

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ  
สำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

The Sensitivity Analysis for Flexible Pavement Design in Thailand



ฐิติวัฒน์ หาวีเชียร  
ปวร เปี่ยมปรีชารัตน์  
ภัทรพล จันทบุบผา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

# The Sensitivity Analysis for Flexible Pavement Design in Thailand



THITIWAT HAWICHIAN  
PAWORN PIEAMPRECHARUT  
PHATTHARAPHON CHANTHABUBPHA

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ  
สำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

The Sensitivity Analysis for Flexible Pavement Design in Thailand



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ สำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

นักศึกษา นายฐิติวัฒน์ หาวิเชียร รหัสนักศึกษา 58010330  
นายปวร เปี่ยมปรีชารัตน์ รหัสนักศึกษา 58010756  
นายภัทรพล จันทบุบผา รหัสนักศึกษา 58010945

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จรัส พิทักษ์ศฤงคาร	 Prada Chaturak
ผศ.นัฐพร นวกิจรังสรรค์	
ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

# การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ สำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

นายจตุวัฒน์ หาวิเชียร รหัสนักศึกษา 58010330

นายปวร เปี่ยมปรีชารัตน์ รหัสนักศึกษา 58010756

นายภัทรพล จันทบุบผา รหัสนักศึกษา 58010945

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ปริดา จาตุรพงศ์

ปีการศึกษา 2561

## บทคัดย่อ

ถนนเป็นระบบคมนาคมขนส่งหลักของประเทศไทย มากกว่าร้อยละ 90 ของถนนในประเทศไทย เป็นถนนลาดยาง เนื่องจากถนนลาดยางถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศไทย การออกแบบถนนลาดยางจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน การเลือกใช้ความหนาและวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาเมื่อมีการออกแบบถนนลาดยาง ในการศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) วิเคราะห์ความหนาของชั้นทาง ที่ส่งผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง (2) วิเคราะห์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทาง ที่ส่งผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง

โดยโปรแกรม KENPAVE จะถูกนำมาใช้เป็นซอฟต์แวร์เพื่อวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดภายในโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้ทฤษฎีของ Boussinesq เพื่อตรวจสอบกราฟเส้นโค้งที่สร้างโดยโปรแกรม KENPAVE ผลการวิเคราะห์พบว่าการใช้วัสดุที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและความหนาที่ต่างกันในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง ส่งผลกระทบต่อทั้งความเครียดอัดในแนวตั้ง (VC) และความเครียดดึงในแนวนอน (HT) ซึ่งวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างชั้นทาง สามารถใช้ผลจากการวิเคราะห์เหล่านี้ เพื่อเลือกความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างชั้นทางในแต่ละชั้น

# The Sensitivity Analysis for Flexible Pavement Design in Thailand

Thitiwat                      Hawichian                      Student ID. 58010330

Paworn                      Pieamprecharut                      Student ID. 58010756

Phattharaphon                      Chanthabubpha                      Student ID. 58010945

Advisor Dr.Preeda Chaturabong

Academic Year 2018

## Abstract

The road is the main transportation system, more than 90% of roads in Thailand is a flexible pavement. Since flexible pavement is prevalently used for highway construction in Thailand, the design of flexible pavement is required to achieve maximum effectiveness. Therefore, the selections of thickness and elastic modulus are the main factors to be taken into account in pavement design. In this study, the objectives of this research are (1) to determine the effects of different thicknesses on tensile and compressive strains, and (2) to determine the effects of different elastic moduli on tensile and compressive strains.

KENPAVE program was used as an analytical software for determining the stresses and strains under the flexible pavement. Then using Boussinesq's method to verify the curves that were generated by KENPAVE. The results show that use of materials with different elastic modulus and thickness in the construction of the pavement structure can affect both strains including vertical compressive strain (VC) and horizontal tensile strain (HT). Therefore pavement engineer can adopt these values to select the optimum thicknesses and elastic moduli for each layer.

## กิตติกรรมประกาศ

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ และการสนับสนุนจาก ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา และคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่กรุณาถ่ายทอดวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาโครงการฉบับนี้ ตลอดทั้งให้ความเมตตา และเสียสละเวลาแก่คณะผู้วิจัยมาโดยตลอด จนทำให้โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณนายโกสินทร์ เจตียนนท์ ผู้อำนวยการสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง นายปรนิก จิตต์อารีกุล วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ และเจ้าหน้าที่กรมทางหลวงทุกท่านที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลอันเป็นประโยชน์เพื่อประกอบการวิจัยฉบับนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณเป็นอย่างสูง คณะผู้วิจัยรำลึก อยู่เสมอว่าไม่มีความสำเร็จใดๆในชีวิต หากปราศจากกำลังใจจากบุคคลที่มีพระคุณเหล่านี้ ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษาของคณะผู้วิจัยโดยตลอดมา

นายฐิติวัฒน์ หาวีเชียร  
นายปวร เปี่ยมปรีชารัตน์  
นายภัทรพล จันทบุบผา

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญกราฟ.....	V
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 ข้อมูลการออกแบบเส้นทางของถนนทางหลวงที่เป็นมาตรฐานกรมทางหลวงในประเทศไทย.....	4
2.2 ปริมาณการจราจรประจำปี 2560.....	7
2.3 ข้อมูลขนาดล้อรถ และแรงดันในล้อรถ.....	8
2.4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเครียดที่มีผลต่อเส้นทาง.....	9
2.5 การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ และความหนาของชั้นทางที่มีผลต่อการเกิด ความเครียดของถนนลาดยางโดยใช้โปรแกรม KENPAVE.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	31
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3.2 การกำหนดค่าของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์.....	32
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม kenpave .....	33
3.4 การประมวลผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล .....	44
3.5 การสรุปผลการวิจัย .....	46
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	51
4.1 ผลการวิจัย.....	51
4.2 การวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
บรรณานุกรม.....	78

## สารบัญกราฟ

เรื่อง	หน้า
กราฟที่ 2.1.....	15
กราฟที่ 2.2.....	17
กราฟที่ 2.3.....	18
กราฟที่ 2.4.....	19
กราฟที่ 2.5.....	26
กราฟที่ 3.1.....	45
กราฟที่ 3.2.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 2.1.....	5
ตารางที่ 2.2.....	6
ตารางที่ 2.3.....	7
ตารางที่ 2.4.....	8
ตารางที่ 2.5.....	10
ตารางที่ 2.6.....	21
ตารางที่ 2.7.....	28
ตารางที่ 3.1.....	49
ตารางที่ 4.1.....	52
ตารางที่ 4.2.....	55
ตารางที่ 4.3.....	58
ตารางที่ 4.4.....	61
ตารางที่ 4.5.....	64
ตารางที่ 4.6.....	67
ตารางที่ 4.7.....	70
ตารางที่ 4.8.....	71
ตารางที่ 4.9.....	72
ตารางที่ 4.10.....	73
ตารางที่ 4.11.....	74
ตารางที่ 5.1.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1.....	9
รูปที่ 2.2.....	14
รูปที่ 2.3.....	15
รูปที่ 2.4.....	16
รูปที่ 2.5.....	20
รูปที่ 2.6.....	25
รูปที่ 2.7.....	27
รูปที่ 3.1.....	33
รูปที่ 3.2.....	33
รูปที่ 3.3.....	34
รูปที่ 3.4.....	34
รูปที่ 3.5.....	36
รูปที่ 3.6.....	36
รูปที่ 3.7.....	37
รูปที่ 3.8.....	37
รูปที่ 3.9.....	38
รูปที่ 3.10.....	39
รูปที่ 3.11.....	39
รูปที่ 3.12.....	40
รูปที่ 3.13.....	40
รูปที่ 3.14.....	41
รูปที่ 3.15.....	41
รูปที่ 3.16.....	42
รูปที่ 3.17.....	42
รูปที่ 3.18.....	43
รูปที่ 3.19.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

รูปที่ 3.20.....44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทย มีการพัฒนาระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานในทุกๆ ด้านอย่างต่อเนื่อง ด้านการคมนาคมถือเป็นอีกด้านหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคมนาคมทางบก ซึ่งมีสัดส่วนในการใช้ถนน เป็นช่องทางหลักในการคมนาคม ถนนจึงมีบทบาทสำคัญต่อการขยายตัวทางเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรมของประเทศไทยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ถนนในประเทศไทย โดยทั่วไปสามารถจำแนกเป็นประเภทของถนนได้ 2 ประเภท คือ ถนนลาดยาง และถนนคอนกรีต เป็นที่ทราบกันว่า มากกว่า 90% ของถนนในประเทศไทยเป็นถนนลาดยาง เพราะ ราคาค่าก่อสร้างของถนนลาดยางมีอัตราที่ต่ำกว่าถนนคอนกรีต และมีขั้นตอนในการบำรุงรักษาที่ไม่ซับซ้อน ตลอดจนพื้นผิวของถนนลาดยางมีความเรียบกว่าถนนคอนกรีต เนื่องจากการก่อสร้างถนนลาดยางจะก่อสร้างตลอดความยาวของถนน จึงทำให้ไม่มีรอยต่อระหว่างช่วง แต่ถนนคอนกรีตจะเว้นช่วงรอยต่อไว้เพื่อรองรับการขยายและการหดตัวของคอนกรีต จากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงทำให้ถนนลาดยางเป็นที่นิยมและหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างและบำรุงรักษาถนน เลือกที่จะก่อสร้างถนนลาดยางเพื่อใช้ในการคมนาคมขนส่งทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย

เนื่องจากถนนลาดถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศไทย การออกแบบถนนลาดยางจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน การเลือกความหนาและวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาเมื่อมีการออกแบบถนนลาดยาง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่มีจุดมุ่งหมายในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย เพื่อวิเคราะห์หาและแนะนำความหนาและวัสดุที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้างถนนลาดยางในประเทศไทย การออกแบบที่ดีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของถนนลาดยางให้มากยิ่งขึ้น และสามารถลดภาระค่าบำรุงรักษาซ่อมแซมในอนาคตได้ ตลอดจนสามารถรองรับการขยายตัวของระบบโครงข่ายการคมนาคมทางถนนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ความหนาของชั้นทาง ที่ส่งผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างชั้นทาง ที่ส่งผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ความเสียหาย (การแตกร้าว) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นทางเป็นระยะเวลา 20 ปี

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 การวิเคราะห์ความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ส่งผลต่อความเครียดของถนนลาดยางในประเทศไทยเท่านั้น
- 1.3.2 การวิเคราะห์ความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ส่งผลต่อความเครียดของถนนลาดยางในประเทศไทยโดยใช้โปรแกรม KENPAVE เท่านั้น
- 1.3.3 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับก่อสร้างถนนที่มีในประเทศไทย
- 1.3.4 วิเคราะห์ผลกระทบของถนนลาดยางในประเทศไทย ภายใต้ระบบชั้นทาง 4 ชั้นเท่านั้น
- 1.3.5 การวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage Analysis) ของถนนลาดยางในประเทศไทยจะพิจารณาภายใต้อายุการใช้งานหลังจากเริ่มเปิดใช้งานถนน 1 ปี

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 การกำหนดค่าของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์
- 1.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม KENPAVE
- 1.4.4 การประมวลผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล
- 1.4.5 การสรุปผลการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทยโดยใช้โปรแกรม KENPAVE ANALYSIS ฉบับนี้คณะผู้วิจัยมีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบถนนลาดยาง รวมไปถึงเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของวิศวกรผู้ออกแบบ ในการคัดเลือกวัสดุสำหรับการก่อสร้างถนนลาดยาง ให้มีความเหมาะสมตลอดจนใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบถนนทางหลวงของประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

วรรณกรรมปริทัศน์จะกล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยมีหัวข้อที่ได้รวบรวมข้อมูลไว้ดังนี้

- 2.1 ข้อมูลการออกแบบชั้นทางของถนนทางหลวงที่เป็นมาตรฐานกรมทางหลวงในประเทศไทย
- 2.2 ข้อมูลปริมาณการจราจรประจำปี 2560
- 2.3 ข้อมูลขนาดล้อรถและแรงดันในล้อรถ
- 2.4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเครียดที่มีผลต่อชั้นทาง
- 2.5 การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ และความหนาของชั้นทางที่มีผลต่อการเกิดความเครียดของถนนลาดยางโดยใช้โปรแกรม KENPAVE

### 2.1 ข้อมูลการออกแบบชั้นทางของถนนทางหลวงที่เป็นมาตรฐานกรมทางหลวงในประเทศไทย

#### 2.1.1 วัสดุชั้นทาง (Pavement Materials)

ในการออกแบบวิเคราะห์ชั้นทางข้อมูลค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (ค่ายังโมดูลัส หรือ E-modulus) เป็นค่าที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ข้อมูลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นได้มาจากการคำนวณย้อนหลังจากการทดสอบการพังทลายจากน้ำหนักกดทับต่อโครงสร้างชั้นทาง หรือการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้วัสดุที่มีความคล้ายคลึงกับวัสดุที่ใช้ทำชั้นทาง สำหรับวัสดุชั้นทางแบบ Unbound granular การระบุค่ากำลังการแบกรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) ของชั้นดินเดิม (Subgrade) ได้รับมาจากผลทดสอบ Saturated CBR (California Bearing Ratio, ทดสอบหลังจากแช่น้ำ 4 วัน) ในวัสดุนั้นๆ ค่ายังโมดูลัสของวัสดุสามารถประมาณค่าได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งใช้สูตรความสัมพันธ์ โดย Transport Research Laboratory (TRRL, 1980) ที่ได้รับการแนะนำจาก AASHTO 2002 ซึ่งมีสูตรความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ค่ายังโมดูลัสของวัสดุ} = 17.6 \times (\text{CBR } \%)^{0.64} \text{ MPa}$$

อย่างไรก็ตาม หากไม่มีข้อมูลค่า CBR ก็สามารถใช้ค่ายังโมดูลัสของวัสดุที่ใช้ทำชั้นทางในประเทศไทยซึ่งถูกสันนิษฐานขึ้นมาได้ตามตารางข้างล่างต่อไปนี้ ซึ่งตารางนี้จะแนะนำค่าความหนาต่ำสุดในแต่ละชั้น และค่าที่จะนำไปใช้ไม่ควรต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่า E – modulus และความหนาของวัสดุแต่ละประเภท

Pavement Materials	Asphalt binder grade / Portland Cement Content	Thickness Minimum – Maximum (mm.)	E-modulus At 35 °C (MPa)
Asphaltic materials			
Surface Treatment	AC 60/70 or 80/100	-	0
	Cutback RC 3000 or 800	-	0
Cold Mixed Asphalt	Asphalt Emulsion	10 - 35	0
Asphalt Concrete	AC 25/35 or 40/70	50 -	2500
AC Surfacing on Stabilized Base Layers		50 -	2000
<b>Unbound Granular Base</b>			
Crushed Rock Base	-	200 -	250 - 600
Steel Slag	-	200 -	300 - 400
Crushed Gravel Base	-	150 -	150 - 400
Natural Gravel Base	-	150 -	120 - 300
<b>Cement – Modified Base</b>			
Mod. Crushed Rock	2 %	200 -	300 - 800
Mod. Gravel	2 %	200 -	200 - 600
Soil Cement Stabilization	4 %	150 -	150 - 500
Stabilized Laterite	-	200 -	300 - 600
<b>Subbase Materials</b>			
Sandy materials	-	200 -	50 – 150

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า E – modulus และความหนาของวัสดุแต่ละประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ชั้นดินเดิม (Subgrade)

ข้อมูลการออกแบบสำหรับคุณสมบัติของชั้นดินเดิม จำเป็นต้องทำการสำรวจในสถานที่จริงตามแนวเส้นทางที่ถูกลบไว้ หรือมาจากการขุดเจาะสำรวจระบบการระบายน้ำในพื้นที่นั้นๆ ส่วนการระบุค่ากำลังการแบกรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) ของชั้น Subgrade ได้รับมาจากผลทดสอบ Saturated CBR (California Bearing Ratio, ทดสอบหลังจากแช่น้ำ 4 วัน) ในวัสดุนั้นๆ ค่ายังโมดูลัสของวัสดุสามารถประมาณค่าได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งใช้สูตรความสัมพันธ์โดย Transport Research Laboratory (TRRL, 1980) ที่ได้รับการแนะนำจาก AASHTO 2002 โดยมีสูตรความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ค่ายังโมดูลัสของชั้น Subgrade} = 17.6 \times (\text{CBR } \%)^{0.64} \text{ MPa}$$

ถ้าหากไม่มีข้อมูลค่า CBR สามารถใช้ค่าโมดูลัสตามตารางข้างล่างต่อไปนี้ได้ โดยการเลือกใช้แต่ละค่านั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณของความละเอียดในเนื้อวัสดุ เพื่อบ่งบอกถึงระดับที่จำเป็นต้องใช้ในการบดอัดและบ่งบอกค่าความชื้นในมวลดิน เป็นต้น

ตารางแสดงค่า E - modulus ของวัสดุชั้น Subgrade

Subgrade Type	E - modulus (MPa)
Sand	50 - 150
Clay	10 - 60
Soft Clay	5 - 10

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า E - modulus ของวัสดุชั้น Subgrade

## 2.2 ข้อมูลปริมาณการจราจรประจำปี 2560

### ตารางแสดงปริมาณการจราจรประจำปี 2560

สายทาง	ตอนควบคุม	ชื่อสายทาง	กม.สำรวจ	ปริมาณจราจร	จังหวัด
35	100	ดาวคะนอง - แสมดำ	6+500	270,050	กรุงเทพมหานคร
338	101	อรุณอมรินทร์ - พุทธรณทลสาย 4	0+000	136,400	กรุงเทพมหานคร
338	101	อรุณอมรินทร์ - พุทธรณทลสาย 4	9+281	182,895	กรุงเทพมหานคร
7	103	บางปะกง - หนองรี	67+900	84,286	ชลบุรี
315	200	หัวไผ่ - ชลบุรี	40+651	89,852	ชลบุรี
344	102	หนองรี - หนองปรือ	6+665	88,397	ชลบุรี
108	101	เชียงใหม่ - ปากทางท่าลี่	7+650	50,272	เชียงใหม่
1001	100	เชียงใหม่ - บ้านโป่ง	1+000	49,738	เชียงใหม่
1141	100	ดอนจั่น - เชียงใหม่	7+000	89,255	เชียงใหม่
2	201	มวกเหล็ก - บ่อทอง	45+600	73,712	นครราชสีมา
2	205	โคกกรวด - นครราชสีมา	146+072	92,194	นครราชสีมา
2	301	นครราชสีมา - ดอนหวาย	148+657	97,187	นครราชสีมา
24	702	เดชอุดม - อุบลราชธานี	418+943	34,483	อุบลราชธานี
231	101	ถนนวงแหวนรอบเมืองอุบลราชธานี	8+150	32,523	อุบลราชธานี
2050	100	อุบลราชธานี - ตระการพืชผล	45+900	22,855	อุบลราชธานี

### ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณการจราจรประจำปี 2560

ปริมาณการจราจรข้างต้นเป็นค่าที่ได้มาจากการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์แบบ Annual Average Daily Traffic (AADT) หรือปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดทั้งปี โดยข้อมูลข้างต้นนี้เป็นการเก็บตัวอย่างข้อมูลใน 5 จังหวัดของประเทศไทยมีดังนี้

- 1) กรุงเทพมหานคร
- 2) ชลบุรี
- 3) เชียงใหม่
- 4) นครราชสีมา
- 5) อุบลราชธานี

โดยแต่ละจังหวัดจะเลือกปริมาณการจราจรที่มีจำนวนมากที่สุด 3 ลำดับแรกของจังหวัดนั้นๆ มาแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

## 2.3 ข้อมูลขนาดล้อรถและแรงดันในล้อรถ

### ตารางแสดงข้อมูลขนาดล้อรถและแรงดันในล้อรถ

	Test	Tire	Tire load (kN)	Contact pressure (kN/m <sup>2</sup> )
O'Neil (1969), cited in Marshe	Static	Assumed bias ply	na	na
Howell et al. (1985)	Static	40x14 Type VII 28-ply aircraft tire	9-133	970-1170
Lippmann (1985)	Dynamic	P205/75R14	5 (controlled by axle height)	210-410
Marshek et al. (1986)	Static	10-20 bias ply c	20-24	520-760
Liu (1992)	Static	175/70SR80S	4	120
Liu (1992)	Static	8.25R20 14 ply	9-21	480-690
Liu (1992)	Dynamic	??	3-4	210?
Tielking and Abraham (1994)	Static	11R24.5 (smooth)	22-29	620-720
Tielking and Abraham (1994)	Static	11R24.5 (treaded)	27-36	550-720
de Beer et al. (1997)	Dynamic	11.00x20 14 ply bias (smooth)	20-50	420-720
de Beer et al. (1997)	Dynamic	11.00x20 14 ply bias (smooth)	10-40	420-720
de Beer et al. (1997)	Dynamic	46x16 30 ply aircraft tire	20-50	1450
de Beer et al. (1997)	Dynamic	315/80R22.5	20-100	500-1000
de Beer et al. (1997)	Dynamic	425/65R22.5	25-100	500-1100
de Beer et al. (1997)	Dynamic	425/65R160	25-100	500-1100
Tielking and Abraham (1994)	Static	385/65R22.5 (treaded,wide base)	27-40	660-990
Siegfried (1998)	Static	175/70R13	2-4	100-170
Siegfried (1998)	Static	8.25R20 14 ply	10-20	280-550
Siegfried (1998)	Dynamic	8.25R20 14 ply	4-7	280-550
Woodside et al. (1999)	Dynamic	8.25R20 14 ply	5-24	100-690

### ตารางที่ 2.4 แสดงข้อมูลขนาดล้อรถและแรงดันในล้อรถ

#### 2.3.1 การวัดขนาดของล้อที่มีความสัมพันธ์กับความเค้น

Robert A. Douglas, W.D.H. Woodward, and A.R. Woodside การเลือกประเภทของแรงกระทำของล้อรถ (Tire load) และแรงดันในล้อรถ (Contact pressure) ตามตารางที่ 2.4 โดยแต่ละประเภทจะมีแนวโน้มที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

- 1) ล้อรถยนต์ (Automobile tires) มีแรงกระทำของล้อรถอยู่ในช่วง 3 – 5 kN.
- 2) ล้อรถบรรทุก (Truck) มีแรงกระทำของล้อรถอยู่ในช่วง 10 – 40 kN.
- 3) ล้อรถบรรทุกขนาดใหญ่ (Heavy truck) มีแรงกระทำของล้อรถมากกว่า 10 kN. ขึ้นไป

ที่ซึ่งมีแรงดันในล้อรถไม่มากกว่า 300 kN/m<sup>2</sup>

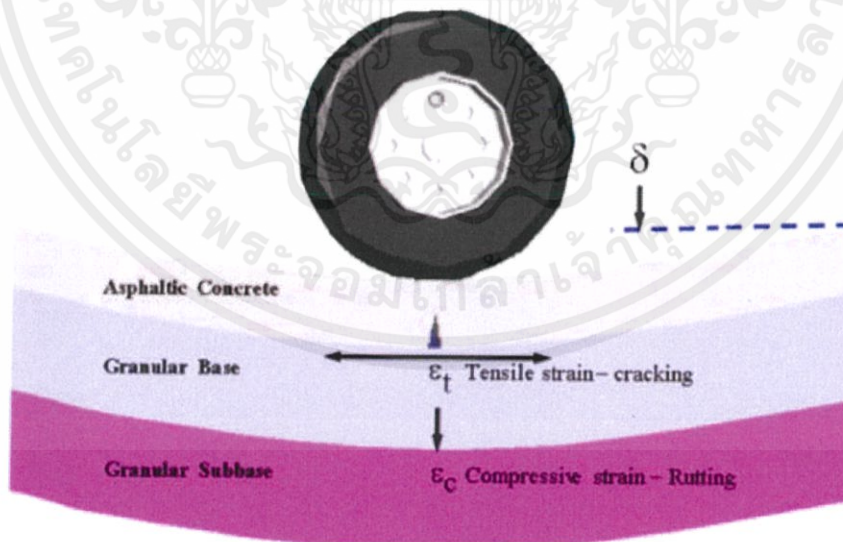
## 2.4 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเครียดที่มีผลต่อชั้นทาง

Wang (1968), Bonnot (1972) และ Otte (1974) พบว่าค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (Strain at Failure) ของวัสดุในโครงสร้างชั้นทางหยุ่นตัวมีความแปรปรวนน้อยกว่าค่าความเค้น ดังนั้นจึงใช้ค่าความเครียดเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาการวิบัติของชั้นทาง โดยเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนโครงสร้างชั้นทางหยุ่นตัวจะก่อให้เกิดความเครียดวิกฤติ (Critical Strain) ใน 2 ทิศทางซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้าง ดังนี้

1) ความเครียดดึงในแนวรัศมีในชั้นผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต ซึ่งมีผลต่อการเกิดรอยแตกของชั้นผิวทางแอสฟัลท์

2) ความเครียดอัดในแนวดิ่งในชั้นดินเดิมจะมีผลต่อการเสียรูปถาวรของชั้นทาง

ถ้าค่าความเครียดดึง ( $\epsilon_t$ ) เกิดขึ้นมากเกินไปจนขีดจำกัดจะทำความเสียหายแก่โครงสร้างชั้นทางหยุ่นตัว โดยเกิดรอยแตกใต้ชั้นแอสฟัลท์ก่อนแล้วค่อยๆ กระจายตัวขึ้นมาบนผิวหน้า และถ้าค่าความเครียดอัด ( $\epsilon_c$ ) เกิดขึ้นบนชั้นดินเดิมมากเกินไปจนขีดจำกัดจะทำความเสียหายแก่โครงสร้างโดยจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) ที่บริเวณผิวถนน การเกิดการเสียรูปอย่างถาวรเกิดจากชั้นดินเดิมรับน้ำหนักมากเกินไป ลักษณะการเกิดความเสียหายของโครงสร้างชั้นทางหยุ่นตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดความเสียหายของโครงสร้างชั้นทางหยุ่นตัว

ในการประเมินความเสียหายของโครงสร้างชั้นทางหยุ่นตัวนอกจากจะต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุชั้นทาง ค่าความเค้น ค่าความเครียด และค่าการทรุดตัว ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจะมีค่าวิกฤติ (Critical) ที่ตำแหน่งใดของชั้นทางแล้วยังจะต้องทราบว่าโครงสร้างจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกซ้ำ (Load เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repetition) ได้ก็รอบจึงจะวิบัติ โดยในส่วนหลังนี้จำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมความล้าของวัสดุหรือที่เรียกว่า Fatigue Characteristics ได้แก่ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกซ้ำๆ ของชั้นทางแต่ละประเภทว่ามีลักษณะอย่างไร ชั้นทางหยุ่นตัวจะมี Fatigue Characteristics ที่มีความสำคัญในการประเมินความสามารถในการรับ น้ำหนักบรรทุกทุกซ้ำๆ อยู่ 2 ลักษณะ คือ

- 1) Fatigue Crack Criteria ของชั้นแอสฟัลท์คอนกรีต
- 2) Permanent Deformation Criteria ของชั้นดินเดิม

## 2.5 การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ และความหนาของชั้นทางที่มีผลต่อการเกิดความเครียดของถนนลาดยางโดยใช้โปรแกรม KENPAVE

### 2.5.1 อัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's Ratio)

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ (2538) ได้ศึกษาถึงอัตราส่วนปัวซองส์ที่เหมาะสมสำหรับดินชนิดต่างกันและได้มีการเสนอค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของดินในการทำชั้นทาง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 สำหรับค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของดินเหนียวจะใช้ประมาณ 0.40 – 0.50 และ 0.30 – 0.35 ในกรณีที่เป็นดินทราย

#### ตารางแสดงค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของวัสดุ

Soil Type	Poisson's Ratio	Reference
Subgrade soil	0.4 – 0.5	Brown & Pell (1970)
Claye Subgrade	0.4 – 0.5	Barksdale & Hicks (1972)
Cohesive soil	0.5	Yoder & Witczak (1975)
Cohesionless soil	0.3	Yoder & Witczak (1975)
Cohesive soil	0.4	Barker et al. (1977)
Cohesionless soil	0.3	Barker et al. (1977)
Subgrade soil	0.35	Claessen et al. (1977)
Subgrade soil	0.35	Murphy et al. (1980)
Cohesive soil	0.45	NAASRA (1987)
Non – cohesive soil	0.35	NAASRA (1987)

#### ตารางที่ 2.5 แสดงค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 การวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage Analysis)

โปรแกรม DAMA ที่ได้รับการพัฒนาโดยสถาบันแอสฟัลท์ สามารถใช้ได้กับแนวคิดเกี่ยวกับความเสียหายเพื่อกำหนดวัฏจักรในการออกแบบชั้นทาง เป็นที่น่าสนใจเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม DAMA กับผลที่ได้จากโปรแกรม KENLAYER

Chen et al. (1995) ได้ทำการประเมินโปรแกรม 5 โปรแกรม ดังนี้ ILLIPAVE, MICH-PAVE, ABAQUS, DAMA และ KENLAYER และสรุปได้ว่าโปรแกรม DAMA มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางแบบหยุนตัว ซึ่งเป็นที่ทราบว่าทั้งโปรแกรม DAMA และโปรแกรม KENLAYER ใช้ทฤษฎีชั้นทางของเบอมีสเตอร์ (Burmister layer theory) และผลลัพธ์ที่ได้ควรมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์แบบเป็นเชิงเส้น

Chen et al. แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม DAMA และโปรแกรม KENLAYER มีความเหมาะสมอย่างมากต่อการวิเคราะห์การเสีรูปร่างในชั้นผิวทาง และความเครียดดึงในจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุอย่างมะตอย แต่ความเครียดอัดในจุดบนสุดของชั้นดินเดิมที่ได้ค่ามาจากโปรแกรม KENLAYER มีความไม่สมจริงอยู่เล็กน้อย ความแตกต่างกันนี้เกิดมาจากสาเหตุที่โปรแกรม KENLAYER มีค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งก็คือการลิมเพิ่มค่า 0.0001 หรือค่าที่น้อยกว่านี้ลงไปในความหนาของชั้นทาง 2 ชั้นที่อยู่ติดกัน ดังนั้นความเครียดอัดในจุดบนสุดของ ชั้นดินเดิมจะถูกพิจารณาให้ใช้เป็นค่าแทนลงไปจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุแบบเม็ดด้วย นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบความเค้นในแนวตั้งบนชั้นผิวทาง และแสดงให้เห็นว่ามีเพียงโปรแกรม DAMA และโปรแกรม MICH-PAVE เท่านั้นที่ให้ค่าจริงของความเค้นในแนวตั้งเท่ากับแรงดันในล้อสัมผัส ในโปรแกรมอื่นๆ จะเป็นวิธีที่ให้ค่าไม่ตรงกับสิ่งที่พิจารณา ควรสังเกตด้วยว่าความเค้นในแนวตั้งของชั้นผิวทางที่อยู่ภายใต้พื้นที่ของแรงกระทำ ควรเป็นไปตามทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับความดันของล้อ

อย่างไรก็ตามยังสามารถหาค่าโดยประมาณได้หลังจากการวิเคราะห์ค่าหลายรอบ ในปัจจุบันนี้ความเค้นเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย และไม่ได้ใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการออกแบบชั้นทาง ดังนั้นจึงไม่ควรเสียเวลามากในการวิเคราะห์หาค่าความเค้นเพียงเพื่อจุดประสงค์ในการแสดงให้เห็นว่าความเค้นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันในล้อ สำหรับวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical methods) ไม่มีความเป็นไปได้ที่จะให้ค่าความเค้นในแนวตั้งที่ได้เท่ากับแรงดันในล้อ เป็นที่เชื่อกันว่าโปรแกรม DAMA และโปรแกรม MICH-PAVE ไม่ได้รับค่าความเค้นในแนวตั้งตามวิธีการเชิงตัวเลข แต่ให้ค่าแรงดันในล้อแทน และเพื่อป้องกันความสับสนโปรแกรม KENLAYER ได้รับการเปลี่ยนแปลงโดยการตั้งค่าความดันในแนวตั้งภายใต้พื้นที่ของแรงกระทำจริง ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันในล้อ และกำหนดให้แรงดันในล้อแนวตั้งเท่ากับ 0 ภายนอกพื้นที่ของแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.1 แบบจำลองของโปรแกรม DAMA (DAMA Model)

โปรแกรม DAMA สามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางหยาบหลายชั้นได้ โดยใช้เทคนิคการสะสมความเสียหาย (Cumulative damage techniques) ทั้งในระบบล้อเดี่ยวและระบบล้อคู่ ซึ่งโครงสร้างชั้นทางจะประกอบด้วยวัสดุต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ยางมะตอยผสมร้อน (Hot mix asphalt)
- 2) ยางมะตอยน้ำ (Emulsified asphalt mixture)
- 3) วัสดุแบบเม็ดที่ไม่ผ่านการบำบัด (Untreated granular materials)
- 4) ชั้นดินเดิม (Subgrade)

ที่จะต้องสามารถทำการวิเคราะห์ได้ โดยมีจำนวนชั้นทางสูงสุดได้ไม่เกิน 5 ชั้น ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมีลักษณะเป็นค่าตัวแปรที่ต้องกรอกใส่โปรแกรม ดังนี้

- 1) อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน
- 2) โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่แปรผันทุกเดือน

### 2.5.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่มีผลกระทบต่อชั้นทาง (The sensitivity analysis)

PROGRAM KENPAVE (KENLAYER) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของชั้นทางที่เป็นแบบชนิดยืดหยุ่นตัวได้ (Flexible Pavement) หรือก็คือชั้นทางที่มีชั้นผิวทางเป็นยางมะตอย (Asphalt) โดยยางมะตอยเป็นวัสดุที่การคืนสภาพตัวเองขึ้นอยู่กับเวลา แต่ไม่สามารถคืนสภาพได้ 100 % ซึ่งเรียกวัดประเภทนี้ว่า Viscoelastic Materials

Yang H. Huang (2004) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของชั้นทางจะทำการวิเคราะห์เป็น 2 ระบบ ดังนี้

- 1) ระบบชั้นทาง 3 ชั้น (Three Layer Systems)
- 2) ระบบชั้นทาง 4 ชั้น (Four Layer Systems)

เพื่อที่จะอธิบายให้เห็นถึงตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อชั้นทาง แต่เนื่องจากความซับซ้อนของปฏิกิริยาที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ ภายในชั้นทาง ทำให้ยากที่จะอธิบายถึงผลสรุปให้กระจ่างชัด แต่ภาพรวมของผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับชั้นทาง จะสามารถทำให้ระบุถึงตัวแปรที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับชั้นทางได้เอง เพราะตัวแปรที่ได้นั้นอาจไม่ได้เป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลกระทบต่อชั้นทาง หากแต่จะขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ ร่วมด้วย ทางที่ดีที่สุดคือการกำหนดตัวแปรที่เป็นเหตุเป็นผลให้คงที่ แล้วปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ต้องการทราบค่าหรือต้องการศึกษาเพื่อแสดงให้เห็นผลที่เกิดขึ้นกับชั้นทาง

### 2.5.3.1 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Linear Analysis)

การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นนี้ มีพื้นฐานมาจากการตั้งสมมติฐานให้วัสดุในชั้นทางทุกชั้นมีพฤติกรรมการยืดหยุ่นตัวเป็นแบบเชิงเส้น (Linear elastic) ถึงแม้ว่าชั้นที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน (Hot Mixed Asphalt, HMA) จะมีพฤติกรรมการยืดหยุ่นตัวเป็นแบบกึ่งเชิงเส้น (Viscoelastic) และชั้นทางที่มีวัสดุแบบเม็ดเป็นก้อน (Granular materials) จะมีพฤติกรรมการยืดหยุ่นตัวแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear elastic) ก็ตามที่ วิธีดำเนินการวิเคราะห์คือการสันนิษฐานให้ชั้นทางทุกชั้นมีพฤติกรรมการยืดหยุ่นตัวเป็นแบบเชิงเส้น โดยจะต้องทำการการเลือกค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (E-Moduli) ของชั้นที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน ให้มีความเหมาะสม ซึ่งค่านี้จะแปรผันกับความเร็วของพาหนะที่ขับขึ้นและอุณหภูมิของชั้นผิวทาง ส่วนการเลือกค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่เป็นแบบเม็ดจะแปรผันกับขนาดของแรงกระทำ

