

การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นยางพาราเสริมกำลังคันดินในสนาม

PERFORMANCE OF PARA RUBBER FOR EMBANKMENT REINFORCEMENT IN FIELD TEST



ภักคณ จรุงรัตน์

PAKKAPON JAROONRAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2023-EN-M-097-099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE OF PARA RUBBER FOR EMBANKMENT REINFORCEMENT IN FIELD TEST



PAKKAPON JAROONRAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
AND CONSTRUCTION MANAGEMENT

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

KMITL-2023-EN-M-097-099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2022**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นยางพาราเสริมกำลังคันดินในสนาม
นักศึกษา	นาย ภัคภณ จรุงรัตน์
รหัสประจำตัวนักศึกษา	64601106
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ศลิษา ไชยพุทธ

## บทคัดย่อ

จากสถานการณ์ราคาขายพาราในประเทศไทยที่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 จนถึงปัจจุบัน งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ นำแผ่นยางพาราจากธรรมชาติ ที่เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น มีคุณสมบัติด้านการรับแรงดึง เช่นเดียวกับคุณสมบัติของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังของคันดินด้วยแผ่นยางพารารวมควันซึ่งเป็นแผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางคอมปาวด์ซึ่งเป็นแผ่นยางธรรมชาติที่ผ่านการผสมสารเคมี ในสนามทดสอบ ขนาด 1 เมตร × 5 เมตร สูง 0.5 เมตร และติดตั้งแผ่นยางพารารวมควันและแผ่นยางคอมปาวด์จำนวน 2 ชั้น ที่ตำแหน่ง 0.05 เมตร และ 0.25 เมตร จากผิวดิน ทดสอบเปรียบเทียบกำลังการรับน้ำหนักของคันดินที่ไม่มีการเสริมกำลังและเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ ด้วยการจำลองน้ำหนักของยานพาหนะขนาด 160 กิโลกรัม บรรทุกผ่านบนสนามทดสอบจำนวน 250 รอบ ตรวจวัดค่าการทรุดตัว (Settlement) และค่าความลึกของร่องล้อ (Rutting depth) จากการศึกษาตรวจวัดพฤติกรรมของคันดินในสนามทดสอบพบว่า คันดินบริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ มีค่าการทรุดตัว และ ค่าความลึกของร่องล้อ น้อยกว่าคันดินบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมควันและบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังตามลำดับ ดังนั้นแผ่นยางพาราธรรมชาติมีประสิทธิภาพช่วยเสริมกำลังการรับแรงของคันดินในสนาม โดยเฉพาะแผ่นยางคอมปาวด์

**Thesis** Performance of para rubber for embankment reinforcement in field test  
**Student** Mr. Pakkapon Jaroonrat  
**Student ID.** 64601106  
**Degree** Master of Engineering  
**Program** Civil engineering environmental engineering and construction management  
**Year** 2023  
**Thesis advisor** Assoc. Prof. Dr. Salisa Chaiyaput

## ABSTRACT

From the situation of the price of rubber in Thailand, which tends to decrease continuously during the years 2011 to the present, In this research, natural rubber sheets are used as a flexible material with tensile properties similar to those of geogrid. By evaluating the effectiveness of ribbed smoked sheets for embankment reinforcement in the field test with dimensions of 1 meter by 5 meters and a height of 0.5 meters. Which has two layers of ribbed smoked sheets and compound rubber sheets installed at 0.05 meters and 0.25 meters from the ground surface. Simulate the weight of a 160-kilogram vehicle, load it through 250 cycles, and measure the settlement and rutting depth to compare the load-bearing capacity of an embankment without reinforcement and reinforced with ribbed smoked sheets and compound rubber sheets. From the study, it was found that the embankment in the reinforced area with compound rubber sheets had a lower settlement and rutting depth than the embankment both with and without reinforcement with ribbed smoked sheets. As a result, the compound rubber sheets are most effective in helping with the strengthening of the embankment's bearing in the field.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ศลิษา ไชย พุทธ ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในทุกเรื่องตั้งแต่เริ่มต้นการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นคำแนะนำในการ วิจัย ระเบียบวิธีการวิจัย การเขียนบทความทางวิชาการ การเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ และอื่น ๆ อีก มากมาย ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นายอนุพุทธ เสียงสุนทรสิทธิ์ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลทางวิชาการตลอดจนให้คำปรึกษาในเรื่องของงานวิจัยให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นางสาวกนกพร พงษ์พรรณนา นางสาวกมลรัตน์ ศรีวิเชียร นางสาวญาณิศา บุญเคล้า นางสาวฐิติรัตน์ โชติทรัพย์ชลัท และนายอาดิล ฌรงค์อัศวร ที่เป็นส่วนหนึ่งในทีมทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม

เหนือสิ่งอื่นใดต้องขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ผู้ให้กำเนิดเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกเรื่อง ขอขอบพระคุณครอบครัวและคนที่ข้าพเจ้ารักที่เป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ขอให้ได้รับสิ่งที่ดีตลอดจนประสบแต่สิ่งที่ดีแก่บุคคลดังกล่าวด้วยเทอญ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา คนที่ข้าพเจ้ารัก ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ภักภณ จรูญรัตน์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 ยางพารา.....	4
2.1.1 ยางพาราดิบและส่วนประกอบของน้ำยาง.....	4
2.1.2 การผลิตแผ่นยางพารารมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS).....	5

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.3 แผ่นยางคอมปาวด์.....	6
2.2 แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid).....	10
2.3 หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน.....	11
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน.....	13
2.4.1 วิธีร่อนผ่านตะแกรง.....	13
2.4.2 การบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ.....	13
2.4.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของพรอคเตอร์.....	14
2.4.4 การบดอัดดินระดับตื้น (Shallow Compaction).....	16
2.4.5 การทดสอบหาค่ารับน้ำหนักแบบ CBR.....	20
2.5 ความเสียหายของผิวถนนและวิธีวัดความเสียหาย.....	21
2.5.1 หลุมบ่อ (Pothole).....	22
2.5.2 ร่องล้อ (Rutting).....	23
2.5.3 รอยปะซ่อม (Patching).....	24
2.5.4 ผิวหน้าหลุดร่อน (Raveling).....	25
2.5.5 ทรุ่ตัวเป็นแอ่ง (Depression).....	26
2.5.6 รอยแตกร้าว (Crack).....	27
2.6 ทฤษฎีการคาดคะเนการทรุดตัวจากการตรวจวัดในสนาม.....	30
2.6.1 การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic method).....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีอะโซกะ (Asaoka method).....	31
2.7 ทฤษฎีการคำนวณหน่วยแรงเฉื่อยในแนวตั้งโดยวิธีการประมาณ.....	31
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
2.8.1 การประยุกต์ใช้แผ่นยางพารารมควัน RSS-Geogrid เพื่อเสริมกำลังถนนพร้อม วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM 2D.....	33
2.8.2 การทดสอบเสถียรภาพของชั้นดินเดิมในสนามด้วยวัสดุใยสังเคราะห์พร้อมการ เปรียบเทียบวิธีการออกแบบ.....	34
2.8.3 Performance of geosynthetics in unpaved roads.....	35
2.8.4 Evaluation of Interface Shear Strength Coefficient of Alternative Geogrid Made from Para Rubber Sheet.....	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 การทดสอบคุณสมบัติของดินที่เลือกใช้.....	37
3.1.1 การทดสอบหาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน.....	38
3.1.2 การทดสอบการบดอัดดิน.....	40
3.1.3 การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	43
3.2 การเตรียมแผ่นยางคอมปาวด์.....	45
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์.....	47
3.3.1 การวัดความหนาของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์.....	47

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์.....	48
3.4 การออกแบบสนามทดสอบ.....	49
3.5 การสร้างสนามทดสอบ.....	52
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังภายในสนาม.....	56
3.6.1 การวัดค่าการทรุดของคันดินในสนาม.....	56
3.6.2 การวัดค่าความลึกของร่องล้อภายในสนาม.....	57
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	60
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทราย.....	60
4.1.1 ผลการทดสอบการหาขนาดเม็ดดินวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis).....	60
4.1.2 ผลการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction).....	61
4.1.3 การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	61
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์.....	63
4.2.1 การทดสอบวัดความหนาของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์.....	63
4.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์.....	63
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังของคันดินด้วยแผ่นยางพาราภายในสนาม.....	66
4.3.1 ผลการวัดค่าการทรุดตัว.....	66
4.3.2 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธี Hyperbolic method.....	69

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธี Asaoka method.....	71
4.3.4 ผลการวัดค่าความลึกของร่องล้อภายในสนาม.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	86

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สูตรยางคอมปาวด์.....	8
2.2 ตารางเปรียบเทียบวิธีการทดลองแบบมาตรฐาน และวิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	14
2.3 ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Stress) ที่ความลึกในการกด (Penetration) ต่าง ๆ.....	20
2.4 ค่า CBR ที่เหมาะต่อชั้นทางต่าง ๆ.....	21
2.5 ตารางการเปรียบเทียบผลการทดสอบของดินที่มีค่า CBR สูงกับดินที่มีค่า CBR ต่ำ.....	33
4.1 ค่าความหนาโดยเฉลี่ยของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์.....	63
4.2 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์.....	65
4.3 การเปรียบเทียบการทรุดตัวในแต่ละตำแหน่งภายในสนามทดสอบ.....	68
4.4 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method.....	70
4.5 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method.....	70
4.6 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method.....	71
4.7 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Asaoka method.....	76
4.8 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Asaoka method.....	76
4.9 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ด้วยวิธี Asaoka method.....	77
4.10 การเปรียบเทียบการทรุดตัวในแต่ละตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน.....	77

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 การเปรียบเทียบการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน.....	77
4.12 การเปรียบเทียบการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน.....	78



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	4
2.2 แผ่นยางคอมปาวด์ .....	7
2.3 ลักษณะของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละแบบ.....	11
2.4 การลดการเคลื่อนตัวของออกด้านข้าง (Lateral restraint).....	12
2.5 การเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของระบบ (Bearing capacity increase).....	12
2.6 การรองแรงดึงที่เกิดจากวัสดุเสริมกำลัง (Membrane tension effect).....	12
2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน.....	15
2.8 เครื่องตบสันสะเทือนแบบเรียบ.....	17
2.9 เครื่องกระทบ.....	17
2.10 เครื่องจักรขนาดใหญ่ (Heavy Soil Compaction).....	18
2.11 อุปกรณ์วิธีแทนที่ด้วยทราย (Sand Cone Method).....	19
2.12 ความเสียหายประเภทหลุมบ่อ.....	22
2.13 การวัดความเสียหายประเภทหลุมบ่อ.....	23
2.14 ความเสียหายประเภทร่องล้อ.....	23
2.15 การวัดความเสียหายประเภทร่องล้อ.....	24
2.16 ความเสียหายประเภทรอยปะซ่อม.....	24
2.17 การวัดความเสียหายประเภทรอยปะซ่อม.....	25
2.18 ความเสียหายประเภทผิวหน้าหลุตร้อน.....	25

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 การวัดความเสียหายประเภทผิวหลุดร่อน.....	26
2.20 ความเสียหายประเภททรุดตัวเป็นแอ่ง.....	26
2.21 การวัดความเสียหายประเภททรุดตัวเป็นแอ่ง.....	27
2.22 ความเสียหายประเภทรอยแตกกว้างตามแนวยาว.....	27
2.23 ความเสียหายประเภทรอยแตกกว้างตามแนวขวาง.....	28
2.24 ความเสียหายประเภทรอยแตกกว้างแบบหนึ่งจระเข้.....	28
2.25 การวัดความเสียหายประเภทรอยแตกตามยาวและขวาง.....	29
2.26 การวัดความเสียหายประเภทรอยแตกกว้างแบบหนึ่งจระเข้.....	30
2.27 วิธีการคาดคะเนแบบ Hyperbolic plot.....	30
2.28 กราฟของทฤษฎี Asoka Method ของการทรุดตัวในแนวดิ่ง.....	31
2.29 การคำนวณหน่วยแรงในแนวดิ่งโดยวิธีประมาณ.....	32
2.30 สัญลักษณ์ต่างๆที่แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างคันดินและตำแหน่งการเสริมกำลัง.....	34
2.31 ภาพตัดขวางของส่วนทดสอบ.....	35
3.1 แผนผังวิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.2 ชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์และถาดรองตะแกรง.....	39
3.3 การใช้เครื่องเขย่าเพื่อทำทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน.....	39
3.4 การนำดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงออกทิ้งและทำความสะอาดตะแกรง.....	39
3.5 ค้อนบดอัดแบบมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การบดอัดดินด้วยวิธี Modified proctor test.....	42
3.7 การใช้เหล็กปาดดิน ปาดดินที่เกินขอบ Mold ออก.....	43
3.8 แผ่นยางคอมปาวด์ที่มีช่องเปิดขนาด 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร.....	46
3.9 อุปกรณ์สำหรับเจาะช่องเปิดขนาด 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร.....	46
3.10 การวัดค่าความหนาของตัวอย่างทดสอบ.....	47
3.11 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงด้วยเครื่อง UTM.....	49
3.12 แผนผังการออกแบบของสนามทดสอบ.....	51
3.13 ภาพตัดด้านข้าง (ด้าน A-A) ของสนามทดสอบ.....	51
3.14 ภาพตัดด้านหน้า (ด้าน B-B) ของสนามทดสอบ.....	52
3.15 เครื่องตบสันสะท้อนแบบเรียบ.....	52
3.16 เครื่องทดสอบหาความหนาแน่นในสนาม.....	53
3.17 ปรับระดับพื้นสนามทดสอบด้วยกรวด.....	53
3.18 ปรับระดับพื้นสนามทดสอบด้วยทรายหยาบพร้อมบดอัดและวัดร้อยละการบดอัด.....	54
3.19 แสดงการติดตั้ง settlement plate ที่ระดับความสูง 0.5 เมตรจากผิวดิน พร้อมติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง.....	54
3.20 สร้างสนามทดสอบด้วยชั้นทรายบดอัด.....	55
3.21 ปรับความชื้นตามที่ออกแบบ.....	55
3.22 ไม้สตาฟแบบละเอียด.....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 การวัดค่าการทรุดตัว.....	57
3.24 การวิ่งผ่านของน้ำหนักเพื่อจำลองพฤติกรรมของรถบนถนน.....	59
3.25 การวัดค่าการทรุดตัว.....	59
4.1 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน.....	60
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้ง.....	61
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนกับความเค้นเฉือน.....	62
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตั้งฉากกับความเค้นเฉือน.....	62
4.5 กราฟกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควัน.....	64
4.6 กราฟกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางคอมปาวด์.....	64
4.7 กราฟเปรียบเทียบการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน และ ตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน.....	66
4.8 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method.....	69
4.9 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method.....	70
4.10 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method.....	71
4.11 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ ด้วยวิธี Asaoka method.....	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ ด้วยวิธี Asaoka method.....	72
4.13 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ ด้วยวิธี Asaoka method.....	73
4.14 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน ด้วยวิธี Asaoka method.....	73
4.15 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน ด้วยวิธี Asaoka method.....	74
4.16 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน ด้วยวิธี Asaoka method.....	74
4.17 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง ด้วยวิธี Asaoka method.....	75
4.18 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง ด้วยวิธี Asaoka method.....	75
4.19 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง ด้วยวิธี Asaoka method.....	76
4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความลึกของร่องล้อภายในสนามทดสอบ.....	79
4.21 การวัดค่าการทรุดตัวสุดท้ายในบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์.....	79
4.22 การวัดค่าการทรุดตัวสุดท้ายในบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน.....	80
4.23 การวัดค่าการทรุดตัวสุดท้ายในบริเวณที่ไม่มีเสริมกำลัง.....	80

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเสริมความแข็งแรงของถนนด้วยวัสดุเสริมกำลังซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในงานถนน คือ การใช้แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) ในการเสริมกำลัง วัสดุเสริมกำลังสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรง ลดการทรุดตัวของโครงสร้างชั้นทางในงานถนน โดยช่วยให้ถนนมีความสามารถที่จะรับน้ำหนักได้มากขึ้น รวมถึงมีส่วนช่วยที่จะทำให้ถนนเกิดเสถียรภาพมากขึ้น และ ช่วยยืดอายุการใช้งานของถนนเพิ่มขึ้น

เนื่องจากสภาพเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศไทยกำลังตกต่ำ ส่งผลทำให้ราคาของยางพาราและผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจากยางพาราที่ซื้อ-ขายในประเทศไทย มีแนวโน้มของราคาที่ลดลงอย่างมากในช่วงระหว่างปี.ศ. 2554 จนถึงปัจจุบัน นับเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกษตรกรบางส่วนมีรายได้ลดลง

จากการศึกษาก่อนหน้าของ Chaiyaput et al. (2022) ได้มีการนำผลิตภัณฑ์จากยางพารามาประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรม เพื่อทำเป็นวัสดุช่วยในการเสริมกำลังภายในถนนโดยนำมาประยุกต์ใช้ให้ออกมาในรูปแบบแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) และ ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารวมควันพบว่าประสิทธิภาพการเสริมกำลังดินของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารวมควันจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังของดินที่มีค่าค่าแคลิฟอร์เนียแบร์ริง เรโซ (California Bearing Ratio, CBR) หรือกำลังรับน้ำหนักต่ำ

งานวิจัยนี้จึงได้นำแผ่นยางพารารวมควันจากการศึกษาเบื้องต้นที่เป็นการทดสอบเพียงในห้องปฏิบัติการเท่านั้น และ ยังไม่มีการทดสอบภายในสนาม พร้อมกับนำแผ่นยางพาราคอมปาวด์มาใช้ภายในการทดสอบนี้ด้วยเนื่องจากการศึกษาเบื้องต้นแผ่นยางพารารวมควันนั้นเสริมกำลังได้แต่ยังไม่มากพอจึงได้ใช้แผ่นยางคอมปาวด์ในงานวิจัยนี้ โดยการทดสอบของงานวิจัยนี้สร้างสนามทดสอบเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นยางพารารวมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ที่เกิดขึ้นภายในสนามทดสอบ

#### 1.2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารวมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์ในสนาม
2. เปรียบเทียบ อัตราการทรุดตัว (Settlement) และค่าความลึกร่องล้อ (Rut depth) ของคันดิน

ในบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์กับคันดินในบริเวณที่ไม่เสริมกำลัง

### 1.3. ขอบเขตงานวิจัย

1. แผ่นยางพาราที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แผ่นยางพารารมควันชั้น 3 และแผ่นยางพาราคอมปาวด์
2. แผ่นยางพารารมควันชั้น 3 และแผ่นยางคอมปาวด์ที่นำมาใช้จะมีลักษณะตามที่กำหนด
  - ตัดเป็นตาข่ายที่มีช่องเปิด 2 เซนติเมตร × 2 เซนติเมตรและเว้นช่องว่าง 2 เซนติเมตร
3. ไม่ศึกษาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์
4. ไม่ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
5. ศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังของแผ่นยางพาราในคันดินทรายเท่านั้น

### 1.4. ขั้นตอนของการศึกษา

ศึกษาประสิทธิภาพของการเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์ในสนาม โดยการศึกษารวบรวมวรรณกรรมทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อทราบถึงข้อมูลต่าง ๆ ที่สามารถนำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงในงานวิจัยได้ ทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆที่ได้ศึกษามา จากนั้นนำข้อมูลมาทำการออกแบบสนามทดสอบและวิธีการทดสอบ การทดสอบในสนามจะทำการเก็บข้อมูลการทดสอบ ดังนี้ อัตราการทรุดตัว (Settlement) และ ค่าความลึกร่องล้อ (Rutting depth)

เมื่อเสร็จสิ้นการก่อสร้างสนามทดสอบ จำลองพฤติกรรมของรถบนถนนด้วยการนำวัตถุจำลองที่มีน้ำหนัก 160 กิโลกรัม (เทียบเท่าน้ำหนักของรถจักรยานยนต์ที่ Honda all new scoopy i ปี 2018 ที่มีน้ำหนัก 98 กิโลกรัม (บริษัท ไทยฮอนด้า จำกัด, 2018) และน้ำหนักมาตรฐานของคนไทยโดยไม่ระบุเพศ จะอยู่ที่ประมาณ 63.2 กิโลกรัม (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2551) บรรทุกรวมกัน) ผ่านบนสนามทดสอบจำนวน 250 รอบ เพื่อจำลองพฤติกรรมของรถบนถนน เมื่อทดสอบเสร็จสิ้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ ประมวลผล และ สรุปผลเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังจากแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์ในสนาม

### 1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพในการเสริมกำลังของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์ที่เกิดขึ้นภายในสนามทดสอบ

## 1.6. คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

1. ยาง RSS-3 หมายถึงแผ่นยางพารารมควันชั้น 3 ที่ถูกนำมาใช้เป็นตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยมีขนาดช่องเปิดขนาด 2 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตรและเว้นช่องว่าง 2 เซนติเมตร
2. ยาง CR หมายถึง แผ่นยางพาราคอมปาวด์ที่ถูกนำมาใช้เป็นตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยมีขนาดช่องเปิดขนาด 2 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตรและเว้นช่องว่าง 2 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

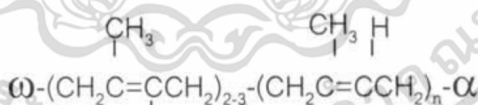
## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1. ยางพารา

##### 2.1.1 ยางพาราดิบและส่วนประกอบของน้ำยาง

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) โดยมีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.1 เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้มีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub> มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวประมาณ 50,000 หน่วย แบบเส้นตรงใน 1 หน่วยไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และหมู่อัลฟาเมทิลีนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถันและเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเช่นเดียวกัน ยางธรรมชาติมีสายโซ่ที่เคลื่อนไหวทงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดีมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ -72 °C สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมากสำหรับความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติดังรูปที่ 2.1 สามารถตกผลึกได้เมื่อยืด เนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาดการขีดถูสูงขึ้น ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรงจะต้องมีการบดอย่างก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ (การยางแห่งประเทศไทย, 2561)

โดย  $\omega$  และ  $\alpha$  เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ปลายโมเลกุลที่มีสมมติฐานว่าเป็นโปรตีนและกรดไขมันตามลำดับ

น้ำยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวเหมือนน้ำนม มีสภาพเป็นคอลลอยด์หรือสารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความถ่วงจำเพาะ 0.92 กรัมต่อ ลบ.ซม. มีค่า pH ประมาณ 6.5 - 7.0 มีความหนืดประมาณ 12 - 15 เซนติพอยส์ (centipoises) เป็นสารที่ไม่

บริสุทธิ์ มีปริมาณของเนื้อยางแห้งระหว่าง 25 - 45% ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งทั้งหมดและส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้งประมาณ 3 % น้ำยางสดเมื่อนำมาปั่นด้วยความเร็วสูง 20,000 รอบต่อนาที น้ำยางจะแยกออกได้ 4 ส่วนดังนี้ 1. ส่วนของเนื้อยางแห้ง 2. อนุภาคเพอร์ย-วิสลิง 3. เซรุ่ม และ 4. ตะกอนสีเหลืองหรือขาวที่เรียกรวมสารพวกกลูทอยด์ (การยางแห่งประเทศไทย, 2561)

### 2.1.2 การผลิตแผ่นยางรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

การรมควันเป็นการแปรรูปยางโดยใช้ความร้อนและควันด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้ยางแผ่นแห้ง นอกจากนี้จะเป็นการลดความชื้นในแผ่นยางแล้วยางที่ผ่านการรมควันจะมีความยืดหยุ่นเหมาะสมกับการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้วสารจากควันไฟยังช่วยป้องกันการเกิดรา ซึ่งเป็นตำหนิชนิดหนึ่งในการจัดชั้นยาง การผลิตยางแผ่นรมควันทำได้ 2 วิธี คือเริ่มจากการนำน้ำยางสดจับตัวรีดเป็นแผ่น จากนั้นผึ่งให้สะเก็ดน้ำแล้วนำเข้าห้องรมควัน อีกวิธีคือเริ่มจากนำยางแผ่นดิบมาล้างด้วยเครื่องล้างแล้วนำไปรมควัน

ในส่วนขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการกรองน้ำยางสดโดยใช้ตะแกรงกรองเบอร์ 60 เพื่อกรองสิ่งปนเปื้อนที่อาจติดมากับน้ำยางได้ หากน้ำยางเริ่มเสียสภาพ ไม่ควรนำมาปะปนกับน้ำยางที่ยังสด เพราะจะทำให้ยางมีรอยตำหนิได้

#### วิธีการผลิตยางแผ่นดิบเพื่อนำไปผลิตยางแผ่นรมควัน

การยางแห่งประเทศไทย (2561) ได้ระบุว่าขั้นตอนการทำยางแผ่นดิบจะต้องทำอย่างระมัดระวัง มิเช่นนั้นจะทำให้ยางแผ่นรมควันที่ผลิตออกมามีรอยตำหนิและเกิดของเสีย ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น และต้องใส่ใจเรื่องอุปกรณ์การผลิตจะต้องสะอาดและพร้อมใช้งาน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เติมน้ำในตะกั้งจับตัวยางที่ได้คำนวณปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC) ที่เจือจางแล้ว ตามสูตรที่กำหนดจนได้ระดับที่ต้องการ
2. กวนน้ำยางสดในบ่อรวมยางที่หา DRC รวมแล้ว ให้เข้ากัน จากนั้นปล่อยลงตะกั้งที่ได้เติมน้ำสะอาดไว้แล้ว จนได้ระดับที่ต้องการด้วยการผ่านตะแกรงกรองขนาด 100 เมช
3. กวนน้ำกับน้ำยางให้เข้ากัน
4. กวาดฟองออกให้เกือบหมด
5. ค่อย ๆ เทสารละลายกรดฟอร์มิคที่เจือจางแล้วเข้มข้น 4% ในอัตรา 0.6% ต่อปริมาณเนื้อยางแห้งจนทั่วตะกั้ง
6. กวนสารละลายกรดฟอร์มิคเจือจางกับน้ำยางในให้เข้ากันช้า ๆ ไปมา 15 ครั้ง
7. กวาดฟองออกให้หมด ด้วยการไล่ฟองอากาศไปข้างใดข้างหนึ่งของตะกั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการเสียบแผ่นเริ่มจากกึ่งส่วนบริเวณที่ยังคงมีฟองอากาศหลงเหลืออยู่ เสียบแผ่นตรงกลางของตะก และทยอยเสียบโดยกะให้มีระยะห่างของการเสียบเท่า ๆ กัน จนหมดแผ่นเสียบ โดยในระหว่าง การเสียบแผ่นจะต้องกวาดฟองอากาศให้หมด
9. ปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 45 นาที
10. ใช้นิ้วแตะผิวหน้ายาง หากน้ำยางไม่ติดนิ้ว ให้ทำการหล่อน้ำที่เพื่อป้องกันผิวหน้ายางมีสีคล้ำ
11. ปล่อยทิ้งไว้อีกประมาณ 1.30 ชั่วโมง เพื่อให้ยางจับตัวสมบูรณ์
12. เติมน้ำในตะกจนท่วม ดึงแผ่นเสียบออกและยกแผ่นยางออกจากตะกไว้ในบ่อที่มีน้ำหล่อเต็มเพื่อเตรียมการรีดแผ่น ให้เรียงแผ่นยางเพื่อสะดวกในการหยิบแผ่นยางเข้าเครื่องรีด
13. ทำการรีดยางทีละแผ่นผ่านเครื่องจักรรีดยางที่มีน้ำหล่อผ่าน ลงในบ่อล้างยางหลังรีดที่มีน้ำไหลผ่านตลอดระยะเวลาการรีด
14. พาดยางบนไม้ราวที่สะอาด เรียงบนรถตากยางให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน
15. ผึ่งจนยางสะอาดดีน้ำ
16. สางยางทุกแผ่นเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นยางติดกัน
17. นำเข้าห้องรมควัน

### วิธีการรมควัน

การรมควันเป็นเทคนิคการใช้ความร้อนและควัน เพื่อทำให้แผ่นยางแห้งด้วยการควบคุม อุณหภูมิ และควันในระดับที่เหมาะสม นอกจากจะเป็นการลดความชื้นในแผ่นยางแล้ว ยางที่ผ่านการรมควันจะมีความยืดหยุ่นสูง สารจากควันไฟยังช่วยป้องกันการเกิดเชื้อรา การควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม ความร้อนไม่เกิน 60°C เริ่มจากอุ่นเตาให้ร้อนก่อนประมาณ 45°C ใช้เวลาครึ่งชั่วโมงเมื่อนำยางเข้ารมแล้ว ระยะแรกแผ่นยางที่มีความชื้นเฉลี่ย 30% เมื่อกระทบความร้อนน้ำจะเริ่มระเหยพร้อมกับเนื้อยางที่มีการหดตัวอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิในช่วงระยะนี้จะลดลงประมาณ 10 - 15°C อาจใช้เวลา 10 - 12 ชั่วโมง อุณหภูมิจึงจะเริ่มสูงขึ้น วันต่อมาให้เติมพินรักษาอุณหภูมิในห้องไว้ประมาณ 50°C และเพิ่มเป็น 55 - 60°C ในวันที่ 3 - 4 ลดอุณหภูมิก่อนยางแห้งสนิท โดยไม่ต้องเติมพินอีก ใช้ความร้อนที่ระอุอยู่ทำให้แผ่นยางแห้งสนิทประมาณ 1 - 3 ชม.

