวกกันน็อกในกรณีการทดสอบความแรงจากการกระแทก

วิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับ การทดลองจริงนั้น ในส่วนขนาดของ Mesh วัสดุนั้นจะทำการเลือกใช้รูปแบบของ Mesh และขนาดให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการจำลองในกรณีการทดสอบการกระแทกแบบหัวค้อนกระแทกกับศีรษะ โดยเปลือกหมวก โฟมรองใน และฟองน้ำยางพาราจะถูกกำหนดให้เป็น Deformable โดยมีรูปแบบของ Mesh เป็นแบบ 10-node modified quadratic tetrahedron (C3D10M) ทั้ง 3 วัสดุส่วนขนาดของ Mesh ของเปลือกหมวก โฟม รองใน และฟองน้ำยางพารา จะใช้ขนาด Mesh ที่ 10 mm ส่วนวัสดุที่เพิ่มมาจากในกรณีแรกคือผู้วิจัยจะทำการสร้างพื้นแบบราบเรียบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm โดยกำหนดให้เป็น Mesh รูปแบบ 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral (R3D4) ขนาด 20 mm ดังภาพที่ 3.26 ในส่วนของเงื่อนไขการจำลองรูปแบบนี้ในภาพที่ 3.27 จะทำการกำหนดให้ศีรษะจำลองที่สวมใส่หมวกกันน็อกจะถูกกำหนดให้เป็นของแข็ง (Rigid body) นั้นตกลงในแนวแกน Y (Free U2) และปรับมุมของศีรษะจำลองที่กระแทกให้กระแทกบริเวณด้านหน้าหมวกทำมุม 35° กับพื้นให้ตกลงมากระแทกกับพื้นแบบราบเรียบที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ใด ๆ ($U1, U3, UR1, UR2, UR3 = 0$) ที่ความเร็วการกระแทกเท่ากับ 7.67 m/s ตามมาตรฐานของการทดสอบหมวกกันน็อกที่ใช้ในเชิงพาณิชย์สำหรับกรณีทดสอบหมวกกันน็อกแบบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้า ส่วนในกรณีของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบนั้นจะจำลองความเร็วในการกระแทกที่ 5.94 m/s ซึ่งก็เป็นไปตามมาตรฐานของการทดสอบหมวกกันน็อกที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ในส่วนของจุดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลผลความแรงในแบบจำลองนั้นเก็บข้อมูลที่บริเวณตรงคอของศีรษะจำลอง (RP1) เพื่อให้สอดคล้องกับการติดตั้งเซนเซอร์วัดความแรงในการทดลองจริง



ภาพที่ 3.26 การกำหนดลักษณะ Mesh และรูปแบบของ Mesh ของวัสดุในแบบจำลองในกรณีการทดสอบความแข็งแรงจากการกระแทก



ภาพที่ 3.27 การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบจำลองกรณีการทดสอบการกระแทกในกรณีการทดสอบความแข็งแรงจากการกระแทก

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทที่ 4 นี้เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองของหมวกกันน็อคที่เสริมวัสดุฟองน้ำยางพาราทั้งการเสริมแบบคลุมทั้งพื้นที่และการเสริมแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ที่มีความหนา 1 cm และความหนา 1.6 cm โดยใช้วิธีการทำการทดสอบแรงกระแทกในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นรูปแบบหมวก 3 รูปแบบคือหมวกแบบครึ่งใบ หมวกแบบเต็มใบและหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า เพื่อทดสอบหาค่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดกับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งจากการกระแทกกับเวลา และการทดสอบค่าการบาดเจ็บที่ศีรษะ (HIC) ซึ่งจะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ต่าง ๆ ในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาการกระแทกของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

4.1.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดกับเวลาของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

การศึกษาค้นคว้าการตอบสนองต่อการรับแรงกระแทกของแบบจำลองหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบจะใช้แบบจำลองหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบที่มีความแตกต่างกัน 5 แบบด้วยกัน แบบที่ 1 เป็นหมวกที่ไม่มีการเสริมฟองน้ำยางพารา แบบที่ 2 คือหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่มีความหนา 1.0 cm และแบบที่สาม คือหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่มีความหนา 1.6 cm แบบที่ 4 คือหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ที่มีความหนา 1.0 cm และแบบที่ 5 คือหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ที่มีความหนา 1.6 cm ซึ่งจะกำหนดหัวค้อนจำลองที่มีการกำหนดมวลที่ 10 kg ลงมากระแทกกับแบบจำลองหมวกกันน็อคที่มีความเร็ว 4.85, 5.42 5.94 และ 6.26 m/s ตามลำดับ โดยในส่วนของตารางที่ 4.1 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ ซึ่งจะแสดงภาพในกรณีไม่เสริมฟองน้ำยางพารา กรณีเสริมฟองน้ำยางพาราความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ และกรณีเสริมฟองน้ำยางพาราความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ ซึ่งพบว่าหมวกแบบไม่เสริมนั้นจะมีการแตกหักหรือเสียหายของชิ้นงานที่มากกว่าหมวกแบบเสริมฟองน้ำยางพารา

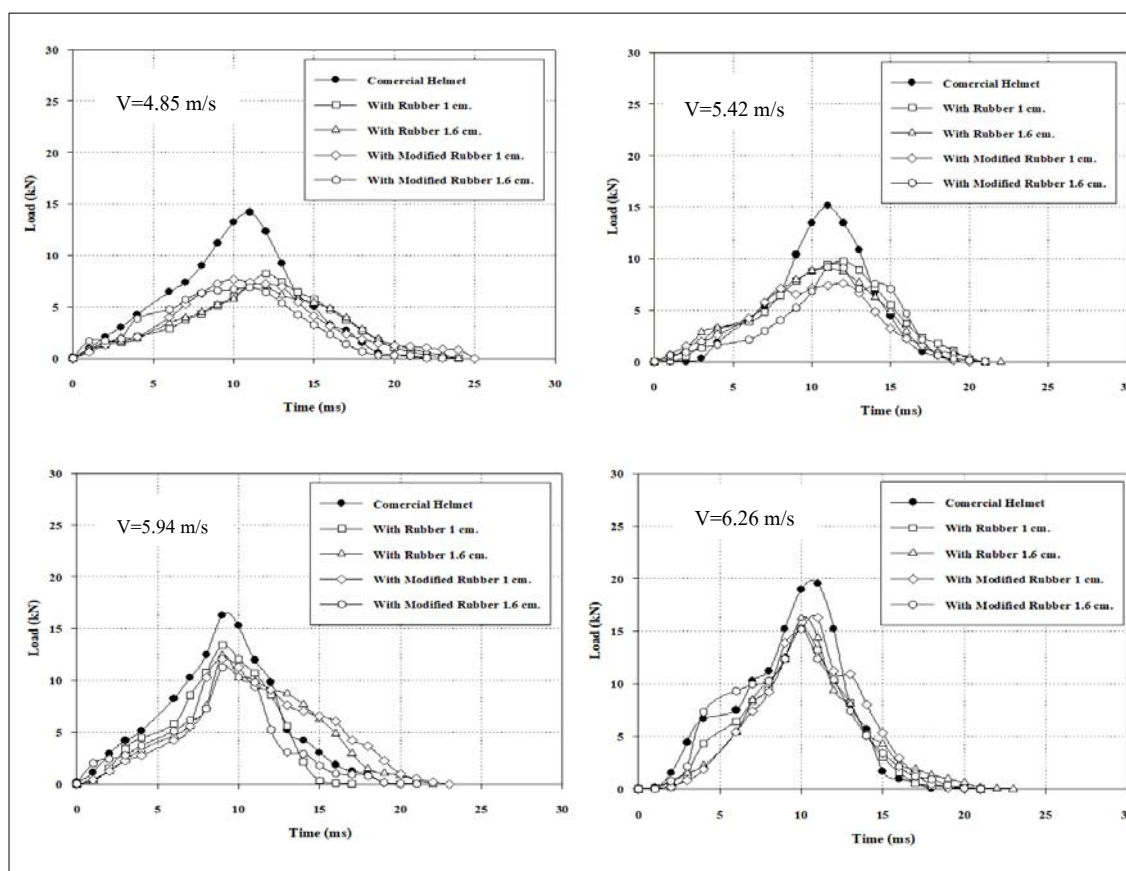
จากภาพที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบที่กระแทกด้วยความเร็วต่าง ๆ จะพบว่าการกระแทกของหัวค้อนตามพฤติกรรมรับแรงกระแทกของหมวกแบบครึ่งใบที่ไม่เสริมเกิดการเสียหายมากที่สุดในทุกกรณี ในส่วนของหมวกที่มีการเสริมฟองน้ำยางพารานั้นจะช่วยลดภาระโหลดที่เกิดจากการกระแทกลงได้โดยเฉพาะที่ความเร็ว 4.85 m/s ที่มีความแตกต่างของภาระโหลดสูงสุดระหว่างหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำยางพารากับหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่มีความหนา 1 cm แตกต่างกันถึง 42.04% หากพิจารณาที่ความเร็ว 6.26 m/s จะพบว่าความแตกต่างของภาระโหลดสูงสุดระหว่างหมวกกันน็อคที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำ

กับหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความหนา 1 cm จะมีความแตกต่างกัน 21.97% ซึ่งพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ลดลงเมื่อมีความเร็วสูงขึ้น

ตารางที่ 4.1 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

กรณี	พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ				
ไม่เสริม					
เสริม 1 cm แบบคลุม ทั้งพื้นที่และแบบ เฉพาะพื้นที่					
เสริม 1.6 cm แบบ คลุมทั้งพื้นที่และ แบบเฉพาะพื้นที่					

จากภาพที่ 4.1 วิเคราะห์ได้ว่าที่ความเร็วต่ำนั้นฟองน้ำยังสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้านการรับแรงกระแทกที่สูงมากแต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการกระแทกนั้นฟองน้ำยางพาราจะมีประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกที่ลดลง และจากพฤติกรรมของการกระแทกในแต่ละความเร็วนั้นพบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วในการกระแทกที่สูงขึ้นภาระโหลดที่เกิดจากการกระแทกหมวกกันน็อคก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราทุกแบบจะมีค่าภาระโหลดที่ต่ำกว่าหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำยางพาราในทุกความเร็วการกระแทก

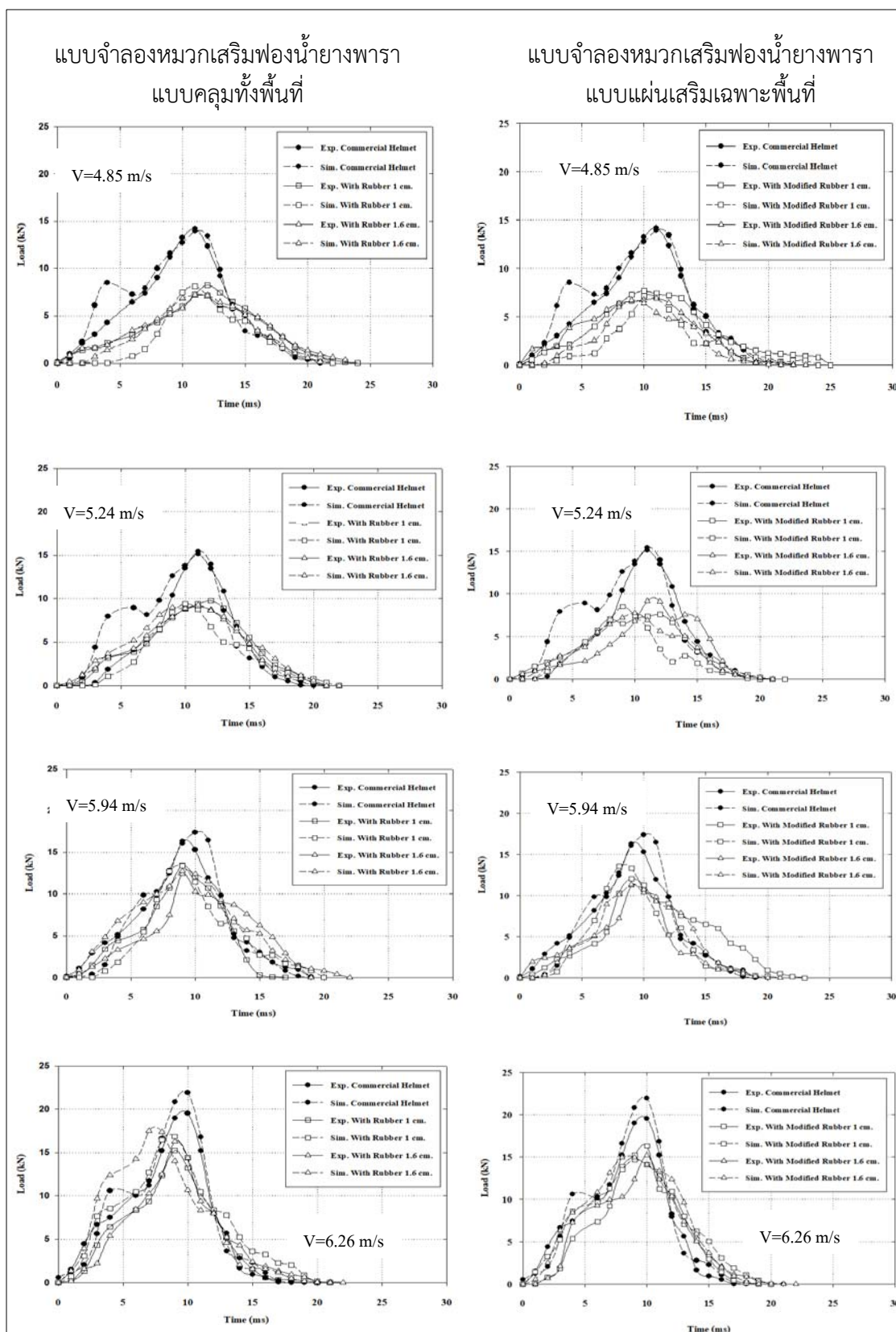


ภาพที่ 4.1 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของแบบจำลองหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

4.1.2 การวิเคราะห์แบบจำลองหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

จากการแสดงพฤติกรรมการรับแรงกระแทกภายในแบบจำลองหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบที่มีความแตกต่างกัน 5 แบบ ภาพที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาโดยใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยจะทำการแบ่งกราฟให้เป็น 2 รูปแบบคือ แบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความเร็วต่าง ๆ และแบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ที่ความเร็วต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับเวลาของการทดลองจริงกับแบบจำลอง พบว่าผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อยทั้งนี้วิเคราะห์ได้ว่าแบบจำลองที่ได้ทำการสร้างขึ้นเพื่อมาวิเคราะห์นั้นมีส่วนประกอบของเปลือกหมวก โฟม และฟองน้ำยางพารา ซึ่งยังไม่ได้เพิ่มเติมรายละเอียดในส่วนของการขึ้นส่วนของสายรัดคาง ผ้ารองในหมวก กระดูกกันลมของหมวก ทำให้ผลการจำลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนไปจากการทดลองจริง และอีกสิ่งหนึ่งที่จะทำให้ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนกันนั้นเกิดได้จากส่วนโค้งของหมวกกันน็อคที่มีความโค้งไม่เท่ากันหรือไม่สม่ำเสมอทำให้นำมาสร้างแบบจำลองนั้นก็ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบหมวกจริงได้

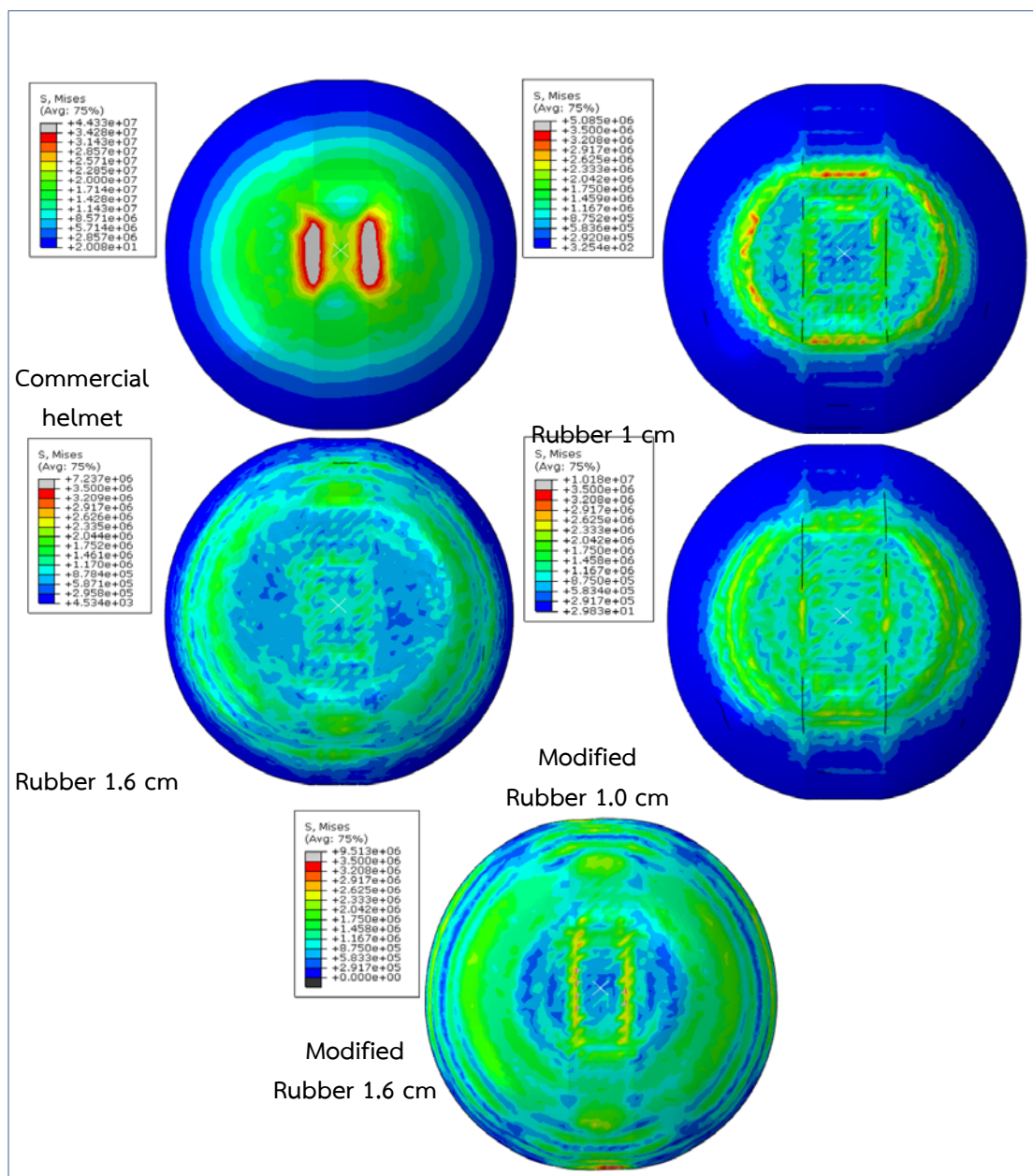


ภาพที่ 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลองของหมวกแบบครึ่งใบ

จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการทดลองกับแบบจำลองนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 1 – 12% แล้วแต่กรณีไปซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้หากพิจารณาถึงแบบจำลองที่ไม่ได้เพิ่มเติมรายละเอียดในส่วนของชิ้นส่วนของหมวกอื่น ๆ ในส่วนของค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ในเชิงเส้นของกราฟระหว่างการทดลองและแบบจำลอง (r^2) พบว่าความสัมพันธ์ของกราฟส่วนใหญ่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน โดยหากความสัมพันธ์ของกราฟระหว่างการทดลองและแบบจำลองมีความเป็นเชิงเส้นเดียวกันนั้นค่าที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจากตารางจะพบว่าหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำ ยางพารานั้นจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นของการทดลองและแบบจำลองที่ใกล้เคียงกันที่สุดอยู่ในช่วง 0.73 – 0.90 ส่วนในกรณีที่เสริมยางพารานั้นเนื่องจากการศึกษาแบบจำลองนั้นหมวกนั้นได้ทำการเพิ่มวัสดุเข้ามาเป็นส่วนในการวิเคราะห์อีก 1 ชั้น ทำให้ค่าความเป็นเส้นที่ได้จะมีความคาดเคลื่อนมากกว่าหมวกแบบปกติที่มีแค่ชั้นเปลือกหมวกและโฟม 2 ชั้น

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดสูงสุดระหว่างการทดลองและแบบจำลองของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

รูปแบบของหมวก	ความเร็ว (m/s)	ภาระโหลดสูงสุด (kN)		ความแตกต่าง (%)	R-Squared (r^2)
		การทดลอง	แบบจำลอง		
1. หมวกที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำ	4.85	14.20	13.95	1.76	0.88
	5.42	15.12	15.42	1.98	0.73
	5.94	16.29	17.38	6.69	0.79
	6.27	19.52	21.92	12.29	0.90
2. หมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.0 cm	4.85	8.23	8.13	0.60	0.82
	5.42	9.76	9.41	3.58	0.63
	5.94	13.40	13.35	0.37	0.85
	6.27	15.93	16.85	5.77	0.62
3. หมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm	4.85	7.12	7.18	0.84	0.74
	5.42	9.07	9.26	2.09	0.89
	5.94	12.39	12.76	2.98	0.78
	6.27	14.56	15.34	5.35	0.82
4. หมวกเสริมฟองน้ำยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.0 cm	4.85	7.67	7.13	7.04	0.74
	5.42	9.78	8.53	12.78	0.53
	5.94	13.74	13.55	1.38	0.42
	6.27	16.29	16.03	1.59	0.40
5. หมวกเสริมฟองน้ำยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm	4.85	6.89	6.69	2.90	0.72
	5.42	9.10	8.03	11.75	0.57
	5.94	12.37	11.78	4.76	0.64
	6.27	15.20	15.90	4.60	0.77



ภาพที่ 4.3 แบบจำลองแสดงพฤติกรรมการกระแทกที่ภาระโหลดสูงสุดที่ความเร็ว 6.26 m/s ของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของภาระโหลดสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยนี้จะขอยกตัวอย่างในกรณีการกระแทกที่ความเร็วสูงสุดคือ 6.26 m/s จากภาพที่ 4.3 เป็นรูปในขณะที่เกิดภาระโหลดสูงสุดของหมวกแต่ละแบบบริเวณด้านบนของหมวกจะพบว่า หมวกที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำยางพาราจะมีค่าของ von Mises stress ที่มีค่าสูงมากกว่า 21.4 MPa ที่บริเวณตรงกลางของหมวกกันน็อค ส่วนในกรณีที่มีการเสริมฟองน้ำยางพารานั้นค่าของ von Mises stress จะมีค่าที่ต่ำกว่า 2.14 MPa เป็นส่วนมากของพื้นที่หมวกนั้นหมายถึงคุณสมบัติในการกระจายแรงได้ดีขึ้นกว่าเดิม ทั้งนี้ค่า von Mises stress เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการรวมแรงกันของ Principle stress ทั้งหมด

ได้เป็นค่าตัวแทน stress ที่จะนำไปเปรียบเทียบกับ Yield จะทำนายการเสียหายของวัสดุ ซึ่งหากพิจารณาจากการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการที่ลักษณะของหัวค้อนตกลงมากระแทกที่บริเวณกลางของศีรษะและนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองจะพบว่าโอกาสที่บริเวณที่จะเสียหายของวัสดุหรือชิ้นงานมากที่สุดคือบริเวณตรงกลางของหมวกซึ่งสอดคล้องกันกับภาพจากแบบจำลองจะเห็นได้ว่าในกรณีหมวกที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำอย่างพารา von Mises stress ที่เกิดสูงสุดจะอยู่บริเวณตรงกลางของหมวก ส่วนในกรณีเสริมฟองน้ำจะพบว่าการกระจายของ von Mises stress ที่มากกว่าทำได้ดีกว่า โอกาสเสียหายของชิ้นงานก็จะน้อยกว่าตามไปด้วย หากพิจารณาเฉพาะหมวกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราก็จะพบว่าการกระจายของ von Mises stress จะมีลักษณะที่คล้ายกันคือกระจายไปทั่วพื้นผิวของหมวกกันน็อคทั้งนี้พบว่าที่หมวกเสริมฟองน้ำอย่างพาราเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm นั้นจะพบว่ามีบางจุดที่เกิด von Mises stress สูงทั้งนี้เกิดจุดที่เกิดนั้นเป็นช่วงของรอยต่อของชิ้นงานที่เกิดจากชิ้นรูปแบบจำลองจึงทำให้มีค่า von Mises stress ที่สูงกว่า 3.20 MPa บ้างในบางจุดเท่านั้น

4.2 ผลการศึกษาการกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

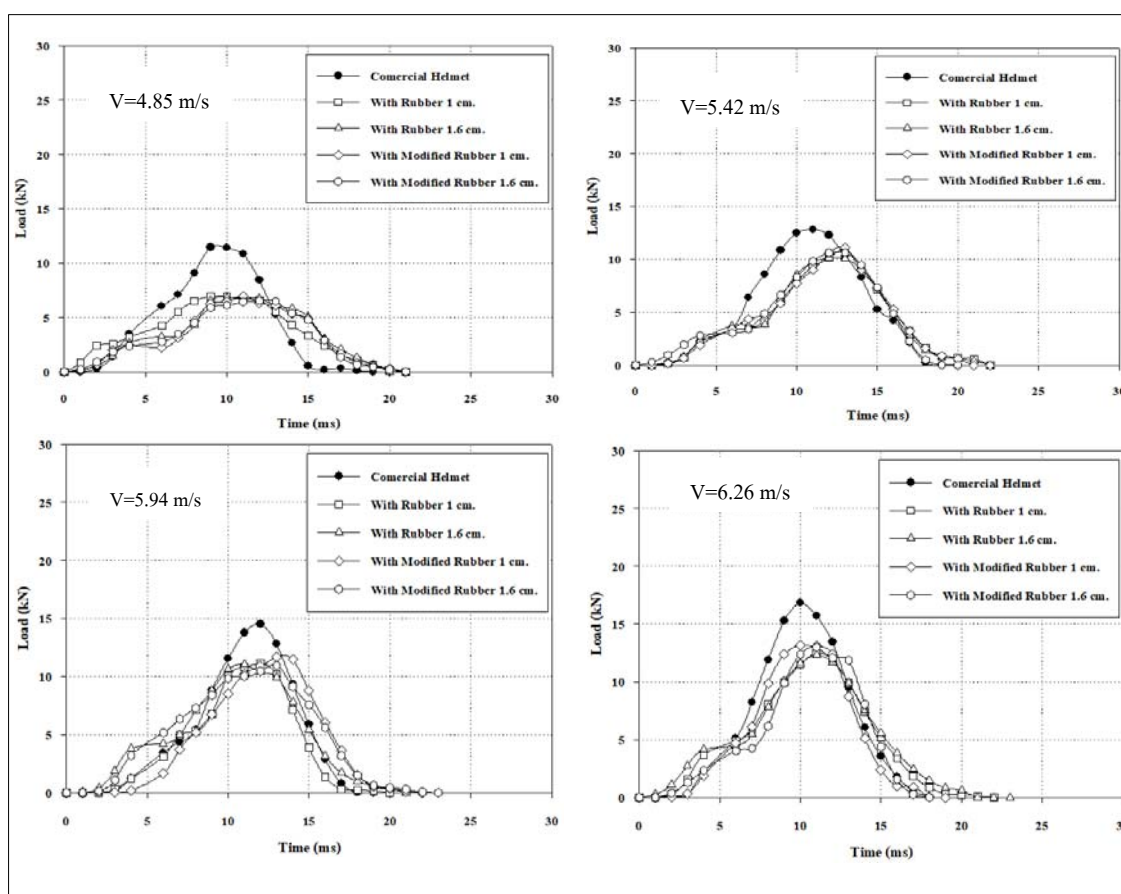
4.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดกับเวลาของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

ตารางที่ 4.3 พฤติกรรมการรับแรงแบบกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบกรณีต่าง ๆ

กรณี	พฤติกรรมกรรับแรงแบบกระแทก				
ไม่เสริม					
เสริม 1 cm แบบคลุมทั้ง พื้นที่และ แบบเฉพาะ พื้นที่					
เสริม 1.6 cm แบบคลุมทั้ง พื้นที่และ แบบเฉพาะ พื้นที่					

การศึกษาการตอบสนองต่อการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบโดยการทดสอบแรงกระแทกในห้องปฏิบัติการ จะใช้ตัวอย่างในการทดสอบเป็นหมวกกันน็อคแบบเต็มใบที่มีความแตกต่างกัน 5 แบบด้วยกัน เช่นเดียวกันกับกรณีทดสอบหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ ซึ่งจะกำหนดหัวค้อนจำลองที่มีการกำหนดมวลที่ 10 kg ลงมากระแทกกับแบบจำลองหมวกกันน็อคที่มีความเร็ว 4.85, 5.42, 5.94 และ 6.26 m/s ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.3 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ ซึ่งจะแสดงรูปในกรณีไม่เสริมฟองน้ำยางพารา กรณีเสริมฟองน้ำยางพาราความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ และกรณีเสริมฟองน้ำยางพาราความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ หากวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองหมวกแบบครึ่งใบ ซึ่งพบว่าในกรณีหมวกแบบครึ่งใบที่ไม่เสริมฟองน้ำจะมีลักษณะความเสียหายของชิ้นงานที่มากกว่าแบบเต็มใบ ซึ่งกรณีหมวกครึ่งใบนั้นจะมีการแตกหักของเปลือกหมวกหรือในบางครั้งเกิดการแตกอย่างละเอียดในกรณีเป็นหมวกแบบใบที่ไม่เสริมฟองน้ำ แต่หมวกแบบเต็มใบนั้นจะไม่พบการแตกหักของชิ้นงานในทุกกรณี



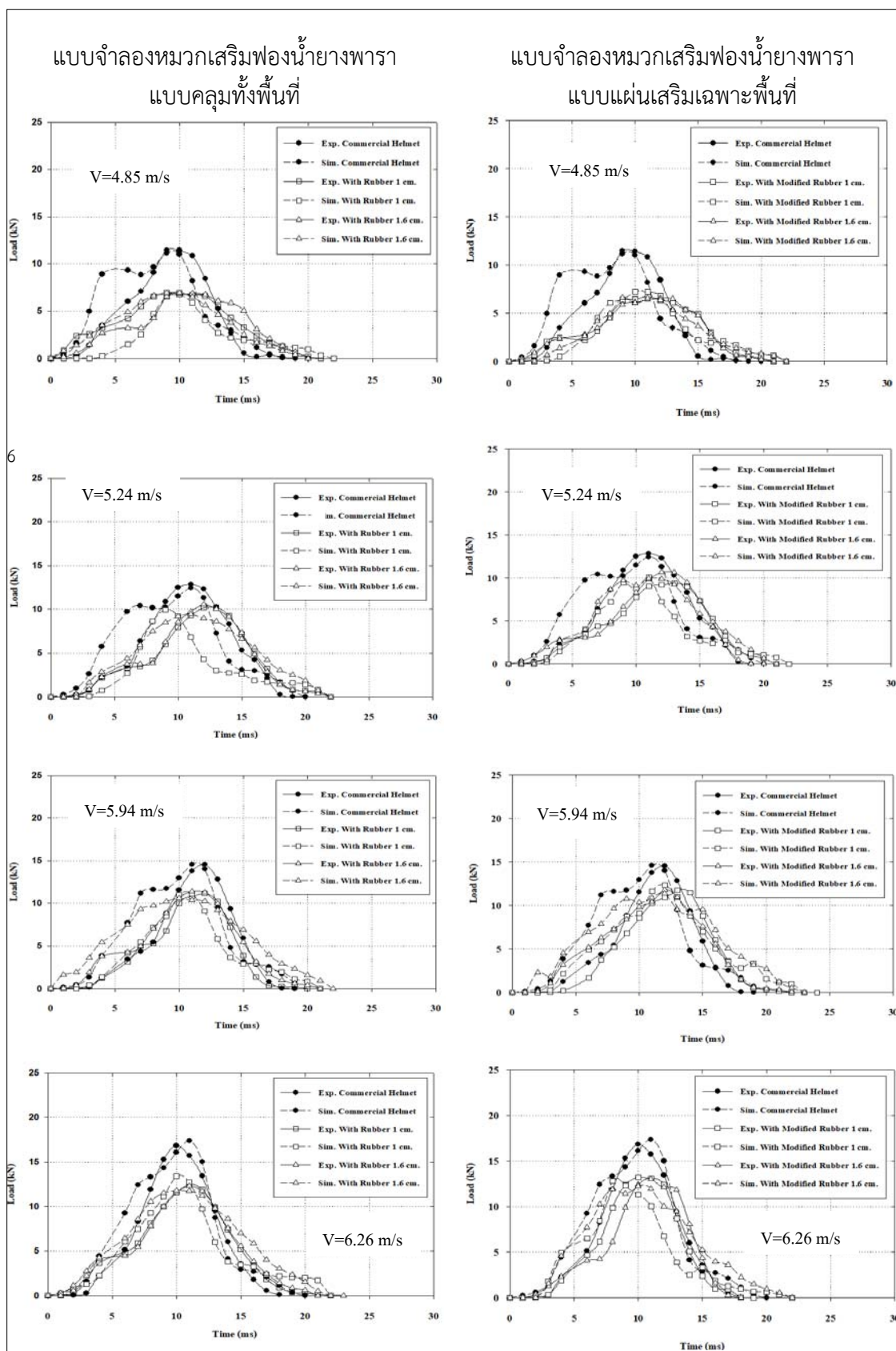
ภาพที่ 4.4 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของแบบจำลองหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