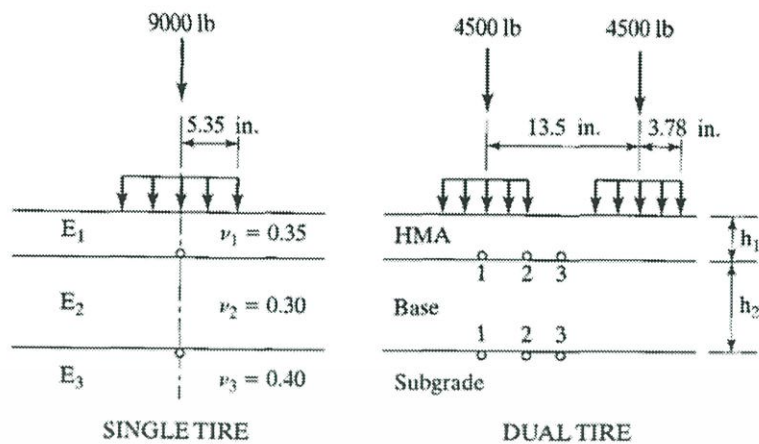
#### 1. ระบบชั้นทาง 3 ชั้น

เพื่อที่จะอธิบายผลกระทบของการออกแบบในบางปัจจัยที่มีผลตอบสนองต่อผิวทาง โดยใช้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในรูปแบบของระบบชั้นทาง 3 ชั้นทำการวิเคราะห์ ซึ่งตัวแปรที่ถูกพิจารณาจะประกอบไปด้วยดังนี้

1. ความหนาของชั้นทาง (Layer thickness) ประกอบด้วย  $h_1$  และ  $h_2$
2. ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Layer Moduli) ประกอบด้วย  $E_1$ ,  $E_2$  และ  $E_3$

โดยในระบบชั้นทาง 3 ชั้นนั้นจะแบ่งการศึกษาประเภทของน้ำหนักล้อ (Type of wheel load) ที่กระทำต่อผิวทางออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. น้ำหนักล้อเดี่ยว (Single wheel load) มีค่ารัศมี  $a$  เท่ากับ 5.35 นิ้ว น้ำหนักกระทำ 9000 ปอนด์
2. น้ำหนักล้อคู่ (Dual wheel loads) มีค่ารัศมี  $a$  เท่ากับ 3.78 นิ้ว มีค่าระยะห่างระหว่างล้อเท่ากับ 13.5 นิ้ว น้ำหนักกระทำ 4500 ปอนด์ต่อล้อ



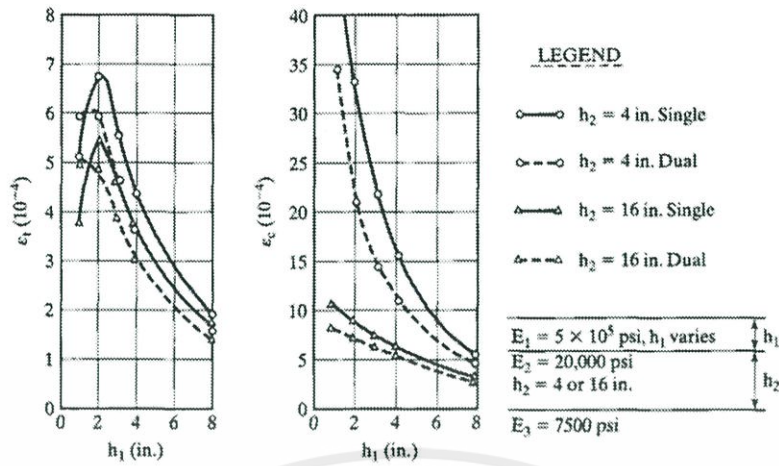
รูปที่ 2.2 แสดงถึงระบบชั้นทาง 3 ชั้น ที่รับแรงกระทำแบบน้ำหนักล้อเดี่ยวและน้ำหนักล้อคู่ (1 นิ้ว เท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร และ 1 ปอนด์ เท่ากับ 4.45 นิวตัน)

โดยค่า  $\nu$  เป็นค่าที่ได้จากเพลลาเดี่ยว (Single-axle) ที่มีแรงกระทำ 18 kip แรงดันในล้อ (ลมยาง, Contact pressure) 100 psi และอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's Ratio) ใน 3 ชั้นทางเท่ากับ 0.35, 0.3 และ 0.4 ตามลำดับ สำหรับล้อเดี่ยว (Single tire) จุดวิกฤตของความเครียด (Strain) จะปรากฏให้เห็นได้จุดศูนย์กลางของพื้นที่ที่พิจารณารับแรงลงไปชั้นทาง และล้อคู่ (Dual tires) จะเกิดความเครียด 3 จุดดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 ซึ่งแต่ละจุดเราสามารถคำนวณหาความเครียดได้ และจุดที่มีความเครียดมากที่สุดจะถูกเลือกให้เป็นจุดวิกฤต

### 1.1 ผลกระทบจากความหนาของชั้นทาง (Effect of Layer Thickness)

ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน ( $h_1$ ) และชั้นพื้นทาง (Base layer,  $h_2$ ) ซึ่งความเครียดดึง (Tensile strain) จะเกิดขึ้น ณ จุดต่ำสุดของชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน และความเครียดอัด (Compress strain) จะเกิดขึ้น ณ จุดบนสุดของชั้นดินเดิม (Subgrade layer)

กราฟที่ 2.1 แสดงให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน ( $h_1$ ) กับความเครียดดึง และความเครียดอัด โดยกำหนดให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน ( $E_1$ ) เท่ากับ 500,000 psi ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) เท่ากับ 20,000 psi ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นดินเดิม ( $E_3$ ) เท่ากับ 7,500 psi และกำหนดให้ความหนาชั้นพื้นทาง ( $h_2$ ) เท่ากับ 4 และ 16 นิ้ว โดยที่เหตุผลในการกำหนดให้ความหนาชั้นพื้นทาง ( $h_2$ ) มี 2 ค่า ก็เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของความหนาชั้นพื้นทางที่มีความหนาไม่มาก ไปจนถึงความหนาที่มากกว่ามีความสามารถที่จะใช้งานได้จริงหรือไม่ โดยค่าตัวแปรที่ใช้งานเพื่อวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นอยู่ในทางด้านขวาของกราฟ

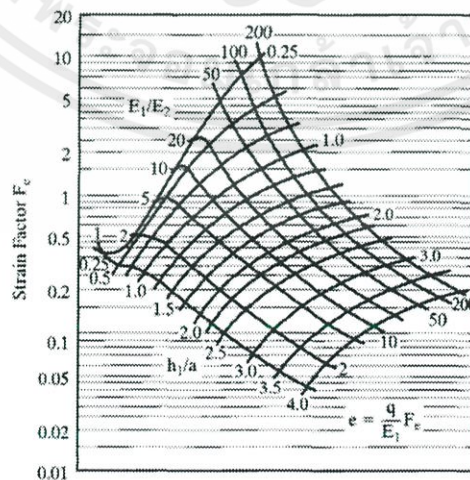


กราฟที่ 2.1 ผลกระทบจากความหนาของชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ตอบสนองต่อชั้นทาง (1 psi เท่ากับ 6.9 kPa)

กราฟที่ 2.1 แสดงผลข้อมูลดังต่อไปนี้

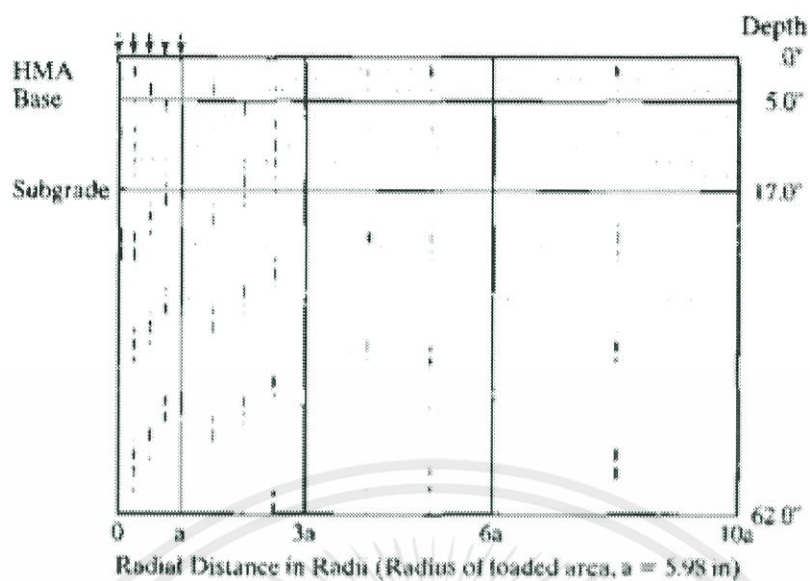
1. ในทุกแรงกระทำ และแรงดันในล้อที่มีค่าเท่ากันของตัวอย่างการทดสอบแบบน้ำหนักล้อเดียว ผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นในกราฟ ค่าความเครียดอัดจะมีค่ามากกว่าการทดสอบแบบน้ำหนักล้อคู่เสมอ แต่ไม่มีความจำเป็นที่ความเครียดดึงจะต้องมีค่าที่มากกว่า ตามเงื่อนไขต่อไปนี้เมื่อผิวหน้าของถนนเป็นยางมะตอยที่บางมากค่าความเครียดดึงในการทดสอบแบบน้ำหนักล้อคู่จะมีค่ามากกว่าในการทดสอบแบบน้ำหนักล้อเดียว

ดังนั้นการใช้การทดสอบแบบน้ำหนักล้อเดียวแทนที่การทดสอบแบบน้ำหนักล้อคู่จะเป็นการทดสอบในแบบของ ILLI-PAVE & MICH-PAVE ซึ่งไม่มีความปลอดภัย เมื่อจะทำการวิเคราะห์การวิบัติในเรื่องความล้าของผิวทางที่มีผิวหน้าของถนนเป็นยางมะตอยที่บางมาก

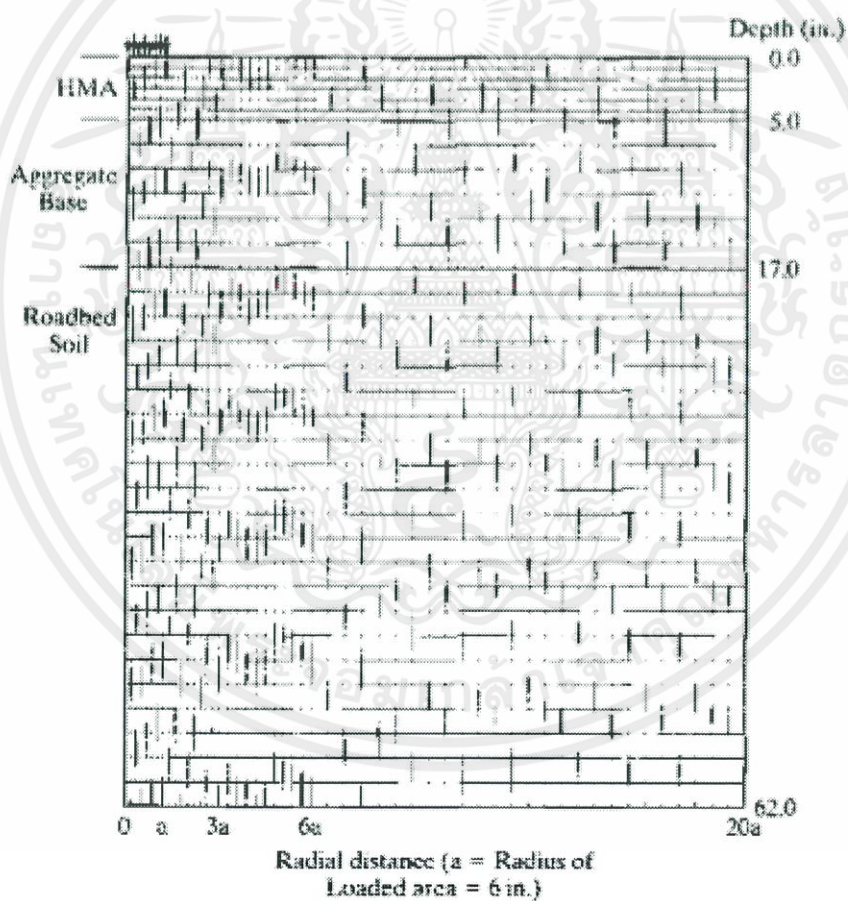


รูปที่ 2.3 ปัจจัยของความเครียดสำหรับการทดลองแบบน้ำหนักล้อเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) DOS Version



(b) Windows Version

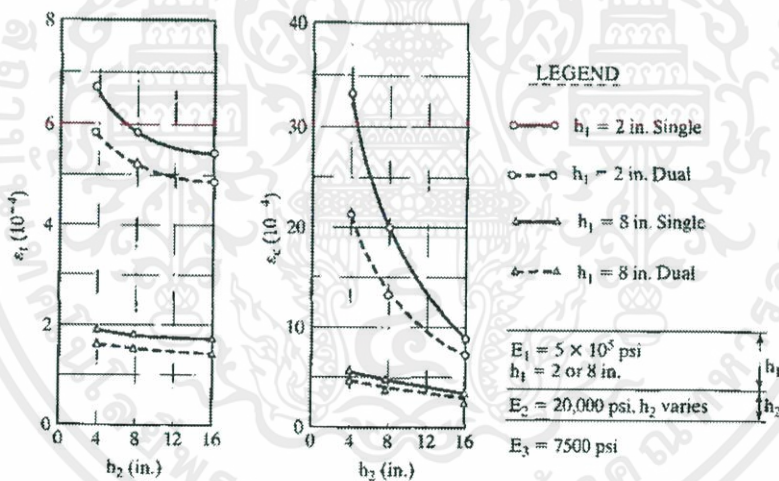
รูปที่ 2.4 Finite - element mesh used by MICH-PAVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในตัวอย่างการทดสอบแบบน้ำหนักล้อเดี่ยว จะมีจุดที่เป็นความหนาวิกฤตซึ่งให้ค่าความเครียดดิ่งที่มีค่าสูงสุด หากความหนาเพิ่มขึ้นจากจุดความหนาวิกฤตนี้ ชั้นยางมะตอยจะมีความหนามากขึ้น และค่าความเครียดดิ่งก็จะมีค่าน้อยลงตามลำดับ ในขณะที่หากความหนาท่ำกว่าจุดความหนาวิกฤตนี้ ชั้นยางมะตอยจะมีความหนาลดลง และค่าความเครียดดิ่งก็จะมีค่าน้อยลงตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มที่จะเหมือนกับผลลัพธ์ในรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งถูกรายงานโดย Freeme & Marais (1973) ที่ระบุว่าจุดที่เกิดการวิบัติของความล้าควรจะมีค่าน้อยที่สุดในขณะเดียวกันกับชั้นยางมะตอยก็ควรจะมี ความบางมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เช่นกัน

3. ความหนาของชั้นยางมะตอย ( $h_1$ ) ที่มากกว่าจุดความหนาวิกฤต มีผลทำให้ค่าความเครียดดิ่งลดลงอย่างมาก โดยไม่คำนึงถึงความหนาของชั้นพื้นทาง ถ้าชั้นยางมะตอยมีความหนาน้อยกว่า 2 นิ้ว วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการยืดอายุความล้าคือ การเพิ่มความหนาของชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน

4. การเพิ่มความหนาของชั้นยางมะตอย มีผลทำให้ความเครียดอัดลดลงอย่างมาก แต่เฉพาะกรณี ที่ชั้นพื้นทางมีความหนาที่บางเท่านั้น ถ้าชั้นพื้นทางมีความหนาที่มากจะไม่เกิดผลกระทบ



กราฟที่ 2.2 ผลกระทบจากความหนาของชั้นพื้นทางที่ตอบสนองต่อชั้นทาง

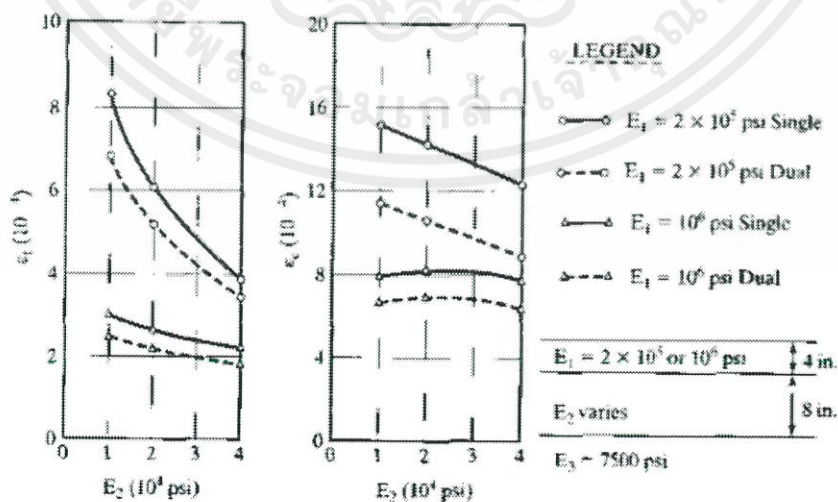
กราฟที่ 2.2 แสดงให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นพื้นทาง ( $h_2$ ) กับ ความเครียดดิ่งและความเครียดอัด โดยกำหนดให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน ( $E_1$ ) เท่ากับ 500,000 psi ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) เท่ากับ 20,000 psi ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นดินเดิม ( $E_3$ ) เท่ากับ 7,500 psi และกำหนดให้ความหนาชั้นพื้นทาง ( $h_1$ ) เท่ากับ 2 และ 8 นิ้ว

กราฟที่ 2.2 แสดงผลข้อมูลดังต่อไปนี้

1. เมื่อความหนาของชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนเท่ากับ 2 นิ้วหรือมากกว่า การแทนการทดสอบแบบน้ำหนัากล้อคู่ด้วยการทดสอบแบบน้ำหนัากล้อเดี่ยว จะให้ค่าความเครียดดึงและความเครียดอัดเพิ่มขึ้นทั้งคู่
2. การเพิ่มความหนาชั้นพื้นทางไม่ได้เป็นสาเหตุสำคัญในการลดลงของความเครียดดึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความหนาของชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนมีค่ามากขึ้น
3. การเพิ่มความหนาชั้นพื้นทางเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ความเครียดอัดลดลงอย่างมาก (แคในกรณีที่มีความหนาของชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนมีค่าความหนาที่น้อยเท่านั้น) เว้นแต่ในลักษณะของ Full-Depth หรือชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อน วิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการลดความเครียดอัดคือ การเพิ่มความหนาของชั้นพื้นทาง

### 1.2 ผลกระทบจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Effect of Layer Modulus)

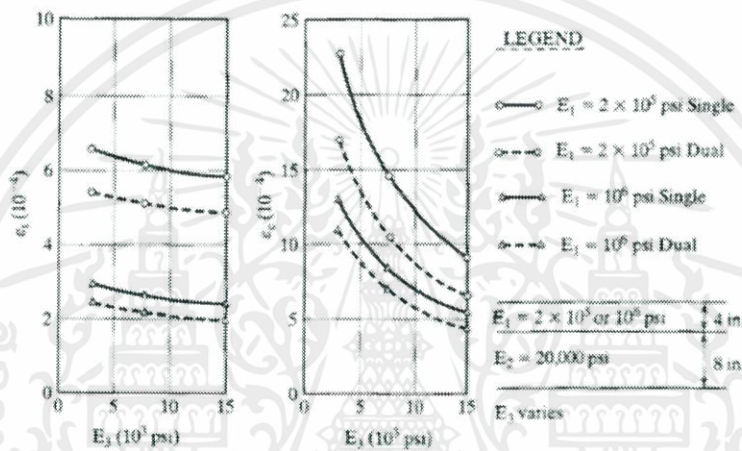
ผลจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นดินเดิม ( $E_3$ ) ที่มีผลกระทบต่อความเครียดดึงและความเครียดอัดยังคงมีอาจหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้ แต่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน ( $E_1$ ) ไม่ได้ถูกพิจารณา เพราะเป็นที่รู้กันดีว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเครียดอัดและความเครียดดึงมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน ยังเป็นสาเหตุให้จำนวนที่เกิดการเกิดซ้ำจากความล้ามีค่าลดลงตามสมการ  $N_f = f_1(E_1)^{-f_2}(E_2)^{-f_3}$  ไม่ว่าจะเป็ความเครียดอัดที่มีค่าน้อยเนื่องจากมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของวัฏจักรในการเกิดความล้าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและเกณฑ์พิจารณาการพัง



กราฟที่ 2.3 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) ที่มีผลตอบสนองต่อชั้นทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

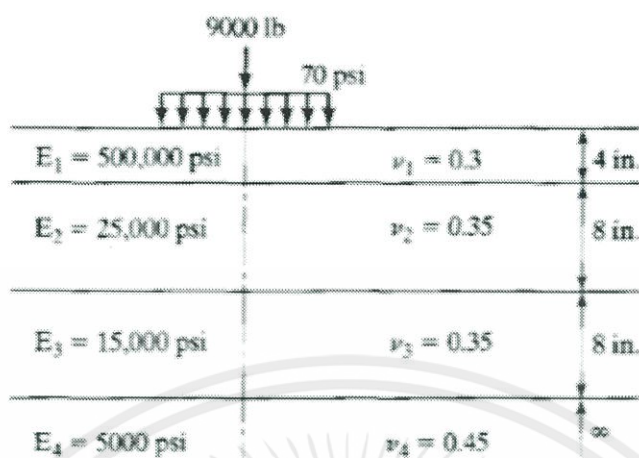
กราฟที่ 2.3 แสดงให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นของความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) กับความเครียดดึงและความเครียดอัด โดยกำหนดให้ความหนาของวัสดุในชั้นผิวทาง ( $h_1$ ) เท่ากับ 4 นิ้ว ความหนาของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $h_2$ ) เท่ากับ 8 นิ้ว ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นผิวทาง ( $E_1$ ) เท่ากับ 200,000 หรือ 1,000,000 psi และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทาง ( $E_3$ ) เท่ากับ 7,500 psi ซึ่งผลที่ได้จะเห็นว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทางมีผลกระทบต่อความเครียดดึงมากกว่าความเครียดอัดและส่งผลกระทบอย่างมากต่อค่าที่ได้ เฉพาะในกรณีที่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นผิวทางมีค่าที่น้อยกว่า



กราฟที่ 2.4 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทาง ( $E_3$ ) ที่มีผลตอบสนองต่อชั้นทาง

กราฟที่ 2.4 แสดงให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นของความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทาง ( $E_3$ ) กับความเครียดดึงและความเครียดอัด โดยกำหนดให้ความหนาของวัสดุในชั้นผิวทาง ( $h_1$ ) เท่ากับ 4 นิ้ว ความหนาของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $h_2$ ) เท่ากับ 8 นิ้ว ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นผิวทาง ( $E_1$ ) เท่ากับ 200,000 หรือ 1,000,000 psi และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) เท่ากับ 20,000 psi ซึ่งผลที่ได้จะเห็นว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทางมีผลกระทบต่อความเครียดอัด แต่ในทางกลับกันกับแทบจะไม่มีผลกระทบต่อความเครียดดึงเลย และผลกระทบจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทางจะมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะป็นกรณีที่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นผิวทางจะมีค่ามากหรือน้อยก็ตาม

## 2. ระบบชั้นทาง 4 ชั้น



รูปที่ 2.5 การแสดงระบบชั้นทาง 4 ชั้นสำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

รูปที่ 2.5 แสดงมาตรฐานของระบบชั้นทาง 4 ชั้นซึ่งประกอบด้วยชั้นทางดังต่อไปนี้ ชั้นผิวทางที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนที่มีความหนาเท่ากับ 4 หรือ 8 นิ้ว ชั้นพื้นทางที่เป็นวัสดุ Crush stone ที่มีความหนาเท่ากับ 8 นิ้ว ชั้นรองพื้นทางที่เป็นวัสดุ Gravel ซึ่งระบบชั้นทาง 4 ชั้นนี้รับแรงกระทำ 9,000 ปอนด์ (ในกรณีนี้เป็นการทดสอบแบบน้ำหนักล้อเดียว) แรงดันในล้อ 70 psi ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Modulus of elastic) และอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's Ratio) จะแสดงให้เห็นตามรูปภาพด้านบน

Location	Response	Standard case	Case 1 high pressure $q = 140$ psi	Case 2 strong subgrade $E_1 = 15,000$ psi	Case 3 $\nu = 0.5$	Case 4 asphalt base $E_2 = 300,000$ psi	Case 5 cement base $E_2 = 1,000,000$ psi	Case 6 6 in. lime $E_2 = 50,000$ psi $E_c = 5000$ psi
Top of HMA	$w_c$ (in.)	0.0341 (0.034)	0.0360 (0.036)	0.0212 (0.021)	0.0336 (0.034)	0.0202 (0.021)	0.0161 (0.017)	0.0290 (0.029)
Bottom of HMA	$\sigma_x$ (psi)	-199.9 (-200)	-291.4 (-291.0)	-190.8 (-191)	-269.6 (-270)	6.51 (6.3)	39.1 (38.4)	-188.1 (-188)
	$\epsilon_x$ ( $10^{-6}$ )	-295.7 (-296)	-428.7 (-429)	-283.5 (-284)	-293.8 (-294)	-21.15 (-21.5)	19.77 (18.8)	-279.8 (-280)
Top of base	$\sigma_x$ (psi)	26.48 (26.5)	34.5 (34.4)	27.28 (27.3)	24.21 (24.2)	50.44 (50.4)	58.18 (58.2)	27.35 (27.4)
	$\sigma_z$ (psi)	2.88	2.07	3.79	9.51	6.51	61.74	3.97
Bottom of base	$\sigma_x$ (psi)	-6.95 (-7.0)	7.56 (-7.4)	-4.29 (-4.3)	-7.67 (-7.7)	-61.08 (-60.6)	-102.1 (-100)	-3.99 (-3.9)
	$\sigma_z$ (psi)	8.59 (8.6)	9.30 (9.3)	10.62 (10.6)	8.42 (8.4)	3.77 (3.7)	2.21 (2.2)	10.45 (10.5)
Top of subbase	$\sigma_x$ (psi)	-2.32	-2.53	-0.29	-1.24	-1.13	-0.36	-0.15
	$\sigma_z$ (psi)	-5.25 (-5.3)	-5.47 (-5.3)	-0.56 (-0.6)	-5.92 (5.9)	2.22 (-2.2)	-1.20 (-1.1)	0.92 (1.0)
Bottom of subbase	$\sigma_x$ (psi)	3.48 (3.5)	3.58 (3.5)	5.66 (5.7)	3.49 (3.5)	1.74 (1.7)	1.22 (1.2)	2.13 (2.2)
	$\sigma_z$ (psi)	0.39	0.02	3.65	0.35	0.18	0.26	0.40
	$\epsilon_x$ ( $10^{-6}$ )	588.8	713.8	355.2	627.4	314.9	196.0	354.8
36 in. below surface	$\sigma_x$ (psi)	1.59 (1.6)	1.61 (1.6)	2.41 (2.4)	1.66 (1.6)	0.99 (0.9)	0.78 (0.7)	1.44 (1.4)
	$\sigma_z$ (psi)	0.03	0.03	0.05	1.37	0.11	0.14	0.16

Note: Numbers in parentheses were reported by ERES Consultant, Inc. using ELSYMS 1 in. = 25.4 mm; 1 psi = 6.9 kPa.

## ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของชั้นทางที่มีค่าความยืดหยุ่นแบบเป็นเชิงเส้นในระบบหลายชั้น

ตารางที่ 2.6 จะมีการพิจารณากรณีศึกษาออกเป็น 7 กรณีดังนี้ 1 กรณีศึกษาแบบมาตรฐาน และ 6 กรณีศึกษาแบบที่ไม่ได้เป็นมาตรฐาน ซึ่งมีปัจจัยตัวแปรที่จะต่างจากกรณีศึกษาแบบมาตรฐานที่จะถูกวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

### 1. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 1

แรงกระทำจะมีค่าเท่ากับกับกรณีศึกษาแบบมาตรฐาน แต่แรงดันในล้อจะมีค่าเพิ่มเป็น 2 เท่าจากกรณีศึกษาแบบมาตรฐาน

### 2. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 2

ชั้นดินเดิมมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นดินเดิมมีค่าเป็น 3 เท่าของกรณีศึกษาแบบมาตรฐาน

### 3. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 3

ในทุกชั้นทางให้สมมุติว่ามีพฤติกรรมเป็นแบบซึ่งอัดตัวไม่ได้ และมีค่าอัตราส่วนปัวของสเท่ากับ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 4

ชั้นพื้นทางที่เป็นวัสดุเป็นแบบเม็ด (Granular) ถูกแทนที่ด้วยวัสดุยางมะตอย

#### 5. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 5

ชั้นพื้นทางที่เป็นวัสดุเป็นแบบเม็ด (Granular) ถูกแทนที่ด้วยวัสดุ Cement-treated base ตามทฤษฎีอัตราส่วนปัวของส์ของวัสดุ Treated base ควรจะแตกต่างจากวัสดุเป็นแบบเม็ด อย่างไรก็ตาม ผลกระทบที่เกิดจากอัตราส่วนปัวของส์จะมีค่าน้อย ใช้ค่าอัตราส่วนปัวของส์เท่ากับ 0.35

#### 6. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 6

มีชั้นทางประกอบด้วย 5 ชั้น โดยที่ชั้นดินเดิม จะถูกแทนที่ด้วยวัสดุที่เป็นปูนขาวที่มีเสถียรภาพ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนปัวของส์เท่ากับ 0.45 ข้อความในวงเล็บได้ Layered elastic system analysis, ELSYM5 (Kopperman et al., 1986) โปรแกรมจะถูกบรรยายโดย ERES consultant, Inc. (1987) ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์จากโปรแกรม KENLAYER มีค่าใกล้เคียงกับโปรแกรม ELSYM5

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองถูกเปรียบเทียบกับ จุดพังทลายที่เกิดขึ้นบริเวณผิวทาง ( $W_0$ ) ความเค้นในแนวรัศมี (Radial stress) และความเครียดดึง (Tension strain) ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นผิวทางที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน ความเค้นในแนวตั้ง (Vertical stress) ณ บริเวณจุดบนสุดของแต่ละชั้นทาง ความเค้นในแนวรัศมี (Radial stress) ณ บริเวณจุดบนสุดและจุดล่างสุดของแต่ละชั้นทาง ความเครียดอัดในแนวตั้ง (The vertical compressive strain) ณ บริเวณจุดบนสุดของชั้นดินเดิม ส่วนความเค้นในแนวตั้ง (Vertical stress) กับความเค้นในแนวรัศมี (Radial stress) ในชั้นดินเดิมที่ซึ่งลึกลงไปใต้ผิวทาง 36 นิ้ว จุดพังทลายบริเวณผิวทางเป็นจุดที่จะระบุได้อย่างดีถึงความแข็งแรงโดยรวมของชั้นทาง ความเครียดดึง (Tension strain) ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุยางมะตอย และความเครียดอัด (Compressive strain) ณ บริเวณจุดบนสุดของชั้นดินเดิมจะถูกนำมาออกแบบเป็นจุดวิกฤตที่เกิดขึ้นๆ

ความเค้นในแนวตั้ง (Vertical stress) มีส่วนทำให้เกิดการบีบตัวคาน้ำ (Consolidation) ในแต่ละชั้นทางและทำให้เกิดร่อง (rutting) ขึ้นบริเวณผิวทาง ความเค้นในแนวรัศมี (Radial stress) มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกหักในชั้นวัสดุที่เป็นของแข็ง (Rigid) และเป็นตัวควบคุมค่าโมดูลัสการคืนตัวของชั้นที่เป็นวัสดุเป็นแบบเม็ดที่ซึ่งไม่มีขอบเขตจำกัด (Unbounded granular layers)

## ตารางที่ 2.6 แสดงผลข้อมูลดังต่อไปนี้

1. การเปรียบเทียบกรณีศึกษาแบบมาตรฐาน และกรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 1 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากแรงดันในล้อ (Contact pressure) และขนาดของล้อ (Contact radial) มีความสำคัญเฉพาะบริเวณจุดบนสุดของชั้นทางเท่านั้น ถ้าการออกแบบชั้นทางนี้ถูกควบคุมโดยความเครียดดึงในแนวรัศมี ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุยางมะตอย

ค่าความเครียดในแนวรัศมีของกรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 1 มีค่ามากกว่ากรณีศึกษาแบบมาตรฐานถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงต้องใช้แอสฟัลต์ผสมร้อนที่คุณภาพดีและมีความหนา เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวจากความล้าจากการใช้งาน ถ้าการออกแบบชั้นทางนี้ถูกควบคุมโดยความเครียดอัดในแนวตั้ง ณ บริเวณจุดบนสุดของชั้นดินเดิม

กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 1 ความเครียดในแนวตั้งจะมีค่ามากกว่ากรณีศึกษาแบบมาตรฐานเพียง 3.6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผลกระทบจากขนาดของล้อจึงไม่มีความสำคัญต่อการพิจารณา

2. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาแบบมาตรฐาน ชั้นดินเดิมซึ่งมีความแข็งแรงมากขึ้นจะช่วยลดจุดแตกหักที่ผิวทางลงได้ 38 เปอร์เซ็นต์ แต่ความเครียดดึงในบริเวณจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุยางมะตอยจะลดลงเพียง 4.1 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากฐานรากที่แข็งแรง (Stiffer foundation) ความเค้นอัดในแนวตั้งและแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเครียดดึงในแนวรัศมีจะลดลง ผลกระทบนี้จะส่งผลโดยตรงต่อชั้นรองพื้นทางในตำแหน่งที่อยู่เหนือชั้นดินเดิม และผลกระทบนี้จะลดลงเรื่อยๆในแต่ละชั้นที่ห่างจากชั้นดินเดิมมากขึ้น เพราะว่าชั้นทางที่เป็นวัสดุเป็นแบบเม็ดและชั้นรองพื้นทางมีพฤติกรรมเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) การเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นในแนวตั้งและแนวรัศมี จะเป็นการเพิ่มค่าโมดูลัสการคืนตัว (resilient moduli) ดังนั้นผลกระทบของชั้นดินเดิมที่มีความแข็งแรงมากขึ้นที่เกิดขึ้นบนความเครียดดึงบริเวณจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุยางมะตอยควรมีค่าความเครียดดึงมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับพฤติกรรมที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear)

3. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 3 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาแบบมาตรฐาน ระบุว่าอัตราส่วนปัวซองส์มีผลกระทบน้อยมากต่อการเกิดรอยร้าวในผิวทาง (Surface deflection) ความเค้นในแนวตั้งและความเครียดดึงในแนวรัศมีในบริเวณจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุยางมะตอย แต่กลับมีผลกระทบอย่างมากต่อความเค้นในแนวรัศมี ความเครียดอัดในแนวตั้งในบริเวณจุดบนสุดของชั้นดินเดิมจะมีค่าลดลง 9.1 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีอัตราส่วนปัวซองส์ที่มากขึ้น

4. การแทนที่ชั้นวัสดุเป็นแบบเม็ดด้วยวัสดุขี้เถ้าในกรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 4 จะก่อให้เกิดผลโดยตรงทำให้รอยร้าวบนชั้นผิวทาง ความเค้นในชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิมมีค่าลดลง ส่วนค่าความเค้นในแนวรัศมี ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นทางที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนจะเปลี่ยนจากแรงดึงเป็นแรงอัด ดังนั้นความเครียดดึงวิกฤตส่วนใหญ่จะปรากฏที่บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นขี้เถ้าแทนที่จะเกิดที่ชั้นผิวทาง

5. การแทนที่ชั้นวัสดุเป็นแบบเม็ดด้วยวัสดุซีเมนต์ (Cement base) ในกรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 5 ส่งผลให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวทาง ความเค้นในชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิมจะมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาแบบไม่ได้เป็นมาตรฐานที่ 4 ความเค้นดึงในแนวรัศมี ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นพื้นทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยความแข็ง (ความไม่ยืดหยุ่น) ของชั้นพื้นทาง