### 2.1.3 แผ่นยางคอมปาวด์

แผ่นยางคอมปาวด์ คือ ยางที่มีการผสมสารเคมีเพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ และทางเคมีของยาง เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดประสงค์ในการพัฒนาคุณสมบัติของแผ่นยางธรรมชาติ เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบโจทย์การใช้งานตามความต้องการ เช่น ยางล้อ ถู่มือยาง ยางรองคอสะพาน ท่อยาง ยางรัดของ แผ่นยางพื้นรองเท้า เป็นต้น การจะผลิตแผ่นยางคอมปาวด์ต้องอาศัยเทคโนโลยีเข้ามาช่วยไม่ว่าจะเป็นการออกแบบสูตรเคมียาง และการผสมยางเพื่อให้ได้แผ่นยางคอมปาวด์สำหรับขึ้นรูป และคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยทั่วไปส่วนผสมหลักของแผ่นยางคอมปาวด์จะประกอบด้วย

1. ยาง ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber; SR) ยางผสม (Blends) หรือยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer; TPE)
2. สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)
3. สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator)
4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)
5. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)
6. สารตัวเติม (Aillers)
7. สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and processing aids)
8. สารอื่นๆ เช่น สี (Pigments) สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) และสารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แผ่นยางคอมปาวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแผนผังคอมปาวด์ในงานวิจัยนี้ได้ผสมสารเคมีที่แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรยางคอมปาวด์

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr*)
แผนผังพารามควันชนิดที่ 3 (RSS3)	100
ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	3
กรดสเตียริก (Stearic acid)	1
ไดเมทิลบิวทิลฟีนิลลีนไดเอมีน (6PPD)	1
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO <sub>3</sub> )	50
เขม่าดำ (Carbon black)	50
ซิลิกา (Silica)	5
โพลีเอทิลีน ไกลคอล ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4000 (PEG4000)	1
น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil)	30
กำมะถัน (Sulfur)	2
ไซโคลเฮกซิลเบนโซโธอะโซลซัลฟิनाไมด์ (CBS)	1.5
<b>Total phr*</b>	<b>244.5</b>

\*phr (part per hundred of rubber) หมายถึง หน่วยการผสมยางโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่างๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก)

ซึ่งสารผสมแต่ละชนิดที่ใช้ในการสร้างแผนผังคอมปาวด์สำหรับสร้างตาข่ายเสริมดินกำลังในการศึกษานี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแผนผังพารามควันดังต่อไปนี้ (สถาบันพลาสติก, 2015)

1. ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ การวัลคาไนซ์คือ การที่ยางทำปฏิกิริยากับกำมะถันในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน โดยกำมะถันที่นำมาทำปฏิกิริยาดังนี้ จะสร้างพันธะโคเวเลนต์เชื่อมระหว่างโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเดียวกัน ทำให้ยางมีคุณภาพคงตัวในอุณหภูมิต่าง ๆ มีความยืดหยุ่นได้ดีมากขึ้น ทนความร้อนและแสงแดด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไตเมทิลบิวทิวฟีนิลลีนไดเอมีน เป็นส่วนผสมเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งาน และป้องกันการเสื่อมสภาพของแผ่นยางคอมปาวด์

3. แคลเซียมคาร์บอเนต ใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อทำให้ซิลิกาแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่งผลต่อการลดลงของต้นทุน และเพิ่มความง่ายในการผลิต

4. เขม่าดำ เป็นสารตัวเติม โดยการกระจายตัวของอนุภาคของเขม่าดำในแผ่นยาง มีผลในการเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

5. ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่มีคุณสมบัติในการเสริมแรงให้แกยาง แต่จะมีผลต่อการหน่วงการวัลคาไนซ์ของยางทำให้ต้องใส่ซิลิกาปริมาณน้อยในการเสริมแรงของยาง

6. โพลีเอทิลีน ไกลคอล เป็นสารเคมีตัวเติมที่เพื่อใช้แก้ปัญหาคารวัลคาไนซ์ได้ช้าลงของยางที่เป็นผลมาจากการเติม ซิลิกา

7. น้ำมันพาราฟิน มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายน้ำมันพาราฟินนิกแต่มีน้าหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็ง ไซพาราฟินเกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือมีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่มหรือเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตได้ ส่วนไซพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน

8. กำมะถัน เป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี

9. โซโคลเฮกซิลเบนโซโธอะโซลซัลฟิनाไมด์ สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูง และให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้นยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง

สารผสม และสารตัวเติมที่ใช้ส่งผลให้คุณสมบัติของแผ่นยางคอมปาวด์แตกต่างไปจากแผ่นยางพารารวมควัน โดยคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปได้แก่ แผ่นยางคอมปาวด์มีความแข็งแรงมากขึ้น กำลังรับแรงดึงสูงขึ้น มีความทนทาน และอายุการใช้งานที่สูงขึ้น

## 2.2. แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid)

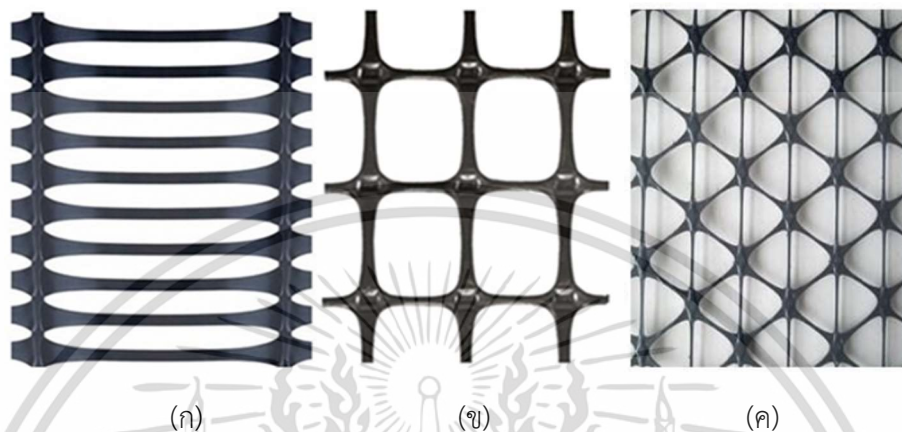
แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrids) ผลิตครั้งแรก ณ ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1982 โดยในช่วงแรกผลิตจากวัสดุประเภทพอลิเอสเตอร์ ด้วยการนำเส้นใยสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น พลาสติก มาสานกัน ต่อมาจึงมีการพัฒนาสารเคลือบผิวและวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแถบพลาสติก ปัจจุบันแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินผลิตจากการประสานเส้นใยพลาสติกชนิดรับแรงดึง (Tensile) สูง ความคืบ (Creep) และการยืดตัว (Elongation) ต่ำ เช่น พอลิเอสเตอร์ พอลิโพรไพลีน หรือพอลิเอทิลีน และเคลือบเส้นใยด้วยวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เพื่อป้องกันการถูกทำลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงแดด กระบวนการผลิตแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน มีหลายวิธี เช่น การเชื่อมแบบวัสดุเส้นใยพลาสติกด้วยความร้อน การถักทอ ในลักษณะเดียวกับการถักทอแผ่นใยสังเคราะห์ การถักทอด้วยเส้นด้าย และการเจาะรูแผ่นวัสดุพลาสติก แล้วยึดออกเป็นตาราง เป็นต้น แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินมีลักษณะเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิด (Apertures) ประกอบไปด้วยแถบวัสดุตามแนวยาว (Longitudinal Ribs) และแถบวัสดุตามแนวขวาง (Transverse Ribs) ไขว้กัน เพื่อให้ดินลอดผ่านได้ มีขนาด ตั้งแต่ 10 ถึง 100 มิลลิเมตร พื้นที่ของช่องเปิดอยู่ในช่วงร้อยละ 40 ถึง ร้อยละ 90 ของพื้นที่ทั้งหมด ช่องเปิดถูกออกแบบเพื่อช่วยเสริมกำลังให้ดินมีความแข็งแรง มีประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับดิน มีความสามารถในการรับแรงเฉือนในชั้นดิน เนื่องจากกลไกการยึดเกาะระหว่างช่องเปิดของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินกับดิน (Interlock) แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินมีคุณลักษณะพิเศษ ใช้ในการช่วยรับแรงดึงที่กระทำกับดิน เช่นเดียวกับเหล็กเสริม ที่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าความเครียด (Strain) ใกล้เคียงกับดิน เหมาะสมกับงานประเภท เสริมกำลังในกำแพงกันดิน หรือลาดดิน ตลอดจนเสริมกำลังของโครงสร้างทาง เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง (Stiffness) ให้กับโครงสร้างที่เกิดหน่วยแรงดึงขึ้น เมื่อมีน้ำหนักจากยานพาหนะมากระทำ เช่น งานถนน ทางรถไฟ หรือพื้นสนามบิน เสริมใต้ฐานเขื่อนเพื่อป้องกัน หรือลดการกัดเซาะ และเสริมกำลังกระจายน้ำหนักเหนือเข็มกลุ่ม ในงานฐานราก เป็นต้น (ศลิษา, 2565)

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrids) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามแนวการรับแรงดึงนี้

1. แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบทางเดียว (Uniaxial Geogrid)
  - ลักษณะช่องเปิดจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 2.3 ก และจะรับแรงดึงได้เพียงทิศทางเดียว เหมาะสำหรับการก่อสร้างกำแพงกันดิน เสริมกำลังความลาดชันในงานเขื่อน เป็นต้น
2. แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบสองทาง (Biaxial Geogrid)
  - ลักษณะช่องเปิดจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 2.3 ข และจะรับแรงดึงได้ 2 ทิศทาง เหมาะสำหรับการก่อสร้างถนน ลาดดิน เป็นต้น

### 3. แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบสามทาง (Triaxial Geogrid)

- ลักษณะช่องเปิดจะเป็นสามเหลี่ยม มุมภายใน 60 องศา ดังรูปที่ 2.3 ค และจะรับแรงดึงได้ 3 ทิศทาง เหมาะสำหรับการก่อสร้างทางรถไฟ เป็นต้น



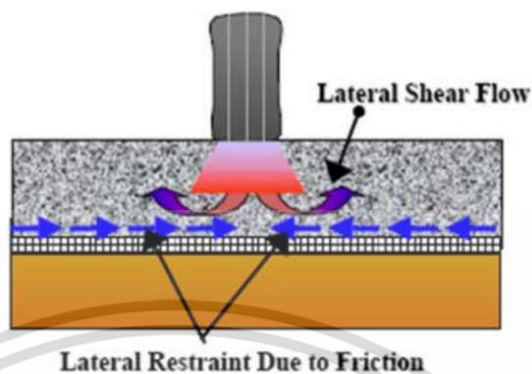
รูปที่ 2.3 ลักษณะของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแต่ละแบบ ก. Uniaxial Geogrid ข. Biaxial Geogrid ค. Triaxial Geogrid (Happho Solutions Vmart Private Limited, 2018)

### 2.3. หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน

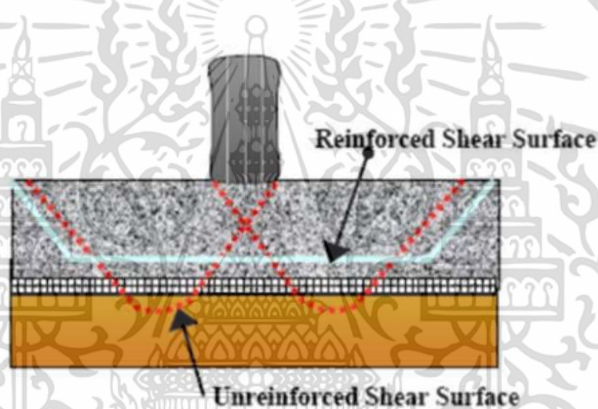
แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) ทำหน้าที่ช่วยเสริมกำลังรับแรงในถนนโดยจะมีกลไกดังนี้

1. ลดการเคลื่อนตัวออกด้านข้าง (Lateral restraint)
2. เพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของระบบ (Bearing capacity increase)
3. แรงดึงที่เกิดจากวัสดุเสริมกำลัง (Membrane tension effect)

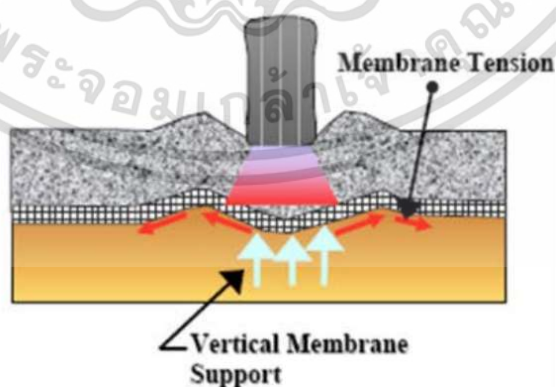
โดยรูปที่ 2.4, 2.5 และ 2.6 จะแสดงลักษณะการกระจายแรงในแต่ละหน้าที่ตามลำดับ (Haliburton et al., 1981; Giroud et al., 1984; Koerner, 1997; Christopher, 2010)



รูปที่ 2.4 การลดการเคลื่อนตัวของออกด้านข้าง (Lateral restraint) (Holtz et al., 1998)



รูปที่ 2.5 การเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของระบบ (Bearing capacity increase) (Holtz et al., 1998)



รูปที่ 2.6 การรองแรงดึงที่เกิดจากวัสดุเสริมกำลัง (Membrane tension effect) (Holtz et al., 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

### 2.4.1 วิธีร่อนผ่านตะแกรง

วิธีการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) เป็นการวิเคราะห์ดินเม็ดหยาบคือดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 สามารถหาขนาดเม็ดดินได้โดยการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ ซึ่งวางเรียงลำดับโดยให้ตะแกรงย่อยที่สุดอยู่ข้างบนและตะแกรงละเอียดที่สุดอยู่ข้างล่างแล้วหาเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรงแต่วิธีนี้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้นเพราะรูปร่างขนาดเม็ดดินมีความแตกต่างกัน ไม่ใช่กลมหรือลูกบาศก์แต่เป็นเหลี่ยมแหลมไปตามธรรมชาติส่วนเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 จะใช้การทดสอบด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะเกี่ยวเนื่องกันเมื่อได้ผลแล้วต้องนำผลทั้ง 2 วิธีมาเขียนกราฟการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินต่อไปในการวิเคราะห์การกระจายตัวของเม็ดดินโดยทั่วไปขนาดของเม็ดดินกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดดิน (Diameter) ที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าที่ระบุหรือเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรงค่าต่าง ๆ จะถูกนำมาเขียนกราฟมากกว่าการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางบันทึกผล

### 2.4.2 การบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test) คือ การศึกษาหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) เนื่องจากในระหว่างการก่อสร้างจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพงานบดอัดดิน เพื่อตรวจสอบว่าชั้นดิน ในโครงการก่อสร้างมีความหนาแน่นเพียงพอ และมีคุณภาพเหมาะสมเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงต้องมีการนำตัวอย่างดินซึ่งเป็นดินที่มาจากแหล่งเดียวกับที่ใช้ในโครงการก่อสร้างมาทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ และนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการบดอัดดินในสนาม ในปี ค.ศ. 1930 Proctor ได้พัฒนาทฤษฎีการบดอัดดิน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของความชื้นและความหนาแน่น ของดิน ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในการทดสอบการบดอัดดิน ในห้องปฏิบัติการมาจนถึงปัจจุบัน เรียกวิธีนี้ว่า วิธีการทดสอบแบบมาตรฐานของพรอคเตอร์หรือนิยมเรียกว่า วิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน

วิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโยธาทั่วไป แต่ในปัจจุบันยานพาหนะได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับโครงการก่อสร้างต่าง ๆ มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้ดินที่นำมาบดอัดในโครงการก่อสร้างต่าง ๆ ต้องรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการพัฒนาวิธีการทดสอบที่เรียกว่า วิธีการทดสอบแบบดัดแปลงของพรอคเตอร์ หรือนิยมเรียกว่า วิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยเพิ่มพลังงานในการบดอัดดินให้สูงขึ้น เพื่อให้สอดคล้อง

กับน้ำหนักของยานพาหนะและโครงสร้างที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น สามารถนำไปเปรียบเทียบกับ การบดอัดดิน ในสนามได้ ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบ วิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) และ วิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) (ศลิษา, 2562)

**ตารางที่ 2.2** ตารางเปรียบเทียบวิธีการทดลองแบบมาตรฐาน และวิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน

วิธีการทดสอบ	วิธีการทดสอบแบบ	วิธีการทดสอบแบบ
	มาตรฐาน	สูงกว่ามาตรฐาน
น้ำหนักตัมกระแทก	5.5	10
ระยะยก (นิ้ว)	12	18
จำนวนครั้งการบดอัดดินต่อชั้น	25	25
จำนวนชั้นในการบดอัดดิน	3	5
พลังงานในการบดอัดดิน (ฟุต-ปอนด์/ลบฟุต)	12,400	56,200

ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดอัดดิน คือ

1. ชนิดและขนาดคละในมวลดิน
2. ความชื้นในมวลดิน ( $W$ )
3. ความหนาแน่น ( $\gamma$ ) หรือ ความหนาแน่นแห้ง ( $\gamma_d$ )
4. พลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน ( $E$ )

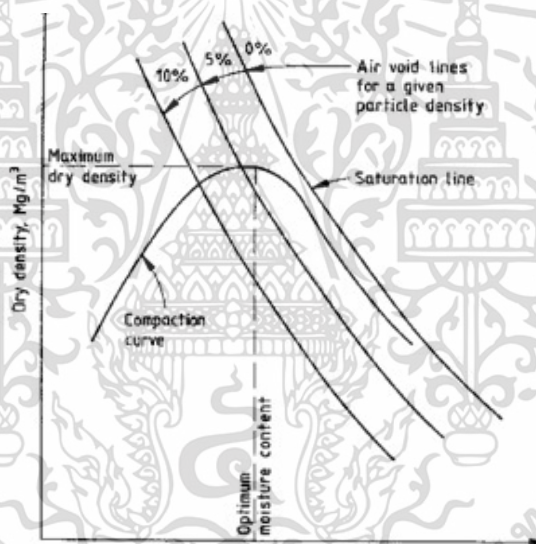
$$\text{การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน (Compaction Energy, E)} = \frac{\text{น้ำหนักตัมกระแทก} \times \text{ระยะยก} \times \text{จำนวนครั้งการบดอัดดินต่อชั้น} \times \text{จำนวนชั้นในการบดอัดดิน}}{\text{ปริมาตรของแบบใส่ตัวอย่างดิน}} \quad (2.1)$$

### 2.4.3 ทฤษฎีการบดอัดดินของพรอคเตอร์

Proctor ได้พัฒนาทฤษฎีการบดอัดดิน ในปี ค.ศ. 1930 และตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือเอ็นจีเนียริง นิวส์ เรคคอร์ด (Engineering New Record) ในปี ค.ศ. 1933 (Proctor, 1933) ทฤษฎีดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เรียกว่า วิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพรอคเตอร์ ความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ของการบดอัดดินจะแปรผันตามปริมาณน้ำ หรือ ปริมาณความชื้นในดิน และพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (Moisture Content) และความหนาแน่นแห้ง จากการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการจะถูกนำมาพล็อต เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content หรือ OMC) ที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด เนื่องจากจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดเป็นจุดที่อนุภาคของดินเคลื่อนที่มาชิดติดกันมากที่สุด ช่องอากาศที่เหลืออยู่ภายในมวลดินจะมีปริมาณน้อยมาก จึงเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพในการบดอัดดินสูงที่สุด แต่ในทางปฏิบัติแล้วการบดอัดดินยังคงมีช่องอากาศหรือช่องว่างในมวลดินเหลืออยู่ ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ไม่สามารถกำจัดได้ทั้งหมด ดังนั้น เส้นโค้งการบดอัดดิน จึงไม่ตัดกับเส้นโค้งปราศจากอากาศที่ช่องอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Voids Curve) หรือเรียกว่า เส้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation Line,  $S = 100\%$ ) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการบดอัดดิน (flatGEO Consulting Company Limited, 2015)

จากเส้นโค้งการบดอัดดินพบว่าเส้นโค้งแบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ 1. ด้านแห้ง (Dry Side) และ 2. ด้านเปียก (Wet Side) สำหรับด้านแห้งจะมีแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินที่สูงจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) ทำให้ยากต่อการบดอัดดิน เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในดิน ความหนาแน่นแห้งของดินจะค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากน้ำในดินทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น ช่วยลดแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารีที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เม็ดดินเคลื่อนตัวเข้าไปแทรกระหว่างกันได้ง่ายเม็ดดินจัดเรียงตัวกันใหม่ ช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นของดินเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ซึ่งเป็นจุดที่มีความชื้นเหมาะสมที่สุด (จุดยอดของเส้นโค้งการบดอัดดิน) ในทาง

ตรงกันข้ามเมื่อปริมาณความชื้นในดินเพิ่มมากขึ้นเกินปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ความหนาแน่นแห้งจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำส่วนเกินจะเข้าไปแทนที่เม็ดดิน และแทรกอยู่ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ด้านดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ด้านเปียก และเมื่อปริมาณความชื้นในดินสูงขึ้นมาก ๆ พบว่า ดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ไม่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป

#### 2.4.4 การบดอัดดินระดับตื้น (Shallow Compaction)

การบดอัดดินระดับตื้น หรือการบดอัดดินที่ผิวดิน (Shallow Compaction หรือ Surface Compaction) เป็นการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินตื้นจากผิวดินลงไปประมาณ 10-30 เซนติเมตร วิธีนี้เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินที่ง่าย และราคาถูก เนื่องจากงานทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น งานถนน งานเชื่อม งานระบบสาธารณูปโภค และโครงสร้างพื้นฐาน จำเป็นต้องปรับระดับพื้นที่ก่อนการก่อสร้าง แทบทั้งสิ้น ทำให้ต้องควบคุมการบดอัดดินในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างให้มีค่าความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับผลทดสอบที่ได้ในห้องปฏิบัติการ หลายหน่วยงาน อาทิ กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท กรมโยธาธิการ และผังเมือง จำเป็น มีข้อกำหนดเพ่งควบคุมคุณภาพของงานบดอัดดินของแต่ละโครงการ เช่น การกำหนดความหนาแน่นแห้งที่ใช้ในสนามต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการเดินในห้องปฏิบัติการ และปริมาณความชื้นในดินต้องมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ  $\pm 2$  ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ( $\pm 2$  %OMC) เป็นต้น