ภาพที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงพฤติกรรมการทดสอบแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบที่กระที่ความเร็วต่าง ๆ โดยพฤติกรรมลักษณะของกราฟภาระโหลดจะมีลักษณะสอดคล้องกันกับกรณีการทดสอบหมวกแบบครึ่งใบ จากกราฟพบว่าภาระกระแทกของหัวค้อนตามพฤติกรรมรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบที่ไม่เสริมเกิดการเสียหายมากที่สุดในทุกกรณี เมื่อวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างภาระโหลดสูงสุดมากที่สุดคือในกรณีที่ความเร็ว 4.85 m/s โดยหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำอย่างพาราจะมีภาระโหลดที่สูงกว่า หมวกที่เสริมพองน้ำอย่างพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm แตกต่างกัน 39.39% และ 40.28% ตามลำดับ ส่วนกรณีหมวกที่เสริมพองน้ำอย่างพาราแบบเฉพาะพื้นที่ที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm จะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำอย่างพาราอยู่ที่ 38.98% และ 42.91% ตามลำดับ หากพิจารณาความเร็วที่สูงสุด ($V = 6.26$ m/s) ค่าความแตกต่างกันระหว่างหมวกที่ไม่ได้ทำการเสริมพองน้ำกับหมวกที่เสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm แตกต่างกัน 25.60% และ 26.82% ตามลำดับ ส่วนกรณีหมวกที่เสริมพองน้ำอย่างพาราแบบเฉพาะพื้นที่ที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm จะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำอย่างพาราอยู่ที่ 21.49% และ 26.31% ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ลดลงเมื่อมีความเร็วสูงขึ้นจากการทดลองหมวกแบบเต็มใบนั้นจะมีลักษณะแบบเดียวกันกับกรณีการทดสอบหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ หากว่าพิจารณาที่ความเร็วต่ำนั้นพองน้ำยังสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้านการรับแรงกระแทกที่สูงมากแต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการกระแทกนั้นพองน้ำอย่างพาราจะมีประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกที่ลดลง และจากพฤติกรรมของการกระแทกในแต่ละความเร็วนั้นพบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน หากพิจารณาในด้านรูปแบบของหมวกระหว่างหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบกับหมวกกันน็อคแบบเต็มใบจะพบว่าค่าภาระโหลดของหมวกแบบเต็มใบเมื่อเกิดการกระแทกจะมีค่าที่ต่ำกว่าหมวกแบบครึ่งใบซึ่งเกิดจากรูปทรงของหมวกแบบเต็มใบที่มีพื้นที่ครอบคลุมศีรษะที่มากกว่าหมวกแบบครึ่งใบ หากพิจารณาเฉพาะรูปแบบของการเสริมพองน้ำอย่างพาราระหว่างแบบคลุมทั้งพื้นที่กับแบบเฉพาะพื้นที่ ที่ความหนาเดียวกันที่ 1 cm หมวกเสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งพื้นที่จะมีค่าภาระโหลดต่ำกว่าแบบเสริมเฉพาะพื้นที่เล็กน้อยโดยแตกต่างกันที่ 3.02% ($V = 4.85$ m/s) 3.65% ($V = 5.42$ m/s) 2.80% ($V = 5.94$ m/s) และ 5.51% ($V = 6.26$ m/s) ตามลำดับ ในขณะที่ความหนา 1.6 cm หมวกเสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งพื้นที่จะมีค่าภาระโหลดต่ำกว่าแบบเสริมเฉพาะพื้นที่แตกต่างกันที่ 4.36% ($V = 4.85$ m/s) 0.01% ($V = 5.42$ m/s) 4.57% ($V = 5.94$ m/s) และ 5.85% ($V = 6.26$ m/s) ตามลำดับ อีกหนึ่งประเด็นคือประเด็นด้านความหนาของพองน้ำที่ใช้ในการเสริมคือที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm จะพบว่าหมวกแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความหนา 1 cm จะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากหมวกที่เสริมพองน้ำที่ความหนา 1.6 cm อยู่ที่ 1.58% ($V = 4.85$ m/s) 3.47% ($V = 5.42$ m/s) 15.81% ($V = 5.94$ m/s) และ 1.67% ($V = 6.26$ m/s) ตามลำดับ ส่วนกรณีที่แบบเสริมเฉพาะพื้นที่แตกต่างกันที่ 2.97% ($V = 4.85$ m/s) 6.17% ($V = 5.42$ m/s) 5.37% ($V = 5.94$ m/s) และ 1.36% ($V = 6.26$ m/s) ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลนี้พบว่ารูปแบบการเสริมพองน้ำนั้นไม่มีความแตกต่างกันและสามารถใช้รูปแบบเสริมเฉพาะพื้นที่เพื่อใช้งานได้โดยมีน้ำหนักของตัวหมวกที่ลดลงกว่าแบบคลุมทั้งพื้นที่ ซึ่งแนวโน้มลักษณะเช่นนี้ก็มีความสอดคล้องกันกับหมวกแบบครึ่งใบ

4.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

ในการแสดงพฤติกรรมการรับแรงกระแทกภายในแบบจำลองหมวกกันน็อคแบบเต็มใบที่มีความแตกต่างกัน 5 แบบ ภาพที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาโดยใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยจะทำการแบ่งกราฟให้เป็น 2 รูปแบบคือ แบบจำลองหมวกเสริมพองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความเร็วต่าง ๆ และแบบจำลองหมวกเสริมพองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ที่ความเร็วต่าง ๆ เช่นเดียวกับลักษณะการวิเคราะห์ในกรณีหมวกแบบครึ่งใบ โดยหมวกแบบเต็มใบนี้ลักษณะของภาระโหลดสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าหมวกแบบครึ่งใบ และจากการวิเคราะห์รูปแบบของกราฟนั้นพบว่าแบบจำลองและการทดลองในห้องปฏิบัติการจะมีความสอดคล้องกันในด้านรูปแบบของกราฟที่มีลักษณะโค้งคล้ายภูเขา ส่วนค่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับการทดลองจริงนั้นพบว่าผลมีค่าใกล้เคียงกันในที่นี้ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างในกรณีที่ความเร็วสูงสุดในการทดสอบที่ 6.26 m/s ความแตกต่างระหว่างการทดลองในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองในกรณีหมวกที่ไม่เสริม แบบจำลองหมวกเสริมพองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1 cm แบบจำลองหมวกเสริมพองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm แบบจำลองหมวกเสริมพองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ 1 cm และแบบจำลองหมวกเสริมพองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm จะมีเปอร์เซ็นต์แตกต่างกันที่ 3.72% 7.03% 4.30% 3.10% และ 6.06% ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นก็เป็ผลมาจากรายละเอียดในส่วนของชิ้นส่วนของสายรัดคาง ผ้ารองในหมวก กระงกกันลมของหมวก และความโค้งของส่วนหมวกซึ่งทำให้ผลการจำลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนไปจากการทดลองจริง

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการทดลองกับแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 – 10.42% ซึ่งหากเปรียบเทียบกับผลการทดลองในกรณีหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบนั้นถือว่าผลการทดลองที่ได้มีความคล้ายคลึงกัน แสดงถึงแนวทางการวิเคราะห์ที่ถูกต้องในการใช้กำหนดเงื่อนไขโปรแกรม FEA ในส่วนของค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ในเชิงเส้นของกราฟระหว่างการทดลองและแบบจำลอง (r^2) พบว่าหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำยางพารานั้นจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นของการทดลองและแบบจำลองที่ใกล้เคียงกันที่สุดอยู่ในช่วง 0.61 – 0.92 ส่วนในกรณีที่เสริมยางพารานั้นเนื่องจากการศึกษาแบบจำลองนั้นหมวกนั้นได้ทำการเพิ่มวัสดุอย่างเข้ามาเป็นส่วนในการวิเคราะห์อีก 1 ชั้น ทำให้ค่าความเป็นเส้นที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าหมวกแบบปกติโดยสังเกตได้ว่าหมวกแบบที่ไม่เสริมจะมีค่า r^2 ที่มากกว่า 0.72 แต่สำหรับหมวกที่มีการเสริมพองน้ำยางพาราในบางกรณีเช่น หมวกเสริมพองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm ที่ความเร็ว 6.27 m/s นั้นจะมีค่า r^2 อยู่ที่ 0.61 ซึ่งเป็นผลมากจากการเพิ่มวัสดุอย่างเข้ามาเป็นส่วนในการวิเคราะห์อีก 1 ชั้นทำให้การวิเคราะห์มีความซับซ้อนมากขึ้น



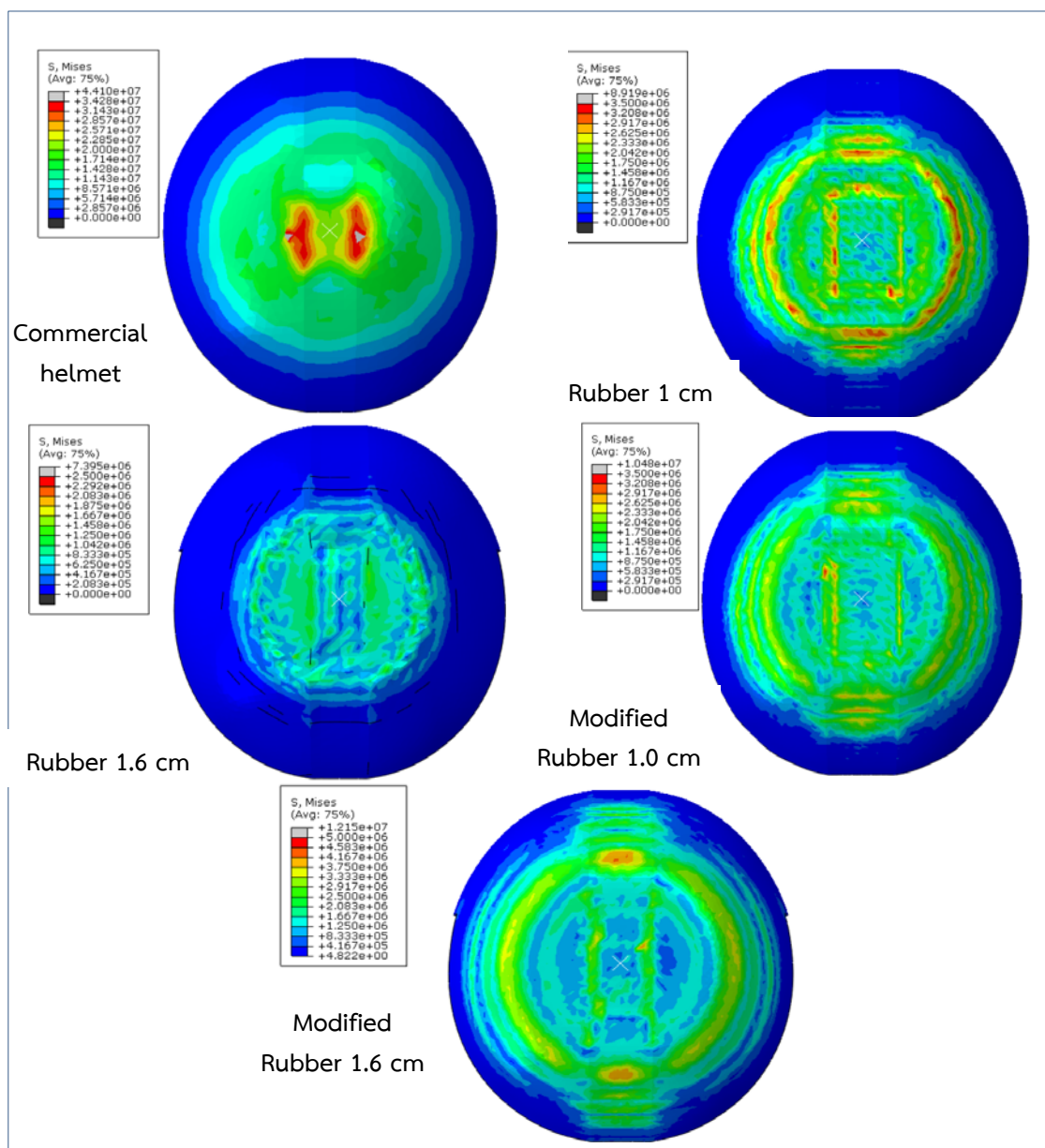
ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลองของหมวกแบบเต็มใบ

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดสูงสุดระหว่างการทดลองและแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

รูปแบบของหมวก	ความเร็ว (m/s)	ภาระโหลดสูงสุด (kN)		ความแตกต่าง (%)	R-Squared (r ²)
		การทดลอง	แบบจำลอง		
1. หมวกที่ไม่ได้เสริม พองน้ำ	4.85	11.45	11.14	2.70	0.72
	5.42	12.83	12.41	3.27	0.72
	5.94	14.5357	14.57	0.27	0.85
	6.27	16.8200	17.36	3.21	0.88
2. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราแบบคลุม ทั้งพื้นที่ 1.0 cm	4.85	6.94	6.75	2.73	0.62
	5.42	¹⁰ .21	9.95	2.54	0.68
	5.94	11.16	11.11	0.44	0.78
	6.27	12.51	13.39	7.03	0.80
3. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราแบบคลุม ทั้งพื้นที่ 1.6 cm	4.85	6.83	6.94	1.61	0.89
	5.42	10.55	9.45	10.42	0.83
	5.94	11.40	10.60	7.01	0.76
	6.27	12.30	11.77	4.30	0.61
4. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.0 cm	4.85	6.73	7.23	7.42	0.66
	5.42	9.39	10.06	7.13	0.71
	5.94	11.72	12.34	5.29	0.87
	6.27	13.20	12.79	3.10	0.92
5. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm	4.85	6.53	6.54	0.15	0.82
	5.42	10.63	9.94	6.49	0.61
	5.94	11.79	11.34	3.81	0.75
	6.27	13.0284	12.23	6.06	0.75

ในภาพที่ 4.6 เป็นรูปพฤติกรรมภาระโหลดสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยนี้จะขอยกตัวอย่างในกรณีการกระแทกที่ความเร็วสูงสุดคือ 6.26 m/s จากรูปในขณะที่เกิดภาระโหลดสูงสุดของหมวกแต่ละแบบจะพบว่า หมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำยางพาราจะมีค่าของ von Mises stress ที่มีค่าสูงมากกว่า 21.4 MPa ที่บริเวณตรงกลางของหมวกกันน็อค ซึ่งหากวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรณีแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบนั้นจะพบว่า การกระจายตัวของ von Mises stress ที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวของ stress น้อยกว่าแบบครึ่งใบ โดยในส่วนในกรณีที่มีการเสริมพองน้ำยางพารานั้นค่าของ von Mises stress จะมีค่าที่ต่ำกว่า 2.14 MPa เป็นส่วนมากของพื้นที่เมื่อเปรียบเทียบกับหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

อีกด้วย นั้นหมายถึงคุณสมบัติที่หมวกแบบเต็มใบนั้นสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าการกระจายแรงจะกระจายได้ดีกว่าแบบครึ่งใบ



ภาพที่ 4.6 แบบจำลองแสดงพฤติกรรมของการกระแทกที่ภาระโหลดสูงสุดที่ความเร็ว 6.26 m/s ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

จากภาพที่ 4.6 หากพิจารณาเช่นเดียวกับหมวกแบบครึ่งใบนั้นจะพบว่าการกระแทกของหัวค้อนก็ตกลงมาถึงบริเวณกึ่งกลาง ฉะนั้นจุดที่มีโอกาสเสียหายของหมวกมากที่สุดย่อมเป็นจุดกึ่งกลางศีรษะโดยในกรณี หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพารา นั้น หมวกที่มีการเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1 cm จะมีค่า von Mises stress จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.75 – 2.04 MPa เป็นส่วนมาก

ของพื้นที่หมวก หมวกที่มีการเสริมพองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm จะมีค่า von Mises stress จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5.41 – 6.54 MPa เป็นส่วนมาก เช่นเดียวกับการเสริมพองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่ที่จะพบว่าหมวกที่มีการเสริมพองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่ 1 cm จะมีค่า von Mises stress จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.75 – 2.04 MPa เป็นส่วนมากของพื้นที่หมวก หมวกที่มีการเสริมพองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm จะมีค่า von Mises stress จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.67 – 2.08 MPa เป็นส่วนมาก จากการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการที่ลักษณะของหัวค้อนตกลงมากระแทกที่บริเวณกลางของศีรษะและนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองจะพบว่าโอกาสที่บริเวณที่จะเสียหายของวัสดุหรือชิ้นงานมากที่สุดคือบริเวณตรงกลางของหมวกซึ่งสอดคล้องกันกับภาพจากแบบจำลองจะเห็นได้ว่าในกรณีหมวกที่ไม่ได้เสริมพองน้ำยางพารา von Mises stress ที่เกิดสูงสุดจะอยู่บริเวณตรงกลางของหมวก ส่วนในกรณีเสริมพองน้ำจะพบว่ามีการกระจายของ von Mises stress ที่มากกว่าทำได้ดีกว่าโอกาสเสียหายของชิ้นงานก็จะน้อยกว่าตามไปด้วย หากพิจารณาเฉพาะหมวกที่เสริมพองน้ำยางพาราก็จะพบว่ามีการกระจายของ von Mises stress จะมีลักษณะที่คล้ายกันคือกระจายไปทั่วพื้นผิวของหมวกกันน็อกทั้งนี้พบว่าที่หมวกเสริมพองน้ำยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm นั้นจะพบว่ามีบางจุดที่เกิด von Mises stress สูงทั้งนี้เกิดจุดที่เกิดนั้นเป็นช่วงของรอยต่อของชิ้นงานที่เกิดจากขึ้นรูปแบบจำลองจึงทำให้มีค่า von Mises stress ที่สูงกว่า 2.14 MPa บ้างในบางจุดเท่านั้น

4.3 ผลการศึกษาการกระแทกของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

4.3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหดกับเวลาของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

การศึกษาค้นคว้าการตอบสนองต่อการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้าโดยการทดสอบแรงกระแทกในห้องปฏิบัติการ จะใช้ตัวอย่างในการทดสอบเป็นหมวกกันน็อกแบบเต็มใบที่มีความแตกต่างกัน 5 แบบด้วยกัน เช่นเดียวกันกับการทดสอบหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบและเต็มใบ ซึ่งจะกำหนดหัวค้อนจำลองที่มีการกำหนดมวลที่ 10 kg ลงมากระแทกกับแบบจำลองหมวกกันน็อกที่ความเร็ว 4.85, 5.42, 5.94 และ 6.26 m/s ตามลำดับ

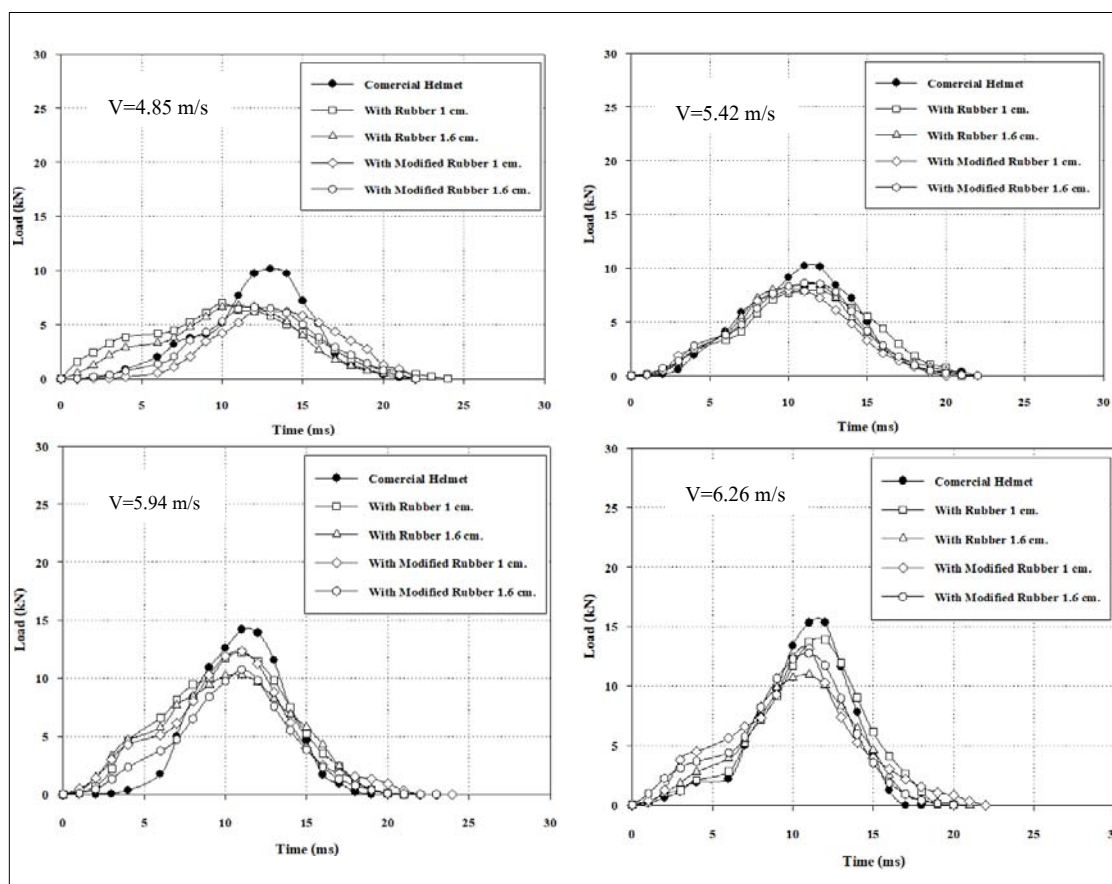
ตารางที่ 4.5 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ ซึ่งจะแสดงรูปในกรณีไม่เสริมพองน้ำยางพารา กรณีเสริมพองน้ำยางพาราความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ และกรณีเสริมพองน้ำยางพาราความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ หากวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองหมวกแบบครึ่งใบและแบบเต็มใบ จะพบว่าหมวกแบบเต็มใบปิดหน้ามีลักษณะการเสียหายน้อยกว่าหมวกทั้ง 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่จะไม่พบการแตกเสียหายบริเวณเปลือกหมวก มีเพียงเศษชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนหลุดออกมาเท่านั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแบบหมวกครึ่งใบพบว่าในกรณีหมวกแบบครึ่งใบที่ไม่เสริมพองน้ำจะมีลักษณะความเสียหายของชิ้นงานและมีความเสียหายส่งผลไปยังโฟมที่ใช้เป็นวัสดุรองในหมวก ส่วนกรณีแบบเต็มใบปิดหน้านั้นจะไม่พบการแตกหักของชิ้นงานในทุกกรณี ซึ่งเมื่อเสริมพองน้ำยางพาราเข้าไปในหมวกชนิดเต็มใบปิดหน้าก็ยังทำให้การเสียหายที่บริเวณหมวกจะลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.5 พฤติกรรมการรับแรงแบบกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้ากรณีต่าง ๆ

กรณี	พฤติกรรมการรับแรงแบบกระแทก				
ไม่เสริม					
เสริม 1 cm แบบ คลุมทั้งพื้นที่ และแบบ เฉพาะพื้นที่					
เสริม 1.6 cm แบบ คลุมทั้งพื้นที่ และแบบ เฉพาะพื้นที่					

ภาพที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงพฤติกรรมการทดสอบแรงกระแทกของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้าทีกระที่ความเร็วต่าง ๆ โดยพฤติกรรมลักษณะของกราฟภาระโหลดจะมีลักษณะสอดคล้องกันกับกรณีการทดสอบหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบ โดยจากกราฟพบว่าหมวกที่ไม่ได้ทำการเสริมฟองน้ำจะมีค่าภาระโหลดที่สูงกว่าหมวกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราในทุกความเร็ว และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบในกรณีที่ไม่ได้ทำการเสริมฟองน้ำอย่างพารา จะพบว่าค่าภาระโหลดของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าแบบที่ไม่เสริมฟองน้ำจะมีค่าภาระโหลดที่ต่ำกว่าหมวกทั้ง 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปแบบของหมวกที่มีความครอบคลุมพื้นที่ของศีรษะที่มากที่สุด จากกราฟยังพบว่าเมื่อพิจารณาถึงหมวกที่ทำการเสริมฟองน้ำอย่างพาราในทุกรูปแบบจะพบว่ารูปแบบการเสริมฟองน้ำอย่างพาราจะช่วยลดภาระโหลดได้ในทุกกรณีและเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะหมวกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราทุกแบบกับหมวกแบบครึ่งใบ เต็มใบ และเต็มใบปิดหน้ายังพบว่าหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าทีเสริมฟองน้ำอย่างพาราจะมีภาระโหลดจากการกระแทกที่ต่ำที่สุด เมื่อวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างภาระโหลดสูงสุดมากที่สุดคือในกรณีที่ความเร็ว 4.85 m/s โดยหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำอย่างพาราจะมีภาระโหลดที่สูงกว่า หมวกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่

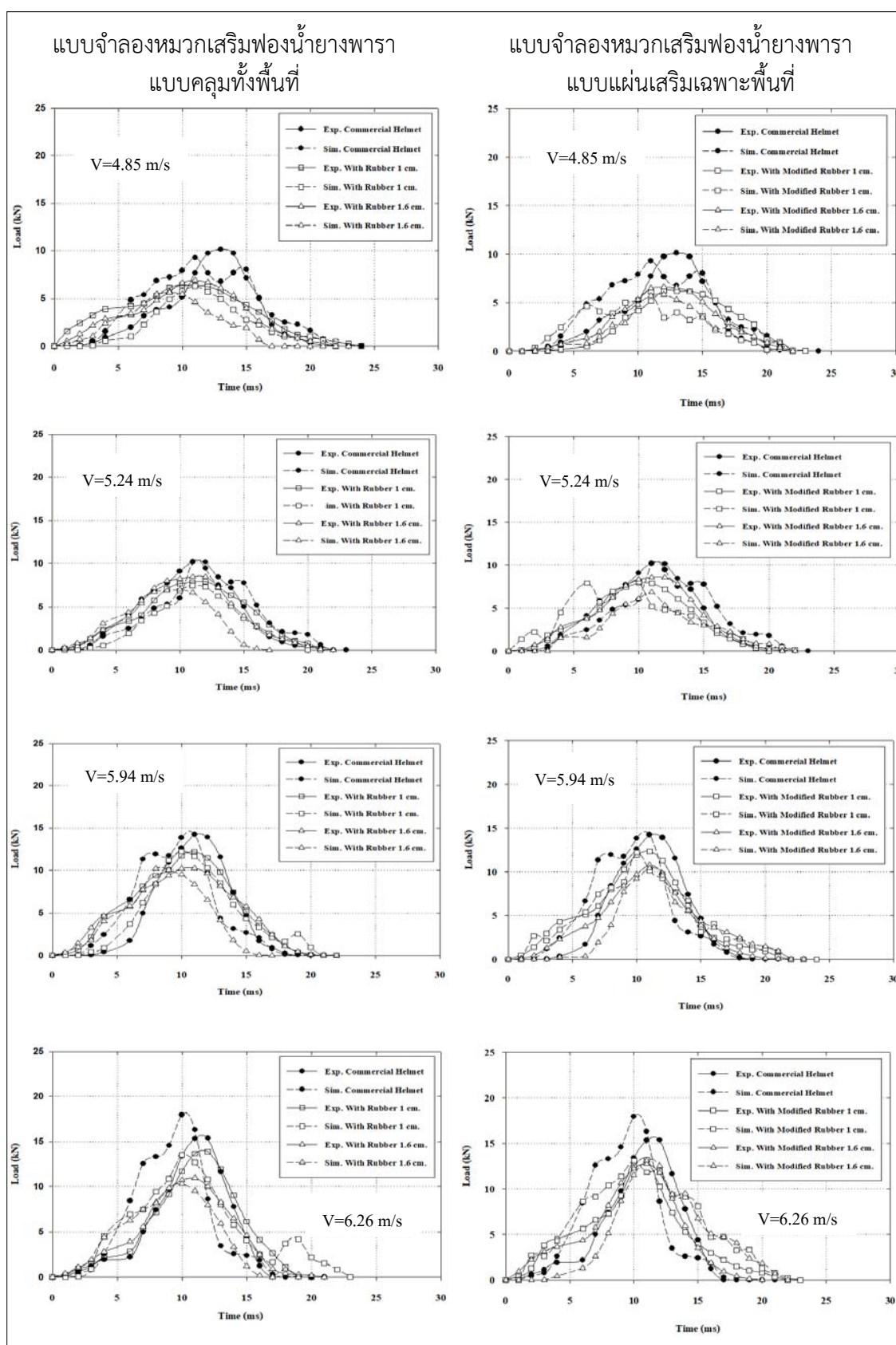
ความหนา 1 cm และ 1.6 cm แตกต่างกัน 31.02% และ 33.49% ตามลำดับ ส่วนกรณีหมวกที่เสริมพองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่ที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm จะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำยางพาราอยู่ที่ 31.52% และ 34.73% ตามลำดับ เช่นเดียวกันที่ความเร็วที่สูงขึ้นนั้นภาระโหลดที่เกิดขึ้นกับหมวกที่เสริมพองน้ำยางพารานั้นจะต่ำกว่าหมวกที่ไม่ได้ทำการเสริมพองน้ำ ในที่นี้จะยกตัวอย่างที่ความเร็ว 6.26 m/s พบว่าค่าความแตกต่างกันระหว่างหมวกที่ไม่ได้ทำการเสริมพองน้ำกับหมวกที่เสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm แตกต่างกัน 9.57% และ 28.66% ตามลำดับ ส่วนกรณีหมวกที่เสริมพองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่ที่ความหนา 1 cm และ 1.6 cm จะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำยางพาราอยู่ที่ 14.01% และ 16.87% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ลดลงเมื่อมีความเร็วสูงขึ้น เป็นในลักษณะแบบเดียวกันกับกรณีการทดสอบหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบและเต็มใบ วิเคราะห์ได้ว่าที่ความเร็วดำเนินพองน้ำยังสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้านการรับแรงกระแทกที่สูงมากแต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการกระแทกนั้นพองน้ำยางพาราจะมีประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกที่ลดลง และจากพฤติกรรมของการกระแทกในแต่ละความเร็วนั้นพบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน เมื่อเปรียบเทียบแบบของหมวกทั้ง 3 แบบ จากภาพที่ 4.1, 4.4 และ 4.7 เมื่อวิเคราะห์จากกราฟความเร็วสูงสุดที่ 6.26 m/s ภาระโหลดระหว่างหมวกแบบครึ่งใบ หมวกแบบเต็มใบ และหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าที่ไม่ได้ทำการเสริมพองน้ำจะพบว่าหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีภาระโหลดสูงสุดจากการกระแทกน้อยกว่าหมวกแบบเต็มใบและครึ่งใบ 9.57% และ 27.16% ตามลำดับ หากพิจารณาในด้านรูปแบบของหมวกระหว่างหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบกับหมวกกันน็อกแบบเต็มใบจะพบว่าค่าภาระโหลดของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า เมื่อเกิดการกระแทกจะมีค่าที่ต่ำกว่าหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบ ซึ่งเกิดจากรูปทรงของหมวกแบบเต็มใบที่มีพื้นที่ครอบคลุมศีรษะที่มากกว่าหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบ สำหรับรูปแบบของการเสริมพองน้ำนั้นเป็นเช่นเดียวกันกับหมวกแบบเต็มใบ คือความแตกต่างระหว่างภาระโหลดของการเสริมพองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่กับแบบคลุมเฉพาะพื้นที่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ความหนาเดียวกันที่ 1 cm หมวกเสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งพื้นที่จะมีค่าภาระโหลดต่ำกว่าแบบเสริมเฉพาะพื้นที่เล็กน้อยโดยแตกต่างกันที่ 0.71% ($V = 4.85$ m/s) 0.012% ($V = 5.42$ m/s) 1.06% ($V = 5.94$ m/s) และ 4.89% ($V = 6.26$ m/s) ตามลำดับ ในขณะที่ความหนา 1.6 cm หมวกเสริมพองน้ำแบบคลุมทั้งพื้นที่จะมีค่าภาระโหลดต่ำกว่าแบบเสริมเฉพาะพื้นที่แตกต่างกันที่ 1.93% ($V = 4.85$ m/s) 1.05% ($V = 5.42$ m/s) 4.57% ($V = 5.94$ m/s) และ 13.22% ($V = 6.26$ m/s) ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลนี้พบว่ารูปแบบการเสริมพองน้ำนั้นไม่มีความแตกต่างกันและสามารถใช้รูปแบบเสริมเฉพาะพื้นที่เพื่อใช้งานได้โดยมีน้ำหนักของตัวหมวกที่ลดลงกว่าแบบคลุมทั้งพื้นที่ ซึ่งแนวโน้มลักษณะเช่นนี้ก็มีความสอดคล้องกันกับหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบ



ภาพที่ 4.7 พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของแบบจำลองหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

4.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

การวิเคราะห์ผลการจำลองของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้าจะแสดงรูปแบบเป็น 2 รูปแบบ แบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ที่ความเร็วต่าง ๆ และแบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ที่ความเร็วต่าง ๆ เช่นเดียวกับลักษณะการวิเคราะห์ในกรณีหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบ จากภาพที่ 4.8 จะพบว่าแบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าทั้งแบบที่เสริมฟองน้ำยางพาราและไม่เสริมฟองน้ำยางพาราจะมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลจากการทดลอง ในที่นี้จะทำการยกตัวอย่างการวิเคราะห์ที่กรณีความเร็วสูงสุดที่ 6.26 m/s ความแตกต่างระหว่างข้อมูลการทดลองในห้องปฏิบัติการของหมวกกันน็อกเปรียบเทียบกับแบบจำลองทั้ง 5 แบบ คือแบบจำลองในกรณีหมวกที่ไม่เสริม แบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1 cm แบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm แบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ 1 cm และแบบจำลองหมวกเสริมฟองน้ำยางพาราแบบใช้แผ่นเสริมเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm จะมีเปอร์เซ็นต์แตกต่างกันที่ 17.09% 2.66% 5.84% 0.68% และ 2.76% ตามลำดับ