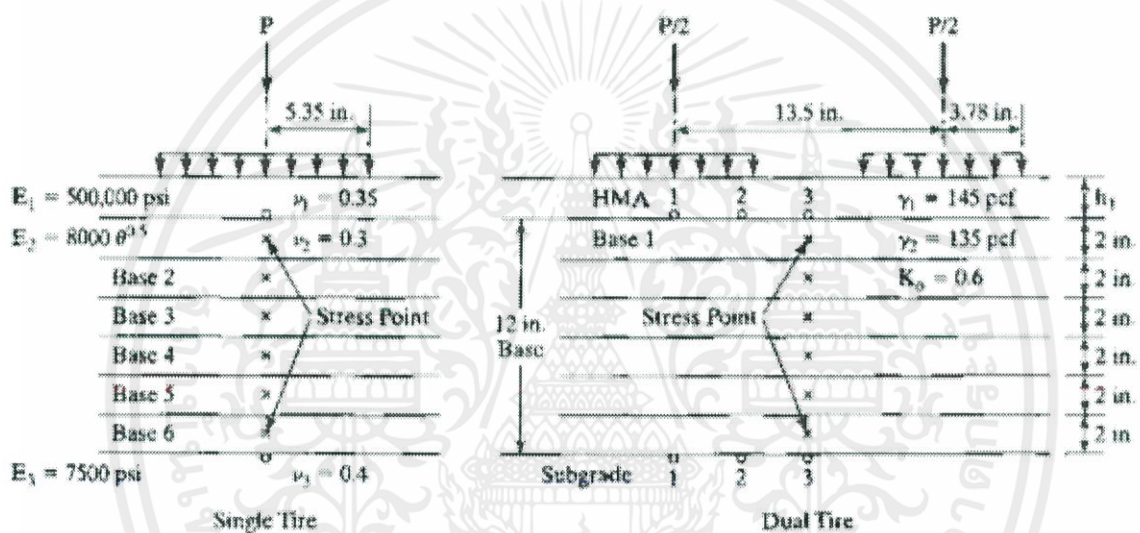
6. กรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 6 เปรียบเทียบกับกรณีศึกษาแบบมาตรฐาน ระบุว่าชั้นทางที่เป็นวัสดุหินปูนที่มีเสถียรภาพ (lime-stabilized) ที่มีความหนา 6 นิ้วถูกวางไว้เหนือชั้นดินเดิมจะช่วยลดค่าความเครียดดึง ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นผิวทางลงประมาณ 5.4 เปอร์เซ็นต์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเหมือนกันกับกรณีศึกษาแบบไม่ได้เป็นมาตรฐานที่ 2 เพียงแต่ว่ามีชั้นดินเดิมที่แข็งแรงกว่า

7. ความเค้นในแนวรัศมีในชั้นดินเดิมจะเกิดแต่แรงอัด (Compression) อย่างเดียว ในขณะที่ชั้นรองพื้นทางและบริเวณจุดต่ำสุดของชั้นพื้นทางจะเกิดแต่แรงดึง (Tension) หนึ่งในกรณีที่มีข้อยกเว้นคือกรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานที่ 6 ซึ่งความเค้นในแนวรัศมี ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นรองพื้นทางจะเกิดแต่แรงอัดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีชั้นทางที่เป็นวัสดุหินปูนที่แข็งแรงและมีเสถียรภาพ (Very stiff lime – stabilized) ซ่อนอยู่ข้างล่างชั้นรองพื้นทาง

### 2.5.3.2 การวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Analysis)

การวิเคราะห์ที่มีพื้นฐานมาจากการสันนิษฐานให้ชั้นทาง 1 ชั้นหรือชั้นทางหลายชั้นมีพฤติกรรมของค่าความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear elastic) โดยค่าความเค้นจะขึ้นอยู่กับโมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus) ซึ่งชั้นทางที่เป็นวัสดุเป็นแบบเม็ด (Granular materials) ที่มีพฤติกรรมของค่าความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นชั้นทางแบบเดี่ยวหรือแบ่งเป็นหลายๆชั้นทาง (Subdivided) ในแต่ละชั้นทางได้ โดยความหนาของแต่ละชั้นทางต้องสูงไม่เกิน 2 นิ้ว

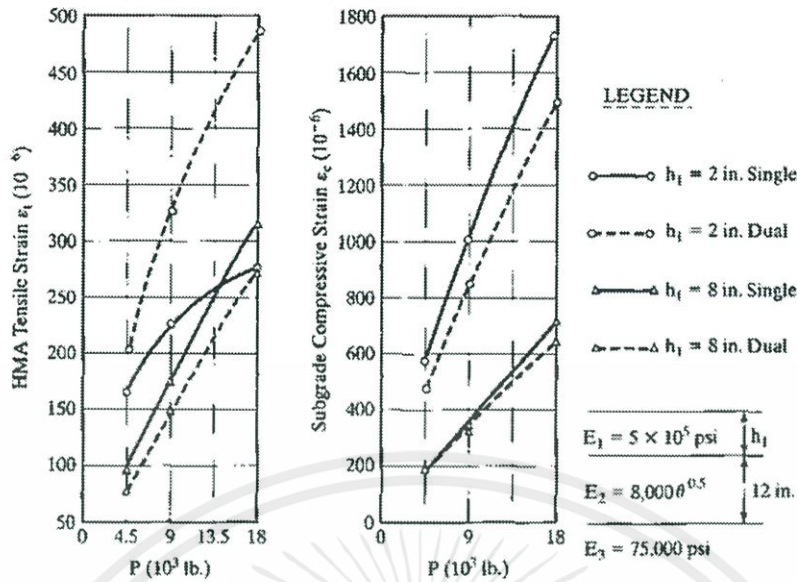
#### 1. ระบบชั้นทาง 3 ชั้น



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของชั้นทางสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

(1 นิ้ว เท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร , 1 psi เท่ากับ 6.9 kPa , 1 pcf เท่ากับ 157.1 นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างระบบชั้นทาง 3 ชั้น ภายใต้แรงกระทำ  $P$  ซึ่งถูกประยุกต์ใช้กับการถ่ายแรงกระทำแบบยาวและยาวคู่ โดยกำหนดค่าของตัวแปรทั้งขนาดล้อ ความเค้น ความเครียดและจุดบกพร่อง ให้เหมือนกันกับการวิเคราะห์แบบเป็นระบบเชิงเส้น ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อแรงดันในล้อ (Contact pressure) หรือขนาดของแรงกระทำ  $P$  ทั้งหมด อย่างไรก็ตามสำหรับระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear system) นี้ที่เป็นวัสดุแบบเม็ดละเอียด การเพิ่มขึ้นของการตอบสนองไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเหมือนกับการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ เนื่องจากความแข็งของวัสดุแบบเม็ดมีค่ามากกว่าแรงกระทำ วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์นี้ก็เพื่อต้องการที่จะหาขนาดของแรงกระทำที่มีผลตอบสนองต่อชั้นทาง ข้อมูลที่มีความจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์นี้ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.6



กราฟที่ 2.5 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำที่ตอบสนองต่อชั้นทางที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น

กราฟที่ 2.5 แสดงให้เห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นของจากแรงกระทำ  $P$  ที่สัมพันธ์กับความเครียดดึงและความเครียดอัด โดยกำหนดให้ชั้นผิวทางมีความหนา ( $h_1$ ) เท่ากับ 2 หรือ 8 นิ้ว โดยชั้นพื้นทางที่เป็นวัสดุแบบเม็ดถูกพิจารณาแบ่งย่อยออกเป็น 6 ชั้น มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength,  $C_u$ ) และมุม  $\phi$  มีค่าเท่ากับ 0 เหตุผลที่ชั้นดินเดิมถูกพิจารณาให้มีความยึดหยุ่นแบบเป็นเชิงเส้นแทนที่ความยึดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ก็เพราะว่าความยึดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะส่งผลกระทบต่อชั้นทางจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาก็ได้

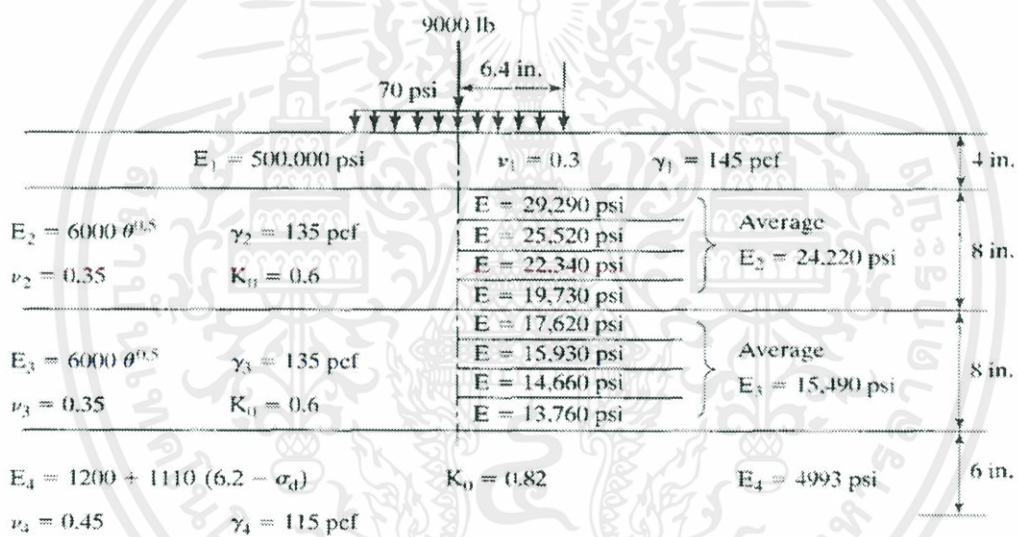
กราฟที่ 2.5 แสดงผลข้อมูลดังต่อไปนี้

1. สำหรับชั้นทางที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนที่มีความหนาน้อย โดยกำหนดให้ชั้นผิวทางมีความหนา ( $h_1$ ) เท่ากับ 2 นิ้ว ซึ่งความเค้นดึงที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำแบบล้อคู่จะมีความมากกว่าภายใต้แรงกระทำแบบล้อเดี่ยว โดยแนวทางของผลที่เกิดขึ้นนี้ได้แสดงไว้ในกราฟที่ 2.1 แต่ผลที่เกิดขึ้นจะค่อนข้างเห็นได้อย่างชัดเจนก็ต่อเมื่อชั้นพื้นทางมีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น กราฟที่ 2.5 นี้แสดงให้เห็นว่าแรงกระทำที่มีความมากขึ้นเท่าไร ความเครียดดึงที่เกิดขึ้นระหว่างล้อเดี่ยวและล้อคู่ก็จะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากว่าแรงกระทำแบบล้อเดี่ยวจะส่งผลให้ชั้นพื้นทางที่เป็นวัสดุแบบเม็ดจะมีความเค้นที่มากขึ้นและทำให้ชั้นพื้นทางนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้นแล้วทำให้ความเครียดดึงมีค่าลดลง

2. ผลกระทบของชั้นทางที่มีพฤติกรรมไม่เป็นแบบเชิงเส้นจะระบุให้เห็นถึงเส้นกราฟที่มีลักษณะโค้ง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดิ่งกับแรงกระทำ  $P$  โดยค่าที่ได้จะเห็นผลชัดเจนในกรณีที่ชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนมีความหนาน้อย ส่วนชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนที่มีความหนามากกว่า (ความหนาเท่ากับ 8 นิ้ว) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดิ่งกับแรงกระทำ  $P$  จะมีค่าใกล้เคียงกับพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น

3. ความแตกต่างของการตอบสนองต่อชั้นทางระหว่างแรงกระทำแบบล้อเดียวกับแรงกระทำแบบล้อคู่ จะส่งผลกระทบต่อชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนมีความหนาน้อย ในทางกลับกันจะส่งผลกระทบต่อชั้นแอสฟัลต์ผสมร้อนมีความหนาที่เพิ่มขึ้น

## 2. ระบบชั้นทาง 4 ชั้น



รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบชั้นทาง 4 ชั้นที่มีความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น

รูปที่ 2.7 เป็นกรณีศึกษาแบบมาตรฐานสำหรับระบบที่มีความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบที่มีความยืดหยุ่นแบบเป็นเชิงเส้น ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.4 ถึงแม้ว่าชั้นผิวทางจะเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมการยืดหยุ่นตัวเป็นแบบกึ่งเชิงเส้น (Viscoelastic) แต่ก็ยังมีความมั่นใจเป็นไปได้เสมอที่จะหาค่าความเร็วของพาหนะหรือระยะเวลาที่แรงกระทำเกิดขึ้น โดยที่ค่าโมดูลัสมีค่าเท่ากับ 500,000 psi และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินเดิมจะขึ้นอยู่กับค่าความเค้น ซึ่งจะถูกระบุโดยสมการที่แสดงอยู่ในรูปข้างบน สำหรับชั้นดินเดิมที่เป็นวัสดุแบบเม็ดละเอียด (Fine-grained subgrade soil) จะมีสมการเฉพาะสำหรับหาค่าความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 6.2 psi ดังที่แสดงไว้ เพราะว่าในความเป็นจริงนั้นค่าความเค้นจริง (The actual stress)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดชั้นจะมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ได้เสมอ ค่าคงที่ในสมการการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น จะถูกคัดเลือกเพื่อที่ว่าค่าโมดูลัสที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าโมดูลัสในระบบเชิงเส้น โดยที่ค่าโมดูลัสที่มีค่าเท่ากับ 25,000 psi จะเหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและค่าโมดูลัสที่มีค่าเท่ากับ 15,000 psi จะเหมาะสมสำหรับชั้นดินเดิม ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Permeability,  $K_1$ ) ที่ควรจะนำมาวิเคราะห์จะมีค่าเท่ากับ 6000 ในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางจะถูกแบ่งย่อยออกเป็นชั้นอีก 4 ชั้นในแต่ละชั้นพื้นทาง ค่าโมดูลัสของแต่ละชั้นจะได้รับค่าจากโปรแกรม KENLAYER ซึ่งแสดงให้เห็นไว้ในรูปที่ 2.7

Response	Standard case	Case 1 high pressure $q = 140$ psi	Case 2 strong subgrade <sup>1</sup>	Case 3 strong base <sup>2</sup>	Case 4 strong base $K_2 = 0.7$	Case 5 strong surface $E_1 = 10^6$ psi	Case 6 subgrade $K_0 = 0.4$
Avg $E_2$ (psi)	24,220	26,360	25,870	53,000	46,110	20,740	24,020
Avg $E_3$ (psi)	15,490	15,720	17,930	30,090	21,600	14,510	15,160
$E_4$ (psi)	4993	4984	14,700	5514	5359	5211	4277
$w_0$ (in.)	0.0341 (0.0341)	0.354 (0.0360)	0.0205 (0.0212)	0.0252	0.0277	0.0307	0.0371
$\epsilon_t$ ( $10^{-6}$ )	-290.0 (-295.7)	-403.4 (-428.7)	-267.5 (-283.5)	-173.6	-193.2	-218.9	-293.4
$\epsilon_c$ ( $10^{-6}$ )	691.0 (688.8)	704.5 (713.8)	357.6 (355.2)	507.5	564.0	584.4	748.7

Note. Figures in parentheses are from Table 3.8 based on the elastic system 1 psi = 6.9 kPa, 1 in. = 25.4 mm.

<sup>1</sup> Subgrade  $K_1 = 12,340$  psi

<sup>2</sup> Base  $K_1 = 12,000$  psi

### ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของชั้นทางที่มีค่าความยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในระบบหลายชั้นทาง

ในกรณีเพิ่มเติมจากกรณีศึกษาแบบมาตรฐานที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 นั้นจะมีกรณีศึกษาแบบไม่เป็นมาตรฐานอีก 6 กรณี ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีเพียง 1 ตัวแปรเท่านั้นที่จะถูกเปลี่ยนค่าให้ต่างจากกรณีศึกษาแบบมาตรฐานเพื่อทำการวิเคราะห์ ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.7 ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าเฉลี่ยของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) ชั้นรองพื้นทาง ( $E_3$ ) ชั้นดินเดิม ( $E_4$ ) ค่าการทรุดตัวของชั้นผิวทาง ( $w_0$ ) ค่าความเครียดดึงในแนวรัศมี ( $\epsilon_t$ ) ณ บริเวณจุดต่ำสุดของชั้นผิวทางและค่าความเครียดอัดในแนวตั้ง ( $\epsilon_c$ ) ณ บริเวณจุดบนสุดของชั้นดินเดิม

สำหรับการเปรียบเทียบค่าของ  $w_0$ ,  $\epsilon_t$  และ  $\epsilon_c$  ตามทฤษฎีแบบเป็นเชิงเส้นจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.6 โดยเป็นค่าที่แสดงในวงเล็บ

## ตารางที่ 2.7 แสดงผลข้อมูลดังต่อไปนี้

1. กรณีศึกษาแบบมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่าคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์แบบเป็นเชิงเส้นด้วยใช้ค่าโมดูลัสค่าเดียวกันในแต่ละชั้นทางเดียวกัน การเปรียบเทียบการระหว่างวิธีการวิเคราะห์แบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าผลจากการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจะให้ค่าการทรุดตัวของชั้นผิวทางเหมือนกัน ค่าความเครียดดึงที่น้อยกว่าเล็กน้อยและค่าความเครียดอัดที่มากกว่าเล็กน้อย ผลลัพธ์ที่ได้นี้ถือว่ามีผลสมเหตุสมผล เนื่องจากว่าค่าการทรุดตัวของชั้นผิวทางจะขึ้นกับค่าเฉลี่ยของค่าโมดูลัส ค่าความเครียดดึงจะขึ้นกับค่าโมดูลัสของวัสดุที่อยู่ใต้ชั้นยางมะตอย ในขณะที่ค่าความเครียดอัดจะขึ้นกับค่าโมดูลัสของวัสดุที่อยู่เหนือชั้นดินเดิม ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าโมดูลัสในระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะมีค่าใกล้เคียงกับระบบแบบเชิงเส้น ค่าโมดูลัสของชั้นทางที่เป็นวัสดุแบบเม็ด (Granular Materials) ที่อยู่ด้านล่างติดกับชั้นยางมะตอยจะมีค่า 29,290 psi ในขณะที่ค่าๆนี้จะมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของค่าโมดูลัสในชั้นพื้นทางที่มีค่า 24,220 psi และค่าโมดูลัสของชั้นทางที่เป็นวัสดุแบบเม็ดที่อยู่ด้านบนติดกับชั้นดินเดิมจะมีค่า 13,760 psi ในขณะที่ค่านี้จะมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของค่าโมดูลัสในชั้นรองพื้นทางที่มีค่า 15,490 psi ค่าโมดูลัสที่มีค่ามากกว่าของชั้นพื้นทางที่อยู่ใต้ชั้นยางมะตอยจะให้ค่าความเครียดดึงที่น้อยกว่า และค่าโมดูลัส ที่มีค่าน้อยกว่าของชั้นรองพื้นทางที่อยู่ด้านบนชั้นดินเดิมจะให้ค่าความเครียดอัดที่มากกว่า

2. แรงกระทำรวมที่มีค่าเหมือนกันจะเป็นการเพิ่มแรงดันในล้อ (Contact pressure) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) เพิ่มขึ้น แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทาง ( $E_3$ ) และชั้นดินเดิม ( $E_4$ ) การวิเคราะห์ผลแบบนี้มีความสมเหตุสมผล เพราะว่าชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิมมีระยะที่ห่างจากแรงกระทำและไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันในล้อ トラบเท่าที่แรงกระทำยังมีค่าเท่าเดิม นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของความเค้นในความแข็งแรงของวัสดุขนาดใหญ่ (Large geostatic stress) ในชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิม จะทำให้ผลกระทบลดลง ซึ่งเกิดจากค่าความเค้นภายใต้ค่าโมดูลัสการคืนตัว หากทำการเพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ผลการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจะให้ค่า  $w_0$ ,  $\epsilon_t$  และ  $\epsilon_c$  ที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น

3. ชั้นดินเดิมที่แข็งแรงเป็นสาเหตุทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ( $E_2$ ) และชั้นรองพื้นทาง ( $E_3$ ) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การเพิ่มค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นดินเดิม ( $E_4$ ) จาก 4,993 psi ไปเป็น 14,700 psi มีผลทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทางเพิ่มขึ้น

16% และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทางเพิ่มขึ้น 7% ดังนั้นผลการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทำให้ค่าความเครียดลดลง 7.8% และลดลงไป 4.1% ในการวิเคราะห์แบบเป็นเชิงเส้น

4. ชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางที่มีความแข็งมากขึ้น สามารถหาค่าได้โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ  $K_1$  และ  $K_2$  ในระบบการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจาก  $K_1$  และ  $K_2$  ส่งผลสำคัญอย่างมากต่อความเครียดตึงมากกว่าความเครียดอัด

5. ชั้นผิวทางที่มีความแข็งแรงเป็นสาเหตุทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทางมีค่าลดลง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิมมีค่าลดลงเล็กน้อยและทำให้  $w_0$ ,  $\epsilon_t$  และ  $\epsilon_c$  มีค่าลดลงอย่างมาก

6. การลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ( $K_0$ ) ของชั้นดินเดิมจะทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นดินเดิมและความเครียดอัดลดลง แต่ไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุในชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และความเครียดตึง เนื่องจากค่าความเค้นในแนวระนาบ (horizontal stresses) ทุกจุดที่เกิดขึ้นในชั้นทางที่เป็นวัสดุแบบเม็ดเป็นแรงตึงทั้งหมด โดยจะต้องกำหนดค่าตั้งแต่ 0 จนถึงจุดที่ความเค้นมีค่าคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ( $K_0$ ) ของวัสดุเป็นแบบเม็ด (Granular materials) ในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางจะไม่มีผลกระทบต่อวิเคราะห์

7. ผลกระทบส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากค่าความเค้นในความแข็งแรงของวัสดุ (Geostatic stress) ทำให้ค่าโมดูลัสของชั้นดินเดิมมีการเปลี่ยนแปลงจากความเค้นที่กระทำหรือค่าโมดูลัสของชั้นทางที่วางอยู่ด้านบนมีค่าลดน้อยลง ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นถึงความสมเหตุสมผลในการสันนิษฐานว่าชั้นดินเดิมมีพฤติกรรมแบบเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ไม่ขึ้นกับความเค้น การวิเคราะห์เช่นนี้ไม่สามารถใช้ได้สำหรับชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง เพราะค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของ 2 ชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของค่าความแข็งแรงในชั้นดินเดิม (Stiffness of subgrade)

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

- 3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.2 การกำหนดค่าของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์
- 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลในโปรแกรม kenpave
- 3.4 การประมวลผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล
- 3.5 การสรุปผลการวิจัย

#### 3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การได้มาของข้อมูลแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) และข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ในส่วนของงานวิจัยฉบับนี้ข้อมูลที่คณะผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมนั้น จัดเป็นข้อมูลแบบทุติยภูมิทั้งหมด เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีผู้อื่นค้นคว้าหรือเก็บรวบรวมไว้ก่อนแล้ว

##### 3.1.1 การได้มาซึ่งข้อมูลเพื่อประกอบการวิจัย มีแหล่งข้อมูลดังนี้

- 1) หน่วยงานราชการ และ หน่วยงานเอกชน
- 2) หนังสือหรือตำราที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการวิจัย
- 3) ข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต

##### 3.1.2 การได้มาซึ่งข้อมูลเพื่อประกอบการวิจัย มีแนวทางในการหาข้อมูลดังนี้

- 1) เขียนหนังสือขอความอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อประกอบการวิจัยจากสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง
- 2) สืบค้นข้อมูลจากหนังสือหรือตำราที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการวิจัย
- 3) สืบค้นข้อมูลจากเว็บไซต์ของกรมทางหลวงและเว็บไซต์ของสำนักควบคุมน้ำหนักรยานพาหนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การกำหนดค่าของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

คณะผู้วิจัยได้ทำการกำหนดค่าของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้เก็บรวบรวม โดยกำหนดค่าใดค่าหนึ่งในช่วงของข้อมูลทั้งหมด ให้เป็นตัวแทนของช่วง ประกอบด้วยค่าต่างๆดังนี้

1. กำหนดแรงกระทำบนชั้นผิวทาง Contact pressure = 990 kPa และ Contact radius = 192.5 mm.

2. กำหนดค่าความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์ความหนาชั้นผิวทางและการวิเคราะห์ความเสียหายของชั้นทาง ดังนี้

2.1 ค่าความหนาชั้นพื้นทางมีค่า 150 mm. และ 500 mm.

2.2 ค่าความหนาชั้นรองพื้นทางมีค่า 200 mm. และ 500 mm.

2.3 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทางมีค่า 2500 MPa

2.4 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นพื้นทางมีค่า 150 MPa และ 800 MPa

2.5 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นรองพื้นทางมีค่า 50 MPa และ 150 MPa

2.6 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นดินเดิมมีค่า 5 MPa และ 50 MPa

3. กำหนดค่าความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทาง ดังนี้

3.1 ค่าความหนาชั้นพื้นทางมีค่า 150 mm, 300 mm. และ 500 mm.

3.2 ค่าความหนาชั้นพื้นทางมีค่า 150 mm. และ 500 mm.

3.3 ค่าความหนาชั้นรองพื้นทางมีค่า 200 mm. และ 500 mm.

3.4 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นพื้นทางมีค่า 150 MPa และ 800 MPa

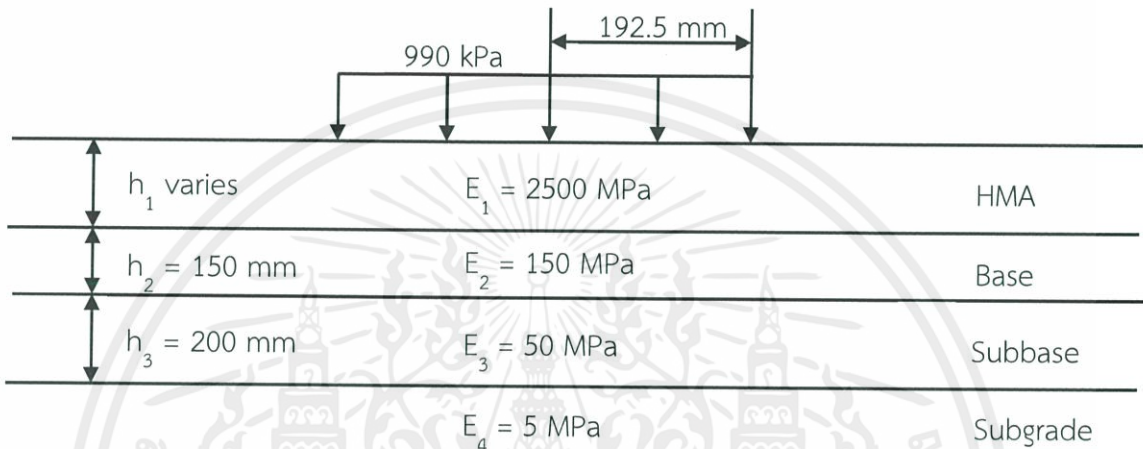
3.5 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นรองพื้นทางมีค่า 50 MPa และ 150 MPa

3.6 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นดินเดิมมีค่า 5 MPa และ 50 MPa

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลในโปรแกรม KENPAVE

การวิเคราะห์ข้อมูลในโปรแกรม kenpave มีขั้นตอน ดังนี้

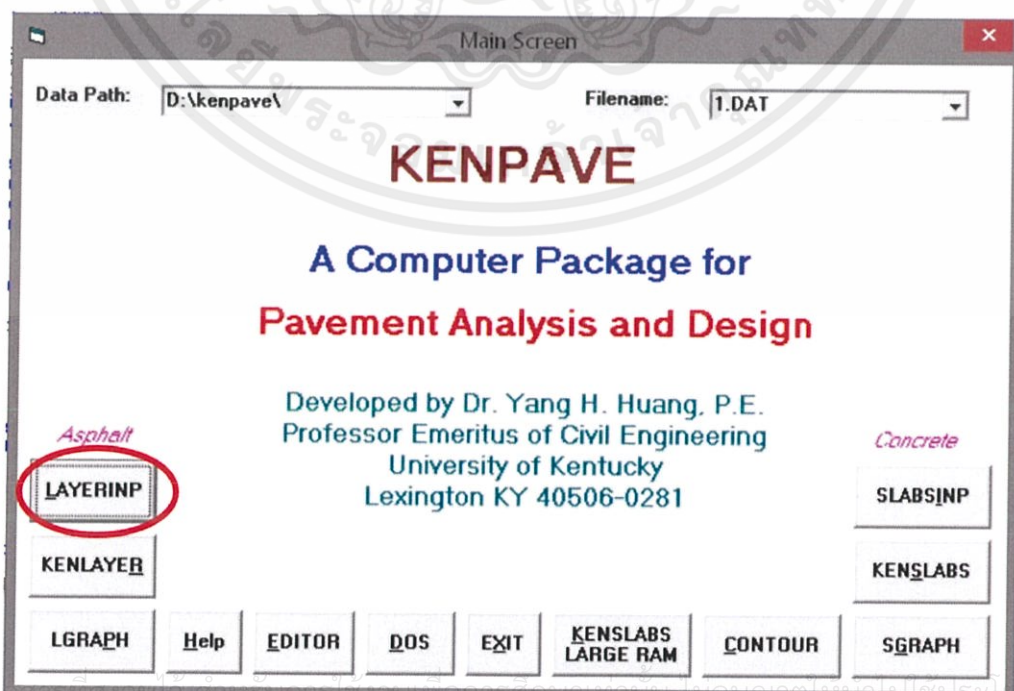
1. ออกแบบถนนลาดยาง โดยกำหนดให้เปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นทางหรือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่กำลังพิจารณาไปเรื่อยๆ ในขณะที่กำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ไว้ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การออกแบบชั้นทาง 4 ชั้น

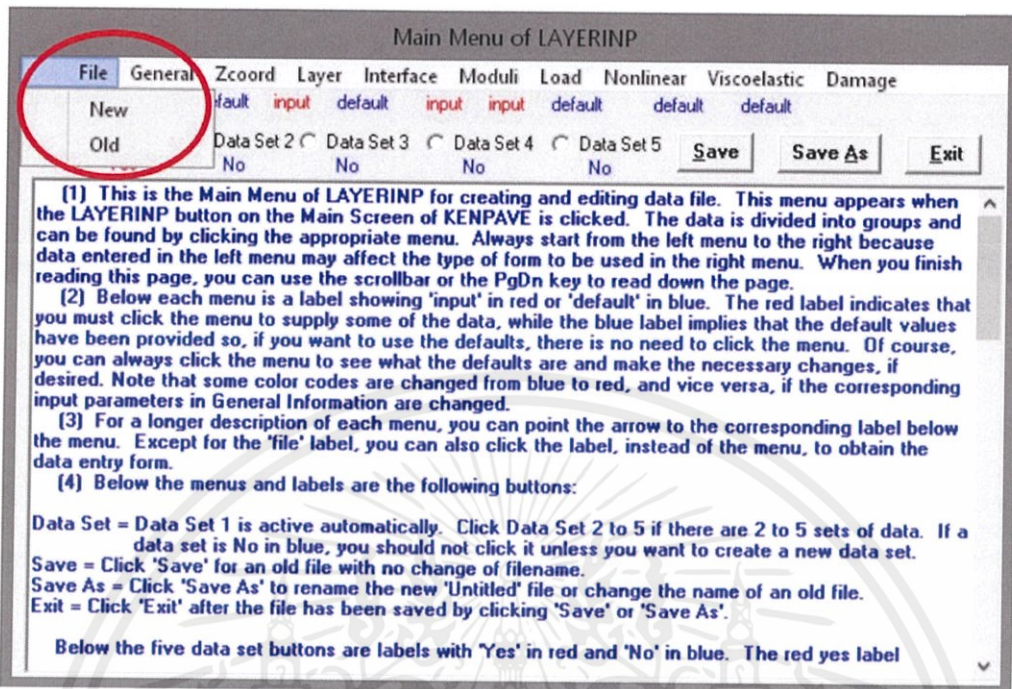
2. นำตัวแปรที่ถูกออกแบบไว้ในแต่ละกรณีมากรอกในโปรแกรม KENPAVE เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ตามขั้นตอนต่อไปนี้

2.1 เข้าโปรแกรม KENPAVE จากนั้นเข้าไปที่ LAYERINP



รูปที่ 3.2 Main screen

## 2.2 เมื่อเข้าไปใน LAYERINP แล้วกด file จากนั้นกด new



รูปที่ 3.3 Main menu of LAYERRINP

## 2.3 กดคำว่า General จากนั้นกรอกค่าแต่ละช่องดังนี้

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE		
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	0
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	.001
Number of layers	(NL)	3
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	0
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	1
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1
Number of layers for top compression	(NLTC)	1
System of units (0=English, 1=S)	(NUNIT)	0

(1) This form appears when the 'General' on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the remaining text, you can use the scrollbar. You can also use the PgDn key after clicking this textbox to make it active.

(2) TITLE (title of run): Any title or comment can be typed on one line. The title should not be longer than 68 characters including spaces. If you make a mistake in typing, use the Del key to erase any typographical errors. When the total length reaches 68, no additional characters can be added. No comma should be used in TITLE. Use colon or semicolon instead.

(3) MATL (types of material): 1 when all layers are linear elastic, 2 when some layers are nonlinear

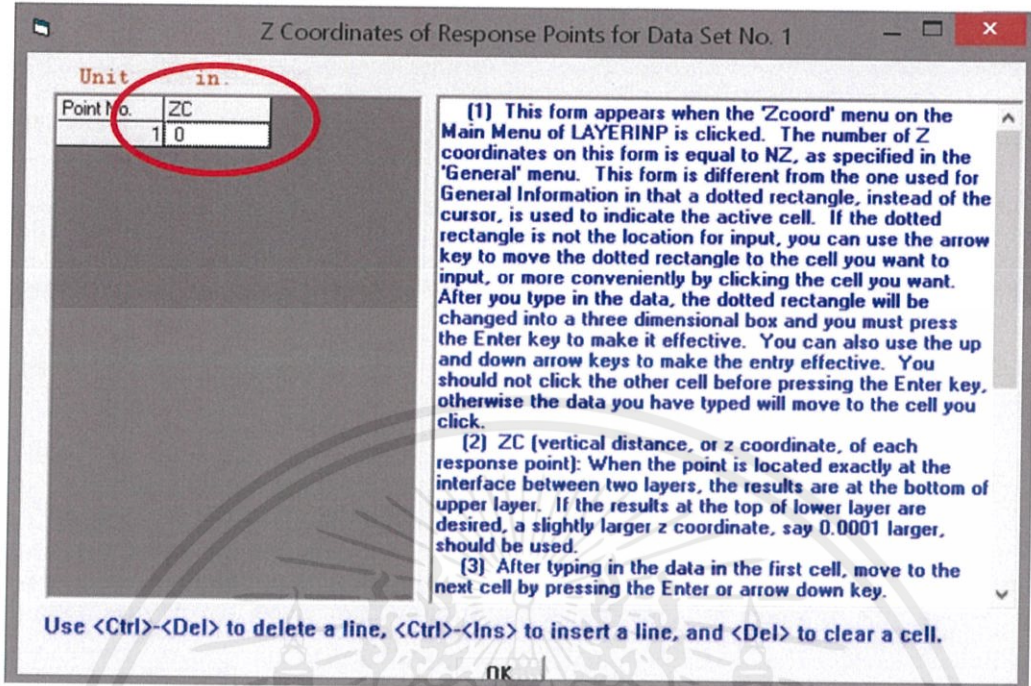
รูปที่ 3.4 General information of LAYERINP รูปที่ Main menu of LAYERRINP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1	ช่อง MATL	กรอกค่า	1 สำหรับการวิเคราะห์แบบ linear 2 สำหรับการวิเคราะห์แบบ nonlinear 3 สำหรับการวิเคราะห์แบบ viscoelastic 4 สำหรับการวิเคราะห์แบบ combined
2.3.2	ช่อง NDAMA	กรอกค่า	0 สำหรับกรณีไม่ศึกษา damage analysis 1 สำหรับกรณีศึกษา damage analysis
2.3.3	ช่อง NPY	กรอกค่า	จำนวนปีที่ต้องการวิเคราะห์
2.3.4	ช่อง NLG	กรอกค่า	จำนวนโหนดที่ต้องการวิเคราะห์
2.3.5	ช่อง DEL	กรอกค่า	0.001 (โปรแกรมกำหนดให้)
2.3.6	ช่อง NL	กรอกค่า	จำนวนชั้นทาง
2.3.7	ช่อง NZ	กรอกค่า	จำนวนจุดที่ต้องการวิเคราะห์
2.3.8	ช่อง ICL	กรอกค่า	80 (โปรแกรมกำหนดให้)
2.3.9	ช่อง NSTD	กรอกค่า	1 สำหรับต้องการทราบเฉพาะค่าการหลุดตัว 5 สำหรับต้องการแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 9 สำหรับต้องการแสดงค่าความเครียดที่เกิด
2.3.10	ช่อง NBOND	กรอกค่า	0 สำหรับบางชั้นมีแรงเสียดทาน 1 สำหรับทุกชั้นมีแรงเสียด
2.3.11	ช่อง NLBT	กรอกค่า	จำนวนผิวล่างของชั้นทาง
2.3.12	ช่อง NLTC	กรอกค่า	จำนวนผิวบนของชั้นทาง
2.3.13	ช่อง NUNIT	กรอกค่า	0 สำหรับหน่วยอังกฤษ 1 สำหรับหน่วย SI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กด Zcoord แล้วรอกความลึกจุดที่ต้องการวิเคราะห์จากระดับผิวด้านบนจากนั้นกด OK



Z Coordinates of Response Points for Data Set No. 1

Unit in.