เครื่องจักรที่ใช้ในการบดอัดดินระดับตื้น แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

เครื่องจักรขนาดเล็ก (Light Soil Compaction) เหมาะสำหรับบดอัดดินในบริเวณพื้นที่ ขนาดเล็ก และแคบเฉพาะจุด ได้แก่

- เครื่องตบสั่นสะเทือนแบบเรียบ (Vibrating Plate Compactors) เป็นเครื่องจักรขนาดเล็ก ใช้แรงสั่นสะเทือนในการบดอัดดิน เหมาะกับการปรับระดับดินให้เรียบก่อนจะปูพื้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องตบสันสະเทือนแบบเรียบ (สลีซา, 2565)

- เครื่องกระท่ง (Rammer) เป็นเครื่องจักรขนาดเล็กให้แรงโดยการกระแทก ทำให้สามารถตบอัดดินได้แน่นกว่าเครื่องตบสันสະเทือนแบบเรียบ ใช้กับพื้นที่ ที่มีขนาดเล็กมาก เหมาะกับดินประเภท กรวด และ ทราย ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องกระท่ง (สลีซา, 2565)

การบดอัดดินในพื้นที่เล็ก และแคบ โดยใช้เครื่องจักรขนาดเล็ก ควรใช้เครื่องจักรทั้งสองประเภทควบคู่กันไป เนื่องจากแรงกระแทกของเครื่องกระท่ง มีประสิทธิภาพในการบดอัดดินให้มีความหนาแน่นตามต้องการ ลดปัญหาการทรุดตัว และรอยร้าวของพื้นดินที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต หลังจากนั้นจึงปรับระดับ พื้นให้เรียบด้วยเครื่องตบสันสະเทือนแบบเรียบ บางครั้ง ว่าในการก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น การซ่อมแซมถนนส่วนที่เป็นหลุมจะใช้เครื่องตบกันสะเทือนแบบเรียบเพียงประเภทเดียว ซึ่งไม่ได้รับแรงกระแทกจากเครื่องกระทุ้ง ก่อนทำการปูพื้นผิวลาดยาง ส่งผลให้ถนนลาดยางเกิดปัญหา การทรุดตัวเป็นหลุมเป็นบ่อในระยะเวลาเพียงไม่นาน

ต่อมาเครื่องจักรขนาดใหญ่ (Heavy Soil Compaction) ลักษณะการทำงานของรถบดอัดดินในสนามจะเป็นแบบนวด (Kneading) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องจักรขนาดใหญ่ (Heavy Soil Compaction) (ห้างหุ้นส่วนจำกัด ควอลิเทค อีควิปเมนต์, 2018)

โดยพลังงานการบดอัดดินจะแปรผันตรง กับจำนวนเที่ยวของรถบดอัดที่วิ่งในสนาม หากจำนวนเที่ยวของการบดอัดดินมาก พลังงานที่ได้รับในการบดอัดดินก็จะมีมากขึ้น โดยรถบดอัดดินสามารถพบเห็นได้ทั่วไป ในสถานที่ก่อสร้าง เช่น การก่อสร้างถนน เขื่อน และ กำแพงกันดินเสริมกำลัง เป็นต้น ซึ่งเครื่องจักรขนาดใหญ่ สามารถแบ่งประเภทการใช้งานตามชนิดของดินที่บดอัด คือ รถบด สำหรับดินเม็ดละเอียด เช่น รถบดตีนแกะ (Sheepsfoot Roller) และรถบดสำหรับดินเม็ดหยาบ เช่น รถบดล้อยาง (Pneumatic Tyres Roller) รถบดสั่นสะเทือน (Vibratory Roller) และ รถบดล้อเหล็กผิวเรียบ (Smooth Wheeled Rollers) เป็นต้น

เนื่องจากไม่มีมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมจำนวนเที่ยวของรถบดอัด ทำให้จำนวนเที่ยว ของการเดินทางขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ขับรถบด ซึ่งจะขับรถให้มีจำนวนเที่ยวมากที่สุด เพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห่งตามที่ต้องการ จำนวนเที่ยวของการบดอัดดินมีผลอย่างมากต่อคุณภาพ การบดอัดดิน ทั้งนี้หาก

จำนวนเที่ยวของรถบดอัดดินน้อยเกินไปจะทำให้ความหนาแน่นแห้งน้อยกว่า ค่าที่ได้ในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่จำนวนเที่ยวของการบดอัดดินมากเกินไปจะส่งผลให้เกิด ความสั่นเปลือย ไม่ว่าจะเป็นการ สั่นเปลือยเวลา ค่าจ้างแรงงาน ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง และ ค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักร เป็นต้น เพื่อควบคุม ให้การบดอัดดินในสถานที่ก่อสร้าง หรือในสนามมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องตรวจสอบ ความหนาแน่นของ ดินในสนาม ซึ่งสามารถทดสอบได้หลายวิธี โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ ดังนี้

- วิธีทดสอบตัวอย่างแปลงสภาพ (Disturbed Specimen Methods) ได้แก่ วิธีแทนที่ด้วยน้ำมัน (Oil Replacement Method) วิธีบัลลูนน้ำ (Water Balloon Method) และ วิธีแทนที่ด้วยทราย หรือ วิธีกรวยทราย (Sand Replacement Method or Sand Cone Method) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์วิธีแทนที่ด้วยทราย (Sand Cone Method) (บริษัท แอลจีทูลส์ จำกัด, 2556)

- วิธีทดสอบตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Specimen Methods) ได้แก่ วิธีการเจาะแกน (Core-Cutter Method) วิธีแทนที่ด้วยน้ำ (Water Displacement Method)

- วิธีนิวเคลียร์ (Nuclear Method) ด้วยการปล่อยรังสีนิวเคลียร์ (Nuclear) ลงไปในชั้นดิน เปรียบเหมือนการหาความหนาแน่นด้วยการเอ็กซ์เรย์ (X-Ray) ชั้นดิน ภายหลังจากตรวจสอบหาความ หนาแน่นของดินในสนาม หากผู้ควบคุมงานพบว่าการบดอัดดิน ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของโครงการ หรือค่าที่ได้ ออกแบบไว้ หรือความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดิน ในสนามไม่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ จำเป็นที่จะต้องบดอัดดินใหม่ ให้ความหนาแน่นแห้งตามที่กำหนดไว้ (ศลิษา, 2565)

#### 2.4.5 การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักแบบ CBR

การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (California bearing ratio test, CBR) ถูกพัฒนาในช่วงปี ค.ศ. 1930 โดยเป็นวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่บดอัดแน่น ซึ่งการทดสอบหาค่า เปอร์เซ็นต์ CBR สามารถทำการทดสอบได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการปกติจะทำการทดสอบที่จุดความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (OMC) โดยใช้เหล็กกลมตัน (penetration piston) ขนาดพื้นที่ 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที หรือ 1.25 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วนำค่าหน่วยแรงที่ได้ที่ความลึกในการกดต่าง ๆ ใหญ่ถือว่าเป็น test unit stress และนำไปหาอัตราส่วนกับค่าหน่วยแรงมาตรฐาน standard unit stress ที่การยุบตัวเดียวกัน (สมการที่ 2.2) โดยหน่วยแรงมาตรฐาน นั้นได้จากการทดสอบตัวอย่างหินคลุกที่กำหนดโดย California Division of Highways และกำหนดให้มีค่าเป็นมาตรฐานตามตารางที่ 2.3

$$\text{CBR} = \frac{\text{Test unit stress}}{\text{standard unit stress}} \times 100\% \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.3 ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Stress) ที่ความลึกในการกด (Penetration) ต่างๆ

Penetration		Standard Unit Stress	
mm.	in.	MPa	psi
2.5	0.10	6.9	1000
5.0	0.20	10.3	1500
7.5	0.30	13.0	1900
10.0	0.40	16.0	2300
12.7	0.50	18.0	2600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบ CBR แบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. ทดสอบแบบแห้ง (unsoaked sample test) คือ การที่ทดสอบตัวอย่างดินที่บดอัดไว้แล้วทันที

2. ทดสอบแบบเปียก (soaked sample test) คือ การที่ทดสอบตัวอย่างดินที่บดอัดแล้วและผ่านการแช่น้ำไม่ต่ำกว่า 96 ชม. (4 วัน) หรือจนกว่าดินจะหยุดการบวมตัว (swelling) โดย ดินที่มีค่าบวมตัวสูงไม่เหมาะกับการทำถนน

โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า CBR ที่ความลึกการกดที่ 0.1 นิ้ว แต่ถ้าค่า CBR ที่ความลึก 0.2 นิ้วมีค่ามากกว่าที่ 0.1 นิ้ว จะต้องทำการทดสอบใหม่ (ปกติค่า CBR ที่ 0.1 นิ้วมีค่ามากกว่า CBR ที่ 0.2 นิ้ว) และหากทดสอบอีกครั้งแล้วยังได้ผลเหมือนเดิมก็ให้ใช้ค่าที่ 0.2 นิ้วได้ เมื่อได้คุณสมบัติ CBR ของ ดินแล้วสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินว่าเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานถนนหรือไม่และเหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุในชั้นใดของงานทางดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า CBR ที่เหมาะต่อชั้นทางต่าง ๆ

CBR no.	General rating	User	Classification system	
			Unified	AASHTO
0-3	Very poor	Subgrade	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Poor to fair	Subgrade	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Fair	Subbase	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Good	Base of Subbase	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	Excellent	Subgrade	GW, GM	A1a, A2-4, A3

## 2.5 ความเสียหายของผิวถนนและวิธีวัดความเสียหาย

ถนนที่ชำรุดเสียหายส่งผลกระทบต่อการเดินทาง ผู้ใช้เส้นทาง ความปลอดภัยและเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อการพัฒนาท้องถิ่น ข้อมูลสภาพของผิวถนนและชำรุดเสียหายของผิวถนน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการวางแผน บำรุงรักษา ปรับปรุง ซ่อมแซม และจัดสรรงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในประเทศไทยยังไม่มีกระบวนการวัด จัดเก็บข้อมูลสภาพของผิวถนนและความ

ชำรุดเสียหายอย่างเป็นระบบ ดังนั้นการสำรวจสภาพผิวถนนอย่างเป็นระบบและต่อเนื่องจึงจำเป็นต่อการพัฒนากระบวนการดังกล่าวเพื่อเพิ่มระดับการให้บริการของถนน (Level of Service) และช่วยให้อายุการใช้งานของถนนยืนยาวขึ้นซึ่งความเสียหายของสภาพถนนได้แบ่งตามชนิดความเสียหายได้ 6 ประเภทโดยมีรายละเอียดดังนี้ (โสธร, 2556)

### 2.5.1. หลุมบ่อ (Pothole)

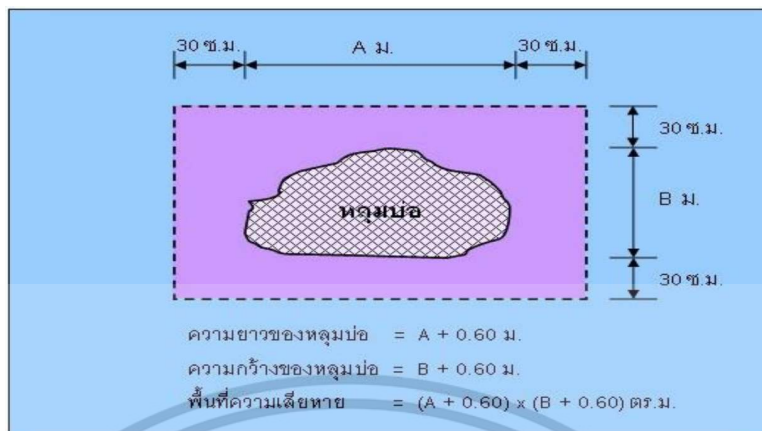
มีลักษณะเป็นหลุมคล้ายขามลงไปถึงผิวและพื้นทาง โดยทั่วไปเกิดจากผิวทางและพื้นทางที่ไม่แข็งแรงอันเนื่องมาจากแอสฟัลต์น้อยเกินไป มีวัสดุละเอียดมากเกินไปหรือน้อยเกินไปหรือจากระบบการระบายน้ำไม่ดีดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความเสียหายประเภทหลุมบ่อ (บริษัท มติชน จำกัด (มหาชน), 2559)

#### วิธีการวัดความเสียหายประเภทหลุมบ่อ

การวัดปริมาณความเสียหายประเภทหลุมบ่อจะวัดพื้นที่ความเสียหายโดยวัดความกว้างและความยาวออกจากพื้นที่เสียหายจากขอบด้านละ 30 เซนติเมตร และสรุปพื้นที่ความเสียหายเป็นหน่วยตารางเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การวัดความเสียหายประเภทหลุมบ่อ (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

### 2.5.2. ร่องล้อ (Rutting)

เกิดจากการบดอัดวัสดุชั้นต่าง ๆ ในระหว่างการก่อสร้างไม่ดีพอหรือเกิดจากส่วนผสมไม่ดีพอ ดังนั้นเมื่อรับน้ำหนักการจราจรจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกด้านข้างของวัสดุในชั้นต่าง ๆ ได้ผิวทางหรือเกิดการเคลื่อนที่ของชั้นผิวทางเองบรรทุกน้ำหนักเกินกว่าที่กฎหมายกำหนดดังรูปที่ 2.14

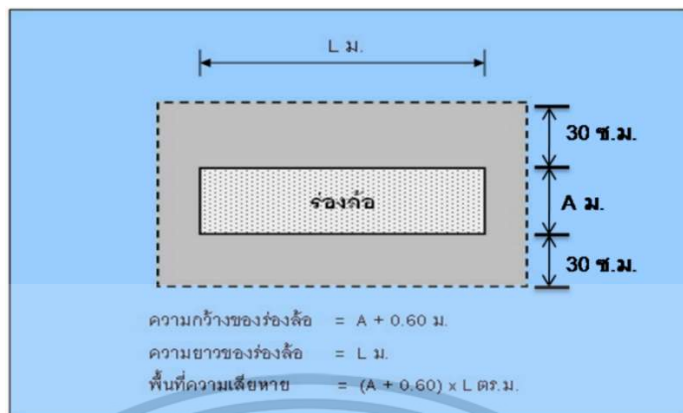


รูปที่ 2.14 ความเสียหายประเภทร่องล้อ (จตุรงค์, 2555)

### วิธีการวัดความเสียหายประเภทร่องล้อ

การวัดปริมาณความเสียหายประเภทร่องล้อให้วัดความกว้างและความยาวออกจากพื้นที่เสียหายจากขอบด้านละ 30 เซนติเมตร และสรุปปริมาณความเสียหายเป็นตารางเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.15 และวัดความลึกของร่องล้อเป็นหน่วยเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การวัดความเสียหายประเภทร่องล้อ (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

### 2.5.3. รอยปะซ่อม (Patching)

เกิดจากการซ่อมแซมผิวทางตามแนววางท่อหรือระบบสาธารณูปโภคหรือการซ่อมแซมความเสียหายบนผิวทางแล้วบดอัดวัสดุถมหลุมที่ขุดไม่ได้คุณภาพ ทำให้เกิดเป็นรอยปะซ่อมที่ไม่ได้คุณภาพและปรากฏเป็นความเสียหายส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ทางดังรูปที่ 2.16

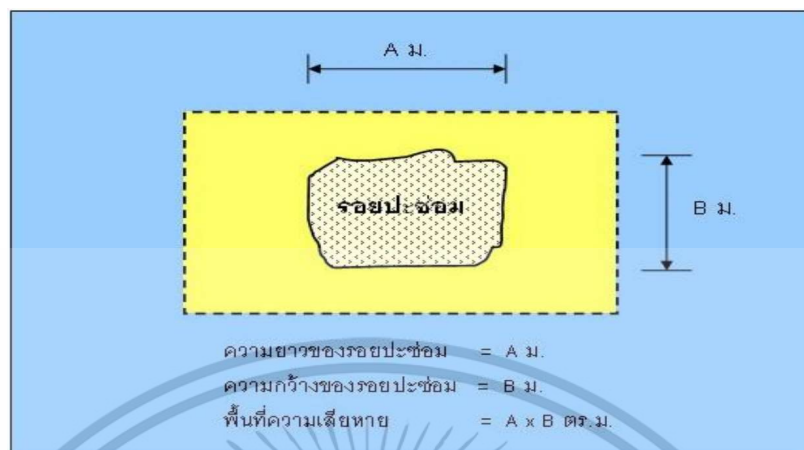


รูปที่ 2.16 ความเสียหายประเภทรอยปะซ่อม (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

### วิธีการวัดความเสียหายประเภทรอยปะซ่อม

การวัดปริมาณความเสียหายประเภทรอยปะซ่อมให้วัดความกว้างและความยาวเท่ากับพื้นที่ความเสียหายจริงและสรุปปริมาณความเสียหายเป็นตารางเมตร โดยวิธีการวัดปริมาณและตัวอย่างการวัดดังแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การวัดความเสียหายประเภทรอยปะซ่อม (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

#### 2.5.4. ผิวหน้าหลุดร่อน (Raveling)

เกิดจากวัสดุมวลรวมในผิวทางแยกตัวออกจากกันจากผิวบนลงถึงชั้นล่างหรือจากขอบพื้นทางเข้ามา โดยทั่วไปวัสดุมวลรวมที่ละเอียดหลุดออกมาก่อน เมื่อการหลุดร่อนนี้ดำเนินต่อไปวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่ค่อย ๆ หลุดออกตามผิวทางหลุดร่อนเกิดขึ้นจากการที่ไม่ได้รับการบดอัดแน่นพอหรือการก่อสร้างในขณะที่อากาศชื้นหรือเย็นหรือเกิดจากการผสมแอสฟัลต์น้อยเกินไปดังรูปที่ 2.18

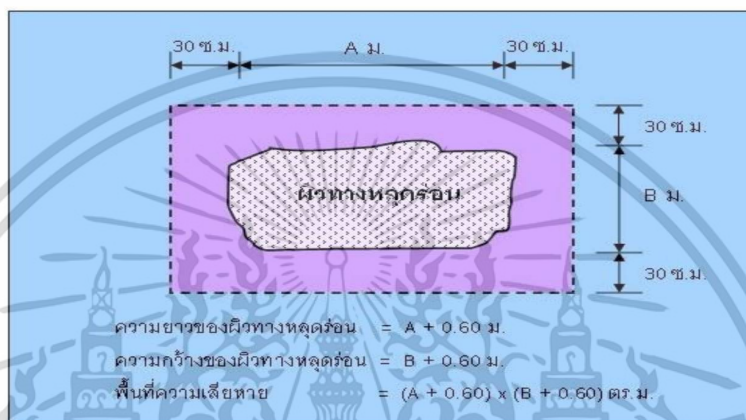


รูปที่ 2.18 ความเสียหายประเภทผิวหน้าหลุดร่อน (สำนักงานวิเคราะห์และตรวจสอบและสำนักงานบริหารบำรุงทาง, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการวัดความเสียหายประเภทผิวหน้าหลุดร่อน

การวัดปริมาณความเสียหายประเภทผิวหน้าหลุดร่อนให้วัดความกว้างและความยาวออกจากพื้นที่เสียหายจากขอบด้านละ 30 เซนติเมตร และสรุปปริมาณความเสียหายเป็นตารางเมตร โดยวิธีการวัดปริมาณและตัวอย่างการวัดความเสียหาย ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การวัดความเสียหายประเภทผิวหน้าหลุดร่อน (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

### 2.5.5. หลุมตื้นเป็นแอ่ง (Depression)

เป็นการหลุมตื้นต่ำกว่าระดับปกติ อาจมีรอยแตกร้าวรวมอยู่ด้วย เกิดจากยานพาหนะที่สัญจรมีน้ำหนักบรรทุกทุกเกินกว่าที่ได้กำหนดไว้ใน การออกแบบหรือการทรุดของพื้นทางชั้นล่างหรือการก่อสร้างที่ไม่ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 2.20

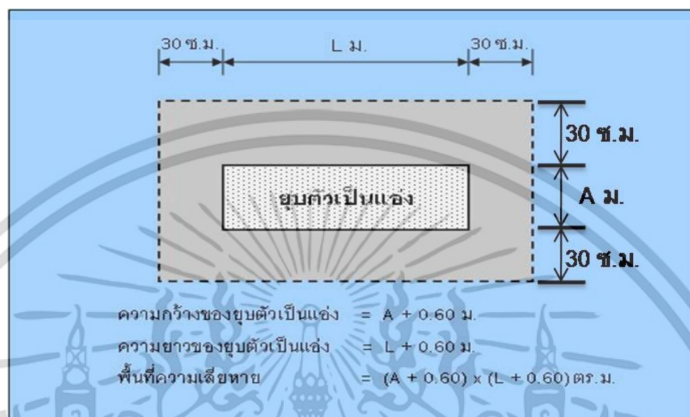


รูปที่ 2.20 ความเสียหายประเภทหลุมตื้นเป็นแอ่ง (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการวัดความเสียหายประเภททรุดตัวเป็นแอ่ง

การวัดปริมาณความเสียหายประเภททรุดตัวเป็นแอ่งให้วัดความกว้างและความยาวออกจากพื้นที่เสียหายจากขอบด้านละ 30 เซนติเมตร และสรุปปริมาณความเสียหายเป็นตารางเมตร โดยวิธีการวัดและตัวอย่างการวัดปริมาณความเสียหาย ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การวัดความเสียหายประเภททรุดตัวเป็นแอ่ง (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

### 2.5.6. รอยแตกร้าว (Crack)

ได้แบ่งประเภทความเสียหายประเภทรอยแตกร้าวออกเป็น 3 ประเภทด้วยกันดังนี้

- รอยแตกร้าวตามแนวยาว (Longitudinal crack) เกิดจากการเคลื่อนที่ทางแนวดิ่งของผิวเดิมภายใต้การเสริมผิวทางใหม่ ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวถึงชั้นบนผิวทางใหม่ หรือเกิดจากการขยายตัวและหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความเสียหายประเภทรอยแตกร้าวตามแนวยาว (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รอยแตกร้าวตามแนวขวาง (Transverse crack) หรือทางแนวราบของผิวเดิมภายใต้การเสริมผิวทางใหม่ ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวถึงชั้นบนผิวทางใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ความเสียหายประเภทรอยแตกร้าวตามแนวขวาง (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

- รอยแตกร้าวแบบหนังจระเข้ (Alligator Crack) เป็นการแตกร้าวที่ต่อเนื่องกัน มีลักษณะเป็นตารางเล็ก ๆ คล้ายหนังจระเข้หรือลวดตาข่าย เกิดจากการทรุดตัวมากเกินไปของผิวทางซึ่งอยู่บนดินคันทาง (Subgrade) หรือพื้นทางและดินคันทางอิมิตัว บางครั้งความเสียหายอาจเต็มหน้าถนนซึ่งในกรณีนี้แสดงถึงน้ำหนักรถที่ผ่านในบริเวณนั้น ๆ สูงเกินกว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของพื้นทางนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ความเสียหายประเภทรอยแตกร้าวแบบหนังจระเข้ (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

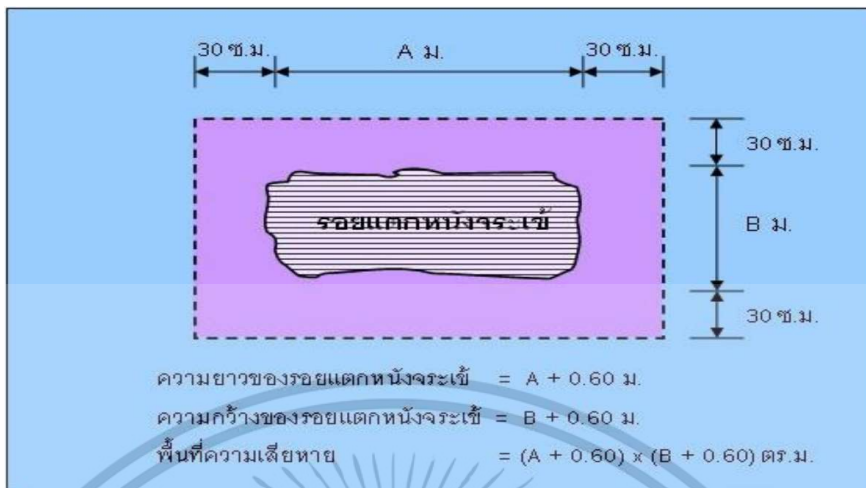
### วิธีการวัดความเสียหายประเภทรอยแตกร้าว

- รอยแตกตามแนวยาว (Longitudinal crack) และตามแนวขวาง (Transverse crack) ให้วัดออกจากพื้นที่เสียหายจริงซึ่งต้องการซ่อมบำรุง โดยจะวัดความยาวและความกว้างของพื้นที่ความเสียหายเป็นเมตร และสรุปปริมาณความเสียหายเป็นตารางเมตร โดยวิธีการวัดปริมาณและตัวอย่างการวัดความเสียหายดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การวัดความเสียหายประเภทรอยแตกตามยาวและขวาง (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

- รอยแตกร้าวแบบหนังจระเข้ (Alligator Crack) ให้วัดความกว้างและความยาวออกจากพื้นที่เสียหายจากขอบด้านละ 30 เซนติเมตร และสรุปปริมาณความเสียหายเป็นตารางเมตรโดยวิธีการวัดปริมาณและตัวอย่างการวัดความเสียหายประเภทรอยแตกร้าวหนังจระเข้ดังรูปที่ 2.26