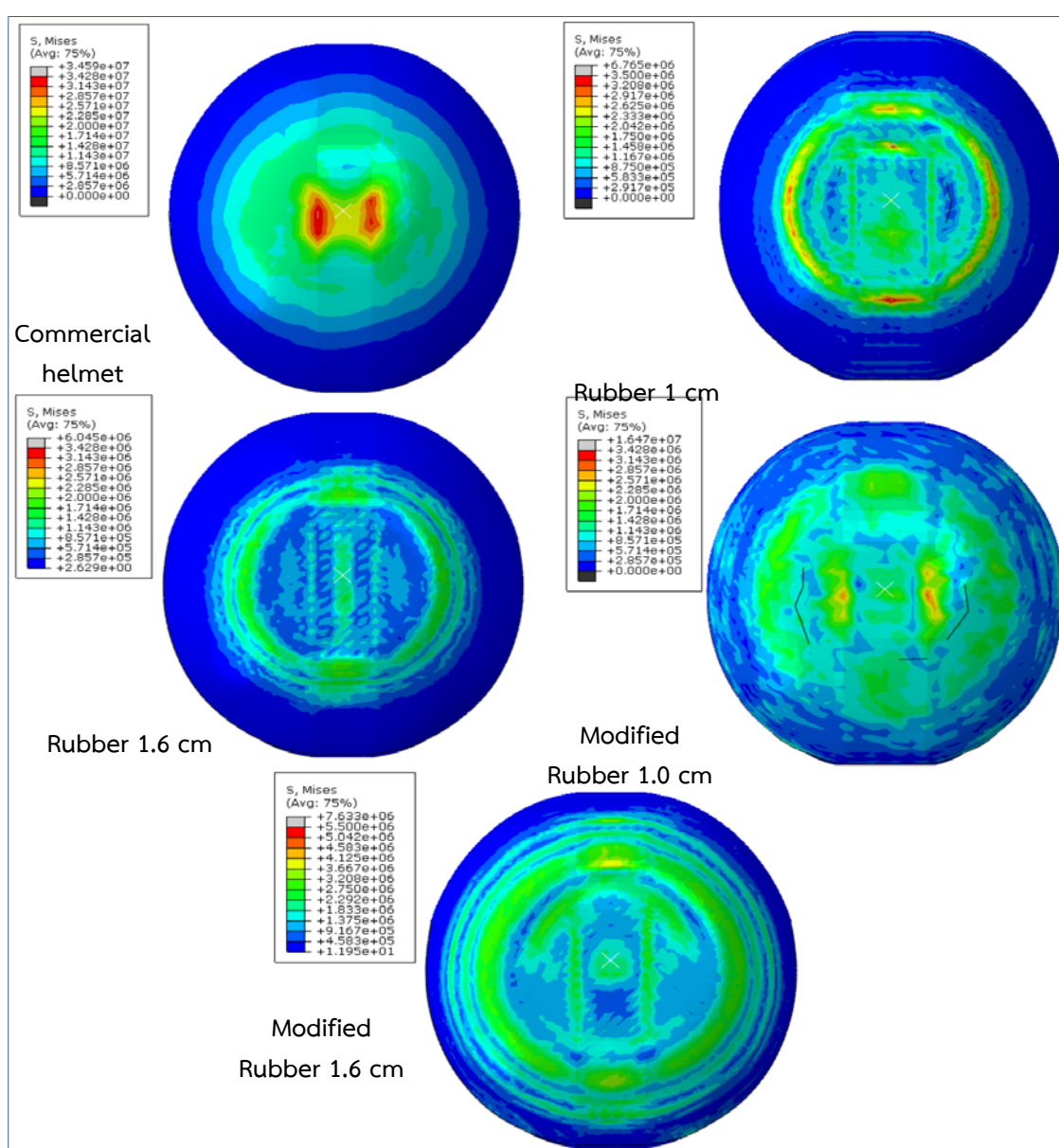
ภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับการทดลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดสูงสุดระหว่างการทดลองและแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า

รูปแบบของหมวก	ความเร็ว (m/s)	ภาระโหลดสูงสุด (kN)		ความ แตกต่าง (%)	R-Squared (r ²)
		การทดลอง	แบบจำลอง		
1. หมวกที่ไม่ได้เสริมพองน้ำ	4.85	10.12	9.2747	8.39	0.71
	5.42	10.20	10.13	0.68	0.72
	5.94	14.20	14.27	0.49	0.64
	6.27	15.33	17.95	17.09	0.54
2. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราแบบคลุม ทั้งพื้นที่ 1.0 cm	4.85	6.36	6.28	1.25	0.79
	5.42	7.95	7.49	5.78	0.50
	5.94	12.20	12.24	0.32	0.87
	6.27	13.88	13.51	2.66	0.93
3. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราแบบคลุม ทั้งพื้นที่ 1.6 cm	4.85	6.90	5.64	18.26	0.59
	5.42	8.52	7.01	17.72	0.77
	5.94	10.27	10.18	0.87	0.90
	6.27	10.95	10.31	5.84	0.75
4. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.0 cm	4.85	6.25	6.15	1.60	0.57
	5.42	7.95	8.10	1.88	0.51
	5.94	12.33	12.20	1.05	0.72
	6.27	13.20	13.11	0.68	0.74
5. หมวกเสริมพองน้ำ ยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm	4.85	6.60	5.86	11.21	0.67
	5.42	8.61	6.86	20.32	0.59
	5.94	10.74	10.44	2.79	0.78
	6.27	12.76	13.11	2.74	0.58

จากข้อมูลจะวิเคราะห์ได้ว่าบางกรณีเช่นแบบจำลองหมวกที่ไม่ได้ทำการเสริมพองน้ำยางพาราจะมีค่าความแตกต่างถึง 17.09% ซึ่งความคาดเคลื่อนนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการในบางครั้งนั้นจะมีชิ้นส่วนรายละเอียดของหมวกที่ค่อนข้างหลายชิ้นนำมาประกอบกัน ทำให้ในบางครั้งเมื่อนำมาสร้างแบบจำลองนั้นค่อนข้างลำบากที่สร้างแบบจำลองที่มีรายละเอียดของอุปกรณ์ได้ครบตามแบบจริงในห้องปฏิบัติการ จึงทำให้มีโอกาสเกิดความคาดเคลื่อนค่อนข้างสูง และจากข้อมูลในกราฟจะพบว่าเส้นของกราฟแบบจำลองนั้นมีลักษณะที่ไม่เป็นไปตามเส้นกราฟการทดลองมากนัก ทำให้จะส่งผลถึงข้อมูลความเป็นเชิงเส้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

จากตารางที่ 4.6 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการทดลองกับแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้านั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.32 – 20.32% ถือว่าผลการทดลองที่มีค่าความแตกต่างกันมากที่สุดในจำนวนหมวกทั้ง 3 แบบ ทั้งนี้เนื่องจากหมวกแบบเต็มใบปิดหน้านั้นมีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนรายละเอียดภายในหมวกค่อนข้างจะมากกว่าหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่มากกว่าหมวกแบบอื่น ๆ ในส่วนของค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ในเชิงเส้นของกราฟ พบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของการทดลองและแบบจำลองที่อยู่ในช่วง 0.51 – 0.90 ซึ่งก็สอดคล้องกับผลของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างการทดลองกับแบบจำลองที่หมวกชนิดเต็มใบปิดหน้าจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดหากเปรียบเทียบกับหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบและเต็มใบ



ภาพที่ 4.9 แบบจำลองแสดงพฤติกรรมและการกระแทกที่ภาระโหลดสูงสุดที่ความเร็ว 6.26 m/s ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า

จากภาพที่ 4.9 เป็นรูปพฤติกรรมภาระโหลดสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้าจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยนี้จะขอยกตัวอย่างในกรณีการกระแทกที่ความเร็วสูงสุดคือ 6.26 m/s จากรูปในขณะที่เกิดภาระโหลดสูงสุดของหมวกแต่ละแบบจะพบว่า หมวกที่ไม่ได้มีการเสริมพองน้ำยางพาราจะมีค่าของ von Mises stress ที่มีค่าสูงมากกว่า 38.6 MPa ที่บริเวณตรงกลางของหมวกกันน็อค ซึ่งหากวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรณีแบบจำลองของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบและเต็มใบนั้น จะพบว่าหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีการกระจายตัวของ von Mises stress ที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวของ stress น้อยกว่าแบบครึ่งใบและเต็มใบ หากพิจารณาในกรณีที่มีการเสริมพองน้ำยางพารานั้นค่าของ von Mises stress จะมีค่าที่ต่ำกว่า 3.50 MPa เป็นส่วนมากของพื้นที่เมื่อเปรียบเทียบกับหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบอีกด้วย นั้นหมายถึงคุณสมบัติที่หมวกแบบเต็มใบปิดหน้านั้นสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่าการกระจายแรงจะกระจายได้ดีกว่าแบบครึ่งใบและแบบเต็มใบ

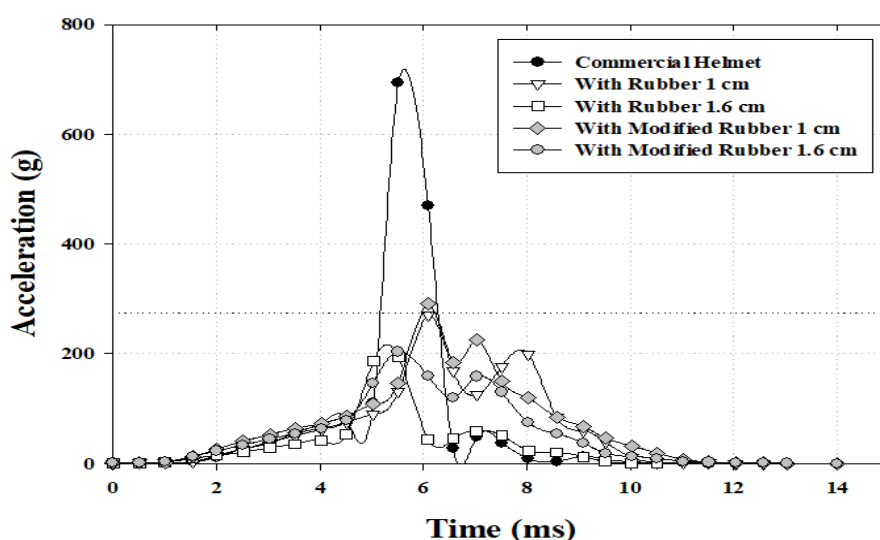
จากภาพที่ 4.3, 4.6 และ 4.9 หากพิจารณาเปรียบเทียบกัน 3 รูปแบบของหมวกกันน็อคคือหมวกแบบครึ่งใบ แบบเต็มใบและแบบเต็มใบปิดหน้าจะพบว่าพฤติกรรมของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีค่า von Mises stress จะมีความใกล้เคียงกันกับหมวกแบบครึ่งใบและแบบเต็มใบเป็นส่วนมาก โดยจะมีค่า stress อยู่ในช่วง 1.71 – 2.28 MPa เมื่อพิจารณาเฉพาะหมวกที่เสริมพองน้ำยางพาราก็จะพบว่า การกระจายของ stress จะมีลักษณะที่คล้ายกันคือกระจายไปทั่วพื้นผิวของหมวกกันน็อคทั้งนี้พบว่าที่หมวกเสริมพองน้ำยางพาราเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm นั้นจะพบว่ามีบางจุดที่เกิด von Mises stress สูงทั้งนี้เกิดจุดที่เกิดนั้นเป็นช่วงของรอยต่อของชิ้นงานที่เกิดจากชิ้นรูปแบบจำลองจึงทำให้มีค่า von Mises stress ที่สูงกว่า 4.58 MPa บ้างในบางจุดเท่านั้น ทั้งนี้จากการวิเคราะห์หมวกทั้ง 3 แบบจะพบว่าเนื่องจากจุดที่หัวค้อนตกลงมากระแทกกับหมวกนั้นเป็นจุดเดียวกันคือบริเวณด้านบนของศีรษะ จึงทำให้ความแตกต่างระหว่าง von Mises stress ของหมวกแต่ละแบบนี้ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงกระแทกที่คล้ายกันแตกต่างกันที่ความโค้งของตัวหมวกเล็กน้อยเท่านั้น โดยจากการศึกษาแบบจำลองของหมวกกันน็อคที่เสริมพองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่นั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนของ von Mises stress ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ค่อนข้างมาก เนื่องจากลักษณะของการเสริมพองน้ำยางพาราเฉพาะพื้นที่นั้น ภายในหมวกนั้นจะมีลักษณะของอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างศีรษะกับโฟม ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใส่คุณสมบัติของอากาศที่อยู่ในช่องว่างเข้าไป ซึ่งแตกต่างจากการคลุมแผ่นพองน้ำทั้งพื้นที่ที่ไม่มีอากาศมาเกี่ยวข้องทำให้รูปของ von Mises stress อาจจะมีการคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้ และหากพิจารณาจุดกระแทกที่เป็นจุดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่บริเวณกลางศีรษะ ก็มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างรูปแบบของหมวกที่มากกว่าเดิม ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้วิเคราะห์การกระแทกที่จุดอื่น ๆ ของหมวกเนื่องจากผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกันกับการทดลองจริงจึงยังไม่ได้วิเคราะห์ในส่วนนี้เพิ่มเติม

4.4 ผลของค่าความเร่ง (Acceleration) และ HIC จากการกระแทกของหมวกกันน็อก

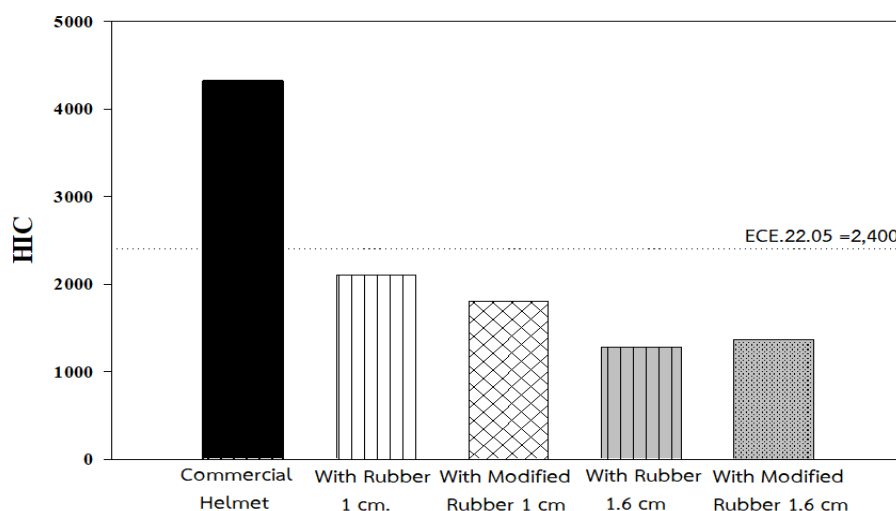
ในการศึกษาความเร่ง (Acceleration) และค่า HIC ของหมวกกันน็อกทั้ง 3 แบบนั้นจะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยหมวกแบบครึ่งใบจะทำการทดสอบที่ความเร็วในการกระแทก 5.94 m/s ส่วนหมวกแบบเต็มใบและเต็มใบปิดหน้าจะทำการทดสอบที่ความเร็วในการกระแทก 7.67 m/s และจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการกับผลจากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทาง FEA เพื่อเป็นแนวทางในการใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ที่รูปแบบอื่น ๆ ในอนาคต โดยรายละเอียดของผลการทดสอบและการวิเคราะห์จะเป็นดังหัวข้อต่อไปนี้

4.4.1 ผลการทดสอบความเร่ง (Acceleration) และ HIC ของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

ภาพที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งของการทดสอบหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบเทียบเวลา ซึ่งจากกราฟจะพบว่าค่าความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration, P_{acc}) ของหมวกกันน็อกที่ไม่เสริมฟองน้ำอย่างพาราจะมีค่าสูงที่สุดที่ 693.03 g ส่วนหมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราที่มีความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ที่มีค่าความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration) คือ 277.94 g และ 290.66 g ตามลำดับ และ หมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราที่มีความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่ส่วนมีค่า 221.05 g และ 204.17 g ตามลำดับ วิเคราะห์ได้ว่าการเสริมฟองน้ำอย่างพารานั้นค่าความแตกต่างของความเร่งสูงสุดได้ ส่วนความหนาของการเสริมฟองน้ำอย่างพารานั้นค่าความแตกต่างของความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นทั้งการเสริมแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมเป็นบางส่วนไม่เกิดความแตกต่าง ส่วนภาพที่ 4.1 เป็นผลของค่า HIC ของหมวกกันน็อกแต่ละแบบซึ่งสอดคล้องกับค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดกับหมวกกันน็อกคือหากค่าความเร่งสูงสุดมีค่าสูงก็จะเป็นผลให้ค่า HIC มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า HIC ของหมวกกันน็อกที่ไม่มีการเสริมฟองน้ำอย่างพารามีค่า 4,313 ส่วนหมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราที่มีความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่มีค่า 2,109 และ 1,805 ตามลำดับ และหมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราที่มีความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเฉพาะพื้นที่มีค่า 1,276 และ 1,362 ตามลำดับ



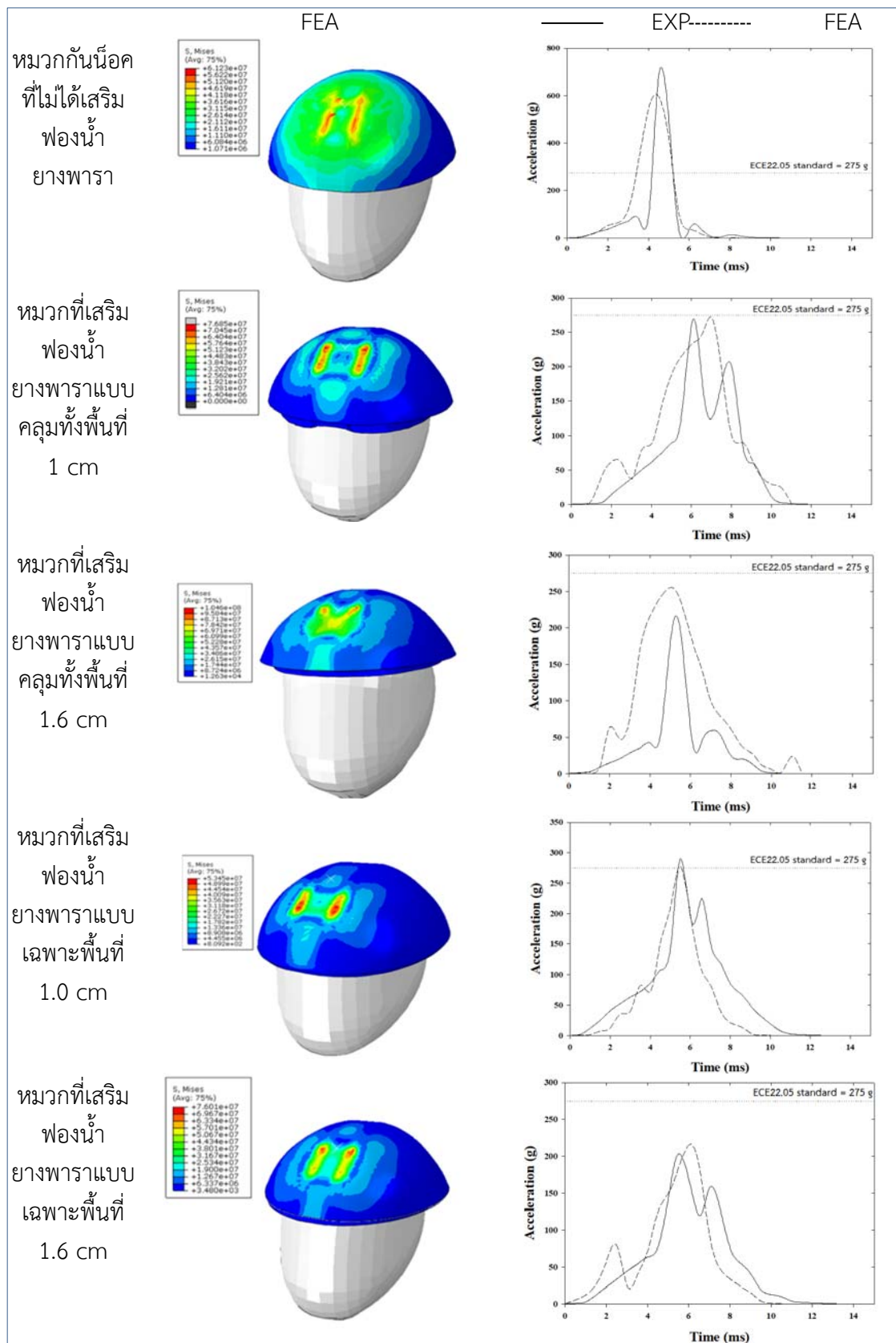
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่ง (Acceleration) กับเวลาของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ



ภาพที่ 4.11 ค่า HIC ของการทดสอบหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

4.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) และ HIC ของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองการกระแทกเพื่อทดสอบค่าความเร่งของหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบในที่นี้จะแสดงผลดังภาพที่ 4.12 พบว่าผลระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลของแบบจำลองมีความแตกต่างกันบ้างพอสมควร จากการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองนั้นพบว่าหมวกแบบครึ่งใบที่ไม่ได้ทำการเสริมฟองน้ำยางพาราจะมีค่า von Mises stress มีค่าอยู่ในช่วง 26 – 40 MPa และมีลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างกว่าหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราในทุกกรณี โดยหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบที่เสริมฟองน้ำยางพาราในทุกรูปแบบจะมีค่า von Mises stress อยู่ในช่วงเดียวกันกับหมวกที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำแต่จะมีลักษณะของความเค้นที่เป็นบริเวณกว้างน้อยกว่าแบบที่ไม่ได้ทำการเสริมฟองน้ำ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแบบจำลองของหมวกแบบไม่เสริมฟองน้ำยางพาราจะพบว่าค่าความเร่งสูงสุดที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 693.03 g ส่วนผลของแบบจำลองนั้นจะมีค่า 595.76 g ซึ่งจะพบว่ามีความแตกต่างกันระหว่างผลการทดลองและแบบจำลอง ทั้งนี้วิเคราะห์ได้ว่าเนื่องจากการวิเคราะห์นั้นผู้วิจัยไม่ได้สร้างรายละเอียดของผ้ารองในหมวก สายรัดคาง และส่วนโค้งของรูปหมวกนั้นมีความโค้งของหมวกกันน็อกที่มีความโค้งไม่เท่ากันหรือไม่สม่ำเสมอทำให้เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองนั้นก็ทำให้เกิดค่าความคาดเคลื่อนจากแบบหมวกจริงได้ หากวิเคราะห์แบบจำลองหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราในที่นี้ขอยกตัวอย่างหมวกแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1 cm จะพบว่าค่าความเร่งที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 269.58 g ส่วนผลของแบบจำลองนั้นจะมีค่า 271.67 g แม้ว่าผลของความเร่งสูงสุดจะค่าใกล้เคียงกันแต่ลักษณะของรูปกราฟนั้นก็มีความแตกต่างกันพอสมควรทั้งนี้ก็เป็นผลจากความโค้งของหมวกกันน็อกที่มีความโค้งไม่เท่ากันเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4.12 ผลของแบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) ของหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบ

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของค่าความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) และปริมาณ HIC ที่เกิดขึ้นกับหมวกแบบครึ่งใบในทุกกรณี ซึ่งจากตารางพบว่าในกรณีของ P_{ACC} ผลของการทดลองกับการวิเคราะห์แบบจำลองจะมีความใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงกราฟที่มีความแตกต่างกันทำให้ค่า HIC นั้นจะมีความแตกต่างกันพอสมควรทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปแบบของเส้นกราฟที่ต่างกัน สำหรับค่า HIC ที่เกิดขึ้นกับหมวกกันน็อครูปแบบต่าง ๆ พบว่าหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำยางพาราสองแบบคือแบบครึ่งใบและแบบเต็มใบมีค่า HIC อยู่ที่ 4,131 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน หากพิจารณาหมวกกันน็อคที่มีการเสริมฟองน้ำยางพาราทุกรูปแบบนั้นจะมีค่า HIC อยู่ในช่วง 1,300 – 2,100 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยค่า HIC เป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าการบาดเจ็บที่ศีรษะ หาก HIC มีค่าเกินกว่า 2,400 ก็จะมีผลต่อการบาดเจ็บที่ศีรษะของมนุษย์ได้

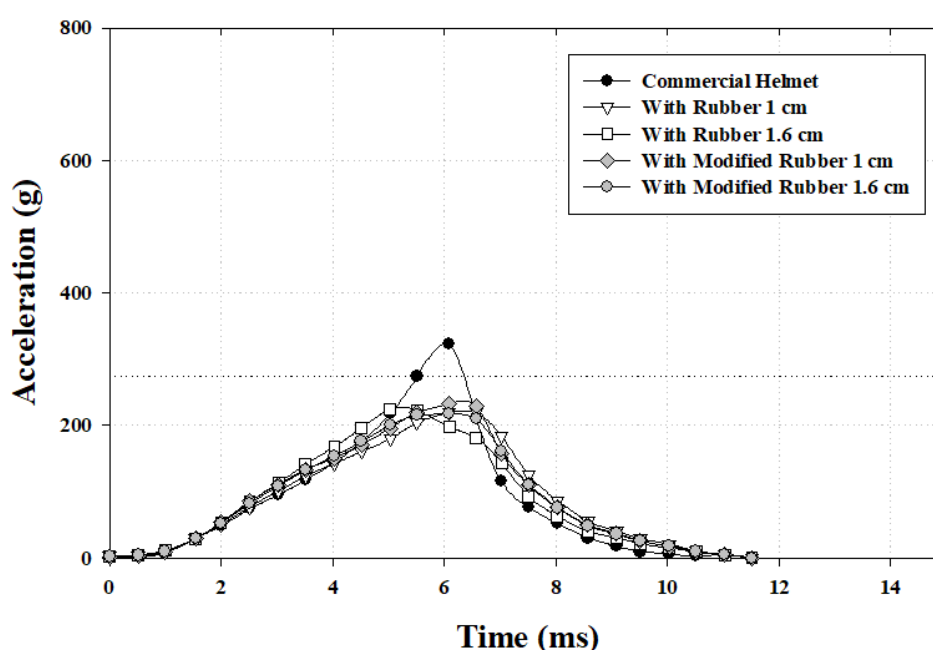
ตารางที่ 4.7 ผลของค่าความเร่งสูงสุดและ HIC ของหมวกแบบครึ่งใบ

ชนิดหมวก	P_{ACC} (g) (EXP)	P_{ACC} (g) (SIM)	HIC (EXP)	HIC (SIM)
หมวกกันน็อคที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำยางพารา	693.03	595.76	4,131	4,228
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1 cm	277.94	271.67	2,109	2,503
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราแบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm	221.05	256.10	1,805	2,309
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่ 1.0 cm	290.66	277.99	1,276	1,126
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราแบบเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm	204.17	216.92	1,362	1,238

4.4.3 ผลการทดสอบความเร่ง (Acceleration) และ HIC ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

การทดสอบหมวกกันน็อคแบบเต็มใบจะมีความแตกต่างจากหมวกแบบครึ่งใบเล็กน้อยคือความเร็วที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน ECE22.05 นั้นจะทดสอบที่ความเร็ว 7.67 m/s โดยในภาพที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งของการทดสอบหมวกกันน็อคแบบเต็มใบเทียบกับเวลา ซึ่งจากกราฟจะพบว่าค่าความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) ของหมวกกันน็อคที่ไม่เสริมฟองน้ำยางพาราจะมีค่าสูงที่สุดที่ 322.03 g ส่วนหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำยางพาราที่ความหนา 1 cm ซึ่งหากมองในเรื่องของมาตรฐานตามเกณฑ์ของ ECE22.05 ที่ทดสอบนั้นจะพบว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ตั้งไว้ ทั้งนี้ในตอนทดสอบนั้นผู้วิจัยได้ทำการนำผ้ารองในที่อยู่ระหว่างโหมกับศีรษะออกเพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมความแตกต่างระหว่างการเสริมฟองน้ำกับไม่เสริมฟองน้ำจึงทำให้ค่าของ P_{ACC} มีค่าสูงกว่าปกติ ในส่วนของหมวกที่มีการเสริมฟองน้ำยางพาราที่ความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมเฉพาะพื้นที่จะมีค่าความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) คือ 229.15 และ 236.33 g ตามลำดับ และ หมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำยางพาราที่ความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมเป็นบางส่วนมี

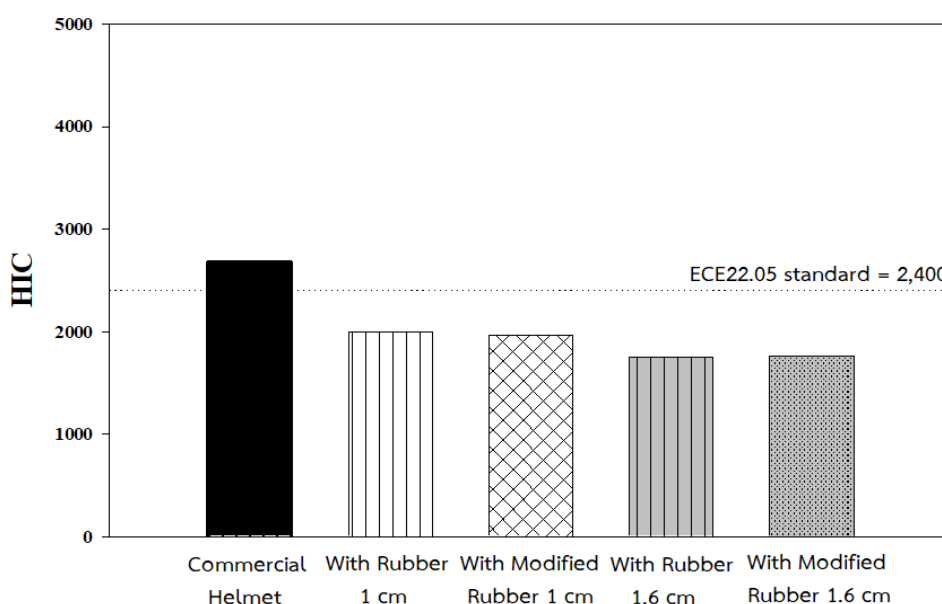
ค่า 223.34 และ 217.21 ตามลำดับ วิเคราะห์ได้ว่าการเสริมฟองน้ำยางพาราเข้าไปในหมวกกันน็อคแบบเต็มสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดได้และลดลงมาอยู่ตามมาตรฐานที่ ECE22.05 กำหนดที่ไม่เกินกว่า 275 g ส่วนความหนาของการเสริมฟองน้ำยางพารานั้นค่าความแตกต่างของความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้หากพิจารณาในด้านการสวมใส่ที่สะดวกสบายและน้ำหนักเบา นั้นหมวกแบบเสริมฟองน้ำเฉพาะพื้นที่ที่มีความหนา 1 cm นั้นก็สามารถที่จะช่วยลดความเร่งจากกระแทกให้อยู่ในมาตรฐาน ECE22.05 กำหนดได้อย่างปลอดภัย



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่ง (Acceleration) กับเวลาของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ

การวิเคราะห์ผลของ HIC ของหมวกแบบเต็มใบนั้นในภาพที่ 4.14 เป็นผลของค่า HIC ของหมวกกันน็อคแต่ละแบบซึ่งสอดคล้องกับค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดกับหมวกกันน็อคคือหากค่าความเร่งสูงสุดมีค่าสูงก็จะเป็นผลให้ค่า HIC มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า HIC ของหมวกกันน็อคที่ไม่มีการเสริมฟองน้ำยางพารามีค่า 2,679 ส่วนหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำยางพาราที่มีความหนา 1 เซนติเมตร ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมมีค่า 1,998 และ 1,967 ตามลำดับ และหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำยางพาราที่มีความหนา 1.6 เซนติเมตร ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมมีค่า 1,745 และ 1,762 ตามลำดับ จากการทดลองจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าของความเร่งที่เกิดกับหมวกแบบเต็มใบนั้นจะมีค่าต่ำกว่าหมวกแบบครึ่งใบ ทั้งนี้หมวกแบบเต็มใบที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำจะมีค่าสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย แม้ว่าในกรณีหมวกแบบเต็มใบที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำยางพาราจะมีค่า P_{ACC} และ HIC ที่สูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดแต่ก็มีผลมาจากการนำผ้ารองในที่อยู่ระหว่างโพนกับศีรษะออกในงานวิจัยนี้ ซึ่งค่า P_{ACC} ที่สูงกว่ากำหนดก็ส่งผลให้ค่า HIC ที่สูงกว่ากำหนดตามไปด้วย ส่วนในกรณีหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราในทุกแบบนั้นพบว่ามีค่า HIC ที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดจึงวิเคราะห์ได้ว่าฟองน้ำยางพาราที่เสริมเข้าไปในหมวกกันน็อคสามารถช่วยลด P_{ACC} และ HIC ที่เกิดขึ้นได้ ส่วน

