

การศึกษาการดูดซับแรงภายใต้การระเบิด

STUDY OF THE FORCE ABSORPTION FROM THE EXPLOSION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-011-121

# การศึกษาการดูดซับแรงภายใต้การระเบิด

STUDY OF THE FORCE ABSORPTION FROM THE EXPLOSION



ชนิษฐา หล่อวีระธรรม  
KANIDTHA LOHWERATHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-011-121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF THE FORCE ABSORPTION FROM THE EXPLOSION



KANIDTHA LOHWERATHAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN DEFENCE ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

KMITL-2019-EN-M-011-121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการดูดซับแรงภายใต้การระเบิด
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชนิษฐา หล่อวีระธรรม
รหัสประจำตัว	57601282
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมป้องกันประเทศ
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. จารุวัตร เจริญสุข

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานเนื่องจากการระเบิดของวัสดุ 2 ชนิดเปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR) และวัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane : PU) โดยทำการทดลองภายใต้ระเบิดจริงชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต (Pentaerythritol Tetranitrate : PETN) ตามปริมาณของระเบิดที่เพิ่มขึ้น ดังนี้ ระเบิดขนาดน้ำหนัก 3 กรัม 5 กรัม และ 10 กรัม เมื่อเกิดการระเบิดจะมีการถ่ายโอนพลังงานจำนวนมหาศาลไปยังสภาพแวดล้อมโดยรอบ รวมถึงคลื่นกระแทกที่ปะทะกับชิ้นของวัสดุที่นำมาทดลอง โดยคลื่นระเบิดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดเป็นค่าสัญญาณความเร่งด้วย Accelerometer Sensor เพื่อศึกษาการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นหลังจากการระเบิดของวัสดุทั้งสองชนิด หลังจากการทดลองพบว่าวัสดุยางธรรมชาติ สามารถดูดซับแรงที่เกิดจากการระเบิดได้ดีกว่าวัสดุพอลิยูรีเทน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสำหรับการพัฒนาวัสดุที่ดูดซับแรงเพื่อลดความเสียหายจากการระเบิดและนำไปสู่การพัฒนาหรือปรับปรุงวัสดุอื่นในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study of The Force Absorption from The Explosion
Student	Ms. Kanidtha Lohweratham
Student ID.	57601282
Degree	Master of Engineering
Program	Defence Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk

## ABSTRACT

This study is to compare the ability of explosive absorbing of two types of materials which are natural rubber and polyurethane. The experiment is conducted by real explosion of Pentaerythritol Tetranitrate (PETN) with increasing amount as follows: 3 grams, 5 grams and 10 grams. The explosion distributes significant energy to the environment including shock waves between layers of the tested materials. The explosion wave will be measured its acceleration level by the accelerometer sensor in order to study the energy absorption of both materials. After the experiment, it is found that the natural rubber can absorb force of the explosion better than the polyurethane. This research is to study the developing absorbing materials to reduce explosion damages and lead to the development or modification of other absorbing materials in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จางวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือ สนับสนุน ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ภักคินี ชิตสกุล ที่เป็นผู้ชี้แนะในแนวทางเบื้องต้นในงานวิจัยฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และสนับสนุนข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ ที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา ชี้แนะแนวทางในการเรียนและการวิจัยในสาขาวิศวกรรมป้องกันประเทศ รวมถึงยังช่วยเป็นธุระในการจัดหาสารตั้งต้นวัสดุระเบิด พร้อมสถานที่ทำการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในอุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านเอกสารและการดำเนินการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบพระคุณ คณะผู้บริหารและหัวหน้างาน บริษัทกันโน อินทีเกรชั่น ที่ให้โอกาสรับผิดชอบและเรียนรู้เกี่ยวกับงานด้านการทหาร

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณทุกๆ คนในครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจที่ดีให้กับข้าพเจ้าตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา-มารดา และซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ชนิษฐา หล่อวีระธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 คำถามการวิจัยและสมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.4 กรอบแนวคิดในการศึกษา.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 นิยามศัพท์.....	2
1.7 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สถิติการเกิดเหตุระเบิดและเหตุอื่นๆ ในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 วัตถุประสงค์.....	7
2.3.1 การแบ่งวัตถุประสงค์ตามความเร็วในการจุด.....	7
2.3.2 การแบ่งวัตถุประสงค์ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน.....	7
2.4 การระเบิด.....	9
2.4.1 ประเภทของระเบิด.....	9
2.4.2 รูปแบบของการจุดระเบิด.....	9
2.4.3 ผลลัพธ์เบื้องต้นของการระเบิด.....	10
2.4.5 การคำนวณแรงระเบิด.....	12
2.4.6 พฤติกรรมของคลื่นระเบิด.....	13
2.4.7 การระเบิดบนพื้น.....	16
2.5 ทฤษฎีงานและพลังงาน.....	17
2.5.1 งาน.....	17
2.5.2 พลังงาน.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 การดูดซับพลังงาน.....	19
2.5.4 กฎการแปรผกผันยกกำลังสอง (Inverse Square Law).....	21
2.5.5 ทฤษฎีการกระจายแรง.....	22
2.6 การวัดค่าสัญญาณความเร่ง.....	24
2.6.1 การวัดค่าสัญญาณความเร่ง ด้วย Accelerometer Sensor.....	24
2.6.2 การกรองสัญญาณ (Filtering).....	25
2.7 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....	30
2.8 พอลิยูรีเทน (Polyurethane).....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 วัสดุและเครื่องมือวัด.....	34
3.1.1 ดินระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต.....	34
3.1.2 แผ่นเหล็กพร้อมโครงเหล็ก.....	35
3.1.3 วัสดุยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....	36
3.1.4 วัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane).....	37
3.1.5 Accelerometer Sensor.....	38
3.2 การทดลอง.....	39
3.2.1 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 3 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน.....	40
3.2.2 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 5 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน.....	42
3.2.3 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 10 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน.....	42
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	44
4.1 ผลการทดลองที่ 3.2.1.....	44
4.2 ผลการทดลองที่ 3.2.2.....	47
4.3 ผลการทดลองที่ 3.2.3.....	49
4.4 ตัวอย่างผลของแรงระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55
ประวัติผู้เขียน.....	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าเปรียบเทียบกำลังของวัตต์ระเบิด.....	12
2.2 ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการระเบิด.....	13



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน สายพานหุ่นยนต์เก็บกัญชัตฤระเบิดและแนวป้องกันกันระเบิด.....	4
2.2 แสดงกราฟสถิติของเหตุการณ์ความไม่สงบที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้.....	5
2.3 แสดงรูปแบบการทดลอง.....	6
2.4 แสดงรูปแบบการทดลอง.....	6
2.5 แสดงระเบิดแสวงเครื่องแบบต่อวงจรเข้ากับถังแก๊ส.....	8
2.6 แสดงระเบิดแสวงเครื่องแบบต่อวงจรเข้ากับวิทยุสื่อสาร.....	8
2.7 ลักษณะพฤติกรรมของคลื่นระเบิด.....	14
2.8 แสดงกราฟแรงดันและเวลา.....	15
2.9 แสดงกราฟค่าแรงดันพลศาสตร์ ความเร็วของอนุภาคอากาศ และความหนาแน่นของอากาศหลังแนวคลื่นกระแทก.....	15
2.10 แสดงการเกิดคลื่นสะท้อนของการระเบิดบนพื้น.....	16
2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดและระยะปรับทอนของการระเบิดบนพื้น.....	16
2.12 แสดงทิศทางของแรง.....	18
2.13 ลักษณะการดูดซับพลังงาน.....	20
2.14 แสดงหลักการพื้นฐานทั่วไปของกฎกำลังสองผกผันที่ระยะต่างๆ.....	22
2.15 การกระจายแรงตามแนวเส้น.....	23
2.16 การกระจายแรงบนพื้นที่.....	23
2.17 การกระจายแรงบนปริมาตร.....	23
2.18 แสดงรูปแบบระบบแกนที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่.....	24
2.19 แสดงไดอะแกรมของระบบแกน.....	25
2.20 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองความถี่ต่ำ.....	26
2.21 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองความถี่ต่ำ.....	27
2.22 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองความถี่ต่ำ.....	27
2.23 แสดงผลตอบสนองกรณีกรอง Butterworth.....	28
2.24 แสดงการกรองสัญญาณแบบ Butterworth Filter.....	29
2.25 แสดงการกรองสัญญาณแบบ Chebyshev Filter.....	29
2.26 แสดงสูตรทางเคมีของยางพารา (Natural Rubber) .....	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 แสดงวัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane).....	32
3.1 แสดงระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต .....	34
3.2 แสดงดินระเบิดที่พันเข้ากับฝักแกระเบิด.....	35
3.3 แสดงแท่งเหล็กที่บรรจุดินระเบิดที่พันเข้ากับฝักแกระเบิด.....	35
3.4 แสดงโครงเหล็กสำหรับวางวัสดุที่ใช้ทดลอง.....	36
3.5 แสดงวัสดุยางธรรมชาติ.....	37
3.6 แสดงวัสดุพอลิยูรีเทน.....	37
3.7 แสดงไดอะแกรมการต่อ Accelerometer Sensor .....	38
3.8 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำการทดลอง.....	39
3.9 แสดงลักษณะการวางวัสดุและประกบด้วยแผ่นเหล็กบนโครงเหล็ก.....	40
3.10 แสดงลักษณะการฝังแท่งเหล็กที่บรรจุระเบิด.....	40
3.11 แสดงลักษณะการวางวัสดุดูดซับแรงและระเบิดสำหรับการทดลอง.....	41
3.12 แสดงการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) .....	41
4.1 แสดงผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่ง ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 3 กรัม.....	45
4.2 แสดงผลจากกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 3 กรัม.....	46
4.3 แสดงผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่ง ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 5 กรัม.....	47
4.4 แสดงผลจากกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 5 กรัม.....	48
4.5 แสดงผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่ง ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 10 กรัม.....	49
4.6 แสดงผลจากกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 10 กรัม.....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับแรงจากการระเบิด บทนำในรายงานวิจัยเล่มนี้กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย คำถามการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับงานนี้และประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาครั้งนี้

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันบางพื้นที่ของประเทศไทย ยังคงมีเหตุการณ์ความรุนแรงหรือการก่อความไม่สงบเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้ที่ยังคงมีทั้งเหตุยิงปะทะและเหตุระเบิดเกิดขึ้นหรือแม้แต่ในเขตเมืองเศรษฐกิจสำคัญบางเมือง ก็ยังมีเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นบ้าง ในเขตพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้ นั้น เป็นพื้นที่ที่อยู่ในความดูแลของเจ้าหน้าที่ทหารเป็นหลัก โดยมีปฏิบัติการทั้งในเชิงรุกและเชิงรับ มีการป้อมปรามเผ่าระวังเหตุต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังคงมีเหตุดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

เหตุการณ์ระเบิดนั้นนับได้ว่าเป็นภัยคุกคามที่อันตรายมากสำหรับทหาร รวมถึงข้าราชการในพื้นที่ดังกล่าว หน่วยงานรัฐเองได้มีการจัดหาอุปกรณ์ในหลายๆ ด้านเพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของทหารและเจ้าหน้าที่ แต่ยังคงไม่เพียงพอและยังต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้หรือเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อ ในงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาทดลองการดูดซับแรงภายใต้ระเบิดจริงของวัสดุยางธรรมชาติ (Natural Rubber) และวัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane) เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการดูดซับแรงและนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์หรือเครื่องป้องกัน เช่น เบาะที่นั่ง หรือพื้นรองเท้า ฯลฯ

ดังนั้น ผู้ทำการวิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในศึกษาการดูดซับแรงจากการระเบิดของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ วัสดุประเภทไหนที่สามารถดูดซับแรงได้ดีกว่า โดยการจัดทำการศึกษาทดลองกำหนดเงื่อนไขให้วัสดุที่เลือกมาศึกษานั้นอยู่ในสภาวะใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดและทำการทดลองระเบิดด้วยดินระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต (Pentaerythritol Tetranitrate : PETN) แล้ววัดค่าสัญญาณความเร่ง เพื่อดูแนวโน้มของความเร่งที่เกิดขึ้นหลังจากการดูดซับแรงเมื่อเกิดระเบิดขึ้น เพื่อบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับแรงของวัสดุ สำหรับเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุและเพื่อเป็นประโยชน์กับผู้ที่ได้ทำการศึกษาและพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับแรงของวัสดุยางธรรมชาติ (Natural Rubber) และวัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane)

## 1.3 คำถามการวิจัยและสมมุติฐานการวิจัย

1.3.1 วัสดุใดที่ช่วยดูดซับแรงหรือพลังงานที่เกิดจากการระเบิดได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างยางธรรมชาติ (Natural Rubber) กับพอลิยูรีเทน (Polyurethane)

1.3.2 ทฤษฎีใดที่สามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณการดูดซับแรง

## 1.4 กรอบแนวคิดในการศึกษา

กรอบแนวคิดในการศึกษาเพื่อศึกษาการดูดซับแรงหรือพลังงานจากการระเบิดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์หรือยุทธโศปกรณ์ทางการทหาร โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

1.4.1 ศึกษาอุปกรณ์หรือยุทธโศปกรณ์ทางการทหารที่เกี่ยวข้องและจำเป็นต้องใช้การดูดซับแรงที่เกิดเนื่องจากระเบิด

1.4.2 ศึกษาชนิดของวัตถุระเบิด รวมทั้งรูปแบบที่ใช้ในการก่อเหตุจริงในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้

1.4.3 ศึกษาความสามารถของวัสดุที่จะนำมาทำการทดลองพร้อมออกแบบการทดลอง

1.4.4 ทดลองการดูดซับแรงของวัสดุที่ศึกษาด้วยระเบิดจริง

1.4.5 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดลอง

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุ

1.3.2 ศึกษาเรื่องการกระจายพลังงานและการดูดซับแรง

1.3.2 เพื่อประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางการทหารต่างๆ เช่น แก้วช่วยดูดซับแรง รองเท้ากันระเบิด แนวป้องกันการระเบิด สายพานหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด ฯลฯ

## 1.6 นิยามศัพท์

**ยุทธโศปกรณ์** หมายถึง อาวุธหรือยุทธภัณฑ์ที่ใช้ในทางทหาร เพื่อดำรงและสนับสนุนภารกิจและกิจการทางทหาร โดยมีจุดมุ่งหมายทางการรบ หรือการปฏิบัติการทางทหาร

**พลังงาน** หมายถึง คุณสมบัติเชิงปริมาณพื้นฐานที่อธิบายระบบทางกายภาพหรือสถานะของวัตถุ พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้หลายรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ความสามารถในการดูดซับแรง** หมายถึง ความสามารถของวัสดุที่สามารถลดทอนแรงหรือพลังงานที่มากระทำก่อนส่งผ่านไปยังวัตถุอื่นๆ

**วัสดุระเบิด** หมายถึง สารเคมี หรือวัสดุอุปกรณ์ที่สามารถก่อให้เกิดการระเบิดได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความร้อน, การกระแทก และการเสียดสีที่เหมาะสม

**การระเบิด** หมายถึง การทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างรวดเร็วที่ทำให้เกิดเสียง, ความร้อน และการขยายตัวของมวลอากาศที่รุนแรง

**ความเร่ง** หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลง (หรืออนุพันธ์เวลา) ของความเร็ว เป็นปริมาณเวกเตอร์

**แอมพลิจูด** หมายถึง ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของค่าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการแกว่งตัวในระบบ

## 1.7 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.7.1 มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการดูดซับแรงของวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุ
- 1.7.2 มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการระเบิดและการดูดซับแรงจากระเบิดจริง
- 1.7.3 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนายุทธโศปกรณ์ด้านการทหาร
- 1.7.4 ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงยุทธโศปกรณ์ประเภทต่างๆ
- 1.7.5 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุที่ช่วยดูดซับแรงจากการระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและความเป็นมาของงานวิจัยนี้ รวมถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีต่างๆ ที่เป็นแนวทางเข้าสู่กระบวนการวิจัยและนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในการศึกษาการดูดซับพลังงานจากการระเบิด เนื่องจากบางพื้นที่ของประเทศที่ยังมีเหตุการณ์ความไม่สงบนั้น ยังคงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์หรือยุทธโศปกรณ์ทางการทหารอีกมาก สำหรับอำนวยความสะดวกแก่การปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ เช่น แก้วช่วยซับแรงระเบิดสำหรับติดตั้งในรถเกราะดัดแปลง รองเท้าป้องกันแรงระเบิดสำหรับเจ้าหน้าที่ชุดลาดตระเวนหรือเจ้าหน้าที่เก็บกู้วัตถุ วัสดุสำหรับสายพานหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด แนวป้องกันการระเบิดสำหรับฐานปฏิบัติการ ฯลฯ ดังรูปที่ 2.1 และในพื้นที่ดังกล่าวนี้ มีเหตุการณ์ต่างๆเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งเหตุที่อันตรายร้ายแรงหลัก คือ เหตุการณ์ระเบิด ดังนั้นอุปกรณ์หรือยุทธโศปกรณ์ที่ใช้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยปกป้องหรือป้องกันอันตรายจากการระเบิดเพื่อเป็นการลดการเสียชีวิตและการบาดเจ็บเมื่อเกิดเหตุ

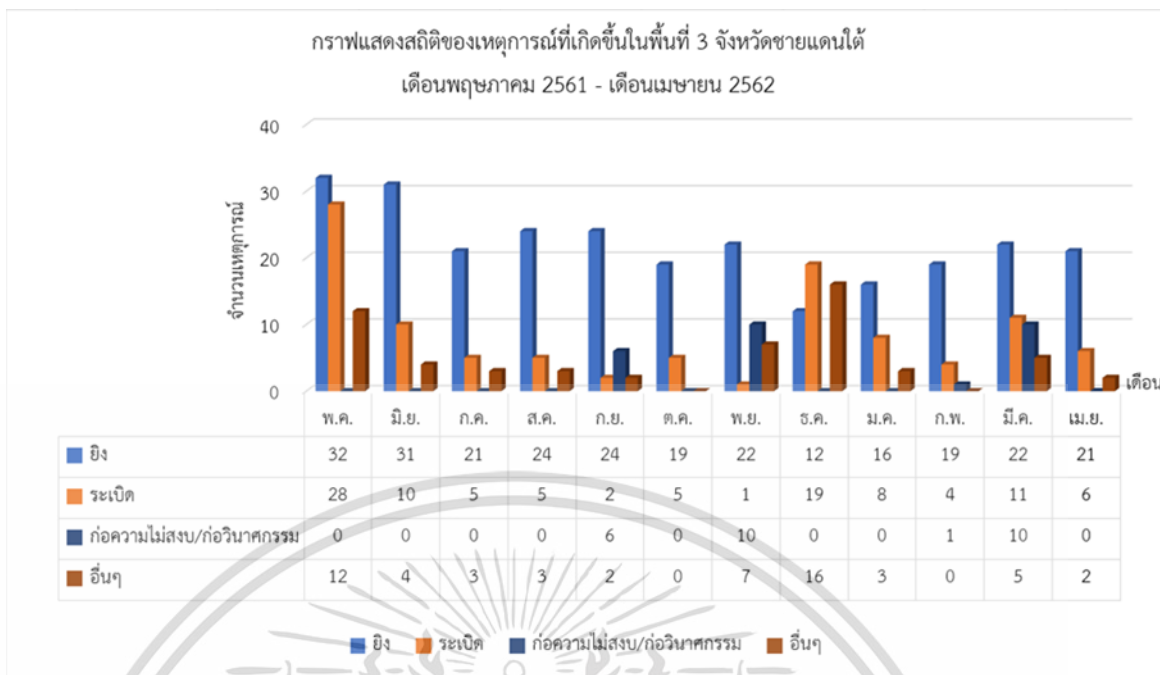


รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน สายพานหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด และแนวป้องกันระเบิด