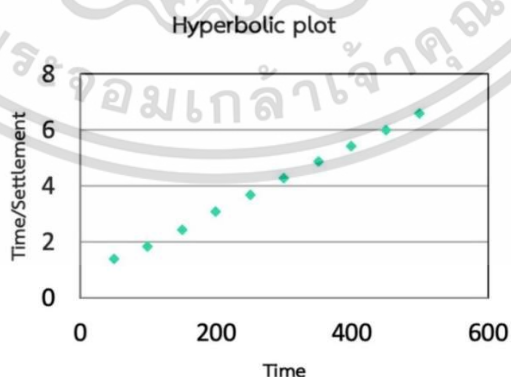


รูปที่ 2.26 การวัดความเสียหายประเภทรอยแตกร้าวแบบหนึ่งจระเข้ (กรมทางหลวงชนบท, 2562)

## 2.6 ทฤษฎีการคาดคะเนการทรุดตัวจากการตรวจวัดในสนาม

### 2.6.1 การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีไฮเปอร์โบลิก (Hyperbolic method)

Tan (1994) ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์การอัดตัวคายน้ำของดินด้วยวิธี Hyperbolic โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวเนื่องจากการยุบตัว (Consolidation settlement,  $S$ ) กับเวลา ( $t$ ) ซึ่งมีลักษณะพฤติกรรมเป็นให้เป็นเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/S$  กับ  $t$  และมีความชัน  $(1/B)$  จากสมบัติของฟังก์ชัน Hyperbolic จะได้ว่า ส่วนกลับของความชัน  $(1/B)$  ของเส้นตรงนี้ สามารถนำไปวิเคราะห์ ค่าการทรุดตัวสุดท้ายของกระบวนการอัดตัวคายน้ำได้ แสดงดังรูปที่ 2.27

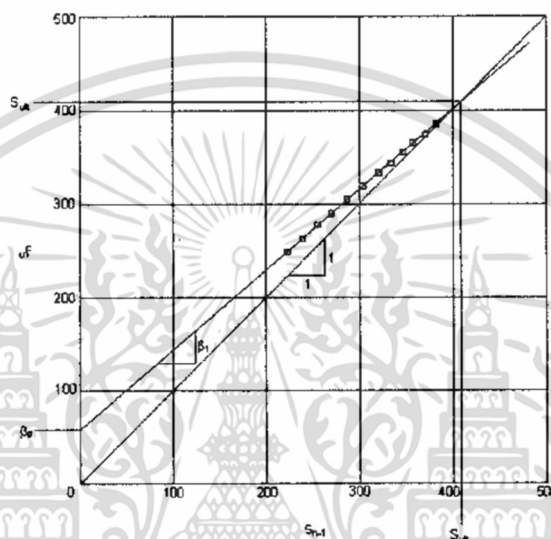


รูปที่ 2.27 วิธีการคาดคะเนแบบ Hyperbolic plot (ศลิษา, 2565)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 การวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีอะโซกะ (Asaoka method)

Asaoka (1978) เสนอทฤษฎีสำหรับทำนายค่าการทรุดตัวสูงสุดสำหรับกระบวนการอัดตัวคาน้ำที่สมบูรณ์โดยทำนายจากค่าวัดทรุดตัวของดินในสนาม (S) เทียบกับเวลา Asaoka method สามารถทำได้โดยพล็อตค่าการทรุดตัวครั้งที่  $n(S_n)$  กับค่าการทรุดตัวครั้งก่อนหน้า ( $S_{n-1}$ ) ดังรูปที่ 2.28

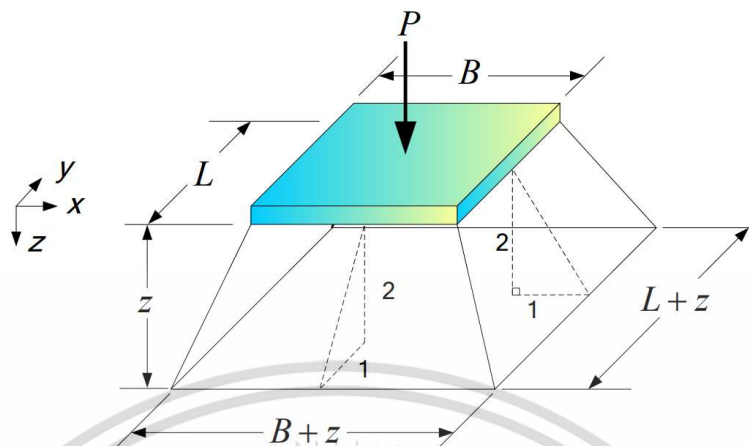


รูปที่ 2.28 กราฟของทฤษฎี Asaoka Method ของการทรุดตัวในแนวดิ่ง (Asaoka, 1978)

เมื่อลากเส้น 45 องศาบนกราฟหลังจากการพล็อตค่าการทรุดตัวครั้งที่  $n(S_n)$  กับค่าการทรุดตัวครั้งก่อนหน้า ( $S_{n-1}$ ) จะเกิดจุดตัดกันของเส้นแนวนอนกราฟการทรุดตัวและเส้นกราฟ 45 องศา ซึ่งเป็นจุดที่ดินหยุดการทรุดตัว ( $S_n = S_{n-1}$ ) ซึ่งก็คือค่าการทรุดตัวสูงสุดนั่นเอง

## 2.7 ทฤษฎีการคำนวณหน่วยแรงเฉลี่ยในแนวดิ่งโดยวิธีการประมาณ

การหาหน่วยแรงในแนวดิ่งที่เกิดจากแรงหรือน้ำหนักภายนอกที่กระทำบนระนาบของพื้นผิวดิน อาจประมาณได้ว่า แรงหรือหน่วยแรงจากฐานรากกระจายออกไปรอบข้างของแต่ละข้างจากขอบเขตของฐานรากโดยทำมุมเอียงประมาณ 30 องศากับแนวดิ่งดังรูปที่ 2.29 หรือให้กระจายออกไปทางข้าง 1 หน่วย ต่อความลึก 2 หน่วย (2 vertical to 1 horizontal slope) ดังนั้นจะหาหน่วยแรงเฉลี่ยในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นในมวลดินที่ระดับลึกใด ๆ โดยวิธีประมาณได้



รูปที่ 2.29 การคำนวณหน่วยแรงในแนวดิ่งโดยวิธีประมาณ (พรพจน์, 2554)

ถ้าฐานรากกว้าง  $B \times L$  รับน้ำหนักแผ่เฉลี่ยเท่ากับ  $q_0$  หากพิจารณาว่ามีการกระจายออกไปทางข้างจากขอบของฐานรากทุกด้านด้วยความชัน 2 ต่อ 1 หน่วยแรงเฉลี่ยในแนวดิ่งเท่ากับ  $z$  ( $\Delta\sigma$ ) ดังสมการที่ 2.3 (ปิยะ, 2561)

$$\Delta\sigma_z = \frac{q_0 \times B \times L}{(B+z)(L+z)} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\Delta\sigma_z$  คือ หน่วยแรงในแนวดิ่งที่มีความลึกเท่ากับ  $z$  (กิโลปาสคาล)

$q_0$  คือ หน่วยแรงในแนวดิ่งกระทำที่ผิวดิน (กิโลปาสคาล)

$B$  คือ ความกว้างของฐานราก (เมตร)

$L$  คือ ความยาวของฐานราก (เมตร)

$z$  คือ ความลึกที่พิจารณา (เมตร)

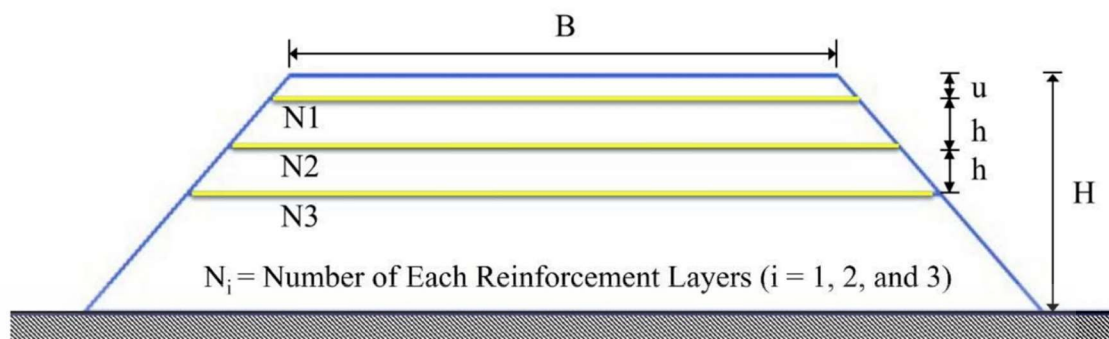
## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 การประยุกต์ใช้แผ่นยางพารารวมคั้วน RSS-Geogrid เพื่อเสริมกำลังถนนพร้อมวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM 2D

Chaiyaput et al. (2022) ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารา โดยดินลูกรังที่ไม่เสริมกำลัง พบว่าค่าซีบีอาร์ของดินลูกรัง E1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 64.53 (ซีบีอาร์สูง) และดินลูกรัง E2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 40.56 (ซีบีอาร์) ค่าซีบีอาร์ของดินลูกรัง ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารา E1-RSS และ E2-RSS มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 64.31 และ 49.95 ตามลำดับ ค่าซีบีอาร์ของดินลูกรัง E1 ลดลงร้อยละ 0.34 ในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารวมคั้วน ในทางตรงกันข้ามค่าซีบีอาร์ของดินลูกรัง E2 เพิ่มร้อยละ 23.15 ในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่าย เสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารา สามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการเสริมกำลังดินของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่ผลิตจากแผ่นยางพารารวมคั้วนจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังของดินที่มีค่าซีบีอาร์ หรือกำลังรับน้ำหนักต่ำแสดงดังตารางที่ 2.5 และยังสามารถทดสอบการประยุกต์ใช้แผ่นยางพารา RSS-Geogrid เพื่อเสริมกำลังถนน วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM 2D โดยทำการศึกษเกี่ยวกับจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังของคันดินถนน ซึ่งในงานวิจัยจะประยุกต์ใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง  $u/H$  และ  $h(N-1)/H$  โดยงานวิจัยระบุไว้ว่า จำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังนั้นคือ จำนวน 2 ชั้น ที่  $h(N-1)/H = 0.4$  และ  $u/H = 0.1$  แสดงดังรูปที่ 2.30

ตารางที่ 2.5 ตารางการเปรียบเทียบผลการทดสอบของดินที่มีค่า CBR สูงกับดินที่มีค่า CBR ต่ำ

Soil Types	Testing Conditions	CBR (%)	Percentage Difference (%)
High CBR	Non-reinforced (E1)	64.53	-0.34(Decreased)
	Reinforced 1 layer (E1-RSS)	64.31	
Low CBR	Non-reinforced (E2)	40.56	+23.15(Increased)
	Reinforced 1 layer (E2-RSS)	49.95	

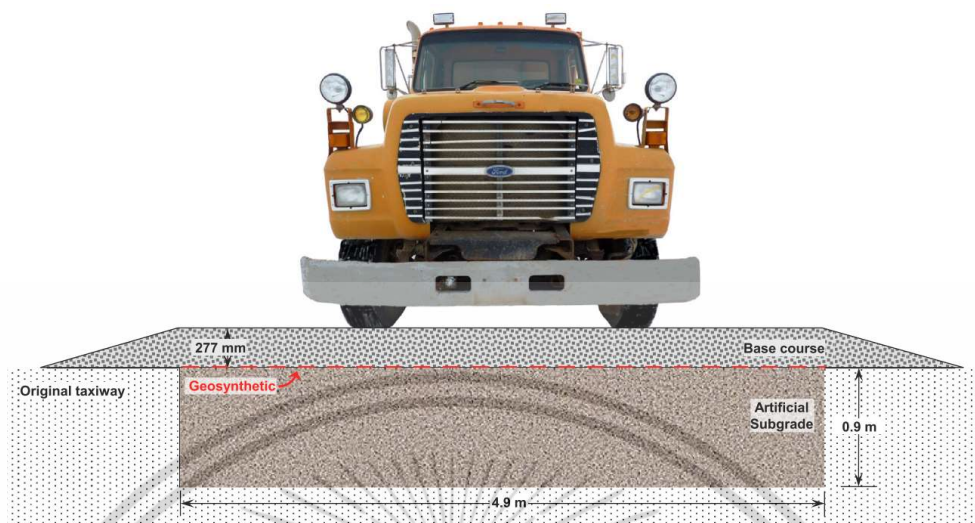


รูปที่ 2.30 สัญลักษณ์ต่างๆที่แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างคันดินและตำแหน่งการเสริมกำลัง (Chaiyaput et al., 2020)

### 2.8.2 การทดสอบเสถียรภาพของชั้นดินเดิมในสนามด้วยวัสดุสังเคราะห์พร้อมการปรับเทียบวิธีการออกแบบ

Cuelho and Perkins (2016) ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุสังเคราะห์เสริมกำลังดิน (Geosynthetics) 12 ชนิด (10 geogrid และ 2 geotextiles) เพื่อประเมินประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไข มีการใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 5 การทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย wide-width tensile strength (ASTM D4595 และ ASTM D6637), cyclic tensile modulus (ASTM D7556), resilient interface shear stiffness (ASTM D7499), junction strength (ASTM D7737), และ aperture stability modulus (Kinney, 2000)

สำหรับงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุสังเคราะห์เสริมกำลังดิน (Geosynthetics) ในสนามทดสอบที่มีความยาว 255 เมตร กว้าง 4.9 เมตร โดยมีภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.31 ซึ่งงานวิจัยใช้การทดสอบหาค่าความลึกของร่องล้อ (Rutting Depth) ในสนาม การวัดร่องแต่ละอันถูกปรับและเฉลี่ยเข้าด้วยกันภายในส่วนการทดสอบในสนาม ค่าแต่ละค่าของร่องที่มากกว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและห่างจากค่าเฉลี่ยไม่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ พบว่าการวิเคราะห์ค่าความลึกของร่องล้อ (Rutting Depth) ถูกดำเนินการเพื่อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุสังเคราะห์เสริมกำลังดิน (Geosynthetics) มีประสิทธิภาพมากที่สุดในสนามทดสอบ



รูปที่ 2.31 ภาพตัดขวางของส่วนทดสอบ (Cuelho and Perkins, 2016)

### 2.8.3 Performance of geosynthetics in unpaved roads

งานวิจัยของ Latha (2010) ศึกษาผลของการทดสอบในสนามของถนนไม่ได้ลาดยางที่สร้างขึ้นโดยใช้การเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetics) และศึกษาข้อได้เปรียบที่แตกต่างกันของการวางวัสดุเสริมกำลัง เช่น แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) และแผงตาข่ายรังผึ้ง (Geocell) ซึ่งศึกษาในกรณีของการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักและการลดความลึกของร่องล้อ โดยความลึกของร่องล้อจะทำการเปรียบเทียบแตกต่างกัน 3 ส่วน ทำการทดสอบโดยใช้รถสก็ูตเตอร์น้ำหนัก 106 กิโลกรัม ขับโดยคนที่มีน้ำหนัก 55 กิโลกรัม วิ่งผ่านบนถนนจำลองขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร ด้วยความเร็ว 18 ถึง 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยวิ่งเป็นเส้นตรงในทางเดียว ซึ่งผลการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาเสริมกำลังในถนน

งานวิจัยข้างต้นเป็นส่วนในการอ้างอิงนำวิธีการทดสอบความลึกร่องล้อในสนาม โดยวิธีการทดสอบซึ่งนำวัดตามจำลองพฤติกรรมของรถบนถนนด้วยการวิ่งผ่านบนสนามทดสอบจำนวน 250 รอบ

### 2.8.4 Evaluation of Interface Shear Strength Coefficient of Alternative Geogrid Made from Para Rubber Sheet

งานวิจัยของ Anubud et al. (2023) ศึกษาเกี่ยวกับการนำแผ่นยางคอมปาวด์ (RCS) และแผ่นยางพาราธรรมควัน (RSS) มาใช้เป็นทางเลือกทดแทนสำหรับแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid) ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

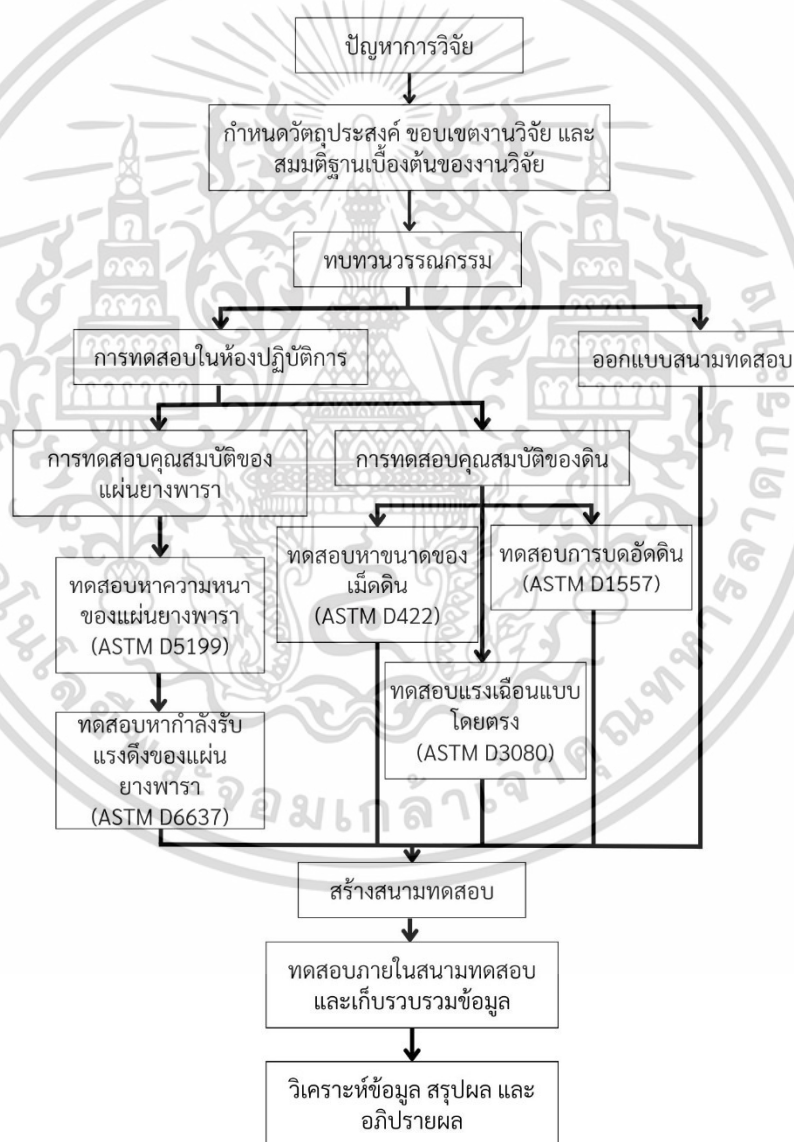
เสริมกำลังของดิน ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังในดินที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ดินทราย ดินลูกรัง และดินเหนียว โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวจากการทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large-scale direct shear) ซึ่งติดตั้งแผ่นตาข่ายเสริมกำลังแบบ RCS และ RSS อย่างอิสระในดินทราย ดินลูกรัง และดินเหนียว ผลที่ได้คือตาข่ายเสริมกำลังแบบ RCS และ RSS มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวระหว่างดินและตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยมีผลมากที่สุดในดินทราย ตามด้วยดินลูกรังและเห็นผลน้อยที่สุดในดินเหนียว ส่วนค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน แบบ RCS และ RSS มีค่ามากที่สุดในการเสริมกำลังในดินทราย ตามด้วยดินลูกรัง และน้อยที่สุดในดินเหนียว ซึ่งในกรณีแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน แบบ RCS มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสูงกว่ากรณีที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินจากแผ่นยางพาราวันเสมอ

งานวิจัยข้างต้นเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาเบื้องต้นเป็นผลให้เลือกใช้ดินทรายในการทำสนามทดสอบเนื่องจากค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนที่ผิวในดินทรายมีค่าสูงที่สุด

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย เริ่มต้นตั้งแต่การทดสอบคุณสมบัติของดินที่นำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างคันดิน การออกแบบสนามทดสอบ และวิธีการทดสอบภายในสนาม โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยดังแผนผังที่แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1. การทดสอบคุณสมบัติของดินที่เลือกใช้

#### 3.1.1. การทดสอบหาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน

##### วัตถุประสงค์

เพื่อหาขนาดของเม็ดดินและการกระจายส่วนคละของเม็ดดินโดยใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรง

##### มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ASTM D422-63 Standard Test Method of Particle Size Analysis of Soils

##### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ตะแกรงที่ใช้ร่อนตัวอย่างพร้อมภาตรอง และเครื่องเขย่าตะแกรง
2. ภาตใส่ตัวอย่าง
3. ค้อนยาง
4. เครื่องชั่งขนาด 2 กิโลกรัม อ่านละเอียด 0.1 กรัม
5. แปรงทำความสะอาดตะแกรง
6. ตู้อบ (Drying Oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่  $105 \pm 5$  องศาเซลเซียส

##### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำความสะอาดตะแกรงทั้งหมดด้วยแปรงทำความสะอาด แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์พร้อมบันทึกค่า แสดงดังรูปที่ 3.2
2. นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องใหญ่อยู่บน แล้วเรียงขนาดเล็กลงมา ตามลำดับจนถึงตะแกรงขนาดเล็กที่สุด ดังนี้ No. 3/8, 4, 10, 20, 40, 100, 200 และภาตรองตะแกรง
3. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่าใช้เวลา ในการเขย่าอย่างน้อย 10 นาที เสร็จ แล้วนำตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักตะแกรง รวมกับดินที่ค้างบนตะแกรง นำดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงออกทิ้งแล้วทำความสะอาดตะแกรง ให้เรียบร้อย แสดงดังรูปที่ 3.3 - 3.4



รูปที่ 3.2 ชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละเบอร์และถาดรองตะแกรง



รูปที่ 3.3 การใช้เครื่องเขย่าเพื่อทำทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน



รูปที่ 3.4 การนำดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงออกทิ้งและทำความสะอาดตะแกรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2. การทดสอบการบดอัดดิน

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง กับปริมาณความชื้นในการบดอัด (Moisture Density Relative)
2. เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ของดินตัวอย่าง
3. เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด (Optimum Moisture Content, OMC)

#### มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

1. ASTM D698-07 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12, 400 ft- lb / ft ( 600 KN-m/m))
2. ASTM D1557-0 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56, 000 ft- lb/ ft ( 2,700 KN-m/ m<sup>3</sup>))

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. แบบหล่อทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Mold) มีสองขนาดให้เลือกใช้คือ ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายใน 4 นิ้ว (105 ม.ม.) ความสูง 4.584 นิ้ว (116.43 ม.ม) และ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 นิ้ว (152.4 ม.ม.) ความสูง 4.584 นิ้ว (116.43 ม.ม) พร้อมด้วยปลอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกัน (Collar) และแผ่นฐาน (Base Plate) สูง 50 ม.ม. (มีปริมาตร 1000 ซม.<sup>3</sup>)
2. ค้อนบดอัดแบบมาตรฐาน (Compaction Hammer) หน้า 5.5 ปอนด์ ระยะยก 12 นิ้ว และแบบสูงกว่ามาตรฐาน หน้า 10 ปอนด์ ระยะยก 18 นิ้ว แสดงดังรูปที่ 3.5
3. แม่แรงสำหรับดันตัวอย่างดินออกจาก Mold
4. เหล็กปาดดินสันตรง (Straight Edge) ขนาด 30 ซม.
5. ตะแกรงร่อนดินขนาด เบอร์ 4 (Sieve)
6. เครื่องชั่งขนาด ตั้งแต่ 1.0 กรัม - 10 กิโลกรัม
7. ถาดผสมดิน (Mixing Pan)
8. ที่ตักดิน (Scoop)



รูปที่ 3.5 ค้อนบดอัดแบบมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์

### การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างดินแปลงสภาพร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หนักประมาณ 3 – 5 กิโลกรัมแล้วผึ่งให้แห้งโดยอากาศหรือดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างในสนาม

1. นำตัวอย่างดินที่ได้จัดเตรียมไว้มาเทลงในภาตผสมดิน ใช้ค้อนอย่างทุบดินที่เกาะอยู่ออกจากกัน ถ้าตัวอย่างเป็นดินเหนียว ผึ่งให้แห้งแล้วทุบให้ละเอียดหรืออาจใช้เครื่องบด
2. พิจารณาตัวอย่างของเม็ดดิน เพื่อเลือกใช้ Mold ให้เหมาะสมกับขนาดของเม็ดดิน ถ้าตัวอย่าง เป็นดินเม็ดเล็ก ให้ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ใช้กับ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 ม.ม. ถ้าเม็ดดินมีขนาดใหญ่ กว่าตะแกรงเบอร์ 4 ให้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว (19.05 ม.ม.) ใช้กับ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 ม.ม. โดยส่วนที่ค้ำตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว ให้แทนที่ด้วยดินที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้วและค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ใน ปริมาณที่เท่ากัน
3. ประมาณปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

### ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความสูงของ Mold เพื่อหาปริมาตรของดินใน Mold จากนั้นประกอบ Mold และ Base plate พร้อมชั่งน้ำหนัก (ไม่ต้องชั่ง Collar)

2. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้อย่างน้อย 3 กิโลกรัมสำหรับทดสอบแบบมาตรฐานและ 5 กิโลกรัม สำหรับการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยเริ่มผสมน้ำให้มีความชื้น ตามค่าที่ได้จาก ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน
3. ตักดินใส่ Mold ที่ประกอบไว้แล้ว โดยประมาณให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่าๆ กันโดยมีจำนวน 3 ชั้นสำหรับ Standard และ 5 ชั้นสำหรับ Modified เมื่อบดอัดครบจำนวนชั้นแล้วให้ดินพื้น ขอบ Mold ขึ้นไปประมาณ 1-2 ซม.
4. ใช้ค้อนหนัก 5.5 ปอนด์สำหรับบดอัดแบบมาตรฐานและ 10 ปอนด์สำหรับบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานบดอัดดินใน Mold แต่ละชั้นให้ทั่วทั้ง Mold บดอัดชั้นละ 25 ครั้งสำหรับ Mold ขนาด 105 มม. และ 56 ครั้งสำหรับ Mold ขนาด 152.4 มม. โดยให้ Mold วางอยู่บนพื้นคอนกรีตเรียบ แสดงดังรูปที่ 3.6
5. ถอดปลอก (Collar) ออกแล้วใช้เหล็กปาดดิน (Straight Edge) ปาดดินที่เกินขอบ Mold ออก และแต่งผิวดินให้เรียบใช้แปรงขนอ่อนปัดเศษดินที่ค้างอยู่อกให้หมดแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 3.7
6. ดันแท่งตัวอย่างดินออกจาก Mold แล้วผ่ากลางตามแนวตั้งเพื่อเก็บตัวอย่างตามแนวผ่า ประมาณ 100 กรัม ไปอบเพื่อหาค่าปริมาณความชื้น (Water Content)
7. ใช้ค้อนยางทุบก่อนดินที่เหลือให้แตกออกจนร่วน แล้วผสมน้ำเพิ่มอีก 2 - 3 % คลุกเคล้าให้ เข้ากันทั่วแล้วทดสอบซ้ำตามข้อ 4 - 6 จนกระทั่งน้ำหนักดินเริ่มลดลงแล้วทดลองเพิ่มอีกครั้ง เพื่อให้ได้กราฟทางด้านเปียกจำนวนครั้งในการทดสอบไม่ควรเกิน 5 - 6 ครั้ง



รูปที่ 3.6 การบดอัดดินด้วยวิธี Modified proctor test



รูปที่ 3.7 การใช้เหล็กปาดดิน ปาดดินที่เกินขอบ Mold ออก

### 3.1.3. การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง

#### วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของมวลดิน (Shear strength) โดยจะแสดงค่าความต้านแรงเฉือนในมวลดิน ในรูปของค่าแรงเชื่อมแน่น (Cohesion, C) และ มุมเสียดทาน ( $\phi$ )

#### มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ASTM D3080-11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง ( Direct Shear testing machine)
2. กล่องตัวอย่าง ( Shear box ) และอุปกรณ์
3. วงแหวนวัดแรง ( Proving ring ) ขนาดพอเหมาะกับกำลังของตัวอย่างที่จะทดสอบ
4. มาตรหน้าปัด (Dial gauge) วัดการเคลื่อนตัว (2 ตัว) อ่านละเอียด 0.01 มม. หรือ 0.001 นิ้ว ช่วงชัก 25 มม. หรือ 1 นิ้ว
5. แผ่นน้ำหนัก (Surcharge weight )
6. เวอเนียร์ ( Vernier )

#### การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างดินเป็น Cohesion less Soil เช่น ทราย (Sand) ให้นำทรายแห้งหรือทรายอิม น้ำ (แช่น้ำ 24 ชั่วโมง) ประมาณ 1000 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเตรียมน้ำหนักกดตัวอย่างการทดสอบ

ให้เตรียมน้ำหนักตามที่ได้จากการคำนวณ โดยคำนวณชุดน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ จำนวน 3 ชุด โดยปกติแล้วจะคำนวณน้ำหนักที่แขวนแล้วทำให้เกิด Normal stress กระทำกับตัวอย่างดินใน Shear box ประมาณ 1, 2 และ 4 เท่าของ Effective overburden pressure,  $\sigma_{vo}'$  ของดิน

### ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบตัวอย่างทราย (Cohesion less soil)

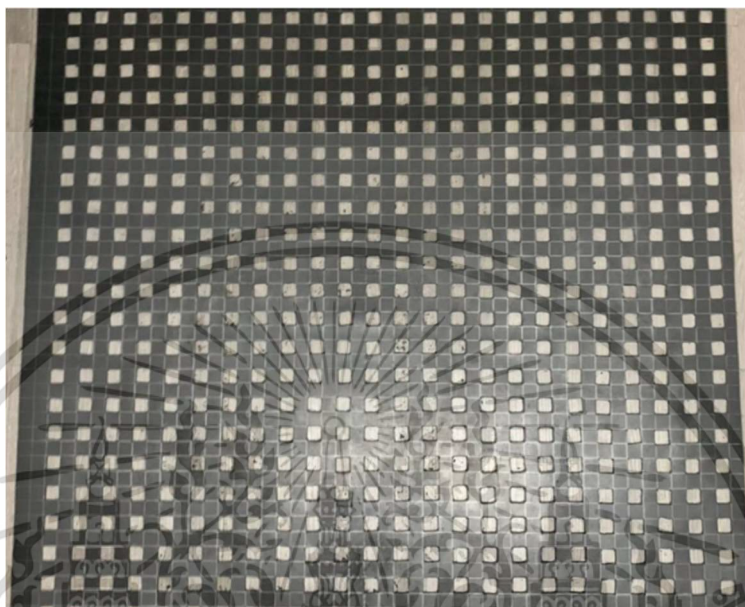
1. ชั่งน้ำหนักของ Shear box พร้อมอุปกรณ์ประกอบและวัดขนาดหน้าตัดของ Shear box (Shear box ที่ใช้ในที่มีขนาดหน้าตัด 10 เซนติเมตร  $\times$  10 เซนติเมตร)
2. ทำการประกอบ Shear box บนและล่างด้วยสกรูให้แน่นพอสมควรแล้ววาง Plate รองรับด้านล่าง ตามด้วย Porous stone และ Plate ยึดตัวอย่างดินแบบมีรูระบายน้ำในแนวขวางกับทิศทางการเฉือน
3. ทำการใส่ตัวอย่างดินลงไปเป็นชั้นๆ ชั้นละประมาณไม่เกิน 5 มิลลิเมตร โดยการปล่อยให้ตัวอย่างทรายตกอย่างอิสระโดยควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างดินให้ใกล้เคียงสภาพในสนาม
4. วัดความหนาของตัวอย่างดินโดยให้วัดความหนา 5–10 จุดให้ทั่วผิวหน้าตัวอย่างดิน แล้วนำค่ามาเฉลี่ย (ความหนาของตัวอย่างดินหลังบดอัดและปรับผิวหน้าจนเรียบเรียบร้อยแล้วจะหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร) แล้วจึงวาง Plate ยึดตัวอย่างดินแบบมีรูระบายน้ำและ แผ่นเหล็กด้านบนทางด้านบน แล้วจึงตามด้วย Load hand ตามลำดับ ทับบนผิวหน้าของตัวอย่างดิน
5. เสร็จแล้วทำความสะอาด Shear Box โดยใช้แปรงขนอ่อนปัดทรายที่ติดอยู่ออกให้หมดแล้วจึงนำ Shear Box ที่มีตัวอย่างดินบรรจุอยู่เรียบร้อยแล้วไปชั่งน้ำหนัก
6. นำ Shear box ใส่ในเครื่องทดสอบ Direct Shear ปรับแกนที่จะให้แรงเฉือนให้แน่นติดตั้ง Horizontal dial gauge (0.001 mm / Div.) (ใช้วัดการเคลื่อนตัวของระยะที่เฉือนตามแนวราบ) ทำการใส่แรงกด (Normal load) บนแผ่นเหล็กด้านบน (Load hand) ควรใช้น้ำหนักครั้งแรกตามค่าที่คำนวณได้ (ถ้าเป็นการทดสอบแนะนำให้ใช้น้ำหนักครั้งแรกเป็น 4 กิโลกรัม) และติดตั้ง Vertical dial gauge (0.001 mm / Div.) (ใช้วัดการเคลื่อนตัวของตัวอย่างดินในแนวตั้ง) บน Normal load

7. เสร็จแล้วหมุน สกรูที่ยึด Shear box ทั้งสองข้างออกไปและปรับเข็มของ Dial gauge ทั้งสองให้เข็มชี้ที่เลขศูนย์ (0) ให้เรียบร้อย
8. หมุนคลาย Jack handle ลงพร้อมทำการ Shear ตัวอย่างโดยให้อัตราการเลื่อน 0.5 – 2 มิลลิเมตร / นาที ทำการอ่านค่าแรงเลื่อนจาก Load Dial Gauge และการเคลื่อนตัวแนวตั้งจาก Vertical Dial Gauge (ค่าที่อ่านได้น้อยกว่าศูนย์มีค่าเป็นลบ) ทุก ๆ การเคลื่อนตัวในแนวราบของ Shear box ที่เหมาะสม (อ่านค่าระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบจาก Horizontal dial gauge) เช่น 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 130, 160, 200, 250, 300 และ 350 Div. เป็นต้น ซึ่งจะสิ้นสุดการทดสอบได้ก็ต่อเมื่อตัวอย่างดินวิบัติ ก็คือค่าแรงเลื่อนที่อ่านได้จาก Load dial gauge มีค่าคงที่หรือลดลงอย่างน้อยสองค่า (การ Shear จะใช้เวลา 3–5 นาทีของตัวอย่างทราย และ 5–10 นาทีของตัวอย่างดินเหนียวแบบ UU Test และ CU Test )
9. หลังจากตัวอย่างดินวิบัติแล้ว ให้นำตัวอย่างดินออกจาก Shear Box แล้วทำความสะอาด Shear Box ให้เรียบร้อย และทำการเตรียมตัวอย่างดินใหม่ของตัวอย่างดินชนิดเดียวกันนี้โดยดำเนินการทดสอบเหมือนกับขั้นตอน 2–5 อีกอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง โดยใส่แรงกด (Normal load) เพิ่มเป็นสองเท่าของครั้งแรกและครั้งต่อไป ซึ่งควรเพิ่มจากเดิมที่ใส่ไปแล้ว 4 กิโลกรัม เป็น 8 กิโลกรัม และ 16 กิโลกรัม ตามลำดับ

### 3.2 การเตรียมแผ่นยางคอมปาวด์

แผ่นยางคอมปาวด์ที่นำมาใช้ภายในสนามทดสอบมีขนาด 1 เมตร x 1 เมตร พร้อมกับเจาะรูช่องเปิดเพื่อให้มีลักษณะคล้ายคลึงกับตาข่ายเสริมกำลังดิน แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยใช้แผ่นกดเจาะทำเป็นลักษณะแท่นกดติดใบมีดที่สามารถสร้างช่องเปิดให้มีขนาด 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่

3.9



รูปที่ 3.8 แผ่นยางคอมปาวด์ที่มีช่องเปิดขนาด 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์สำหรับเจาะช่องเปิดขนาด 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์

#### 3.3.1 การวัดความหนาของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์

##### วัตถุประสงค์

เพื่อหาความหนาของแผ่นยางพารา

##### มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ASTM D5199-01 Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics

##### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดความหนาวัสดุ
2. อุปกรณ์การตัดตัวอย่าง เช่น กรรไกร มีดคัตเตอร์

##### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ตัดแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์ให้มีขนาด 20 เซนติเมตร×20 เซนติเมตร
2. กำหนดหมายเลขของแผ่นยาง
3. วัดความหนาของยางพร้อมบันทึกค่า แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การวัดค่าความหนาของตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารวมควั่นและแผ่นยางคอมปาวด์

#### วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของแผ่นยางพารา

#### มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ASTM D6637-01 Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดความหนาวัสดุ
2. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึง (Universal Testing Machine)
3. อุปกรณ์การตัดตัวอย่าง เช่น กรรไกร มีดคัตเตอร์
4. เทปกาว
5. ปากกาเคมี

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. เตรียมตัวอย่างตาข่ายเสริมกำลังดินสำหรับทดสอบโดยให้ตัวอย่างมีลักษณะดังต่อไปนี้
  - ในแนวขวางทิศทางการดึงต้องประกอบด้วยกึ่ง 1 กึ่ง
  - ในแนวตามทิศทางการดึงต้องประกอบด้วยกึ่ง 3 กึ่ง
  - ทำการเคลือบกึ่งริมออกทั้งสองด้านตามแนวทิศทางการดึงสำหรับให้เครื่องทดสอบแรงดึงจับ
2. นำตัวอย่างสำหรับทดสอบติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึง โดยกำหนดให้เครื่องทดสอบอ่านค่าแรงดึงและความเครียดในแต่ละช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 3.11
3. นำค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้มาทำการคำนวณเพื่อให้ได้เป็นกำลังรับแรงดึงต่อหนึ่งหน่วยความยาว โดยการคำนวณจะเป็นไปตามสมการที่ 3.1 ต่อไปนี้ (ASTM D 6637)

$$A_f = [(F_p - T_0)/N_t] N_t \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $A_f$  = แรงต่อหนึ่งหน่วยความยาวรวม (N/m)  
 $F_p$  = แรงสูงสุดจากการทดสอบ (N)  
 $T_0$  = ค่าปรับแก้การเลื่อนของตัวอย่าง (N)  
 $N_r$  = จำนวนของตัวอย่างที่ทดสอบ  
 $N_t$  = จำนวนของชิ้นส่วนรับแรงดึงต่อหนึ่งหน่วยความยาว

#### 4. เปรียบเทียบหาแนวของแผ่นยางที่มีกำลังรับแรงดึงมากที่สุด



รูปที่ 3.11 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงด้วยเครื่อง UTM

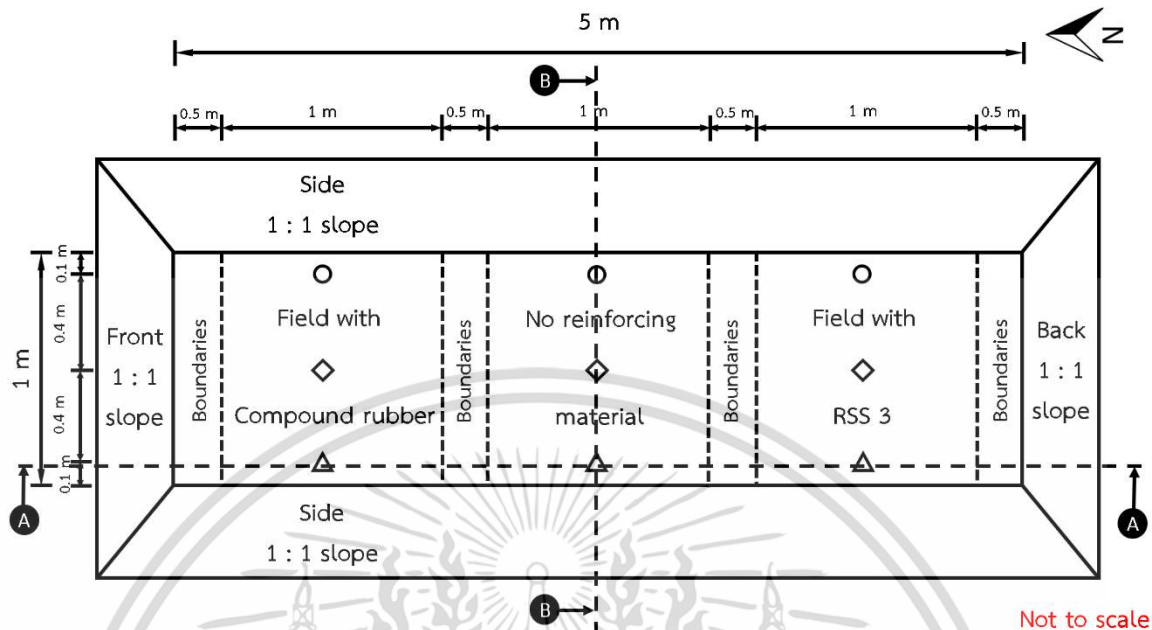
### 3.4 การออกแบบสนามทดสอบ

คันดินทรายจะถูกออกแบบให้เป็นสนามทดสอบเพื่อจำลองพฤติกรรมของถนนที่ไม่ปูผิวทางลาดยางและศึกษาได้แก่ค่าอัตราการทรุดตัว (Settlement) และ ค่าความลึกร่องล้อ (Rut depth) เปรียบเทียบพฤติกรรมของถนนที่ไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารา โดยสนามทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ โดยที่ส่วนที่ 1 บริเวณที่มีการเสริมกำลังคันดินด้วยการติดตั้งแผ่นยางคอมปาวด์ ส่วนที่ 2 บริเวณที่ไม่มีการติดตั้งวัสดุเสริมกำลังในคันดินเปล่า และส่วนที่ 3 บริเวณที่มีการเสริมกำลังคันดินด้วยการติดตั้งแผ่นยางพารารมควัน

สนามทดสอบออกแบบตามงานวิจัยของ Chaiyaput, et al. (2020) ซึ่งการเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุดคือจำนวน 2 ชั้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเสริมกำลังคันดินด้วยแผ่นยางพารารวมคันและแผ่นยางคอมปาวด์ในสนามจำนวน 2 ชั้น ที่ตำแหน่ง 0.05 เมตร และ 0.25 เมตร จากผิวดิน โดยภาพแผนผังการออกแบบ, ภาพตัดด้านข้าง (ด้าน A-A) และภาพตัดด้านหน้า (ด้าน B-B) ของสนามทดสอบที่มีความกว้างของสนาม 1 เมตร ความยาว 5 เมตร และความสูง 0.5 เมตร ซึ่งออกแบบตามโครงสร้างถนนในประเทศไทยที่มีความสูงของชั้นถนนประมาณ 0.5 เมตร อ้างอิงจากเอกสารการออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทาง (กรมทางหลวง, 2546) แสดงดังรูปที่ 3.12 – 3.14 ตามลำดับ และได้ออกแบบความชันของลาดคันดินที่ 1 ต่อ 1 ทุกด้านเพื่อสังเกตพฤติกรรมของคันดิน

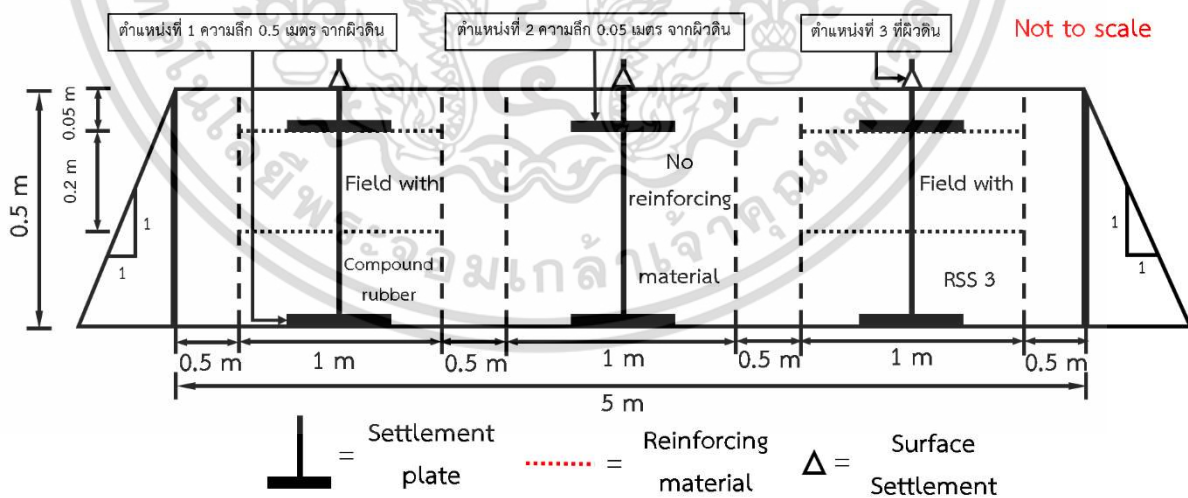
การออกแบบขอบเขตด้านข้าง (Boundary) ใช้ทฤษฎีการคำนวณหน่วยแรงเฉื่อยในแนวตั้งโดยวิธีการประมาณ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเกี่ยวเนื่องกันของผลการทดสอบด้วยหากมีหน่วยแรงกระทำที่บริเวณกึ่งกลางบนของสนามทดสอบจะมีการกระจายของแรงออกไปทางข้าง 1 หน่วย ต่อความลึก 2 หน่วย แสดงว่าสนามทดสอบที่มีความสูง 0.5 เมตร ถูกกระทำด้วยแรง ณ จุดกึ่งกลางบนสนามแสดงว่าระยะที่แรงส่งผลถึงทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 0.25 เมตร ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการออกแบบให้สนามทดสอบมีระยะของขอบเขตด้านของเท่ากับ 0.5 เมตร

ในสนามทดสอบมีการติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวคือแผ่นการวัดการทรุดตัว (settlement plate) ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 ณ ความสูง 0.5 เมตร จากผิวดิน (ตำแหน่งดินเดิม) เพื่อเป็นการตรวจสอบการทรุดตัวในชั้นดินเดิม ตำแหน่งที่ 2 ณ ความสูง 0.05 เมตร จากผิวดิน เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวในคันดิน ณ ตำแหน่งที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราชั้นแรก และตำแหน่งที่ 3 ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของสนามทดสอบ เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวของสนามทดสอบ ซึ่งในแต่ละส่วนทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์เหมือนกันทั้งหมด



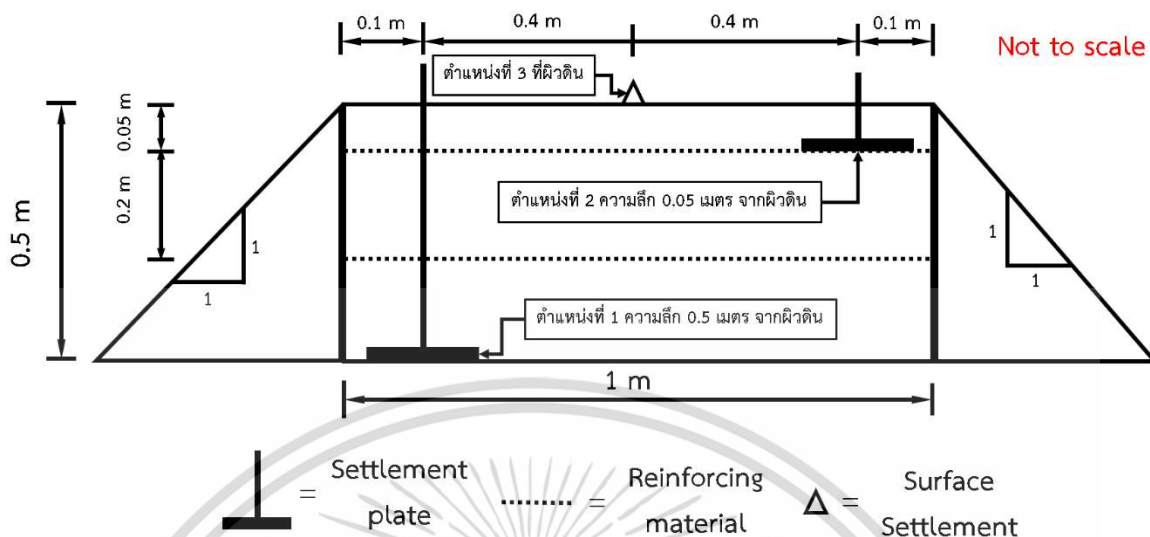
- ◇ = Surface settlement at 0 m depth
- = Ground settlement at 0.5 m depth
- △ = N1 layer settlement at 0.05 m depth

รูปที่ 3.12 แผนผังการออกแบบของสนามทดสอบ



รูปที่ 3.13 ภาพตัดด้านข้าง (ด้าน A-A) ของสนามทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ภาพตัดด้านหน้า (ด้าน B-B) ของสนามทดสอบ

### 3.5 การสร้างสนามทดสอบ

สนามทดสอบนี้ทำการก่อสร้างภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ณ ภาควิศวกรรมโยธา โดยสภาพพื้นที่เป็นสนามทดสอบที่ใช้ในการหาความหนาแน่นของดินสำหรับนักศึกษา วิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์

การสร้างสนามทดสอบนั้นจะสร้างสนามทดสอบขึ้นมาตามที่ได้ออกแบบไว้โดยจะทำการบดอัดด้วยเครื่องตบแบบสันสะเทือนและทำการวัดร้อยละการบดอัดด้วยเครื่องทดสอบหาความหนาแน่นของดินภายในสนามแสดงดังรูปที่ 3.15 - 3.16 ทุกครั้งเพื่อให้ผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวง (มยพ. 1918-62) ซึ่งจะต้องมีร้อยละการบดอัด 90% ในการสร้างสนามทดสอบขึ้นมาโดยมีขั้นตอนการสร้างสนามทดสอบดังนี้



รูปที่ 3.15 เครื่องตบสันสะเทือนแบบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบหาความหนาแน่นในสนาม

### ขั้นตอนการร่้างสนามทดสอบ

1. เริ่มต้นด้วยการปรับระดับพื้นสนามที่ทำการทดสอบให้มีระดับเท่ากับด้วยกรวดและทรายหยาบ แสดงดังรูปที่ 3.17 -3.18



รูปที่ 3.17 ปรับระดับพื้นสนามทดสอบด้วยกรวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ปรับระดับพื้นสนามทดสอบด้วยทรายหยาบพร้อมบดอัดและวัดรอยละการบดอัด