รูปแบบการเสริมฟองน้ำอย่างพารานั่นแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมเฉพาะพื้นที่ที่จะมีค่า P_{ACC} และ HIC ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในกรณีความหนาของฟองน้ำอย่างพารานั้นพบว่าการเสริมฟองน้ำที่ความหนา 1.6 cm จะช่วยลดค่า P_{ACC} และ HIC ได้มากกว่าการเสริมฟองน้ำอย่างพาราที่ 1 cm เล็กน้อย ด้วยรูปร่างของหมวกแบบเต็มใบที่มีลักษณะคลุมทั้งศีรษะของผู้ขับขี่เมื่อเปรียบเทียบกับหมวกแบบครึ่งใบที่มีลักษณะปกป้องเฉพาะส่วนบนของศีรษะเท่านั้น ทำให้เวลาที่มีการสวมใส่อาจจะต้องคำนึงถึงน้ำหนักของหมวกที่เพิ่มขึ้นหากเสริมฟองน้ำอย่างพารามากกว่าแบบครึ่งใบที่มีน้ำหนักน้อยอยู่แล้ว หากพิจารณาในด้านการสวมใส่ที่เหมาะสมนั้นหมวกกันน็อกแบบเต็มใบที่เสริมฟองน้ำอย่างพารานั้นจะมีน้ำหนักมากกว่าหมวกปกติที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำอยู่พอสมควรดังนั้นการเสริมฟองน้ำอย่างพาราที่ความหนามากเกินไปนั้นอาจเกิดปัญหาในด้านความสบายของผู้ขับขี่ได้เช่นกัน

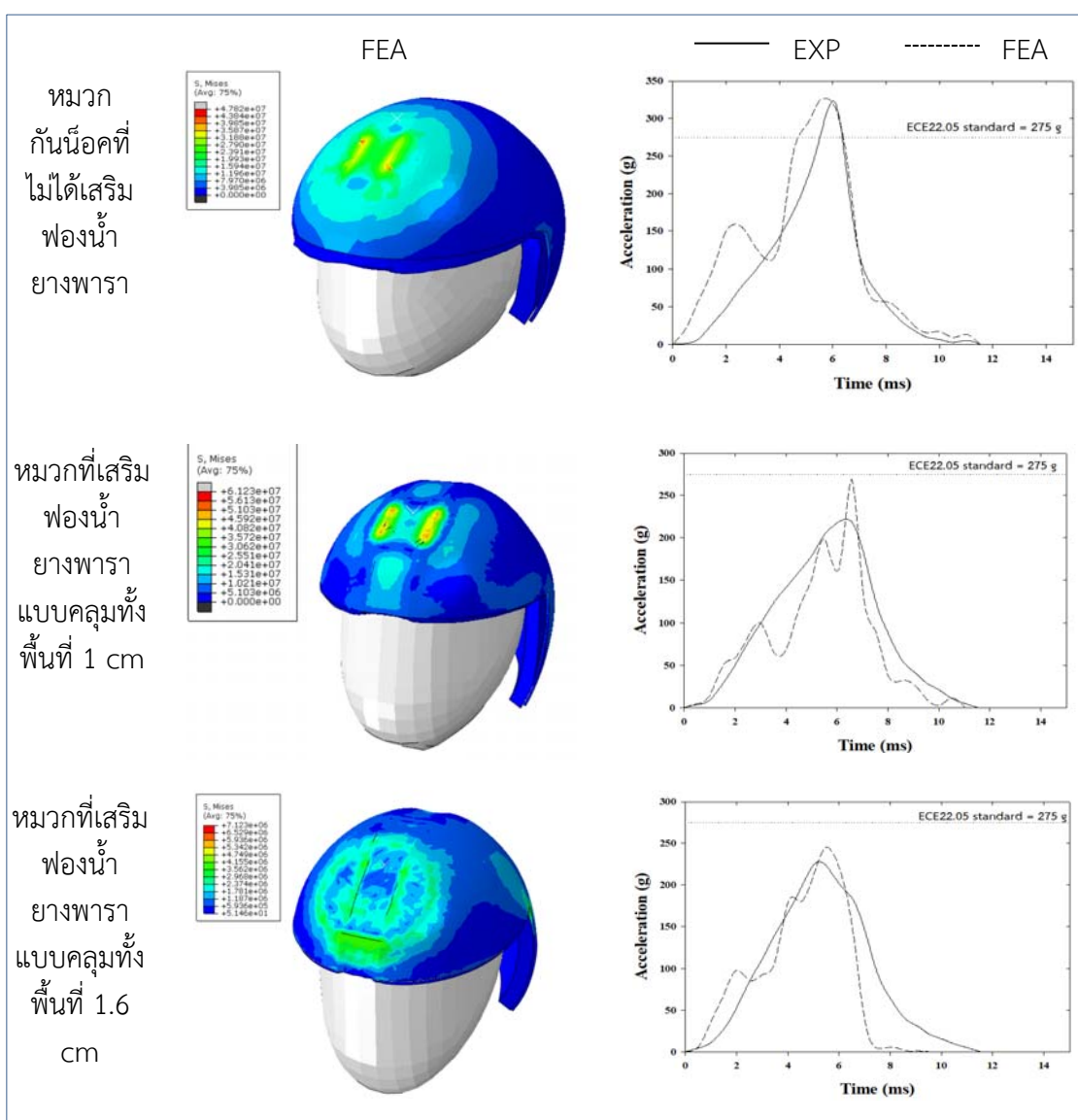


ภาพที่ 4.14 ค่า HIC ของการทดสอบหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ

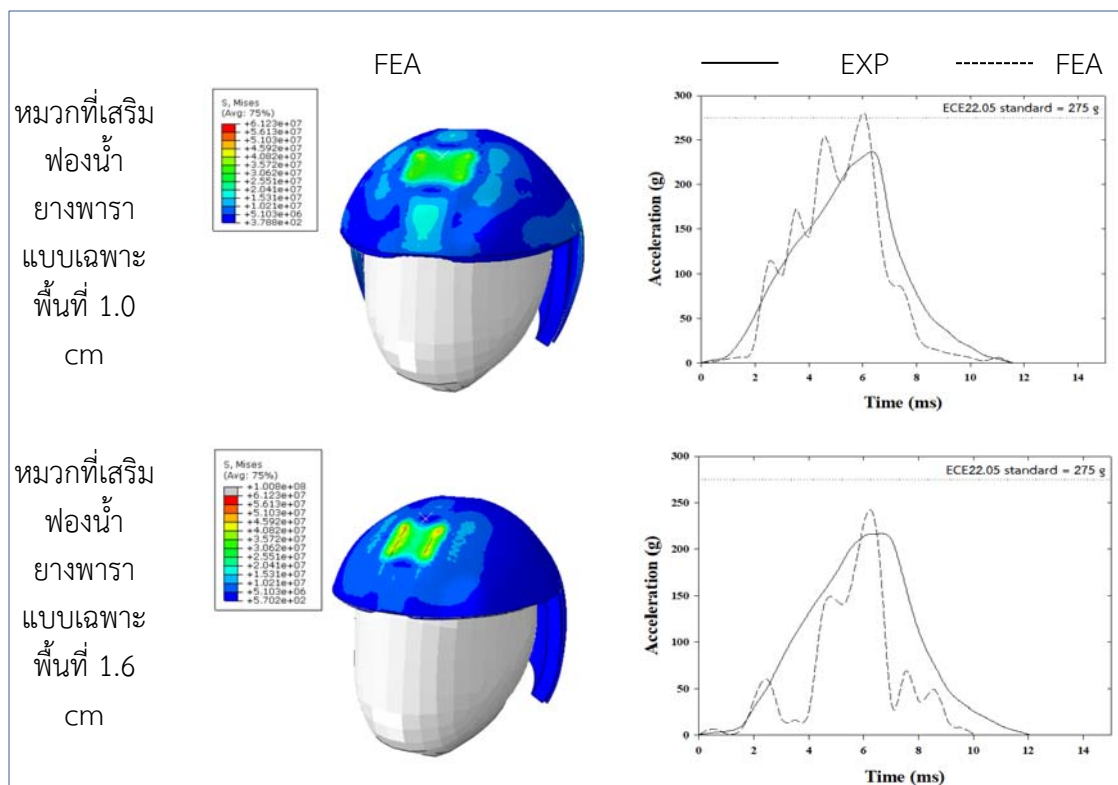
4.4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) และ HIC ของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.15 จะพบว่าลักษณะรูปแบบของ von Mises stress ของหมวกแบบเต็มใบที่ไม่ได้ทำการเสริมฟองน้ำอย่างพาราจะมีลักษณะเป็นวงกว้างกว่าหมวกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราอยู่ในช่วง 27.90 – 43.84 MPa ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับหมวกแบบครึ่งใบแต่ลักษณะของการกระจายตัวของความเค้นจะน้อยกว่าหมวกแบบครึ่งใบ และหากพิจารณาจากหมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราจะพบว่าค่าของความเค้นที่เกิดบริเวณหมวกกันน็อกจะมีการกระจายตัวน้อยกว่าโดยจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดของหมวกแบบเสริมฟองน้ำอย่างพาราทุกรูปแบบนี้มักจะเป็นจุดต่อของชิ้นส่วนแบบจำลอง ซึ่งหากพิจารณาถึงบริเวณอื่น ๆ ที่ไม่ใช่จุดต่อแล้วนั้นจะพบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่อยู่ในระหว่าง 30 – 35 MPa ซึ่งจะวิเคราะห์ห่อหุ้มของฟองน้ำอย่างพารานั้นช่วยลดค่าความเร่งที่เกิดขึ้นและลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในหมวกกันน็อกได้ เมื่อพิจารณาจากกราฟ

เปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการสร้างแบบจำลองจะพบว่า ค่า P_{ACC} ของแบบจำลองนั้นจะมีค่าที่แตกต่างจากการทดลองอยู่พอสมควรเมื่อเปรียบเทียบกับผลของหมวกแบบครึ่งใบ ทั้งนี้เกิดจากส่วนประกอบและชิ้นส่วนของหมวกแบบเต็มใบนั้นมีความซับซ้อนมากกว่าหมวกแบบครึ่งใบ ทำให้การสร้างแบบจำลองที่สมจริงนั้นยากกว่าหมวกแบบครึ่งใบ จึงทำให้ผลของกราฟจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองนั้นมีลักษณะค่อนข้างแตกต่างจากการทดลองจริง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จำเป็นต้องการวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อการยืนยันผลการทดลองว่าพองน้ำยางพารานั้นช่วยลดค่า P_{ACC} ได้จริงฉนั้นแล้วแบบจำลองที่สร้างขึ้นก็ถือว่าสามารถนำมาใช้ในการยืนยันผลการทดลองได้โดยอาจจะมีค่าความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองบ้างในบางกรณี



ภาพที่ 4.15 ผลของแบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ



ภาพที่ 4.15 ผลของแบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบ (ต่อ)

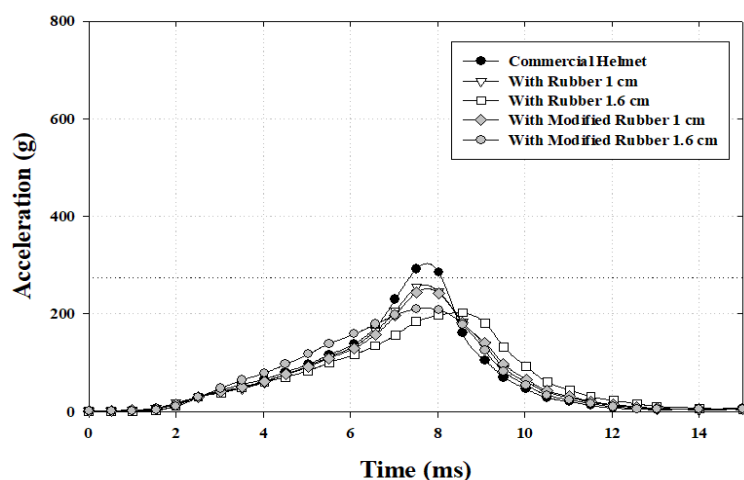
การวิเคราะห์ผลของค่าความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) และปริมาณ HIC ที่เกิดขึ้นกับหมวกแบบเต็มใบในทุกกรณี จากตารางที่ 4.8 พบว่าในกรณีของ P_{ACC} ผลของการทดลองกับการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบจะมีความแตกต่างกันบ้างในบางกรณี และเมื่อพิจารณาจากรูปเส้นกราฟนั้นแตกต่างกันก็จะส่งผลให้ค่า HIC นั้นจะมีความแตกต่างกันพอสมควร หากเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของหมวกแบบครึ่งใบนั้น ผลการทดลองของหมวกแบบเต็มใบจะมีความคาดเคลื่อนมากกว่า แต่หากใช้ผลจากแบบจำลองเพื่อมาเป็นการยืนยันผลจากการทดสอบนั้นก็พบว่าแบบจำลองหมวกแบบเต็มใบนั้นสามารถใช้งานได้ สำหรับค่า HIC ที่เกิดขึ้นกับหมวกกันน็อคแบบเต็มใบรูปแบบต่าง ๆ พบว่าหมวกที่ไม่ได้มีการเสริมฟองน้ำยางพาราสองแบบคือแบบครึ่งใบและแบบเต็มใบมีค่า HIC อยู่ที่ 2,679 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ากว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย หากพิจารณาหมวกกันน็อคที่มีการเสริมฟองน้ำยางพาราทุกรูปแบบนี้จะมีค่า HIC อยู่ในช่วง 1,700 – 2,000 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยจากข้อมูลในตารางก็จะพบว่าหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพารานั้นช่วยลดการบาดเจ็บที่เกิดกับศีรษะมนุษย์ได้ในทุกรูปแบบของการเสริมฟองน้ำ

ตารางที่ 4.8 ผลของค่าความเร่งสูงสุดและ HIC ของหมวกแบบเต็มใบ

ชนิดหมวก	P _{ACC} (g) (EXP)	P _{ACC} (g) (SIM)	HIC (EXP)	HIC (SIM)
หมวกกันน็อกที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำ ยางพารา	322.03	324.06	2,679	2,392
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพารา แบบคลุมทั้งพื้นที่ 1 cm	229.15	269.15	1,998	1,833
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพารา แบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm	223.34	245.40	1,745	1,633
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพารา แบบเฉพาะพื้นที่ 1.0 cm	236.33	279.20	1,967	2,237
หมวกที่เสริมฟองน้ำยางพารา แบบเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm	217.21	235.94	1,762	2,037

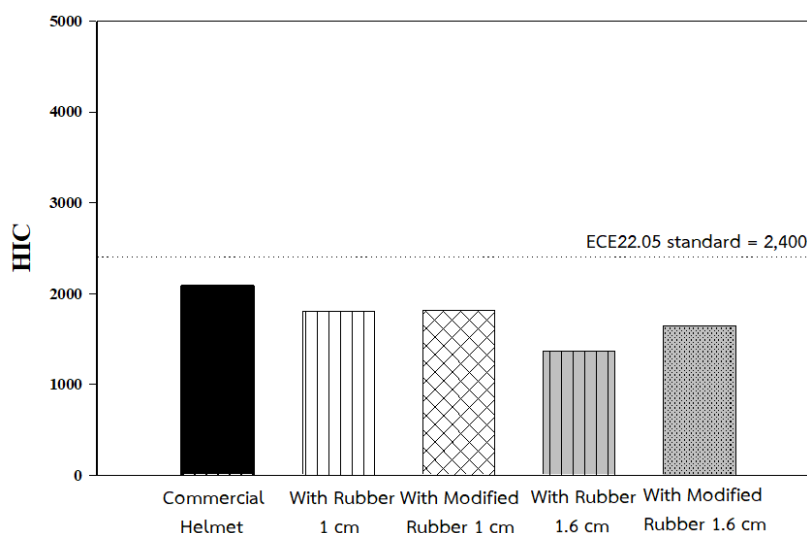
4.4.5 ผลการทดสอบความเร่ง (Acceleration) และ HIC ของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบ ปิดหน้า

ในการวิเคราะห์ความเร่งและค่า HIC ของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้านั้นจะทำการทดสอบความเร็วของการกระแทกเช่นเดียวกันกับกรณีหมวกแบบเต็มใบที่ความเร็ว 7.67 m/s โดยในภาพที่ 4.16 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่งของการทดสอบหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า ใเทียบเวลา ซึ่งจากกราฟจะพบว่าค่าความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) ของหมวกกันน็อกที่ไม่เสริมฟองน้ำยางพาราจะมีค่าสูงที่สุดที่ 305.07 g ส่วนหมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำยางพาราที่ความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมเป็นบางส่วนมีค่าความเร่งสูงสุด (Peak Acceleration) คือ 259.46 g และ 251.93 g ตามลำดับ และ หมวกกันน็อกที่เสริมฟองน้ำยางพาราที่ความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมเป็นบางส่วนมีค่า 203.34 g และ 211.25 g ตามลำดับ จากการทดลองจะพบว่าค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับหมวกแบบเต็มใบปิดหน้านี้นี้จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบ ทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปทรงของหมวกที่มีความครอบคลุมศีรษะที่มากที่สุด ประกอบกับการออกแบบของหมวกที่มีลักษณะคล้ายรูปหยดน้ำเพื่อการต้านลมที่ดีเนื่องจากหมวกชนิดนี้จะนิยมใช้มากในการแข่งขันกีฬาแข่งขันรถจักรยานยนต์ จากมาตรฐานที่ ECE22.05 กำหนดที่ไม่เกินกว่า 275 g พบว่าหมวกที่ไม่ได้ทำการเสริมฟองน้ำยางพาราจะมีค่าเกินกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย ส่วนในหมวกแบบที่เสริมฟองน้ำยางพาราในทุกแบบนี้ถือว่าอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร่ง (Acceleration) กับเวลาของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า

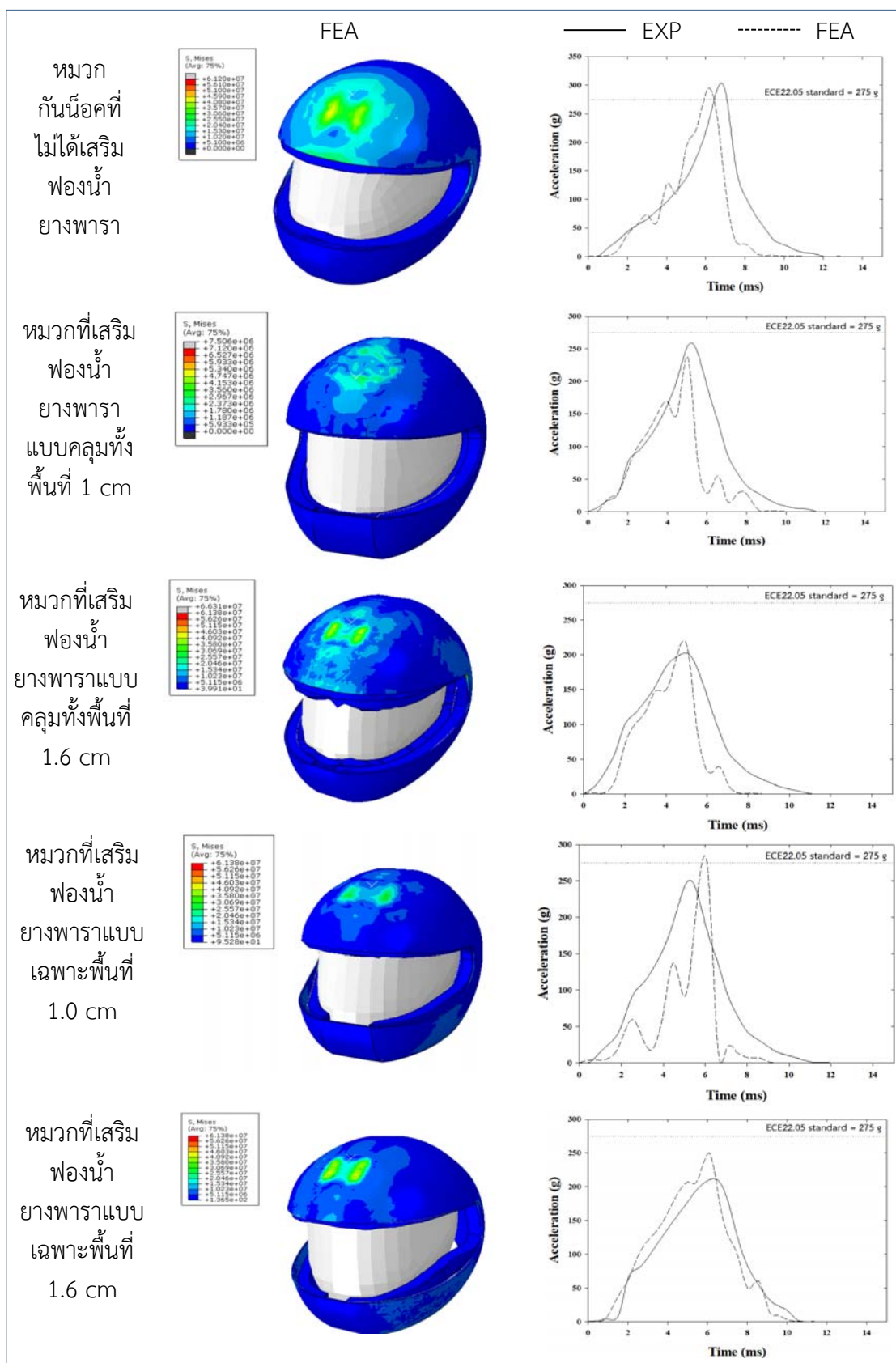
ในส่วนของการวิเคราะห์ผลของ HIC ของหมวกแบบเต็มใบนั้นในภาพที่ 4.17 เป็นผลของ ค่า HIC ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดกับหมวกกันน็อคคือหากค่าความเร่งสูงสุดมีค่าสูงก็จะเป็นผลให้ค่า HIC มีค่าสูงตามไปด้วย จากการศึกษาพบว่าค่า HIC ของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้านั้นจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ECE22.05 ทุกแบบซึ่งแตกต่างจากหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบที่มีบางรูปแบบนั้นค่า HIC จะมีค่าที่สูงกว่ามาตรฐานกำหนด จากภาพที่ 4.15 การทดลองพบว่าค่า HIC ของหมวกกันน็อคที่ไม่มีการเสริมฟองน้ำอย่างพารามีค่า 2,083 ส่วนหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราที่ความหนา 1 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมมีค่า 1,805 และ 1,813 ตามลำดับ ส่วนกรณีหมวกกันน็อคที่เสริมฟองน้ำอย่างพาราที่ความหนา 1.6 cm ทั้งแบบคลุมทั้งพื้นที่และแบบเสริมมีค่า 1,362 และ 1,638 ตามลำดับ จากการทดลองจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าของความเร่งที่เกิดกับหมวกแบบเต็มใบนั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่าหมวกกันน็อคแบบครึ่งใบและเต็มใบ



ภาพที่ 4.17 ค่า HIC ของการทดสอบหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า

4.4.6 การวิเคราะห์แบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) และ HIC ของหมวกกันน็อคแบบเต็มใบปิดหน้า

รูปแบบของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากที่สุดเนื่องจากหมวกชนิดนี้มีความโค้งที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ในแบบจำลองโดยวิธี FEA เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.18 จะพบว่าลักษณะรูปแบบของ von Mises stress ของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าที่ไม่ได้ทำการเสริมพองน้ำยางพาราจะมีลักษณะเป็นวงกว้างกว่าหมวกที่เสริมพองน้ำยางพาราอยู่ในช่วง 20.04 – 40.80 MPa เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับหมวกกันน็อคแบบเต็มใบจะพบว่าหมวกแบบเต็มใบปิดหน้านั้นจะมีค่าความเค้นที่น้อยกว่าเล็กน้อยทั้งนี้ เป็นผลมาจากรูปแบบของหมวกที่มีลักษณะในการรับแรงกระแทกได้ดีกว่า หากพิจารณาในด้านของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าที่เสริมพองน้ำยางพารานั้นทุกแบบจะสามารถช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นจากการกระแทกได้เช่นเดียวกับกรณีหมวกแบบเต็มใบปัญหาของแบบจำลองในงานวิจัยนี้คือลักษณะของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนของแบบจำลอง ซึ่งหากพิจารณาถึงบริเวณอื่น ๆ ที่ไม่ใช่จุดต่อแล้วนั้นจะพบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่อยู่ในระหว่าง 20.46 – 35.80 MPa หากเปรียบเทียบเฉพาะหมวกแบบที่เสริมพองน้ำยางพาราในกรณีหมวกแบบเต็มใบกับแบบเต็มใบปิดหน้า จะพบว่าหมวกทั้งสองแบบจะมีลักษณะของค่าความเค้นจากการกระแทกที่เกิดขึ้นคล้ายกัน เมื่อพิจารณาจากกราฟเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการสร้างแบบจำลองจะพบว่า ค่า P_{ACC} ของแบบจำลองนั้นจะมีค่าที่แตกต่างจากการทดลอง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นมีชิ้นส่วนหลายชิ้นมาประกอบกัน ส่วนแบบจำลองนั้นไม่ได้ใส่รายละเอียดของชิ้นส่วนดังกล่าวมาด้วยจึงทำให้ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและน่าเป็นหมวกที่มีความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองมากที่สุด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้นั้นถือว่าสามารถนำมาใช้ในการยืนยันผลการทดลองได้โดยอาจจะมีค่าความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองบ้างในบางกรณีเช่นเดียวกันกับหมวกแบบเต็มใบ



ภาพที่ 4.18 ผลของแบบจำลองค่าความเร่ง (Acceleration) ของหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้า

ตารางที่ 4.9 ผลของค่าความเร่งสูงสุดและ HIC ของหมวกแบบเต็มใบ

ชนิดหมวก	P_{ACC} (g) (EXP)	P_{ACC} (g) (SIM)	HIC (EXP)	HIC (SIM)
หมวกกันน็อคที่ไม่ได้เสริมพองน้ำ ยางพารา	305.07	292.81	2,083	2,393
หมวกที่เสริมพองน้ำยางพารา แบบคลุมทั้งพื้นที่ 1 cm	259.46	238.18	1,805	1,722
หมวกที่เสริมพองน้ำยางพารา แบบคลุมทั้งพื้นที่ 1.6 cm	203.34	212.07	1,362	1,389
หมวกที่เสริมพองน้ำยางพารา แบบเฉพาะพื้นที่ 1.0 cm	251.93	274.63	1,813	1,934
หมวกที่เสริมพองน้ำยางพารา แบบเฉพาะพื้นที่ 1.6 cm	211.25	249.93	1,638	1,322

ตารางที่ 4.9 เป็นผลวิเคราะห์ผลของค่าความเร่งสูงสุด (P_{ACC}) และปริมาณ HIC ที่เกิดขึ้นกับหมวกแบบเต็มใบในทุกกรณี พบว่าในกรณีของ P_{ACC} ผลของการทดลองกับการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีความแตกต่างกันบ้างในบางกรณีโดยหากพิจารณา P_{ACC} จะพบว่าค่าจากการทดลองกับการวิเคราะห์แบบจำลองนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่หากพิจารณาถึงค่า HIC นั้นจะมีความแตกต่างกันทั้งนี้หากวิเคราะห์จากสมการที่ 3.4 จะพบว่าค่า HIC ที่เกิดขึ้นอยู่กับเวลาที่เกิดความเร่งเกิดขึ้นที่ใน 2 ช่วงเวลา ซึ่งส่วนใหญ่จะคำนวณที่ช่วงเวลาที่ 2 ms และ 4 ms ซึ่งหากเส้นกราฟนั้นมีความแตกต่างกันนั้นก็ทำให้ค่าของ HIC นั้นมีความแตกต่างกันตามไปด้วย ดังนั้นจากตารางที่ 4.9 จะพบว่าค่า HIC มีความแตกต่างกันระหว่างผลของแบบจำลองกับการทดลอง หากพิจารณาในด้านค่า HIC นั้นจะพบว่าค่า HIC ที่เกิดกับหมวกแบบเต็มใบปิดหน้านั้นจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ ECE22.05 กำหนด และหากพิจารณาหมวกทั้ง 3 แบบคือหมวกแบบครึ่งใบ เต็มใบและเต็มใบปิดหน้านั้นจะพบว่าหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าจะมีค่า HIC ที่ต่ำที่สุดจึงมีความปลอดภัยในการสวมใส่มากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดสอบแรงกระแทกของหมวกกันน็อกและแบบจำลองหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์โดยใช้ฟองน้ำยางพาราเป็นวัสดุเสริม เพื่อที่จะลดภาระโหลด ความเร่ง และ HIC ที่เกิดขึ้นจากการเกิดอุบัติเหตุของผู้ขับขี่ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองและแบบจำลองนั้นทำให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

5.1.1 เมื่อพิจารณาถึงหมวกแบบปกติที่ยังไม่ได้เสริมฟองน้ำยางพารา พบว่าจากการศึกษาทดสอบแรงกระแทกของหมวกกันน็อกทั้ง 3 แบบคือหมวกกันน็อกแบบครึ่งใบ เต็มใบ และเต็มใบปิดหน้า จะพบว่าหมวกกันน็อกแบบเต็มใบปิดหน้าจะสามารถรับแรงกระแทกได้ดีที่สุด โดยจากการกระแทกที่ความเร็ว 4.85, 5.42, 5.94 และ 6.26 m/s ตามลำดับ จะพบว่าหมวกแบบเต็มใบปิดมีภาระโหลดสูงสุดจากการกระแทกที่เกิดขึ้นคือ 10.12, 10.20, 14.20 และ 15.33 kN ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหมวกแบบครึ่งใบและเต็มใบในทุก ๆ ความเร็ว ทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปแบบของหมวกที่มีการครอบคลุมพื้นที่ของศีรษะที่มากที่สุด อีกทั้งยังมีน้ำหนักของหมวกที่มากกว่า ส่วนประกอบของชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น สายรัดคาง ชิ้นส่วนที่ปิดคาง ฯลฯ ที่มีความซับซ้อนมากกว่าทำให้สามารถปกป้องศีรษะของมนุษย์ได้ดีกว่าหมวกชนิดอื่น ๆ

5.1.2 หากพิจารณาในรูปแบบของหมวกแบบครึ่งใบ เต็มใบและเต็มใบปิดหน้าที่เสริมฟองน้ำยางพาราทุกแบบ จะพบว่าที่ความเร็วในการกระแทกต่าง ๆ นั้นหมวกแบบที่เสริมฟองน้ำยางพาราจะสามารถลดภาระโหลดสูงสุดได้ โดยเฉพาะที่ความเร็ว 4.85 m/s ในบางกรณีนั้นหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพาราสามารถลดภาระโหลดสูงสุดได้สูงสุดถึง 42.91% ส่วนเมื่อความเร็วสูงขึ้นนั้นความสามารถในการช่วยรับแรงกระแทกของฟองน้ำนั้นจะลดลงไปเล็กน้อย

5.1.3 การทดสอบค่าความเร่งและค่า HIC ของหมวกกันน็อกทั้ง 3 แบบพบว่าหมวกที่ไม่ได้เสริมฟองน้ำยางพารานั้นจะมีค่า P_{ACC} ที่สูงกว่ามาตรฐาน ECE22.05 กำหนดไว้ แต่เมื่อมีการเสริมฟองน้ำยางพาราเข้าไปในทุกแบบนี้ฟองน้ำยางพาราจะช่วยลดค่า P_{ACC} และค่า HIC ให้อยู่ในมาตรฐานได้ ทั้งนี้การทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการนำฝารองในที่อยู่ระหว่างโพนกับศีรษะออกเพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมความแตกต่างระหว่างการเสริมฟองน้ำกับไม่เสริมฟองน้ำจึงทำให้ค่าของ P_{ACC} มีค่าสูงกว่าปกติ หากนำฝารองในที่อยู่ระหว่างโพนกับศีรษะเข้ามาใส่เพิ่มในหมวกจะทำให้ลดค่า P_{ACC} และค่า HIC ลงได้อีกและหากต้องการเลือกหมวกที่เสริมฟองน้ำยางพารามาใช้งานจริง การสวมใส่ที่สะดวกสบายและน้ำหนักเบาหมวกแบบเสริมฟองน้ำเฉพาะพื้นที่ที่ความหนา 1 cm นั้นก็สามารถที่จะช่วยลดความเร่งจากกระแทกให้อยู่ในมาตรฐาน ECE22.05 กำหนดได้อย่างปลอดภัย

5.1.4 จากการวิเคราะห์แบบจำลองหมวกกันน็อกที่ใช้ในกรณีการทดสอบหาค่าภาระโหลดจากการกระแทกที่เกิดขึ้นพบว่า แบบจำลองจะมีค่าความแตกต่างจากการทดลองอยู่ 1-20% โดย

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่มากที่สุดคือแบบจำลองหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าซึ่งมีความซับซ้อนในเรื่องของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการประกอบหมวกทำให้แบบจำลองมีความคาดเคลื่อนไป ส่วนในด้านค่าความเป็นเชิงเส้น (r^2) นั้นแบบจำลองมีความแตกต่างจากการทดลองอยู่ในช่วง 0.6 – 0.8 เป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นผลการทดลองที่สามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้งานต่อในการวิเคราะห์ในรูปแบบอื่น ๆ ได้ในอนาคต

5.1.5 จากการวิเคราะห์แบบจำลองหมวกกันน็อกที่ใช้ในกรณีการทดสอบหาค่าความเร่งและ HIC จากการกระแทกที่เกิดขึ้นพบว่าค่า P_{ACC} ของหมวกแต่ละแบบมีความใกล้เคียงกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพียงแต่ว่าลักษณะเส้นกราฟจะมีความแตกต่างกันพอสมควรซึ่งส่งผลการวิเคราะห์ HIC ให้มีความแตกต่างกันอย่างมากในผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและการทดสอบจริง ซึ่งหากพิจารณารูปแบบของหมวกทั้ง 3 แบบ หมวกแบบเต็มใบปิดหน้าจะผลของการวิเคราะห์แบบจำลองนั้นมีความคาดเคลื่อนจากการทดลองและน่าเป็นหมวกที่มีความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองมากที่สุด เนื่องจากหมวกแบบเต็มใบปิดหน้าที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นมีชิ้นส่วนหลายชิ้นมาประกอบกัน ส่วนแบบจำลองนั้นไม่ได้ใส่รายละเอียดของชิ้นส่วนดังกล่าวมาด้วยจึงมีความคาดเคลื่อนกันพอสมควร