#### 2.1 สถิติการเกิดเหตุระเบิดและเหตุอื่นๆ ในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้

ในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้ มีปัญหายืดเยื้อมายาวนานด้วยปัจจัยที่หลากหลาย ทั้งเรื่องเศรษฐกิจ ศาสนา ฯลฯ ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลสรุปเหตุการณ์ความไม่สงบที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้ ทั้งเหตุยิง เหตุระเบิด เหตุปะทะ เหตุก่อวินาศกรรม วางเพลิง ฯลฯ โดยการอ้างอิงจากฐานข้อมูลศูนย์เฝ้าระวังสถานการณ์ภาคใต้ (Deep South Watch Database) พบว่า ตลอดระยะเวลาตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2561 - เดือนเมษายน 2562 มีเหตุยิงกัน มากเป็นอันดับหนึ่ง และเหตุระเบิด มากเป็นลำดับที่ 2 ดังรูปที่ 2.2 ทั้งนี้ในการเกิดเหตุดังกล่าว ทำให้ทั้งประชาชนผู้บริสุทธิ์ และเจ้าหน้าที่ของรัฐบาลเจ็บและเสียชีวิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



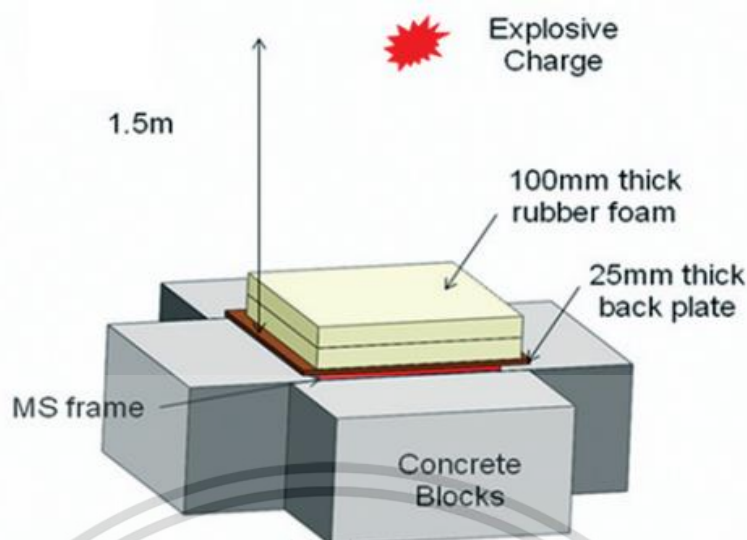
รูปที่ 2.2 แสดงกราฟสถิติของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนใต้

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การศึกษาของ Inderpal Singh Sandhu, Murugan Thangaduri, Prashant S. Alegaonkar และ D.R. Saroha (2019 : 53-57) เรื่อง การลดความแรงของระเบิดด้วยการใช้โฟมยางและโฟมสังเคราะห์ ได้กล่าวถึง การระเบิดที่นอกจะมีแรงดันที่เกิดขึ้นสูงแล้ว ยังมีความแรงสูงที่สามารถทำให้ผู้โดยสารเกิดการบาดเจ็บรุนแรง และทำให้โครงสร้างเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานการณ์ลอบวางระเบิด ในงานวิจัยนี้เป็นการลดผลกระทบของการระเบิดโดยการใช้ชั้นของวัสดุโฟมยางและโฟมสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น มีการศึกษาโดยการทดลองโดยที่ความแรงของคลื่นระเบิดจะแปรผันตามปริมาณของระเบิด การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปะทะของคลื่นระเบิดถูกวัดความแรงด้วยการใช้ Piezoelectric Accelerometer โดยสัญญาณความแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและสัญญาณแอมพลิจูด (Amplitude) ที่ต่ำและกว้างจะแสดงให้เห็นว่าโฟมยางสามารถลดผลกระทบของความแรงได้ดีกว่าโฟมสังเคราะห์

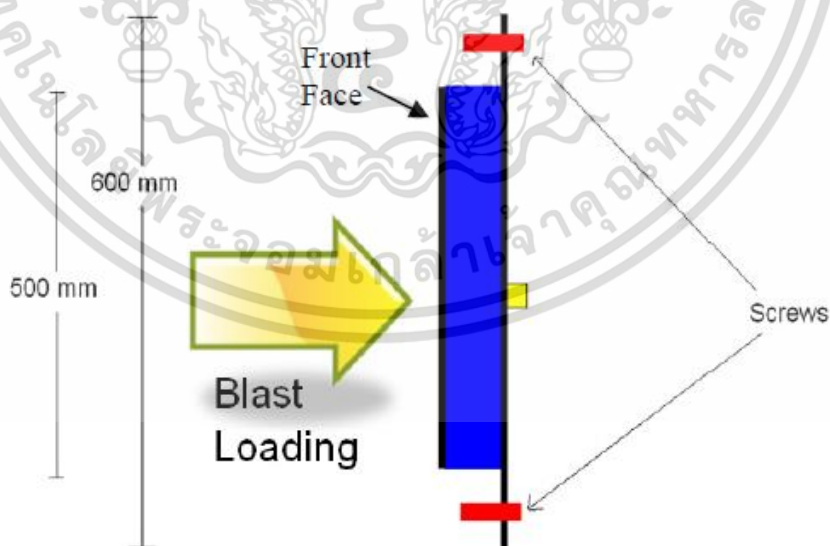
งานวิจัยดังกล่าวทำการทดลองโดยการติดตั้งวัตถุระเบิดไว้ด้านบนของวัสดุที่ทำการทดลองดังรูปที่ 2.3 มีระยะห่างระหว่างวัสดุถึงวัตถุระเบิดคือ 1.5 เมตร (m) วางบนแผ่นเหล็กและประกบด้วยก้อนคอนกรีตทั้ง 4 ด้าน ใช้วัตถุระเบิดชนิดไตรไนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene : TNT) ขนาดน้ำหนัก 0.150 กิโลกรัม ผลที่ได้คือ วัสดุโฟมยางสามารถลดความแรงได้ดีกว่าวัสดุโฟมสังเคราะห์และความหนาของชั้นโฟมจะเป็นส่วนหลักในการช่วยลดทอนแรงจากการระเบิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปแบบการทดลอง

2.2.2 การศึกษางานวิจัยของ H.Bornstein and K.Ackland (2013 : 125-136) เรื่อง การประเมินผลของวัสดุดูดซับพลังงานภายใต้การระเบิด ได้กล่าวถึง ระบบป้องกันระเบิดแบบเดิมที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวโลหะ ซึ่งจะทำหน้าที่ในกันเบี่ยงเบนทิศทางของแรงระเบิดและลดแทนแรงระเบิดได้ แต่ได้มีการพิจารณาวัสดุน้ำหนักเบาที่สามารถดูดซับพลังงานได้ โดยที่วัสดุเหล่านี้อาจจะสามารถลดแรงได้โดยการเปลี่ยนรูปภายใต้การระเบิดและวัสดุเหล่านี้จะได้รับการพิจารณาสำหรับการประยุกต์ใช้ในการป้องกันการระเบิด มีรูปแบบในการทดลองดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 วัตถุระเบิด

วัตถุระเบิด (Explosive) เป็นสารเคมี หรือวัสดุอุปกรณ์ที่สามารถก่อให้เกิดการระเบิดได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะ เช่น ความร้อน การกระแทก และการเสียดสีที่เหมาะสม สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างรวดเร็วที่ทำให้เกิดเสียง ความร้อน และการขยายตัวของมวลอากาศที่รุนแรง โดยปฏิกิริยาทางเคมีนี้ เรียกว่า การระเบิด (Explosion) วัตถุระเบิดสามารถแบ่งได้ดังนี้

### 2.3.1 แบ่งตามความเร็วในการจุดตัว (Velocity Detonation)

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

2.3.1.1 วัตถุระเบิดแรงต่ำ (Low Explosive) คือเมื่อเกิดการจุดตัวจะแปรสภาพเป็นก๊าซอย่างช้าๆ มีความเร็วในการจุดตัวน้อยกว่า 1,000 เมตร/วินาที เช่น ดินดำ ดินส่งกระสุน พลูประทัด ดอกไม้ไฟ และสารไพโรเทคนิคต่างๆ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการระเบิดได้หากเป็นการเผาไหม้อย่างรุนแรงในที่ห่อล้อม หรือที่บังคับ เช่น การระเบิดของประทัดหรือการระเบิดของดินส่งกระสุนในรังเพลิง

2.3.1.2 วัตถุระเบิดแรงสูง (High Explosive) คือเมื่อเกิดการจุดตัวจะแปรสภาพเป็นก๊าซอย่างรวดเร็ว มีความเร็วในการจุดตัวมากกว่า 1,000 เมตร/วินาที ซึ่งการระเบิดของวัตถุระเบิดแรงสูงจะก่อให้เกิดผลการฉีกขาดต่อเป้าหมาย วัตถุระเบิดแรงสูงนี้ใช้บรรจุเป็นดินระเบิดแท่ง บรรจุในทุ่นระเบิด กระสุนปืนใหญ่ และในลูกระเบิดต่างๆ

### 2.3.2 แบ่งตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

2.3.2.1 วัตถุระเบิดทางทหาร เป็นวัตถุระเบิดที่ใช้ในทางทหาร มีความเสถียรมาก มีความปลอดภัยในการเก็บรักษา มีความคงทนต่อการกระแทกเสียดสี เปลวไฟ และความร้อน ต้องใช้ตัวจุดที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะเกิดการระเบิด

2.3.2.2 วัตถุระเบิดทางพลเรือน เป็นวัตถุระเบิดที่ใช้ในทางพลเรือน ตามเหมืองหิน หรืองานก่อสร้างต่าง เช่น งานทำลายโครงสร้างอาคารหรือตึก งานขุดหลุมหรืออุโมงค์ ซึ่งในการใช้งานและเก็บรักษาต้องมีความระมัดระวังอย่างสูงเนื่องจากมีความเสถียรน้อย มีความไวต่อการกระแทกเสียดสี เปลวไฟ และความร้อน

2.3.2.3 วัตถุระเบิดทำเอง (Homemade Explosive or Dirty Bomb) เป็นวัตถุระเบิดที่สามารถทำขึ้นเองได้ง่าย จากสารระเบิด (Blasting Agent) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่มีใช้ทั่วไป มีจำหน่าย

ตามท้องตลาด เช่น ปุ๋ยเคมี ยาปราบศัตรูพืช ยาอ้อมผม ด่านทับทิม ก๊าซหุงต้ม ฯลฯ ดังรูป 2.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ระเบิดแสงเครื่องแบบต่อวงจรเข้ากับถังแก๊ส

นอกจากนี้ วัตถุระเบิดยังสามารถนำไปทำระเบิดแสงเครื่อง (Improvised Explosive Device : IED) ได้ ซึ่งระเบิดแสงเครื่องเป็นรูปแบบหนึ่งของระเบิด เป็นการนำวัสดุที่มีอยู่ทั่วไป ที่จัดหาได้ง่ายๆ นำมาประดิษฐ์เป็นระเบิด ไม่ว่าจะเป็นการนำวัตถุทางทหาร ทางพลเรือน หรือสารประกอบทางเคมี และเครื่องมือเครื่องใช้ เช่น โทรศัพท์ กระจบองบรรจุอาหาร ถังแก๊ส ฯลฯ มาประกอบรวมกันเป็นระเบิดแสงเครื่อง มีรูปแบบหลากหลาย อาจมีความซับซ้อน อันตราย ทำให้เก็บกู้ได้ยาก ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ระเบิดแสงเครื่องนี้สามารถทำให้พกพาซุกซ่อนได้สะดวก ต้นทุนต่ำ มีอำนาจการทำลายล้างสูง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ระเบิดแสงเครื่องแบบต่อวงจรเข้ากับวิทยุสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การระเบิด

การระเบิด (Explosion) เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ก่อให้เกิดคลื่นกระแทกหรือคลื่นระเบิด (Shock wave) ซึ่งเป็นคลื่นแรงดันระเบิดที่เคลื่อนผ่านมวลอากาศด้วยความเร็วเหนือเสียง โดยคลื่นกระแทกจะมีลักษณะของการเพิ่มขึ้นของแรงดัน แล้วตามด้วยการลดลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว

### 2.4.1 ประเภทของการระเบิด

การระเบิด สามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ

2.4.1.1 การระเบิดในลักษณะของ Explosion คือ การเพิ่มความดันอย่างรุนแรงและรวดเร็วในพื้นที่จำกัด สาเหตุที่เกิดมาจากสารที่มีคุณสมบัติในการระเบิดตีกระทบกัน หรือได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอก เช่น ความร้อน หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีอย่างรวดเร็ว ที่ทำให้เกิดความร้อนจากภายในออกมา และอาจให้ก๊าซที่มีปริมาณมาก การระเบิดในลักษณะนี้จะสร้างความเสียหายได้น้อยกว่าการระเบิดในลักษณะของ Detonation

2.4.1.2 การระเบิดในลักษณะของ Detonation คือ การสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในพื้นที่จำกัด ทำให้เกิดความกดดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งการสลายตัวของสารภายใต้ความดันสูง และเมื่อความดันถูกปล่อยผ่านวัตถุต่างๆ ด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วของเสียง จะสามารถทำลายวัตถุเหล่านั้นได้ การระเบิดในลักษณะนี้อาจไม่จำเป็นต้องใช้ก๊าซออกซิเจนช่วยการลุกไหม้

### 2.4.2 รูปแบบการจุดระเบิด

รูปแบบของการจุดระเบิด แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

2.4.2.1 การจุดระเบิดที่เกิดจากปฏิกิริยาจากการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Deflagrated) การระเบิด รูปแบบนี้เกิดจากการเผาไหม้ ส่วนใหญ่เกิดจากวัตถุระเบิดแรงต่ำ (Low-order Explosives) โดยมีออกซิเจนในบรรยากาศเป็นส่วนเสริมหรือเร่งให้พื้นที่ความเสียหายขยายวงมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเกิดจากการสันดาปหรือการทำปฏิกิริยาทางเคมีของสารกับออกซิเจนในอากาศตามปัจจัยดังนี้

- (1) อัตราส่วนระเบิด(Explosive Limit) การระเบิดที่เกิดขึ้นจากปริมาณความหนาแน่นของไอจากสารชนิดใดชนิดหนึ่งที่ปนอยู่ในอากาศ ซึ่งมีเพียงพอที่จะเกิดการเผาไหม้กับออกซิเจน ฉะนั้นเมื่อใดที่อัตราส่วนของไอจากสารมีปริมาณและอยู่ในพื้นที่ที่เหมาะสมแล้ว จะเกิดระเบิดขึ้นทันที เช่น การปล่อยให้ เอธิลแอลกอฮอล์ระเหยออกจากภาชนะที่บรรจุ หรือให้เกิดไอของเอทเธอร์เป็นเอทเธอร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดน้ำส้มปนอยู่ในอากาศคิดเป็นร้อยละ 4 ของพื้นที่ในห้องที่ปิดประตูหน้าต่างมิดชิด จากทั้ง 2 วิธีนี้ จะเกิดระเบิดขึ้นได้จากคุณสมบัติ เฉพาะของสารดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีฝุ่นละอองของสารเคมีบาง ชนิด ได้แก่ กำมะถัน ปุ๋ยยูเรีย แป้งข้าวโพด หากปล่อยให้ฟุ้งกระจายในอากาศ เมื่อได้ปริมาณ ออกซิเจนที่เหมาะสมก็จะเกิดการระเบิดเช่นกัน

(2) อุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติ (Automatic Ignition Temperature) สารบางชนิด มีจุดวาบไฟต่ำ ฉะนั้นในอุณหภูมิที่เหมาะสมก็จะลุกติดไฟได้เอง เช่น ไอของบิวเทนเป็นสารที่มีความพร้อมที่จะติดไฟในอุณหภูมิปกติ ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ติดไฟในทุกสถานะของอุณหภูมิภายในห้องที่ปิด หรือทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงร้อนหรือแตะกับสิ่งที่มีอุณหภูมิสูงจะติดไฟทันที

(3) การรับและสะสมความร้อนไว้อย่างต่อเนื่อง (Susceptibility to Spontaneous Heating) สารบางชนิดมีคุณสมบัติสะสมความร้อนไว้ในตัว ถ้าไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกไปได้แล้ว ก็จะเกิดการสันดาปขึ้นได้ เช่น ผงถ่านคาร์บอน นุ่น ขี้เลื่อย ผงสบู่

2.4.2.2 ปฏิกริยาจากการจุดระเบิด (Detonated) คือ การสันดาปอย่างรวดเร็วมาก ภายในพื้นที่จำกัด ทำให้เกิดความกดดันและอุณหภูมิสูงขึ้น มีอัตราความเร็วของแรงอัดอากาศ (Shock Wave) ตั้งแต่ 1,800 – 9,000 เมตรต่อวินาที (Meter per Second: mps)ขึ้นไป ซึ่งถือเป็นอัตราความเร็วที่สูงกว่าวิธีการเผาไหม้อย่างรวดเร็วถึงสามเท่า การจุดระเบิดนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบ

(1) การจุดระเบิดด้วยแรงอัด (Shock to Detonation) คือ วิธีการทำให้เกิดแรงอัด โดยการใช้เชื้อปะทุเป็นตัวจุดดินระเบิดผ่านชนวนฝึกแค ซึ่งชนวนฝึกแคมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับเชื้อปะทุที่จะนำมาใช้งาน เช่น เชื้อปะทุไฟฟ้าเป็นตัวจุดระเบิดของดินระเบิดหลัก โดยใช้วงจรไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่เป็นตัวให้พลังงาน หรือใช้เครื่องจุดระเบิดทางกลไก ได้แก่ แบบ M1 (ไดนาไมท์ทหาร) เป็นอุปกรณ์จุดระเบิดที่จะทำงาน เมื่อเกิดการกระแทกจากแรงอัดระเบิดที่เกิดจากบริเวณใกล้เคียง หรือ ประเภทถอดสลักนิรภัย เพื่อให้เกิดประกายไฟไปทำการจุดระเบิด ได้แก่ แบบ M1A1 (Bangalore Torpedo) ถอดสลักนิรภัยแล้ว จะเกิดการเสียดสีเป็นประกายไฟทำให้เกิดการจุดระเบิด แบบ M1A2 (Bangalore Torpedo) ที่ถอดสลักนิรภัยแล้ว เข็มแทงชนวนจะพุ่งกระแทกจอกกระแทกแตกออก ทำให้เกิดประกายไฟจุดระเบิดขึ้น

(2) การจุดระเบิดด้วยการเผาไหม้ (Burning to Detonation) เกิดจากการเผาไหม้อย่างรวดเร็วจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นแรงอัดอากาศ เช่น ดินระเบิดแบบไดนาไมท์แท่ง จะเกิดระเบิดเมื่อสายชนวนที่ต่อไว้ไหม้ไฟ

### 2.4.3 ผลลัพธ์เบื้องต้นจากการระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระเบิดจะก่อให้เกิดแรงเป็นคลื่นกระจายออกโดยรอบอย่างรวดเร็วทันที พร้อมกันนี้ จะเกิดความร้อนขึ้นด้วย ความร้อนนี้จะลอยตัวขึ้น ทำให้อากาศโดยรอบ (เนื่องจากอากาศโดยรอบมี อุณหภูมิต่ำกว่า) ไหลกลับเข้าสู่จุดที่เกิดการระเบิด แล้วมันตัวไหลกลับไปซ้อนทับและรวมตัวกับคลื่น ระเบิดที่กระจายในชั้นแรก แรงที่เกิดจากการรวมตัวนี้ จะมีความรุนแรงกว่า (คลื่นระเบิด) เดิม และ ทำลายสิ่งที่อยู่ในบริเวณนั้นทั้งหมด การระเบิดไม่ว่าจะเกิดจากวัตถุระเบิดแรงสูงหรือวัตถุระเบิดแรง ต่ำจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ดังนี้