2. ติดตั้ง settlement plate หลังจากปรับระดับเสร็จสิ้นที่ตำแหน่ง 0.5 เมตร จากผิวดิน และสร้างสนามทดสอบด้วยการบดอัดดินทรายจนถึงความสูงที่ระดับความสูง 0.25 เมตร จากผิวดิน พร้อมติดตั้งวัสดุเสริมกำลังดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการติดตั้ง settlement plate ที่ระดับความสูง 0.5 เมตรจากผิวดิน พร้อมติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สร้างสนามทดสอบด้วยชั้นทรายบดอัดจากวัสดุเสริมกำลังชั้นแรกจนถึงความสูง 0.05 เมตร จากผิวดิน พร้อมติดตั้งวัสดุเสริมกำลังและติดตั้ง settlement plate แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 สร้างสนามทดสอบด้วยชั้นทรายบดอัด

4. สร้างสนามทดสอบด้วยชั้นทรายบดอัดจากวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 2 จนให้คันดินถึงความสูง 0.5 เมตรตามที่ออกแบบ พร้อมทำการปรับความชันด้านข้างให้ได้ตามที่ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ปรับความชันตามที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังภายในสนาม

#### 3.6.1 การวัดค่าการทรุดของคันดินในสนาม

##### วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าการทรุดตัวภายในสนาม

##### มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ทล. - ม. 101/2532 (DH-S 101/2532)

##### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. แผ่นวัดการทรุดตัว
2. กล้องวัดระดับ
3. ขาตั้งกล้องวัดระดับ
4. ไม้สตาฟแบบละเอียด แสดงดังรูปที่ 3.22
5. ตลับเมตร
6. หมุด



รูปที่ 3.22 ไม้สตาฟแบบละเอียด

##### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ติดตั้ง settlement plate ที่ชั้นด้านล่างสุดของสนาม และชั้นที่เสริมด้วยแผ่นยางคอมปาวด์และแผ่นยางพารารวมคว้นชั้นที่ 1 ความลึก 0.25 จากผิวดิน
2. เลือกจุดตั้งกล้องและจุดอ้างอิงเพื่อใช้วัดค่าระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตั้งกล้องวัดระดับและวางไม้สตาฟในจุดอ้างอิง พร้อมบันทึกค่า
4. วางไม้สตาฟในตำแหน่งของ settlement plate และหมุดที่ติดตั้งไว้
5. อ่านค่าระดับและบันทึกผลในช่วง 0-7 วัน, 14 วัน, 30 วัน, 60 วัน และ 90 วัน แสดงดังรูปที่ 3.23
6. นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของสนามทดสอบ



รูปที่ 3.23 การวัดค่าการทรุดตัว

### 3.6.2 การวัดค่าความลึกของร่องล้อภายในสนาม (ดำเนินการทดสอบหลังจากสร้างสนามทดสอบเสร็จ 14 วัน)

#### วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าความลึกของร่องล้อภายในสนาม

#### มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ASTM E1703 / E1703M-95 Standard Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge

#### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. น้ำหนักถ่วง 140 กิโลกรัม
2. รถเข็นปูนล้อเดียว น้ำหนัก 20 กิโลกรัม
3. ไม้บรรทัด
4. ตลับเมตร
5. เชือก
6. เครื่องชั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการทดสอบ

### 1. การจัดวางขอบตรง

- 1.1 วางขอบตรงข้ามร่อง ปล่อยให้ขอบตรงพับบนทางเท้าที่พื้นที่สัมผัสสองพื้นที่ เช่น การเลื่อนขอบตรงตามความยาวทั้งสองทิศทางจะไม่เปลี่ยนพื้นที่สัมผัสบนทางเท้า หลีกเลี่ยงตำแหน่งพื้นที่ติดต่อกับหยุดทำงานที่กว้างกว่าด้านล่างขอบตรง
- 1.2 วางขอบตรงในระนาบตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของจราจร พื้นผิวด้านล่างของขอบตรงจะต้องขนานกับความชันตามยาวของทางเท้า อย่าวางขอบตรงบนการหยุดทำงานใดๆ บนพื้นผิวทางเท้า เช่น หลุมหรือเศษซากที่หลุดออกมา
- 1.3 ช่วงยวาระหว่างการจัดวางขอบตรงต่อเนื่องควรเกี่ยวข้องกับความแม่นยำที่จำเป็นสำหรับการใช้ข้อมูล

### 2. การวางเกจ

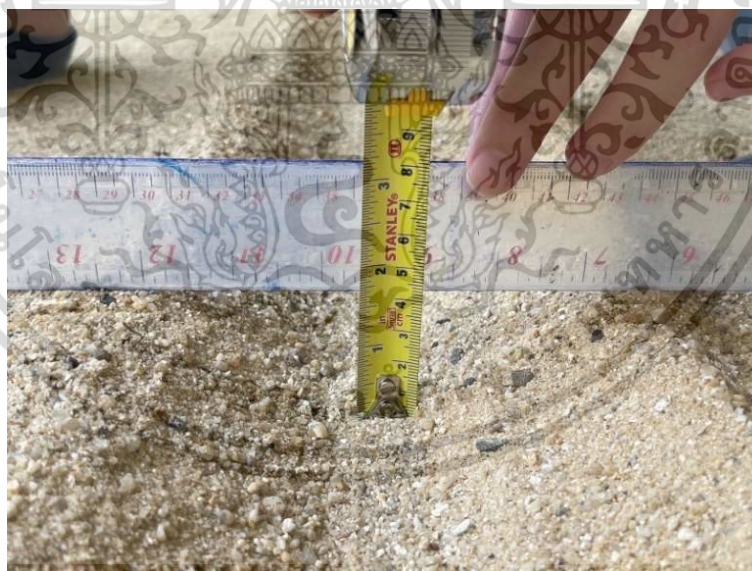
วางเกจระหว่างพื้นที่สัมผัสสองพื้นที่ต่อเพนดิкулярกับระนาบอ้างอิงที่สร้างขึ้นโดยด้านล่างของขอบตรงและตั้งฉากกับความชันตามยาวของทางเท้า ด้านล่างของเกจจะต้องสัมผัสกับทางเท้า ในเวลาของการวัด อย่าวางเกจบนการหยุดทำงานใด ๆ บนพื้นผิวทางเท้า เช่น หลุมหรือเศษซากที่หลวม

### 3. การวัดความลึกของร่องล้อ

- 3.1 หลังทำการวิ่งผ่านด้วยน้ำหนักระดับระยะทางระหว่างพื้นผิวด้านล่างของขอบตรงและทางเท้าหลังจากเกจได้วางตามที่อธิบายไว้ในข้อ 1. และ 2. แสดงดังรูปที่ 3.24 – 3.25
- 3.2 ควรทำการวัดเพื่อจบบางที่ใกล้ที่สุด จำนวนการวัดที่เพียงพอควรดำเนินการตามขอบตรงเพื่อกำหนดระยะทางที่มากที่สุดระหว่างขอบตรงและทางเท้า



รูปที่ 3.24 การวิ่งผ่านของน้ำหนักรถเพื่อจำลองพฤติกรรมของรถบนถนน



รูปที่ 3.25 การวัดค่าการทรุดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

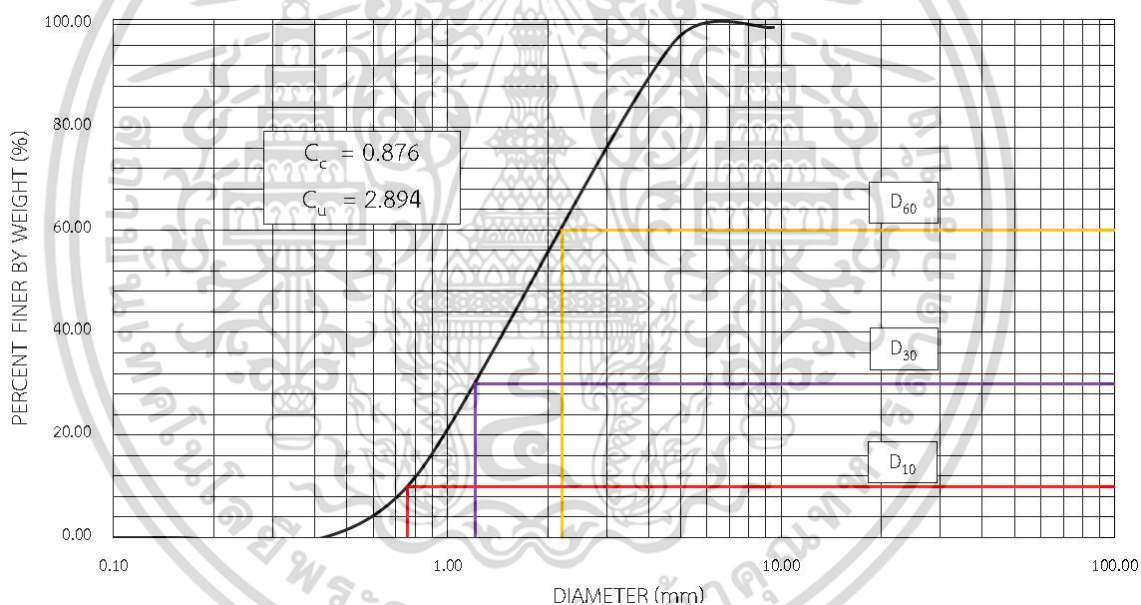
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของทราย

##### 4.1.1 ผลการทดสอบการหาขนาดเม็ดดินวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis)

ในการทดสอบการหาขนาดเม็ดดินวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) ทำให้ทราบขนาดของเม็ดดินและการกระจายส่วนคละของเม็ดดิน เพื่อหาคุณสมบัติของทรายโดยในการทดสอบโดยใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรง จำนวน 3 ตัวอย่าง ผลของค่าเฉลี่ยที่ได้นำมาแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4.1

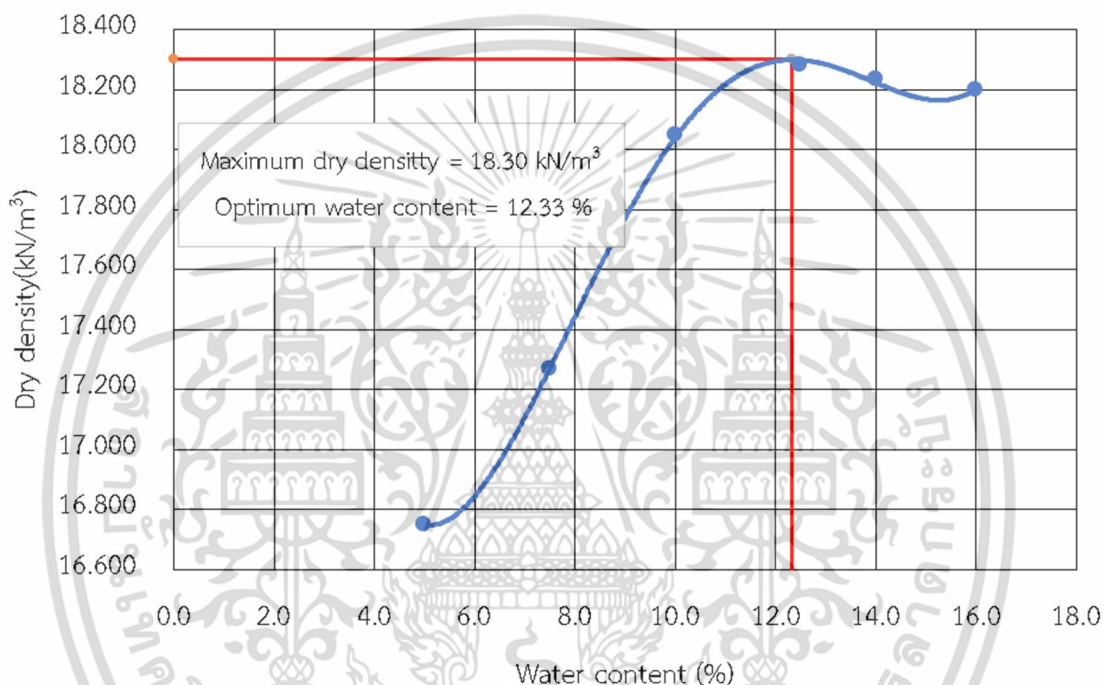


รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน

จากรูปที่ 4.1 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Coefficient of uniformity,  $C_u$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง (Coefficient of curvature,  $C_c$ ) เท่ากับ 2.894 และ 0.876 ตามลำดับ ดังนั้นดินที่เลือกใช้เป็นดินทรายที่มีกรวดเม็ดละเอียดปน มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly graded soil) โดยค่า  $D_{10}$  คือ ขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้จำนวนร้อยละ 10,  $D_{30}$  คือ ขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้จำนวนร้อยละ 30 และ  $D_{60}$  คือ ขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่านี้จำนวนร้อยละ 60

#### 4.1.2 ผลการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction)

ในการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นในการบดอัด ทำให้ทราบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัด ผลการทดสอบจะถูกนำไปใช้เพื่อตรวจสอบและควบคุมคุณภาพการบดอัดทรายในสนามทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2

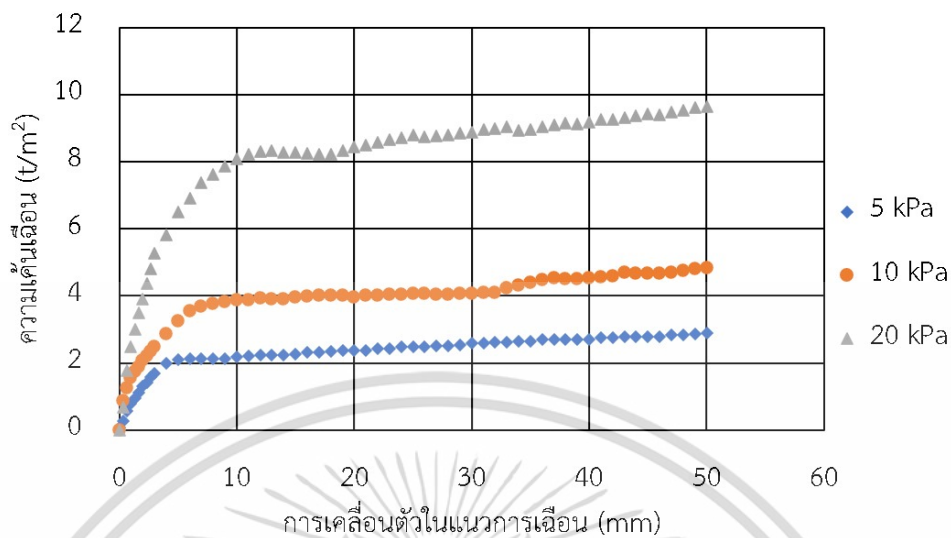


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้ง

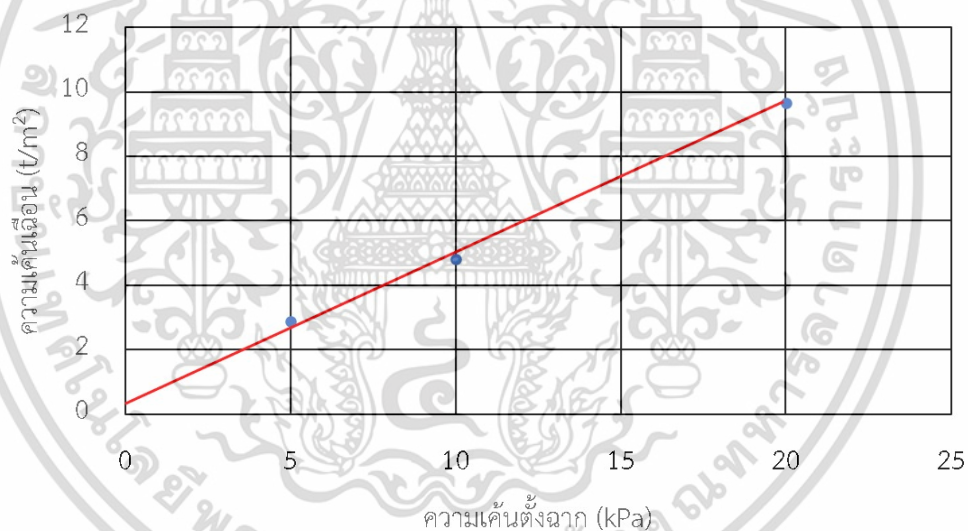
จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 18.30 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการบดอัดเท่ากับ 12.33 %

#### 4.1.3 การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง

ในการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear) เพื่อหาค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของมวลดิน (Shear strength) โดยจะแสดงค่าความต้านแรงเฉือนในมวลดิน ในรูปของค่าการเปลี่ยนแปลงแรงเชื่อมแน่น (Cohesion ; C) และ มุมเสียดทาน ( $\phi$ ) โดยผลการทดสอบจะนำไปเป็นข้อมูลประกอบการออกแบบสนามทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวการเฉือนกับความเค้นเฉือน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตั้งฉากกับความเค้นเฉือน

จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่าความเค้นตั้งฉากที่ 5 กิโลปาสกาล 10 กิโลปาสกาล และ 20 กิโลปาสกาล มีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเท่ากับ 2.88 ตันต่อตารางเมตร 4.82 ตันต่อตารางเมตร และ 9.64 ตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ โดยในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตั้งฉากกับความเค้นเฉือน ซึ่งมีค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 25.46 องศา

## 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์

### 4.2.1 การทดสอบวัดความหนาของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์

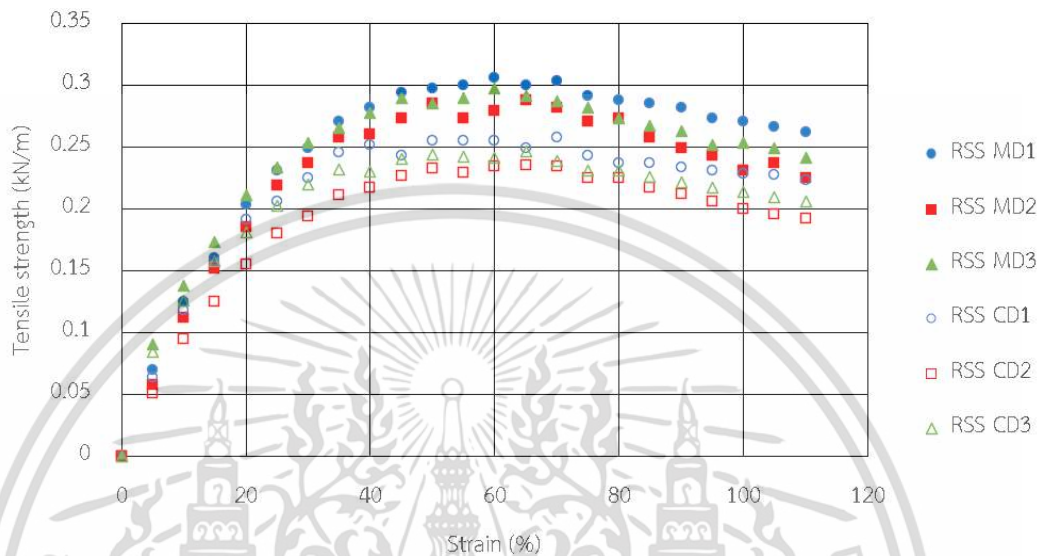
การทดสอบการหาความหนาของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติความหนาของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์โดยเป็นการทดสอบแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ที่มีขนาด 20 เซนติเมตร × 20 เซนติเมตรโดยแบ่งเป็นตัวอย่างของแผ่นยางพารารมควัน 3 ตัวอย่างและแผ่นยางคอมปาวด์ 3 ตัวอย่าง พร้อมแสดงค่าเฉลี่ยของความหนาแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาโดยเฉลี่ยของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์

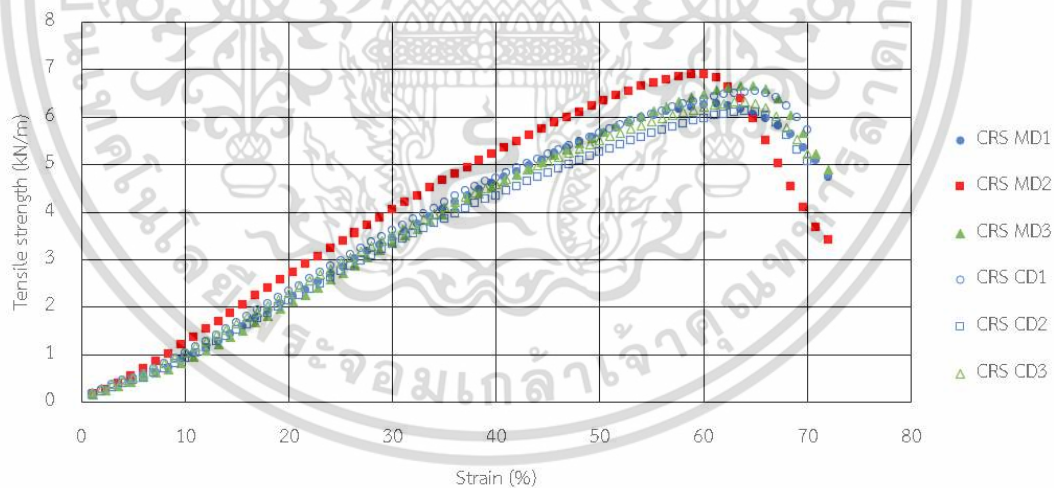
วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	ความหนาเฉลี่ย (mm)
แผ่นยางพารารมควัน	2.38
แผ่นยางคอมปาวด์	2.51

### 4.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์

การทดสอบการหาลำดับรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ ทำให้ทราบถึงกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ โดยเป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดในทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักร 3 ตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดในทิศทางตั้งฉากกับแนวเครื่องจักร 3 ตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์เป็นไปตามรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ พร้อมแสดงคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 กราฟกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควัน



รูปที่ 4.6 กราฟกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางคอมปาวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึงของแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางพาราคอมปาวด์

คุณสมบัติ	แผ่นยางพารารมควัน	แผ่นยางคอมปาวด์
ขนาดช่องเปิด (mm)	20 x 20	20 x 20
พื้นที่ช่องเปิด (mm <sup>2</sup> )	400	400
กำลังรับแรงดึงสูงสุด (kN/m) (ทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักร)	0.298	6.614
กำลังรับแรงดึงสูงสุด (kN/m) (ทิศทางตั้งฉากกับแนวเครื่องจักร)	0.246	6.327
กำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% (kN/m) (ทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักร)	0.073	0.251
กำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% (kN/m) (ทิศทางตั้งฉากกับแนวเครื่องจักร)	0.066	0.264

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักรและค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดทิศทางตั้งฉากกับแนวเครื่องจักรของแผ่นยางพารารมควันมีค่าเท่ากับ 0.298 และ 0.246 กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% ทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักรและค่ากำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% ทิศทางตั้งฉากกับแนวเครื่องจักรของแผ่นยางพารารมควันเท่ากับ 0.073 และ 0.066 กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักรและค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดทิศทางตั้งฉากกับแนวเครื่องจักรของแผ่นยางคอมปาวด์มีค่าเท่ากับ 6.614 และ 6.327 กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% ทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักรและค่ากำลังรับแรงดึงที่ความเครียด 2% ทิศทางตั้งฉากกับแนวเครื่องจักรของแผ่นยางคอมปาวด์เท่ากับ 0.251 และ 0.264 กิโลนิวตันต่อเมตร ตามลำดับ

ดังนั้นทิศทางขนานกับแนวเครื่องจักรของแผ่นยางพาราเป็นทิศทางที่ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด

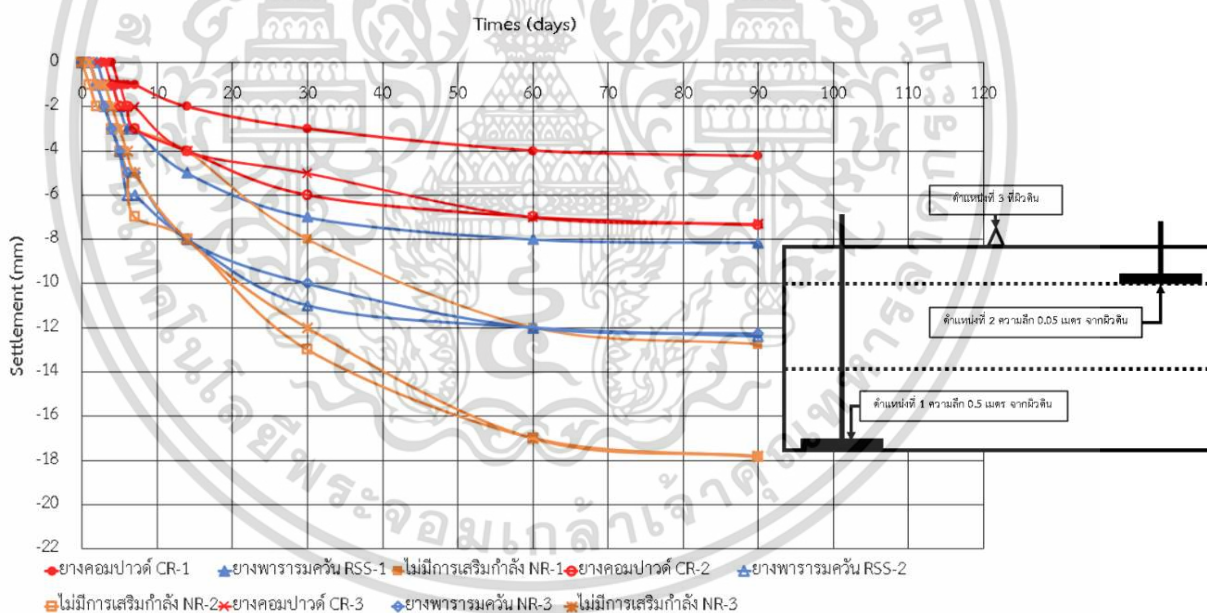
### 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังของคันดินด้วยแผ่นยางพาราภายในสนาม