5.1.6 การพิจารณาเลือกใช้หมวกแบบที่เสริมฟองน้ำยางพาราหมวกแบบเสริมฟองน้ำยางพาราเฉพาะพื้นที่ที่ความหนา 1 cm นั้นก็สามารถที่จะช่วยลดความเร่งจากกระแทกให้อยู่ในมาตรฐาน ECE22.05 กำหนดได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากการพิจารณาจากการสวมใส่ที่สะดวกสบายและสามารถลดน้ำหนักให้เบาลงได้มากกว่าแบบเสริมคลุมทั้งพื้นที่

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 การสร้างแบบจำลองของหมวกกันน็อกทั้ง 3 แบบทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากชิ้นส่วนของหมวกกันน็อกมีความซับซ้อนและมีรัศมีความโค้งของหมวกที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้ส่งผลการวิเคราะห์แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.2 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในการสร้างแบบจำลองที่ต้องมีการเดินทางไปหน่วยงานอื่นและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการวิเคราะห์ ทำให้ต้องวิเคราะห์รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุได้ไม่ละเอียด จึงไม่สามารถที่จะใส่คุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรมได้อย่างละเอียด

5.2.3 ในการทดลองนี้คุณสมบัติวัสดุของฟองน้ำยางพารานั้นผู้วิจัยได้ทำการใส่คุณสมบัติที่สำคัญคือ ความหนาแน่น มอดูลัส และค่าความเค้นสูงสุดเท่านั้น ยังไม่ได้ใส่คุณสมบัติที่สำคัญ ๆ ของการเป็นวัสดุที่ยืดเข้าไปทำให้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาจมีความคาดเคลื่อนได้

5.2.4 ความหนาที่เพิ่มขึ้นของฟองน้ำยางพาราอาจจะมีผลต่อน้ำหนักของหมวกที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับเรื่องของกลิ่นยางพาราที่มีมากขึ้น การเสริมฟองน้ำยางพาราจะมีปัญหาว่าเสริมฟองน้ำไปแล้วนั้นอาจจะมีผลต่อการสวมใส่ที่ไม่สบายของผู้ขับขี่ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในปัจจุบันมีวิธีการที่จะสร้างแบบจำลองให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของจริงได้เรียกว่า เทคนิคการทำวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) หากในอนาคตมีการศึกษาสร้างแบบจำลอง ที่สมจริงจะทำผลการวิเคราะห์แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยลง

5.3.2 ควรมีการศึกษาให้ลึกถึงผลของภาระโหลดที่เกิดขึ้นกับสมองว่า ภาระโหลดเท่าใดจะส่งผล ไปยังอันตรายต่อสมองที่แท้จริง อาจรวมไปถึงการสร้างแบบจำลองของสมองในอนาคต

5.3.3 ควรมีการศึกษาค่าความเร่งและค่า HIC ในบริเวณอื่น ๆ ของหมวกกันน็อค เช่น ด้านข้าง และด้านหลัง เป็นต้น เพื่อให้ผลการทดลองมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5.3.4 ควรมีการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ในการนำฟองน้ำยางพารามาใช้ในการเสริมหมวกนิรภัย ว่าจะมีต้นทุนราคาต่างจากหมวกที่ขายตามท้องตลาดมากน้อยเพียงใด

5.3.5 ควรมีการทำวิจัยเพิ่มเติมในด้านจุดที่ควรเสริมฟองน้ำว่าจุดใดคือจุดที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเสริมฟองน้ำยางพาราเพื่อจะช่วยลดน้ำหนักของหมวกกันน็อคที่มีการเสริมฟองน้ำยางพารา ให้น้ำหนักเทียบเท่ากับหมวกแบบปกติ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- ชาร์ฟ บาร์. การศึกษาผลของออร์แกนเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลพฤติกรรมการเกิดผลึกและสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซพท์ที่เตรียมจากไดนาร์มิกส์วัลคาร์ในเซชันของยางธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2553.
- ฐาปนกร ไชยคำภา และเอกชัย ชัยชนะศิริ. “การจำลองการทดสอบการกระแทกของหมวกนิรภัยแบบเต็มใบปิดหน้าสำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ยานยนต์บริเวณด้านหน้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 56 วันที่ 6-9 กุมภาพันธ์ 2561. น. 296-302, 2561. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2561.
- ฐิตินันท์ รัตนพรหม. “การเสริมแรงยางพองน้ำด้วยเถ้าลอย”, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 วันที่ 4 - 5 เมษายน 2555. น. 743-750. เชียงใหม่: โรงแรมอิมพีเรียลแมปปิง, 2555.
- ดุษฎี และคณะ. “การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิต”, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 23(2): 224-233; เมษายน - มิถุนายน 2558.
- พงษ์ธร แซ่อู่. “ชนิดยางและการใช้งาน”, ยางธรรมชาติ. <http://www.rubbercenter.org/files/technologys.pdf>. 10 เมษายน, 2559.
- พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ และคณะ. รายงานวิจัยยางพารา: การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางพองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กรุงเทพฯ: กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลการเกษตร สถาบันวิจัยยาง, 2552.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (2558). “หมวกกันน็อก (helmet)”, อุปกรณ์คู่มือของนักชิ่ง. http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/material1/index_hemlet.html. 10 เมษายน, 2559.
- มูลนิธิไทยโรดส์. (2553). “สวมหมวกนิรภัย”, พฤติกรรมเสี่ยง. <http://trso.thairoads.org/statistic/risk/detail/5068>. 10 เมษายน, 2559.
- แม่น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: แมคกรอฮิล อินเทอร์เน็ตเอ็นเตอร์ไพรส์, 2557.
- รัตนา ตันทเทอดธรรม, วุฒินันท์ คงทัด และกล้าณรงค์ ศรีรอด. “การศึกษาการเตรียมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยคาบมะพร้าวและปาล์มน้ำมัน”, ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 วันที่ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. น. 523-529. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.
- วรภรณ์ ขจรไชยกูล. เทคโนโลยีน้ำยาง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2559.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สวี่นา พลพีชน์. “ยางพารา”, **กลุ่มงานบริการวิชาการ 2 สำนักวิชาการ**.
https://cdc.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/parliament_parcy/ewt_dl_link.php?nid=33012. 10 เมษายน, 2559.
- สิริภัทร ขวัญเพชร. **รายงานวิจัยปัจจัยที่มีผลต่อการสวมหมวกนิรภัยของนักศึกษา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- สุวิมล เทียกทุม และหทัยนุช จันทรชัยภูมิ. “การพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากเกล็ดผสมฟองน้ำยางธรรมชาติเพื่อการขนส่งมะม่วงน้ำดอกไม้”, **การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2559 วันที่ 29 เมษายน 2559**. น. 352-360. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยรังสิต, 2559.
- เสาวนีย์ ก่ออุฒิกุลรังษี. **รายงานวิจัยผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ**. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2543.
- สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2558). “รายงานการวิเคราะห์สถานการณ์อุบัติเหตุทางถนน พ.ศ. 2557”, **สถานการณ์อุบัติเหตุทางท้องถนน**.
<http://www.otp.go.th/index.php/policy-plan.html>. 10 เมษายน, 2559.
- อาทิตย์ สวัสดิ์รักษา และคณะ. “การพัฒนาวัสดุของอุปกรณ์หนุนเท้าจากยางธรรมชาติเพื่อลดความดันในสันเท้า”, **การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 วันที่ 4-7 พฤศจิกายน 2552**. น. 41-50. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552.
- Afshari, A. and Rajaai, S. M. “Finite Element Simulations Investigating the Role of the Helmet in reducing head injury”, **International Journal of Simulation Modelling**. 7(1): 41-52; March, 2008.
- Boxzaracing.com. “เกร็ดความรู้เรื่องรถแต่ง”, **ความรู้เรื่องรถ**.
<http://bigbike.boxzaracing.com/knowledge/5142>. 10 May, 2020.
- Butz, R. and et al. “Effects of External helmet accessories on biomechanical measures of head injury risk: An ATD study using the HYBRIDIII headform”, **Journal of Biomechanics**. 48(14): 3816-3824; November, 2015.
- Caroline, D. and Remy, W. “Head injury prediction tool for predictive systems optimization”, In **7th European LS-Dyna Conference 20013, 15 February 2013**. p. 28-32. London, United Kingdom: LS-DY-NA, 2013.
- Caserta, G. D. and et al. “Finite Element Modelling of a Honeycomb Reinforced Helmet”, In **7th European LS-Dyna Conference 2008, 15 February 2013**. p. 67-78. London, United Kingdom: LS-DY-NA, 2013.
- Checkraka.com. “ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับรถมอเตอร์ไซด์”, **บทความรถมอเตอร์ไซด์**.
<http://www.checkraka.com/knowledge/motorcycle-15>. 10 May, 2020.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Cripton, P. and et al. “Bicycle helmets are highly effective at preventing head injury during head impact: Head-form accelerations and injury criteria for helmeted and unhelmeted impacts”, **Journal of Accident Analysis and Prevention**. 70(2014): 1–7; September, 2014.
- DeMarco, A. L. and et al. “The impact response of motorcycle helmets at different impact severities”, **Journal of Accident Analysis and Prevention**. 42(6): 1778–1784; November, 2010.
- Department of Transportation. **Federal motor vehicle safety standard**. Washington DC.: Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 1988.
- Economic Commission for Europe. **Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and of their visors for drivers and passengers of motorcycles and mopeds**. Geneva, Switzerland: United Nations, 2002.
- Fahlsted, M., Halldin, P. and Neuron, S. K. “The protective effect of a helmet in three bicycle accidents and finite element study”, **Journal of Accident Analysis and Prevention**. 91(2016): 135–143; June, 2016.
- Federalregister.gov. “Federal Motor Vehicle Safety Standards”, **Motorcycle Helmets**. <https://www.federalregister.gov>. 10 May, 2020.
- Fernandes, F. and et al. “Finite Element analysis of helmeted impacts and head injury evaluation with a commercial road helmet”, In **IRCOBI Conference 2013, 11-13 September 2013**. p. 431-442. Gothenburg, Sweden: International Research Council on Biomechanics of Injury (The IRCOBI), 2013.
- Gondal, T. M. “Velocity And acceleration graphical Interpretation”, **Slideshare**. https://www.slideshare.net/Taimoor_Gondal/velocity-and-acceleration-graphical-interpretation. 29 June, 2019.
- Gupta, S. and et al. “Impact of helmet use on severity of epidural hematomas in Cambodia”, **Journal of World Neurosurgery**. 100(2017): 267-270; April, 2017.
- Huang, T. J. and Chang, L. T. “Design and evaluation of shock-absorbing rubber tile for play ground safety”, **Journal of Materials and Design**. 30(9): 3819–3823; October, 2009.
- ILOVERUBBER99. “น้ำยางชั้น”, **ประวัติของยางพารา**. <https://sites.google.com/site/iloverubber99/home/prawati-khxng-yangphara>. 10 May, 2020.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Khosroshahi, S. F., Ghajari, M. and Galvanetto. U. “Assessment of Motorcycle Helmet Chin Bar Design Criteria with Respect to Basilar Skull Fracture using FEM”, In **10th European LS-DYNA Conference 2015, 15 June 2015**. p. 1-7. Würzburg, Germany: LS-DYNA, 2015.
- Krzeminski, D. and et al. “Effects of solvent exposure on material properties and impact performance of an American football helmet outer shell material”, **Procedia Engineering**. 72(1): 508– 514; December, 2014.
- Liu, D. S. and Chen, Y. T. “A Finite Element Investigation into the Impact Performance of an Open-Face Motorcycle Helmet with Ventilation Slots”, **Journal of Applied Sciences**. 7(3): 279; March, 2017.
- Maw, S., Lun, V. and Clarke, A. “The influence of helmet size and shape on peak linear decelerations when impacting crash pads”, **Procedia Engineering**. 34(2012): 819–824; December, 2012.
- Mocyc.com. “วิธีการทดสอบหมวกกันน็อกของ Snell”, สกู๊ปพิเศษ. <http://www.mocyc.com/>. 10 May, 2020.
- Mustafa, H. and et al. “Finite element bicycle helmet models development”, **Procedia Engineering**. 20(2015): 91–97; December, 2015.
- Ning, H. et al. “Design and manufacturing of long fiber thermoplastic composite helmet insert”, **Journal of Composite Structures**. 168(2017): 792–797; May, 2017.
- Nomoto, A. and et al. “2 - Dimensional Homogenization FEM Analysis of Hyperelastic Foamed Rubber”, **Procedia Engineering**. 147(14): 431–436; January, 2016.
- Norhazariah, S. and et al. “Effect of different preparation methods on crosslink density and mechanical properties of Carrageenan filled natural rubber (NR) latex films”, In **5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP), 4-6 August 2015**. p. 986–992. Penang, Malaysia: The School of Materials & Mineral Resources Engineering, Universiti Sains Malaysia, 2015.
- Pang, T.Y., Subic, A. and Takla, M. “Impact energy attenuation performance of cricket helmets: standard 2-wire drop test vs. pitching machine impact test”, **Procedia Engineering**. 60(2013): 143 – 150; December, 2013.
- Pinnoji, P. K. and et al. “Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments & numerical modeling”, **International Journal of Impact Engineering**. 37(3): 274–284; March, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Rice, T. M. and et al. “Motorcycle helmet use and the risk of head, neck, and fatal injury: Revisiting the Hurt Study”, **Journal of Accident Analysis and Prevention**. 42(6): 1778-1784; May, 2010
- Rider man. “Helmet Review”, **บทความ**. <http://longdoosi.blogspot.com/2009/06/blog-post.html>. 10 May, 2020.
- Snell Memorial Foundation. **Standard for protective head gear for use with motorcycles and other motorized vehicles**. North Highlands, California: Snell Memorial Foundation, 2005.
- Tan, L. B. and et al. “Performance of an advanced combat helmet with different interior cushioning systems in ballistic impact: Experiments and finite element simulations”, **International Journal of Impact Engineering**. 50(2012): 99–112; February, 2012.
- Thinwongpituk, C. **The behavior of non-constant thickness conical shells under axial loading**. Doctor’s Thesis: University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), 2002.
- Thom. D. R. “Comparison tests of motorcycle helmets qualified to international standards”, In **Proceedings of the International Motorcycle Safety Conference**. p. 1–14. Long Beach, California: The Human Element, 2006.
- Zahid, B. and Chen, X. “Energy absorption at different impact locations of riot helmetshells”, **International Journal of Textile Science**. 2(4): 126-131; November, 2013.
- Zahid, B. and Chen, X. “Impact evaluation of Kevlar-based angle-interlock woven textile composite structures”, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 32(12): 925–932; June, 2013.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=4.85$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.975	0.517	0.794	0.000	0.804	0.000	0.587	0.003	1.679	0.000
2	2.120	2.285	1.328	0.000	1.575	0.000	1.338	0.010	1.722	0.215
3	3.028	6.124	1.593	0.000	1.614	0.674	1.966	0.451	1.934	0.932
4	4.248	8.515	2.109	0.008	1.929	1.378	2.112	0.906	3.859	1.745
5	6.449	7.278	2.931	0.734	3.439	2.503	3.990	1.233	4.754	2.549
6	7.383	7.920	3.728	1.474	3.954	3.619	5.249	2.741	5.699	4.241
7	9.003	9.999	4.317	3.095	4.504	4.682	6.350	3.744	6.384	5.979
8	11.203	11.587	5.194	5.532	5.236	5.718	7.254	5.270	6.575	6.690
9	13.238	12.746	6.005	7.480	5.799	6.845	7.676	7.130	6.723	6.418
10	14.203	13.951	7.239	8.130	7.126	7.180	7.384	6.955	6.894	5.398
11	12.348	13.436	8.239	7.092	7.023	7.158	7.222	5.752	6.448	4.745
12	9.203	9.876	7.438	5.635	6.153	6.462	6.939	4.192	5.401	4.597
13	6.203	5.682	6.459	4.576	5.776	6.024	5.480	2.272	4.257	3.940

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=4.85$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
14	5.033	3.383	5.763	4.461	5.400	5.121	4.167	2.196	3.266	2.243
15	3.284	2.917	4.751	3.374	4.8283	3.458	3.136	2.513	2.360	1.134
16	2.735	2.515	3.770	2.248	3.934	2.764	2.376	1.323	1.398	0.627
17	1.528	1.628	2.715	1.646	2.791	1.947	1.899	0.746	0.678	0.365
18	0.569	0.837	1.787	1.186	1.882	1.012	1.494	0.825	0.301	0.230
19	0.343	0.344	1.076	0.869	1.350	0.552	1.241	0.723	0.322	0.055
20	0.210	0.000	0.652	0.633	0.942	0.140	1.173	0.320	0.272	0.000
21	0.000	-	0.326	0.000	0.599	0.000	1.020	0.441	0.047	-
22	-	-	0.100	-	0.307	-	0.925	0.471	0.000	-
23	-	-	0.000	-	0.000	-	0.832	0.000	-	-
24	-	-	-	-	-	-	0.000	-	-	-

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=5.42$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.002	0.218	0.065	0.000	0.422	0.000	0.717	0.000	0.615	0.000
2	0.024	0.927	0.476	0.000	1.257	1.211	1.503	0.000	0.930	0.006
3	0.308	4.394	1.830	0.098	2.852	1.992	1.973	0.944	1.323	1.765
4	1.856	7.947	3.155	1.044	3.297	3.702	2.587	1.724	1.635	2.694
5	4.093	8.937	3.862	2.703	4.245	5.207	4.195	4.403	2.141	3.798
6	5.290	8.151	4.822	5.397	5.762	6.629	5.775	5.495	3.012	5.565
7	6.672	9.805	6.423	6.496	6.987	8.134	7.101	6.948	4.043	6.486
8	10.384	12.603	7.822	8.404	7.938	8.979	6.540	8.537	5.260	7.241
9	13.484	13.802	8.799	9.416	8.776	8.828	8.447	7.481	6.833	8.038
10	15.124	15.429	9.391	8.763	9.073	9.268	9.784	6.047	9.186	6.964
11	13.466	13.964	9.767	6.756	8.712	8.626	7.606	3.537	9.100	5.672
12	10.837	8.635	8.893	5.003	7.642	7.903	6.680	2.020	7.051	5.086

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=5.42$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	6.790	4.522	7.230	4.695	6.277	6.554	4.844	2.766	7.574	5.057
14	4.431	3.131	5.517	4.268	4.872	4.818	3.243	1.889	7.051	3.711
15	2.142	2.841	3.725	2.606	2.926	4.340	2.269	1.011	4.691	1.920
16	0.969	1.890	2.353	1.941	1.419	3.064	1.615	0.824	2.131	0.937
17	0.521	1.003	1.774	1.495	1.023	1.962	0.818	0.838	0.622	0.563
18	0.053	0.444	1.061	0.956	0.821	1.151	0.104	0.520	0.284	0.315
19	0.000	0.000	0.258	0.798	0.387	0.576	0.000	0.225	0.125	0.162
20	-	-	0.000	0.333	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000
21	-	-	-	0.000	0.000	-	-	0.000	-	-

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=5.94$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	1.100	0.000	0.279	0.000	0.422	0.928	0.411	0.000	1.968	0.000
2	2.895	0.406	1.474	0.001	1.257	3.081	1.243	0.245	2.404	0.393
3	4.163	1.499	3.382	0.767	2.269	4.849	2.249	0.729	2.765	1.870
4	5.131	4.919	4.428	1.853	3.312	6.793	2.703	3.009	3.677	3.596
5	8.205	9.846	5.795	5.463	4.628	9.056	4.168	6.972	5.076	5.125
6	10.275	9.854	8.553	9.372	5.539	9.977	5.568	10.874	6.141	8.958
7	12.445	12.793	10.722	12.696	7.486	10.882	10.284	13.558	7.239	10.129
8	16.294	16.052	13.405	13.352	12.394	12.764	13.748	13.327	12.377	11.780
9	15.284	17.384	12.039	11.433	10.294	12.400	11.284	10.648	10.337	10.704
10	11.924	16.453	10.702	8.508	9.924	11.513	9.375	7.856	9.824	9.322
11	9.816	9.824	8.578	6.457	9.102	9.341	9.048	5.245	5.204	8.522
12	5.182	4.737	5.580	6.686	8.712	7.063	7.574	6.064	3.027	7.909

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=5.94$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	4.204	3.199	2.129	4.723	7.642	5.665	7.038	3.371	2.904	5.943
14	3.029	2.712	0.321	2.734	6.277	5.297	6.503	1.440	1.779	3.213
15	1.836	1.771	0.078	2.646	4.872	3.182	6.008	1.116	1.002	1.814
16	1.203	0.792	0.000	1.648	2.926	2.171	4.230	1.061	0.937	1.015
17	0.922	0.162	-	1.433	1.419	1.255	3.648	0.523	0.804	0.535
18	0.064	0.000	-	0.850	1.023	0.000	2.245	0.253	0.129	0.187
19	0.000	-	-	0.000	0.821	-	0.940	0.191	0.029	0.000
20	-	-	-	-	0.387	-	0.503	-0.001	0.000	-
21	-	-	-	-	0.000	-	0.174	0.000	-	-
22	-	-	-	-	-	-	0.000	-	-	-

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=6.26$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	1.510	0.552	0.221	0.716	0.124	0.000	0.019	1.470	0.024	0.603
2	4.433	1.234	1.284	3.040	1.536	1.319	0.798	3.260	0.748	2.550
3	6.678	2.046	4.284	7.630	2.196	3.897	1.860	5.262	2.097	6.361
4	7.486	5.627	6.395	8.554	5.395	9.687	5.395	8.635	7.305	8.449
5	10.264	10.585	8.338	10.495	8.447	12.394	7.384	9.654	9.294	10.833
6	11.204	10.028	9.374	12.714	10.294	14.259	9.237	11.273	9.927	13.135
7	15.203	11.700	12.339	16.455	12.476	15.332	13.847	13.509	10.284	14.924
8	18.978	16.595	15.934	16.851	14.564	15.344	15.205	16.034	12.348	14.957
9	19.529	20.831	13.204	14.431	14.374	14.042	16.293	14.093	15.204	14.098
10	15.202	21.926	10.274	10.497	9.385	10.675	11.204	12.726	12.385	13.372
11	8.011	16.810	8.204	8.355	8.068	8.321	10.928	10.240	10.385	12.387
12	5.664	8.289	5.204	7.787	5.204	7.998	8.030	7.099	7.405	9.649

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบครึ่งใบ ($V=6.26$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	1.650	3.638	3.023	5.216	4.294	4.562	5.305	6.270	5.059	5.955
14	0.927	2.795	1.552	3.572	2.385	2.004	2.958	5.071	3.405	3.702
15	0.523	2.284	0.560	3.220	1.851	1.576	1.420	3.099	2.103	1.998
16	0.037	1.082	0.308	2.264	1.345	1.567	0.428	1.928	1.185	0.951
17	0.012	0.208	0.293	2.031	0.945	1.126	0.140	1.122	0.923	0.316
18	0.000	0.001	0.183	0.823	0.601	0.466	0.036	0.464	0.350	0.011
19	-	0.000	0.000	0.127	0.098	0.129	0.000	0.000	0.094	0.056
20	-	-	-	0.000	0.022	0.049	-	-	0.000	0.034
21	-	-	-	-	0.000	0.000	-	-	-	0.000

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=4.85$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.018	0.390	0.854	0.000	0.142	0.812	0.199	0.000	0.241	0.000
2	0.273	1.584	2.390	0.000	0.591	1.380	0.668	0.000	0.911	0.000
3	1.402	4.949	2.573	0.000	1.454	2.378	2.041	0.066	1.844	0.664
4	3.476	8.931	3.219	0.224	2.674	3.532	2.461	0.488	2.376	1.355
5	6.034	9.306	4.262	1.485	3.236	4.911	2.229	2.520	2.773	2.681
6	7.091	8.848	5.541	2.544	3.237	5.945	3.143	4.515	3.484	4.187
7	9.098	9.692	6.528	4.705	4.251	6.619	4.749	6.065	4.498	4.947
8	11.455	11.144	6.941	6.525	6.555	6.893	6.284	6.410	5.915	6.590
9	11.404	11.023	6.924	6.758	6.840	6.942	6.459	7.236	6.123	6.056
10	10.827	8.202	6.723	5.858	6.837	6.498	6.735	7.217	6.429	6.540
11	8.450	4.401	6.604	4.073	6.735	5.638	6.356	6.828	6.538	6.331
12	5.272	3.467	5.495	2.736	6.103	4.622	6.102	4.964	6.483	5.281

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=4.85$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	2.669	2.955	4.304	2.167	5.837	3.783	5.332	3.315	5.385	4.428
14	0.550	2.174	3.319	1.939	5.054	2.481	4.897	2.243	4.777	3.682
15	0.164	1.136	2.389	1.866	3.089	1.695	2.972	1.912	2.893	2.537
16	0.321	0.464	1.571	1.565	2.073	1.311	1.687	2.075	1.383	1.756
17	0.122	0.059	1.081	1.309	1.303	0.776	0.852	1.681	0.639	1.359
18	0.000	0.000	0.629	1.142	0.685	0.403	0.542	1.083	0.463	0.962
19	0.000	-	0.181	0.938	0.000	0.000	0.325	0.677	0.206	0.771
20	-	-	0.000	0.324	-	-	0.000	0.615	0.000	0.585
21	-	-	-	0.000	-	-	-	0.000	-	0.000

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=5.42$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.005	0.274	0.001	0.000	0.008	0.000	0.016	0.000	0.295	0.000
2	0.277	0.987	0.145	0.000	0.246	0.000	0.167	0.000	0.975	0.002
3	0.724	2.618	0.753	0.084	0.834	1.614	0.670	0.212	1.954	0.451
4	2.238	5.716	2.169	0.739	2.296	2.862	1.907	1.448	2.804	2.703
5	3.496	9.740	3.317	2.715	3.759	4.390	3.472	4.040	3.047	3.992
6	6.382	10.412	3.460	5.695	3.748	5.939	4.384	6.120	3.418	7.249
7	8.571	10.177	4.187	8.628	3.864	7.513	4.747	7.232	4.867	8.636
8	10.882	10.242	6.018	9.957	6.279	8.491	5.868	9.432	6.670	9.708
9	12.503	11.485	7.923	9.270	8.584	9.203	7.740	8.727	8.323	9.146
10	12.839	12.419	9.293	6.813	9.762	9.458	9.012	10.070	9.850	9.943
11	12.303	11.305	10.172	4.300	10.552	8.961	9.210	7.242	10.637	9.881
12	10.284	7.250	10.212	2.998	10.046	8.615	9.398	5.516	10.636	9.232

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=5.42$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	8.302	4.055	9.304	2.741	9.120	7.751	9.001	3.187	9.471	7.393
14	5.300	3.064	7.160	2.577	7.317	6.620	7.356	2.703	7.352	5.830
15	4.239	2.958	4.959	1.884	4.845	5.634	5.252	2.368	4.892	4.328
16	2.120	2.496	3.270	1.695	2.843	4.192	3.197	2.768	2.258	3.799
17	0.253	1.665	1.626	1.535	1.395	3.041	1.600	1.351	0.502	2.660
18	0.012	0.688	0.805	1.593	0.810	2.517	0.925	1.141	0.025	1.632
19	0.000	0.000	0.703	1.410	0.612	1.873	0.613	1.065	0.000	0.653
20	-	-	0.598	0.834	0.398	0.735	0.000	0.766	-	0.000
21	-	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=5.94$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.004	0.125	0.000	0.000	0.026	1.620	0.000	0.000	0.005	0.001
2	0.011	0.423	0.038	0.000	0.415	1.940	0.064	0.000	0.154	2.290
3	0.149	1.322	0.295	0.392	1.904	3.648	0.032	0.298	1.051	1.833
4	1.229	3.865	1.213	1.363	3.771	5.439	0.201	2.165	3.213	4.522
5	3.442	7.711	3.139	4.170	4.248	7.492	1.699	4.912	5.171	6.930
6	4.354	11.176	4.973	5.460	4.969	9.349	3.741	5.837	6.326	7.877
7	5.435	11.602	5.308	7.194	7.051	9.728	5.225	7.239	7.299	9.645
8	8.813	11.735	6.786	8.443	8.835	10.204	6.775	8.739	8.438	10.745
9	11.555	12.968	10.022	10.985	10.637	10.609	8.539	9.067	9.838	10.360
10	13.780	14.576	10.839	11.114	11.408	10.365	10.247	11.621	10.447	10.890
11	14.536	14.015	11.165	9.092	11.276	10.276	10.928	12.346	11.793	11.344
12	12.823	9.479	10.212	5.814	9.949	9.233	11.720	10.956	10.978	9.532

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=5.94$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	9.354	4.800	7.171	3.642	7.804	7.897	11.476	8.819	9.148	9.118
14	5.886	3.121	3.887	2.904	5.445	6.905	8.812	7.001	7.589	9.535
15	2.881	2.803	1.358	2.964	3.154	5.576	6.057	5.005	5.620	7.168
16	0.788	2.550	0.326	2.242	1.716	3.950	3.628	3.575	3.211	5.066
17	0.049	1.693	0.233	1.964	0.969	2.929	1.538	2.816	1.503	4.146
18	0.000	0.693	0.178	1.122	0.596	2.341	0.532	3.315	0.617	3.189
19	-	0.000	0.000	0.847	0.386	1.594	0.336	1.587	0.447	2.696
20	-	-	-	0.000	0.000	0.923	0.143	1.150	0.285	1.247
21	-	-	-	-	-	0.000	0.000	0.997	0.066	0.522
22	-	-	-	-	-	-	-	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=6.26$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.003	0.234	0.005	0.234	0.275	0.000	0.003	0.000	0.014	0.000
2	0.043	0.582	0.304	0.855	1.130	0.583	0.085	0.058	0.387	0.009
3	0.253	1.636	1.565	1.280	2.764	2.235	0.329	1.793	1.283	1.515
4	2.214	4.445	3.664	2.264	4.120	4.254	1.881	4.929	2.321	4.579
5	5.122	9.263	4.873	6.032	4.481	6.464	4.707	6.494	4.042	7.726
6	8.253	12.427	5.904	7.473	5.466	8.563	6.145	8.437	4.235	10.271
7	11.909	13.323	8.102	9.300	7.786	10.552	9.882	12.799	6.147	11.913
8	15.284	14.327	9.992	11.105	10.057	11.521	12.385	12.314	9.896	11.403
9	16.820	16.096	11.530	13.396	11.627	11.774	13.204	11.302	12.395	12.232
10	15.734	17.368	12.513	12.742	12.308	11.723	13.104	10.041	13.028	11.966
11	13.446	15.020	11.921	9.734	11.727	11.180	12.410	6.721	12.102	10.031
12	9.492	8.720	9.930	5.998	9.951	9.802	8.703	3.895	11.857	9.464

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบ ($V=6.26$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	6.022	4.141	7.422	3.807	7.540	8.640	5.100	2.498	8.037	7.170
14	3.554	2.910	5.201	3.493	5.579	7.042	2.413	3.353	4.378	5.269
15	1.786	2.702	3.371	3.212	3.857	5.846	0.970	1.894	1.572	3.940
16	0.539	2.116	1.850	2.351	2.468	4.044	0.910	1.267	0.265	3.575
17	0.069	1.143	0.859	2.156	1.453	3.022	0.028	1.000	0.000	2.257
18	0.000	0.311	0.342	2.047	0.842	2.345	0.000	0.684	-	1.484
19	-	0.000	0.238	1.995	0.594	1.538	-	0.596	-	0.946
20	-	-	0.116	1.689	0.000	0.522	-	0.341	-	0.548
21	-	-	0.014	0.000	0.000	0.000	-	0.000	-	0.000
22	-	-	0.000	-	0.000	-	-	-	-	-

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=4.85$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.001	0.000	1.560	0.000	0.532	0.214	0.001	0.000	0.006	0.000
2	0.097	0.000	2.437	0.000	1.276	0.666	0.025	0.333	0.187	0.002
3	0.302	0.500	3.267	0.050	2.143	1.060	0.036	1.343	0.390	0.015
4	0.885	1.527	3.861	0.555	2.852	2.389	0.164	2.470	0.726	0.641
5	1.995	4.825	4.159	0.986	3.270	3.464	0.517	4.607	1.341	0.759
6	3.182	5.384	4.490	2.223	3.777	4.494	1.133	4.099	2.033	1.463
7	3.796	6.848	5.271	3.616	4.787	5.429	2.035	3.892	3.542	2.628
8	4.067	7.238	6.129	4.916	5.718	5.640	3.423	4.958	4.331	2.913
9	5.125	7.908	6.388	5.748	6.623	5.440	4.186	5.305	5.307	4.744
10	7.694	9.275	6.367	6.284	6.909	4.615	5.185	6.155	6.465	5.705
11	9.737	7.653	6.253	5.699	6.659	3.476	6.250	3.449	6.605	5.861
12	10.127	6.764	5.767	4.956	6.100	2.933	6.211	3.987	6.535	5.284