2.4.3.1 แรงระเบิด คือ คลื่นที่กระจายออกโดยรอบ และตรงจุดที่เกิดระเบิดจะเกิดหลุม หรือยุบเป็นรอยบุบลงไป ส่วนขนาดของหลุมหรือรอยยุบนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของวัตถุระเบิด สำหรับลักษณะของแรงระเบิดก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุระเบิดด้วย ซึ่งแบ่งเป็น

(1) แรงผลักดันหรือยกตัว รัศมีของแรงระเบิดจะกระจายออกโดยรอบทำลาย ส่วนใหญ่เป็นแรงระเบิดจากวัตถุระเบิดแรงต่ำ แต่วัตถุระเบิดแรงสูงก็ให้แรงระเบิดลักษณะนี้ได้เช่นกัน เช่น TNT, ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil)

(2) แรงฉีกกระชากหรือตัดขาด รัศมีของแรงระเบิดจะกระจายเป็นมุม 45 องศา ส่วนใหญ่เป็นแรงระเบิดจากวัตถุระเบิดแรงสูง เช่น RDX, Composition-4, SEMTEX

2.4.3.2 ความร้อน เพลิงไหม้ และก๊าซพิษ แรงระเบิดที่เปลี่ยนเป็นแรงอัดดันขยายตัว อย่างรวดเร็วจะก่อให้เกิดความร้อนและการลุกไหม้ โดยเฉพาะในกรณีที่ตัววัตถุระเบิดเป็นเชื้อเพลิง เช่น ปุ๋ยแอมโมเนีย ซึ่งการลุกไหม้ นี้ หากสามารถทำให้ขยายผลเป็นเพลิงไหม้ลุกลามต่อไป จะยิ่งให้ผล การทำลายต่อเนื่องจากการระเบิดอีกด้วย สำหรับการลุกไหม้ของดินระเบิดจะให้ก๊าซพิษ เนื่องจากตัว ดินระเบิดเป็นสารเคมี การเข้าไปยังจุดเกิดเหตุที่ควันระเบิดยังไม่เจือจางจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ การระเบิดที่ก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของไอหรือฝุ่นละอองที่หนาแน่นก็เป็นอันตรายกับ สิ่งมีชีวิต

2.4.3.3 การแตกกระจายหรือเกิดรอยแตกร้าว จากคลื่นแรงระเบิดที่กระจายไปโดยรอบ อย่างรวดเร็วและมีความรุนแรง จะทำให้วัตถุที่มีความทึบที่อยู่ตรงจุดระเบิดแตกกระจายเป็นชิ้นเล็กๆ และฟุ้งกระเด็นด้วยความเร็วไปในรอบทิศทาง ส่วนวัตถุทึบที่อยู่บริเวณโดยรอบใกล้เคียงนั้น ลักษณะ ของการแตกกระจายจะขึ้นอยู่กับวิธีการวางระเบิดว่าเป็นการวางระเบิดจากภายใน (เจาะช่องหรือรู เพื่อใส่วัตถุระเบิด) หรือภายนอก (วางทาบหรือผูกติด) เป้าหมาย เพราะแรงระเบิดจะลดความรุนแรง ลงตามระดับความหนาทึบของวัตถุ ดังนั้นการแตกอาจไม่เป็นลักษณะชิ้นเล็กๆแต่จะหลุดกระเทาะจาก ส่วนที่ติดอยู่ออกเป็นชิ้นใหญ่ๆ หรือเกิดการปริแตกหรือเป็นรอยร้าวแยกออกจากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.4 สำหรับการก่อวินาศกรรมจะมุ่งผลการระเบิดเพื่อการทำลายเพียงประการเดียว ซึ่งลักษณะของผลการทำลายแบ่งได้ดังนี้

- (1) ให้แรงอัดระเบิด (Blast)
- (2) ให้สะเก็ดระเบิด (Fragmentation)
- (3) ให้ทั้งแรงอัดระเบิดและสะเก็ดระเบิด
- (4) เกิดเพลิงไหม้ (Incendiary)
- (5) ให้แรงอัดระเบิดและเกิดเพลิงไหม้ (Blast Incendiary)
- (6) แรงระเบิดทำให้เชื้อโรคหรือสารเคมีพิษฟุ้งกระจายในอากาศ (Bio-Chemical)

#### 2.4.5 การคำนวณแรงระเบิด

การระเบิดขนาดของแรงดันระเบิดจะขึ้นอยู่กับปริมาณของวัตถุระเบิด ซึ่งจะเป็นปริมาณเทียบกับวัตถุระเบิด TNT และระยะห่างระหว่างวัตถุถึงจุดศูนย์กลางการระเบิด และในการคำนวณแรงระเบิดจะพิจารณาจากน้ำหนักของวัตถุระเบิดชนิด TNT เป็นหลัก ดังนั้นหากเป็นวัตถุระเบิดชนิดอื่นจึงจำเป็นต้องคำนวณหาน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า (Effective Charge Weight) โดยใช้ค่าเปรียบเทียบกำลังตามตาราง 2-1

ตารางที่ 2.1 ค่าเปรียบเทียบกำลังของวัตถุระเบิด

ชนิดวัตถุระเบิด	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	R.E. Factor
TNT	1.60	1.00
PETN	1.71	1.66
RDX	1.78	1.60

และสามารถหาน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่าได้ดังสมการ (2-1)

$$W_e = R.E. Factor \times W_{exp} \quad (2-1)$$

โดยที่  $W_e$  คือ น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า  
 $W_{exp}$  คือ น้ำหนักวัตถุระเบิดที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*R.E. Factor* คือ ค่าเปรียบเทียบกำลัง (Relative Effectiveness Factor) เป็นค่าแสดงกำลังการระเบิดของวัตถุระเบิดเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุระเบิดมาตรฐานหนึ่งหน่วยมวล

หรือสามารถหาน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่าได้จากการใช้อัตราส่วนของความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการระเบิด โดยการใช้ค่าตารางที่ 2-2 ดังสมการ (2-2)

ตารางที่ 2.2 ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการระเบิด

ชนิดวัตถุระเบิด	ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการระเบิด (มิลลิจูล/กิโลกรัม)
TNT	1.60
PETN	1.66
RDX	1.78

$$W_e = W_{exp} \frac{H_{exp}^d}{H_{TNT}^d} \quad (2-2)$$

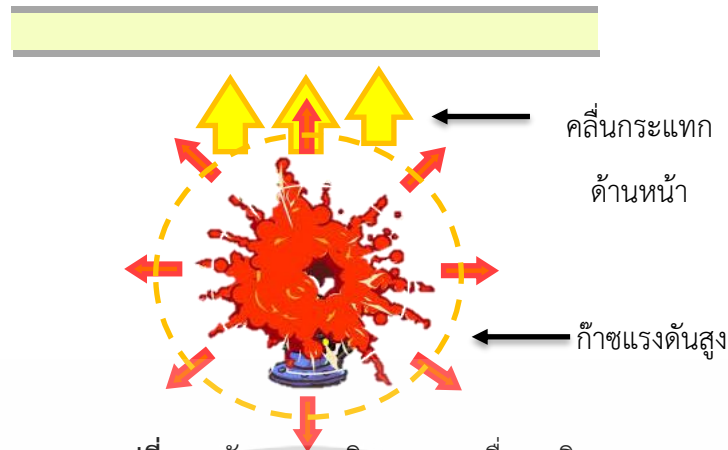
โดยที่  $W_e$  คือ น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า  
 $W_{exp}$  คือ น้ำหนักวัตถุระเบิดที่พิจารณา  
 $H_{exp}^d$  คือ ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการระเบิดของวัตถุระเบิดที่พิจารณา  
 $H_{TNT}^d$  คือ ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการระเบิดของวัตถุระเบิดชนิด TNT

#### 2.4.6 พฤติกรรมของคลื่นระเบิด

จากการศึกษาโดยการอ้างอิงจากคู่มือการคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างเกี่ยวกับพฤติกรรมของคลื่นระเบิด (Shock Wave) จากที่ได้กล่าวไปแล้ว คลื่นระเบิด เกิดจากการระเบิดและมีการปลดปล่อยพลังงานอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุระเบิดที่เป็นของแข็งหรือของเหลวให้กลายเป็นก๊าซแรงดันสูงที่มีอุณหภูมิสูงมาก โดยที่ก๊าซแรงดันสูงนี้จะแพร่กระจายออกทุกทิศทางผ่านอากาศโดยรอบในลักษณะคลื่นกระแทกที่ถูกผลักดันโดยก๊าซร้อน ดังรูปที่ 2.7 โดยแรงดันที่เกิดขึ้นในทันทีที่ด้านหน้าของคลื่นกระแทก เราเรียกว่า คลื่น

กระแทกด้านหน้า (Shock Front Wave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



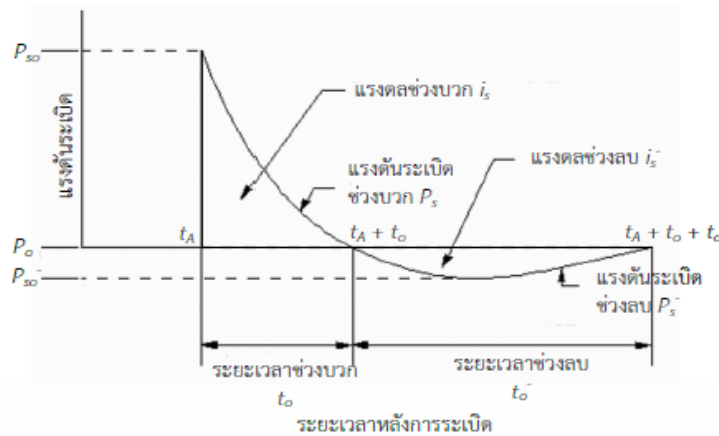
รูปที่ 2.7 ลักษณะพฤติกรรมของคลื่นระเบิด

คลื่นกระแทกด้านหน้า (Shock Front) หรือคลื่นแรงระเบิด จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากระดับแรงดันบรรยากาศ (Ambient Pressure) จนถึงค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุด (Peak Incident Pressure) โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันระเบิด ณ จุดใดๆ จากจุดศูนย์กลางระเบิด ในขณะที่คลื่นระเบิดขยายตัวออก ตัวคลื่นจะมีความรุนแรงและความเร็วลดลงเมื่อระยะเวลามากขึ้นและถ้ามีวัตถุอยู่ในเส้นทางของคลื่น คลื่นกระแทกด้านหน้าจะกระทบกับวัตถุและเกิดแรงดันระเบิด (Blast Pressure) โดยที่ขนาดและการกระจายของแรงดันระเบิดนี้ขึ้นจะขึ้นอยู่กับ

- 1) คุณสมบัติของระเบิด
- 2) ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางระเบิดไปยังโครงสร้าง
- 3) ขนาดและการขยายขนาดของแรงดันระเบิด

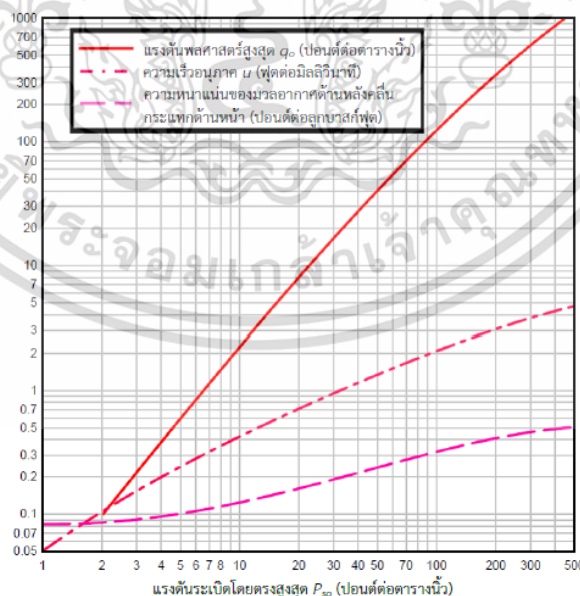
เมื่อเกิดการระเบิด คลื่นกระแทกด้านหน้าเดินทางมาถึงจุดใดๆ ที่เวลา  $t_A$  ซึ่งแรงดันที่จุด  $t_A$  จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าแรงดันระเบิดโดยตรงสูงสุดที่  $P_{so}$  หลังจากนั้นแรงดันระเบิดจะลดลงไปเรื่อยๆ จนเท่ากับแรงดันบรรยากาศ เมื่อผ่านไปเป็นเวลา  $t_0$  ระยะเวลาช่วงนี้จะเรียกว่าช่วงบวก (Positive Phase) จากนั้นแรงดันจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าแรงดันลบสูงสุด  $P_{so}$  ซึ่งจะเป็นจุดที่อนุภาคอากาศเริ่มเกิดการไหลกลับ ทำให้แรงดันปรับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลของแรงดัน ณ จุดนั้นๆ หรือเท่ากับแรงดันบรรยากาศ โดยช่วงที่แรงดันระเบิดมีค่าต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศนี้จะเรียกว่าช่วงลบ (Negative Phase) เป็นระยะเวลา  $t_0$  แรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณช่วงลบนี้นี้จะไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากมีผลกระทบต่อวัตถุน้อยกว่าในช่วงบวกอย่างมาก และในการพิจารณาผลตอบสนองต่อวัตถุที่อยู่ภายใต้แรงระเบิด จำเป็นต้องทราบค่าแรงดล (Impulse) โดยตรงจากการระเบิด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงดันและเวลา ดังรูป 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กราฟแรงดันและเวลา

ในขณะที่คลื่นกระแทกด้านหน้าเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางการระเบิดในทุกทิศทาง คลื่นกระแทกจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $U$  ที่ลดลงเรื่อยๆ แต่ยังคงมีความเร็วมากกว่าความเร็วเสียง ส่วนโมเลกุลของก๊าซที่อยู่ด้านหลังคลื่นกระแทกด้านหน้าจะเคลื่อนที่ตามด้วยความเร็วที่น้อยกว่า จะเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วอนุภาค  $u$  การเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซนี้จะก่อให้เกิดแรงดันที่เรียกว่า แรงดันพลศาสตร์ (Dynamic Pressure) มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $q_0$  โดยที่แรงดันพลศาสตร์  $q_0$  ความเร็วอนุภาค  $u$  และความหนาแน่นของมวลอากาศด้านหลังคลื่นกระแทกด้านหน้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันโดยตรงสูงสุด ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ค่าแรงดันพลศาสตร์ ความเร็วของอนุภาคอากาศและความหนาแน่นของอากาศหลังแนว

คลื่นกระแทก ที่มา : Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of

Accidental Explosions (UFC 3-340-02))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรแรงระเบิดต่างๆ แรงดล และความเร็วคลื่นระเบิด (U) จะขึ้นอยู่กับ ระยะปรับทอน (Z) ตามกฎของ Hopkinson-Cranz ดังสมการ (2-3)

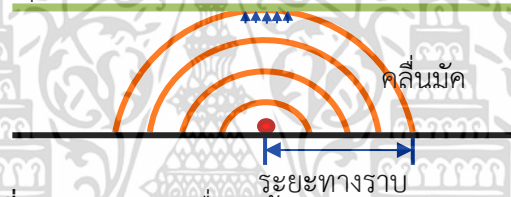
$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \tag{2-3}$$

- โดยที่ Z คือ ระยะปรับทอน
- R คือ ระยะห่างจุดศูนย์กลางกระเบิด (Stand – Off Distance)
- W คือ น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า TNT

2.4.7 การระเบิดบนพื้น

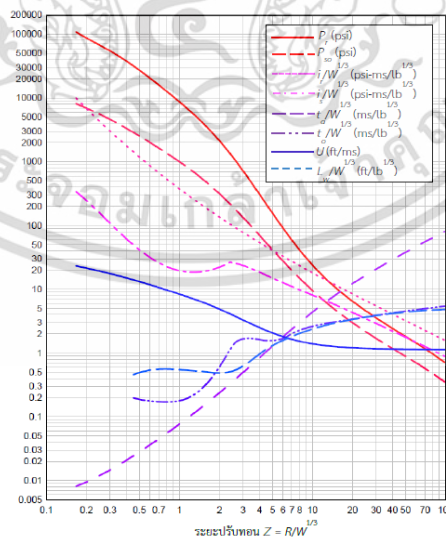
การระเบิดที่เกิดใกล้พื้นหรือบนพื้นจะถือว่าการระเบิดบนพื้นซึ่งคลื่นระเบิดโดยตรง จะสะท้อนจากพื้นและเกิดการเสริมแรงซึ่งก่อให้เกิดคลื่นมัทันที่เมื่อเกิดการระเบิด การระเบิด ประเภทนี้จะมีลักษณะของคลื่นเป็นรูปครึ่งทรงกลมเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางกระเบิด ดังรูป 2.10

สมมุติว่าคลื่นมัทันเป็นระนาบตรงก่อนกระทบกับวัตถุ



รูปที่ 2.10 การเกิดคลื่นสะท้อนของการระเบิดบนพื้น

การหาค่าของตัวแปรแรงระเบิดต่างๆ ของการระเบิดบนพื้นนี้สามารถหาได้จากรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแรงระเบิดและระยะปรับทอนของการระเบิดบนพื้น

(ที่มา : Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental

Explosions.(UFC 3-340-02))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ Brode (1955) สามารถหาค่าแรงดันสูงสุด (Peak Incident Pressure :  $P_{so}$ ) ได้ดังสมการ (2-4) สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุดซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อวัตถุ ดังสมการ (2-5)

$$P_{so} = \frac{0.975}{z} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3} - 0.019 \quad (2-4)$$

โดยที่  $P_{so}$  = แรงดันสูงสุด

$Z$  = ระยะปรับทอน

$$P_r = 2P_{so} \left\{ \frac{7P_o + 4P_{so}}{7P_o + P_{so}} \right\} \quad (2-5)$$

โดยที่  $P_r$  = แรงดันระเบิดสะท้อนสูงสุด

$P_o$  = แรงดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล

## 2.5 ทฤษฎีงานและพลังงาน

ทฤษฎีงานและพลังงาน หมายถึงความสามารถในการเกิดงาน ซึ่งเป็นผลการทำงานของแรงที่ทำให้วัตถุ หรือสิ่งใดๆ เคลื่อนที่หรือทำให้สสารเกิดการเปลี่ยนแปลงได้