#### 4.3.1 ผลการวัดค่าการทรุดตัว

ในการทดสอบการวัดค่าการทรุดตัวจะแสดงผลเปรียบเทียบของการทรุดตัวในแต่ละตำแหน่ง โดยการทรุดตัววัดผ่านแผ่นทรุดตัว (Settlement plate) ที่ติดตั้งในสนามทดสอบทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ

- ตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ใช้ในการวัดการทรุดตัวของชั้นดินเดิมของคันดิน
- ตำแหน่งที่ 2 ที่ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน ใช้ในการวัดการทรุดตัวของคันดินที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราชั้นแรก
- ตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ใช้ในการวัดการทรุดตัวของคันดินทั้งหมด

โดยการเปรียบเทียบแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟ ซึ่งค่าการทรุดตัวในตำแหน่งทั้งหมด จะแสดงผลรวม ดังรูปที่ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน และ ตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน

จากรูปที่ 4.7 เห็นได้ว่าในตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ (CR-1) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 4.25 มิลลิเมตร ส่วนบริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางรมควัน (RSS-1) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 8.15 มิลลิเมตร และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง (NR-1) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 12.76 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์และแผ่นยางพารารมควันกับบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังมีค่าการทรุดตัวลดลงร้อยละ 66.69 และ 36.13 ตามลำดับ

ส่วนในตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ (CR-2) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 7.37 มิลลิเมตร ส่วนบริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางรมควัน (RSS-2) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 12.4 มิลลิเมตร และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง (NR-2) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 17.86 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์และแผ่นยางพารารมควันกับบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังมีค่าการทรุดตัวลดลงร้อยละ 58.73 และ 30.57 ตามลำดับ

และในตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ (CR-3) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 7.30 มิลลิเมตร ส่วนบริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางรมควัน (RSS-3) มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 12.25 มิลลิเมตร และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง (NR-3) จะมีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 17.80 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์และแผ่นยางพารารมควันกับบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังมีค่าการทรุดตัวลดลงร้อยละ 58.99 และ 31.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการทรุดตัวในแต่ละตำแหน่งภายในสนามทดสอบ

ตำแหน่งภายในสนามทดสอบ	การทรุดตัวกรณีไม่มี การเสริมกำลัง (mm)	การทรุดตัวกรณีเสริมกำลังด้วย แผ่นยางพารารวมคว้น (mm)	การทรุดตัวกรณีเสริมกำลังด้วย แผ่นยางคอมปาวด์ (mm)	การเปลี่ยนแปลงของค่าการทรุดตัวจากการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมคว้นกับกรณีไม่มี การเสริมกำลัง	การเปลี่ยนแปลงของค่าการทรุดตัวจากการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์กับกรณีไม่มี การเสริมกำลัง
ตำแหน่งที่ 1 (ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน)	12.76	8.15	4.25	ลดลงร้อยละ 36.13	ลดลงร้อยละ 66.69
ตำแหน่งที่ 2 (ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน)	17.86	12.40	7.37	ลดลงร้อยละ 30.57	ลดลงร้อยละ 58.73
ตำแหน่งที่ 3 (ที่ผิวดิน)	17.80	12.25	7.30	ลดลงร้อยละ 31.18	ลดลงร้อยละ 58.99

จากตารางที่ 4.3 สังเกตได้ว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมคว้นและแผ่นยางคอมปาวด์มีส่วนช่วยในการลดค่าการทรุดตัวลง ในงานวิจัยของ Yan Zhuang (2022) ศึกษาเกี่ยวกับแรงดึงที่เกิดจากวัสดุเสริมแรงผ่านโมเดล 3D ในโปรแกรม FEM (Finite element) พบว่าการใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินหากเกิดแรงกดในแนวตั้งหรือจำลองพฤติกรรมการวิ่งบนถนนจะการกระจายแรงและสามารถลดค่าการทรุดตัวลงได้ในโมเดลจำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองพฤติกรรมบนถนนและมีการวัดค่าการทรุดตัวจึงเห็นได้ว่าการที่ใช้แผ่นยางพารารวมคว้นและแผ่นยางคอมปาวด์ในการเสริมกำลังสามารถช่วยในการลดการทรุดตัวได้เช่นเดียวกันกับตาข่ายเสริมกำลังดิน

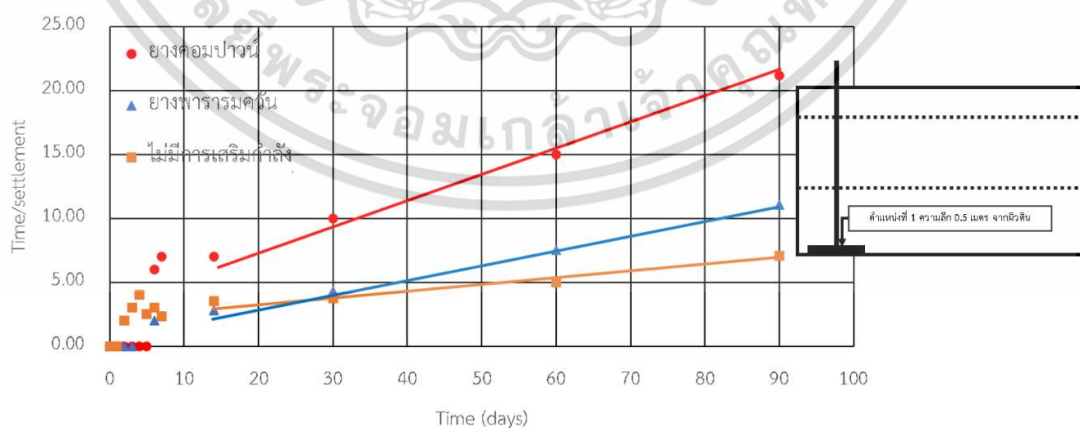
และยังมีงานวิจัยของ Selçuk Bildik (2020) ศึกษาถึงผลการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดินภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้จำนวนของตาข่ายเสริมกำลังดินในการเสริมกำลังต่างกันโดยผลสุดท้ายพบว่าหากมีการใช้ตาข่ายเสริมกำลังจำนวนตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปในการเสริมกำลังจะส่งผลให้กำลังรับแรงแบกทานในระบบเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งยังช่วยลดการทรุดตัวได้อย่างดี และช่วยกระจายความเค้นกดได้ แต่ความเหมาะสมในการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินอยู่ที่จำนวน 2 ชั้นเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการเสริม

กำลังด้วยแผ่นยางพารารมควันและแผ่นยางคอมปาวด์ในสนามจำนวน 2 ชั้นด้วยเช่นกันโดยผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราทั้ง 2 ชนิดนั้นส่งผลที่สอดคล้องกันกับตาข่ายเสริมกำลังดินเช่นกันที่สามารถลดค่าการทรุดตัวลงได้

ส่วนกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์มีค่าการทรุดตัวที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน จากงานวิจัยของ Cuelho and Perkins (2016) ได้วิเคราะห์ค่าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังในดินด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินนั้นมากที่สุดคือค่าความแข็งแรงของข้อต่อ (Stiffness junction) ผ่านการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และเนื่องจากค่ากำลังรับแรงดึงของแผ่นยางคอมปาวด์ที่มีค่ามากกว่าแผ่นยางพารารมควันจึงเป็นผลให้ค่าความลึกของร่องล้อที่ได้นั้นลดลงมากกว่า และในงานวิจัยของ Bingye Han (2020) กล่าวถึงกำลังรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังดินนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเสริมกำลังในคันดิน หากมีกำลังรับแรงดึงที่สูงมากขึ้นกลไกในการเสริมกำลังก็จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นเหตุให้กรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์มีค่าการทรุดตัวลดลงได้มากกว่ากรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน

#### 4.3.2 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธี Hyperbolic method

การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีการ Hyperbolic plot ที่จะทำการเอาค่า slope ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อการทรุดตัวกับเวลา หาค่าการทรุดตัวสุดท้าย โดยจะแสดงผลตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน และตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ดังรูปที่ 4.8-4.10 และตารางที่ 4.4-4.6 ตามลำดับ

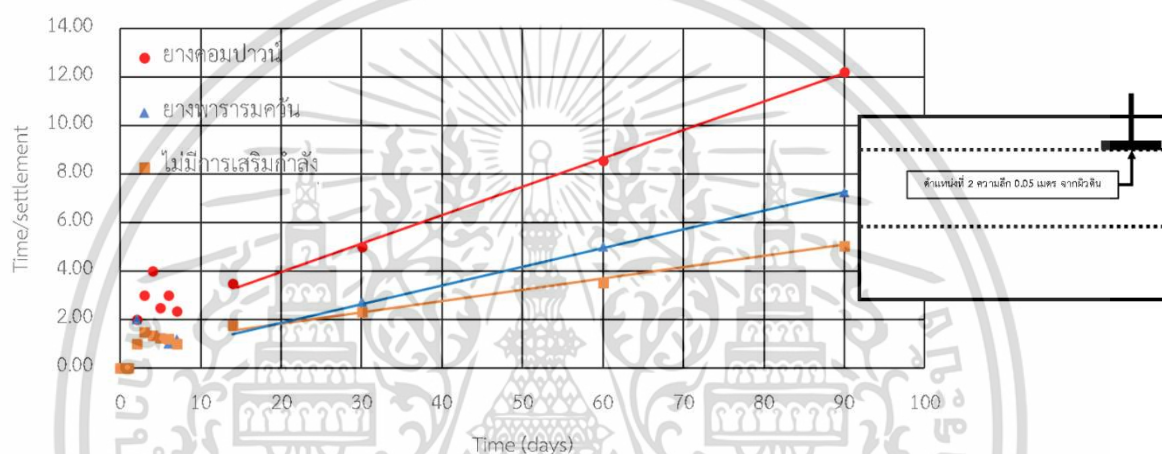


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวสุดท้ายของคันดิน (1/slope) (มิลลิเมตร)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	4.651
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	8.571
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	16.667

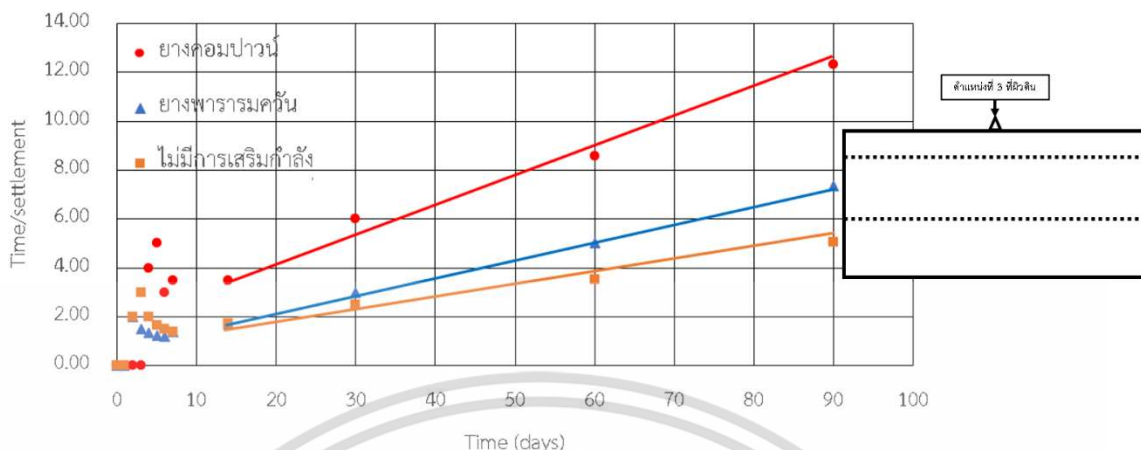


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวสุดท้ายของคันดิน (1/slope) (มิลลิเมตร)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	8.333
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	13.280
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	19.881

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



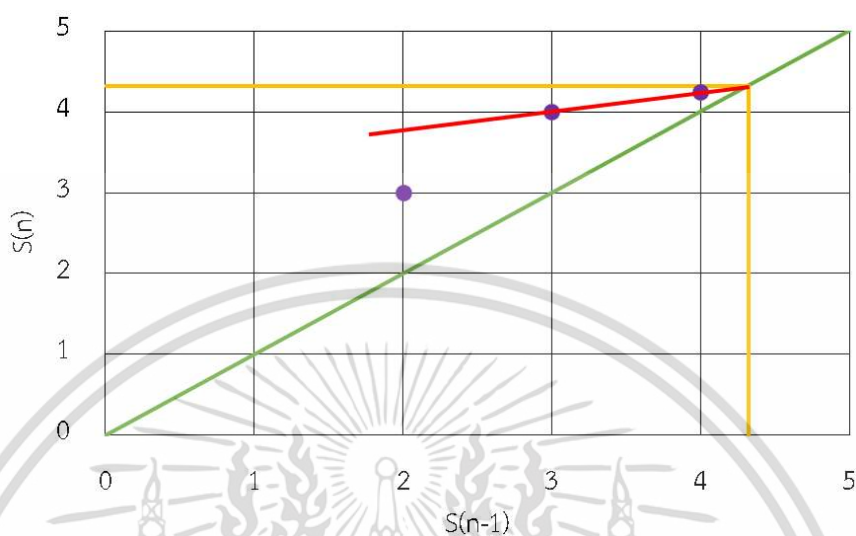
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ด้วยวิธี Hyperbolic method

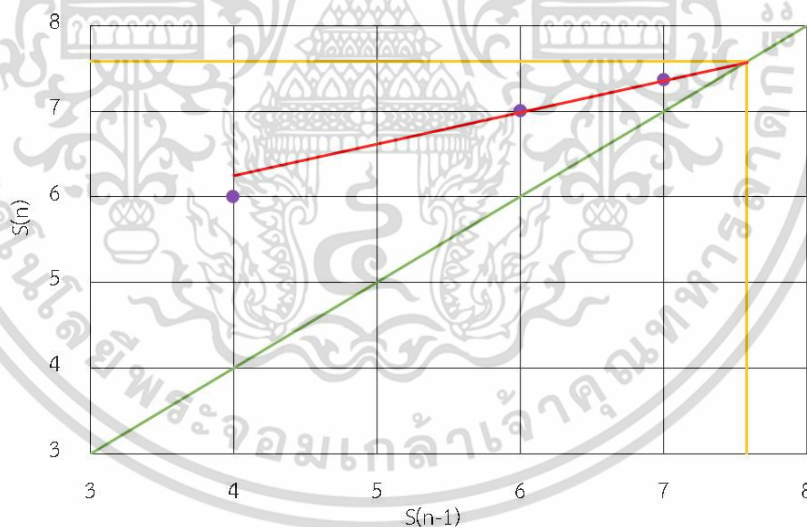
วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวสุดท้ายของคันดิน (1/slope) (มิลลิเมตร)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	9.009
แผ่นยางพารารวมควั่น (RSS)	12.771
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	22.075

#### 4.3.3 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธี Asaoka method

การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธีการ Asaoka method ลากเส้น 45 องศาบนกราฟ หลังจากการพล็อตค่าการทรุดตัวครั้งที่  $n$  ( $S_n$ ) กับค่าการทรุดตัวครั้งก่อนหน้า ( $S_{n-1}$ ) จะเกิดจุดตัดกันของเส้นแนวโน้มกราฟการทรุดตัวและเส้นกราฟ 45 องศา ซึ่งเป็นจุดที่ดินหยุดการทรุดตัว ( $S_n = S_{n-1}$ ) ซึ่งก็คือค่าการทรุดตัวสูงสุดนั่นเอง โดยจะแสดงผลตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน และตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ของบริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ ดังรูปที่ 4.11-4.13 ตามลำดับ บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมควั่น ดังรูปที่ 4.14-4.16 ตามลำดับ บริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง ดังรูปที่ 4.17-4.19 ตามลำดับ และแสดงผลเปรียบเทียบในแต่ละตำแหน่งในตารางที่ 4.7-4.9 ตามลำดับ

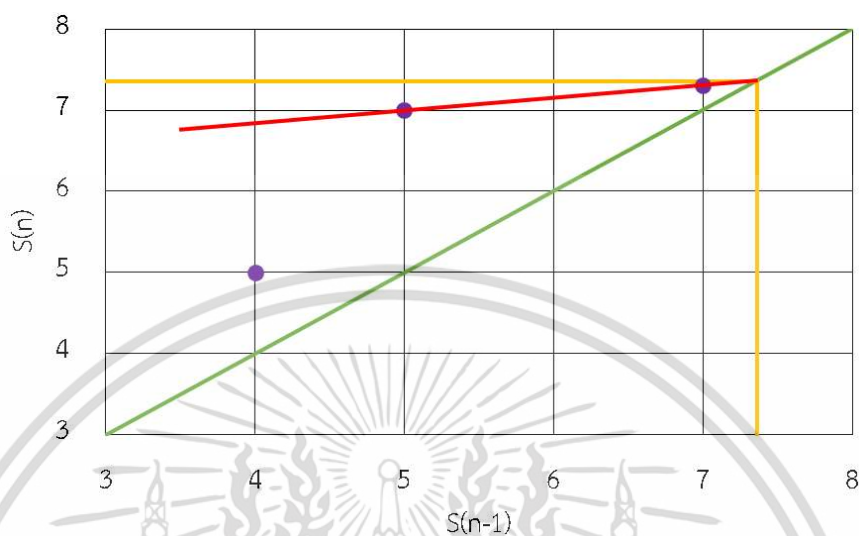


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ ด้วยวิธี Asaoka method

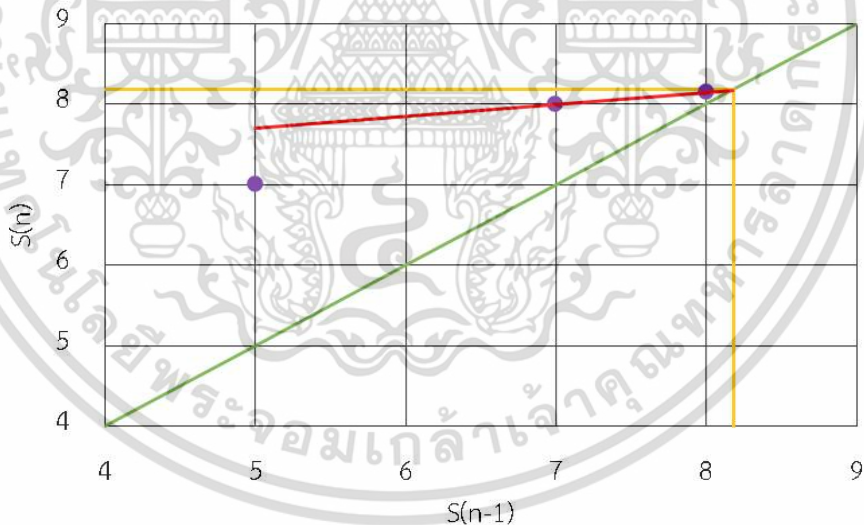


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ ด้วยวิธี Asaoka method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

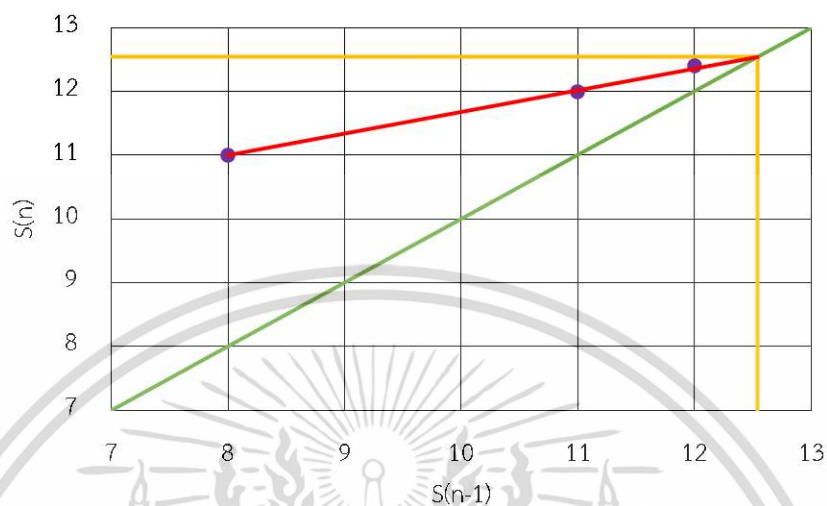


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการคาดคะเนการจราจรตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ ด้วยวิธี Asaoka method



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการคาดคะเนการจราจรตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน ด้วยวิธี Asaoka method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

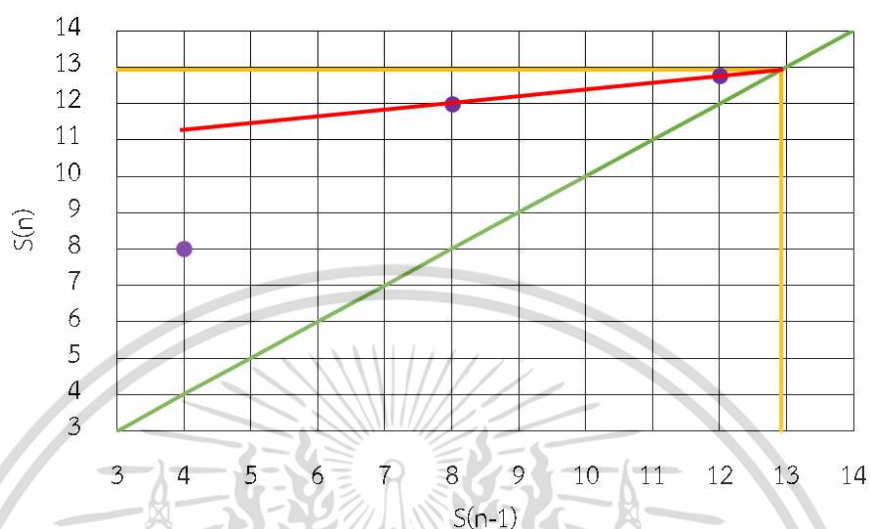


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน ด้วยวิธี Asoka method

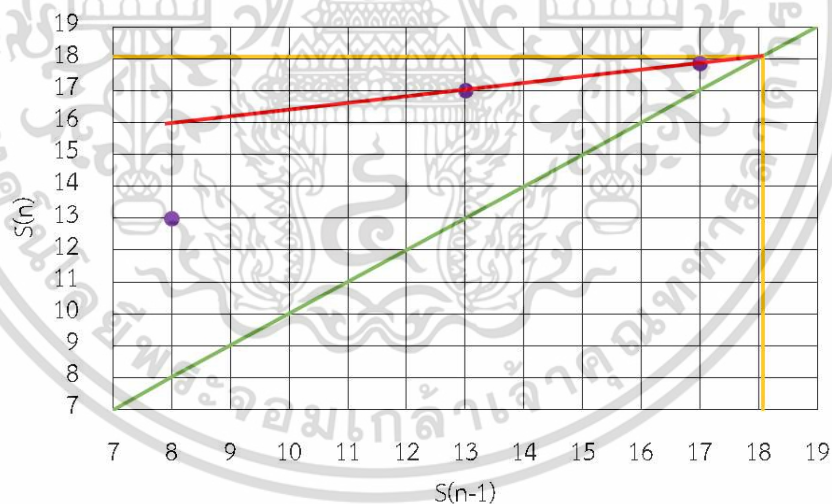


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน ด้วยวิธี Asoka method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

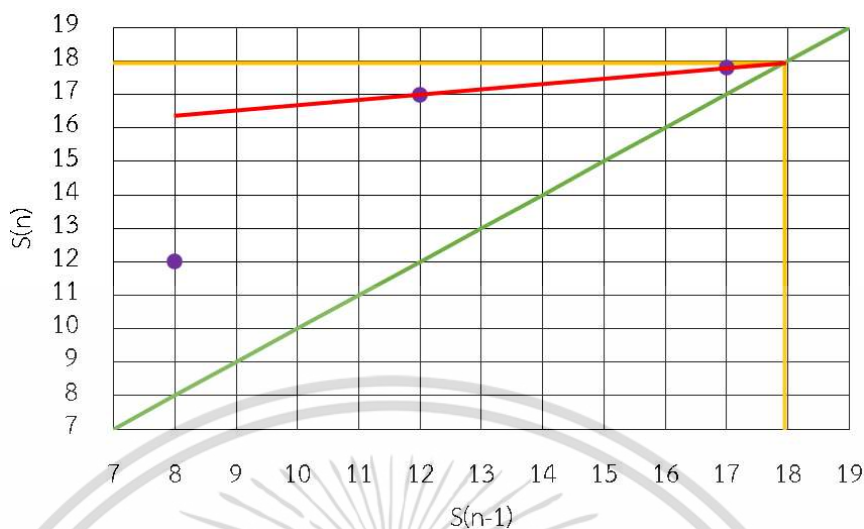


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง ด้วยวิธี Asaoka method



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง ด้วยวิธี Asaoka method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง ด้วยวิธี Asaoka method

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Asaoka method

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวสุดท้ายของคันดิน (มิลลิเมตร)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	4.32
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	8.18
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	12.92

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน ด้วยวิธี Asaoka method

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวสุดท้ายของคันดิน (มิลลิเมตร)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	7.58
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	12.54
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	18.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.9** แสดงผลการคาดคะเนการทรุดตัวตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน ด้วยวิธี Asaoka method

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวสุดท้ายของคันดิน (มิลลิเมตร)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	7.36
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	12.29
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	17.95

**ตารางที่ 4.10** การเปรียบเทียบการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวจริง ในสนาม (mm)	การทรุดตัวจากการคาดคะเน	
		Hyperbolic (mm)	Asaoka (mm)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	4.25	4.651	4.32
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	8.15	8.571	8.18
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	12.76	16.667	12.92