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=4.85$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมฟองน้ำ (kN)		หมวกเสริมฟองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมฟองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมฟองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมฟองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	9.735	7.704	5.027	3.818	5.306	2.174	6.182	3.193	6.112	4.620
14	7.167	8.020	4.309	2.786	3.973	1.906	5.838	3.612	5.042	3.497
15	5.063	4.967	3.559	2.246	2.640	0.658	5.195	2.192	3.830	2.309
16	2.227	3.259	2.664	1.445	1.774	0.000	4.340	1.778	2.889	2.486
17	1.284	2.496	1.774	0.981	1.177	-	3.512	1.168	2.180	1.943
18	0.824	2.250	1.198	0.965	0.780	-	2.740	0.874	1.437	1.555
19	0.337	1.604	0.877	0.989	0.510	-	1.235	0.181	0.784	0.906
20	0.102	0.732	0.692	0.594	0.271	-	0.938	0.245	0.395	0.871
21	0.002	0.029	0.453	0.000	0.000	-	0.000	0.121	0.000	0.000
22	0.000	0.000	0.218	-	-	-	-	0.053	-	-
23	-	-	0.000	-	-	-	-	0.000	-	-

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=5.42$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.004	0.000	0.201	0.000	0.111	0.285	0.147	1.390	0.094	0.000
2	0.121	0.000	0.565	0.000	0.424	0.812	0.457	2.210	0.721	0.003
3	0.581	0.320	1.283	0.256	1.193	1.356	1.861	1.263	1.391	0.020
4	1.868	1.594	2.334	0.522	2.305	3.067	2.523	4.530	2.801	1.529
5	4.100	2.495	3.359	1.960	3.978	4.408	3.842	7.948	3.793	1.625
6	5.909	3.588	4.086	3.398	5.461	5.729	5.025	5.751	4.761	2.679
7	6.885	4.858	5.781	4.294	7.215	6.745	6.993	6.394	6.259	4.374
8	7.764	5.339	7.094	5.126	8.010	6.930	7.512	7.474	7.651	5.485
9	9.141	6.019	7.720	6.868	8.272	7.020	7.958	8.102	8.356	6.127
10	10.208	10.134	7.898	7.497	8.525	6.664	7.921	5.218	8.615	6.867
11	10.120	9.480	7.959	7.332	8.493	5.562	7.225	4.817	8.579	5.388
12	8.465	7.526	7.287	6.268	7.289	4.131	6.098	4.483	7.821	4.390

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=5.42$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	7.212	7.884	6.335	5.121	5.401	2.153	4.852	4.116	6.012	3.379
14	5.014	7.800	5.535	3.678	3.991	0.637	3.310	3.361	4.190	3.009
15	2.648	5.214	4.377	2.817	2.682	0.127	2.107	2.397	2.848	2.868
16	1.496	3.166	2.959	1.972	1.764	0.000	1.426	2.065	1.806	2.262
17	0.900	2.121	1.828	1.306	1.250	-	0.815	1.437	0.999	1.417
18	0.480	1.960	1.070	0.999	0.853	-	0.311	0.608	0.524	0.914
19	0.378	1.799	0.776	0.000	0.455	-	0.000	0.309	0.210	0.846
20	0.369	0.604	0.000	-	0.099	-	-	0.444	0.073	0.000
21	0.000	0.007	-	-	0.000	-	-	0.181	0.000	-
22	-	0.000	-	-	-	-	-	0.000	-	-

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=5.94$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.001	0.000	0.167	0.000	0.350	0.355	0.486	0.000	0.101	0.000
2	0.007	0.037	0.676	0.000	1.455	0.994	1.394	2.710	0.442	0.002
3	0.040	1.160	2.193	0.423	3.274	1.773	3.000	2.141	1.317	0.021
4	0.361	2.454	4.597	0.888	4.700	4.010	4.269	3.411	2.327	0.247
5	1.722	6.633	6.582	3.708	5.763	5.845	5.120	5.394	3.764	0.370
6	4.974	11.328	8.170	6.234	7.660	7.776	6.121	7.450	4.713	1.979
7	8.385	11.919	9.447	8.428	8.477	10.186	8.010	8.214	6.530	3.901
8	10.937	11.741	10.060	11.165	9.431	10.065	10.256	8.856	8.435	7.700
9	12.593	13.849	11.709	12.244	10.229	9.542	11.912	12.201	9.736	9.242
10	14.204	14.271	12.200	11.671	10.276	8.383	12.336	10.129	10.748	10.444
11	13.920	9.745	11.454	10.269	9.680	6.563	11.248	9.286	9.843	9.622
12	11.547	4.390	9.846	8.553	8.225	4.130	8.795	7.667	7.581	6.562

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=5.94$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	7.426	3.134	7.493	6.025	6.872	1.801	6.161	6.716	5.507	5.592
14	4.675	2.671	5.205	4.327	5.808	0.522	4.034	3.164	3.837	4.342
15	1.706	2.069	3.552	3.283	4.274	0.045	2.500	4.049	2.354	3.631
16	0.928	0.751	2.430	2.098	2.464	0.000	1.810	2.308	1.315	3.116
17	0.235	0.110	1.237	1.676	1.083	-	1.503	2.350	0.757	2.453
18	0.013	0.007	0.346	2.535	0.457	-	1.330	1.087	0.394	1.759
19	0.000	0.006	0.093	0.938	0.103	-	0.926	1.235	0.105	1.492
20	-	0.009	0.000	0.027	0.027	-	0.344	0.892	0.047	0.948
21	-	0.000	-	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=6.26$ m/s)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.113	0.000	0.207	0.000	0.334	0.405	0.383	0.000	0.972	0.000
2	0.648	0.435	0.968	0.044	0.999	1.090	1.266	2.720	2.244	0.003
3	1.129	0.778	1.238	0.898	1.850	1.942	3.823	2.626	3.140	0.021
4	1.924	2.569	2.103	4.559	2.778	4.374	4.528	4.344	3.664	0.431
5	2.202	8.452	2.826	6.916	3.905	6.277	5.633	8.603	4.383	1.322
6	4.987	12.581	5.259	7.495	5.580	7.495	6.608	9.165	5.746	2.579
7	7.429	13.312	7.188	9.476	8.284	8.201	7.294	10.385	8.198	5.145
8	9.746	14.571	9.157	10.900	9.854	9.882	9.273	11.399	10.651	8.653
9	13.411	17.953	11.718	13.518	10.732	10.316	12.383	13.116	12.261	11.543
10	15.332	16.295	13.678	12.689	10.960	9.550	13.204	11.828	12.764	13.110
11	15.359	8.620	13.890	10.852	10.043	7.981	10.294	12.004	11.759	12.544
12	11.642	3.459	11.940	8.075	8.276	5.929	7.375	9.308	8.968	9.398

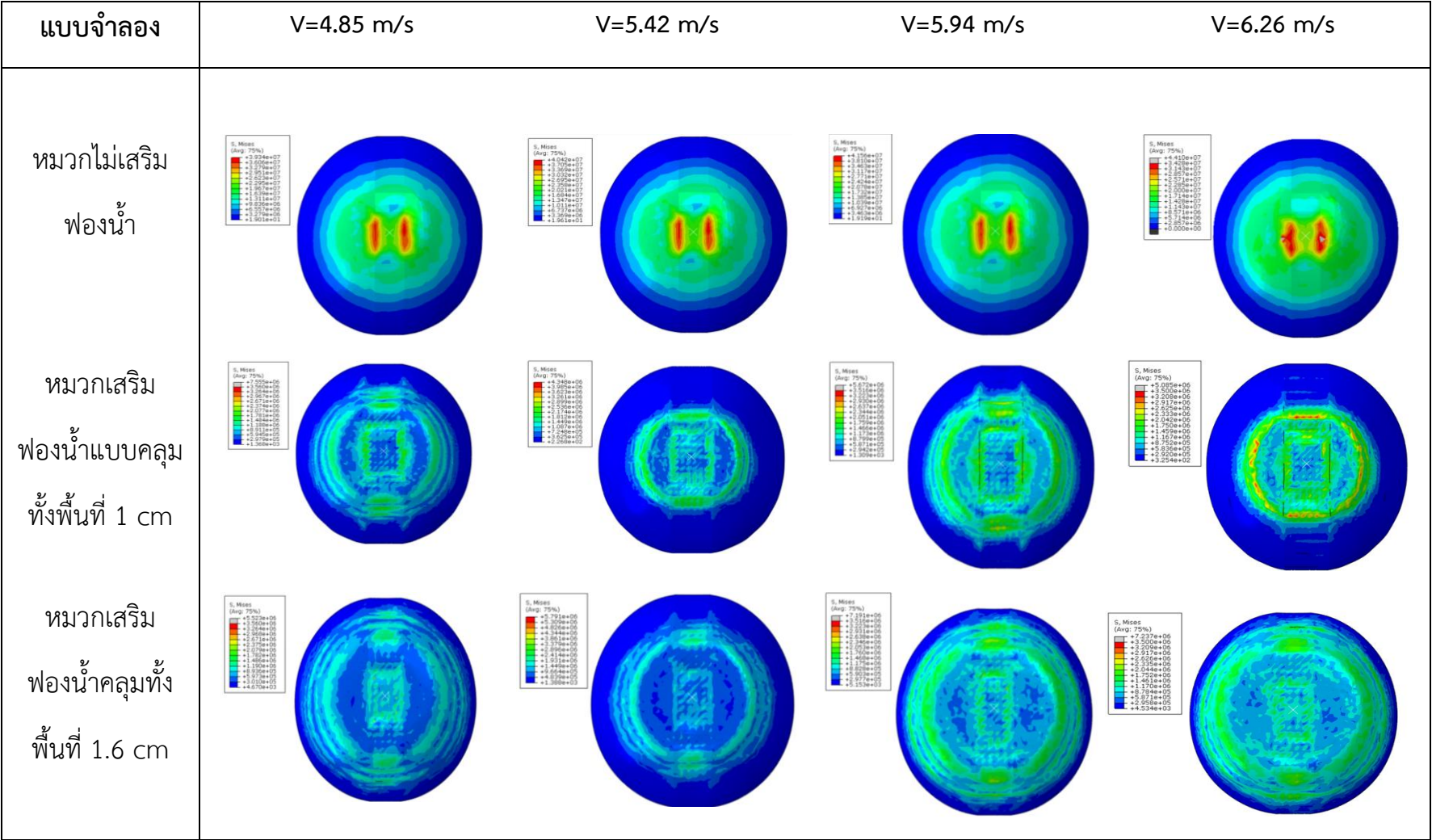
ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบจำลองของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า ($V=6.26$ m/s) (ต่อ)

เวลา (ms)	หมวกไม่เสริมพองน้ำ (kN)		หมวกเสริมพองน้ำแบบ คลุมทั้งพื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำคลุมทั้ง พื้นที่ 1.6 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1 cm (kN)		หมวกเสริมพองน้ำเฉพาะ พื้นที่ 1.6 cm (kN)	
	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)	(EXP)	(SIM)
13	7.795	2.579	9.048	5.785	6.488	3.355	5.264	9.147	5.971	9.463
14	4.414	2.406	6.150	4.071	4.613	1.238	3.948	8.084	3.543	6.766
15	1.229	1.835	4.132	2.483	2.507	0.130	3.006	4.721	1.869	5.074
16	0.000	0.293	2.655	1.632	0.908	0.001	2.201	4.751	0.945	4.710
17	0.000	0.007	1.123	3.697	0.363	0.876	1.519	3.283	0.399	4.041
18	-	0.000	0.093	4.195	0.249	0.000	1.053	3.315	0.133	2.353
19	-	-	0.000	2.171	0.139	-	0.824	1.290	0.000	1.857
20	-	-	-	1.544	0.000	-	0.342	0.778	-	0.735
21	-	-	-	0.847	-	-	0.000	0.213	-	0.000
22	-	-	-	0.000	-	-	-	0.000	-	-

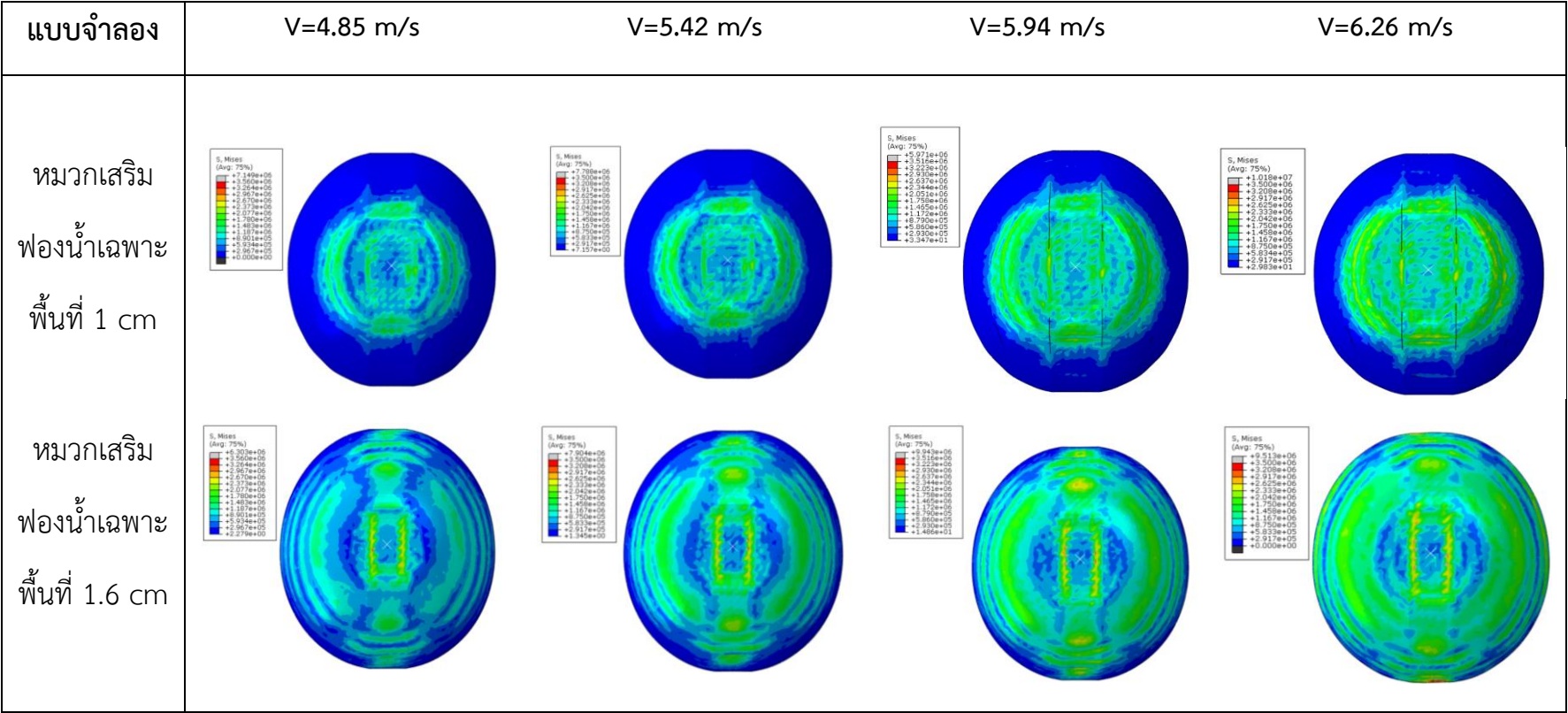
ภาคผนวก ข

ภาพแสดงภาระโหลดสูงสุดของแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี FEA

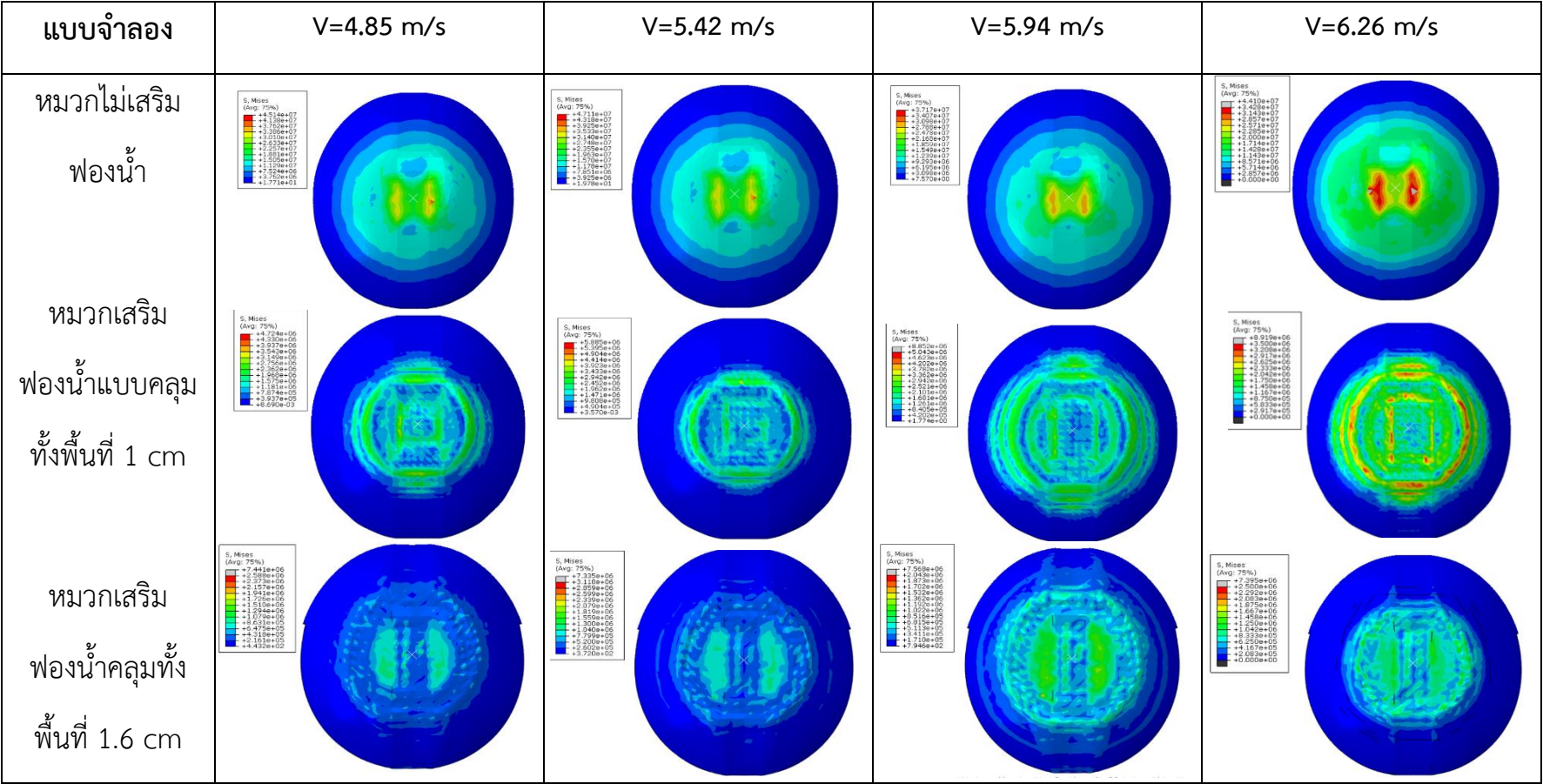
ตารางที่ ข.1 ภาพระโหลตสูงสุดผลของหมวกแบบครึ่งใบ



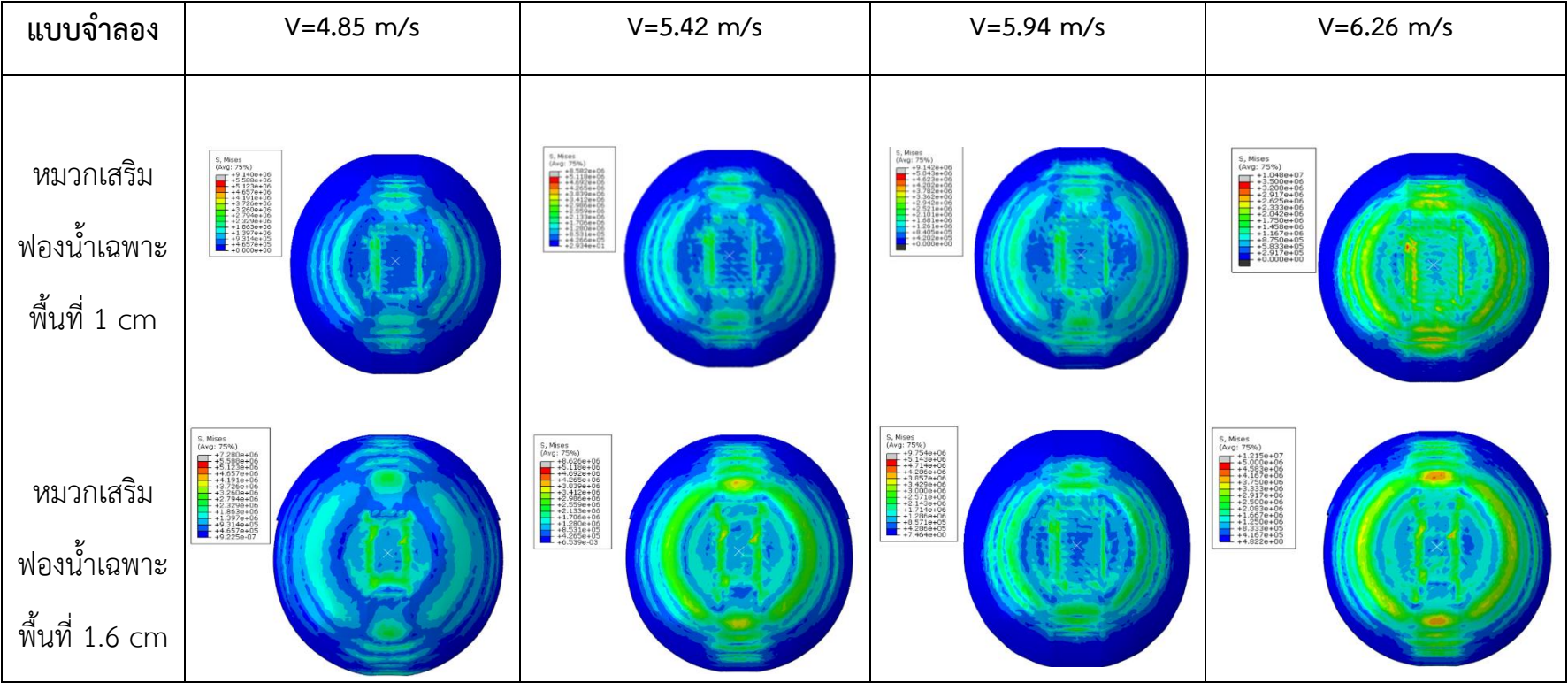
ตารางที่ ข.1 ภาพระโหลตสูงสุดผลของหมวกแบบครึ่งใบ (ต่อ)



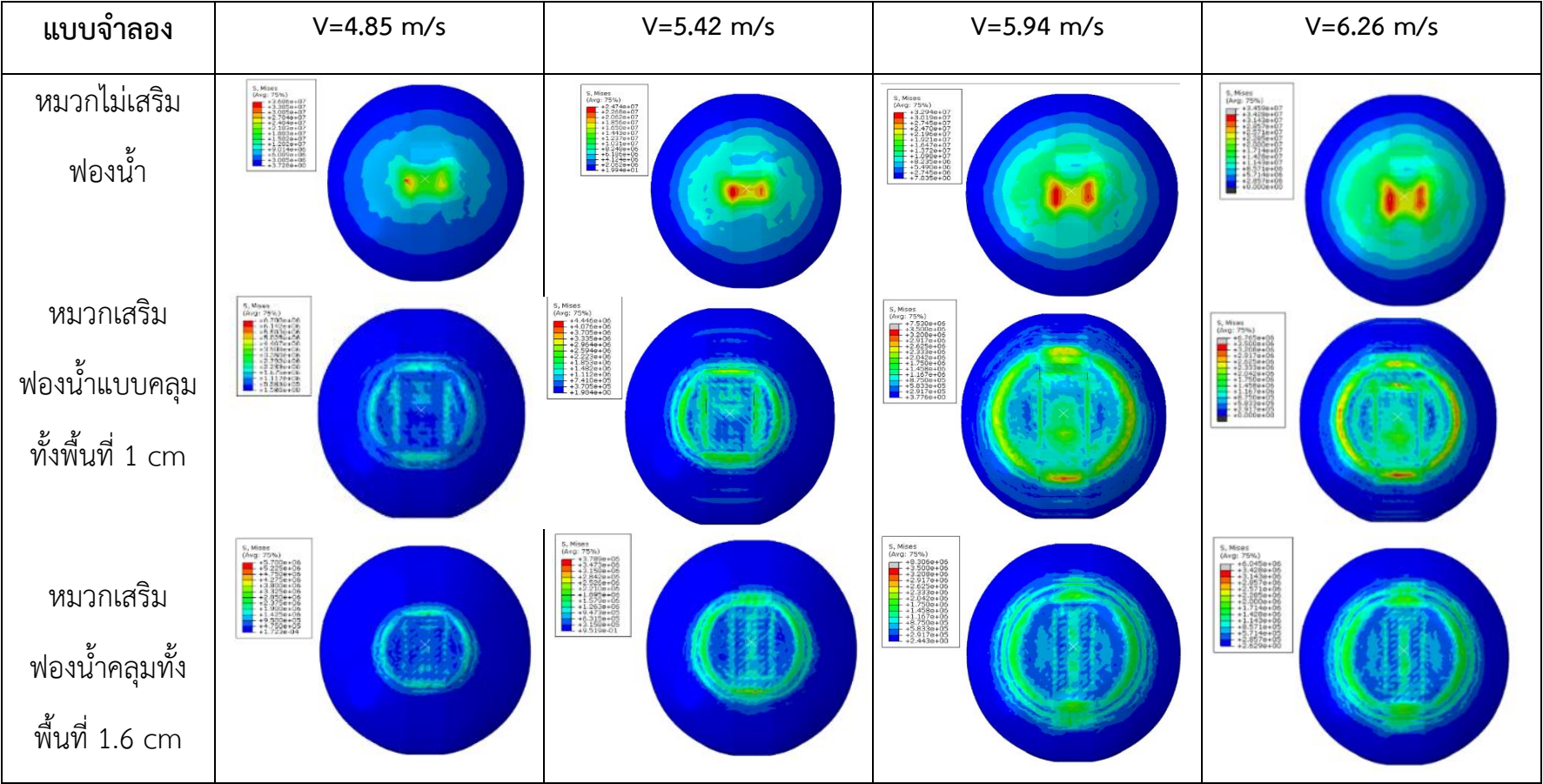
ตารางที่ ข.2 ภาพระโหลตสูงสุดผลของหมวกแบบเต็มใบ



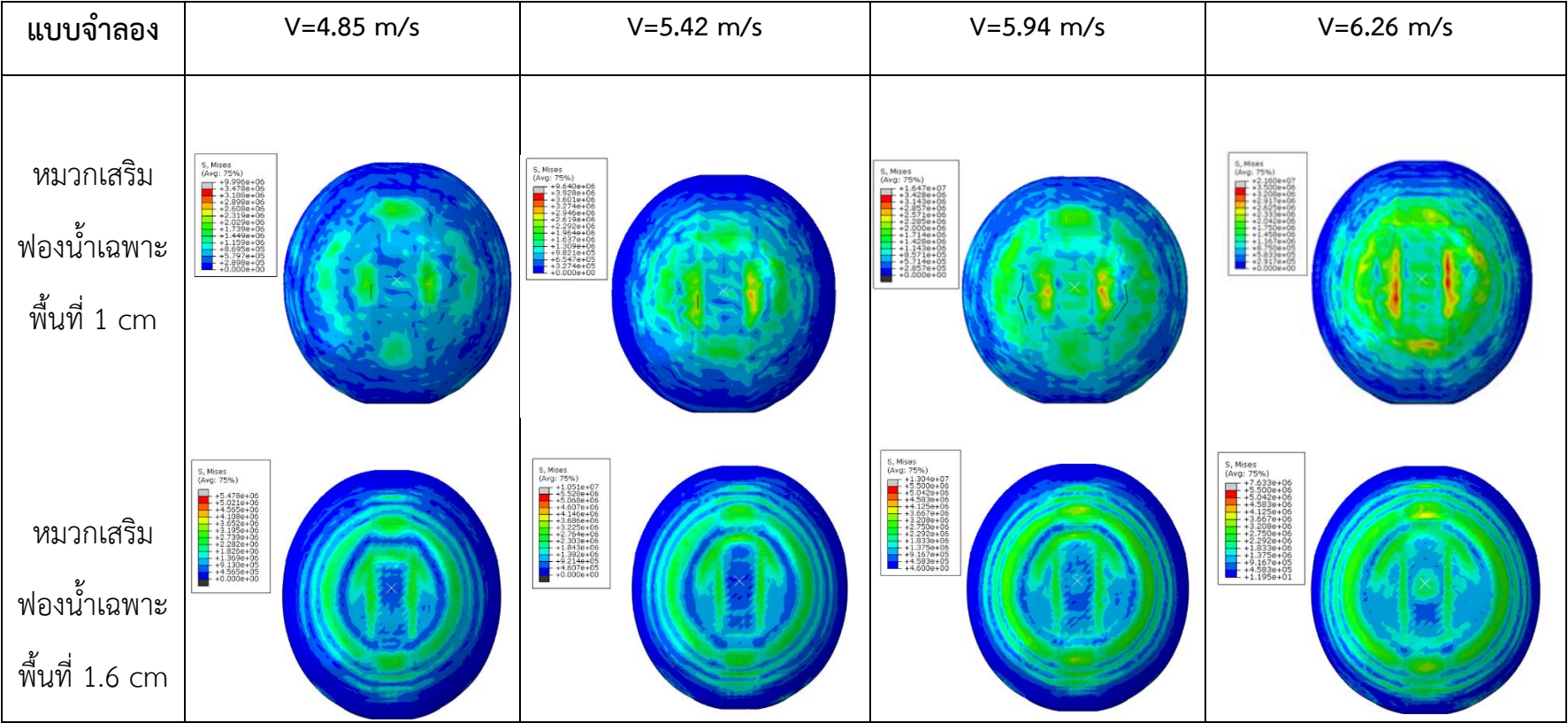
ตารางที่ ข.2 ภาระโหลดสูงสุดผลของหมวกแบบเต็มใบ (ต่อ)



ตารางที่ ข.3 ภาพระโหลตสูงสุดผลของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า



ตารางที่ ข.3 ภาพระโหลตสูงสุดผลของหมวกแบบเต็มใบปิดหน้า (ต่อ)



ภาคผนวก ค
งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

THE STUDY ON APPLICATION OF RUBBER SPONGES FOR IMPACT ABSORBER FOR MOTORCYCLE HELMETS

¹KUNANON SAKKAMPANG, ²CHAWALIT THINVOGPITUK

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrab, Ubon Ratchathani, Thailand 34190
E-mail: offta_02@hotmail.com

Abstract - This study was aimed to evaluate the potentials of applying low-price natural latex for producing rubber sponges as an impact absorber in motorcycle helmets. Three types of commercial motorcycle helmet: shorty, open-face and full-face were used in this study. The rubber sponges of 1 cm and 1.6 cm thickness were produced and adhered to the comfort foam inside the helmets and were tested through two series of tests: impact tests and drop tests. For the impact tests, a 2-meter liftable hammer was dropped and stroked on the experimental helmets. The load response of specimens were recorded. The value of peak accelerations and Head Injury Criterion (HIC) were the main parameters focused in this study. It was found that the helmet with rubber sponges can lower peak load of helmet between 34 – 53 % for 1-cm thickness and between 40 – 64.7 % for 1.6 cm thickness. The rubber sponges can also reduce the value of HIC of commercial helmet, maximum by half for shorty. In addition, acceleration of helmet can be also reduced by applying rubber sponge to the comfort foam. It could be concluded, based on those parameters, that the rubber sponge layer adhered to comfort foam inside the helmet can improve the impact capacity of motorcycle helmets. Many criterions that are linked to severity of head and brain injured were reduced significantly. This implies that the rubber sponge is potentially to be used as impact absorber for motorcycle helmets.

Keywords - Helmet, Impact, Rubber Sponge, Energy Absorption

1. INTRODUCTION

Motorcycle helmet is the most important protection headgear for motorcycle riders because it is an equipment that helps to lower the severity of head and brain injured [1]. Wearing a protective helmet correctly can reduce the risk of death by 43% for the drivers and 58% for the passengers [2]. However, commercially available helmets need to meet at least a safety helmet standard of each country such as DOT Standard (Department of Transportation) [3], Snell Standard (Snell Memorial Foundation) [4], ECE Standard (Economic Commission for Europe) [5], etc. Before achieving the requiring standards, in general, all helmets and protective gear must surpass tests to be certified through different bodies depending on the country the product is sold such as impact-absorption test, penetration test, retention test, and peripheral vision test. In Thailand, there are three main types of commercially available helmets widely used by motorcyclists, they are shorty, open face and full-face. In general, the components of motorcycle helmets are composed of two main parts which are the shell area and inner area. The shell area is made from thermoplastic which usually made from Polycarbonate or Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (henceforth ABS), while the inner part is generally made from an Expanded Poly-Styrene material (henceforth EPS) [6]. In term of dynamic load capacity and energy absorption capacity, full-face helmet is the best protective headgear due to the materials used in making the outer shell and the thickness of the comfort foam inside the helmets [7]. According to the research of T. M. Rice et al. [8], it was found that helmets can reduce the risk of motorcycle accident neck injuries by 37% and brain injuries by 60%. In addition, a study by

A.L. DeMarco et al. [1] revealed that a high impact speed (0.9 to 10.1 m/s) can cause a peak linear acceleration of 500g. Moreover, it was also found that the thickness of the comfort foam inside the helmets directly affect on energy absorption capacity. The higher energy absorption capacity would be better for the motorcyclists.