### 2.5.1 งาน

งาน จะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัตถุแล้วทำให้วัตถุมีการเคลื่อนที่ได้ระยะกระจัด ดังนั้น ตามกฎของนิวตัน โดยที่แรงกระทำกับวัตถุนี้ เปรียบได้กับแรงดันของระเบิด ดังนั้นเมื่อทราบค่าแรงดันของวัตถุระเบิดแล้วซึ่งก็คือแรงที่กระทำกับวัตถุ จะสามารถหาความเร่งที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (2-6) หากต้องการหางานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้ดังสมการ (2-7) งาน คือผลคูณระหว่างแรงกับระยะทางตามแนวแรง

$$F = m \cdot a \quad (2-6)$$

$$W = F \cdot s = F \cos \theta \quad (2-7)$$

โดยที่  $W$  คือ งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

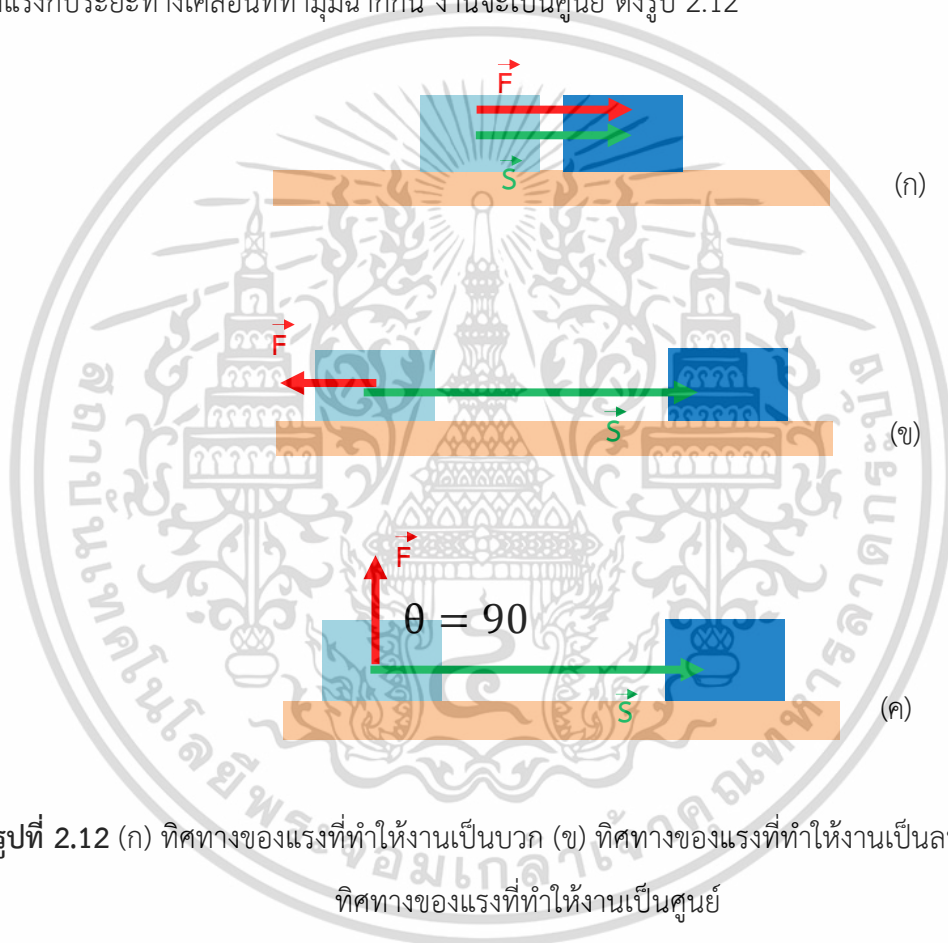
$F$  คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุ

$s$  คือ ระยะกระจัด

$m$  คือ มวลของวัตถุ

$a$  คือ ความเร่ง

งาน เป็นผลคูณเชิงสเกลาร์ ซึ่งจะบอกแต่ขนาด ไม่บอกทิศทาง แต่ก็มีเครื่องหมายบอก  
 ลบ ถ้าแรงอยู่ทิศเดียวกับระยะการเคลื่อนที่ งานจะเป็นบวก ถ้าเป็นทิศตรงกันข้าม งานจะเป็นลบ แต่  
 ถ้าแรงกับระยะทางเคลื่อนที่ทำมุมฉากกัน งานจะเป็นศูนย์ ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 (ก) ทิศทางของแรงที่ทำให้งานเป็นบวก (ข) ทิศทางของแรงที่ทำให้งานเป็นลบ และ (ค)  
 ทิศทางของแรงที่ทำให้งานเป็นศูนย์

### 2.5.2 พลังงาน

พลังงานสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ พลังงานศักย์ (Potential Energy) เป็น  
 พลังงานที่มีสะสมอยู่ในตัว เนื่องจากสถานะของวัตถุและพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) เป็น  
 พลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) คือ พลังงานที่สะสมในวัตถุเนื่องจากความเร็วในตัวของวัตถุ เป็นปริมาณทางสเกลาร์ มีหน่วยเดียวกับงาน ซึ่งเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ เมื่อมีแรงกระทำกับวัตถุ วัตถุจะมีพลังงานของการเคลื่อนที่ เราเรียกว่าพลังงานจลน์ ( $E_k$ ) พลังงานจลน์ของวัตถุขึ้นอยู่กับมวลของวัตถุและอัตราเร็วของวัตถุ ซึ่งพลังงานจลน์จะมีค่าเท่ากับผลคูณของมวลและอัตราเร็วกำลังสองทั้งหมดหารด้วย 2 ดังสมการ (2-8)

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2-8)$$

โดยที่  $E_k$  คือ พลังงานจลน์  
 $v$  คือ ความเร็ว

การระเบิดของวัตถุจะทำให้เกิดพลังงาน ซึ่งการระเบิดนั้น เป็นการเปลี่ยนพลังงานศักย์ภายในวัตถุระเบิดไปเป็นพลังงานจลน์ของชิ้นส่วนที่ระเบิดและพลังงานรูปอื่นๆ เช่น พลังงานเสียง พลังงานความร้อน พลังงานแสง ในการระเบิด ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการกระแทก

### 2.5.3 การดูดซับพลังงาน

การดูดซับพลังงาน หมายถึง ค่าพลังงานที่ชิ้นงานสามารถดูดซับได้ตลอดการชนกระแทกหรือยุบตัว ซึ่งหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงบิดที่ใช้กับมุมบิดของชิ้นงาน หรือโครงสร้าง แต่ในทางปฏิบัติแนะนำให้ใช้การประมาณจากค่าแรงบิดเฉลี่ยในการหาค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุสำหรับรถอุปกรณ์หรือยุทโธปกรณ์ที่มีวัสดุที่ช่วยดูดซับแรงจะช่วยดูดซับแรงที่เกิดจากการกระแทก เพื่อให้สามารถดูดซับพลังงานได้มากที่สุด และให้พลังงานส่งผ่านวัสดุดูดซับแรงให้น้อยที่สุด

การยุบตัวค่าพลังงานดูดซับ (Energy Absorption) เป็นพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ตลอดช่วงเวลาการกระแทกหรือการยุบตัว และพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific Energy Absorption) เป็นพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ เมื่อเทียบกับขนาดน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง การยุบตัวค่าพลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะ เป็นตัวแปรที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนหรือการระเบิด ซึ่งการหาค่าพลังงานดูดซับนั้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของภาระและการยุบตัวของโครงสร้างเมื่อเกิดการชน และสามารถหาค่าพลังงานดูดซับได้ดังสมการที่ (2-9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_a = \int P dS = P_{mean} S \quad (2-9)$$

โดยที่  $E_a$  คือ ค่าการดูดซับพลังงาน

$P_{mean}$  คือ ค่าภาระเฉลี่ย

$S$  คือ ค่าระยะการยุบตัว

$P$  คือ ค่าภาระตลอดการยุบตัว

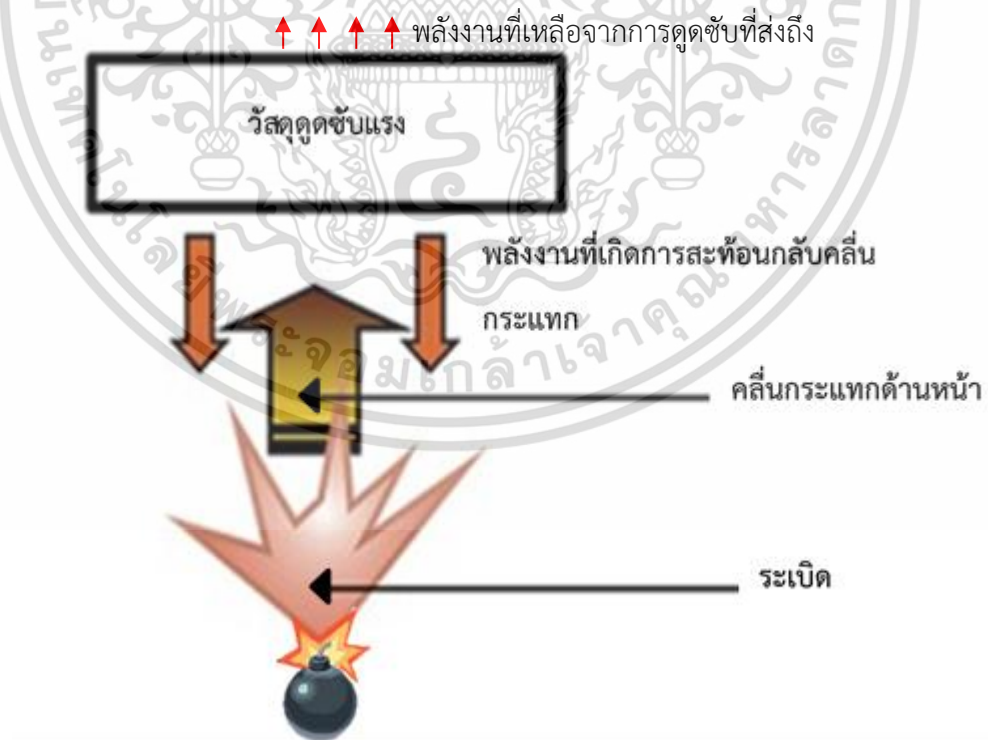
และสามารถหาค่าพลังงานดูดซับจำเพาะได้ดังสมการที่ (2-10)

$$E_s = \frac{\int P dS}{mass} = \frac{P_{mean} S}{mass} \quad (2-10)$$

โดยที่  $E_s$  คือ ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ

$mass$  คือ มวลของโครงสร้าง

รูปแบบของการดูดซับพลังงานเป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะการดูดซับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.5.4 กฎการแปรผกผันยกกำลังสอง (Inverse Square Law)

ความโน้มถ่วงหรือแรงโน้มถ่วง (Gravity) ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ สามารถที่จะอธิบายเรื่องราวของความโน้มถ่วงในสถานที่ที่มีความโน้มถ่วงสูงกว่าชีวิตประจำวันได้ดีกว่ากฎของนิวตัน รวมถึงยังอธิบายปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับเวลาและอวกาศต่างๆ ได้

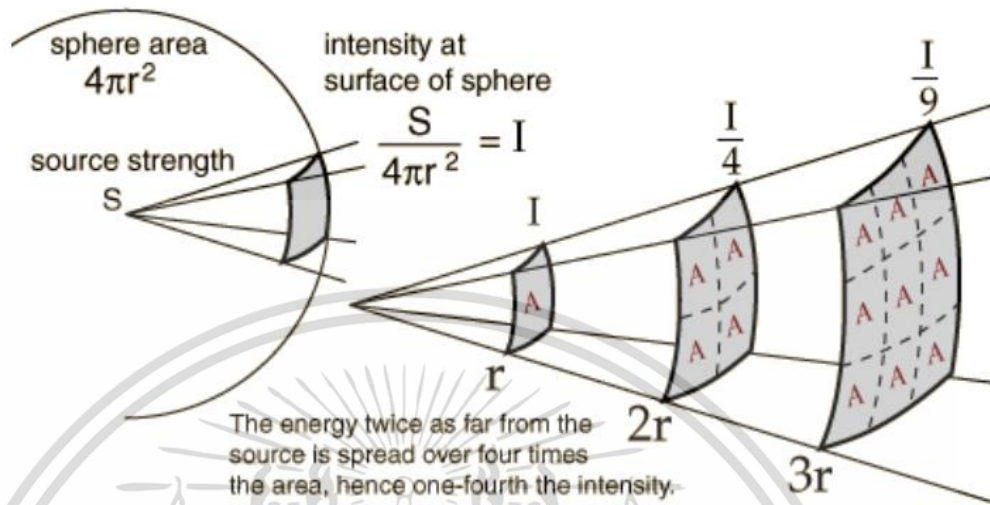
ความโน้มถ่วงหรือแรงโน้มถ่วง (Gravity) ในรูปแบบของแรง (Force) นั้นเป็นการอธิบายในกลศาสตร์คลาสสิก หรือรูปแบบที่เราพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน สามารถใช้กลศาสตร์คลาสสิกในการอธิบายสิ่งต่างๆ รอบตัวได้ดี ตั้งแต่การเดินเล่นในชีวิตประจำวันไปจนกระทั่งการส่งยานอวกาศไปยังดาวพฤหัสบดี ทั้งหมดสามารถอธิบายและคำนวณได้ด้วยกฎแรงโน้มถ่วงของนิวตัน นิวตันอธิบายถึงหลักการทำงานของแรงโน้มถ่วงตามแนวคิดของแรงและพลังงานว่า เปรียบเสมือนแรงที่ปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีมวลสารทุกวัตถุ โดยแรงนี้จะสามารถดึงดูดวัตถุที่มีมวลสารเหมือนกันได้และมันจะดึงดูดซึ่งกันและกันตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 3 ที่กล่าวว่า แรงกิริยา = แรงปฏิกิริยา ซึ่งสำหรับแรงกิริยาของแรงโน้มถ่วงของนิวตันนั้นคือแรงที่วัตถุ A ได้ออกแรงดึงดูดวัตถุ B และแรงปฏิกิริยาก็คือวัตถุ B ก็ออกแรงดึงดูดวัตถุ A เช่นกัน โดยแรงที่ทั้งสองต่างดึงดูดกันในลักษณะเส้นแรงที่ถูกแผ่ออกไปในทุกทิศทางในลักษณะของ 3 มิติ คือ บน ล่าง ซ้าย ขวา หน้า หลัง คล้ายวัตถุก้อนหนึ่งแผ่เส้นแรงออกไป 24 เส้นรอบทิศทางในรูปแบบ 2 มิติ หากวัดปริมาณเส้นแรงต่อพื้นที่  $a$  ในระยะห่าง  $h$  อาจจะมีเส้นแรงที่แผ่ออกมาจากวัตถุนั้นได้ 3 เส้น แต่ถ้าเคลื่อนตัวออกมาเป็นระยะ  $2h$  และใช้พื้นที่ในการวัดเท่าเดิม เราจะได้เส้นแรงน้อยลงอาจจะเหลือ 2 เส้นแรง หรือ 1 เส้นแรงก็ได้ ซึ่งหากต้องการให้ปริมาณเส้นแรงเท่าเดิมในระยะ  $2h$  เราต้องเพิ่มพื้นที่  $a$  เป็น  $a^2$  เพื่อให้ปริมาณเส้นแรงที่เราวัดได้เท่าเดิม ตามกฎกำลังสองผกผัน Inverse-square law

หากพิจารณาต้นกำเนิดแบบจุด (point source) โดยอาศัยหลักการทางเรขาคณิตมาช่วยในการคำนวณ จะพบว่าถ้ามีการแผ่พลังงานออกมาทุกทิศทางรอบด้านอย่างสมดุลแล้ว เราสามารถหาความเข้มที่ระยะทาง  $r$  ได้จากการนำความแรงของต้นกำเนิดนั้น ๆ หารด้วยพื้นที่ (A) ของทรงกลมรัศมี  $r$  หลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ หาความแรงหรือความเข้มของสนามความโน้มถ่วง สนามไฟฟ้า แสง เสียง และรังสี เป็นต้น ดังรูปที่ 2.14

กฎกำลังสองผกผัน (Inverse Square Law) เป็นกฎทางฟิสิกส์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีในลำรังสีหนึ่งหรือพลังงานหรือคลื่นห้วงหนึ่ง ในงานวิจัยนี้จะหมายถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงาน มีระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดถึงตำแหน่งตัววัด (Detector) เปลี่ยนไป ซึ่งหมายถึงความเข้มของพลังงานแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวรับภาพหรือตัววัด



รูปที่ 2.14 หลักการพื้นฐานทั่วไปของกฎกำลังสองผกผันที่ระยะต่างๆ

ตามทฤษฎีการแปรผกผันยกกำลังสองนี้ สามารถนำมาใช้การแรงหรือพลังงานเมื่อเกิดการระเบิดได้ หากเกิดการระเบิดแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ระยะทางใดๆ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของความเข้มหรือพลังงานที่จะกระทำต่อวัตถุจะลดลงเป็น 1/2 เท่าเช่นกัน สามารถเขียนสมการได้ตามสมการที่ (2-10)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(D_2)^2}{(D_1)^2} \quad (2-10)$$

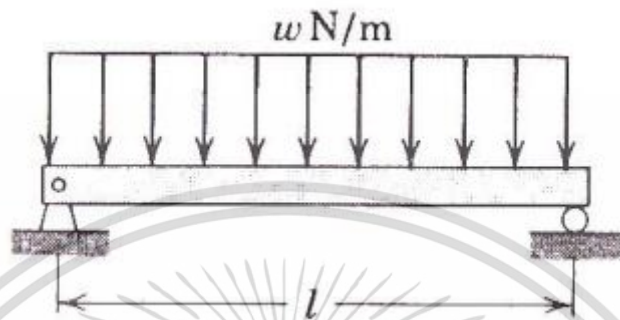
โดยที่	$I_1$	คือ	ความเข้มที่ตำแหน่งตั้งต้น
	$I_2$	คือ	ความเข้มที่ตำแหน่งใหม่
	$D_2$	คือ	ระยะทางที่ตำแหน่งตั้งต้น
	$D_1$	คือ	ระยะทางที่ตำแหน่งใหม่

### 2.5.5 ทฤษฎีการกระจายแรง

การกระจายและการเคลื่อนที่ คือ เมื่อวัตถุสัมผัสกันแรงระหว่างวัตถุจะเป็นแรงกระจายบนพื้นผิวที่สัมผัสกัน (Distributed force) มีการพิจารณาแรงที่กระทำเป็น (Concentrated Force or Point Load) และจะพิจารณาจากความเข้มหรือความน้อยของแรง (Intensity of Force) ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายทั่วบริเวณ ลักษณะการกระจายอาจจะกระจายสม่ำเสมอ (uniformly Distributed) หรือไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniformly Distributed) สามารถแบ่งประเภทของการกระจายแรงดังนี้

2.5.5.1 แรงกระจายตามเส้น (Line Distributed) ลักษณะการกระจายแรงตามแนวเส้น เช่น น้ำหนักของคานที่กระจายตลอดความยาวของคาน ดังรูป 2.15



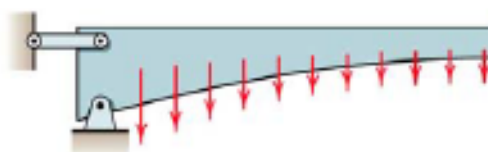
รูปที่ 2.15 การกระจายแรงตามแนวเส้น

2.5.5.2 แรงกระจายบนพื้นที่ (Area Distributed) เป็นแรงที่กระจายทั่วพื้นที่ที่กระทำ เช่น น้ำหนักของรถยนต์บนลานจอดรถ ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 การกระจายแรงบนพื้นที่

2.5.5.2 แรงกระจายบนปริมาตร (Volume Distributed) เป็นแรงที่กระจายทั่วบริเวณของวัตถุซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แรงวัตถุ (Body Force) เช่น แรงดึงดูดของโลกที่มีต่อวัตถุ หรือน้ำหนักของวัตถุที่กระจายทั่วปริมาตร (Specific Weight) ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 การกระจายแรงบนปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การวัดค่าสัญญาณความเร่ง

### 2.6.1 การวัดค่าสัญญาณความเร่ง ด้วย Accelerometer Sensor

อุปกรณ์ Accelerometer จำนวนมากใช้ MEMS (Microelectromechanical Systems) เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญสำหรับการตรวจจับการเร่งความเร็ว Accelerometers STMicroelectronics

Accelerometers คือ เซนเซอร์ที่ใช้สำหรับวัดความเร่ง ซึ่งรวมถึงแรงดึงดูดของโลก หรือ Gravity (G) ด้วย มาจากคำว่า Acceleration + Meter = มิเตอร์วัดความเร่ง ซึ่งก็คือ เซนเซอร์วัดความเร่ง ค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่งจะได้จากความเร่งที่กระทำกับวัตถุนั้นๆ ซึ่งวัดจากแรงที่กระทำกับตัวเซนเซอร์เอง การทำงานจะมีหลักการคล้ายๆกับการนำลูกเหล็กมาผูกกับสปริง

ระบบแกนที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.18 ประกอบด้วย 2 ระบบแกน คือ

2.6.1.1 ระบบแกนโลก ( $X_e, Y_e, Z_e$ )

2.6.1.2 ระบบแกนของวัตถุ ( $X, Y, Z$ )