**ตารางที่ 4.11** การเปรียบเทียบการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวจริง ในสนาม (mm)	การทรุดตัวจากการคาดคะเน	
		Hyperbolic (mm)	Asaoka (mm)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	7.37	8.333	7.58
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	12.40	13.280	12.54
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	17.86	19.881	18.07

**ตารางที่ 4.12** การเปรียบเทียบการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน

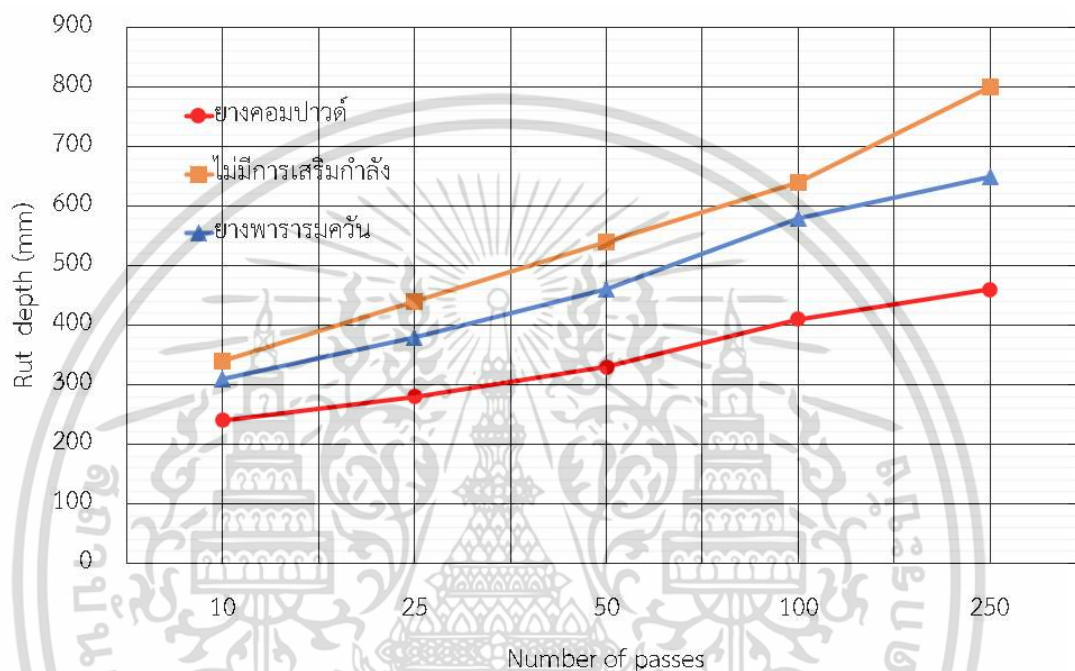
วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลัง	การทรุดตัวจริง ในสนาม (mm)	การทรุดตัวจากการคาดคะเน	
		Hyperbolic (mm)	Asaoka (mm)
แผ่นยางคอมปาวด์ (Compound rubber)	7.30	9.009	7.36
แผ่นยางพารารมควัน (RSS)	12.25	12.771	12.29
ไม่มีการเสริมกำลัง (Non-reinforcement)	17.80	22.075	17.95

การนำวิธี Asaoka method และ วิธีการ Hyperbolic method มาใช้เพื่อตรวจสอบและคาดคะเนค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่เกิดขึ้นภายในสนามทดสอบ ซึ่งจากตารางที่ 4.10-4.12 เห็นได้ว่าการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายด้วยวิธี Asaoka method มีค่าใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวจริงที่เกิดขึ้นในสนาม เนื่องจากสนามทดสอบสร้างจากดินทราย วิธี Asaoka method สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการระบายน้ำด้วยท่อทราย (Sand Drain Problems) ได้โดยสามารถใช้ได้กับ การอัดตัวคายน้ำทางเดียว (One-way Drainage) หรือ การอัดตัวคายน้ำสองทาง (Two-way Drainage) ซึ่งเหมาะสำหรับการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายในสนามทดสอบ ส่วนวิธีการ Hyperbolic method มีค่าการทรุดตัวไม่ใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวจริงที่เกิดขึ้นในสนาม โดยวิธีการ Hyperbolic method เหมาะสำหรับการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายในดินอ่อน (Tan, 1994;Asaoka, 1978)

#### 4.3.4 ผลการวัดค่าความลึกของร่องล้อภายในสนาม

จากงานวิจัยของ Latha (2010) ได้ทดสอบการวัดค่าความลึกของร่องล้อภายในสนามด้วยการวิ่งผ่านด้วยน้ำหนักที่เกิดจากรถสกูเตอร์น้ำหนัก 106 กิโลกรัม และน้ำหนักคนขับที่ 55 กิโลกรัม จำนวน 250 รอบ ซึ่งเป็นแนวทางในการจำลองวัตถุที่เป็นน้ำหนักในการวิ่งผ่านในสนามทดสอบซึ่งน้ำหนักในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากรถจักรยานยนต์ที่มีน้ำหนักยกี่ห้อ Honda รุ่น all new scoopy i ปี 2018 ที่มีน้ำหนัก 98 กิโลกรัม (บริษัท ไทยฮอนด้า จำกัด, 2018) และอ้างอิงน้ำหนักมาตรฐานของคนไทยโดยไม่ระบุเพศโดยประมาณ 63.2 กิโลกรัม (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2551) เมื่อรวมกันจะมีน้ำหนักอยู่ที่ 161.2 กิโลกรัม โดยวัตถุจำลองสร้างโดยการใช้รถเข็นปูนล้อเดียวน้ำหนักประมาณ 20

กิโลกรัมพร้อมใส่น้ำหนักถ่วงอีกประมาณ 140 กิโลกรัม รวมมีน้ำหนักประมาณ 160 กิโลกรัม โดยดำเนินการทดสอบหลังจากการสร้างสนามทดสอบเสร็จสิ้น 14 วัน พร้อมแสดงผลในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความลึกของร่องล้อภายในสนามทดสอบ



รูปที่ 4.21 การวัดค่าการทรุดตัวสุดท้ายในบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การวัดค่าการทรุดตัวสุดท้ายในบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน



รูปที่ 4.23 การวัดค่าการทรุดตัวสุดท้ายในบริเวณที่ไม่มีเสริมกำลัง

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าค่าความลึกของร่องล้อบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์จะมีค่าความลึกสูงสุดร่องล้ออยู่ที่ 460 มิลลิเมตร ส่วนค่าความลึกของร่องล้อบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควันจะมีค่าความลึกร่องล้อสูงสุดอยู่ที่ 650 มิลลิเมตร และค่าความลึกของร่องล้อบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังจะมีค่าความลึกสูงสุดอยู่ที่ 800 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบจะพบว่าบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์และบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควันจะมีค่าความลึกสูงสุดลดลงไปถึง 42.5 % และ 18.75 % ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการลดลงของค่าความลึกของร่องล้อที่เกิดขึ้นภายในสนาม เหตุเนื่องมาจากการทำแผ่นยางพาราออกมาในรูปแบบแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบสองทาง (Biaxial Geogrid) จึงทำให้แผ่นยางพาราที่ได้มีกลไกการเสริมกำลังดินเช่นเดียวกับกับแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยในการช่วยลดค่าความลึกของร่องล้อได้ผลจากแรงดึงที่เกิดจากวัสดุที่เมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้เกิดการช่วยกระจายแรงที่กระทำลงสู่ด้านล่างจึงส่งผลให้ค่าความลึกของร่องล้อนั้นลดลง (Fannin, 1996, Hufenus, 2006) ส่วนในงานวิจัยของ Zainab Ahmed Alkaissi (2021) ได้ศึกษาผลของการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังโดยการจำลองพฤติกรรมกรวยวงถนนผ่านโปรแกรม FEM (Finite element) ซึ่งผลที่ได้คือแรงที่เกิดจากการสัญจรนั้นกระจายออกเป็นวงกว้าง พร้อมทั้งลดค่าความลึกของร่องล้อลงได้และสามารถยืดอายุการใช้งานของถนนนั้นได้เช่นกัน และในงานวิจัยของ Amany (2023) ศึกษาถึงผลการเสริมกำลังของตาข่ายเสริมกำลังดินในดินฐานรากเป็นดินทรายโดยการจำลองการให้น้ำหนักซ้ำในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลในการทดสอบคือการใช้ตาข่ายเสริมกำลังชนิด CE131 ที่มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 5.8 กิโลนิวตันต่อเมตร ในชั้นดินทรายก็ส่งผลให้ลดร่องล้อละ 16 ถึง 31 ได้เช่นกัน โดยการร่องล้อที่แตกต่างของค่าความลึกของร่องล้อนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุพื้นทาง ในขณะที่ผลของการทดสอบค่าความลึกของร่องล้อภายในสนามทดสอบของงานวิจัยนี้ที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมควันและแผ่นยางคอมปาวด์เป็นในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยข้างต้นซึ่งลดค่าความลึกของร่องล้อลงได้เหมือนกัน

สังเกตได้ว่ากรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ช่วยลดค่าความลึกของร่องล้อได้มากกว่ากรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมควันซึ่งสามารถอ้างอิงได้ถึงงานวิจัยของ Cuelho and Perkins (2016) และ Han (2020) ที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.3.1 ค่าการทรุดตัว เนื่องจากค่าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังในดินคือค่าความแข็งแกร่งของข้อต่อ (Stiffness junctions) และตาข่ายเสริมกำลังดินที่มีค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าจะมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังได้ดีกว่า จึงทำให้กรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ช่วยลดค่าความลึกของร่องล้อได้มีประสิทธิภาพมากกว่ากรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมควัน

จากการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรงของทรายที่ใช้สร้างคันดินที่มีค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 25.46 องศา และออกแบบลาดคันดินที่มีความชัน 1 ต่อ 1 เพื่อสังเกตพฤติกรรมของเสถียรภาพในคันดิน ในงานวิจัยของ Mesut (2022) ที่ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคันดินทรายที่วางตัวบนชั้นทรายอัดแน่นผ่านโปรแกรม Plaxis 2D และวิเคราะห์เชิงตัวเลขให้ได้ผลการทดสอบที่ว่า การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินบนลาดคันดินทรายช่วยเพิ่มการรักษาเสถียรภาพของลาดคันดินได้ ซึ่งในการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางพาราทั้ง 2 ชนิด สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของคันดินทรายในสนามได้เช่นกัน

จากผลการทดสอบของงานวิจัย พบว่าการใช้แผ่นยางคอมปาวด์จะมีผลในการช่วยเสริมกำลังมากกว่าแผ่นยางพาราธรรมดานั่นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นทั้งในผลการทดสอบการทรุดตัวและการทดสอบความลึกของร่องล้อ โดยแผ่นยางพาราทั้ง 2 ชนิด ได้ถูกออกแบบมาให้อยู่ในรูปแบบแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบสองทาง จึงได้มีกลไกที่ช่วยในการเสริมกำลังเช่นเดียวกัน ซึ่งกลไกการเสริมกำลังเกี่ยวกับการทรุดตัวคือลดการเคลื่อนตัวออกด้านข้าง (Lateral restraint) ซึ่งเมื่อเกิดน้ำหนักมากระทำบนชั้นดิน แผ่นยางทั้ง 2 ชนิดก็จะทำการจำกัดการเคลื่อนตัวของดินโดยเป็นผลให้ความอดุลย์ของดินเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการทรุดตัวลดลงและเกิดการกระจายแรงลงสู่ชั้นดินด้านล่าง ส่วนกลไกการเสริมกำลังที่เกี่ยวกับการลดลงของค่าความลึกร่องล้อคือ แรงดึงที่เกิดจากวัสดุเสริมกำลัง (Membrane tension effect) ซึ่งเมื่อเกิดน้ำหนักมากระทำบนชั้นดิน จะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในวัสดุเสริมกำลังทำให้เกิดการกระจายแรงจากด้านบนลงสู่ชั้นดินด้านล่าง ซึ่งกลไกการเสริมกำลังเหล่านี้ได้มีการอธิบายไว้ในงานวิจัยของ Christopher (2010)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นยางพาราเสริมกำลังคันดินในสนาม เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบภายในสนามทดสอบในบริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมคันและบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังจะได้ผลสรุปดังนี้

1) ค่าการวัดค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงภายในสนามทดสอบด้วยการวัดค่าระดับจากกล้องระดับและไม้สตาฟละเอียดทดสอบผ่านมาตรฐาน ทล. - ม. 101/2532 (DH-S 101/2532) โดยตำแหน่งการวัดการทรุดตัวแบ่งออกเป็น 3 ตำแหน่ง ได้ผลสรุปดังนี้ ในตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์จะทำให้เกิดการทรุดตัวน้อยที่สุดมีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 4.25 มิลลิเมตร บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมคัน มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 8.15 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังที่มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 12.76 มิลลิเมตร พบว่าค่าการทรุดตัวลดลงไปถึงร้อยละ 66.69 และ 36.13 ตามลำดับ ในตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์จะทำให้เกิดการทรุดตัวน้อยที่สุดมีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 7.37 มิลลิเมตร บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมคัน มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 12.40 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังที่มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 17.86 มิลลิเมตร พบว่าค่าการทรุดตัวลดลงไปถึงร้อยละ 58.73 และ 30.57 ตามลำดับ ส่วนในตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์จะทำให้เกิดการทรุดตัวน้อยที่สุดมีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 7.30 มิลลิเมตร บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมคัน มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 12.25 มิลลิเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังที่มีค่าการทรุดตัวสูงสุดเท่ากับ 17.80 มิลลิเมตร พบว่าค่าการทรุดตัวลดลงไปถึงร้อยละ 58.99 และ 31.18 ตามลำดับ

ส่วนค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากการคาดคะเนด้วยวิธีไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic method) โดยค่าการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารวมคัน และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง มีค่าเท่ากับ 4.651 มิลลิเมตร 8.571 มิลลิเมตร และ 16.667 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 2 ความ

ลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง มีค่าเท่ากับ 8.333 มิลลิเมตร 13.280 มิลลิเมตร และ 19.881 มิลลิเมตร ตามลำดับ และค่าการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง มีค่าเท่ากับ 9.009 มิลลิเมตร 12.771 มิลลิเมตร และ 22.075 มิลลิเมตร ตามลำดับ

และค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากการคาดคะเนด้วยวิธีอะโซกะ (Asaoka method) โดยค่าการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 1 ความลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง มีค่าเท่ากับ 4.32 มิลลิเมตร 8.18 มิลลิเมตร และ 12.92 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 2 ความลึก 0.05 เมตร จากผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง มีค่าเท่ากับ 7.58 มิลลิเมตร 12.54 มิลลิเมตร และ 18.07 มิลลิเมตร ตามลำดับ และค่าการทรุดตัวในตำแหน่งที่ 3 ที่ผิวดิน บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควัน และบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลัง มีค่าเท่ากับ 7.36 มิลลิเมตร 12.29 มิลลิเมตร และ 17.95 มิลลิเมตร ตามลำดับ

2) ค่าความลึกของร่องล้อภายในสนามทดสอบด้วยการจำลองการวิ่งผ่านน้ำหนักรถจำนวน 250 รอบผ่านมาตรฐาน ASTM E1703 ซึ่งได้ผลสรุปของค่าความลึกร่องล้อสูงสุดดังนี้ บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์เกิดค่าความลึกของร่องล้อย่อยที่สุดเท่ากับ 460 มิลลิเมตร บริเวณที่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารารมควันเกิดค่าความลึกร่องล้อสูงสุดเท่ากับ 650 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการเสริมกำลังภายในสนามที่มีค่าความลึกร่องล้อสูงสุดเท่ากับ 800 มิลลิเมตร พบว่าค่าความลึกร่องล้อลดลงไปถึงร้อยละ 42.5 และ 18.75ตามลำดับ

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงและค่าความลึกของร่องล้อนั้นการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์และแผ่นยางพารารมควันสามารถช่วยลดการทรุดตัวภายในสนามได้ โดยการเสริมกำลังด้วยแผ่นยางคอมปาวด์จะมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังมากที่สุด และแผ่นยางพารารมควันจะมีประสิทธิภาพรองลงมา เนื่องจากค่ากำลังรับแรงดึงของแผ่นยางคอมปาวด์มีมากกว่าแผ่นยางพารารมควันจึงมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังมากกว่าซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Bingye Han (2020)

สุดท้ายนี้จากการทดสอบการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นยางพาราเสริมกำลังคั่นดินในสนามสามารถสรุปได้ว่าแผ่นยางคอมปาวด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการช่วยเสริมกำลังในคั่นดินภายในสนามทดสอบ และ แผ่นยางพารารวมควันมีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังรองลงมา เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเสริมกำลัง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### การนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อในอนาคต

1. งานวิจัยขั้นนี้ได้ทำการทดสอบภายในสนามที่มีพื้นที่จำกัด ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการสร้างสนามทดสอบที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น พร้อมกับการทดสอบด้วยวิธีการที่หลากหลายมากขึ้น
2. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับดินหลากชนิดเพื่อให้ได้ผลที่หลากหลายมากขึ้น
3. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

## บรรณานุกรม

- Amany Gouda Salama, Azza Mohamed Elboudy and Nasser Mosleh Saleh. (2023). “Evaluation of Geogrid in Unpaved Road Constructed on Sand Subgrade under Cyclic Loading” **Delta University Scientific Journal**, Vol.06 - Iss.01, (2023), 103-110
- Anubud, L., Pakkapon, J., Jiratchaya, A., Weerawut, N. and Salisa, C. (2023). “Evaluation of Interface Shear Strength Coefficient of Alternative Geogrid Made from Para Rubber Sheet” **Polymers**. 2023,15,1707.
- Asaoka, A., (1978). “Observational procedure of settlement prediction.” **Soils and Foundations, Journal of the Soils and Foundations Engineering**, 18(4), 87-101
- ASTM D1557. (2007). “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)).” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D1883. (1999). “Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory Compacted Soils” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487. (2006). “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080. (2011). “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D422. (2007). “Standard Test Method of Particle Size Analysis of Soils” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D6591. (2003). “Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.

- ASTM D6637. (2001). “Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D698. (2007). “Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12, 400 ft- lbf/ ft<sup>3</sup> ( 600 kN-m/m<sup>3</sup>)).” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM E1703. (2000). “ Standard Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge” **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- Bingye Han, Pawel Polaczyk, Yuetan Ma, Miaomiao Zhang, Xiaoqi Lu, Fulu Wei. et al. (2020). “Laboratory Investigation of Critical Factors Affecting Geogrid Reinforcement on Aggregate Base Using Loaded Wheel Tester” **J. Transp. Eng.**, Part B: Pavements, 2020, 146(4)
- Chaiyaput, S., Arwaedo, N., Jamsawang, P. and Ayawanna, J. (2022). “Natural Para Rubber in Road Embankment Stabilization”. **Appl. Sci.** 2022, 12, 1394.
- Christopher, B.R. (2010). “Geogrids in Roadway and Pavement Systems.” **NAUE GmbH & Co. KG, and Global Synthetics Pty Ltd.** 23 Nov. – 1 Dec., 2010.
- Cuelho, E. and Perkins, S. (2016). “Geosynthetic subgrade stabilization – Field testing and design method calibration” **Transportation Geotechnics**. 22–34
- Fannin, R. J. and Sigurdsson, O. (1996). “FIELD OBSERVATIONS ON STABILIZATION OF UNPAVED ROADS WITH GEOSYNTHETICS” **J. Geotech. Engrg.** 1996.122:544-553.
- flatGEO Consulting Company Limited. (2015). “**Compaction curve**” Retrieved February 1, 2023, from [www.happho.com](http://www.happho.com) [www.flatgeo.com](http://www.flatgeo.com)
- Giroud, J.P., Ah-Line, C., and Bonaparte, R. (1984). “Design of Unpaved Roads and Trafficked Areas with Geogrids.” **Proceedings of the symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering**. Institute of Civil Engineers. 116-127.

- Haliburton, T.A., Lawmaster, J.D. and McGuffey, V.C. (1981). "Use of Engineering Fabrics in Transportation Related Applications." **Federal Highway Administration**, FHWA DTFH61-80-C-00094.
- Happho Solutions Vmart Private Limited. (2018). "**Type of Geogrid based on Pattern**" Retrieved February 25, 2023, from [www.happho.com](http://www.happho.com)
- Holtz, R.D, Christopher, B.R. and Berg, R.R. (1998). "Geosynthetic design and construction guidelines." **Federal Highway Administration**, Washington, DC, FHWA-HI-98-038, 460 p.
- Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S.M. Bronnimann, R. (2006). "Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade". **Geotext Geomembr**, 24(1): 21–37.
- Koerner, R. M. (1997). "Designing with Geosynthetics, 5th Edition" **Geosynthetic Institute Emeritus Professor of Drexel University**. Pearson Education, Inc. United States of America.
- Latha, G., Asha Nair and Hemalatha, M. (2010). "Performance of geosynthetics in unpaved roads" **International Journal of Geotechnical Engineering**, 4:3, 337-349
- Mesut GÖR, Nichirvan Ramadhan TAHER, Hüseyin Suha AKSOY and Halmat Ahmed AWLLA. (2022). "EFFECT OF GEOGRID INCLUSION ON THE SLOPE STABILITY" **5<sup>th</sup> INTERNATIONAL EUROPEAN CONFERENCE ON INTERDISCIPLINARY SCIENTIFIC RESEARCH**, JANUARY 28-29, 2022
- Proctor, R.R (1933). "Fundamental Principles of Soil Compaction", **Engineering News-Record**, I. Aug 31, 1933, pp. 245-248; I Sept. 7, 1933, pp. 286-289; . Sept. 21, 1933, pp. 348-355; M. Sept 28, 1933, pp. 372-376

Selçuk Bildik and Mustafa Laman. (2020). “Effect of geogrid reinforcement on soil - structure – pipe interaction in terms of bearing capacity, settlement and stress distribution” **Geotextiles and Geomembranes**.

Tan, S.A. (1994). “Hyperbolic method for settlements in clays with vertical drains” **Can. Geotech. J.** Vol. 31

Yan Zhuang, Shunlei Hu, Xiangwei Song, Haoru Zhang and Wang Chen. (2022). “Membrane Effect of Geogrid Reinforcement for Low Highway Piled Embankment under Moving Vehicle Loads” **Symmetry** 2022, 14, 2162.

Zainab Ahmed Alkaissi and Madhat Shakir Al-Soud. (2021). “Effect of Geogrid Reinforcement on Behavior of Unpaved Roads” **Earth and Environmental Science**. 856, 2021, 012007

กรมทางหลวง. (2532). “มาตรฐานการติดตั้งแผ่นการท่ดตัว” กรมทางหลวง.

กรมทางหลวงชนบท. (2562). “การใช้งานระบบบริหารงานซ่อมบำรุงทางหลวงท้องถิ่น” กรมทางหลวงชนบท

การยางแห่งประเทศไทย. (2561). “ข้อมูลวิชาการยางพารา ปี 2561” สถาบันวิจัยยางการยางแห่งประเทศไทย. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

จตุรงค์ เจริญผล. (2555). “พฤติกรรมของผิวทางที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นใยสังเคราะห์” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

บริษัท ไทยฮอนด้า จำกัด. (2018). “Scoopy i 2018”. สืบค้น 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 จาก [www.thaihonda.co.th](http://www.thaihonda.co.th)

บริษัท มติชน จำกัด (มหาชน). (2559). “ความเสียหายของถนนแบบหลุมบ่อ” สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 จาก [www.matichon.co.th](http://www.matichon.co.th)

บริษัท แอลจีทูลส์ จำกัด. (2556). “อุปกรณ์วิธีแทนที่ด้วยทราย” สืบค้น 12 มกราคม พ.ศ. 2566 จาก [www.lgtool.com](http://www.lgtool.com)

ปิยะ รัตนสุวรรณ. (2561). “คู่มือปฐพีกลศาสตร์” สืบค้น 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566  
www.tumcivil.com

พรพจน์ ต้นเส็ง. (2554). “ปฐพีกลศาสตร์” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศลิษา ไชยพุทธ และ แผลมทอง เหล่าคงถาวร. (2562). “ปฐพีกลศาสตร์ : ทฤษฎีและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ” ตำราและเทคโนโลยีการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศลิษา ไชยพุทธ. (2565). “Settlement” เอกสารการสอนในวิชาวิศวกรรมปฐพี. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศลิษา ไชยพุทธ. (2565). “เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน (Ground Improvement Techniques) ฉบับปรับปรุง.” ศูนย์จำหน่ายตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สถาบันพลาสติก. 2015. “เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์” โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และเครื่องมือแพทย์.

สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร. (2562). “มาตรฐานการถมดินและการบดอัด (มยพ.1918-62)” กรมโยธาและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2551). “Size Thailand”. สืบค้น 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 จาก www.nstda.or.th

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ และสำนักงานบริหารบำรุงทาง. (2550). “คู่มือการตรวจสอบและประเมินความเสียหายของผิวทาง” กรมทางหลวง

สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ. (2546). “การออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต” กรมทางหลวง.

สุกิจ นามพิชญ์, ชูศักดิ์ กิรีรัตน์, เอกรัตน์ รวยรวย, สุกสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์ และ สุธี ปิยะพิพัฒน์. (2549). “คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์” สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (สกว.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โสธร วงศ์ปราโมทย์. (2556). “กรณีศึกษาการสำรวจสภาพความชำรุดเสียหายของผิวถนนในพื้นที่  
องค์การบริหารส่วนตำบลพลูตาหลวง” สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา.

ห้างหุ้นส่วนจำกัด ควอลิเทค อีควิปเมนท์. (2018). “รถบดถนน Road Roller รุ่น SR12 Series - 140  
แรงม้า” สืบค้น 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 จาก [www.liftkaz.com](http://www.liftkaz.com)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้