Over the past 5 years, Thailand becomes the world's largest producer and exporter of natural rubber. Natural rubber is high flexibility, therefore it is widely used as a cushioning material in form of rubber sponge or rubber foam. In the production process, natural rubber latex from rubber trees will be mixed with some chemical such as sulfur or other catalysts before forming at elevated pressure and temperature. This process is called vulcanization or it is also known as the process of forming a visco-hyperelastic materials. The rubber with high adhesion will has higher tensile and flexibility and can be used in various applications such as mattresses, heel pads, cushioning and insulating materials, and etc. This research is aimed to study about using rubber sponge as an absorbing material in motorcycle helmets to reduce the risk of road traffic injuries and deaths as well as to offer were alternative use of the natural rubber. According to previous studies [9, 10, 11], there are many parameters affecting on the energy absorption capacity of helmets, types of helmet is one those. However, this study will focus on three available types of helmet in Thailand which are shorty, full-face and open-face types. The natural rubber is formed to be rubber sponge using Dunlop process. The sponge is adhered beneath the helmet comfort foam of helmet. The specimens were tested under impact, acceleration and head injury criterion value were investigated.

Types	Outer Shell				Inner Comfort Foam			
	Material	Modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Thickness (mm)	Material	Modulus (MPa)	Density (kg/m ³)	Thickness (mm)
Shorty	ABS	2.98	1,120	4.40	EPS	25.33	100.07	27.48
Open- face	ABS	2.73	895	3.44	EPS	21.19	120.27	16.00
Full-face	ABS	2.55	1,128	3.72	EPS	21.26	110.07	30.00
Rubber sponge	-	-	-	-	Elastics	0.03	110.00	10 and 16

EPS = Expanded-Poly-Styrene, ABS = Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS Plastic

Table 1 Types and properties of the experimental helmets in this study

II. METHODOLOGY

In this study, rubber sponges of 1 cm and 1.6 cm thickness were adhered to the comfort foam inside the experimental helmets. The helmets were tested through two series of tests: impact test for investigating the load on the helmets, and drop test for investigating the acceleration and the HIC values of the helmets. As this study solely concentrated on evaluating impact absorbing performance of the helmets with the additional rubber sponge layer, therefore, the helmets sleeves which were adhered inside the helmets were removed. The obtained data was analyzed to compare the differences of the load, acceleration, and HIC values between the commercially available helmets and the helmets with the rubber sponge layer.

2.1 Helmets

Three types of motorcycle helmets: shorty, open-face, and full-face were used in this study as they are widely used in Thailand. Typical helmet of those types are shown in Figure 1. The helmets were selected by considering the same materials used in the outer and inner area. In this study, the outer cap of the helmets was made from ABS plastic and the inside comfort foam was made of EPS foam. The thickness of the outer cap and the inner comfort foam were measured and as shown in Table 1.



Figure 1 Three types of motorcycle helmet commercially used in Thailand and adopted to used in experiment

2.2 Rubber Sponges Preparation

In this study, Dunlop process was used in the production process of rubber sponge because of its low cost and uncomplicated. During the process, the latex was blended with some chemical agents and whipped until the foam is formed and slowly expanded to the required size.

The production process of the rubber sponge was explained thoroughly as follows: prepare 60% concentrated latex as shown in Figure 2(A), put the latex in a mixer to produce foam as shown in Figure 2(B); prepare the mixture of concentrated solutions: 10% ammonium oleate, 50% sulfur, 50% ZDEC, 50% ZMBT, 50% Wingstay L, 50% ZnO, 33% DPG, 12.5 % SSF as shown in Figure 2(C); transfer the mixture into the mixer as shown in Figure 2(D); whip until the foam formed and expanded to the required size as shown in Figure 2(E); pour on a tray and heat in an oven for about 30 minutes at 100°C as shown in Figure 2(F); wash off and dry the rubber sponge as shown in Figure 2(H).

After the entire process, the rubber sponge was in the density of 110 kg/m³ and Young's modulus was at 30 kPa. The rubber sponges of 1-cm and 1.6-cm thickness were adhered to the comfort foam inside the helmets as an additional impact energy absorbing material and covered the whole area of the comfort foam as shown in Figure 3. In this research, there is no reduction in the thickness of the foam inside the helmet in order to compare the differences between the commercially available helmets and the helmets with the addition of rubber sponge layer.

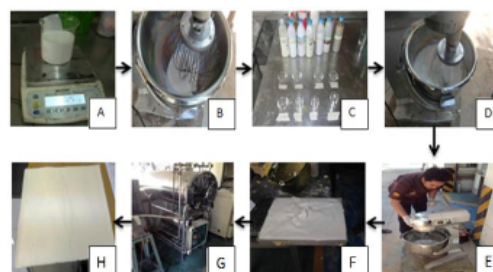


Figure 2 Rubber sponge moulding procedure

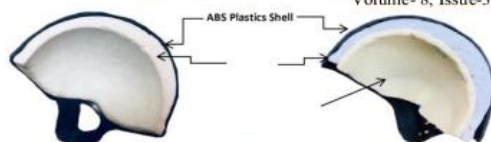


Figure 3 The comparison of the components between the commercially available helmets (Left) and the experimental helmets (Right)

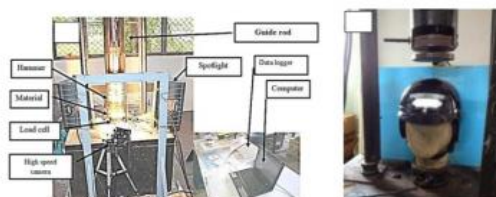


Figure 4 Impact testing machine

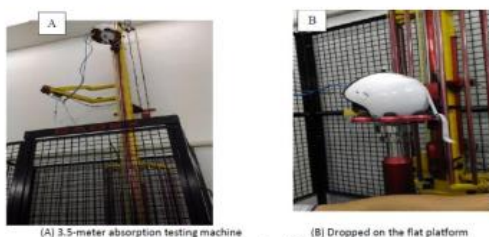


Figure 5 Absorption testing machine

2.3 Impact testing set

The impact testing set used in study was a 2-meter drop tower as shown in Figure 4(A). It was equipped with a 10-kilogram liftable hammer which is dropped in guided free fall to strike the surface of the helmets as shown in Figure 4(B). The drop height was 2 meters and the impact velocity was about 6.26 m/s. At the base of the platform, a load cell was equipped to record to the loading capacity of the experimental helmets up to 1,000 values per second. At the base of the platform, the experimental helmet was put on an artificial head which was placed on the load cell as shown in Figure 4(B). A high-speed camera, which the record rates was 1,000 frames per second, was installed to record the behavior of the experimental helmets after being stroked by the dropped hammer. To start the test, the hammer was released and freely drop before striking on the experimental helmets. The data was recorded through KYOWA DCS 100A program which can displayed graph showing the relation between load and time. The specimens were also tested for acceleration rate and further to calculate for HIC. This was carried out using Absorbing Testing Machine at Automotive Centre of Thailand Automotive Institute. The CE R22 Standard was adopted in this test and the experimental set up is shown in Figure 5(A). In the acceleration test, the experimental helmet was put on an artificial head equipped with three axis accelerometer (PCB model

353b18) before being dropped on the flat platform as shown in the Figure 5(B). For the shorty helmet, it was dropped from a height of 1.84 meters, while open face and full face helmets were dropped from a height of 3 meters.

The acceleration rate was recorded by triaxial accelerometer. For the HIC value, it can be calculated from the relationship between time and linear acceleration as in the Equation 1.1.

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

(1.1)

a = Linear acceleration, t_1, t_2 = Peak linear acceleration Time, $t_1 < t_2$

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Load response under impact

The response of helmets to the impact can be observed by considering load-time relationship of specimens as shown in Figure 6 – 8 which show relationship between the load and time of shorty, open face and full-face helmets, respectively. From the characteristic of load-time curve in Figure 6 – 8, it may be concluded that by adhering the rubber sponge to the comfort foam can lower the value of peak load. The shorty, open-face, and full-face helmets with 1-cm rubber sponge can reduce maximum load by 53.53%, 34.77% and 41.56% respectively compared to commercial motorcycle helmets.

For those of 1.6-cm rubber sponge, the maximum load can be reduced by 64.53%, 39.90% and 47.32% respectively. It is also interesting to investigate the delay time occurred during the tests. Longer delay time implies that the rubber sponge layer helps prolonging impact time and reduced the load on the helmets. As can be observed, the helmets with rubber sponge have higher delay time in every cases.

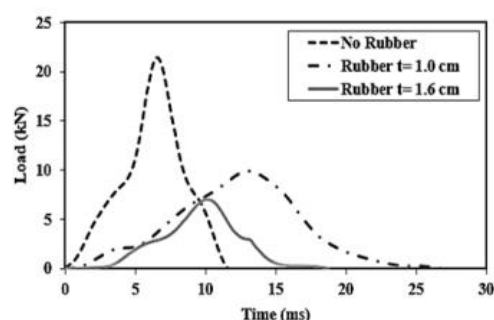


Figure 6 The relationship between load and time of the experimental helmets of shorty helmet

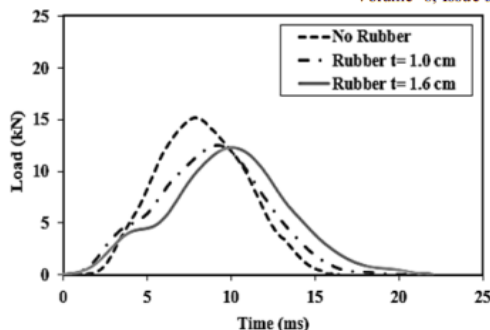


Figure 7 The relationship between load and time of the experimental helmets of open-face helmet

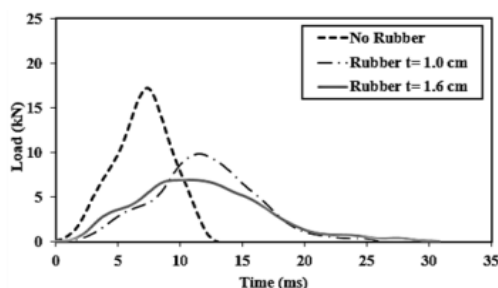


Figure 8 The relationship between load and time of the experimental helmets of full-face helmet

3.2 Acceleration and HIC

Table 2. show the experimental results of peak load, peak linear acceleration and HIC of specimens according to various standards, acceleration value is limited to certain value. For example acceleration of Snell standard is limited under 300 g with the height of 3.06 m test while it is limited under 275 g with 3.0 meter test for ECE standard. The specimens in this study were also tested for acceleration and the results are shown in Figure 9-11. According to Figure 9, the peak acceleration of the shorty helmets without the rubber sponge layer is 693.03 g, while those of the helmets with the 1-cm and 1.6-cm rubber sponge layer are 277.94 g. and 221.05 g. respectively. Regarding to the results of the open-face helmets, the peak acceleration of specimen without the rubber sponge layer is 322.03 g., while those of the helmets with the 1-cm and 1.6-cm rubber sponge layer are 223.34 g. and 229.15 g. respectively as shown in Figure 10. While, the results of the full-face helmets, the peak acceleration of helmet without the rubber sponge layer is 305.07 g., while those of the helmets with the 1-cm and 1.6-cm rubber sponge layer are 259.46 g. and 203.34 g. respectively as shown in Figure 11. As the matter of fact, the peak acceleration of the helmets with the 1-cm and 1.6-cm rubber sponge layer is not significantly different. According to the result of this study, it could be noticed that the values of the peak acceleration in all of the tests of the helmets with rubber sponge layer are lower than 300 g which are complied to both Snell and ECE standards.

Types of Helmets	Thickness of sponge (cm)	Peak Load (kN)	Peak Linear Acc. (g)	HIC
1. Commercial Shorty		21.37	693.03	4,313
2. Shorty- rubber	1	9.93	277.94	2,109
	1.6	7.54	221.05	1,276
3. Commercial Open face		17.54	322.03	2,679
4. Open face- rubber	1	11.44	223.34	1,745
	1.6	10.54	229.15	1,998
5. Commercial Full face		16.84	305.07	2,083
6. Full face- rubber	1	9.84	259.46	1,805
	1.6	8.87	203.34	1,362

Table 2 The summary of load, acceleration and HIC value in this study

Head Injury Criteria (HIC) is one of the important index for the study about impact. HIC value means a value for the characteristics of skull-brain injury arising from the deceleration forces which result from a blunt perpendicular impact with the glazing. Generally, the acceptable HIC value should not exceed 2,400. [8]. According to P. Crompton et.al. [10], the HIC value must not exceed 700 when the HIC integration time does not exceed 15 ms. The HIC value is normally varied as the peak of acceleration value. Value of HIC achieved from this study is shown in Figure 12. The results of the study revealed that the

HIC values of the shorty and full-face helmets without the rubber sponge layer were 4,313.67 and 2,679, which was high enough to cause head injuries [12]. According to Figure 12, the HIC value of the typical shorty helmet (4,313.67) is apparently higher than those with 1-cm and 1.6-cm rubber sponge layer (2,109.67 and 1,276.67). Considering the open-face helmet design, the HIC value of the typical helmet (2,679.67) is also higher than those with 1-cm and 1.6-cm rubber sponge layer (1,745.00 and 1,998.00). Meanwhile, the HIC value of the typical full-face helmet (2,083.33) is slightly higher than those with

1-cm and 1.6-cm rubber sponge layer (1,808.00 and 1,362.00). Therefore, it could be concluded that the rubber sponge can reduce the value of HIC more than half for shorty and between 25 – 35 % for open-face and between 13 – 34% for full-face.

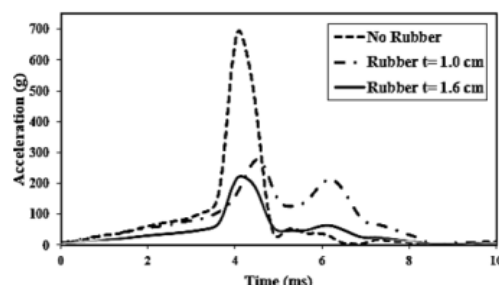


Figure 9 Acceleration and time relationship of specimens of shorty helmet

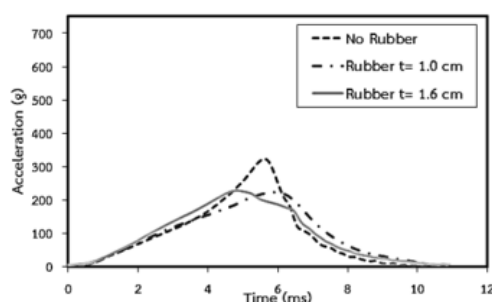


Figure 10 Acceleration and time relationship of specimens of open-face helmet

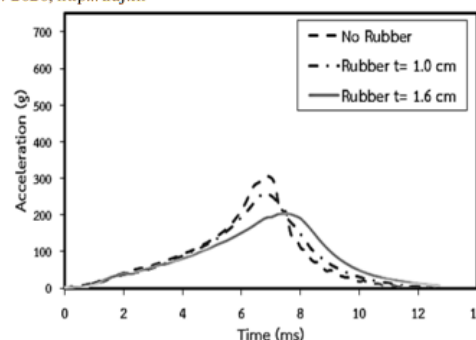


Figure 11 Acceleration and time relationship of specimens of full-face helmet

IV. CONCLUSION

A number of tests was carried out in this study to investigate the possibility to enhance the impact capability of motorcycle helmets in Thailand. Three types of commercially helmets i.e. shorty, open-face and full-face, were adhered with 1.0 cm and 1.6 cm rubber sponge and tested under impact.

According to the experimental result, it was revealed that the adding the rubber sponges to the helmets could reduce the maximum loads of the helmets regardless the thickness of the rubber sponges and the helmet design. Moreover, this research concludes that applying rubber sponges could lower the peak accelerations of the helmets significantly to a standard level, especially in the case of

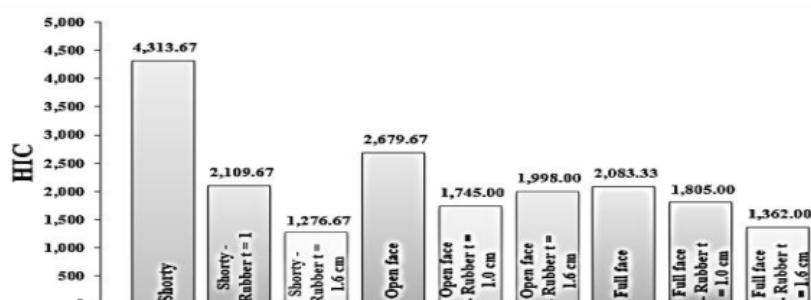


Figure 12 The summary of HIC values

commercial shorty helmets which maximum acceleration value was 693.03 g. and exceeded the Snell and ECE helmet standards. In term of HIC value, the HIC value of the helmets with the additional absorbing layers was in an acceptable level and lower than those of the commercially available helmets which the HIC values were more than 2,000. However, commercial helmets need to pass various standard tests such as energy absorption test, tightness test, vision test, and etc. and should be studied more. Further studies or those who are interested in applying the results of this study could be pursue the study on

analysing appropriate density of the rubber sponge for using as an absorbing material in helmets.

REFERENCE

- [1] A. L. DeMarco, D. D. Chimich, J.C. Gardiner, R.W. Nightingale and G.P. Siegmund, "The impact response of motorcycle helmets at different impact severities", *Journal of Accident Analysis and Prevention*, p. 1778–1784, 2010.
- [2] K. Kanitpong, Y. Tanaboriboon, and N. Boontob, "Helmet use and effectiveness in reducing the severity of head injuries in Thailand", *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2048(2048):66-76, Dec 2008.

- [3] Department of Transportation, "Federal motor vehicle safety standard No.218.49 CFR571.218.U.S.Department of Transportation", National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC. 1988.
- [4] Snell Memorial Foundation, "Standard for protective head gear for use with motorcycles and other motorized vehicles", Snell Memorial Foundation, North Highlands, CA. 2005.
- [5] Economic Commission for Europe, "Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and of their visors for drivers and passengers of motorcycles and mopeds. Regulation No. 22, Revision 4", United Nations, Geneva Switzerland.
- [6] P.K. Pinnoji, P. Mahajan, N. Bourdet, C. Deck and R. Willinger, "Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments & numerical modeling", *International Journal of Impact Engineering*. 37 (2010) p. 274–284, 2010.
- [7] D.R. Thom, "Comparison tests of motorcycle helmets qualified to international standards", *Proceedings of the International Motorcycle Safety Conference, The Human Element, Long Beach 2006 CA*. pp. 1– 14, 2006.
- [8] T.M. Rice, L. Troszak, J.V. Ouellet, T. Erhardt, G.S. Smith and B.W.Tsai, "Motorcycle helmet use and the risk of head, neck, and fatal injury: Revisiting the Hurt Study", *Journal of Accident Analysis and Prevention*. 42 (2010) p. 1778–1784, 2010.
- [9] F. Fernandes, R. Alves de Sousa, R. Willinger and C. Deck, "Finite Element analysis of helmeted impacts and head injury evaluation with a commercial road helmet", *IRCOBI Conference 2013*. 11 - 13 September 2013. Gothenburg, Sweden. p. 431-442, 2013.
- [10] P. Crompton, D.M. Dressler, C.A. Stuart, C.R. Dennison and D. Richards, "Bicycle helmets are highly effective at preventing head injury during head impact: Head-form accelerations and injury criteria for helmeted and unhelmeted impacts". *Journal of Accident Analysis and Prevention*. 70 (2014) p. 1–7, 2014.
- [11] R. Tantathertam, V. Kongtat, K. Sriroat. "Alternative: Preparation and properties of natural rubber filled coconut shell and palm oil bunch fiber composites". *The 48th Kasetsart University Annual Conference*. 3 - 5 February 2010. Bangkok. p 523-529, Feb 2010.
- [12] A. Sawatraksa, J. Detwayukul, S. Wongsiri, B. Tungtrakulwanit and W. Thongruang, "Materials Development of Natural Rubber Heel Cushion for Reducing Plantar Heel Pressure", *The 23th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*. 4-7 September 2009, Chiang Mai. Thailand, Sep 2009.
- [13] G.D. Caserta, U. Galvanetto, M. Ghajari and L. Iannucci. "Finite element modelling of a honeycomb reinforced helmet". *Proceedings of the 1st International Conference on Helmet Performance and Design*. 15 February 2013. London. UK. p. 7-12 – 7-12. Feb 2013.
- [14] D. Krzeminski, D. Fernando, J. Rawlins, T. Gould and S. Piland, "Effects of solvent exposure on material properties and impact performance of an American football helmet outer shell material", *The 2014 conference of the International Sports Engineering Association. Procedia Engineering* 72 (2014) p. 508 – 514, 2014.
- [15] L.B. Tan, K.M. Tse, H.P. Lee, V.B. Chye Tan and S. P. Lim, "Performance of an advance combat helmet with different interior cushioning systems in ballistic impact: Experiments and finite element simulations", *International Journal of Impact Engineering*. 50 (2012) p. 99-112, 2012.
- [16] D. Caroline and W. Remy, "Head injury prediction tool for predictive systems optimization", *7th European LS-Dyna Conference 2008*. 15 February 2013, London, UK. p 28 - 32. Feb 2013.
- [17] S.I. Sadaq, A.R. Junaidi, V.S. Kumar, J.G. Konnelly, S.S. Qadiri, "Impact test on motor cycle helmet for different impact angles using FEA" *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Volume 12 Number 6 - Jun 2014, P 278- 281, 2014.
- [18] D.S. Liu and Y.T. Chen, "A finite element investigation into the impact performance of an open-face motorcycle helmet with ventilation slots", *Applied Sciences Journal. Appl. Sci*. 2017 (7, 279). p 1-12, 2017.
- [19] S. Meng, M. Fahlstedt, P. Halldin, "The effect of impact velocity angle on helmeted head impact severity: A rationale for motorcycle helmet impact test design", *IRCOBI 2018 Conference*. 12 – 14 September 2018. p 454-469, Sep 2018.

Certificate of publication

We certificate that the paper titled:

“An Experimental Investigation of a Rubber Sponge Padded Motorcycle Helmet Subjected to Impact”

Authors:

Kunanon Sakkampang, Chawalit Thinvongpiutuk

**has been published as regular paper
in:**

Volume 15 (5), May 2021, Pages 268-277

DOI: 10.15866/ireme.v15i5.21038

All rights on the paper are reserved by PWP

Head of the Editorial Staff



**Praise Worthy Prize
Publishing House**

An Experimental Investigation of a Rubber Sponge Padded Motorcycle Helmet Subjected to Impact

Kunanon Sakkampang, Chawalit Thinwongpituk

Abstract – This research has aimed to improve the impact absorption capacity of motorcycle helmet by installing rubber sponge pads underneath its comfort foam. Three types of Thai commercial helmets have been used in this study, namely the Shorty, Open-face and Full-face. A number of off-the-shelf helmets and padded-helmets have been used as experimental specimens. The thicknesses of the rubber sponge pads have been 1.0 cm and 1.6 cm and they have been installed to the helmets with two different patterns, i.e. Full Area (FA) and Oregon Aero (OA). Two series of test, the impact and the drop test, have been carried out. Time-histories of the transmitted load and of acceleration have been considered. The peak load, the peak acceleration, and the HIC have been investigated and discussed. The experimental results have indicated that the padding technique could significantly improve the impact absorption capacity of the helmet. The maximum peak load reduction has been 55.21% in the case of the padded-helmet at the impact height of 1.2 m. However, the peak load reduction has decreased with an increase in the impact height. The values of the peak acceleration and the HIC of commercial helmets have been found to exceed the standard value of ECE22.05, particularly for the Shorty helmet. By padding the helmet with a rubber sponge, the peak acceleration and the HIC have been also significantly decreased. The highest reduction of peak acceleration and the HIC were approximately 70% for the Shorty with 1.6 cm pad. In the case of the Open-face and the Full-face, the reductions have ranged in between approximately 12-35%. In addition, this study has revealed that the influence of rubber sponge thickness has been more prominent than the one of the pad patterns. Therefore, the OA pattern may be preferable since it is lighter and uses less material. Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: Motorcycle Helmet, Peak Load, Acceleration, Head Injury Criterion (HIC)

Nomenclature

ABS	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene
a	Linear acceleration
DOT	Department of transportation
ECE22.05	Economic commission for Europe
FA	Full area pattern
EPS	Expanded-Poly-Styrene
HIC	Head Injury Criterion
OA	Oregon aero pattern
Peak Acc.	Peak acceleration
P_{max}	Peak load
Snell	Snell memorial foundation
t_1, t_2	Peak Linear acceleration time, $t_1 < t_2$

I. Introduction

Among the systems that people have to deal with on a daily basis, road transport is the most complex and the most dangerous one. Considering the current global situation, road traffic injuries are a major problem whereby the number of related injuries could be as high as 50 million cases a year, requiring concerted efforts for effective and sustainable prevention [1]. A 2018 report

from the World Health Organization (WHO) showed that 1.35 million people died in road accidents [2]. Low- and middle-income countries face more serious road accident problems than the high-income ones. In Thailand, for example, many potential lives are lost due to road casualties. This is much higher than other causes despite numerous government safety initiatives over the years [3]-[5].

Motorcycles are a significant cause of injury-related fatality and disability, particularly head injuries.

Motorcycle helmet is a protective device, which is highly accepted and world-widely used to reduce head injuries.

However, some studies have indicated that wearing a helmet can reduce head injuries up to only 42 % [6], [7].

In spite of huge improvement on motorcycle helmet, its effectiveness remains a challenging effort [8], [9].

There are three types of commercial motorcycle helmets in Thailand: the Shorty helmet, Open-face helmet, and Full-face helmet. Despite the varieties of designs, the helmet shell is typically made from ABS plastic adhered with EPS foam as the inner liner and comfort liner [10]. The helmet shell provides penetration protection and some rigidity for the inner liner as it

absorbs the energy of the impact.

The compression of the inner liner and the padding reduces the amount of energy applied to the head.

Commercial motorcycle helmets have to comply with standard test such as DOT standard [11], Snell standard [12], ECE.05 standard [13], [15], [16], etc. Those standard tests normally include impact tests to investigate the ability to absorb shock (impact) [17], [18], the resistance to puncture from sharp objects (penetration), the tightness in wearing (retention), and the vision while wearing it (peripheral vision), etc. [14].

The drop test is the main process of evaluating the effectiveness of the helmets with a free drop of a headform at the height between 0.5-3.0 m [13], [19] in order to assess the acceleration and head injury criterion (HIC) values.

The effect of the helmet style has been studied by Alyssa L. DeMarco et al. [20], by carrying out impact tests on various designed helmets.

The results have revealed that the Full-face helmet has been the most efficient design. In some studies, the impact characteristics in different head areas have been investigated using a computer simulation technique [10], [21], [22].

In terms of head injuries, it has been found out that in some cases of accident, even if a rider has worn a helmet, the risk of head injuries has been still high. The cushioning shell and foam inside the helmet may not adequately absorb the shock [23]. Therefore, installing some additional liner might help in reducing the risk of head injuries in road crashes. This research has aimed to enhance the impact load absorption capacity of the motorcycle helmet by adding rubber pad underneath the helmet comfort foam.

A natural rubber sponge has been used as additional liner since rubber is one of the main products of Thailand [24]. In addition, rubber is widely used as cushioning material such as in tubular impact materials [25], playground surfaces [26], off-road rubber tracked ground vehicles [27] and it is also used for concrete reinforcement [28]. This is because rubber is highly resilient [29] and the process of making rubber sponge is simple, cost-effective and can be straightforward molding [30].

This study has examined helmets with two different rubber pad patterns and two different pad thicknesses.

Various heights of impact have been used and the value of peak load, HIC as well as load histories have been investigated in detail.

II. Materials and Experimental Methods

II.1. Specimens

Figs. 1 show typical off-the-shelf Shorty, Open-face, and Full-face helmets used in this study. The outer shell of the helmets is made of ABS plastic with a thickness between 3.72 - 4.40 mm and a modulus between 2.55-2.98 GPa.

The inner comfort foam of the helmet is EPS foam

with a thickness of 26.00-30.00 mm and a modulus between 21.19-25.33 MPa. These helmets have been set into 2 groups. The first one has been the commercial helmets, which have been tested without modification.

The second group has been the padded helmets, which have been modified before testing. The modification has been done by installing rubber sponge pads underneath the helmet comfort foam.

The rubber sponge pad used in this study has been fabricated by Dunlop process with a thickness of 1.0 and 1.6 cm, while the density has been kept constant at 100 kg/m³.

The modulus of the rubber sponge has been 38.26 kPa. The installation of the rubber pads has been made in two patterns.

The first pattern has been the Full Area, referred to as FA, in which the whole area of comfort foam has been attached with rubber sponge pad. The second pattern has been an Oregon Aero, which has been based on the study of L.B.

Tan et al. [31] and has been referred to as OA. This has been done by sticking 5 pieces of rubber sponge pads underneath the helmet comfort foam.

The OA pattern has aimed to reduce additional weight of the padding. The layout of the rubber sponge pad is shown in Figs. 2.

Detailed properties of helmets are listed in Table I.



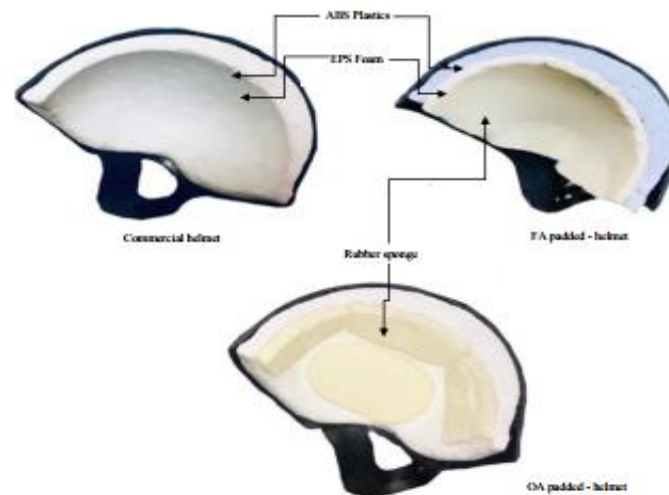
Figs. 1. Typical Thai commercial helmets

K. Sakampang, C. Thinvongpituk

TABLE I
PROPERTIES OF THE SPECIMENS

Helmet Types	Weight (g)	Outer Shell (ABS)			Inner Comfort Foam (EPS)		
		Modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Thickness (mm)	Modulus (MPa)	Density (kg/m ³)	Thickness (mm)
Shorty	515	2.98	1.120	4.40	25.33	100.07	27.48
FA 1 cm	595						
FA 1.6 cm	605						
OA 1 cm	565						
OA 1.6 cm	575	2.73	895	3.44	21.19	120.27	26.00
Open face	730						
FA 1 cm	860						
FA 1.6 cm	870						
OA 1 cm	830	2.55	1.128	3.72	21.26	110.07	30.00
OA 1.6 cm	840						
Full face	1,200						
FA 1 cm	1,280						
FA 1.6 cm	1,290						
OA 1 cm	1,250						
OA 1.6 cm	1,260						

EPS = Expanded-Poly-Styrene, ABS = Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS Plastic
FA = Full Area pattern, OA = Oregon Aero pattern



(a) Sectioned and composition of specimens



(b) Layout of rubber sponge pads for FA and OA helmets

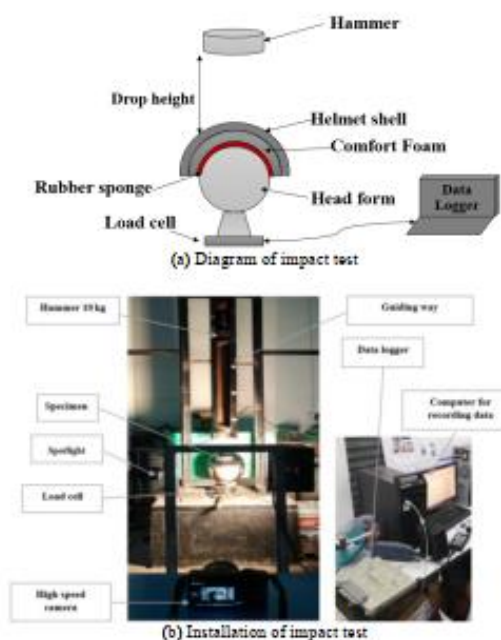
Figs. 2. Composition and layout of rubber pads in the specimens

II.2. Experimental Setup and Test Procedure

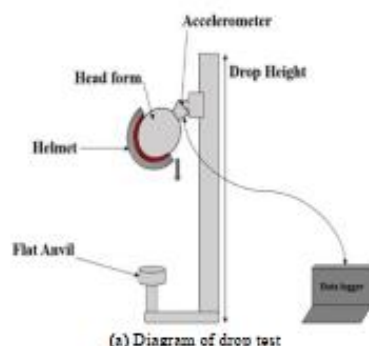
Two series of test have been conducted in this study, i.e. the impact test and the drop test. The first one has aimed to observe the crush characteristics of the specimens. It has been performed by releasing a 10 kg hammer from different heights to strike the helmet, which has been fixed on an anvil below. The drop heights of the hammer have been varied from 1.2, 1.5, 1.8 and 2.0 m in order to perform approximated impact speeds of 4.85, 5.42, 5.94 and 6.26 m/s, respectively.

These speeds have been designed to align with previous studies [15], [34], [35] for further comparison. A load cell (Kyowa model LC-20TV) has been installed under the anvil in order to detect the transmitted load and the data has been recorded by data logger (Kyowa PDC-300 Series 47) for further analysis. The diagram of impact test set up is shown in Figs. 3. The drop test has been carried out to investigate the acceleration and the HIC of the specimens. The test has been conducted at Thailand Automotive Institute, using ECE.05 standard [13], by dropping a helmet wearing-headform from a certain height to hit a flat anvil at the bottom as a shown in Figs. 4.

The headform has been equipped with a PCB model 353b18 three-axis accelerometer for measuring the acceleration of impact. The specimens have been tested at different heights i.e. 1.84 m for the Shorty helmet and 3.0 m for the Open-face and the Full-face helmets. The data has been analyzed to find the relationship between the acceleration and the time, and then the HIC has been calculated using Eq. (1).