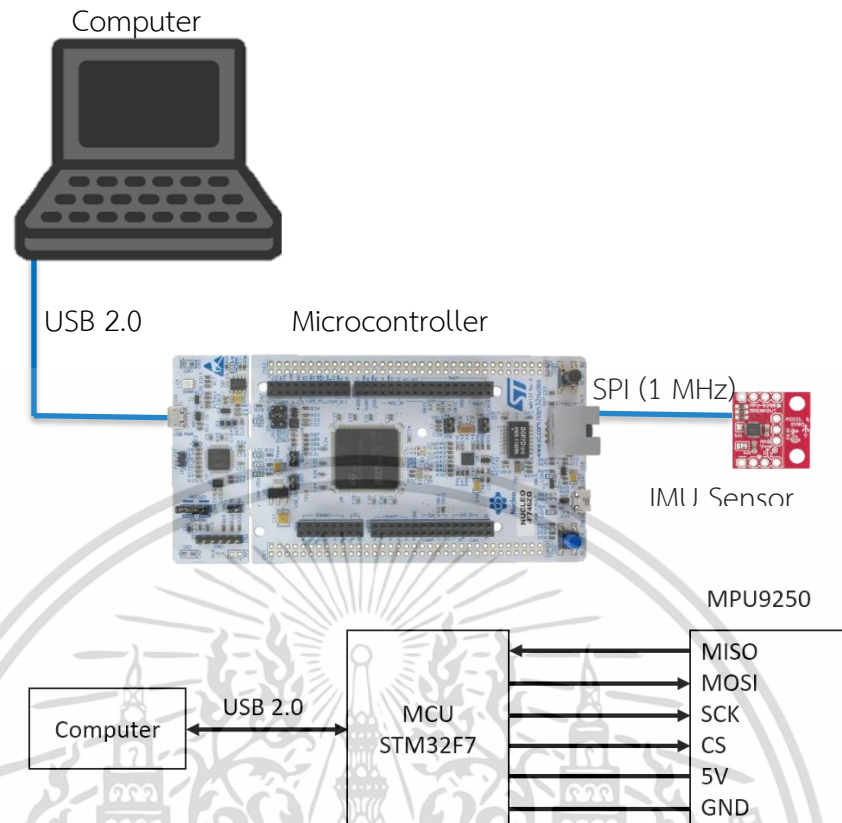
รูปที่ 2.18 รูปแบบระบบแกนที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่

และสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูป 2.19 ซึ่งในการวัดค่าเราจะสามารถนำข้อมูลที่เป็นค่า  $X, Y, Z$  มาวิเคราะห์หาค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ได้ดังสมการที่ (2-10)

$$\text{Amplitude} = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2} \quad (2-10)$$

โดยที่  $a$  คือ ค่าแอมพลิจูดในแนวแกน  $X, Y, Z$  ที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ไดอะแกรมของระบบแกน

## 2.6.2 การกรองสัญญาณ (Filtering)

การกรองสัญญาณเป็นการกรองหรือเลือกสัญญาณให้สามารถผ่านออกไปยังวงจรอื่นด้วยวงจรกรองความถี่ (Filter Circuit) ซึ่งวงจรกรองความถี่นี้จะยอมให้ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าผ่านได้บางช่วงเท่านั้น โดยที่ความถี่อื่นๆ จะถูกลดทอนหรือตัดออกไปเพื่อให้ได้เฉพาะความถี่ที่ต้องการเท่านั้น โดยวงจรกรองความถี่นั้น แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit : LPF) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Circuit: HPF) วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter Circuit: BPF) และวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit: BRF)

### 2.6.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low – Pass Filter Circuit : LPF)

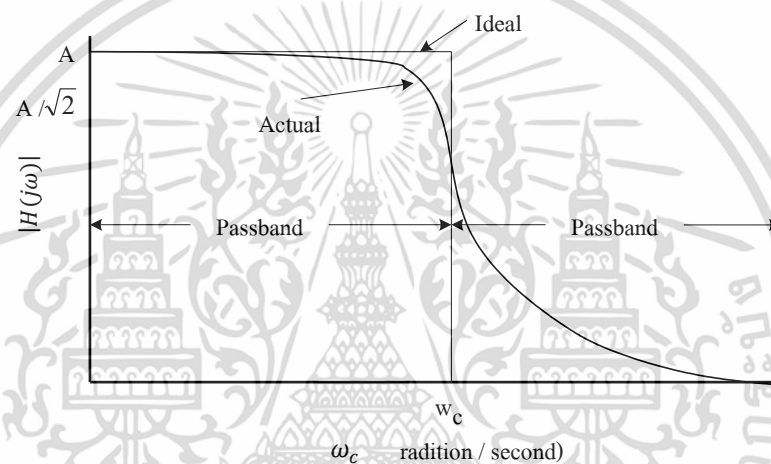
Low – Pass Filter Circuit เป็นวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งซึ่งจะส่งผ่านสัญญาณความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ที่กำหนดไว้ผ่านไปได้ทั้งหมด ในขณะที่จะกำจัดหรือลดทอนความถี่ที่สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ คุณสมบัติเช่นนี้ของวงจร Low – Pass Filter Circuit แสดงให้เห็นดังกราฟการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณ (Amplitude Response) ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นการพล็อต (Plot) ระหว่างขนาด  $|H(j\omega)|$  ของสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) กับความถี่  $\omega$  (เรเดียน/วินาที) หรือความถี่  $f$  (Hz) ทุกความถี่จะได้ตามสมการ (2-11)

$$H(S) = \frac{V_2(S)}{V_1(S)} \quad (2-11)$$

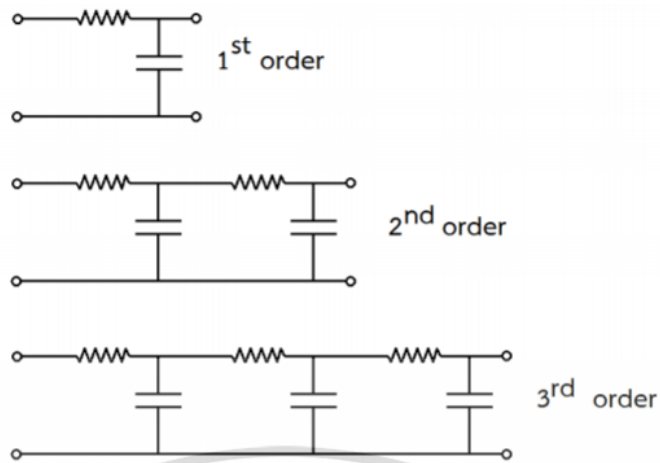
โดยที่  $V_1$  คือ แรงดัน Input  
 $V_2$  คือ แรงดัน Output



รูปที่ 2.20 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองความถี่ต่ำ

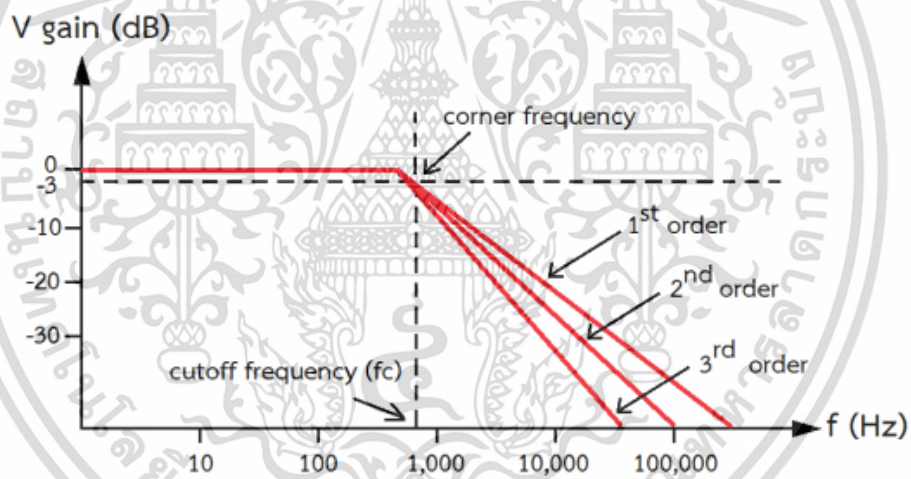
เส้นที่แสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางอุดมคติ และเส้นที่แสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในการใช้งานจริง สามารถแสดงคุณลักษณะเฉพาะได้ใกล้เคียงผลตอบสนองทางอุดมคติมากที่สุด ค่า  $\omega_c$  (แปลงเป็น  $f_c$  ในหน่วย Hz ได้โดยใช้เป็นความถี่คัทออฟ (Cutoff Frequency) กำหนดที่จุด  $|H(j\omega)|$  มีค่า  $1/\sqrt{2}$  หรือ 0.707 เท่าของค่าแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งแสดงด้วยค่า A ความถี่ในช่วงย่านที่สามารถผ่านได้อยู่ในช่วง  $0 \leq \omega \leq \omega_c$  และความถี่ที่เกินจาก  $\omega_c$  ( $\omega > \omega_c$ ) จะไม่สามารถผ่านไปได้ และสามารถเขียนเป็นวงจรถัดไปดังรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงผลตอบสนองของกรณีกรองความถี่ต่ำ

จากรูปที่ 2.21 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงผลตอบสนองของกรณีกรองความถี่ต่ำ

การคำนวณหาค่าความถี่ตัดหรือจุด Cutoff (Cutoff Frequency) ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low – Pass Filter) และสามารถหาได้ดังสมการ (2-12)

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2-12)$$

โดยที่  $\omega_c$  คือ ความถี่ตัดเชิงมุม

$f_c$  คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

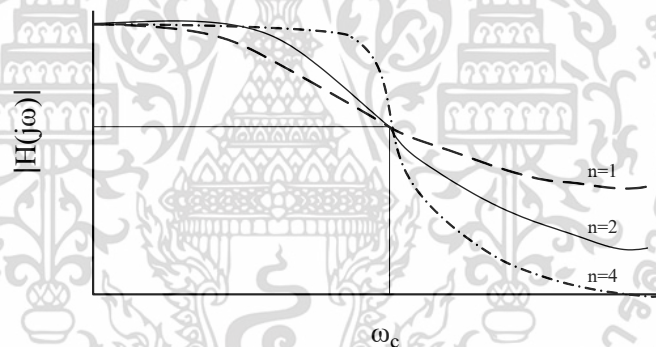
C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ

วงจรรองความถี่ต่ำแบบ Butterworth (Low – Pass Butterworth Filter) เป็นวงจรรองความถี่ที่มีคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic) ใกล้เคียงกับวงจรรองความถี่ต่ำทางอุดมคติโดยยอมให้ช่วงความถี่ที่ผ่านได้มีค่าแอมพลิจูดเท่าเทียมตลอดย่านที่ยอมให้ผ่านได้ โดยการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณ (Amplitude Response) สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2-13)

$$|H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_c)^{2n}}} \quad (2-13)$$

โดยที่  $n$  คือ ค่าอันดับ (Order) ของวงจรรองความถี่

วงจรรองความถี่สามารถที่จะปรับปรุงคุณลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณให้ดีขึ้น โดยใช้การเพิ่มค่า  $n$  หรืออันดับของวงจรรองความถี่ ดังรูปที่ 2.23



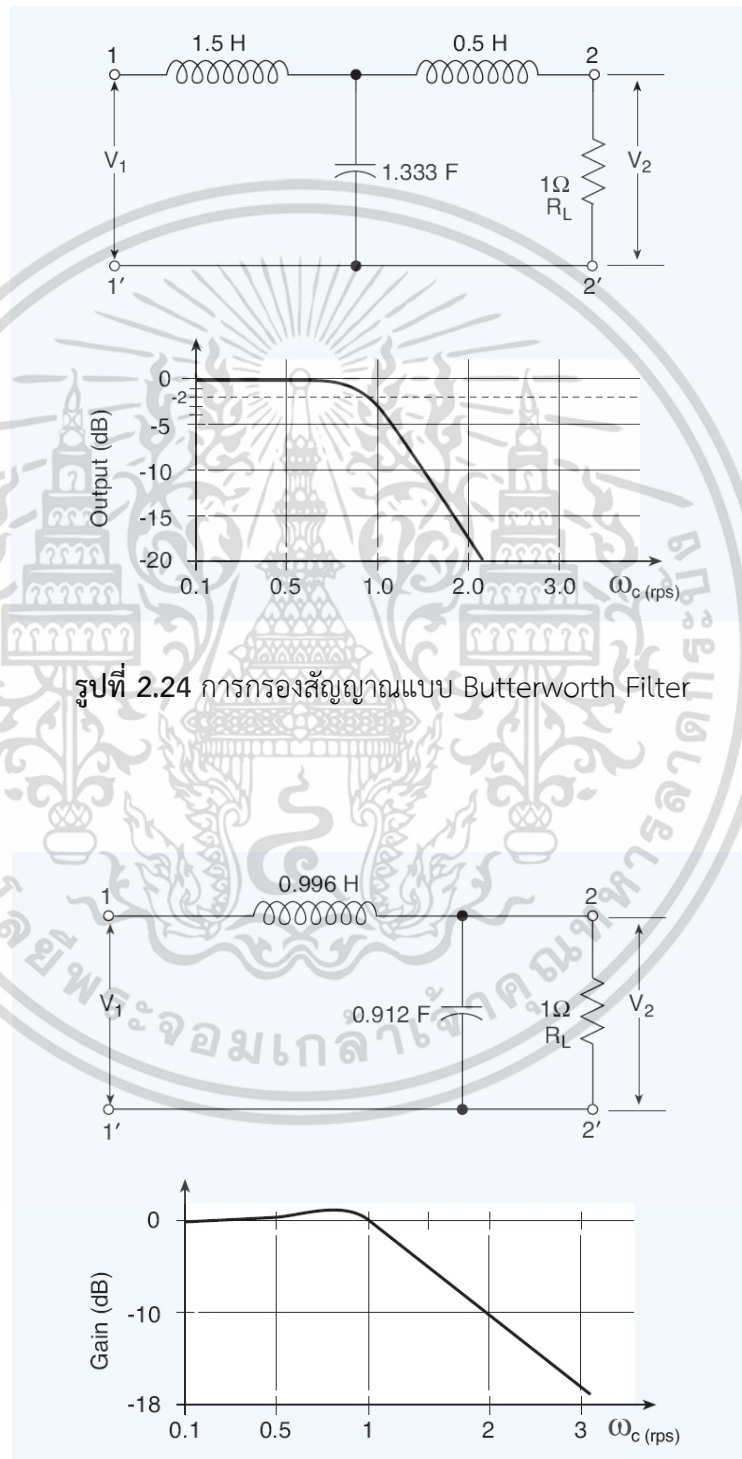
รูปที่ 2.23 แสดงผลตอบสนองกรณี Butterworth

วงจรรองความถี่แบบ Butterworth มีข้อดีที่ คือสามารถให้ผลตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณได้เท่าเทียมกันตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ

2.6.2.2 วงจรรองความถี่ต่ำอันดับสองแบบ Butterworth (Second – Order Low – Pass Butterworth Filter)

ตัวกรองสัญญาณแบบ Butterworth มีการตอบสนองความถี่ที่ค่อนข้างแคบในวงจรรองความถี่ที่ต้องการผ่านได้ แต่ให้ผลตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณได้เท่าเทียมกันตลอดย่านความถี่ที่ต้องการ มีอัตราการลดทอนสูงชัน ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณจะถูกลดทอนลงด้วยอัตราเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ  $-20\text{ dB/decade}$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่แบบ Chebyshev ซึ่งทำงานได้ค่อนข้างดี สำหรับสเตปฟังก์ชัน แต่ขั้นตอนการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้น วงจรกรองความถี่แบบ Chebyshev มีการลดทอนสูงชันกว่า Butterworth จุดคutoff ของวงจร Butterworth นี้จะอยู่ต่ำกว่าจุดคutoff ของวงจรกรองความถี่แบบ Chebyshev ดังรูปที่ 2.24 และ 2.25



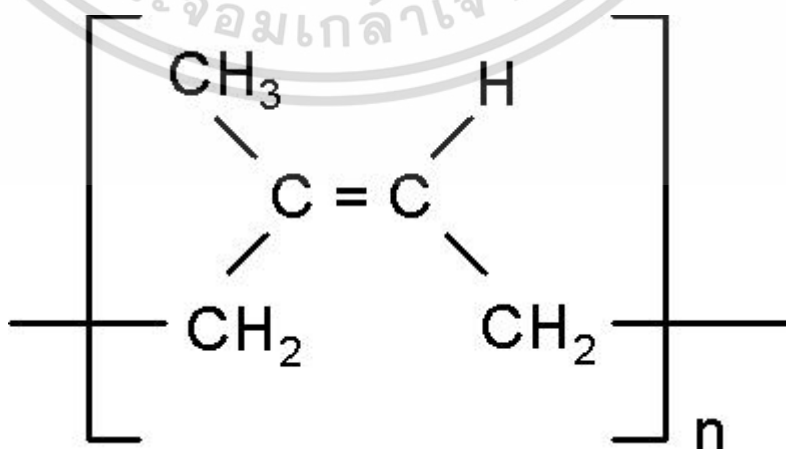
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 ตัววิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzers)

ตัววิเคราะห์สัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกสัญญาณ และจัดการสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ ตัววิเคราะห์สัญญาณอาจจะมีส่วนขยายสัญญาณ (Signal Amplifiers) อยู่ด้วย และตัววิเคราะห์สัญญาณจะมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย ทั้งการบันทึกสัญญาณในโดเมนเวลา การกรองสัญญาณ (Filtering) การแปลงสัญญาณเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) และการหาค่าฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response Function)

## 2.7 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ CIS-1,4-Polyisoprene กล่าวคือ มี Isoprene (C 5 H 8 ) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000 -20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance) สูง มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cc มีสูตรทางเคมีดังรูป 2.26



รูปที่ 2.26 สูตรทางเคมีของยางพารา (Natural Rubber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเด่นของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับวัสดุยางธรรมชาติหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (Assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน ในการใช้ประโยชน์จากยางจะมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้ เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติการเหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ Anti-degradants) เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมันและสารเคมีต่ำ

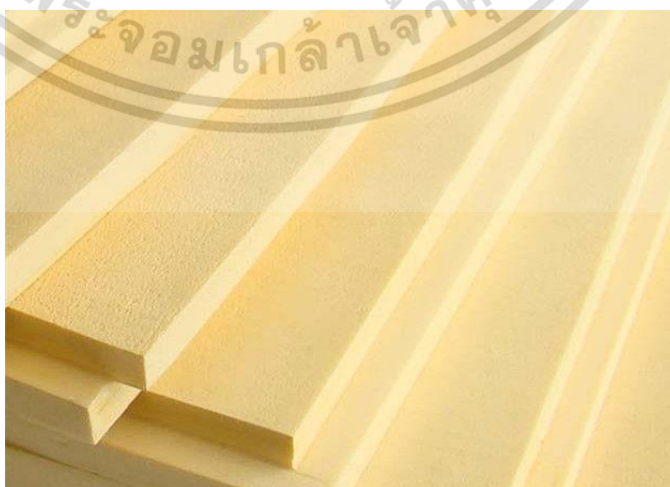
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 พอลิยูรีเทน (Polyurethane)

พอลิยูรีเทน (Polyurethane) หรือ PU คือ สารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยชีวเคมีระหว่างการเชื่อมต่อของยูรีเทนและพอลิเมอร์ของพอลิยูรีเทน โดยมีการประกอบกันขึ้นมาจากมอนอเมอร์เป็นอย่างน้อย 2 ชนิด สำหรับวัสดุที่พอลิยูรีเทนเป็นส่วนประกอบนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะโดดเด่นของคุณสมบัติ อันได้แก่ ความเหนียว ความแข็งและมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.008-4.50 g/cc โฟมอ่อนความหนาแน่นต่ำ มักจะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเตียง โฟมแข็งความหนาแน่นต่ำ มักจะนำมาใช้ทำเป็นฉนวนสำหรับรถยนต์ อีลาสโตเมอร์อ่อน มักจะนำมาใช้ในพวกแผ่นยางเป็นหลัก พลาสติกแข็ง มักจะนำมาใช้ในการทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