Point No.	ZC
1	0

[1] This form appears when the 'Zcoord' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of Z coordinates on this form is equal to NZ, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can also use the up and down arrow keys to make the entry effective. You should not click the other cell before pressing the Enter key, otherwise the data you have typed will move to the cell you click.

[2] ZC (vertical distance, or z coordinate, of each response point): When the point is located exactly at the interface between two layers, the results are at the bottom of upper layer. If the results at the top of lower layer are desired, a slightly larger z coordinate, say 0.0001 larger, should be used.

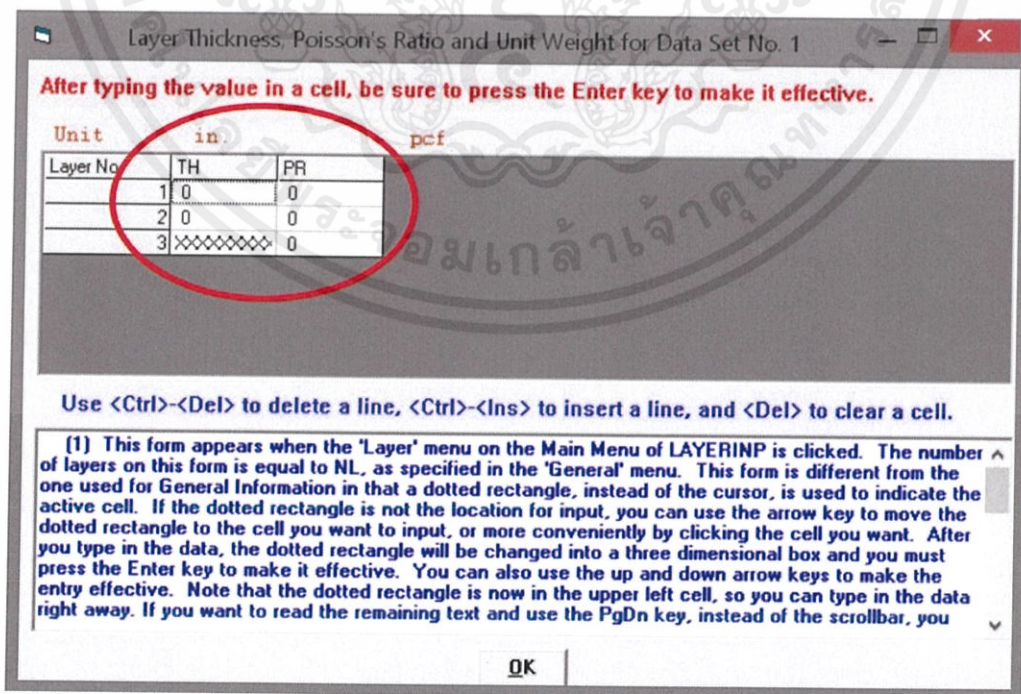
[3] After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

OK

รูปที่ 3.5 Zcoordinates of response points

2.5 กด Layer กรอกค่าความหนาของแต่ละชั้นในช่อง TH และ ค่า Poisson's ratio ของแต่ละชั้นในช่อง PR



Layer Thickness, Poisson's Ratio and Unit Weight for Data Set No. 1

After typing the value in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

Unit in. pcf

Layer No.	TH	PR
1	0	0
2	0	0
3	xxxxxxxx	0

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

[1] This form appears when the 'Layer' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can also use the up and down arrow keys to make the entry effective. Note that the dotted rectangle is now in the upper left cell, so you can type in the data right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you

OK

รูปที่ 3.6 Layer thickness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ช่อง PR กรอกค่า 0.35 สำหรับ HMA และ วัสดุ Granular  
0.45 สำหรับดิน fine-grained

2.6 กด Moduli จากนั้น กด Peroid1

Layer Modulus of each period for Data Set No. 1

Period1  
input

(1) This form appears when the "Moduli" menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of periods on this form is equal to NPY, as specified in the "General" menu. The 12 buttons on the form indicates that a maximum of 12 periods may be used. However, only the periods being actually specified are marked with the period number on the button.

(2) Below the period button is a label showing "input" in red, indicating that there are no defaults and you must enter the elastic modulus for each layer. After the data are entered, the letter "input" will be changed to "done".

(3) Now you can click the Period1 button to enter the data. After the data for all periods are entered, as indicated by "done" under each period button, click OK to return to the Main Menu of LAYERINP.

OK

รูปที่ 3.7 Layer modulus of each period

กรอกค่า modulus of elastic ของแต่ละชั้นในช่อง E จากนั้นกด OK

Layer Moduli for Period No. 1 and Data Set No. 1

Unit psi

Layer No.	E
1	0
2	0
3	0

(1) This form appears when the period button on the Layer Modulus of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the "General" menu.

(2) E (elastic modulus of each layer): Use as the assumed modulus for the first iteration when the layer is nonlinear. If more convenient, you can enter the modulus in exponential form such as 1.234E5. Assign 0 or any value for viscoelastic layer.

(3) After typing the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key. After the last cell is filled, be sure to click the Enter key.

(4) You can delete a line, or one layer, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>-<Del> keys. The NL in the "general" menu will be reduced automatically by 1.

(5) You can add a new line, or one more layer, above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NL in the "General" menu will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NL in the "General" menu by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that always use the <Ctrl>-<Ins>

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

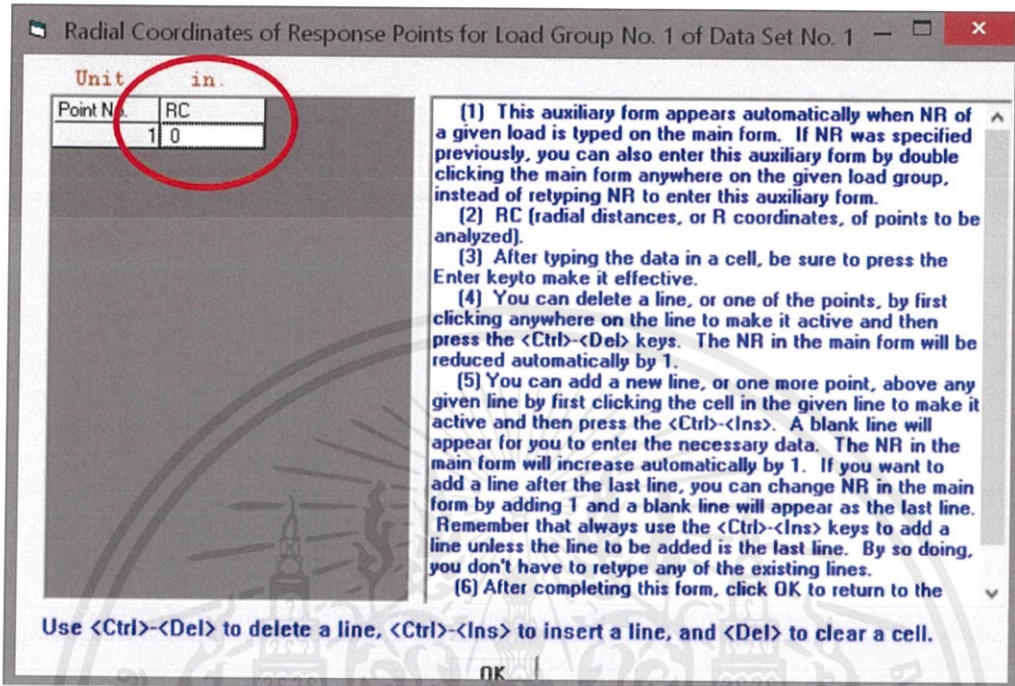
OK

รูปที่ 3.8 Layer moduli for period

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับครู เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

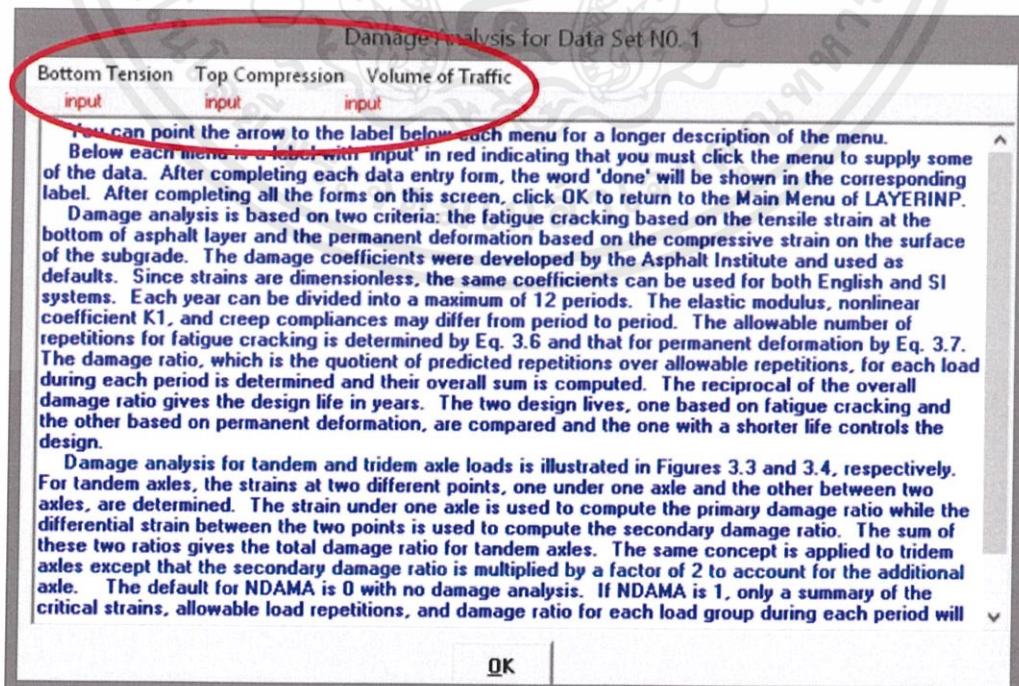


2.8 เมื่อทำการกรอกค่าเสร็จแล้วให้ Double Click ที่ช่อง NR or NPT จากนั้นให้กรอกค่าระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางล้อกับจุดที่ต้องการวิเคราะห์จากนั้นกด OK สองครั้ง



รูปที่ 3.10 Load repetition for period

2.9 กรณีวิเคราะห์ Damage analysis กด Damage



รูปที่ 3.11 Damage analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการวิจัยในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กด Bottom Tension กรอกค่า ช่อง LNBT เท่ากับจำนวนผิวด้านล่างของชั้นทางทั้งหมดในกรณีศึกษาจากนั้นกด OK

After typing the value in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

Sequence	LNBT	FT1	FT2	FT3
1	0	0.0796	3.291	0.854

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

(1) This form appears when the 'Bottom Tension' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of sequences or layers for damage analysis on this form is equal to NLBT, as specified in the 'General' menu. Note that the cursor is now in the upper left cell, as indicated by the dotted rectangle, so you can type in the layer number right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. After finishing reading, you should click the cell before typing in the data.

(2) LNBT (layer number for damage analysis of bottom tension).

(3) FT1, FT2, FT3 (fatigue coefficients, as indicated by f1, f2 and f3 in Eq. 3.6): Values suggested by the Asphalt Institute are 0.0796, 3.291, and 0.854.

OK

รูปที่ 3.12 Layer number and fatigue coefficients

กด Top Compression กรอกค่า ช่อง LNTC เท่ากับจำนวนผิวด้านบนของชั้นดินทั้งหมดในกรณีศึกษาจากนั้นกด OK

After typing the value in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

Sequence	LNTC	FT4	FT5
1	0	1.365E-09	4.477

Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

(1) This form appears when the 'Top Compression' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of sequences or layers for damage analysis on this form is equal to NLTC, as specified in the 'General' menu. Note that the cursor is now in the upper left cell, as indicated by the dotted rectangle, so you can type in the layer number right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. After finishing reading, you should click the cell before typing in the data.

(2) LNTC (layer number for damage analysis of top compression).

(3) FT4, FT5 (permanent deformation coefficients, as indicated by f4 and f5 in Eq. 3.7): Values suggested by the Asphalt Institute are  $1.365 \times 10^{-9}$  and 4.477.

OK

รูปที่ 3.13 Layer number and permanent deformation coefficients

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กต Volume of Traffic จากนั้น กต Period1

Load Repetitions of Each Period for Data Set No. 1

Period1 <small>input</small>											

(1) This form appears when and the 'Volume of Traffic' menu on the Damage Analysis is clicked. The number of periods on this form is equal to NPY, as specified in the 'General' menu. The 12 buttons on the form indicate that a maximum of 12 periods may be used. However, only the periods being actually specified are marked with the period number on the button.

(2) Below the period button is a label showing 'input' in red, indicating that there are no defaults and you must enter the number of repetitions for each load group. After the data are entered, the letter 'input' will be changed to 'done'.

(3) Now you can click the Period1 button to enter the data. After the data for all periods are entered, as indicated by 'done' under each slab button, click OK to return to the Damage Analysis.

OK

รูปที่ 3.14 Load repetitions of each period

กรอกค่า ช่อง TNLR เท่ากับปริมาณการจราจรเฉลี่ยของรถต่อปีที่ผ่านมาบนถนนเส้นหนึ่ง จากนั้นกด OK สองครั้ง เมื่อกรอกค่าดังกล่าวครบหมดแล้ว จากนั้นกด OK

Load Repetition for Period No. 1 and Data Set No. 1

Load Group 1	TNLR
1	0

(1) This form appears when the period button on the Load Repetitions of each period is clicked. The number of load groups on this form is equal to NLG, as specified in the 'General' menu.

(2) TNLR (total number of load repetitions for each load group during each period).

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one load group, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>-<Del> keys. The NLG in the 'general' menu will be reduced automatically by 1.

(5) You can add a new line, or one load group, above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NLG in the 'General' menu will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NLG in the 'General' menu by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that always use the <Ctrl>-<Ins> keys to add a line unless the line to be added is the last line. By so doing, you don't have to retype any of the existing lines.

(6) Upon completion, click the OK button to return to the

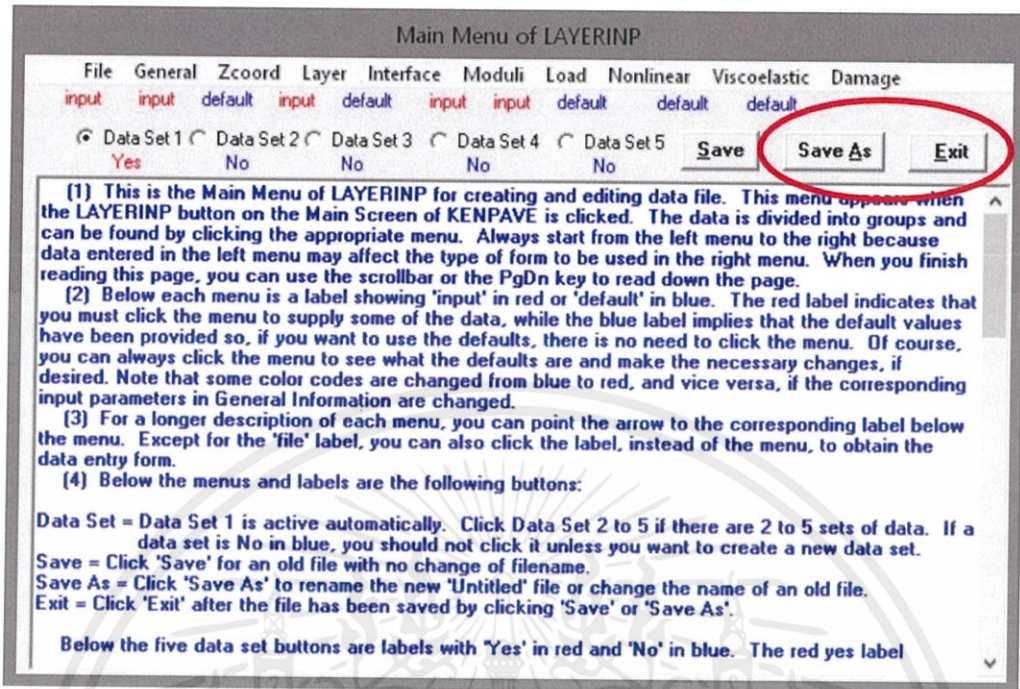
Use <Ctrl>-<Del> to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and <Del> to clear a cell.

OK

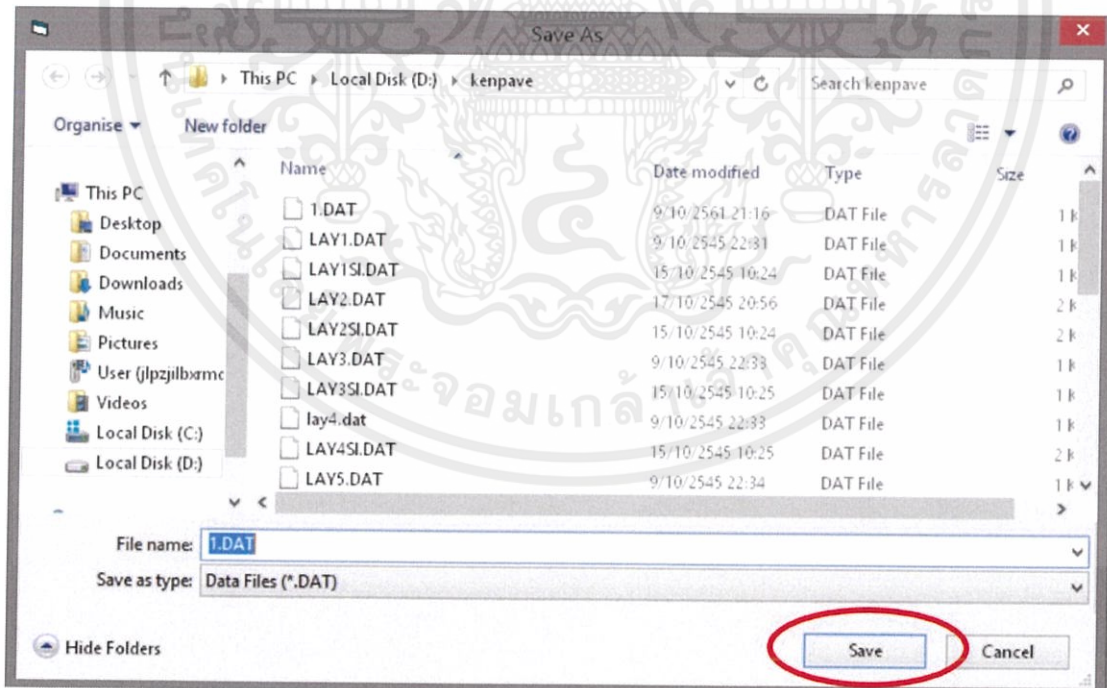
รูปที่ 3.15 Load repetition for period

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 กด Save As แล้วเลือกพื้นที่ที่ต้องการบันทึกข้อมูลจากนั้นกด Save แล้วกด Exit



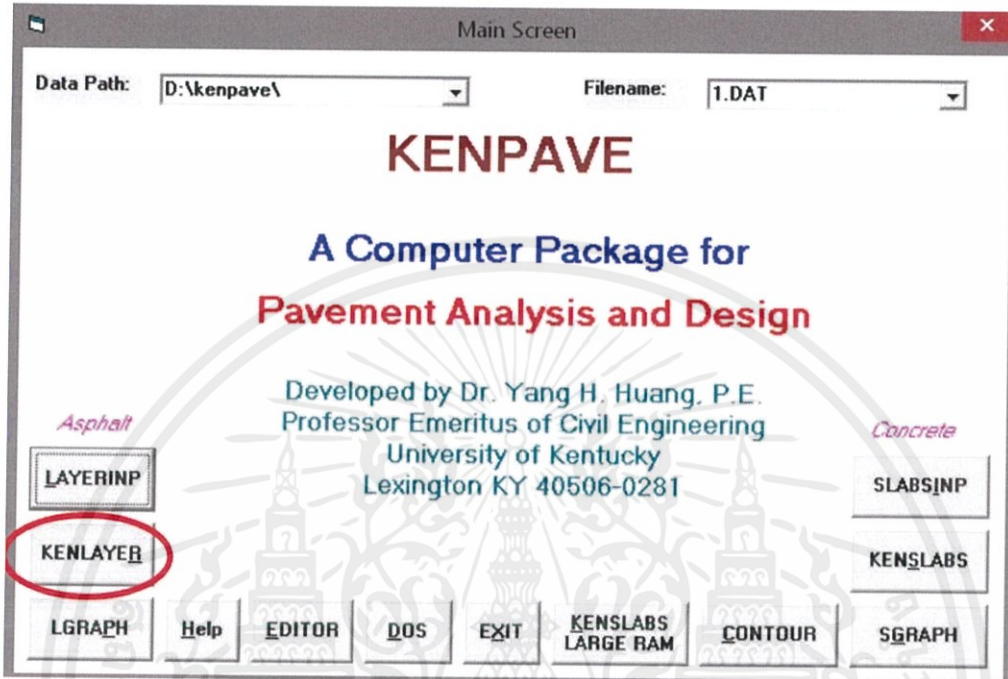
รูปที่ 3.16 Main menu of LAYERRINP



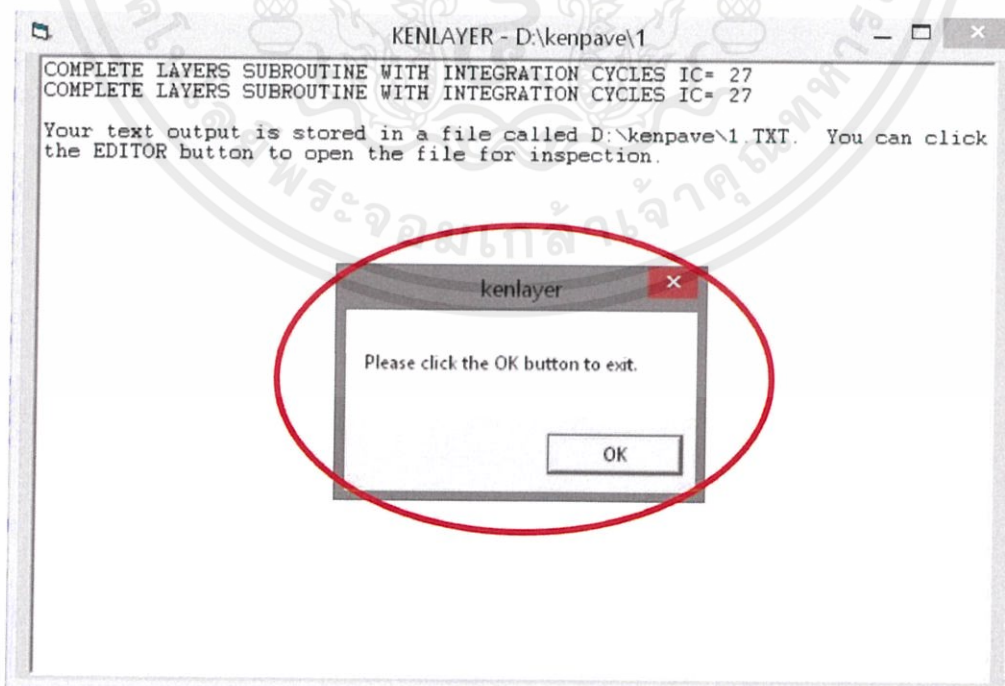
รูปที่ 3.17 Save as window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 กด KENLAYER หากขึ้นคำว่า Please click the OK button to exit นั้นแปลว่าโปรแกรมได้ทำการคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้วจากนั้นกด OK หากโปรแกรมขึ้นข้อความอื่นให้กลับไปแก้ไขข้อมูลใหม่ แล้วทำการกด KENLAYER อีกครั้ง



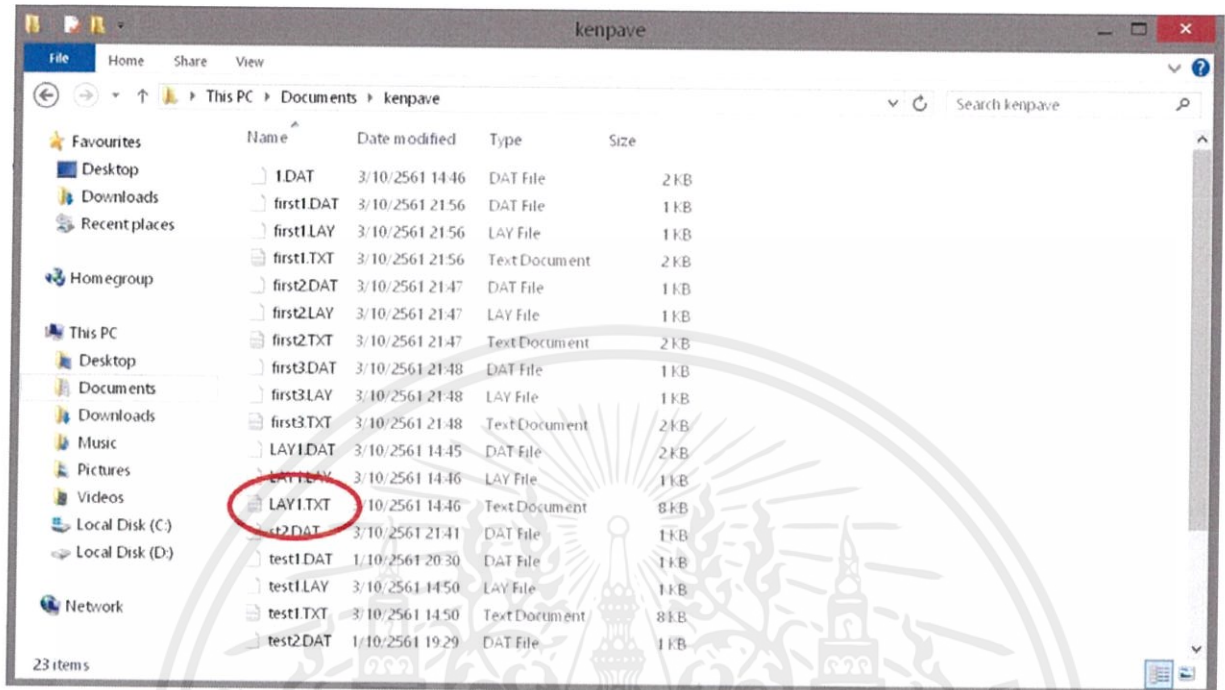
รูปที่ 3.18 Main screen



รูปที่ 3.19 KENLAYER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 ข้อมูลที่คำนวณได้นั้นจะแสดงอยู่ในพื้นที่ที่บันทึกข้อมูลโดยจะเป็นชื่อไฟล์ที่ตั้งไว้และจะมีคำว่า.TXTลงท้ายอยู่ในชื่อไฟล์



รูปที่ 3.20 File.TXT

### 3.4 การประมวลผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม KENPAVE มาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ตามกรณีศึกษา ดังนี้

3.4.1 การวิเคราะห์ความหนาชั้นผิวทางจะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างเป็นกราฟ 2 กราฟ คือ

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิมกับความหนาชั้นผิวทางที่มีค่าความหนาชั้นผิว
2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทางกับความหนาชั้นผิวทางที่มีค่าความหนาชั้นผิว

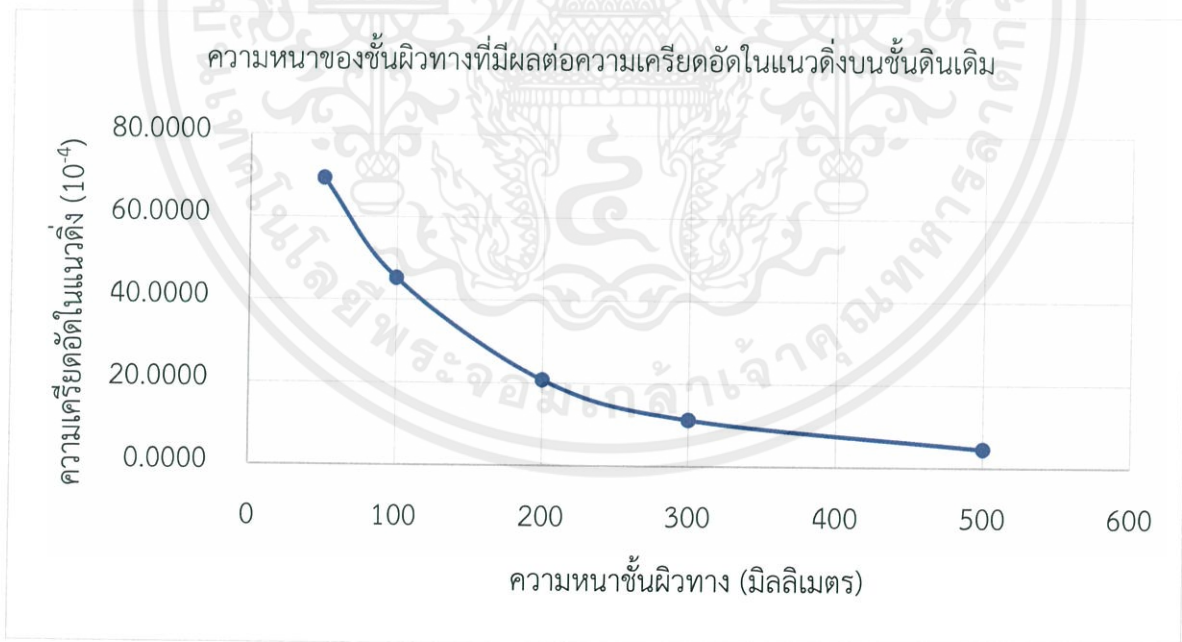
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทางจะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างเป็นกราฟ 2 กราฟ คือ

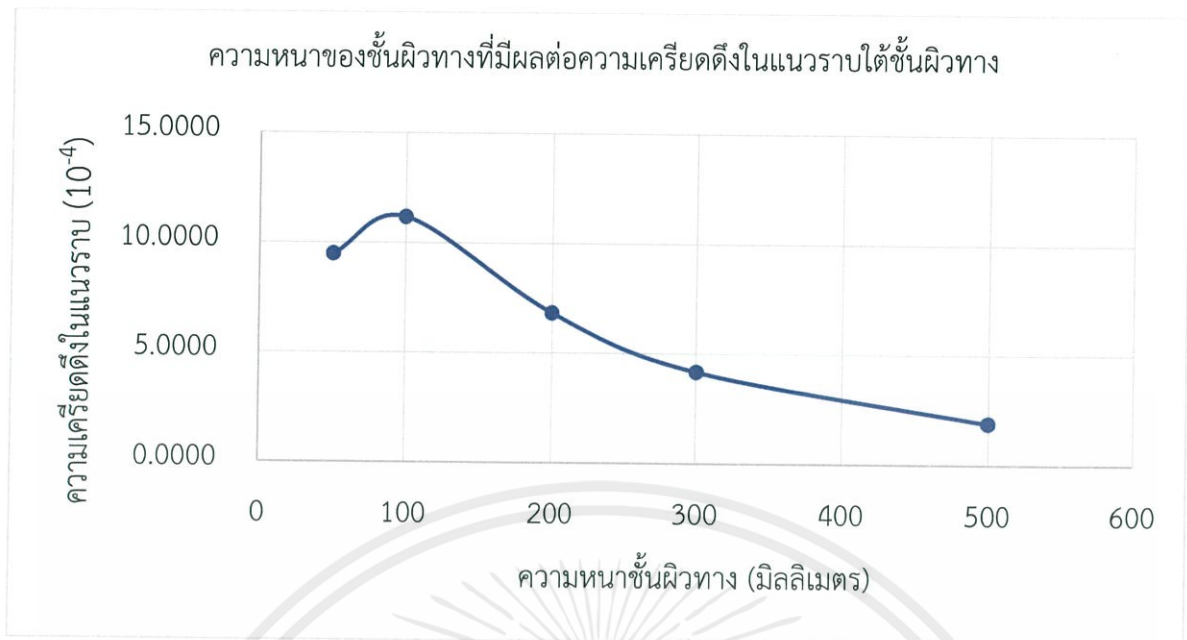
1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิมกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทาง
2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทางกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทาง

3.4.3 การวิเคราะห์ความเสียหายจะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในปีที่ 1 และ ปีที่ 20 มาลบกันแล้วนำมาสร้างกราฟค่าความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบของชั้นดินเดิมซึ่งมีระยะเวลาต่างกัน 20 ปี

ในขั้นตอนการประมวลผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ เป็นการจัดระเบียบข้อมูลในรูปแบบกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของข้อมูลจากกราฟ เพื่อให้สามารถเลือกผลลัพธ์ที่ตรงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยตัวอย่างการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟมีดังที่แสดงในกราฟที่ 3.1 และ กราฟที่ 3.2



กราฟที่ 3.1 แสดงค่าความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลกระทบต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง

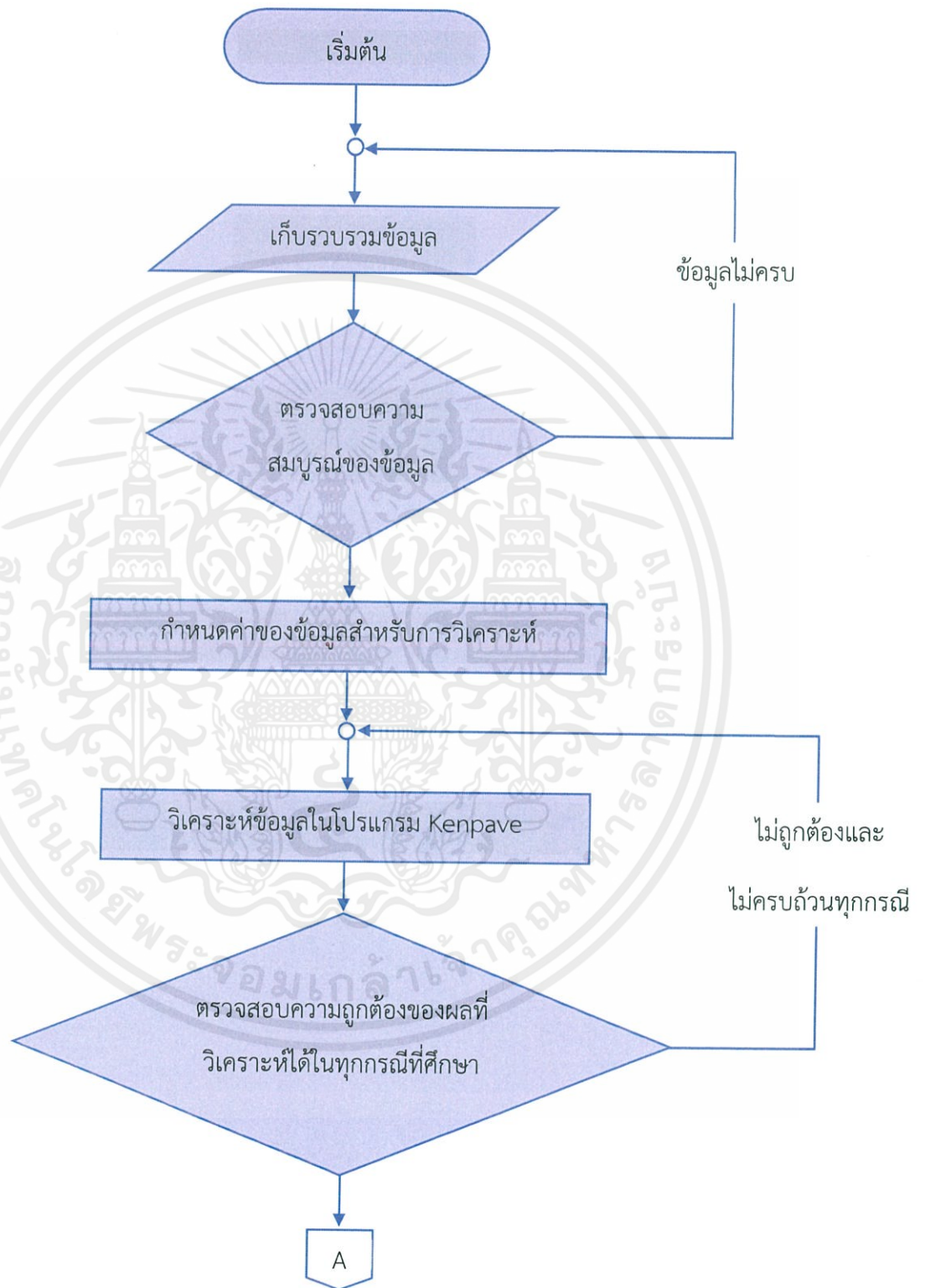


กราฟที่ 3.2 แสดงค่าความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลกระทบต่อความเครียดดึงในแนวราบ