Figs. 3. Impact test setting up



Figs. 4. Drop test setting up

The HIC is the mean of acceleration used to determine head injuries that occur in milliseconds [36]. It is not only related to the maximum acceleration, but it also includes the distribution of acceleration at the time of impact [37]. The HIC is sometimes based on SAE (Safety of Automotive Engineers) standard, which is calculated from the acceleration value every 3 ms [38,39]. In this study, the value of HIC has been determined and recorded automatically by the test rig. Peak acceleration and the HIC values recommended by ECE22.05 have been used as the reference in this study:

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

III. Results and Discussion

III.1. Characteristics of the Transmitted Load

Time-histories of the transmitted load for the Shorty, Open-face and Full-face helmets under impact are illustrated in Figs. 5(a)-(c), respectively. The results of commercial, FA and OA, helmets with different pad

thicknesses (1.0 cm or 1.6 cm) under the same impact height have been plotted in the same graph for comparison. In general, it has been observed that the time-histories of the specimens had similar patterns, as a bell-shape. Peak loads of the Shorty have been comparatively higher than the Open-face and Full-face helmets in every case.

This may have been because of the design of the Shorty, which is, normally not crashworthy as the Open-face and the Full-face are. Considering the influence of rubber sponge pad, it has been obviously seen that the peak loads of the padded-helmet have been lower than the ones of the commercial helmet for every case. It is worth mentioning that the load-histories of padded-helmets, the FA and OA helmets at any thickness, have provided remarkably similar curve shapes and they had

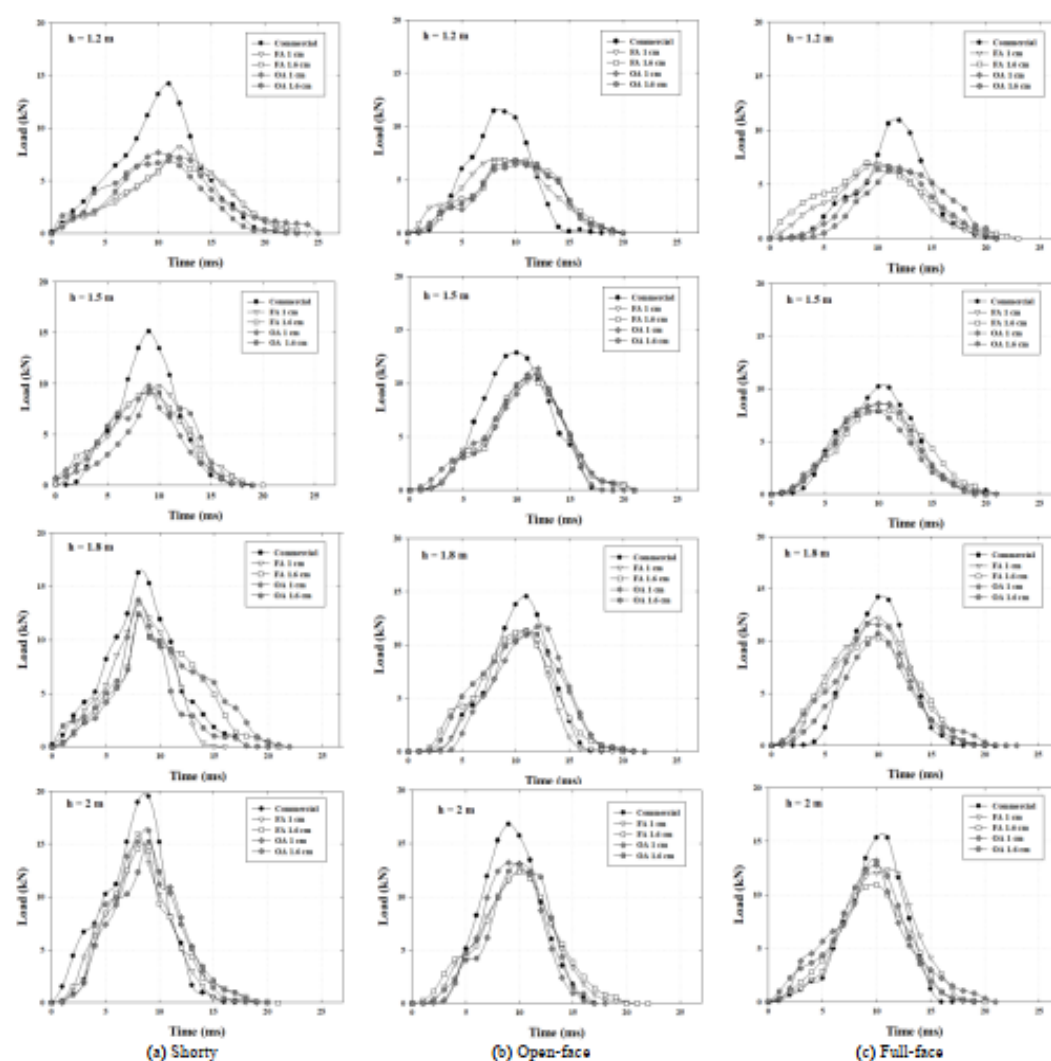
very similar values. Detailed data of the peak loads are tabulated in Table II.

For the impact height of 1.2 m, it has been observed that the highest reductions of the peak loads of the padded-helmets have been 55.21%, 42.96% and 42.71% for the Shorty, Open-face and Full-face respectively.

These have been all obtained from specimens with OA 1.6 cm.

The lowest reductions of the peak load for this height have been in cases of FA with 1.0 cm, which have been 42.04%, 39.38% and 36.75% for the Shorty, Open-face, and Full-face with FA 1.0 cm pad, respectively.

In the case of 1.5 m impact height, the padded helmets have reduced the maximum value of the peak loads by 40.01% (Shorty FA 1.6 cm), 17.77% (Open-face FA 1.6 cm), and 22.05% (Full-face FA and OA 1.6 cm).



Figs. 5. Time-history of transmitted load of specimens under various impact heights

TABLE II
SUMMARY OF PEAK LOAD OF SPECIMENS UNDER VARIOUS IMPACT HEIGHTS

Type	P_{max} (kN), 1.2 m / (S.D.)	% Reduction P_{max}	P_{max} (kN), 1.5 m / (S.D.)	% Reduction P_{max}	P_{max} (kN), 1.8 m / (S.D.)	% Reduction P_{max}	P_{max} (kN), 2 m / (S.D.)	% Reduction P_{max}
Shorty	14.20 (0.19)		15.12 (0.38)		16.29 (0.11)		19.52 (0.050)	
FA 1 cm	8.23 (0.055)	42.04	9.76 (0.11)	35.44	13.40 (0.15)	17.74	15.93 (0.055)	18.39
OA 1 cm	7.67 (0.012)	45.98	9.78 (0.11)	35.31	13.74 (0.083)	15.65	16.29 (0.041)	16.54
FA 1.6 cm	7.12 (0.058)	53.09	9.07 (0.040)	40.01	12.39 (0.10)	23.94	14.56 (0.040)	25.40
OA 1.6 cm	6.89 (0.050)	55.21	9.18 (0.060)	39.28	12.37 (0.015)	24.06	15.20 (0.015)	22.13
Open face	11.45 (0.37)		12.83 (0.085)		14.53 (0.060)		16.82 (0.104)	
FA 1 cm	6.94 (0.066)	39.38	10.93 (0.045)	14.80	11.40 (0.10)	21.54	12.51 (0.058)	25.62
OA 1 cm	6.73 (0.16)	41.22	11.33 (0.69)	11.69	11.72 (0.045)	19.33	13.20 (0.066)	21.52
FA 1.6 cm	6.83 (0.110)	40.34	10.55 (0.30)	17.77	11.27 (0.055)	22.43	12.30 (0.050)	26.87
OA 1.6 cm	6.53 (0.19)	42.96	10.63 (0.20)	17.14	11.09 (0.035)	23.67	13.02 (0.056)	22.59
Full face	10.91 (0.10)		10.20 (0.020)		14.20 (0.10)		15.35 (0.030)	
FA 1 cm	6.90 (0.030)	36.75	8.52 (0.076)	16.47	12.20 (0.032)	14.08	13.88 (0.085)	9.45
OA 1 cm	6.60 (0.080)	39.50	8.61 (0.073)	15.58	12.33 (0.080)	13.16	13.20 (0.026)	13.89
FA 1.6 cm	6.38 (0.037)	41.44	7.95 (0.052)	22.05	10.27 (0.060)	27.67	10.95 (0.026)	28.57
OA 1.6 cm	6.25 (0.055)	42.71	7.95 (0.051)	22.05	10.74 (0.12)	24.36	12.76 (0.081)	16.76

TABLE III
SUMMARY OF PEAK ACCELERATION AND HIC OF SPECIMENS UNDER DROP TEST

Helmet	Thickness of rubber	Peak Acc. (g)	% Reduction Peak Acc.	HIC	% Reduction HIC
Shorty	Shorty	693.03		4.131	
	FA 1 cm	277.94	59.89	2.109	48.95
	OA 1 cm	290.66	58.06	1.805	56.31
	FA 1.6 cm	221.05	68.10	1.276	69.11
Open face	OA 1.6 cm	204.17	70.54	1.362	67.03
	Open face	322.03		2.679	
	FA 1 cm	229.15	28.84	1.998	25.42
	OA 1 cm	236.33	26.61	1.967	26.58
Open face- rubber	FA 1.6 cm	223.34	30.65	1.745	34.86
	OA 1.6 cm	217.21	32.55	1.762	34.23
	Full face	305.07		2.083	
	FA 1 cm	259.46	14.95	1.805	13.35
Full face- rubber	OA 1 cm	251.93	17.42	1.813	12.96
	FA 1.6 cm	203.34	33.35	1.362	34.61
	OA 1.6 cm	211.25	30.75	1.638	21.36

The smallest reductions of peak loads for this impact height have been found in specimens with OA 1.0 cm.

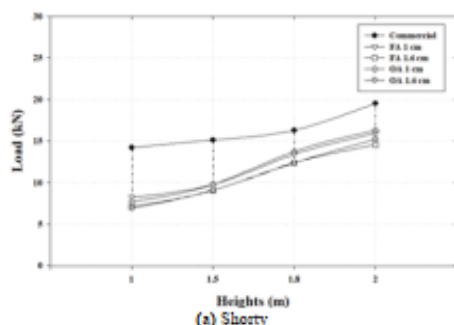
The reduction values have been 35.31%, 11.69%, and 15.58% for the Shorty, Open-face, and Full-face respectively. For the impact height of 1.8 m, the maximum peak load reductions of the padded helmets have been about 24.06 % (Shorty OA 1.6 cm), 23.67% (Open-face OA 1.6 cm) and 27.67% (Full-face FA 1.6 cm). For this height, the lowest reductions of the peak load have been 15.65%, 19.33%, and 13.16% for the Shorty, Open-face, and Full-face with OA 1 cm, respectively. Considering the impact height of 2 m, it has been observed that the peak loads have been reduced between 16.54%-25.40% for the Shorty, 21.52%-26.87% for the Open-face, and 9.45%-28.57% for the Full-face.

According to these data, the rubber sponge pad has remarkably enhanced the impact load absorption capacity of the helmet. This is very significant when compared with some prior studies such as the one of P.K. Pinnoji et al. [10] who have carried out an investigation on Full-face helmet with metal foam shell addition. Their technique could reduce peak load by 24.75%. Another similar study has been made in 2021 by G. Gohel et al. [41], but on bicycle helmet. They have used carbon fiber as alternative for conventional ABS shell and it could reduce impact load by up to 15.22%. As can be seen, those results are about half of the ones obtained in the current study in which the reductions have been between

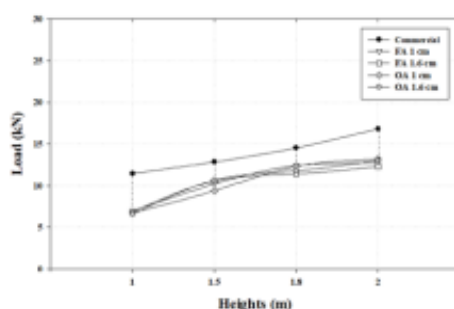
36.75%-42.71% for the Full-face with 1.2 m impact height. However, the absorption capacity of the pad seems to be weaker for higher impact height. Evidence is shown in Fig. 6. As can be noticed from Figs. 6 (a), (b), and (c), the gaps of peak load between the commercial and the padded helmets have been wider at the impact height of 1.0 m and then they have got narrower for higher impact heights, starting from 1.5 m, 1.8 m, and 2.0 m. This may imply that the padding foam loses its absorption ability for higher impact height. This finding is similar to the result reported by J. Z. Wu et al. [40] who have carried out a study on shock performance improvement of industrial helmet using air-bubble cushioning. Their study has concluded that the influence of cushioning decreases with higher impact velocity similarly to the result of the current study.

III.2. Acceleration and HIC

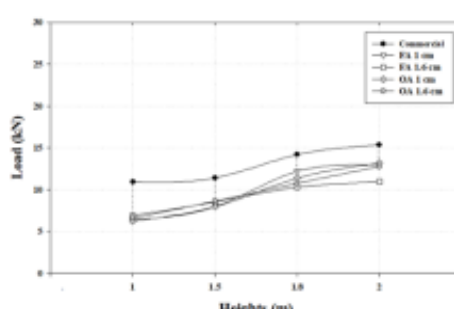
Acceleration and HIC are important indicators of impact absorption devices. It is widely accepted that peak acceleration associated with peak impact load causes traumatic brain injury [40]. HIC is based on the value of peak acceleration and it directly links to the severity of brain injury. The acceleration and the time histories of the commercial and padded-helmets are plotted and shown in Figs. 7.



(a) Shorty



(b) Open-face



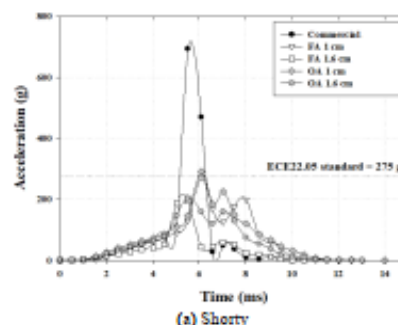
(c) Full-face

Figs. 6. Relationship between peak load and impact heights of specimens

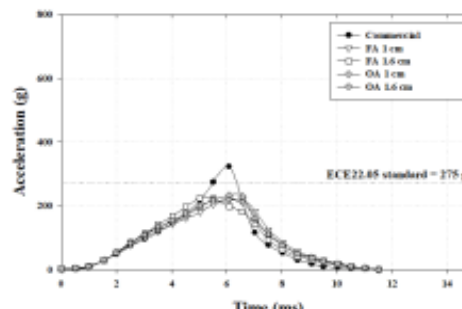
The values of peak acceleration and HIC are tabulated in Table III. Focusing on Figs. 7, the acceleration curves of the specimens had similar shapes but with different magnitudes.

It is noticed that the peak acceleration of commercial helmet has exceeded the standard value of ECE22.5, which is at 275 g [13]. In particular, the Shorty helmet (Fig. 7(a)) had an acceleration peak that has been very sharp and high, more than 2.5 times higher than the standard value. Peak accelerations of the commercial Open-face and the commercial Full-face helmets, shown in Figs. 7(b) and (c), respectively, have been much lower than the Shorty one. These are almost half in general.

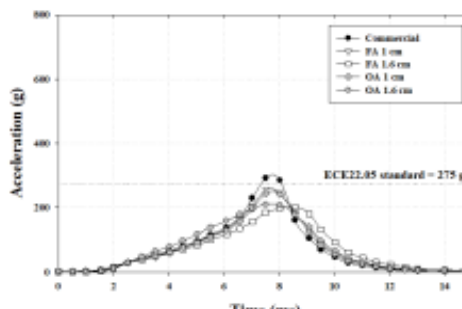
However, they have still exceeded the standard value as already mentioned.



(a) Shorty



(b) Open-face



(c) Full-face

Figs. 7. Time-history for acceleration of specimens under drop test

A detailed investigation on acceleration peak and HIC values is shown in Table III. In the case of the Shorty, FA, and OA with 1.6 cm pads, they have reduced the peak acceleration by about 68.10% and 70.54%, while OA and FA with 1.0 cm pads could lower the peak acceleration by about 58.06% and 59.89%, respectively.

However, peak acceleration of the Shorty with 1.0 cm pad has still slightly exceeded the standard value. The peak accelerations of Open-face with FA and OA pad of 1.6 cm have been reduced by 30.65% and 32.55%, while they have been reduced by 26.61% and 28.84% for the OA and FA with 1.0 cm pads, respectively. The Full-face of OA and FA with 1.6 cm pad could lower the peak acceleration by 30.75% and 33.35%, while the FA and OA with 1.0 cm pad could reduce the peak acceleration by 14.95% and 17.42%, respectively.

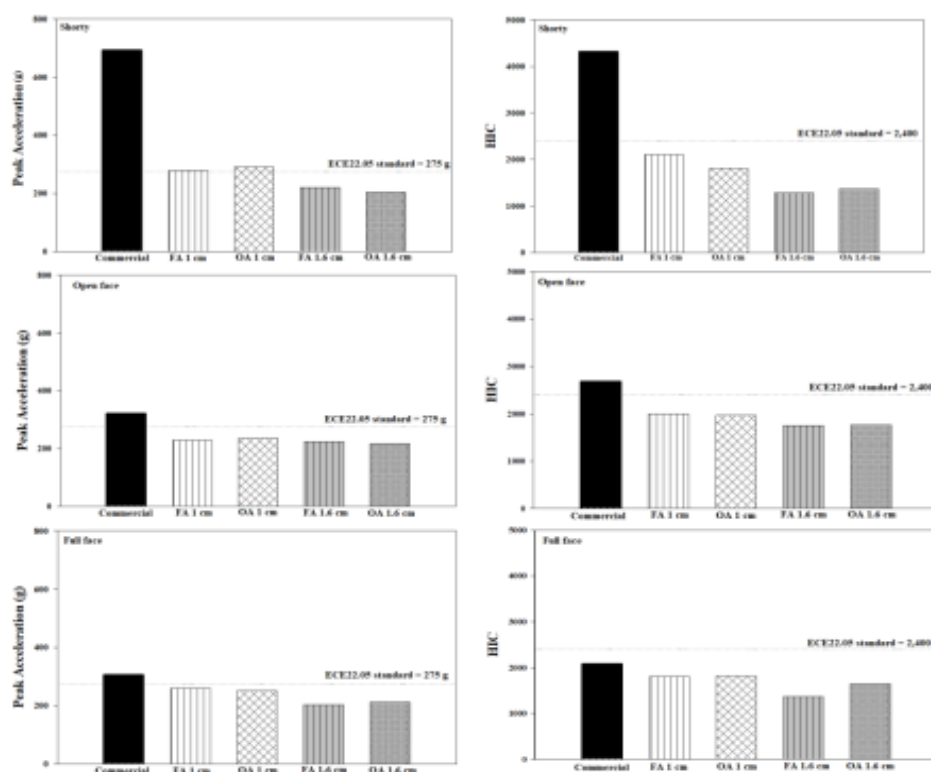


Fig. 8. Comparison of peak acceleration and HIC of specimens

From the results, it is implied that the rubber foam can reduce peak acceleration significantly, especially for the Shorty helmet. It is interesting to see that the specimens with 1.6 cm pad had lower peak acceleration than the 1.0 cm pad by about 2%-6% for Open-face, about 8%-12.5% for the Shorty, and about 13%-18% for the Full-face.

Focusing on the rubber foam pattern, FA and OA helmets have not provided large difference of peak acceleration as long as they have been of the same thickness. It may be concluded that the thickness of rubber pad plays a more dominant effect on peak acceleration than the pad patterns. However, optimal pad thickness should be considered because very thick pad may cause discomfort to the user. The summary of HIC is also presented in Table III and the graphical presentation is in Fig. 8. Similar to the peak acceleration, the HIC of the commercial Shorty has been 4,131 and it has highly exceeded the standard value of ECE22.05, which is at 2,400. The HIC of the commercial Open-face has been found to exceed slightly the ECE22.05 standard while the commercial Full-face has been slightly below the standard. The test results illustrate that every padded-helmet has HIC under the standard value. In general, the discrepancies between HIC of the FA and OA patterns are not large, compared to the effect of thickness. In the

case of the FA and OA Shorty, the helmet with 1.0 cm pad has reduced HIC by 48.95% and 56.31%, respectively, while the 1.6 cm pad could reduce HIC by 67.03% and 69.11% for OA and FA, respectively. The FA and OA Open-face helmets with 1.0 cm pad have decreased the HIC by 25.42% and 26.58%, respectively.

The Open-face OA and FA with 1.6 cm pad have reduced HIC by 34.23% and 34.86%, respectively. The HIC reductions of OA and FA Full-face helmets have been 12.96% and 13.35% for 1.0 cm pad and 21.36% and 34.62% for 1.6 cm OA and FA pads, respectively.

Focusing on the effect of thickness, the 1.6 cm pad has provided lower HIC than that of 1.0 cm pad by 10.73% and 20.16% for the Shorty with OA and FA, respectively. The Open-face with 1.6 cm has given lower value of HIC than the 1.0 cm pad by 7.65% for OA and 9.44% for FA cases. For the Full-face, 1.6 cm pad has provided lower HIC than the 1.0 cm pad by 8.4% and 21.26% for OA and FA patterns, respectively. These are consistent with the peak accelerations and it may be concluded that the rubber foam can significantly reduce the HIC of the helmet and the pad thickness has prominent influence while the one of the pad pattern is less on HIC. It is worth mentioning an interesting technique introduced by G.D. Caserta et al. [42], S. Li et

al. [43] and K. Hansen et al. [44]. They have aimed to reduce acceleration and HIC by using aluminum honeycomb as an addition for cushioning foam in helmet.

The reductions of acceleration and HIC achieved from this technique have been 27% and 14% for G.D. Caserta et al. [42], 24% and 36% for S. Li et al. [43], and 14% and 15% for K. Hansen et al. [44]. By comparing these results with the current study of Full-face helmet, it is observed that the rubber sponge technique provides higher reduction of peak acceleration, while the HIC values are comparable between both techniques.

IV. Conclusion

This research has carried out an experimental study on motorcycle helmet with rubber sponge pad as an extra cushion. The specimens have been commercial helmets in Thailand, which have been the Shorty, the Open-face and the Full-face. The helmets have been modified by adding rubber sponge beneath their comfort foam. This study has used two patterns of rubber sponge pad, which have been FA and OA patterns. The thicknesses of the rubber sponges have been 1.0 cm and 1.6 cm. They have been tested for peak load, peak acceleration, and HIC in order to investigate their impact absorption capacity. The result has revealed that the transmitted load of helmet could be significantly absorbed by the rubber sponge pad as can be observed that the peak loads of padded helmets have been much lower than the ones of the commercial one. However, the absorption capacity of the rubber sponge pad has seemed to decrease with an increase in the impact height. The peak accelerations and the HIC of the commercial helmets have been found to exceed the ECE22.05 value, particularly for the Shorty. Adding the rubber sponge pads beneath the helmet comfort foam can significantly reduce peak accelerations as well as HIC.

The highest reductions of peak acceleration and HIC have been approximately 70% for the Shorty with 1.6 cm pad. In the case of the Open-face and Full-face, the reduction of peak acceleration and HIC has ranged in between approximately 12%-35%. This study has also found out that the influence of the thickness has been more prominent than the one of the pad pattern.

Therefore, the OA pattern may be preferable due to the matter of weight and volume of material. This study is considered as an early stage of rubber sponge pad assisted-helmet. Many issues need to be further investigated. Some interesting issues to be studied in detail are the effect of foam density, the effect of foam thickness as well as other patterns of pad.

Acknowledgements

This work was supported by the Research Program of the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University and Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus.

References

- [1] WHO and World Bank. *World report on road traffic injury prevention*. Geneva: WHO, 2004.
- [2] WHO Global status report on road safety 2018: Summary. World Health Organization: WHO, 2018.
- [3] Y. Tanaboriboon and T. Sattienam. Road accidents in Thailand. *Journal of the International Association of Traffic and Safety Sciences, IATSS Research*, Vol. 29, n.1, pp.88-100, 2005.
- [4] C.F. Chen and C.W. Chen. Speeding for fun? Exploring the speeding behavior of riders of heavy motorcycles using the theory of planned behavior and psychological flow theory. *Accident Analysis & Prevention*, 43 n. 3, pp. 983- 990, 2011.
- [5] C. Chantith, C.K. Permpoonwittawat and B. Hamaide. Measure of productivity loss due to road traffic accidents in Thailand. *IATSS Research*, Vol. 45, Issue 1, pp. 131-136, 2021.
- [6] O. Samuel, G. Walker, P. Salmon, A. Filtmess, N. Stevens, C. Mulvihill, S. Payne and N. Stanton. Riding the emotional roller-coaster: Using the circumplex model of affect to model motorcycle riders' emotional state-changes at intersections. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 66, pp. 139-150, 2019.
- [7] F.W. Siebert and H. Lin. Detecting motorcycle helmet use with deep learning. *Accident Analysis & Prevention*, 134, 150319, pp. 1-11, 2020.
- [8] B.C. Liu, R. Iyer, R. Norton, S. Boufous, S. Blows and S.K. Lo. Helmets for preventing injury in motorcycle riders. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, vol. 4, pp. 1-42, 2004.
- [9] United Nations. *Strategies to Tackle the Issue of Motorcycle Helmet Use for Road Safety in the Asia-Pacific Region: Implementation Framework*, 2020. Available at: <https://www.unescap.org>
- [10] P. K. Pinnoli, P. Mahajan, N. Bourdet, C. Deck and R. Willinger. Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments & numerical modeling. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp.274-284, 2010.
- [11] Department of Transportation. *Federal Motor Vehicle Safety Standard No.218. 49 CFR 571.218..* U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC,1988.
- [12] Snell Memorial Foundation. *Standard for protective head gear for use with motorcycles and other motorized vehicles*. Snell Memorial Foundation, North Highlands, CA, 2005.
- [13] Economic Commission for Europe. *Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and of their visors for drivers and passengers, motorcycles and mopeds*. Regulation No. 22, Revision 4. United Nations, Geneva, Switzerland, September 24, 2002.
- [14] F.A.O. Fernandes and R.J.Alves de Sousa. Motorcycle helmets-A state of the art review. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 56, pp. 1-21, 2013.
- [15] K.C. Butz, B.M. Knowles, J.A. Newman and C.R. Dennison. Effects of external helmet accessories on biomechanical measures of head injury risk: An ATD study using the HYBRIDIII headform. *Journal of Biomechanics*, Vol. 48, pp. 3816-3824, 2015.
- [16] T.A. Connor, S.Meng and D.Zouzas. Current Standards for Sports and Automotive Helmets: A Review. *The European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement*. No. 642662, Ref. Area.3151745, 1st July 2016.
- [17] Salih, Y., Sabeeh, N., Yasa, M., Ahmed, A., Abdulla, A., Behavior of Ferrocement Slabs Strengthening with Jute Fibers under Impact Load, (2020) *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 11 (2), pp. 66-72. doi: <https://doi.org/10.15866/irece.v11i2.17322>
- [18] Akop, M., Awang, M., Salim, M., Mansor, M., Md Saad, A., Mustafah, M., Simulation on Impact Collision of Multi-Purpose Vehicles, (2017) *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 11 (5), pp. 628-634. doi: <https://doi.org/10.15866/ireme.v11i5.10336>
- [19] P.A. Crompton, D.M. Dressler, C.A. Stuart, C. R. Dennison and D. Richards. Bicycle helmets are highly effective at preventing head injury during head impact: Head-form accelerations and

- injury criteria for helmeted and unhelmeted impacts. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 70, pp. 1-7, 2014.
- [20] A.L. DeMarco, D.D. Chimich, J.C. Gardiner, R.W. Nightingale and G.P. Siegmund. The impact response of motorcycle helmets at different impact severities. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 42, pp. 1778-1784, 2010.
- [21] M. Fahlstedt, P. Hallidin and S. Kleiven. The protective effect of a helmet in three bicycle accidents-A finite element study. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 91, pp. 135-143, 2016.
- [22] B. Zahid and X. Chen. Energy Absorption at Different Impact Locations of Riot Helmet Shells. *International Journal of Textile Science*, Vol. 2(4), pp. 126-131, 2013.
- [23] D. Krzeminski, D. Fernandez, J. Rawlins, T. Goulds and S. Pilsand. Effects of solvent exposure on material properties and impact performance of an American football helmet outer shell material. *Procedia Engineering*, Vol. 72, pp. 508-514, 2014.
- [24] C. Musikavong and S.H. Gheewala. Water scarcity footprint of products from cooperative and large rubber sheet factories in southern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 134, pp. 574-582, 2015.
- [25] F. Li, J. Liu, H. Yang, Y. Lu and L. Zhang. Numerical simulation and experimental verification of heat build-up for rubber compounds. *Polymer*, Vol. 101, pp. 199-207, 2016.
- [26] T.J. Huang and L.T. Chang. Design and evaluation of shock-absorbing rubber tile for playground safety. *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 3819-3823, 2009.
- [27] Ehsaid, M., Zughayer, M., Unified Approach for the Design, Manufacture and Test of an Off-Road Rubber Tracked Ground Vehicle (TGV). (2020) *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 14 (7), pp. 449-464. doi: <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i7.18725>
- [28] M. Gecoglu, E. Gtneyisi, O. Hancu, S. Ipek and D.S. Asaad. Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 101, pp. 1113-1121, 2015.
- [29] J. Shey, S.H. Imami, G.M. Glenn and W.J. Orts. Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Industrial Crops and Products*, Vol. 24, pp. 34-40, 2006.
- [30] S. Sirikulchai, R. Kokoo and M. Khangkhamano. Natural rubber latex foam production using air microbubbles: Microstructure and physical properties. *Materials Letters*, Vol. 260, pp. 126916, 2020.
- [31] L.B. Tan, K.M. Tse, H.P. Lee, V.B.C. Tan and S.P. Lim. Performance of an advanced combat helmet with different interior cushioning systems in ballistic impact: Experiments and finite element simulations. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 50, pp. 99-112, 2012.
- [32] N. Onsalung, C. Thinvongpituk and K. Pianthong. Impact Response of Circular Aluminum Tube Filled with Polyurethane Foam. *Materials Transactions*, Vol. 55, pp. 207-215, 2014.
- [33] J.Z. Wu, C.S. Pan and B.M. Wimer. Evaluation of the shock absorption performance of Construction helmets under repeated top impacts. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 96, pp. 330-339, 2019.
- [34] A.L. DeMarco, D.D. Chimich, J.C. Gardiner and G.P. Siegmund. The impact response of traditional and BMX-style bicycle helmets at different impact severities. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 92, pp. 175-183, 2016.
- [35] D.S. Liu and Y.T. Chen. A Finite Element Investigation into the Impact Performance of an Open-Face Motorcycle Helmet with Ventilation Slots. *Appl. Sci.*, Vol. 2017 n. 7, pp. 279, 2017.
- [36] N. Jones. *Structural Impact*. Cambridge university press. Cambridge CB2 1RP, United Kingdom, 1989.
- [37] P.K. Pinnoji and P. Mahajan. Analysis of impact-induced damage and delamination in the composite shell of a helmet. *Journal Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3716-3723, 2010.
- [38] L.P. Vyminskiene and A. Jurkauskas. The research into head injury criteria dependence on car speed. *Journal Transport*, Vol. XXII, n. 4, 269-274, 2007.
- [39] A.K. Ommaya and A.K. Hirsch. Tolerances for cerebral concussion from head impact and whiplash in primates. *Journal of Biomechanics*, Vol. 4, pp. 13-20, 1971.
- [40] J.Z. Wu, C.S. Pan, M. Romagnia, B.M. Wimer and U. Reischl. Application of air-bubble cushioning to improve the shock absorption performance of type I industrial helmets. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 117, pp. 1-12, 2020.
- [41] G. Gehel, S.K. Bhudolia, S.B.S. Elisetty, K.F. Leong and P. Gerard. Development and impact characterization of acrylic thermoplastic composite bicycle helmet shell with improved safety and performance. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 221, pp. 109008, 2021.
- [42] G.D. Caserta, L. Iannucci and U. Galvannetto. Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner. *Composite Structures*, Vol. 93, n. 11, pp. 2748-2759, 2011.
- [43] S. Li, Z. Xiao, Y. Zhang and Q.M. Li. Impact analysis of a honeycomb-filled motorcycle helmet based on coupled head-helmet modelling. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 199, pp. 106406, 2021.
- [44] K. Hansen, N. Dan, F. Feist, C. Deck, R. Willinger, S.M. Maday and M. Bottlang. Angular Impact Mitigation system for bicycle helmets to reduce headacceleration and risk of traumatic brain injury. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 59, pp. 109-117, 2013.

Authors' information

Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand.



Kunanon Sakkampang was born in Ubon Ratchathani, Thailand. He received B.Eng. (Mechanical Engineering) from Ubon Ratchathani University in 2010 and M.Eng. (Mechanical Engineering) from Khon Kaen University in 2013. He is currently a Ph.D. candidate at Ubon Ratchathani University and a lecturer at Mechanical engineering program, Rajamangala University of Technology Isan Sakon Nakhon Campus. His current research interest includes crashworthiness, structural impact and material technology.

E-mail: kunanon.sa@ruu.ac.th



Chawalit Thinvongpituk (Corresponding Author) was born in Nakhon Ratchasima, Thailand in 1973. He received his B.Eng. (Mechanical Engineering) from Ubon Ratchathani University, Thailand in 1996 and received his Ph.D. (Mechanical Engineering) from the University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, UK, in 2002. He is currently an associated professor at Ubon Ratchathani University. His current research interest includes crashworthiness, structural impact and material technology.

E-mail: chawalit.t@ubu.ac.th

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายคุณานนต์ ศักดิ์กำปัง
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 - 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2553 - 2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2554 – ปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งอาจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จังหวัดสกลนคร
ตำแหน่งงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จังหวัดสกลนคร