นอกจากนี้ พอลิยูรีเทนก็ยังสามารถนำมาใช้ในการเคลือบสีเฟอร์นิเจอร์ไม้ได้อีกด้วย เพราะสามารถทนต่อสารเคมีและการขีดขูดได้ดี จึงช่วยปกป้องไม้ให้เฟอร์นิเจอร์ไม้เป็นรอยได้อย่างง่ายดาย อีกทั้งยังคงความสวยงามในตลอดการใช้งาน เรียกว่าเป็นตัวช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้เฟอร์นิเจอร์ไม้ได้เป็นอย่างดี

พอลิยูรีเทน สามารถติดไฟได้อย่างรวดเร็วและค่อนข้างง่าย จึงเปรียบดั่งเชื้อไฟชนิดดีที่ควรนำมาใช้อย่างระมัดระวัง นอกจากนี้ พอลิยูรีเทนยังมีควันหนาแน่นและอาจปล่อยแก๊สพิษออกมาเมื่อติดไฟอีกด้วย ดังนั้นจึงควรระวังอย่าให้พอลิยูรีเทนอยู่ใกล้กับวัตถุไวไฟ หรืออยู่ใกล้กับจุดที่อาจติดไฟได้ง่าย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการติดไฟจนส่งผลเสีย วัสดุชนิดสามารถกันเสียและกันการรั่วซึมได้อย่างดี ต้นทุนต่ำ มีความคงทนต่อแรงอัดและแรงดึง ไม่อมน้ำ ไม่ซึมน้ำและมีความคงตัวสูงเปลี่ยนแปลงรูปยาก ดังรูป 2.27



รูปที่ 2.27 วัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการดูดซับพลังงานของวัสดุ มีการออกแบบการทดลองโดยอ้างอิงจากงานวิจัยด้านนี้ที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา Inderpal Singh Sandhu, Murugan Thangaduri, Prashant S. Alegaonkar และ D.R. Saroha (2019 : 53-57) ทำการวิจัยเรื่องการลดความแรงของระเบิดด้วยการใช้โฟมยางและโฟมสังเคราะห์ ซึ่งรูปแบบการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นการผูกมัดทุระเบิดที่นำมาทดสอบขนาดน้ำหนัก 150 กรัม และ 550 กรัม วัสดุบนของวัสดุที่ทำกรทดลองมีระยะห่างระหว่างวัสดุที่ทำกรทดลองและระเบิดเท่ากับ 1.5 เมตร ซึ่งผู้วิจัยได้นำรูปแบบการทดลองจากงานวิจัยดังกล่าวมาใช้อ้างอิงและปรับเปลี่ยนรูปแบบที่แตกต่างและสอดคล้องกันสถานการณ์การลอบวางระเบิดจริงมาพิจารณาเพื่อออกแบบการทดลอง โดยการนำวัสดุที่เลือกมา 2 ชนิด คือ วัสดุยางธรรมชาติและวัสดุพอลิยูรีเทน ประกบด้วยแผ่นเหล็ก 2 แผ่นแบบแซนวิชวางบนโครงเหล็กที่มีความสูงจากพื้นเท่ากับ 23.5 เซนติเมตร และนำระเบิดขนาดน้ำหนักแตกต่างกันที่จะใช้ทำการทดลองวางไว้ใต้โครงเหล็ก พร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าสัญญาณความเร่งบนแผ่นเหล็กที่ประกบกับวัสดุที่ทดลอง มีการยึดแผ่นเหล็กไว้กับโครงเหล็กไม่ให้มีการขยับและมีน้ำหนักกดทับด้านบน

ปัจจัยในการเลือกชนิดของระเบิดเนื่องจากในพื้นที่จริงที่ผู้วิจัยได้ศึกษานั้นมีเหตุการณ์ระเบิดที่เกิดขึ้นโดยใช้ระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรตเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกระเบิดชนิดนี้มาเพื่อทำการวิจัยและปัจจัยในการเลือกน้ำหนักของวัตถุระเบิดเนื่องจากน้ำหนักระเบิดที่ใช้ก่อเหตุมากที่สุดและรองลงมาทั้งหมดจำนวน 3 ลำดับคือ 15 กิโลกรัม 25 กิโลกรัม และ 50 กิโลกรัม แต่ปริมาณดังกล่าวเป็นปริมาณของระเบิดที่มีอำนาจการทำลายล้างสูงและเป็นอันตรายอย่างมากสำหรับการทดลอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำมาคิดเป็นอัตราส่วน 5 กิโลกรัม ต่อ 1 กรัม จึงได้น้ำหนักของวัตถุระเบิดสำหรับการทดลองคือ 3 กรัม 5 กรัม และ 10 กรัม ตามลำดับ

การทดลองดังกล่าวเพื่อดูแนวโน้มของการดูดซับพลังงานที่ดีกว่าของวัสดุดังกล่าว โดยขอบเขตของขั้นตอนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ โดยส่วนแรก คือการศึกษาข้อบกพร่องของอุปกรณ์หรืออุปกรณ์ที่ต้องการการดูดซับแรงและศึกษาเรื่องของวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดูดซับแรงได้ดี เป็นวัสดุหาง่าย ราคาไม่สูง จากนั้นในส่วนที่ 2 จะเป็นการทดลองและทำการวัดค่าจากการทดลองเป็นค่าสัญญาณความเร่งซึ่งจะวัดด้วย Accelerometer และทำการบันทึกผลของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้น ในส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนการนำผลของสัญญาณแรงที่วัดได้ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสัญญาณผ่านโดเมนเวลา (Time – Domain Signal Analysis) มาเปลี่ยนแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดลอง ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการทดลองโดยละเอียดในแต่ละขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงในตอนต่อไป

### 3.1 วัสดุและเครื่องมือวัด

3.1.1 ดินระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต (Pentaerythritol Tetranitrate : PETN) พร้อมแท่งเหล็กบรรจุระเบิด

ระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต มีสูตรทางเคมี คือ  $C_5H_8N_{12}O_{24}$  มีลักษณะเป็นผงสีขาวจนถึงสีเทาอ่อนไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์, อีเทอร์, อะซีโตน และเบนซินจัดอยู่ในประเภทวัตถุระเบิดแรงสูง และยังใช้ผสมกับวัตถุระเบิดแรงสูงชนิดอื่น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต (Pentaerythritol Tetranitrate : PETN)

ดินระเบิดชนิดเพนตะอิริทริทอลเตตระไนเตรต จะถูกนำชิ้นนำหนักดินระเบิดตามที่กำหนดไว้แล้วพันเข้ากับฝักแคระเปิดสำหรับใช้ในการจุดชนวน ดังรูป 3.2 หลังจากนั้นจะนำดินระเบิดที่พันเข้ากับฝักแคระเปิดแล้วใส่ในแท่งเหล็ก เพื่อเป็นการบังคับทิศทางของระเบิดและอัดด้วยทรายอีกชั้น ดังรูป 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ดินระเบิดที่พื้นเข้ากับฝักแครงระเบิด



รูปที่ 3.3 แท่งเหล็กที่บรรจุดินระเบิดที่พื้นเข้ากับฝักแครงระเบิด

### 3.1.2 แผ่นเหล็กพร้อมโครงเหล็ก

แผ่นเหล็กและโครงเหล็กสำหรับวางแผ่นวัสดุที่ทำการทดลอง มีความสูงจากพื้น

23.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โครงเหล็กสำหรับวางวัสดุที่ใช้ทดลอง

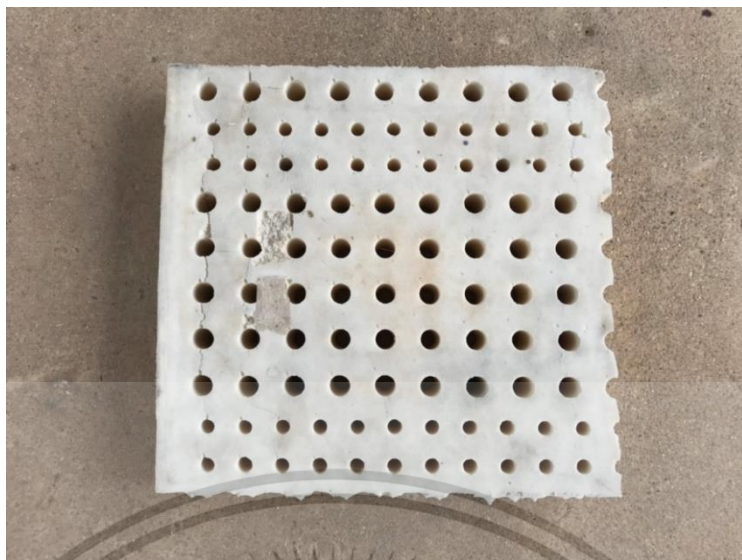
### 3.1.3 วัสดุยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางคือวัสดุพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน มีต้นกำเนิดจากธรรมชาติจะมาจากของเหลวของพืชบางชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว คล้ายน้ำมัน มีสมบัติเป็นคอลลอยด์ อนุภาคเล็ก มีตัวกลางเป็นน้ำยาง เมื่อผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) โดยการใส่กรดฟอร์มิคเจือจางลงในน้ำยาง จะทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน เกิดการแยกชั้นระหว่างเนื้อยางและน้ำ ส่วนน้ำที่ปนอยู่ในยางจะถูกกำจัดออกไปโดยการรีดด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้ง และทำใหยางแห้งสนิทด้วยการรมควันยาง

ยางจะมีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก ความทนทานต่อการฉีกขาดสูง และความต้านทานต่อการขีดถูสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก นอกจากนี้ยังทนต่อกรดและด่างอ่อน แต่จะไม่ทนต่อกรดและด่างเข้มข้น

วัสดุยางธรรมชาติที่นำมาใช้ทำการทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม มีความหนา 2.5 เซนติเมตร และมีขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร น้ำหนัก 1.42 กิโลกรัม ดังรูป 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

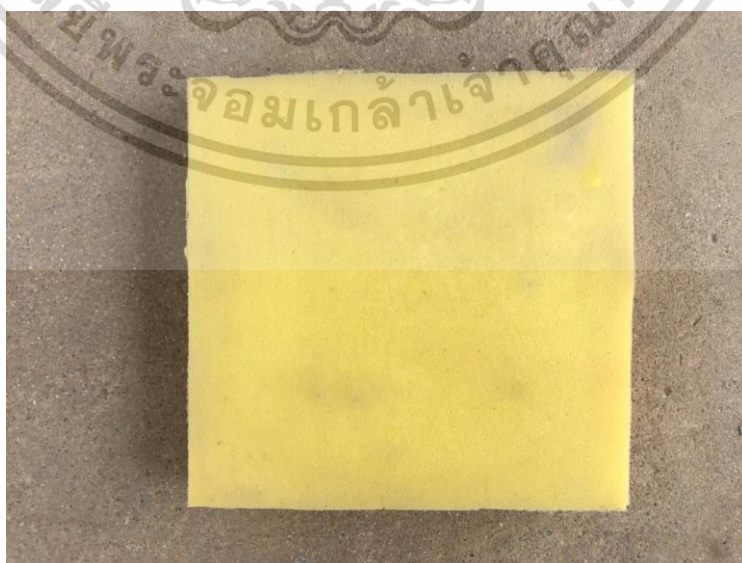


รูปที่ 3.5 วัสดุ양ธรรมชาติ

#### 3.1.4 วัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane : PU)

พอลิยูรีเทน เป็นสารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยชีวเคมีระหว่าง การเชื่อมต่อของยูรีเทนและพอลิเมอร์ของพอลิยูรีเทนโดยมีการประกอบกันขึ้นมาจากมอนอเมอร์เป็น อย่างน้อย 2 ชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นฉนวนความร้อนได้ดี มีความคงทนต่อแรงอัดและแรง ดึง มีความคงตัวสูงเปลี่ยนรูปจากเดิมได้ยาก สามารถทนความเป็นกรด-ด่างได้สูง

วัสดุพอลิยูรีเทน ที่นำมาใช้ทำการทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม มีความหนา 2.5 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นขนาดความหนาที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่มีการทำการวิจัยมาก่อนและศึกษามา โดยมีขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร น้ำหนัก 0.88 กิโลกรัม ดังรูป 3.6

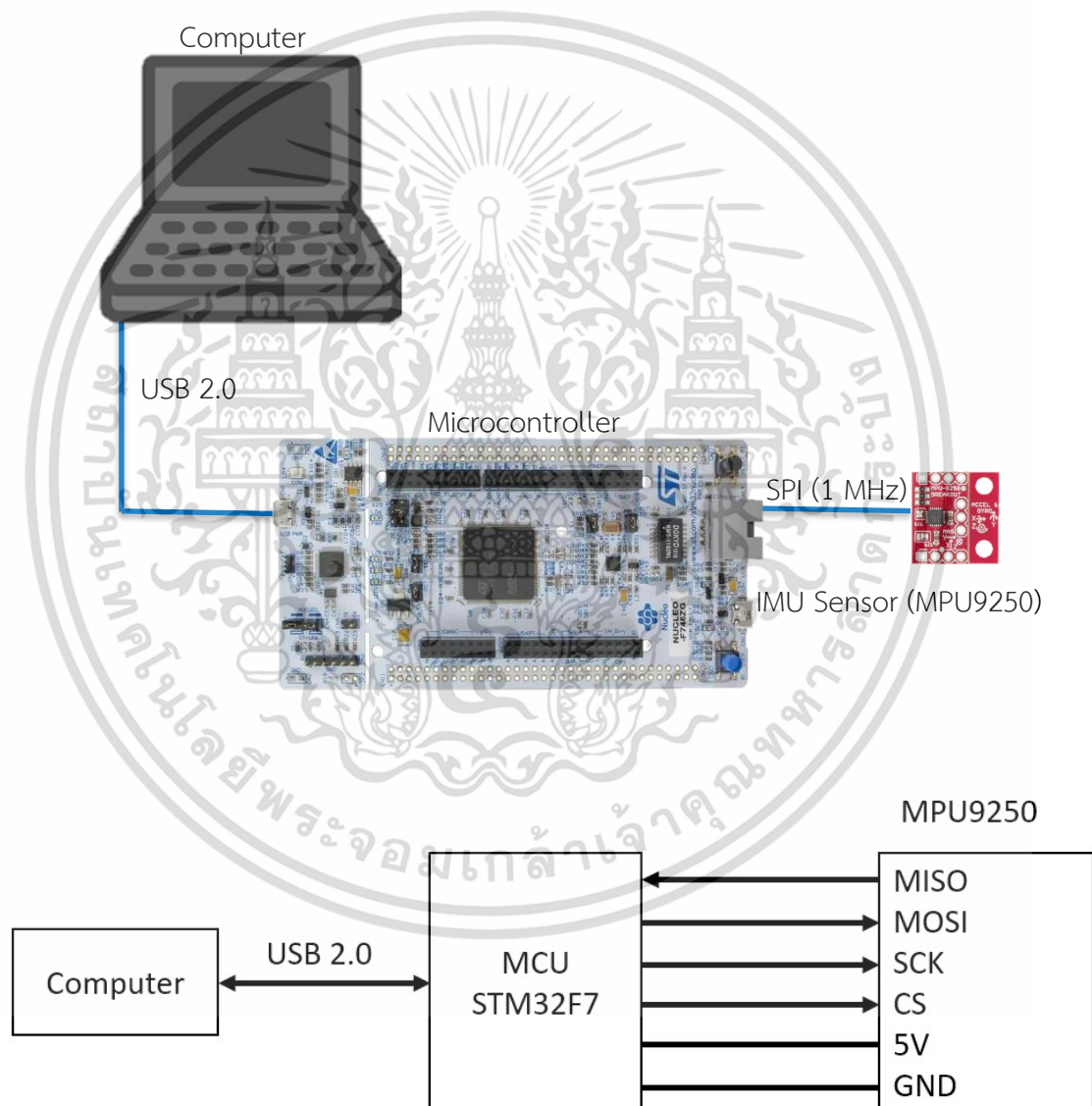


รูปที่ 3.6 วัสดุพอลิยูรีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 Accelerometer Sensor

ประกอบด้วยแกน ax ay และ az จะใช้ค่าในแกน x, y, z เหล่านี้ในการบอกความเร่งเป็นแอมพลิจูด ณ ช่วงเวลาทุก ๆ 1 มิลลิวินาที ซึ่งจริง ๆ แล้ว Accelerometer วัดได้เฉพาะความเร่งเชิงเส้น ไม่สามารถวัดความเร็วเชิงมุมได้ แต่ทำไมถึงสามารถอ่านค่าความเอียงจากมันได้ นั่นก็เพราะว่า ทุกๆ ครั้งที่มีการหมุนหรือเอียง ตำแหน่งของชิพก็จะเปลี่ยน ส่งผลให้จุดต่างๆ บนตัวเซนเซอร์มีความเร่งเชิงเส้นไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับองศาความเอียง ซึ่งความเร่งเชิงเส้นเป็นค่าที่เอาไว้เทียบกับค่า g ของโลก โดยการต่อ Accelerometer Sensor มีการต่อใช้งานตามวงจรดังรูปที่ 3.7

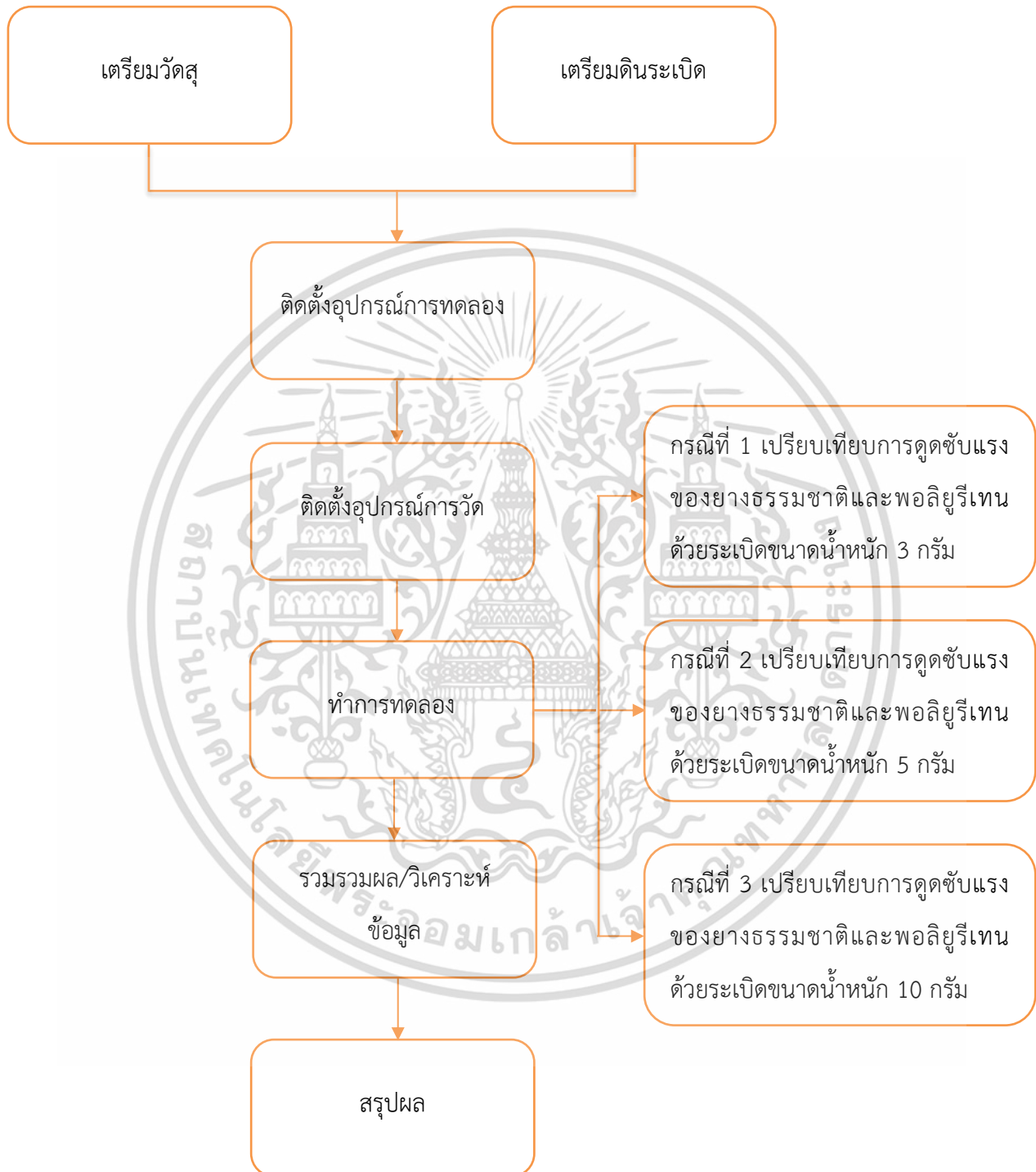


รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมการต่อ Accelerometer Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การทดลอง