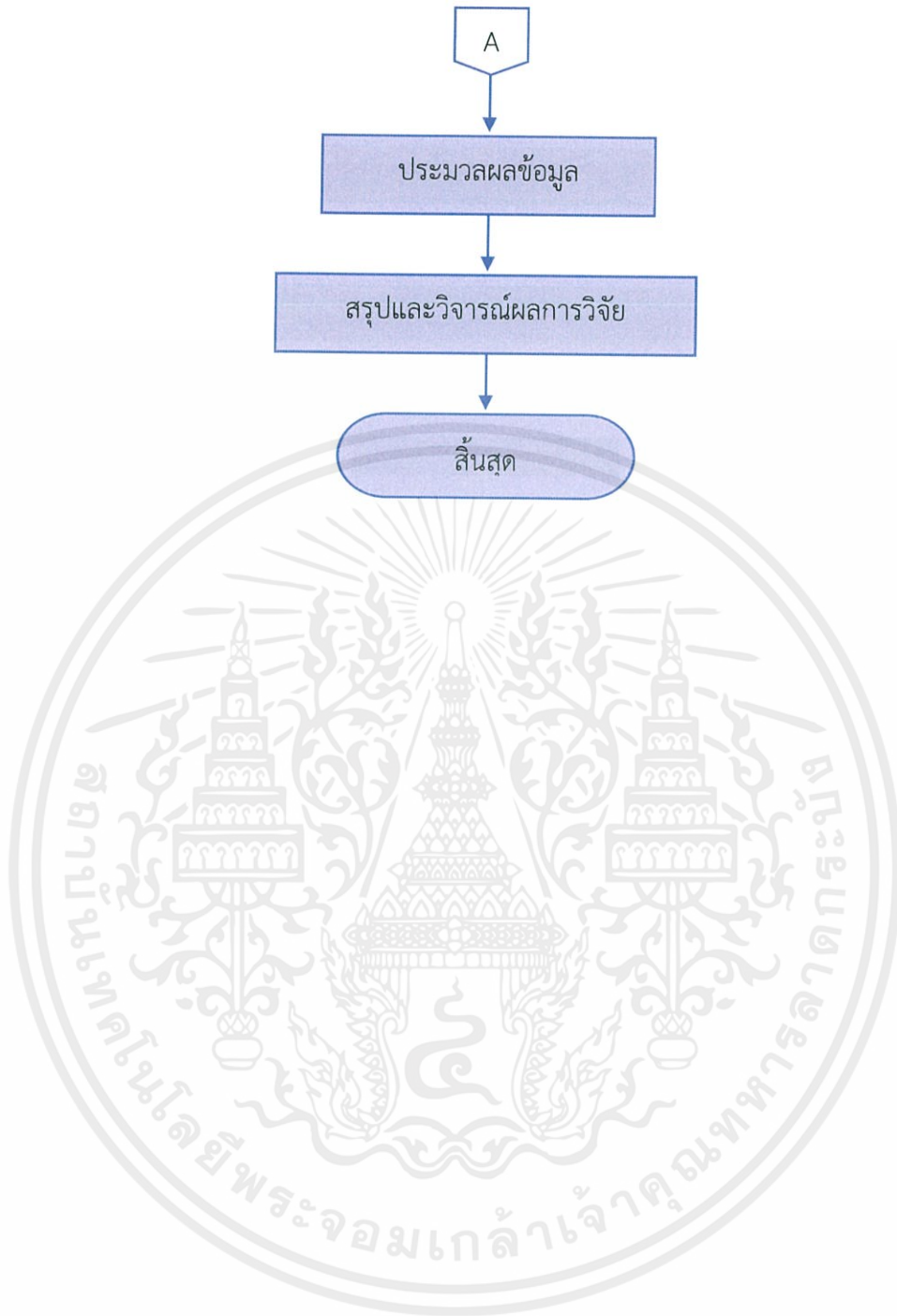
### 3.5 การสรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยเป็นขั้นตอนในการอธิบายผลลัพธ์ที่ผ่านการวิเคราะห์และการประมวลผลแล้ว โดยคณะผู้วิจัยจะทำการสรุปผลจากกราฟว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาที่โครงสร้างชั้นทางใด จะส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของความเครียดมากที่สุดและน้อยที่สุดตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทางชั้นใด จะส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของความเครียดมากที่สุดและน้อยที่สุดตามลำดับ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้สรุปผลนี้ไปใช้ประกอบการออกแบบ ความหนาของชั้นทางและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทาง

## แผนผังลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินการ	ระยะเวลาในการดำเนินการ 1/2561																			
	สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.การกำหนดหัวข้อการวิจัย																				
2.การกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขต																				
3.การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่																				
4.การเก็บรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่																				
5.วิเคราะห์ข้อมูล																				
6.ประมวลผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล																				
7.สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย																				
8.นำเสนอผลการวิจัย																				

ตารางที่ 3.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินการ 1/2561

ขั้นตอนการดำเนินการ	ระยะเวลาในการดำเนินการ 2/2561																			
	มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม				เมษายน				พฤษภาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.การกำหนดหัวข้อการวิจัย																				
2.การกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขต																				
3.การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่																				
4.การเก็บรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่																				
5.วิเคราะห์ข้อมูล																				
6.ประมวลผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล																				
7.สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย																				
8.นำเสนอผลการวิจัย																				

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) แสดงระยะเวลาในการดำเนินการ 2/2561

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการวิจัย

จากข้อมูลการออกแบบชั้นทาง ตามมาตรฐานกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคมของประเทศไทย ระบบชั้นทางที่ใช้ออกแบบถนนลาดยาง โดยทั่วไปจะเป็นแบบ ระบบชั้นทาง 4 ชั้น (Four Layers System) โดยโปรแกรมที่คณะผู้วิจัยได้ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลตามหัวข้อที่ 2.1 คือโปรแกรม KENPAVE ANALYSIS (Asphalt - KENLAYER) ซึ่งผลการวิจัยที่ได้มานั้นถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยความหนาของชั้นผิวทาง

- 1) การวิเคราะห์ความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม
- 2) การวิเคราะห์ความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง
- 3) การวิเคราะห์ความเสียหายที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบบนชั้นดินเดิมเมื่อเวลา

ผ่านไป 20 ปี

##### 4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นทาง

- 1) การวิเคราะห์ความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม
- 2) การวิเคราะห์ความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง

เพื่อชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและความหนาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทาง ในแต่ละชั้นทางมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงความเครียดที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Strain : VC) และความเครียดดึงในแนวระนาบ (Horizontal Tensile Strain : HT) ชุดที่ 1 – 10

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	50	5	5	15	20	69.50	0.00	9.50	0.00
						50	31.97	-54.00	8.72	-8.17
					50	50	20.62	-70.33	6.34	-33.29
						15	20	4.65	-93.31	1.91

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 1

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	50	50	5	15	20	32.60	0.00	9.29	0.00
						50	15.31	-53.04	9.29	0.00
					50	50	10.67	-67.27	7.08	-23.77
						15	20	2.69	-91.74	1.44

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 2

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	150	5	5	15	20	42.33	0.00	6.78	0.00
						50	16.79	-60.34	6.43	-5.12
					50	50	14.43	-65.91	6.34	-6.47
						15	20	3.95	-90.68	1.76

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 3

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT		
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%	
2500	150	150	50	5	15	20	23.15	0.00	7.40	0.00	
						50	9.71	-58.04	7.22	-2.42	
					50	15	20	8.17	-64.73	7.06	-4.53
							50	2.29	-90.13	1.36	-81.62

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 4

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT		
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%	
2500	150	150	150	5	15	20	14.97	0.00	7.48	0.00	
						50	6.41	-57.16	7.48	0.00	
					50	15	20	5.33	-64.41	7.31	-2.33
							50	1.59	-89.35	1.19	-84.04

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 5

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT		
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%	
2500	800	50	5	5	15	20	39.02	0.00	-1.61	0.00	
						50	23.37	-40.11	-1.16	-27.85	
					50	15	20	8.04	-79.40	-1.28	-20.31
							50	3.86	-90.11	1.35	-184.24

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 6

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT		
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%	
2500	800	50	50	5	15	20	32.60	0.00	9.29	0.00	
						50	15.31	-53.04	9.29	0.00	
					50	15	20	10.67	-67.27	7.08	-23.77
							50	1.57	-95.19	0.84	-90.98

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	800	150	50	5	15	20	15.37	0.00	-0.25	0.00
						50	7.57	-50.77	-0.04	-83.25
					20	50	4.19	-72.73	0.09	-136.30
						15	2.17	-85.88	0.96	-482.83

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 8

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	800	150	5	5	15	20	28.23	0.00	-1.54	0.00
						50	13.46	-52.32	-0.82	-46.70
					20	50	6.93	-75.45	-0.55	-64.28
						15	3.49	-87.62	1.25	-181.63

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 9

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	VC		HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	800	150	150	5	15	20	10.34	0.00	0.30	0.00
						50	5.04	-51.24	0.30	0.00
					20	50	2.98	-71.17	0.37	23.06
						15	1.57	-84.83	0.84	180.32

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาที่เปลี่ยนไปที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวระนาบ (Horizontal Tensile Strain : HT) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 20 ปี สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage Analysis) ชุดที่ 1 - 10

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	50	5	5	15	20	2.78	0.00
						50	0.93	-66.55
				50	15	20	0.59	-78.78
							1.60	-42.52

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 1

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	50	50	5	15	20	0.94	0.00
						50	0.31	-67.23
				50	15	20	0.16	-83.30
							0.58	-38.09

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 2

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
							Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	150	5	5	15	20	1.44	0.00
						50	0.45	-68.75
				50	15	20	0.37	-74.51
							1.21	-15.69

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm	cm	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	150	50	5	15	20	0.65	0.00
						50	0.17	-74.31
					50	20	0.13	-80.15
					15	20	0.57	-12.31

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 4

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm	cm	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	150	150	150	5	15	20	0.34	0.00
						50	0.08	-76.26
					50	20	0.06	-81.60
					15	20	0.30	-10.65

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 5

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm	cm	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	800	50	5	5	15	20	2.95	0.00
						50	1.47	-50.17
					50	20	0.43	-85.29
					15	20	0.99	-66.34

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 6

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm	cm	Strain ( $10^{-4}$ )	%
2500	800	50	50	5	15	20	0.86	0.00
						50	0.48	-44.16
					50	20	0.13	-84.70
					15	20	0.40	-53.74

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
							MPa	MPa
2500	800	150	5	5	15	20	1.81	0.00
						50	0.67	-62.87
					50	20	0.35	-80.66
					15	20	0.84	-53.37

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 8

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
							MPa	MPa
2500	800	150	50	5	15	20	0.72	0.00
						50	-0.31	-56.64
					50	20	0.14	-81.12
					15	20	0.43	-39.86

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 9

E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	HT	
							MPa	MPa
2500	800	150	150	5	15	20	0.34	0.00
						50	0.16	-53.85
					50	20	0.06	-81.66
					15	20	0.24	-29.59

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดในการวิเคราะห์ความเสียหายชุดที่ 10

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Strain : VC) และความเครียดดึงในแนวระนาบ (Horizontal Tensile Strain : HT) ชุดที่ 1 – 8

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT	
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%
5	15	20	2500	150	50	5	69.50	0.00	9.50	0.00
						50	32.60	-53.09	9.29	-2.21
				150	42.33	-39.09	6.78	-28.60		
			800	50	5	39.02	-43.86	-1.61	-116.90	
			2000		150	50	71.05	2.23	8.84	-6.95
			3000		150	50	68.19	-1.88	9.83	3.52

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 1

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT	
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%
5	15	50	2500	150	50	5	31.97	0.00	8.72	0.00
						50	15.31	-52.11	9.29	6.49
				150	16.79	-47.48	6.43	-26.23		
			800	50	5	23.37	-26.90	-1.16	-113.28	
			2000		150	50	32.46	1.53	8.25	-5.37
			3000		150	50	31.57	-1.25	8.94	2.55

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 2

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT		
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%	
5	50	20	2500	150	50	5	5	20.62	0.00	6.34	0.00
							50	10.67	-48.25	7.08	11.74
				150	5	14.43	-30.02	6.34	0.09		
			800	150	50	5	8.04	-61.02	-1.28	-120.19	
			2000				20.92	1.45	5.95	-6.06	
			3000				20.39	-1.12	6.53	3.00	

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 3

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT		
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%	
5	50	50	2500	150	50	5	5	12.50	0.00	6.48	0.00
							50	6.24	-50.09	7.08	9.29
				150	5	7.71	-38.31	6.57	1.39		
			800	150	50	5	6.35	-49.22	-0.53	-108.15	
			2000				12.70	1.60	6.16	-4.89	
			3000				12.36	-1.12	6.62	2.21	

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 4

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT		
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%	
50	15	20	2500	150	50	5	5	4.65	0.00	1.91	0.00
							50	2.69	-42.05	1.44	-24.45
				150	5	3.95	-15.09	1.76	-7.50		
			800	150	50	5	3.86	-16.94	1.35	-29.07	
			2000				5.43	16.85	2.25	18.05	
			3000				4.07	-12.35	1.66	-13.06	

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT		
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%	
50	15	50	2500	150	50	5	5	3.95	0.00	1.78	0.00
							50	2.02	-48.86	1.44	-19.06
							150	3.03	-23.41	1.52	-14.50
			2000	150	50	5	800	3.37	-14.75	1.27	-28.56
							2000	4.50	13.82	2.08	17.03
							3000	3.54	-10.53	1.56	-12.54

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 6

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT		
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%	
50	50	20	2500	150	50	5	5	3.69	0.00	1.57	0.00
							50	2.00	-45.86	1.31	-16.42
							150	2.96	-19.81	1.49	-5.28
			2000	150	50	5	800	2.09	-43.36	0.75	-52.16
							2000	4.12	11.72	1.81	15.28
							3000	3.35	-9.20	1.39	-11.52

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 7

T1	T2	T3	E1	E2	E3	E4	VC		HT		
cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	strain ( $10^{-4}$ )	%	strain ( $10^{-4}$ )	%	
50	50	50	2500	150	50	5	5	3.07	0.00	1.49	0.00
							50	1.56	-49.15	1.31	-12.12
							150	2.21	-27.87	1.36	-9.04
			2000	150	50	5	800	1.86	-39.44	0.73	-50.82
							2000	3.37	9.68	1.72	15.13
							3000	2.83	-7.76	1.33	-11.31

ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดชุดที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในการออกแบบนั้นจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในแต่ละชั้นทาง ทางคณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบไว้เพื่อให้เป็นแนวทางในการแนะนำให้แก่วิศวกรที่ทำงานในด้านการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง โดยจัดแบ่งตามความเหมาะสมเป็น 3 ประเภทได้ดังนี้

1.การวิเคราะห์ด้วยความหนาของชั้นผิวทาง ทั้งสิ้น 40 กรณี ดังนี้

Case	E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3
	MPa	MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm
1	2500	800	50	5	5-50	15	20
2							50
3						50	20
4							50
5						15	20
6							50
7						50	20
8							50
9						15	20
10							50
11						50	20
12							50
13						15	20
14							50
15						50	20
16							50
17						15	20
18							50
19						50	20
20							50

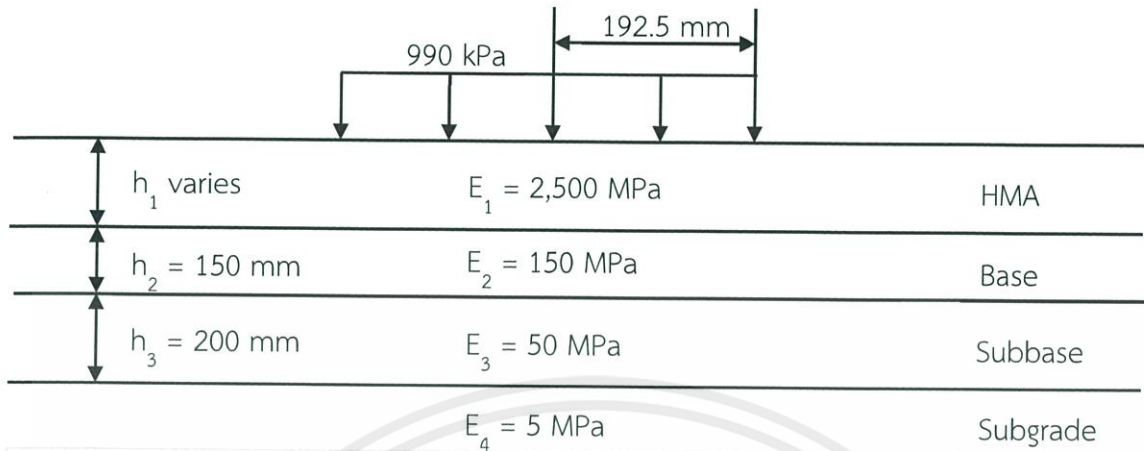
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case	E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3				
	MPa	MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm				
21	2500	150	150		5-50	15	20				
22							50				
23						50	20				
24							50				
25						15	20				
26							50				
27						50	50	50			
28							20				
29						800	150			15	20
30						50					
31		150	150	150	150	50	20				
32		50	150	150	150	50	50				
33		150	150	150	150	15	20				
34		150	150	150	150	15	50				
35		150	150	150	150	50	20				
36		150	150	150	150	50	50				
37		150	150	150	150	15	20				
38		800	150	150	150	15	50				
39		800	150	150	150	50	20				
40		800	150	150	150	50	50				

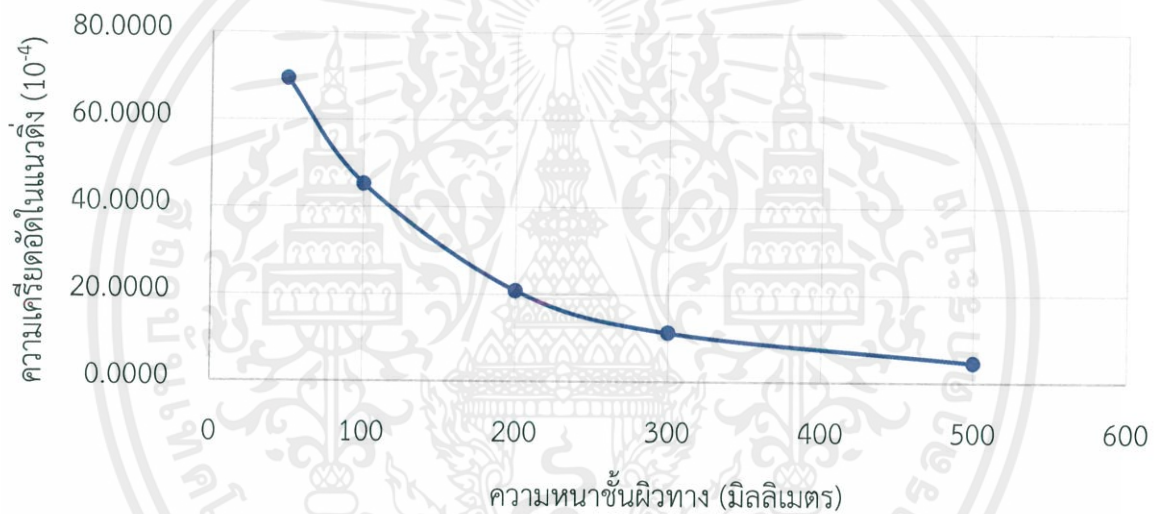
ตารางที่ 4.4 แสดงการออกแบบกรณีศึกษาความหนาที่มีผลต่อความเครียดสำหรับโครงสร้างชั้นทาง  
หยุนต์ัว 40 กรณี

โดยในแต่ละกรณีนั้นจะมีการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวทางกับความเครียด  
อัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวทางกับความเครียดดึงใน  
แนวราบใต้ชั้นผิวทาง ดังตัวอย่างเช่น

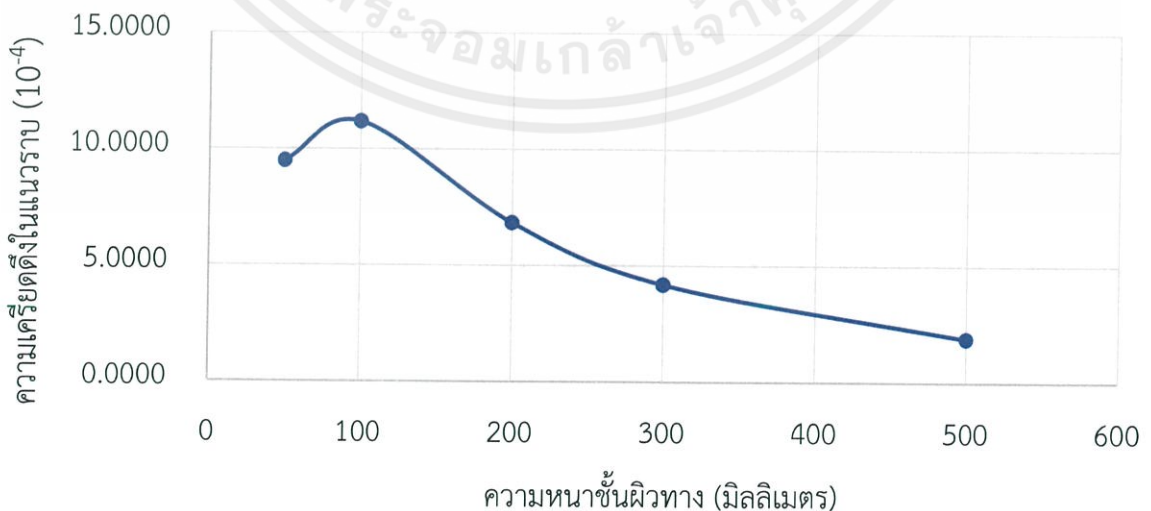
## กรณีที่ 1



ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



2.การวิเคราะห์ความเสียหายเมื่อเวลาผ่านไป 20 ปี ทั้งสิ้น 40 กรณี ดังนี้

Case	E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3
	MPa	MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm
1	2500	150	50	5	5-50	15	20
2						50	
3						20	
4						50	
5			15			20	
6			50				
7			150			20	
8			50			50	
9			15			20	
10			50			50	
11		800	50	20			
12		50	50				
13		15	20				
14		150	50				
15		20					
16		50	50				
17		15	20				
18		150	50	50		50	
19		20					
20		50	50				

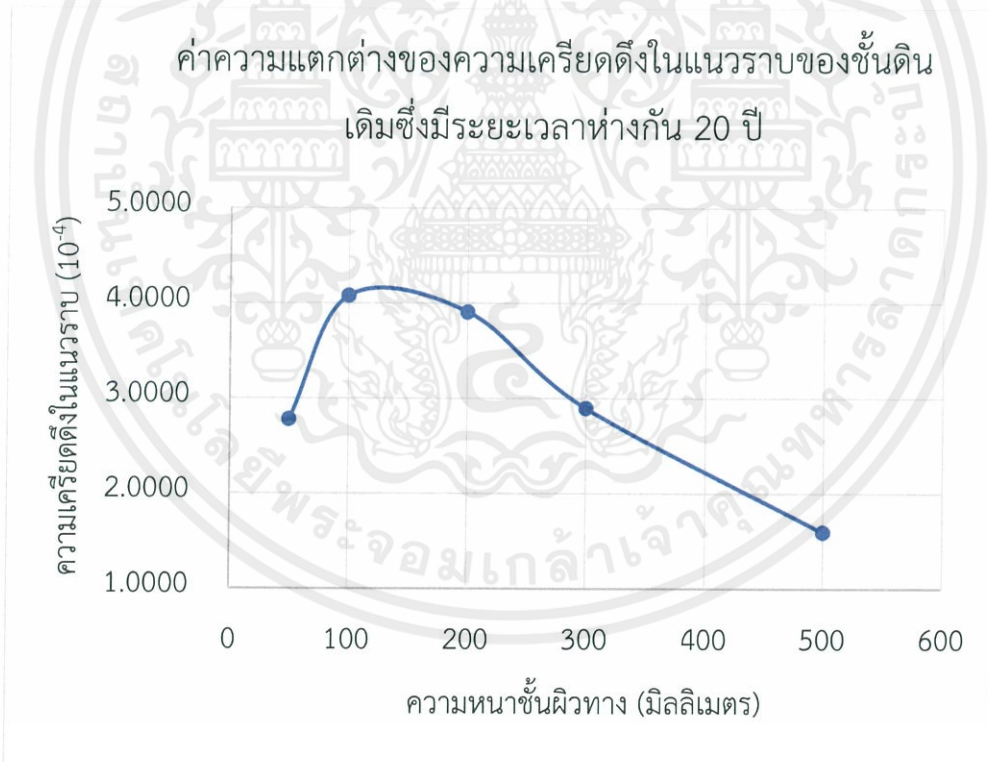
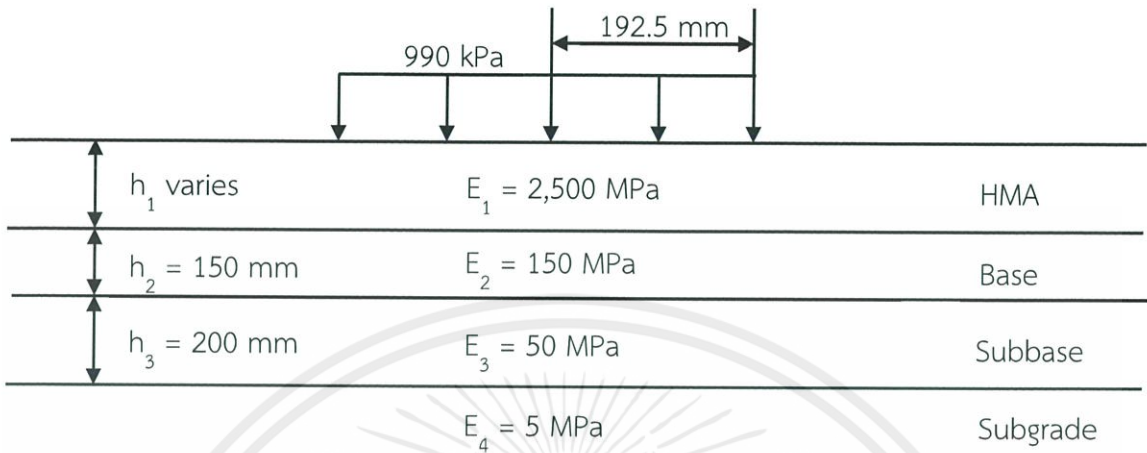
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case	E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3
	MPa	MPa	MPa	MPa	cm	cm	cm
21	2500	150	150	50	5-50	15	20
22						50	
23						20	
24						50	
25						15	20
26						50	
27						20	
28						50	
29						15	20
30						50	
31		20					
32		50					
33		15	20				
34		50					
35		20					
36		50					
37		15	20				
38		50					
39		20					
40		50					

ตารางที่ 4.5 แสดงการออกแบบกรณีศึกษาความหนาที่มีผลต่อความเครียดสำหรับโครงสร้างชั้นทาง  
หยุดตัวโดยการวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage Analysis) เมื่อเวลาผ่านไป 20 ปี ทั้งสิ้น 40 กรณี

โดยในแต่ละกรณีนั้นจะมีการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวทางกับความเครียด  
ดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทางที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 20 ปี ดังตัวอย่างเช่น

## กรณีที่ 1



กราฟที่ 1 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

3.การวิเคราะห์ด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุชั้นผิวทาง ทั้งสิ้น 40 กรณี ดังนี้

Case	E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3	
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	cm	cm	cm	
1	2000-3000	150	50	5	5,30,50	15	20	
2						50		
3						50	20	
4						50	50	
5						15	20	
6						15	50	
7						50	20	
8						50	50	
9						15	20	
10						15	50	
11			50	20				
12			50	50				
13			800	20				
14			15	50				
15			150	20				
16			50	50				
17			15	20				
18			150	50		50	15	50
19			50	20				
20			50	50				

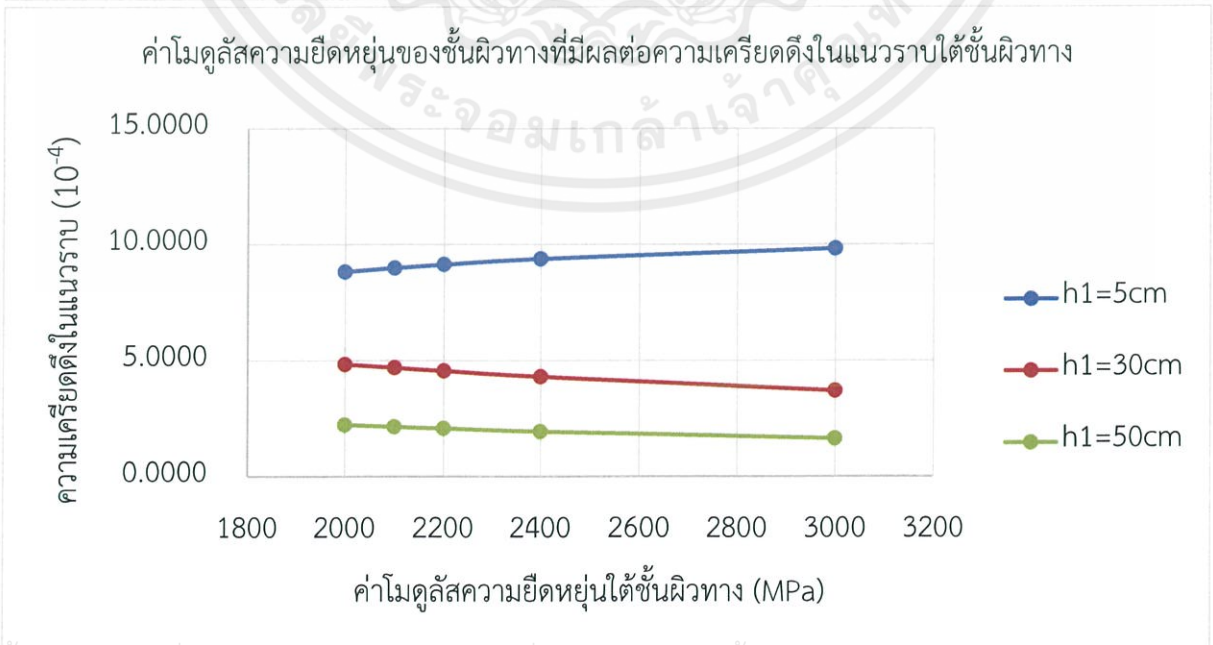
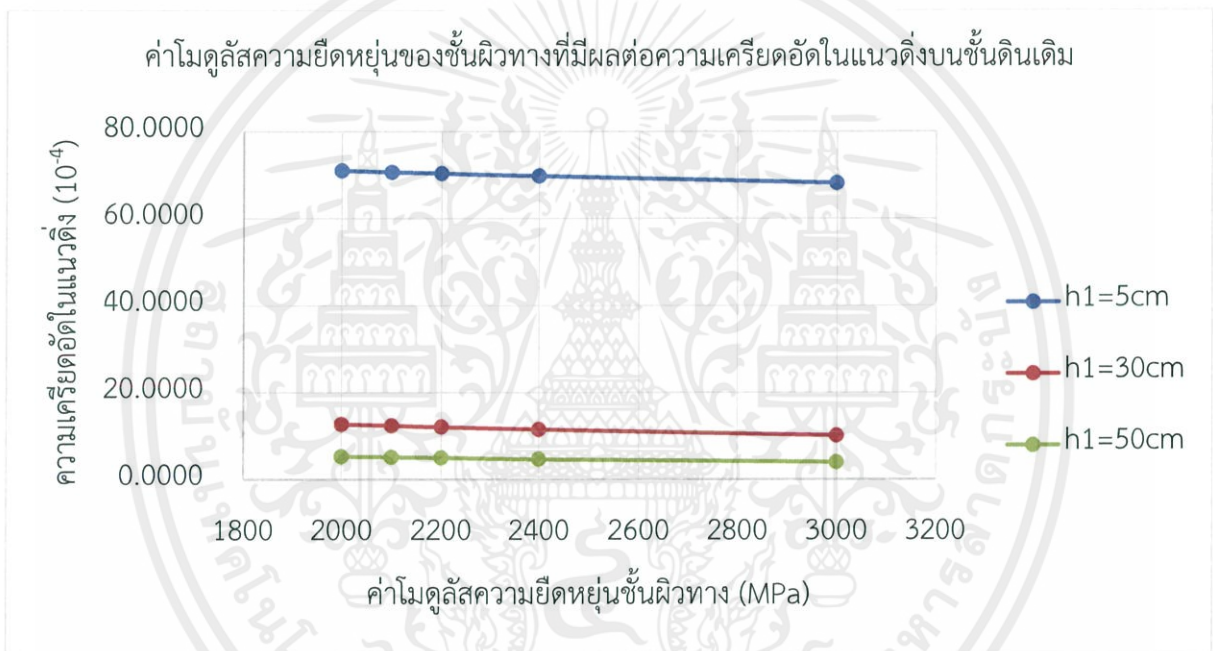
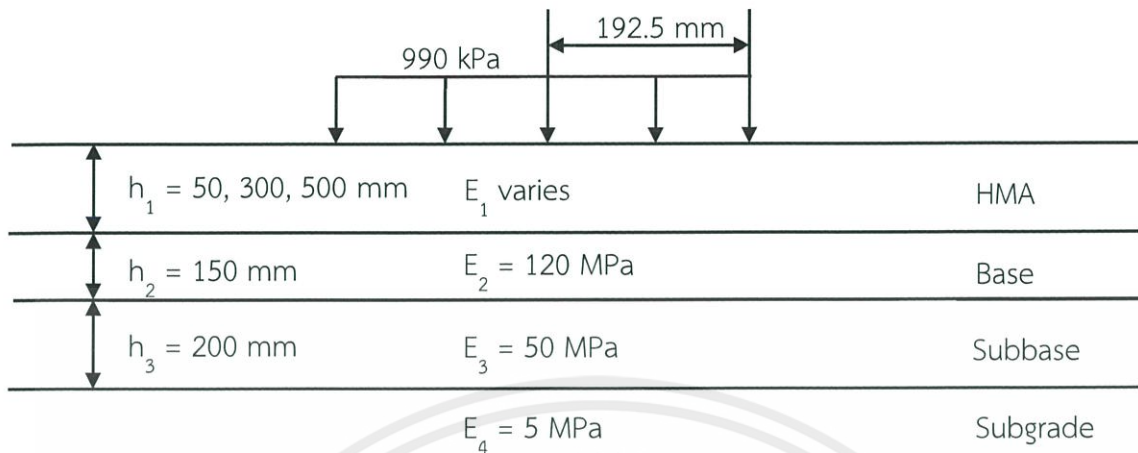
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case	E1	E2	E3	E4	T1	T2	T3					
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	cm	cm	cm					
21	2000-3000	150	150		5,30,50	15	20					
22							50					
23						50	20					
24							50					
25						800				15	20	
26											50	
27											50	50
28											50	20
29												50
30							15	20				
31		50										
32		150					50	20				
33								20				
34								50				
35						20						
36			150	150	150		50	50				
37								20				
38				800				15	50			
39									20			
40		50	50									

ตารางที่ 4.6 แสดงการออกแบบกรณีศึกษาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดสำหรับโครงสร้างชั้นทางหยุ่นตัว 40 กรณี

โดยในแต่ละกรณีนั้นจะมีการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทางกับความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทางกับความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง ดังตัวอย่างเช่น

## กรณีที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

### 4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยความหนาชั้นทาง

การเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Strain : VC) ในแต่ละชุดข้อมูลมีการเปลี่ยนความหนาของแต่ละชั้นทางที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้งจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้