การทดลองจะทำการแบ่งเป็น 3 กรณีคือ



รูปที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 3 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน

การทดลองนี้จะทำการทดลองระเบิดที่ขนาดน้ำหนัก 3 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติ และพอลิยูรีเทน ตามวิธีการดังนี้

3.2.1.1 ในขั้นตอนนี้จะนำยางธรรมชาติ เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหนา 2.5 เซนติเมตร ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ประกบด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร วางบนโครงเหล็ก ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะการวางวัสดุและประกบด้วยแผ่นเหล็กบนโครงเหล็ก

3.2.1.2 นำดินระเบิด ขนาด 3 กรัม บรรจุในแท่งเหล็ก ใส่ทรายทับดินระเบิด แล้วอัดให้แน่น นำไปฝังไว้ใต้ดินบริเวณที่จะทำการทดลอง ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะการฝังแท่งเหล็กที่บรรจุระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 นำวัสดุที่จะทำการทดลองวางบนโครงเหล็ก การวางวัสดุนี้จะวางในลักษณะของการประกบด้วยแผ่นเหล็กและนำไปวางไว้บนโครงเหล็ก ด้านบนของชั้นวัสดุนี้จะมีน้ำหนักกดทับ ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะการวางวัสดุกดทับแรง และระเบิดสำหรับการทดลอง

3.2.1.4 ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการระเบิด ดังรูป 3.12



รูปที่ 3.12 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดความเร่ง (Accelerometer Sensor)

3.2.1.5 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์พร้อม ทำการจุดชนวนระเบิด

3.2.1.6 บันทึกผลการทดลอง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.7 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.1.1-3.2.1.6 โดยการเปลี่ยนวัสดุเป็นพอลิยูรีเทน

3.2.1.8 สรุปผลการทดลอง

3.2.2 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 5 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน

การทดลองนี้จะทำการทดลองระเบิดที่ขนาดน้ำหนัก 5 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติ และพอลิยูรีเทน ตามวิธีการดังนี้

3.2.2.1 ในขั้นตอนนี้จะนำแผ่นพอลิยูรีเทน เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหนา 2.5 เซนติเมตร ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร วางบนโครงเหล็ก

3.2.2.2 นำดินระเบิด ขนาด 5 กรัม บรรจุในแท่งเหล็ก ใส่ทรายทับดินระเบิด แล้วอัดให้แน่น นำไปฝังไว้ใต้ดินบริเวณที่จะทำการทดลอง

3.2.2.3 นำวัสดุที่จะทำการทดลองวางบนโครงเหล็ก การวางวัสดุนี้จะวางในลักษณะของการประกบด้วยแผ่นเหล็กและนำไปวางไว้บนโครงเหล็ก ด้านบนของชั้นวัสดุนี้จะมีน้ำหนักกดทับ

3.2.2.4 ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการระเบิด

3.2.2.5 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์พร้อม ทำการจุดชนวนระเบิด

3.2.2.6 บันทึกผลการทดลอง

3.2.2.7 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.2.1-3.2.2.6 โดยการเปลี่ยนวัสดุเป็นพอลิยูรีเทน

3.2.1.8 สรุปผลการทดลอง

3.2.3 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 10 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน

การทดลองนี้จะทำการทดลองระเบิดที่ขนาดน้ำหนัก 10 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติ และพอลิยูรีเทน ตามวิธีการดังนี้

3.2.3.1 ในขั้นตอนนี้จะนำแผ่นพอลิยูรีเทน เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหนา 2.5 เซนติเมตร ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร วางบนโครงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 นำดินระเบิด ขนาด 5 กรัม บรรจุในแท่งเหล็ก ใส่ทรายทับดินระเบิด แล้วอัดให้แน่น นำไปฝังไว้ใต้ดินบริเวณที่จะทำการทดลอง

3.2.3.3 นำวัสดุที่จะทำการทดลองวางบนโครงเหล็ก การวางวัสดุนี้จะวางในลักษณะของการประกบด้วยแผ่นเหล็กและนำไปวางไว้บนโครงเหล็ก ด้านบนของชั้นวัสดุนี้จะมีน้ำหนักกดทับ

3.2.3.4 ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการระเบิด

3.2.3.5 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์พร้อม ทำการจุดชนวนระเบิด

3.2.3.6 บันทึกผลการทดลอง

3.2.3.7 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.2.3.1-3.2.3.6 โดยการเปลี่ยนวัสดุเป็นพอลิยูรีเทน

3.2.3.8 สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

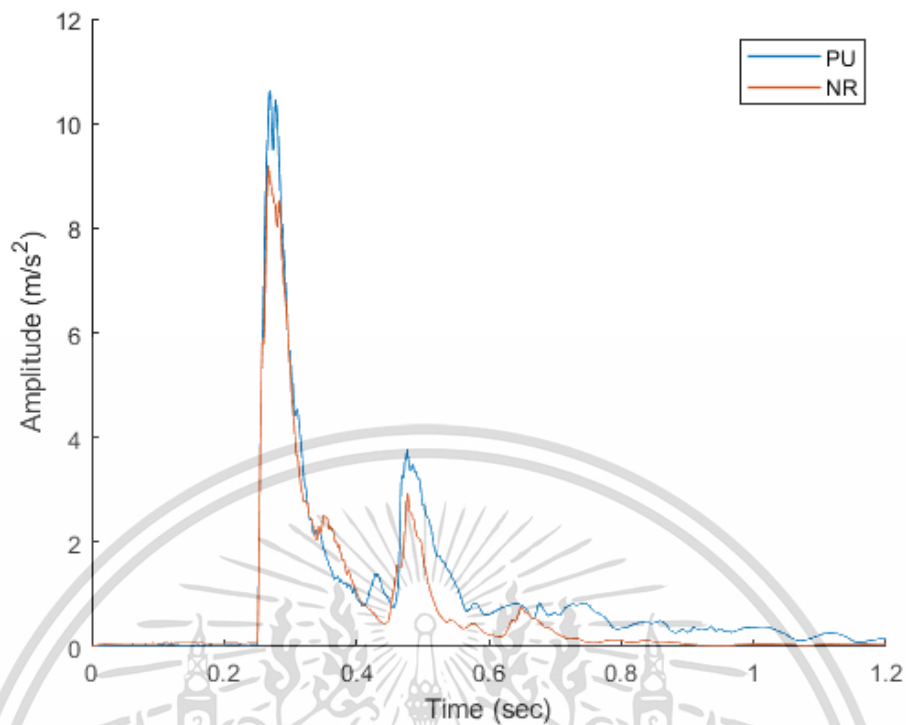
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการทดลองจากบทที่ 3 ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมด 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่าง วัสดุ 2 ชนิด ที่มีการระเบิดด้วยขนาดน้ำหนักของดินระเบิดที่ต่างกัน 3 ขนาด ส่วนต่อไปคือการวัดค่าสัญญาณความเร่งด้วย Accelerometer Sensor ที่เกิดขึ้นหลังการดูดซับพลังงานจากการระเบิดที่ได้ทำการบันทึกผลและทำการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลา (Time – Domain Signal Analysis) ส่วนสุดท้ายเป็นการนำผลที่ได้จากที่ได้ผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนความถี่ เพื่อหาแนวโน้มของความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการระเบิดของวัสดุทั้งสองชนิด

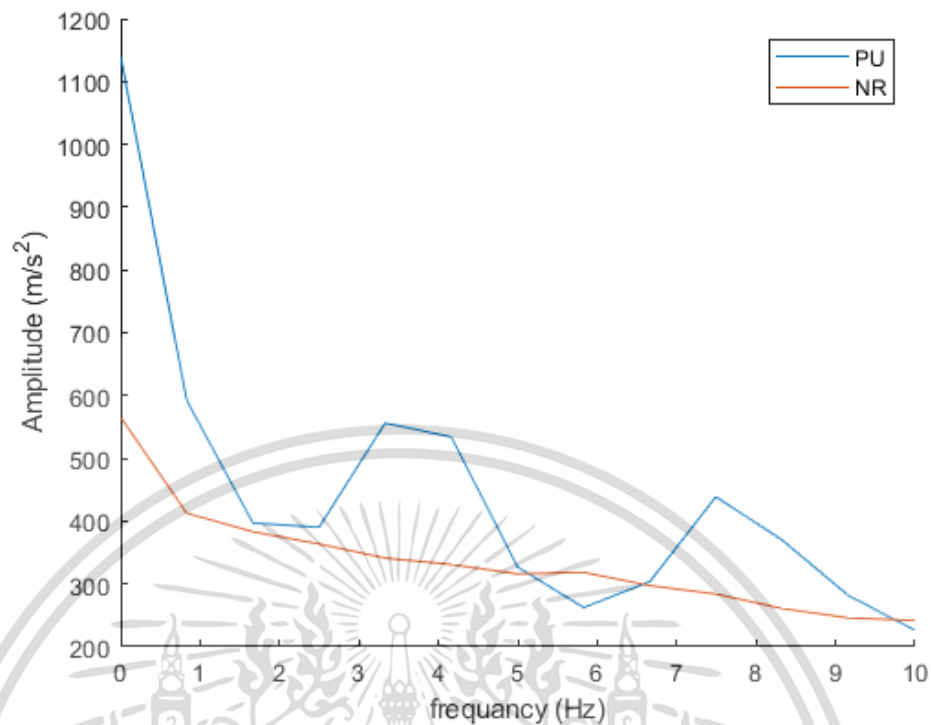
#### 4.1 ผลการทดลองที่ 3.2.1 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 3 กรัม ของวัสดุอย่างธรรมชาติและพอลิยูรีเทน

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองการดูดซับแรงจากระเบิดขนาดน้ำหนัก 3 กรัม ของวัสดุอย่างธรรมชาติและพอลิยูรีเทน โดยการเก็บผลการทดลองจาก Accelerometer แบบสามแกน โดยการใช้ IMU Sensor (MPU9250) สำหรับวัดค่า ซึ่งค่าความเร่งที่วัดได้จากการทดลองจะอยู่ในรูปแบบข้อมูล x, y และ z จากนั้นทำการกรองความถี่ของข้อมูลที่ไม่สนใจออกเหลือแต่ข้อมูลความถี่ที่สนใจ ด้วย Digital Filter ชนิด Second – Order Low – Pass Butterworth Filter ที่ความถี่ 0 - 10 เฮิร์ต ข้อมูลที่ต้องการคือ ข้อมูลที่ 1 Hz แต่เนื่องจากต้องการสังเกตพฤติกรรมของแรงระเบิด ดังนั้นจึงเลือกกรองข้อมูลในช่วงของความถี่ที่สนใจ คือ 0 - 10 Hz โดยผลของกราฟที่ได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลา (Time – Domain Signal Analysis) ดังรูปที่ 4.1 หลังจากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนความถี่ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่ง ที่น้ำหนักกระเบิดขนาด 3 กรัม

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ที่น้ำหนักกระเบิดขนาด 3 กรัม แอมพลิจูดที่อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลา ในที่นี้หมายถึงความเร่งที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาที่วัดได้หลังจากมีการดูดซับพลังงานจากการระเบิดด้วยวัสดุยางธรรมชาติและวัสดุพอลิยูรีเทนจะพบว่า ช่วงวินาทีที่ 0.2 - 0.3 ความเร่งที่เหลือจากการดูดซับด้วยวัสดุพอลิยูรีเทนมีสเปคตรัมของกราฟที่สูงกว่าการดูดซับด้วยวัสดุยางธรรมชาติ ในขณะที่วินาทีที่ 0.8 ความเร่งที่ถูกดูดซับด้วยวัสดุยางธรรมชาติเริ่มมีแนวโน้มที่คงที่และเข้าใกล้ 0

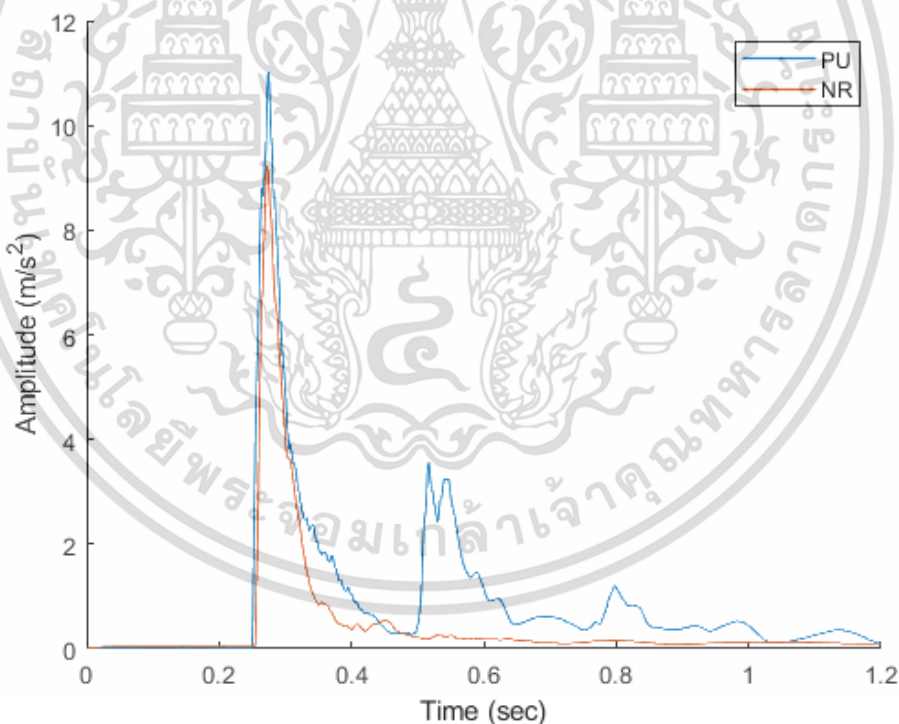


รูปที่ 4.2 ผลจากการกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ที่น้ำหนักกระเบิดขนาด 3 กรัม

หลังจากการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลาแล้วมาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนความถี่ ที่น้ำหนักกระเบิดขนาด 3 กรัม พบว่าสัญญาณความถี่ของวัสดุพอลิยูรีเทนมีความถี่ช่วง 0 - 1 Hz เกิดขึ้นสูง เมื่อเทียบกับวัสดุยางธรรมชาติที่มีความถี่ช่วง 0 - 1 Hz เกิดขึ้นน้อยกว่า และแอมพลิจูดของความถี่ในช่วงอื่นๆ ที่ 0 - 10 Hz ของวัสดุพอลิยูรีเทนมีแนวโน้มที่สูงกว่าแอมพลิจูดของวัสดุยางธรรมชาติ จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุยางธรรมชาติสามารถดูดซับพลังงานจากการระเบิดขนาด 3 กรัม ได้ดีกว่าวัสดุพอลิยูรีเทน

## 4.2 ผลการทดลองที่ 3.2.2 การทดลองการดูดซับแรงระเบิดขนาดน้ำหนัก 5 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน

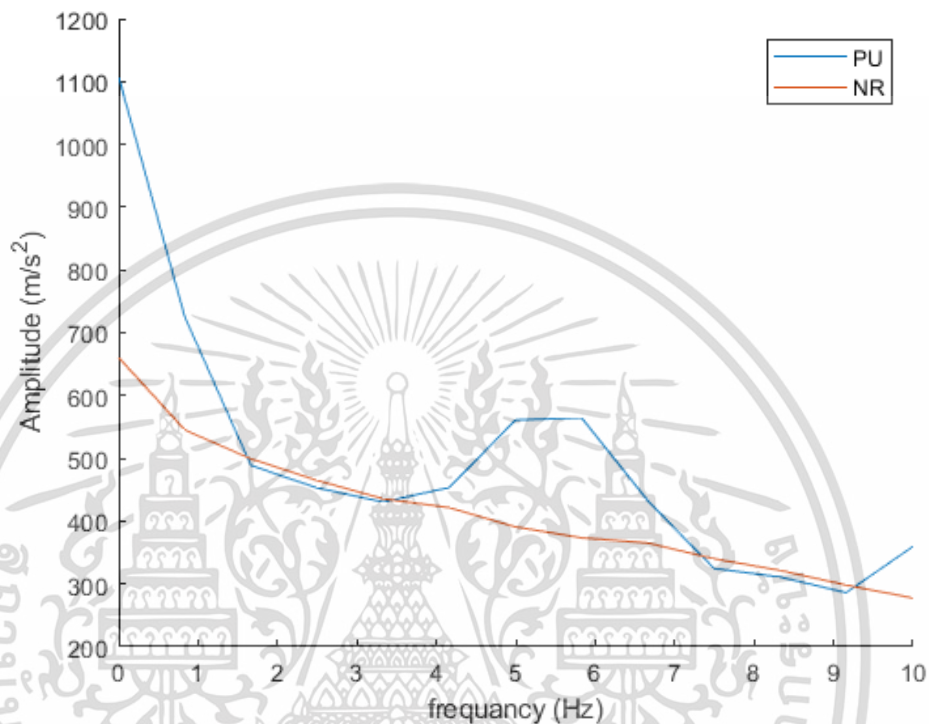
ในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองการดูดซับแรงจากระเบิดขนาดน้ำหนัก 5 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน โดยการเก็บผลการทดลองจาก Accelerometer แบบสามแกน โดยการใช้ IMU Sensor (MPU9250) สำหรับวัดค่า ซึ่งค่าความเร่งที่วัดได้จากการทดลองจะอยู่ในรูปแบบข้อมูล x, y และ z จากนั้นทำการกรองความถี่ของข้อมูลที่ไม่สนใจออกเหลือแต่ข้อมูลความถี่ที่สนใจ ด้วย Digital Filter ชนิด Second – Order Low – Pass Butterworth Filter ที่ความถี่ 0 - 10 เฮิร์ต ข้อมูลที่ต้องการคือ ข้อมูลที่ 1 Hz แต่เนื่องจากต้องการสังเกตพฤติกรรมของแรงระเบิด ดังนั้นจึงเลือกกรองข้อมูลในช่วงของความถี่ที่สนใจ คือ 0 - 10 Hz โดยผลของกราฟที่ได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลา (Time – Domain Signal Analysis) ดังรูปที่ 4.3 หลังจากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนความถี่ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่ง ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 5 กรัม

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 5 กรัม แอมพลิจูดที่อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลา ในที่นี้หมายถึงความเร่งที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาที่วัดได้หลังจากมีการดูดซับพลังงานจากการระเบิดด้วยวัสดุยางธรรมชาติและวัสดุพอลิยูรีเทนจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นหน้าการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า ช่วงวินาทีที่ 0.2 – 0.3 ความเร่งที่เหลือจากการดูดซับด้วยวัสดุพอลิยูรีเทนมีสเปกตรัมของกราฟที่สูงกว่าการดูดซับด้วยวัสดุยางธรรมชาติ ในขณะที่วินาทีที่ 0.9 ความเร่งที่ถูกดูดซับด้วยวัสดุยางธรรมชาติเริ่มมีแนวโน้มที่คงที่และเข้าใกล้ 0 แต่สเปกตรัมของกราฟของวัสดุพอลิยูรีเทนยังคงมีค่าแอมพลิจูดเกิดขึ้นอยู่