ชุดที่	ผลกระทบต่อความหนาต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง		
	มากที่สุด	→	น้อยที่สุด
1	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
2	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
3	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
4	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
5	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
6	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
7	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
8	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
9	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
10	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง

ตารางที่ 4.7 แสดงความหนาของชั้นทางที่มีผลกระทบต่อความเครียดอัดในแนวตั้งจากมากไปน้อย

การเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ (Horizontal Tensile Strain : HT) ในแต่ละชุดข้อมูลมีการเปลี่ยนความหนาของแต่ละชั้นทางที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวราบจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้

ชุดที่	ผลกระทบต่อความหนาต่อความเครียดดึงในแนวราบ		
	มากที่สุด	→	น้อยที่สุด
1	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
2	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
3	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
4	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
5	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
6	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
7	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
8	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
9	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง
10	ชั้นผิวทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง

ตารางที่ 4.8 แสดงความหนาของชั้นทางที่มีผลกระทบต่อความเครียดดึงในแนวราบจากมากไปน้อย

การเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ (Horizontal Tensile Strain : HT) เมื่อเวลาผ่านไป 20 ปี สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage Analysis) ในแต่ละชุดข้อมูลมีการเปลี่ยนความหนาของแต่ละชั้นทางที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวราบจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้

ชุดที่	ผลกระทบความหนาต่อความเครียดดึงในแนวราบ		
	มากที่สุด	→	น้อยที่สุด
1	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
2	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
3	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
4	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
5	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
6	ชั้นพื้นทาง	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
7	ชั้นพื้นทาง	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
8	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
9	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
10	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง

ตารางที่ 4.9 แสดงความหนาของชั้นทางที่มีผลกระทบต่อความเครียดดึงในแนวราบจากมากไปน้อย สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage Analysis)

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นทาง

การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Strain : VC) ในแต่ละชุดข้อมูลมีการเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของแต่ละชั้นทางที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้งจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้

ชุดที่	ผลกระทบต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง			
	มากที่สุด	→		น้อยที่สุด
1	ชั้นดินเดิม	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
2	ชั้นดินเดิม	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
3	ชั้นพื้นทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
4	ชั้นดินเดิม	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
5	ชั้นดินเดิม	ชั้นพื้นทาง	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
6	ชั้นดินเดิม	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
7	ชั้นดินเดิม	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง
8	ชั้นดินเดิม	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นทางที่มีผลกระทบต่อความเครียดอัดในแนวตั้งจากมากไปน้อย

การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ (Horizontal Tensile Strain : HT) ในแต่ละชุดข้อมูลมีการเปลี่ยนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของแต่ละชั้นทางที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวราบจาก มากที่สุดไปน้อยที่สุดตามลำดับดังนี้

ชุดที่	ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อความเครียดดึงในแนวราบ			
	มากที่สุด	→		น้อยที่สุด
1	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นผิวทาง	ชั้นดินเดิม
2	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นผิวทาง
3	ชั้นพื้นทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
4	ชั้นพื้นทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
5	ชั้นพื้นทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
6	ชั้นพื้นทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
7	ชั้นพื้นทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นผิวทาง	ชั้นรองพื้นทาง
8	ชั้นพื้นทาง	ชั้นผิวทาง	ชั้นดินเดิม	ชั้นรองพื้นทาง

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นทางที่มีผลกระทบต่อความเครียดดึงในแนวราบจาก มากไปน้อย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางหยุดตัว ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลช่วงความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่แนะนำสำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย จากสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ หน่วยงานสังกัดกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ซึ่งมีหน้าที่ดำเนินการศึกษา พัฒนา จัดทำข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ วิธีการทดสอบวัสดุ และการปฏิบัติงานก่อสร้างและบำรุงรักษาทางออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง และเสนอปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ใช้กับงานทาง โดยมีข้อมูลดังนี้

Pavement Layers	Thickness	E-modulus
	Minimum - Maximum (mm.)	Minimum - Maximum (MPa)
Surface Layer	50 - 500	2000 - 3000
Base Layer	150 - 500	150 - 800
Subbase Layer	200 - 500	50 - 150
Subgrade Layer	-	5 - 150

ตารางที่ 5.1 ค่าความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในแต่ละชั้นทาง

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม KENPAVE ANALYSIS (Asphalt - KENLAYER) ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางอยู่ 2 ตัวแปร ดังนี้

##### 1. การวิเคราะห์ด้วยความหนาของชั้นทาง

การวิเคราะห์ด้วยความหนาของชั้นทางที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Strain) และความเครียดดึงในแนวระนาบ (Horizontal Tensile Strain) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูล พบว่าความหนาชั้นผิวทาง (Surface Layer) มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้ง และความเครียดดึงในแนวระนาบมากที่สุด และความหนาชั้นรองพื้นทาง (Subbase Layer) มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้ง และความเครียดดึงในแนวระนาบน้อยที่สุด

ในส่วนของความหนาของชั้นทางที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวระนาบ เมื่อเวลาผ่านไป 20 ปี สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage Analysis) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูล พบว่าความหนาชั้นพื้นทาง (Base Layer) มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวระนาบมากที่สุด และความหนาชั้นผิวทาง (Surface Layer) ส่วนใหญ่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวระนาบน้อยที่สุด

## 2. การวิเคราะห์ด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทาง

การวิเคราะห์ด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทาง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้ง (Vertical Compressive Strain) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูล พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นดินเดิม (Subgrade Layer) ส่วนใหญ่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้งมากที่สุด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทาง (Surface Layer) ส่วนใหญ่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดในแนวตั้งน้อยที่สุด ส่วนการวิเคราะห์ด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทาง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวระนาบ (Horizontal Tensile Strain) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูล พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นพื้นทาง (Base Layer) มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวระนาบ มากที่สุด และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นรองพื้นทาง (Subbase Layer) ส่วนใหญ่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงในแนวระนาบน้อยที่สุด

## 3. การออกแบบเพื่อเป็นแนวทางในงานก่อสร้างโครงสร้างชั้นทาง

การออกแบบโครงสร้างชั้นทางนั้นสามารถทำการออกแบบได้หลากหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบนั้นก็ให้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นทางแต่ละชั้นที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการเกิดการวิบัติในชั้นทาง เช่น การเกิดร่องตามแนวล้อบนผิวทาง (Rutting) และเกิดรอยแตกร้าวในโครงสร้างชั้นทาง (Fatigue Cracking) จากการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดภายในโครงสร้างชั้นทางด้วยโปรแกรม KENPAVE ANALYSIS (Asphalt - KENLAYER) โดยใช้ทฤษฎีของ Boussinesq เพื่อตรวจสอบกราฟเส้นโค้งที่สร้างโดยโปรแกรม KENPAVE จะได้กราฟความสัมพันธ์ของข้อมูลอยู่ 5 กลุ่ม ดังนี้

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม
2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง
3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม
4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กราฟแสดงค่าความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบของชั้นดินเดิมซึ่งมีระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

เพื่อเป็นแนวทางแนะนำให้แก่องค์กรหรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางและวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างชั้นทางสามารถนำกราฟที่กล่าวมาแล้วข้างต้นไปประกอบการพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางเพื่อให้ได้ความหนาและวัสดุสำหรับการก่อสร้างชั้นทางที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน และสามารถลดภาระค่าบำรุงรักษาซ่อมแซมในอนาคตได้ ตลอดจนสามารถรองรับการขยายตัวของระบบโครงข่ายการคมนาคมทางถนนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในหัวข้อการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสำหรับการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์โดยใช้ความหนาดำสุดและความหนาสูงสุด ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำสุดและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุดของแต่ละชั้น ที่แนะนำโดยสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง จึงมีข้อเสนอแนะว่าควรมีการศึกษาวิเคราะห์ต่อยอดเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถเจาะจงหรือระบุค่าความหนาและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการก่อสร้างถนนลาดยางในประเทศไทย เพื่อให้เป็นมาตรฐานและช่วยอำนวยความสะดวกหรือลดระยะเวลาในขั้นตอนการออกแบบของวิศวกรลงได้

## บรรณานุกรม

ชยันต์ เจริญพรหม และคณะ. 2542 , รายงานฉบับที่ วพ.171, ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

ธีระชาติ รีนไกรฤกษ์. 2538 , “ค่าอัตราส่วนบิวของส์ของดินคันทาง” , การออกแบบโครงสร้าง ถนนลาดยาง, ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางกรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.

บริษัท ไอเอ็มเอ็มเอส จำกัด. 2548 , งานบริการที่ปรึกษาการศึกษาผลกระทบน้ำหน้กบรรทุกที่มีต่ออายุการใช้งานของชั้นทางหุ่่นตัวและผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์, กรมทางหลวงชนบท, กรุงเทพมหานคร.

HUANG, Y. H., 2004, *Pavement Analysis and Design 2<sup>nd</sup> ed*, Prentice Hall, New Jercey.

PORANIC JITAREEKUL, YONGYUTH TAESIRI. 2002, *An Engineering*

*Manual for Highway Pavement Design*, Road and Pavement Design Branch, Department of Highways, Bangkok.

Robert A. Douglas, W.D.H. Woodward, and A.R. 2000, “WoodsideRoad contact stresses and forces under tires with low inflation pressure”, *Canadian Journal of Civil Engineering*,27(6) pp.1248-1258.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

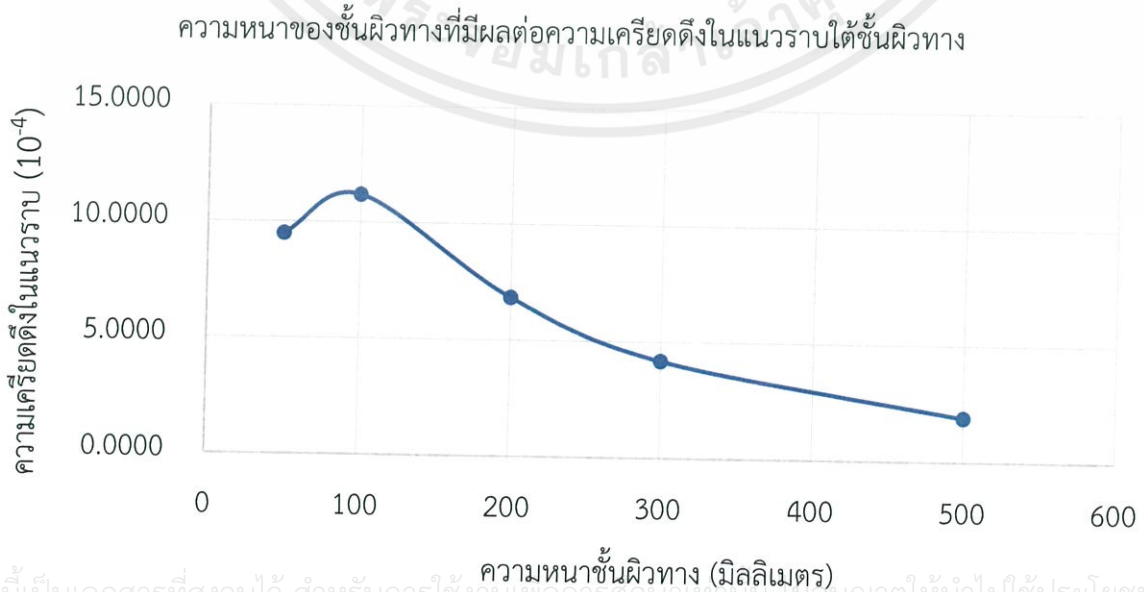
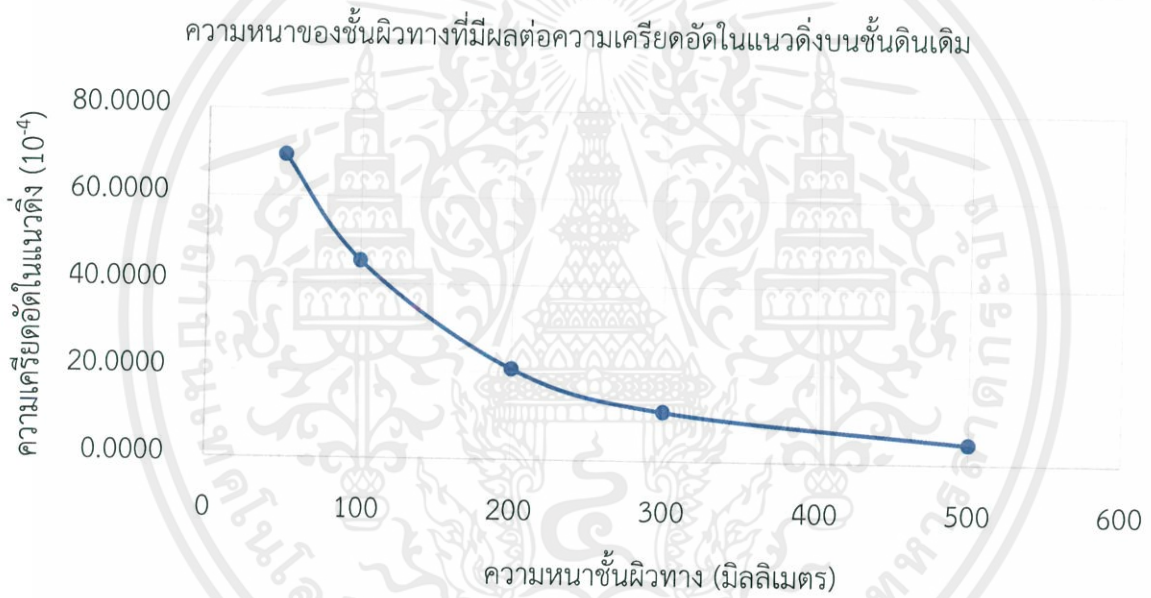
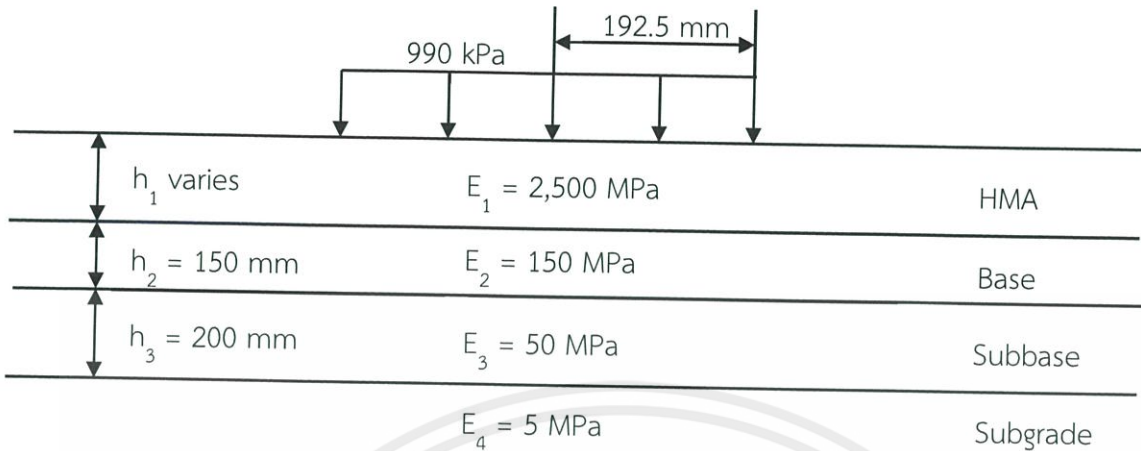


การวิเคราะห์ความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม และการวิเคราะห์ความเครียดดึง  
ในแนวราบใต้ชั้นผิวทางพิจารณาด้วยความหนาชั้นผิวทาง

(Vertical Compressive Strain Analysis on Top of Subgrade And  
Horizontal Tensile Strain Analysis under Bottom of Surface by using thickness  
of Surface Layer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

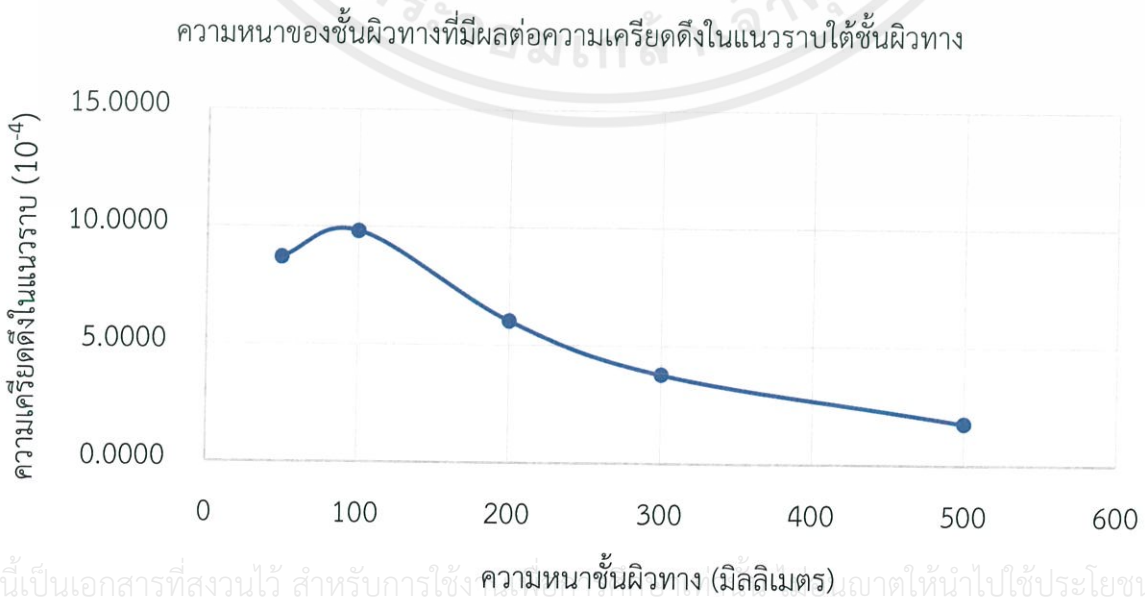
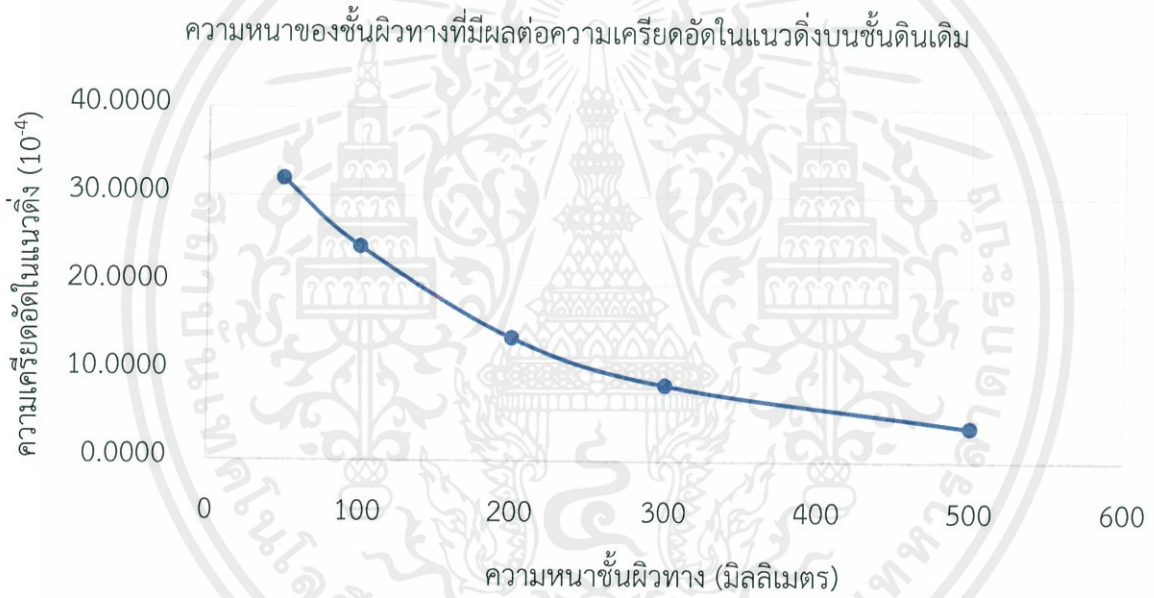
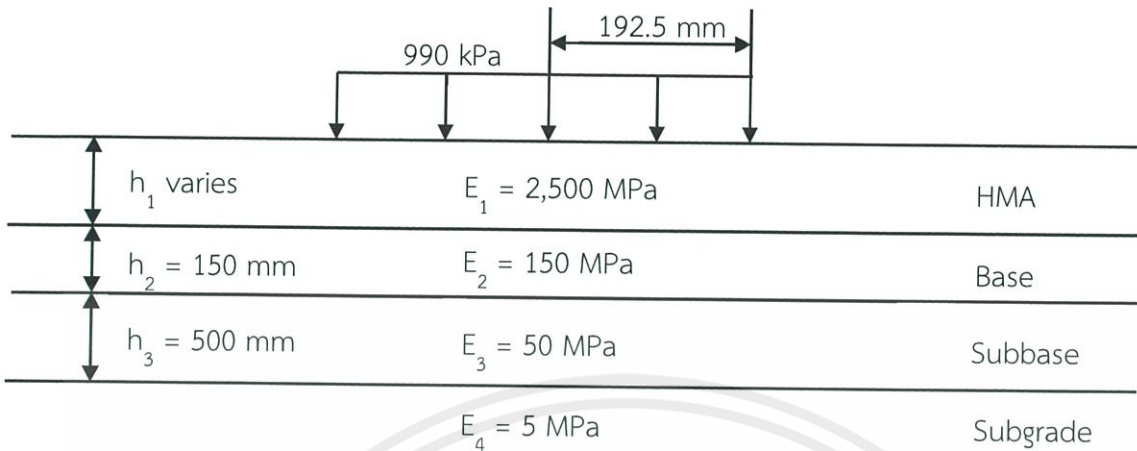
# กรณีศึกษาที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

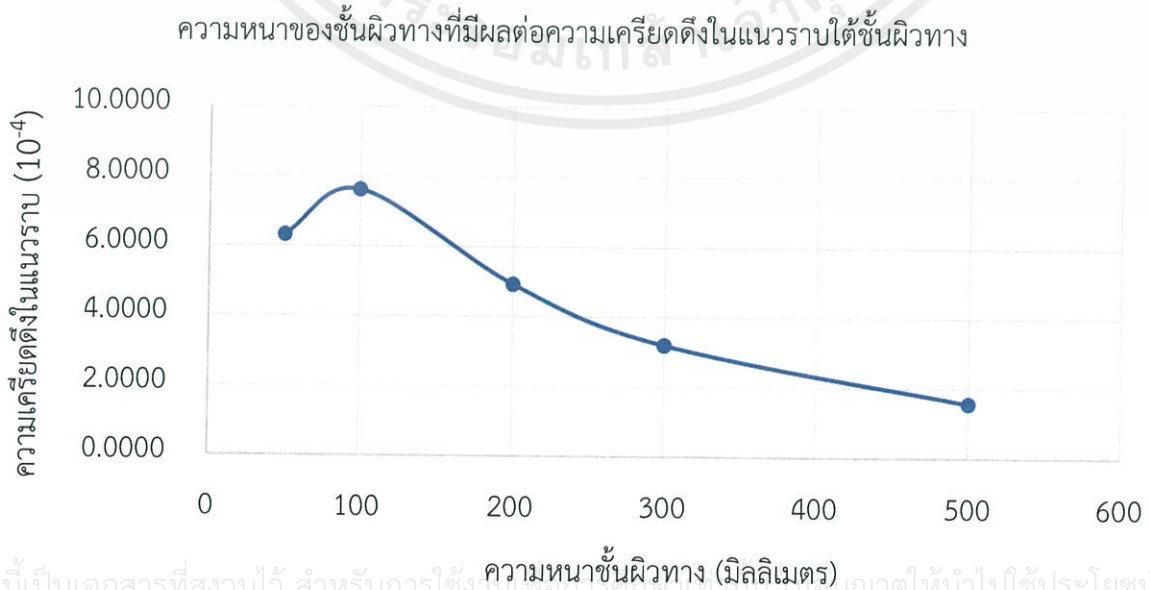
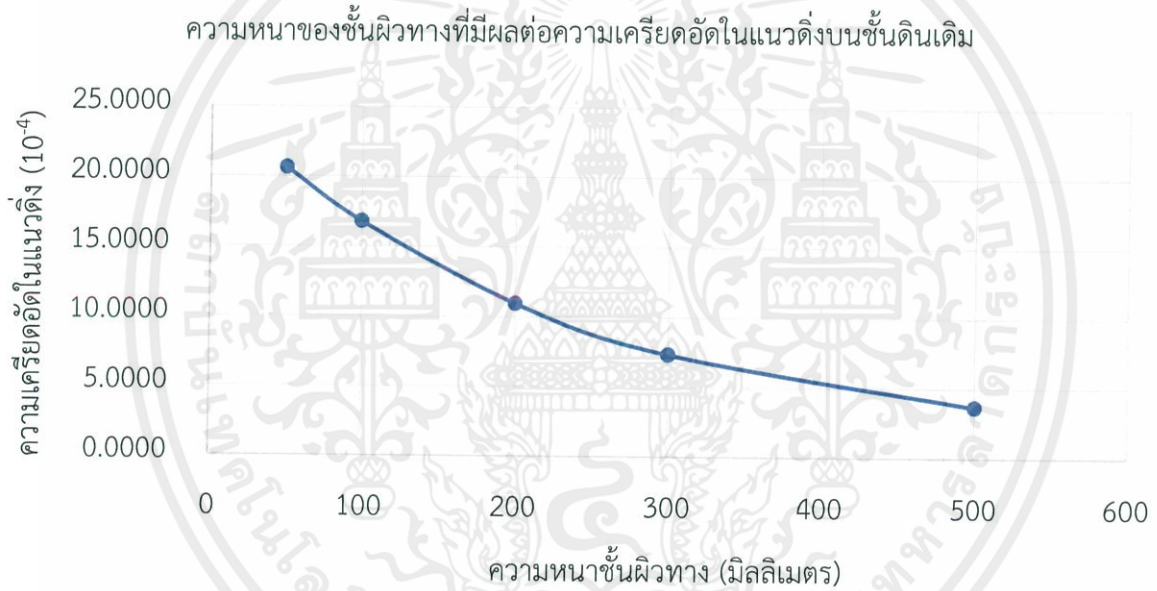
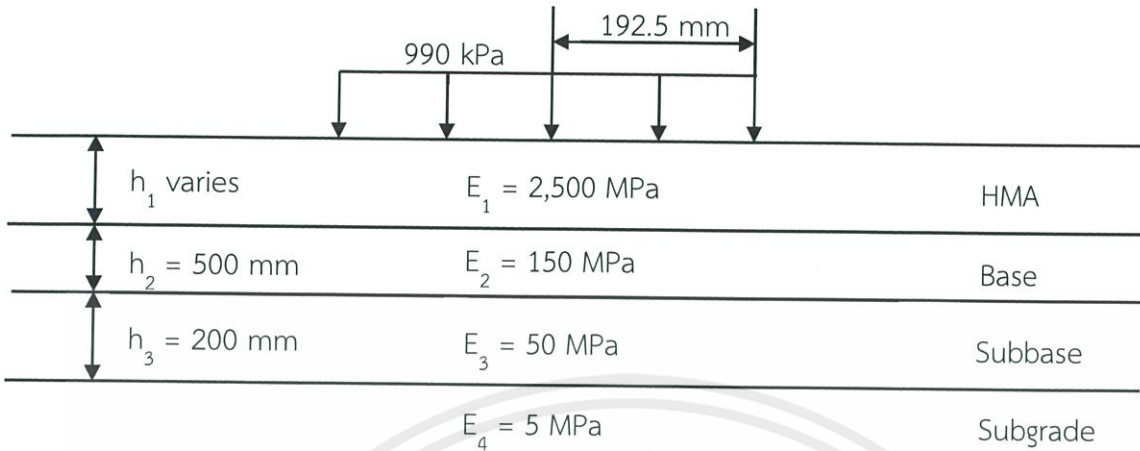
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 2



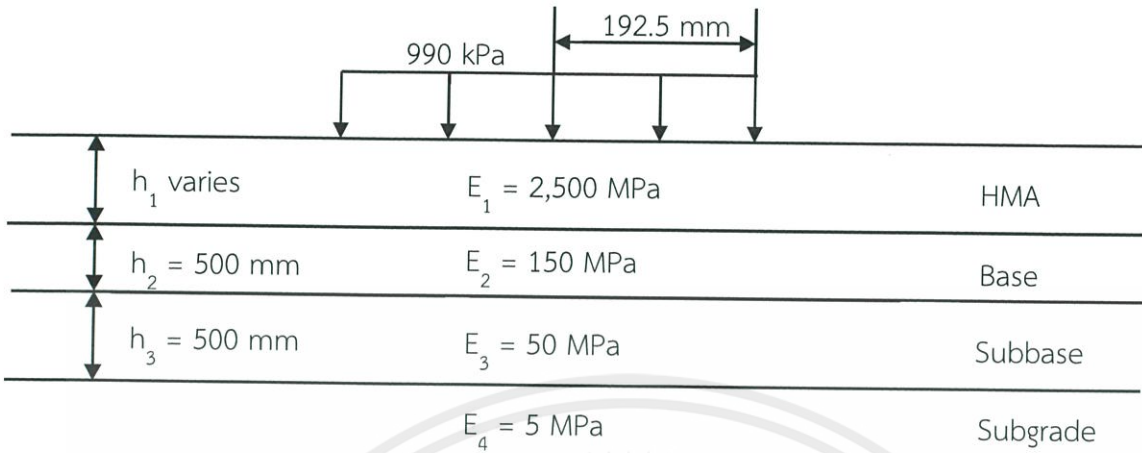
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีศึกษาที่ 3

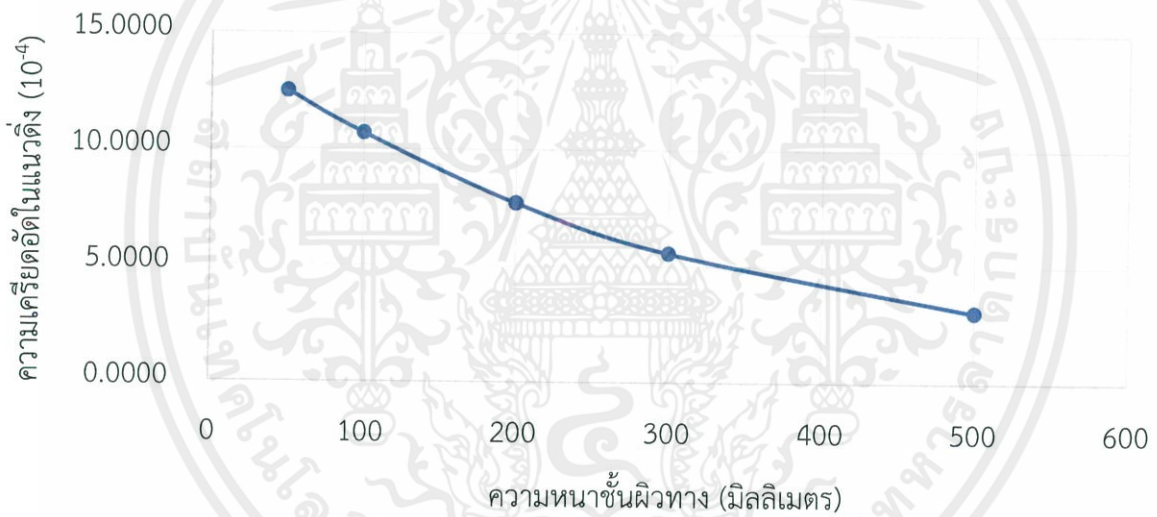


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

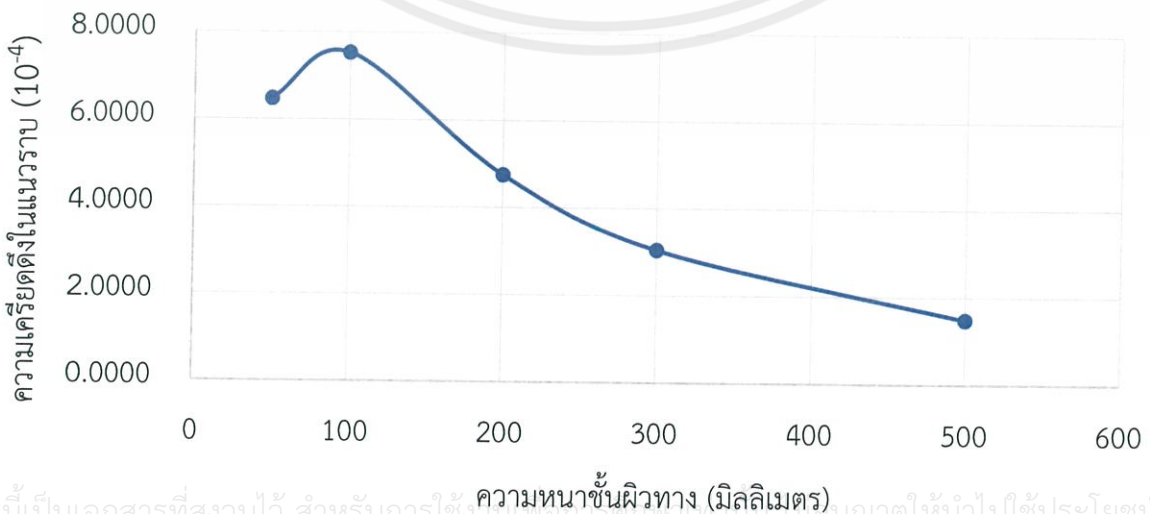
### กรณีศึกษาที่ 4



ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



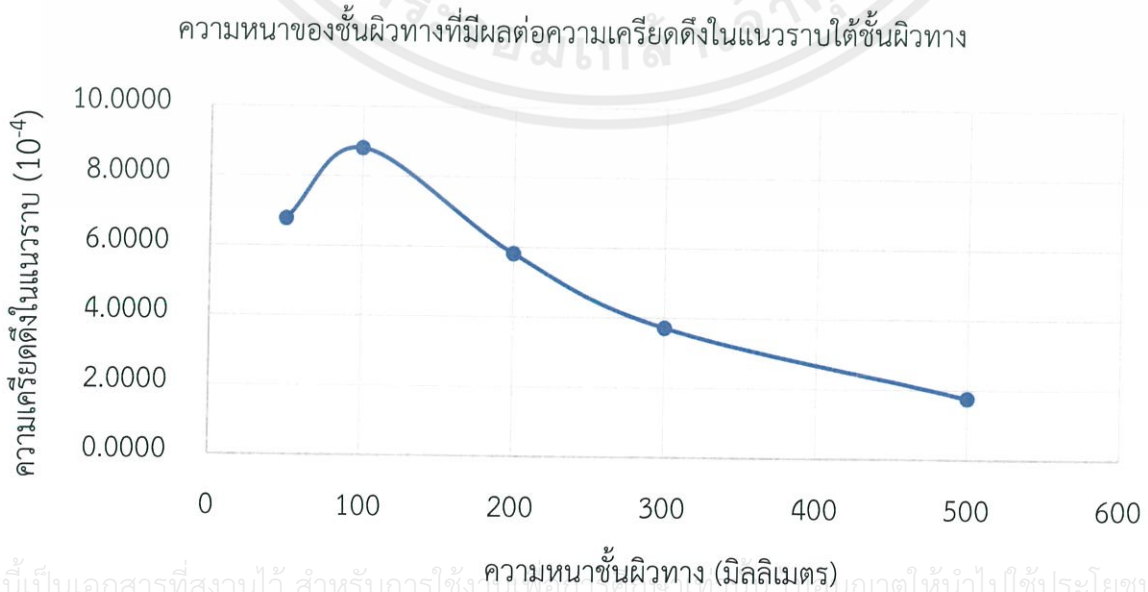
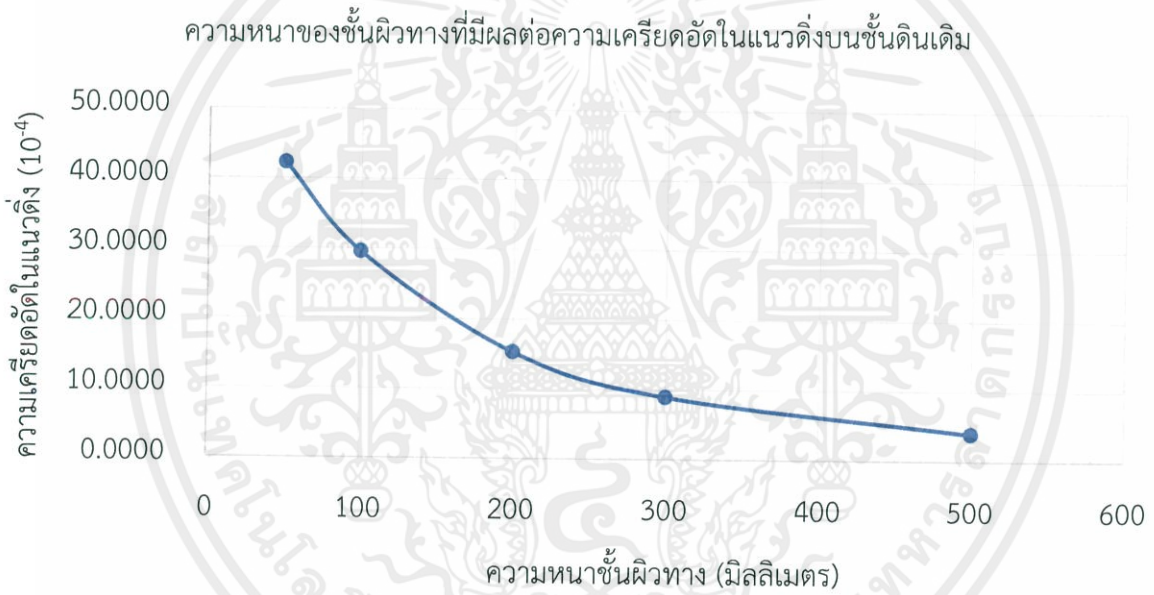
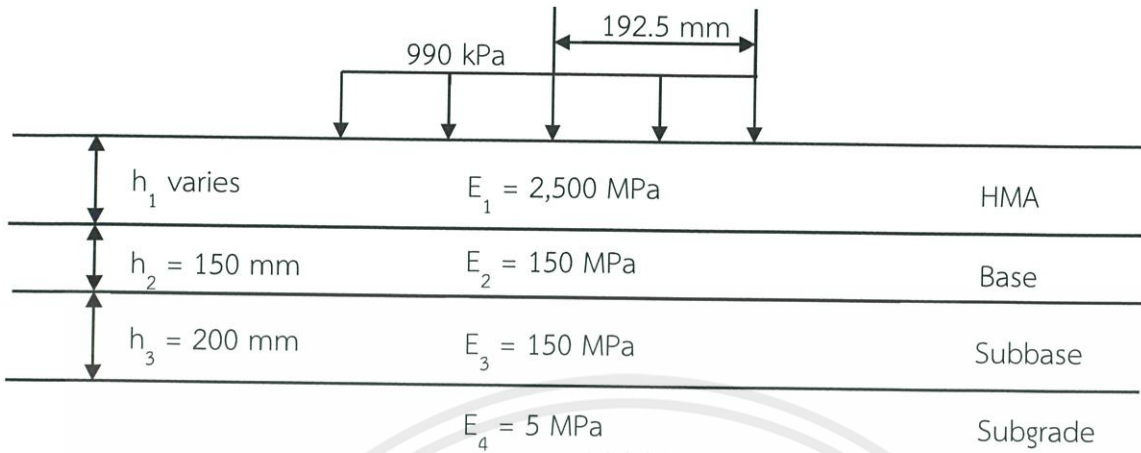
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



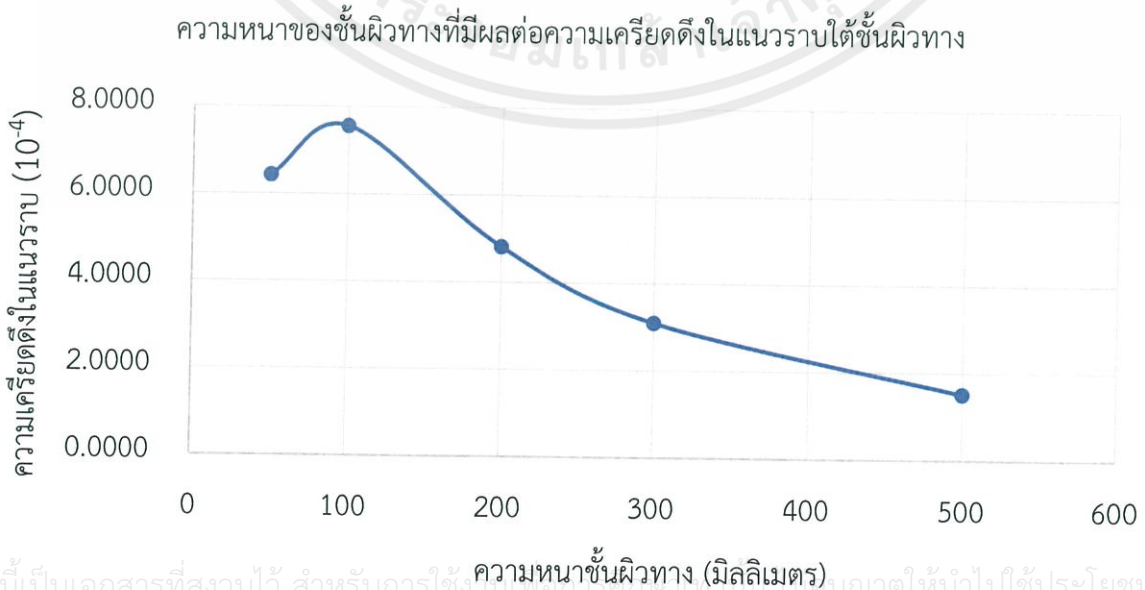
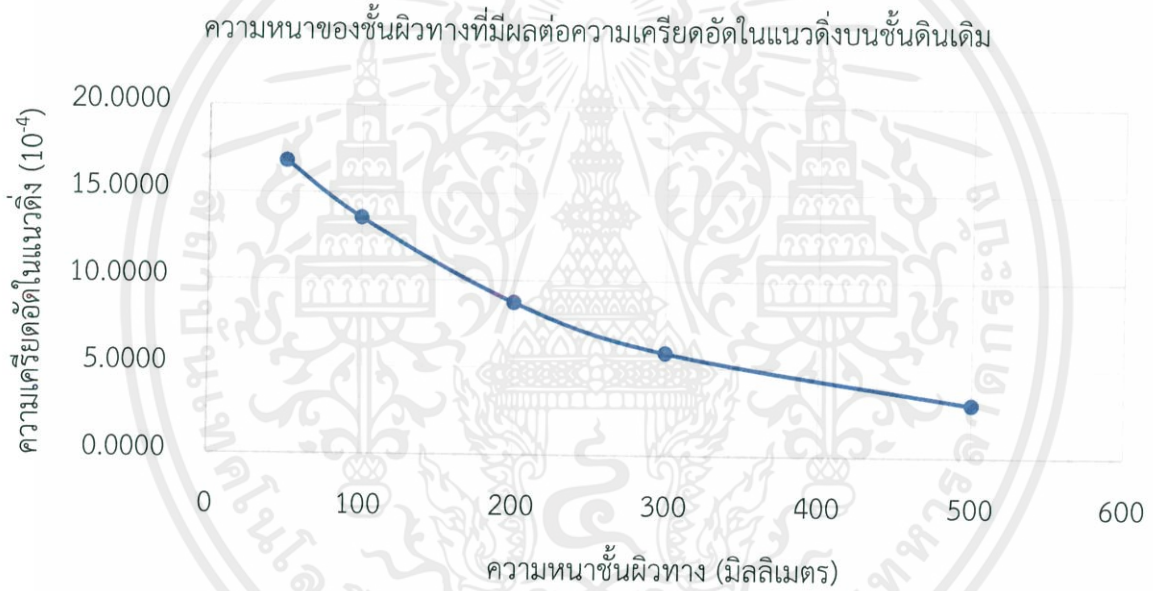
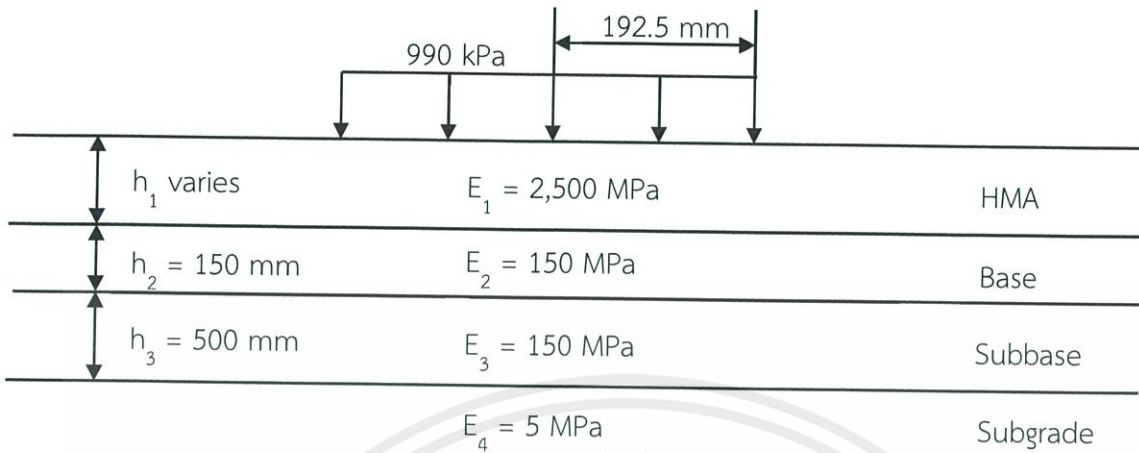
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้นั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

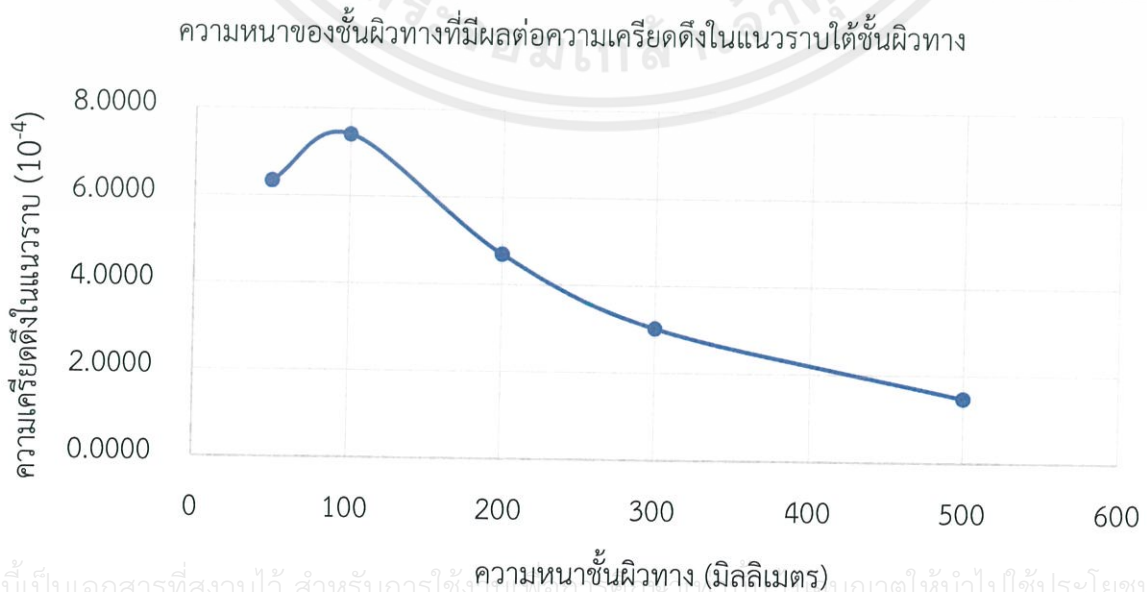
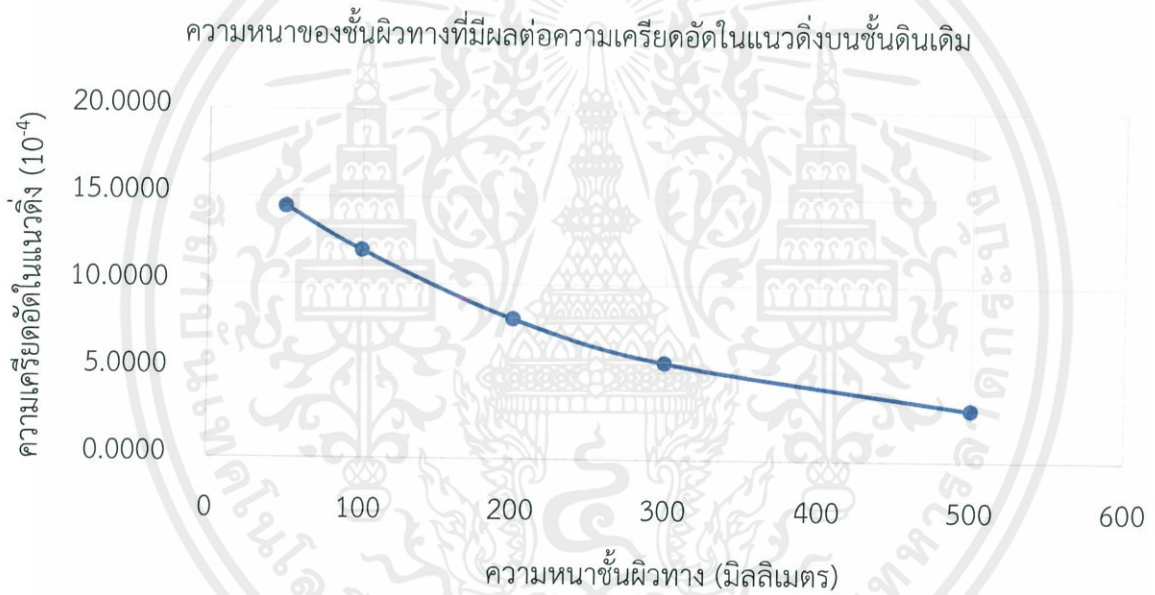
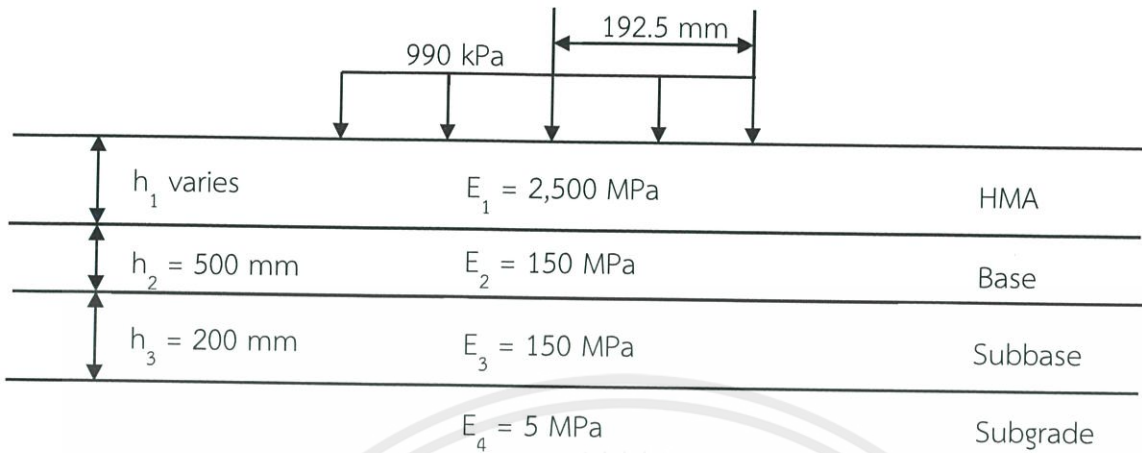
### กรณีศึกษาที่ 5



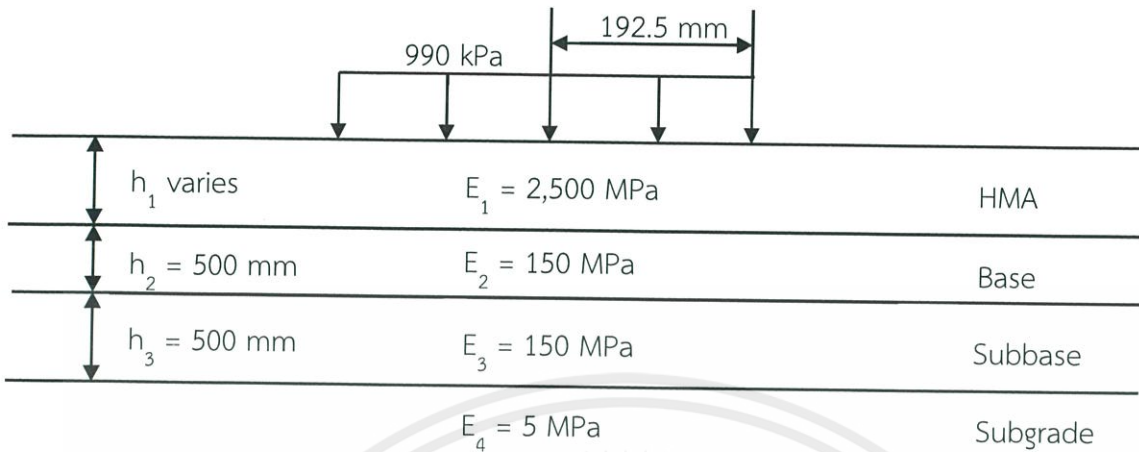
### กรณีศึกษาที่ 6



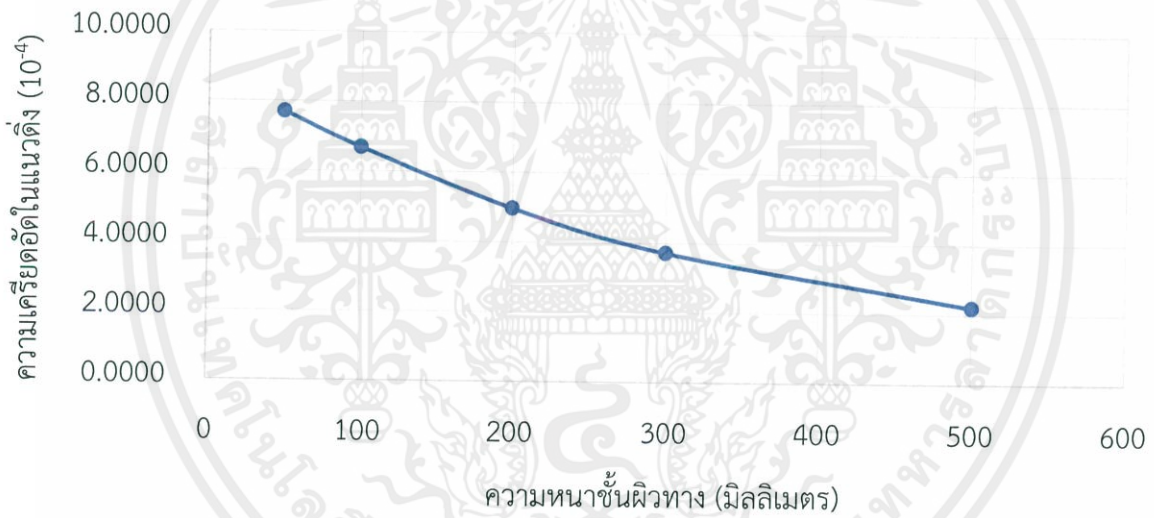
## กรณีศึกษาที่ 7



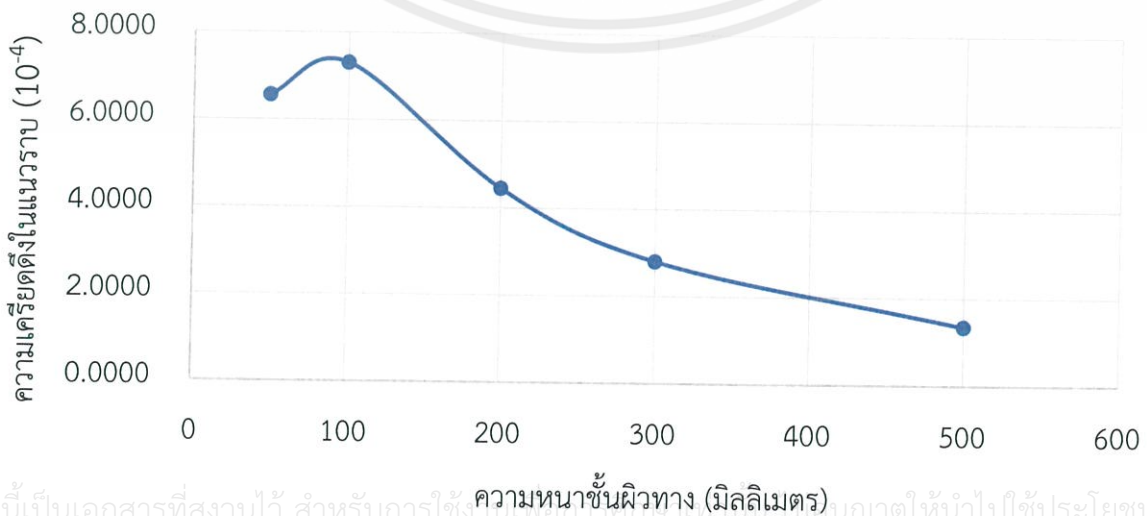
### กรณีศึกษาที่ 8



ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดตัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



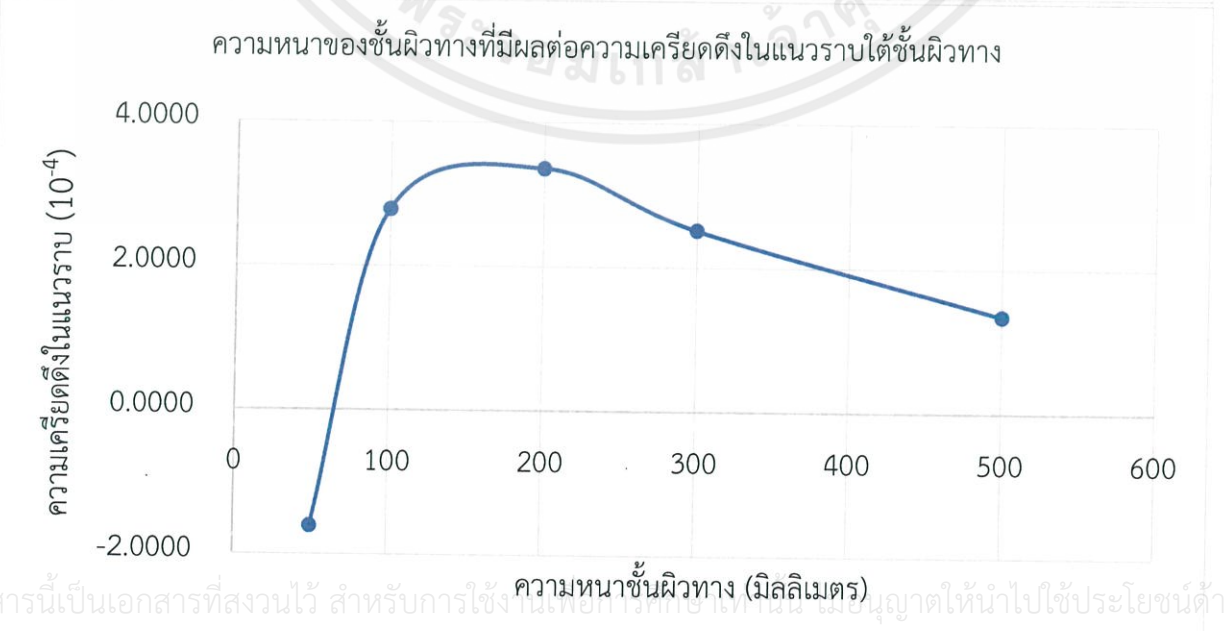
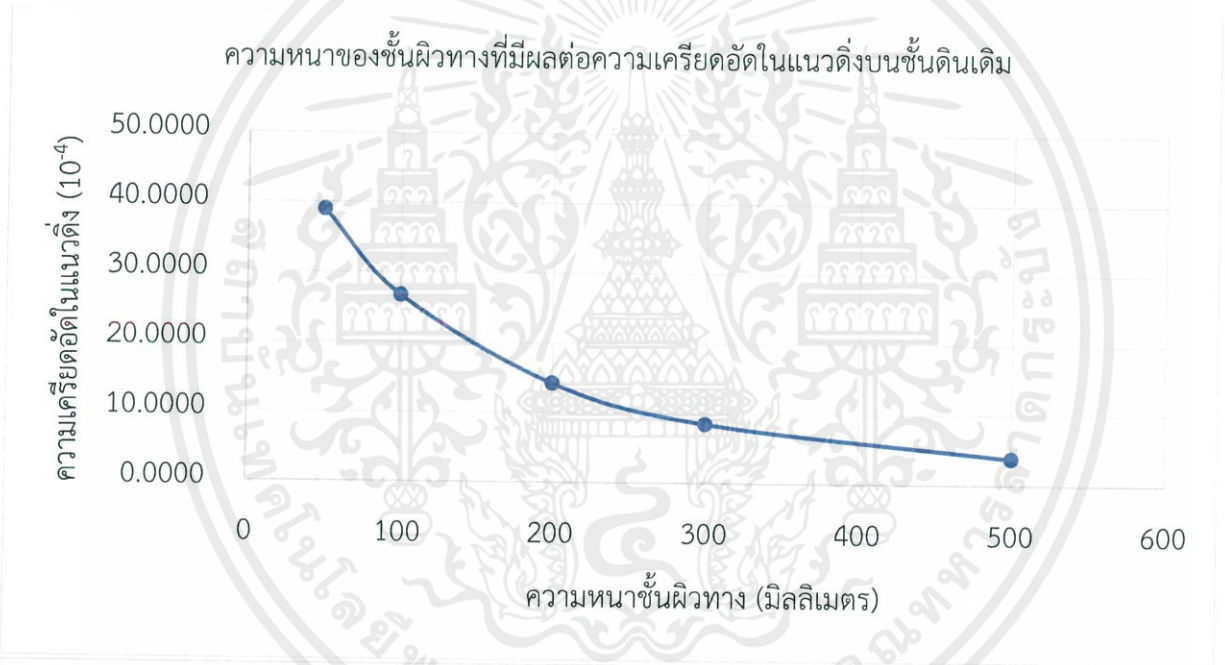
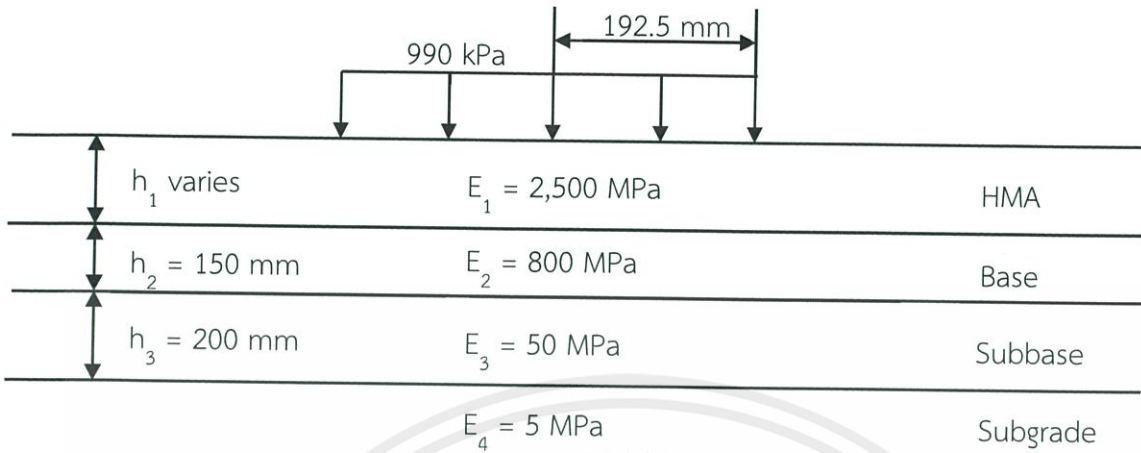
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



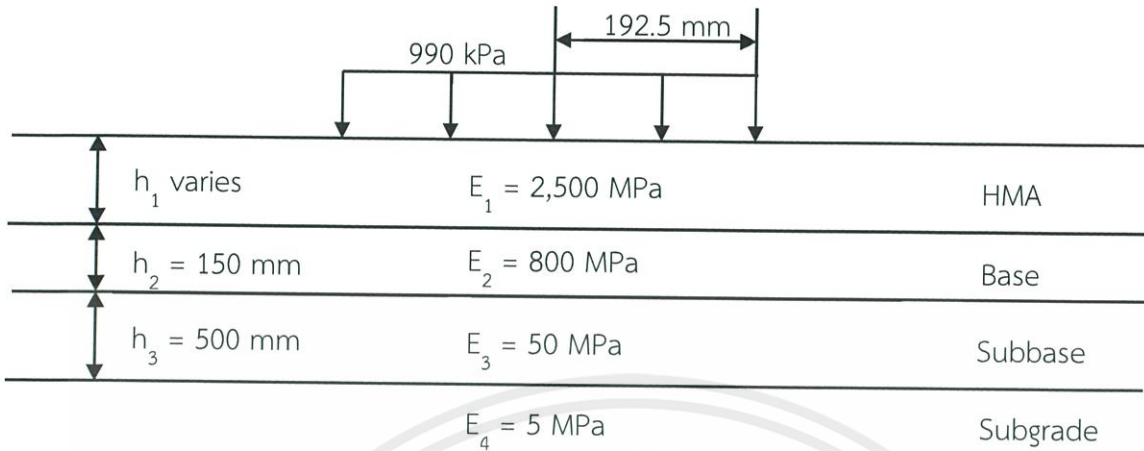
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้นั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

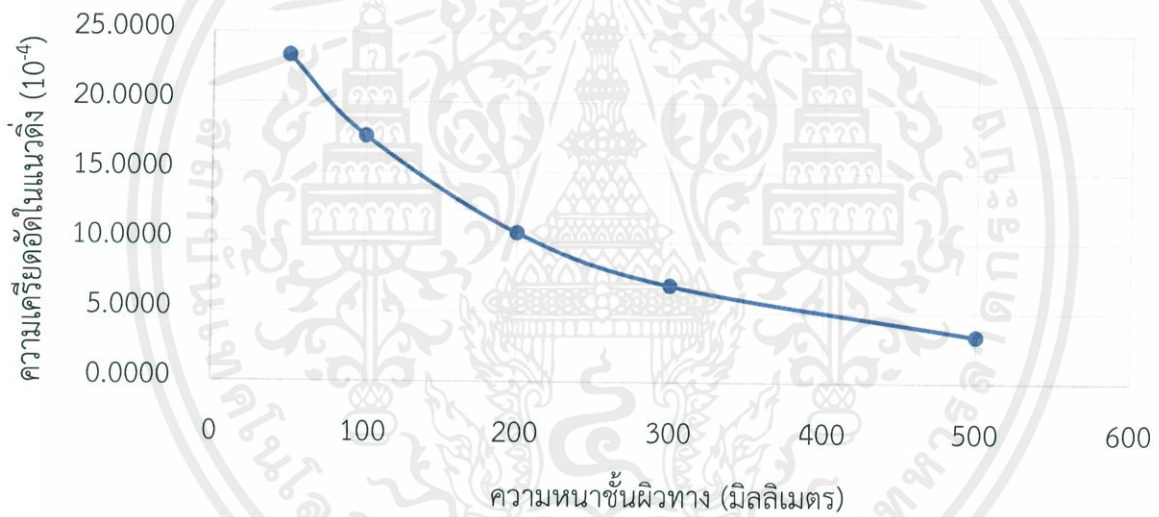
### กรณีศึกษาที่ 9



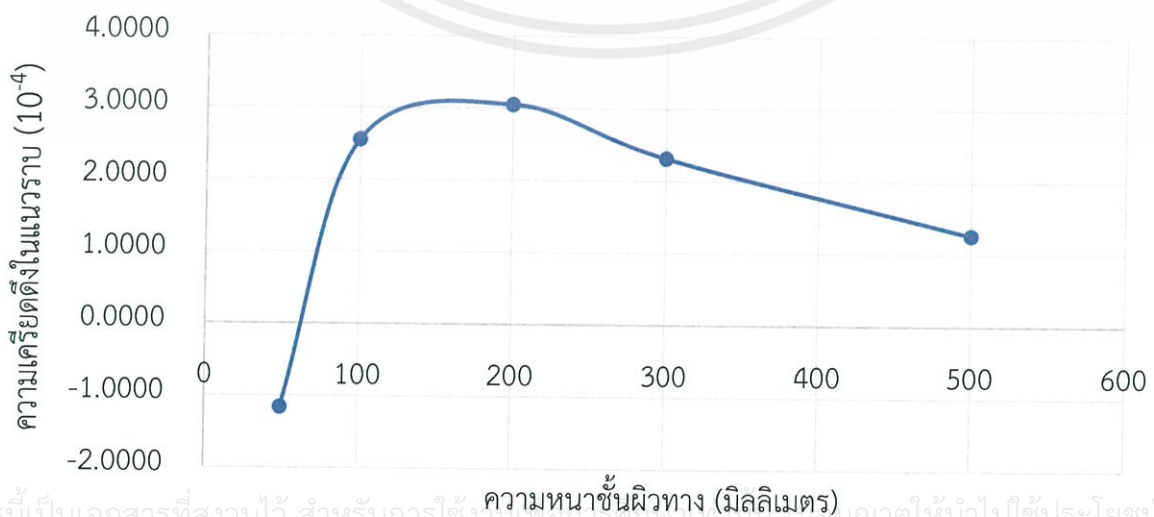
### กรณีศึกษาที่ 10



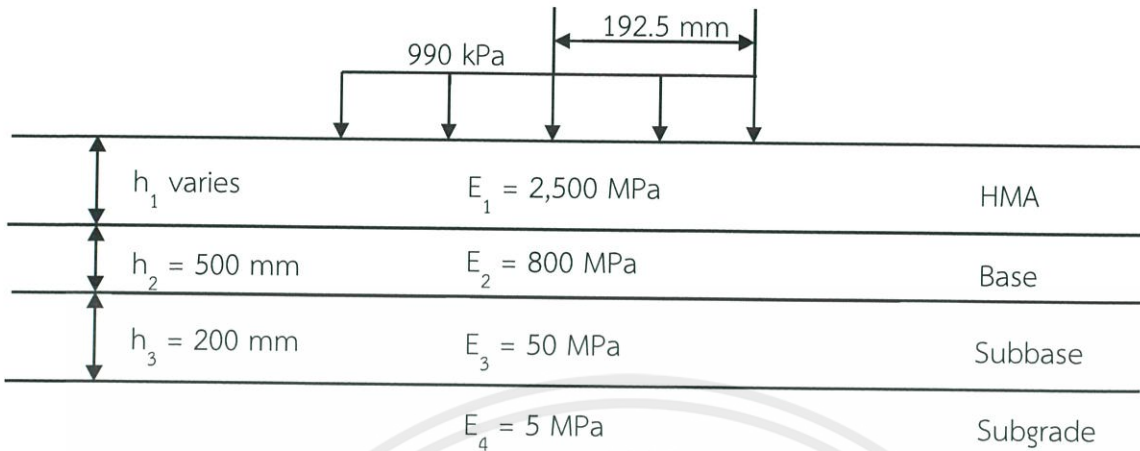
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดตัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



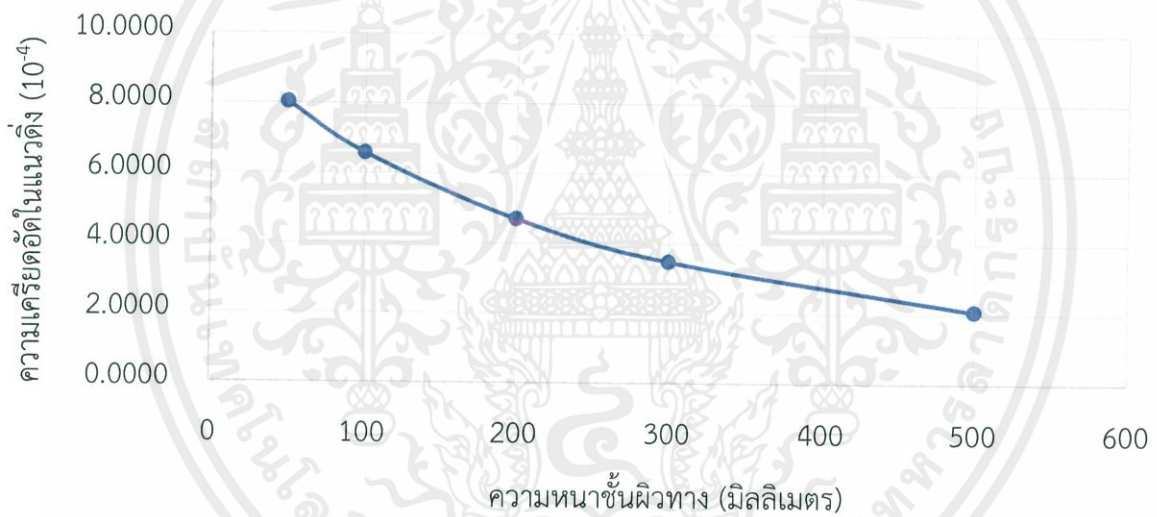
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