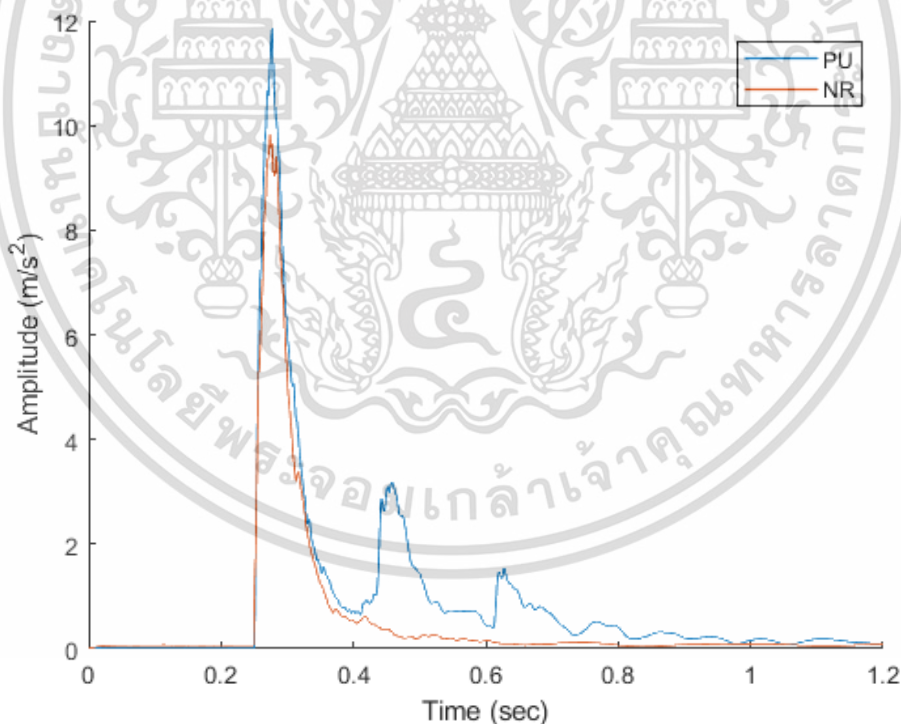


รูปที่ 4.4 ผลจากกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ที่น้ำหนักกระเบิดขนาด 5 กรัม

หลังจากการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลาแล้วมาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนความถี่ ที่น้ำหนักกระเบิดขนาด 5 กรัม พบว่าสัญญาณความถี่ของวัสดุพอลิยูรีเทนมีความถี่ช่วง 0 - 1 Hz เกิดขึ้นสูง เมื่อเทียบกับวัสดุยางธรรมชาติที่มีความถี่ช่วง 0 - 1 Hz เกิดขึ้นน้อยกว่า และแอมพลิจูดของความถี่ในช่วงอื่นๆ ที่ 0 - 10 Hz ของวัสดุพอลิยูรีเทนมีแนวโน้มที่สูงกว่าแอมพลิจูดของวัสดุยางธรรมชาติ จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุยางธรรมชาติสามารถดูดซับพลังงานจากการระเบิดขนาด 5 กรัม ได้ดีกว่าวัสดุพอลิยูรีเทน

### 4.3 ผลการทดลองที่ 3.2.3 การทดลองการดูดซับแรงกระเปิดขนาดน้ำหนัก 10 กรัมของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน

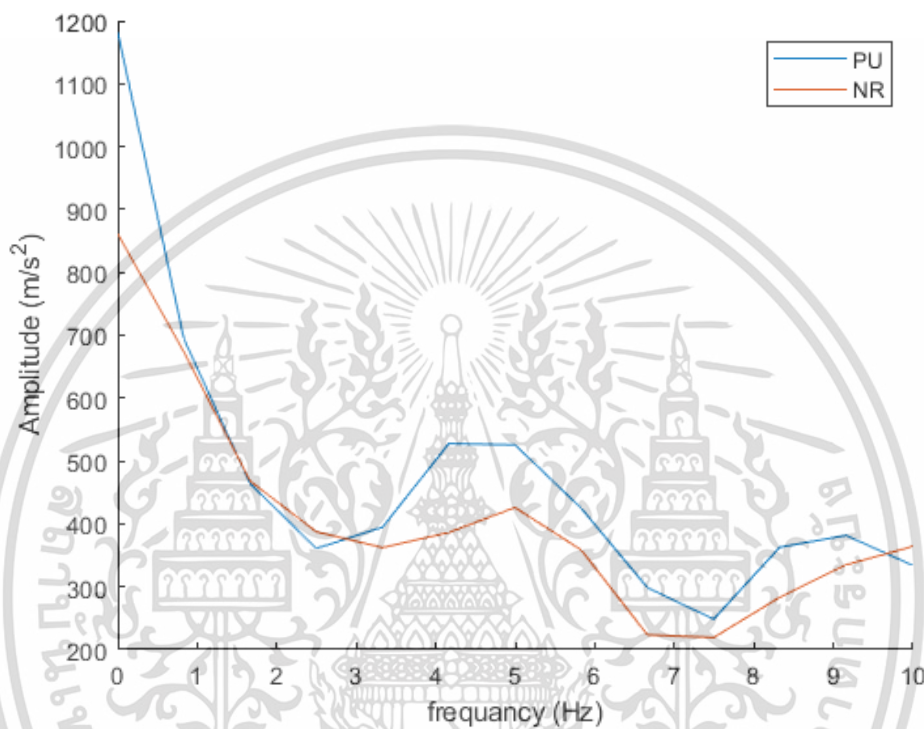
ในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองการดูดซับแรงจากระเปิดขนาดน้ำหนัก 10 กรัม ของวัสดุยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน โดยการเก็บผลการทดลองจาก Accelerometer แบบสามแกน โดยการใช้ IMU Sensor (MPU9250) สำหรับวัดค่า ซึ่งค่าความเร่งที่วัดได้จากการทดลองจะอยู่ในรูปแบบข้อมูล x, y และ z จากนั้นทำการกรองความถี่ของข้อมูลที่ไม่สนใจออกเหลือแต่ข้อมูลความถี่ที่สนใจ ด้วย Digital Filter ชนิด Second – Order Low – Pass Butterworth Filter ที่ความถี่ 0 - 10 เฮิร์ต ข้อมูลที่ต้องการคือ ข้อมูลที่ 1 Hz แต่เนื่องจากต้องการสังเกตพฤติกรรมของแรงระเบิด ดังนั้นจึงเลือกกรองข้อมูลในช่วงของความถี่ที่สนใจ คือ 0 - 10 Hz โดยผลของกราฟที่ได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลา (Time – Domain Signal Analysis) ดังรูปที่ 4.5 หลังจากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนความถี่ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ผลเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณความเร่ง ที่น้ำหนักกระเปิดขนาด 10 กรัม

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ที่น้ำหนักกระเปิดขนาด 10 กรัม แอมพลิจูดที่อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลา ในที่นี้หมายถึงความเร่งที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่วัดได้หลังจากมีการดูดซับพลังงานจากการระเบิดด้วยวัสดุยางธรรมชาติและวัสดุพอลิยูรีเทนจะพบว่า ช่วงวินาทีที่ 0.2 – 0.3 ความเร่งที่เหลือจากการดูดซับด้วยวัสดุพอลิยูรีเทนมีสเปคตรัมของกราฟที่สูงกว่าการดูดซับด้วยวัสดุยางธรรมชาติ ในขณะที่วินาทีที่ 0.9 ความเร่งที่ถูกดูดซับด้วยวัสดุยางธรรมชาติเริ่มมีแนวโน้มที่คงที่และเข้าใกล้ 0 แต่สเปคตรัมของกราฟของวัสดุพอลิยูรีเทนยังคงมีค่าแอมพลิจูดเกิดขึ้นอยู่



รูปที่ 4.6 กราฟที่ได้จากการประมวลผลฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 10 กรัม

หลังจากการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนเวลาแล้วมาผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณผ่านโดเมนความถี่ ที่น้ำหนักระเบิดขนาด 10 กรัม พบว่าสัญญาณความถี่ของวัสดุพอลิยูรีเทนมีความถี่ช่วง 0 - 1 Hz เกิดขึ้นสูง เมื่อเทียบกับวัสดุยางธรรมชาติที่มีความถี่ช่วง 0 - 1 Hz เกิดขึ้นน้อยกว่า และแอมพลิจูดของความถี่ในช่วงอื่นๆ ที่ 0 - 10 Hz ของวัสดุพอลิยูรีเทนมีแนวโน้มที่สูงกว่าแอมพลิจูดของวัสดุยางธรรมชาติ จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุยางธรรมชาติสามารถดูดซับพลังงานจากการระเบิดขนาด 10 กรัม ได้ดีกว่าวัสดุพอลิยูรีเทน

#### 4.4 ตัวอย่างผลของแรงระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์

จากการคำนวณแรงระเบิดเพื่อหาขนาดของแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเบิด สิ่งแรกที่ควรพิจารณาคือน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า เมื่อได้วัตถุระเบิดเทียบเท่าจะสามารถหาค่าระยะปรับทอน (Z) เพื่อนำไปหาค่าแรงดันที่เกิดจากการระเบิดได้ ยกตัวอย่างการหาค่าแรงดันระเบิดสูงสุด เมื่อน้ำหนักระเบิดขนาด 3 กรัม

##### 4.4.1.1 หาน้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า

$$W_e = R.E.Factor \times W_{exp}(\text{น้ำหนักของระเบิด PETN})$$

จะได้  $= 1.66 \times 0.03 \text{ kg.}$

ดังนั้น จะได้น้ำหนักวัตถุระเบิดเทียบเท่า (TNT)  $W_e = 0.05 \text{ kg.}$

##### 4.4.1.2 หาค่าระยะปรับทอน (Z)

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$$

จะได้  $= \frac{0.235 \text{ m.}}{\sqrt[3]{0.05 \text{ kg.}}}$

ดังนั้น จะได้ระยะปรับทอน  $Z = 0.35 \text{ m}/\sqrt[3]{\text{kg}}$

ระยะปรับทอน Z สำหรับนำไปใช้คำนวณแรงดันระเบิดสูงสุด

##### 4.4.1.3 หาค่าแรงดันสูงสุด ( $P_{so}$ )

$$P_{so} = \frac{0.975}{z} - \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3}$$

$$P_{so} = 151.09 \text{ kN/m}^2$$

หรือแรงดันสูงสุด  $= 21.91$  ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

##### 4.4.1.4 เมื่อนำแรงดันสูงสุดที่ได้จากการระเบิดมาคำนวณแรง จะใช้ทฤษฎีการแปรผกผันยก

กำลังสองเพื่อสังเกตค่าแรงดันในกรณีที่ระยะห่างมากขึ้น โดยให้ระยะห่างเป็น 2 เท่าของระยะที่ทำ

การทดลอง คือที่ระยะ 0.47 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(D_2)^2}{(D_1)^2}$$

จะได้

$$I_2 = \frac{(0.235)^2}{(0.47)^2} \times 21.91$$

$$= 5.48 \quad \text{ปอนด์ต่อตารางนิ้ว}$$

ดังนั้นจะสังเกตว่าเมื่อเกิดการระเบิดของระเบิดที่น้ำหนัก 3 กรัม หรือ 0.03 กิโลกรัม จะมีแรงดันระเบิดสูงสุดที่กระทำกับวัตถุที่อยู่ห่างจากจุดระเบิด 0.235 เมตร เท่ากับ 21.91 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แรงดันระเบิดสูงสุดที่กระทำกับวัตถุ จะเท่ากับ 5.48 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้แรงบันดาลใจจากการที่ได้ทำงานคลุกคลีกับเจ้าหน้าที่ใน 3 จังหวัดชายแดนใต้ โดยได้สังเกตเห็นถึงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับทั้งเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติภารกิจและประชาชนทั่วไป รวมถึงปัญหาทางด้านยุทธโศปกรณ์ทางการทหาร ที่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานหรือสถานการณ์ต่างๆ และเพื่อให้ยุทธโศปกรณ์นั้นๆ มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น รวมถึงเพียงพอและสอดคล้องกับภารกิจ

เหตุการณ์ความไม่สงบในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนใต้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบหลากหลายมุ่งหวังสร้างความตระหนักให้ประชาชนและทำลายขวัญกำลังใจของเจ้าหน้าที่รัฐ การก่อความไม่สงบมีหลากหลายรูปแบบ ทั้งการซุ่มยิงเจ้าหน้าที่ การปล้นรถไปทำคาร์บอมและการลอบวางระเบิดด้วยระเบิดแสวงเครื่องที่ประกอบขึ้นหลากหลายรูปแบบ ทั้งที่ไม่รุนแรงมากนักไปจนถึงระเบิดที่รุนแรงเพื่อสร้างสถานการณ์และมุ่งหวังชีวิต ผู้วิจัยจึงสังเกตเห็นปัญหาในจุดนี้ จึงเริ่มศึกษาและวิจัยเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุที่ช่วยดูดซับแรงจากการระเบิดได้ดีขึ้นกว่าเดิมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับส่วนต่างๆ หรือยุทธโศปกรณ์ต่างๆ ทางทหาร

โดยผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงคุณสมบัติของวัสดุ 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติในการซับแรงกระแทกได้คือ พอลิยูรีเทน (Polyurethane) และยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศและมีราคาที่ไม่สูง สำหรับยางพาราก็เป็นพืชเศรษฐกิจลำดับต้นๆ ของประเทศไทย และยังมีคุณสมบัติที่สามารถทนแรงกระแทกได้ดีและพอลิยูรีเทนเองก็เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีเช่นกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบด้วยการทดลองนำวัสดุทั้ง 2 ชนิด ประกบด้วยแผ่นโลหะในลักษณะแซนวิช ติดตั้งเหนือวัตถุระเบิดพร้อมติดตั้ง Accelerometer Sensor บนแผ่นเหล็กที่ประกบกับวัสดุที่ทำการทดลองและทำการวัดค่าความเร่งจากพลังงานจากการระเบิดที่เกิดขึ้น ระเบิดที่ใช้มีปริมาณระเบิดที่แตกต่างกันคือ 3 กรัม 5 กรัม และ 10 กรัม โดยจากผลการทดลองจะพบว่าหลังเกิดการระเบิด ความเร่งที่เกิดขึ้นจะส่งผ่านไปยังวัสดุที่ช่วยดูดซับแรงที่เลือกมาศึกษา โดยวัสดุชนิดพอลิยูรีเทน (Polyurethane) จะมีสัญญาณความเร่งความถี่สูงเกิดขึ้นขณะที่เกิดการระเบิดทั้งกับระเบิดขนาด 3 กรัม 5 กรัม และ 10 กรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุยางธรรมชาติ (Natural Rubber) แล้วนั้นพบว่า ค่าสัญญาณความเร่งความถี่ที่เกิดขึ้นกับยางธรรมชาติมีค่าต่ำกว่า เมื่อเกิดการระเบิดจะมีแรงดันและความเร่งที่สูงมากเกิดขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของแรงดันจะทำให้เกิดความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแรงนี้จะส่งแรงดันซึ่งก็คือพลังงานจากการระเบิดให้กระจายไปทุกทิศทาง จะมีแรงดันที่กระแทกหรือชนกับวัสดุดูดซับทำให้เกิดการดูดซับแรงดัน ซึ่งจะส่งผลให้ความแรงที่เกิดขึ้นค่อยๆลดลงเมื่อมีการดูดซับ แสดงให้เห็นว่า วัสดุยางธรรมชาติ (Natural Rubber) สามารถดูดซับแรงภายใต้การระเบิดได้มากกว่าวัสดุพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ในทุกๆ ปริมาณของวัตถุระเบิด ซึ่งผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่ายางธรรมชาติ (Natural Rubber) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถนำมาใช้เสริมหรือทดแทนวัสดุของยูโทปรกรณ์บางชนิดเพื่อช่วยดูดซับแรงภายใต้การระเบิดที่เกิดขึ้นได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาวัสดุที่ช่วยดูดซับพลังงานจากการระเบิด เช่น การเพิ่มขึ้นของวัสดุหรือการใช้วัสดุยางที่มีการเพิ่มสารเติมแต่งให้คุณสมบัติมากยิ่งขึ้น ให้เหมาะสำหรับการรับแรงหรือการดูดซับพลังงาน

5.2.2 สามารถนำผลที่ได้มาทำการดัดแปลงเพื่อเพิ่มความสามารถของยูโทปรกรณ์ที่ใช้งานอยู่ในพื้นที่ด้วยต้นทุนที่ไม่สูงและสามารถใช้งานได้จริง

5.2.3 สามารถนำผลที่ได้มาปรับปรุงรูปแบบของเกราะเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกระจายพลังงานที่ได้รับจากการระเบิดเพื่อลดการบาดเจ็บและเสียชีวิตของผู้โดยสาร

## เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ngo, P. Mendis, A Gupta & J. Ramsay, “**Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview**”, EJSE Special Issue : Loading on Structures (2007)
- [2] Inderpal Singh Sandhu, Murugan Thangadurai, Prashant S. Alegaonkar, D.R. Saroha, “**Mitigation of Blast Induced Acceleration using Open Cell Natural Rubber and Synthetic Foam**”, Defense Science Journal, Vol. 69, No. 1, January 2019, pp. 53-57
- [3] H. Bornstein & K. Ackland, “**Evaluation of energy absorbing materials under blast loading**”, Materials Characterisation, VI 125
- [4] Jai Ramalingam and Ravi Thyagarajan, “**Analysis of Design Range for a Stroking Seat on a Stroking Floor to Mitigate Blast Loading Effects**”, NATO OTAN, STO- MP-AVT-265
- [5] Nicolas Newell, William Neal, Thanyani Pandelani, David Reinecke, William G Proud & Spyros D Masouros, “**The Dynamic Behavior of the Floor of a Surrogate Vehicle Under Explosive Blast Loading**”, Journal of Materials Science Research; Vol. 5, No. 2; 2016
- [6] Don Issarakorn, Songmueng Nantakwang, “**Machine Condition Monitoring for Preventive Maintenance**”
- [7] T.P.NGUYEN and M.T.TRAN, “**Response of Vertical Wall Structures under Blast Loading by Dynamic Analysis**”, Procedia Engineering 14, 2011, pp. 3308 - 3316
- [8] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. พ.ศ. 2559. **การคำนวณแรงระเบิดและผลกระทบจากแรงระเบิดที่มีต่อโครงสร้างอาคาร**
- [9] ศูนย์เฝ้าระวังสถานการณ์ภาคใต้. พ.ศ. 2561-2562. **สรุปเหตุการณ์ในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวชนิษฐา หล่อวีระธรรม
วัน เดือน ปีเกิด	26 กรกฎาคม 2532 ที่กรุงเทพมหานครฯ
ที่อยู่	224 ถนนเลียบบคลองภาษีเจริญฝั่งใต้ แขวงหนองแขม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 โทร.092-491-9795
ประวัติการศึกษา	2560 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การเขียนแบบด้วย Software ทางวิศวกรรม 2.) ระบบกล้อง CCTV 3.) อุปกรณ์พิเศษที่ใช้ในหน่วยงานราชการทหาร
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2554-2555	ตำแหน่ง Product Launch Business บริษัท Summit Auto Seat Industry Co., Ltd. จ.สมุทรปราการ
พ.ศ.2555-2556	ตำแหน่ง Engineer บริษัท NSK Asia Pacific Technology Centre (Thailand) Co., Ltd. จ.ชลบุรี
พ.ศ.2556-2559	ตำแหน่ง Technical Engineer บริษัท Design Through Acceleration Co., Ltd. จ.กรุงเทพมหานคร
พ.ศ.2559-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง Senior Engineer บริษัท กันโน้ ซีสเต็มส์ อินทีเกรชั่น จำกัด จ.กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้