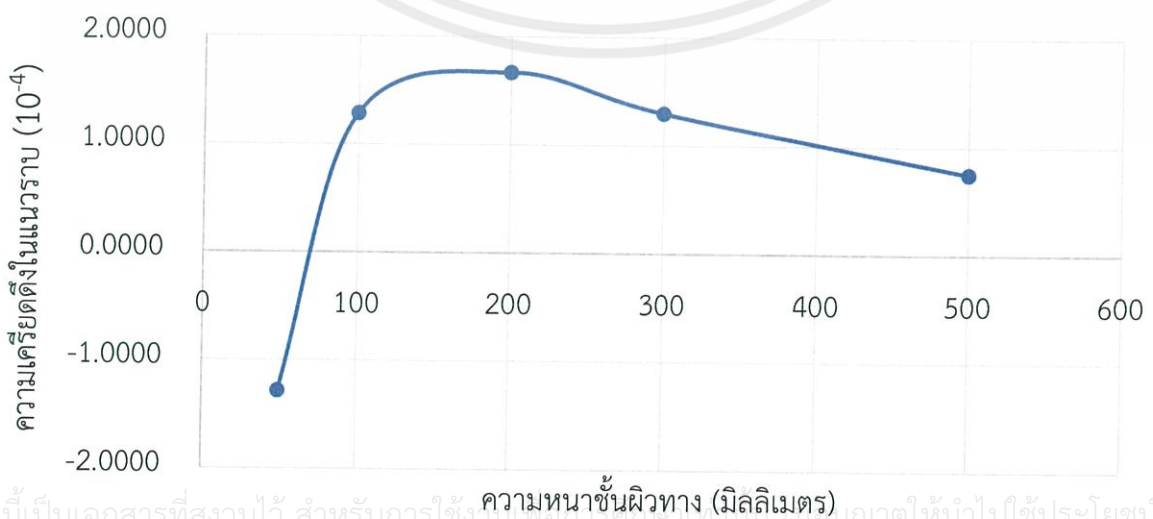
# กรณีศึกษาที่ 11



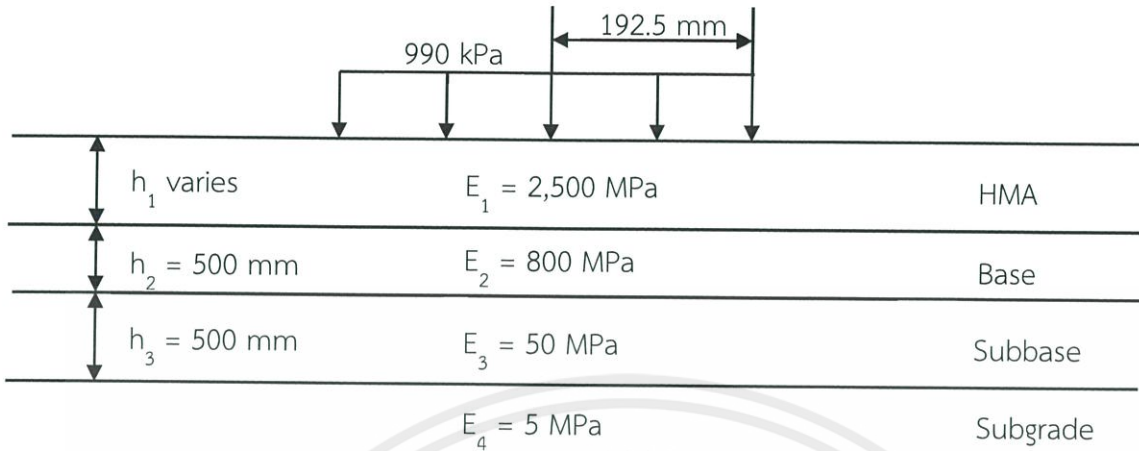
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



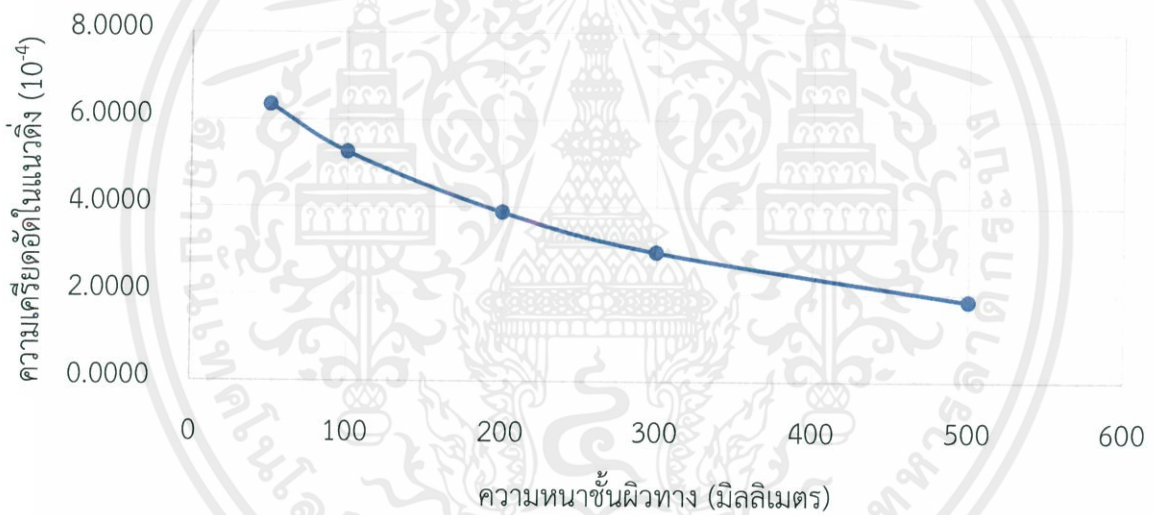
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



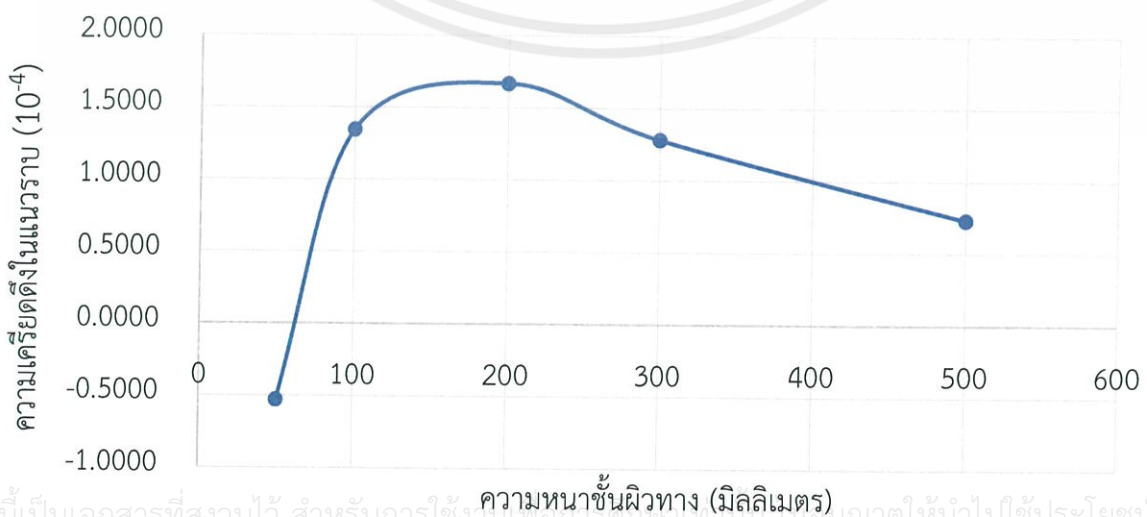
## กรณีศึกษาที่ 12



ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดตัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม

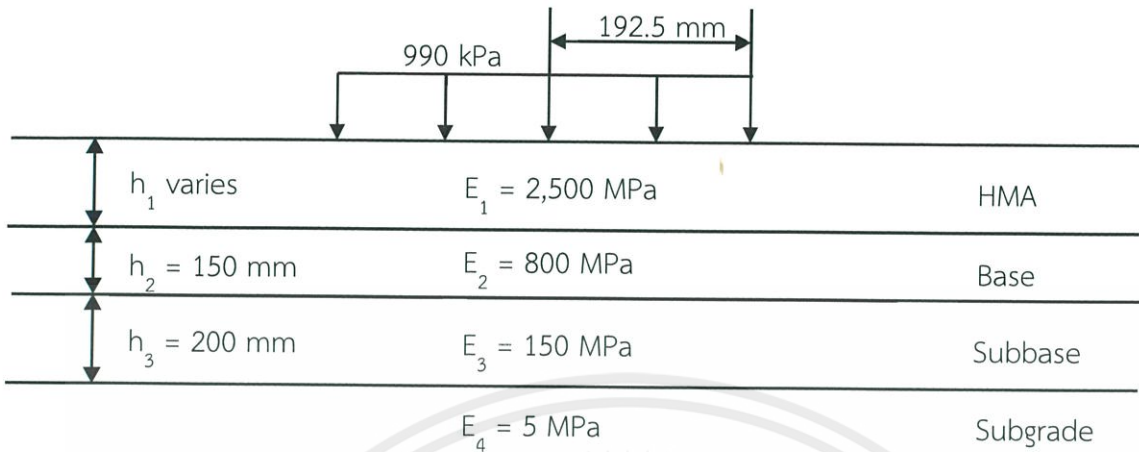


ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง

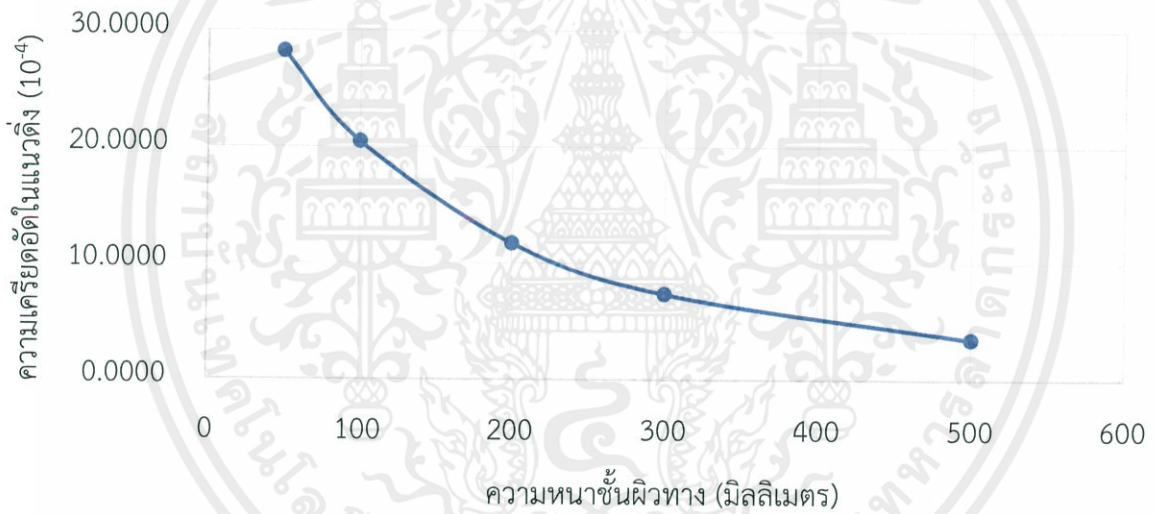


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

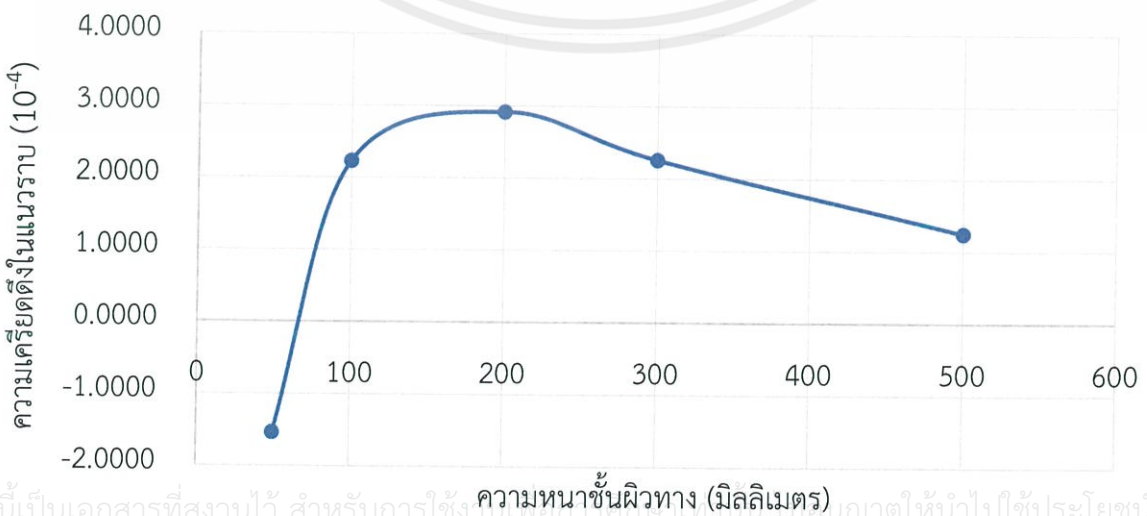
### กรณีศึกษาที่ 13



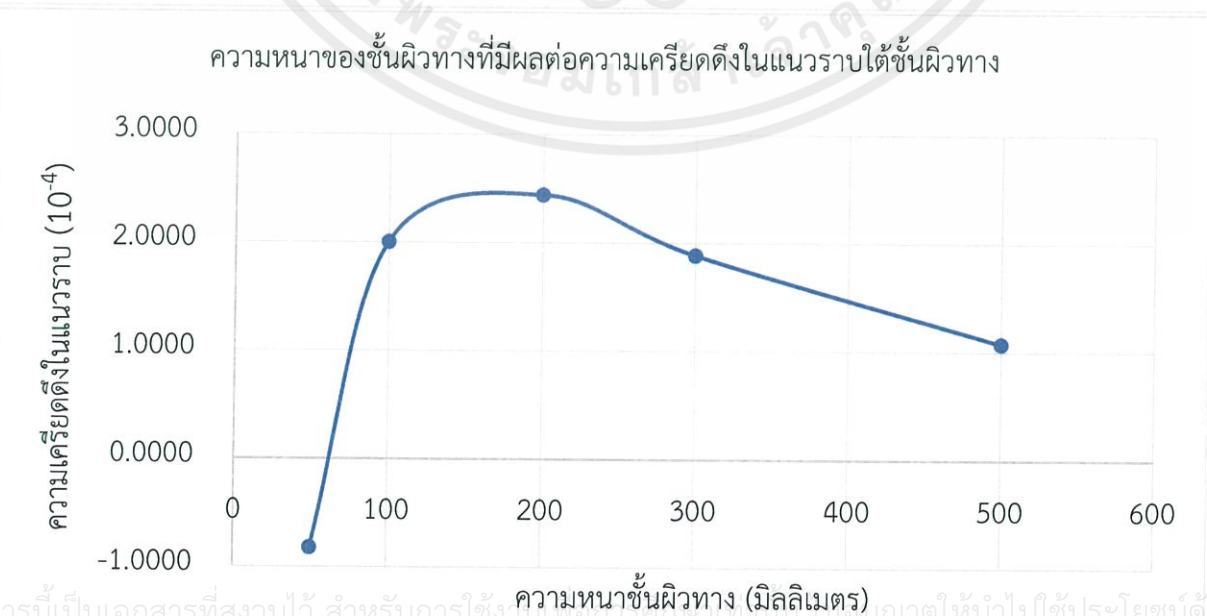
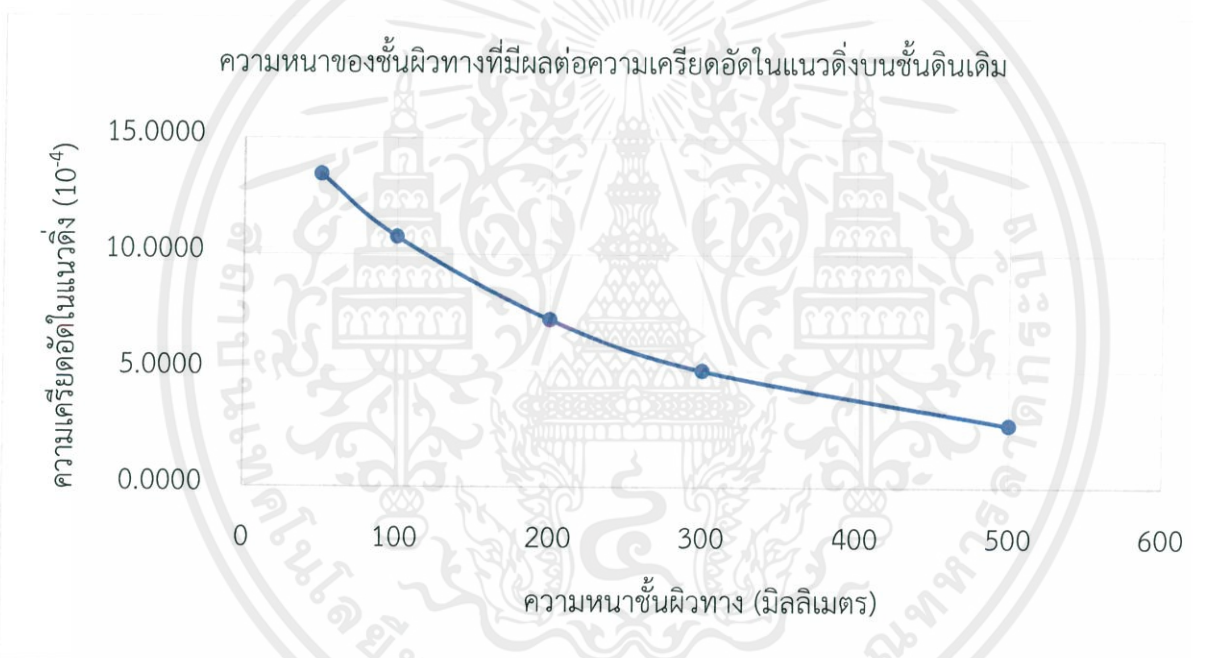
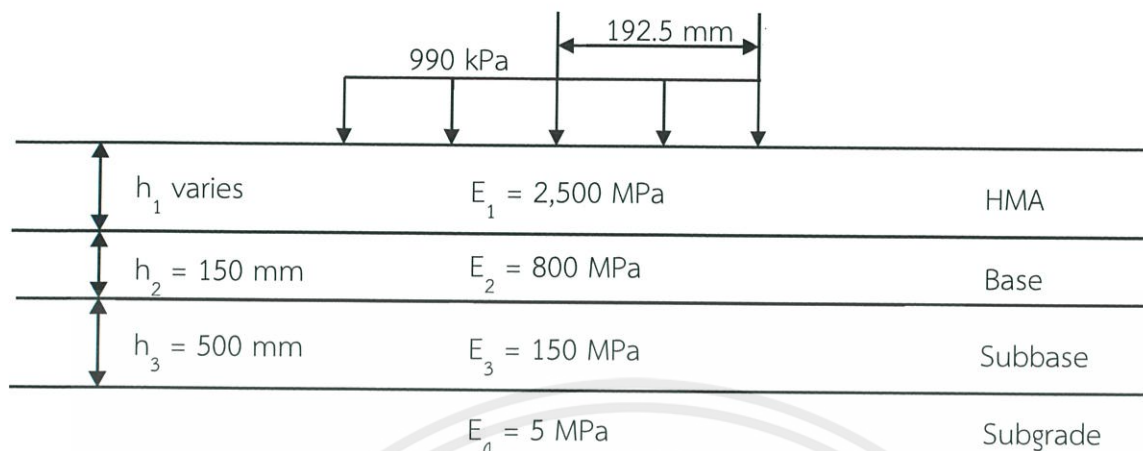
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



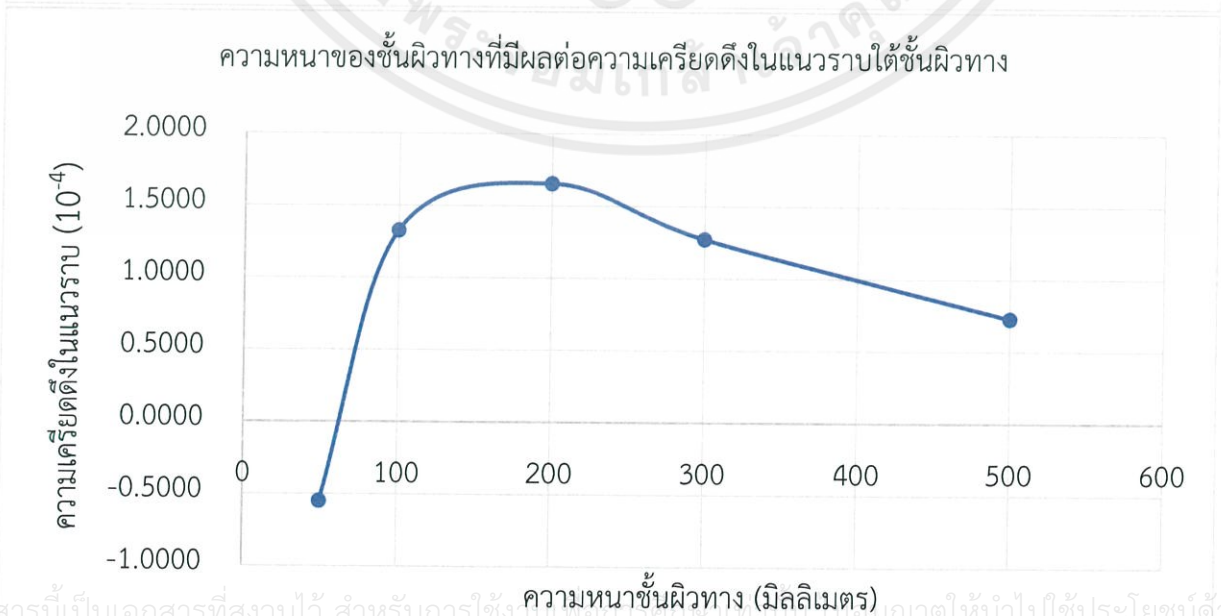
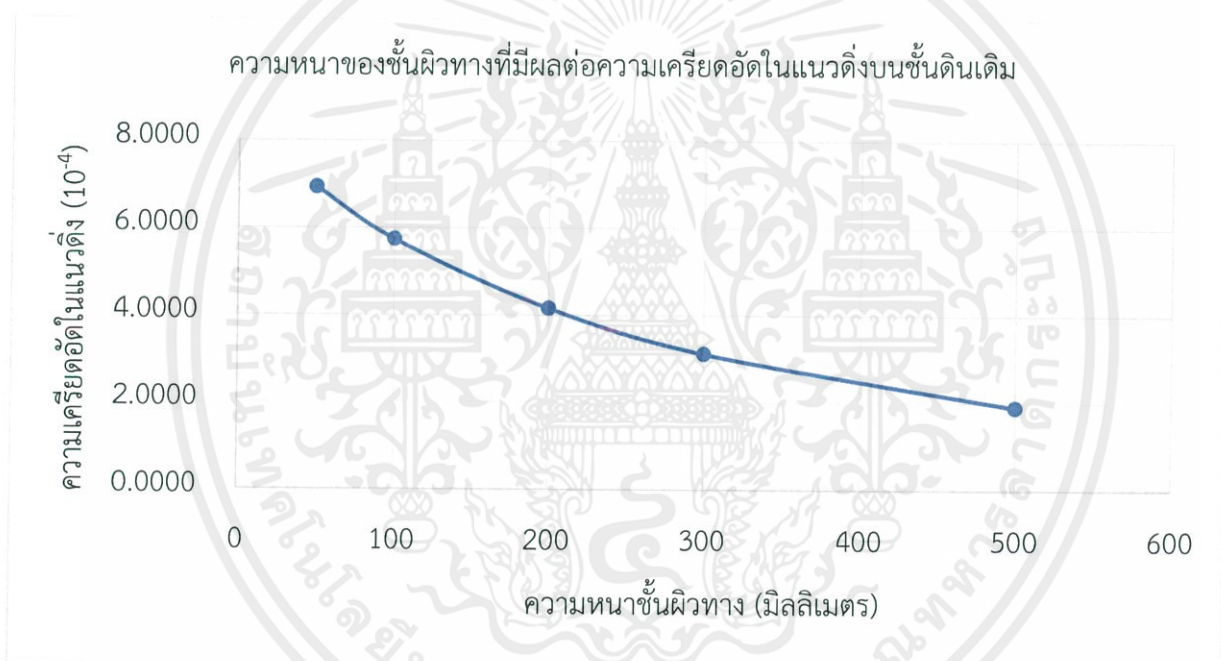
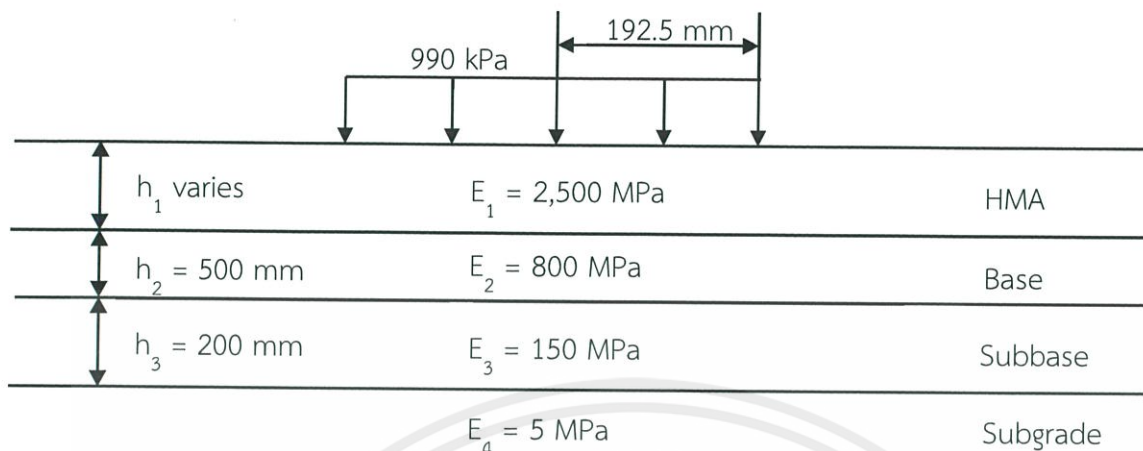
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



### กรณีศึกษาที่ 14

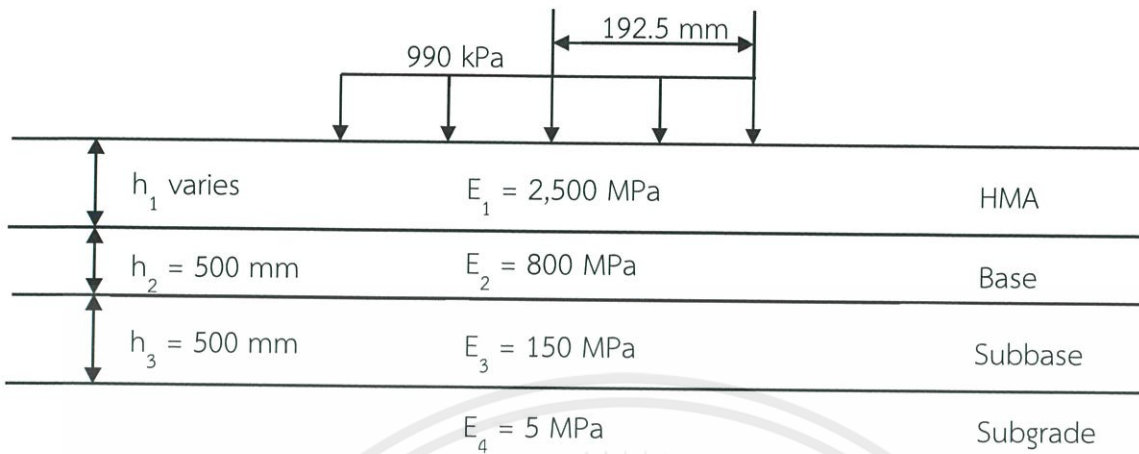


### กรณีศึกษาที่ 15

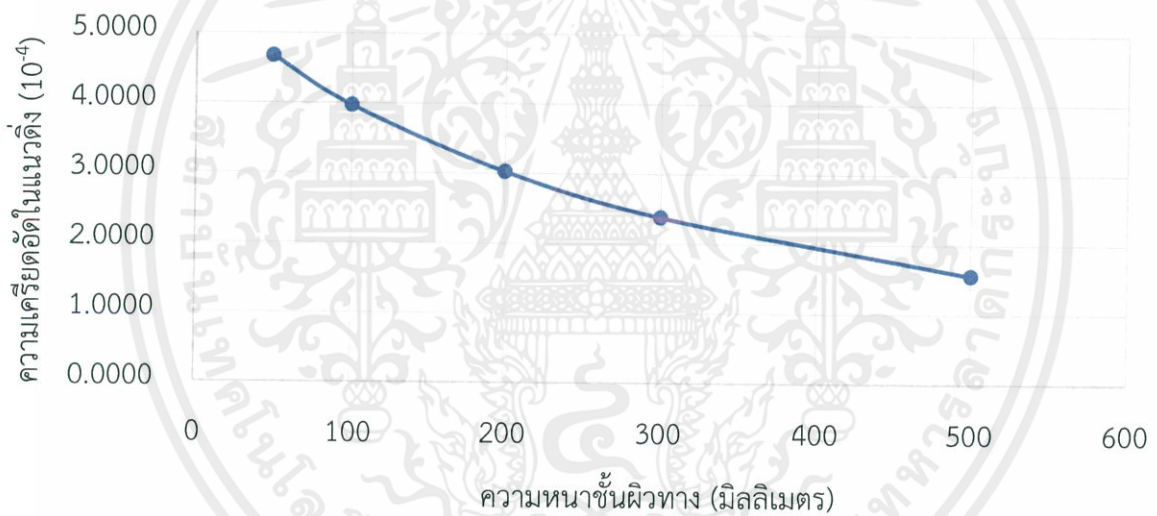


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้นั้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

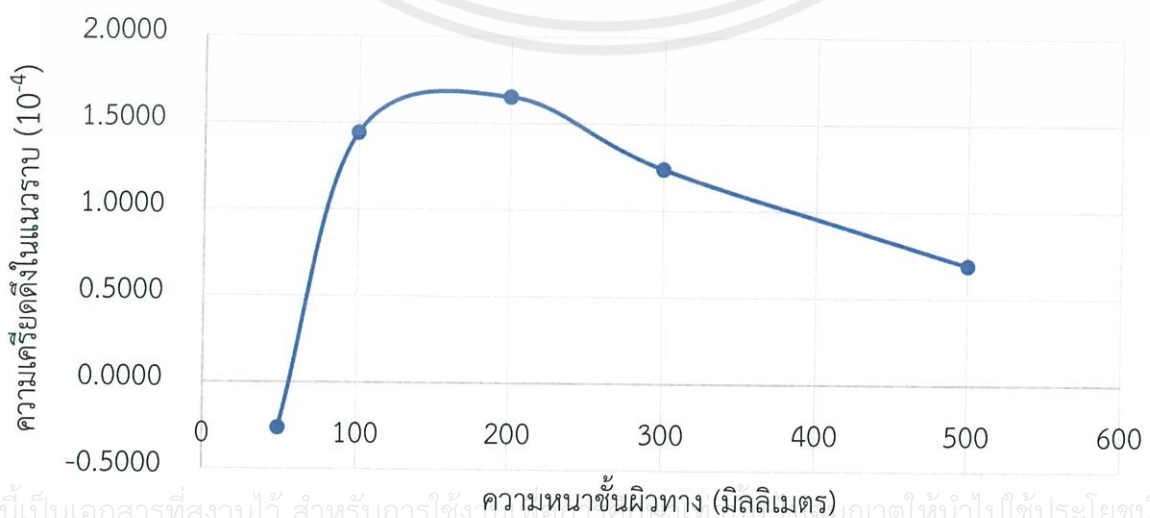
### กรณีศึกษาที่ 16



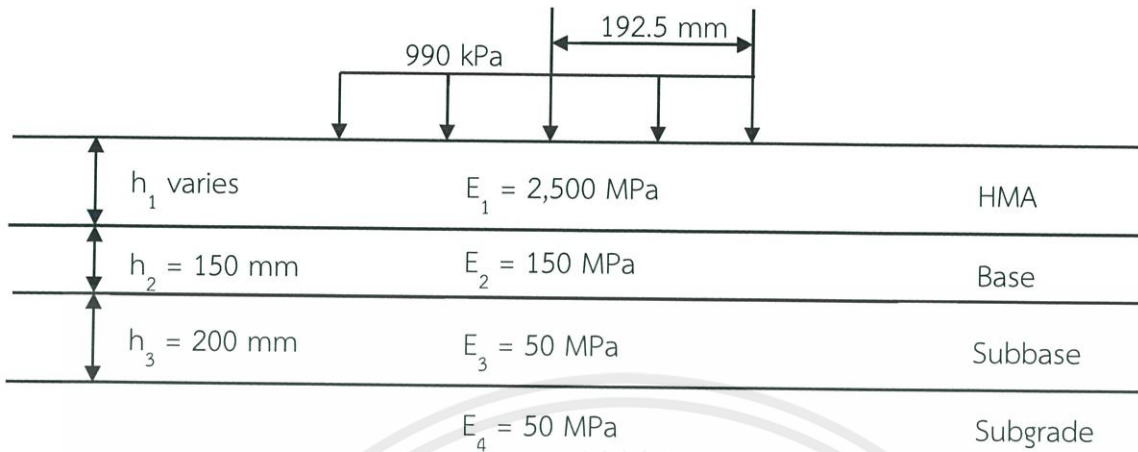
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



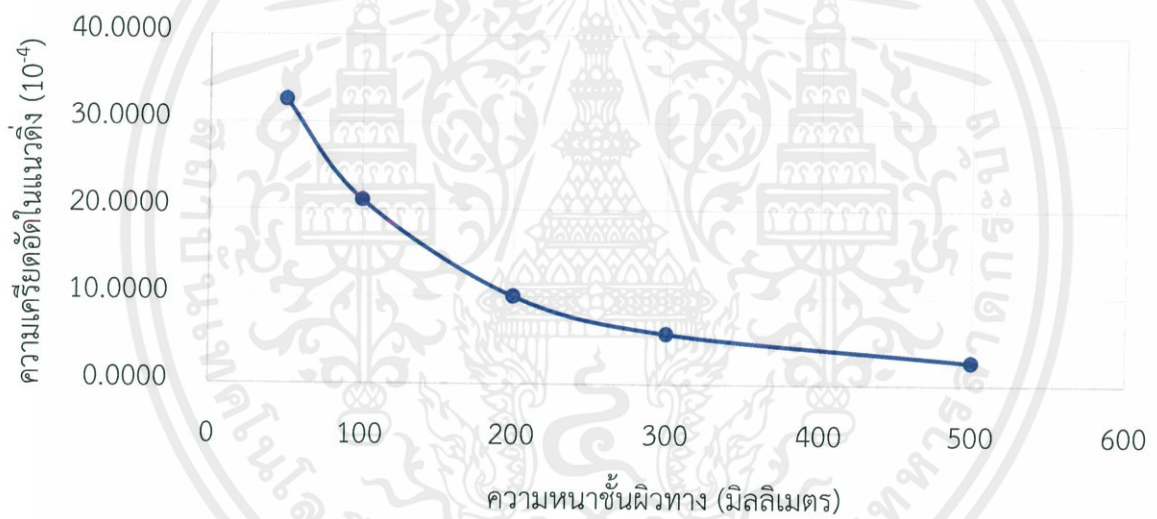
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



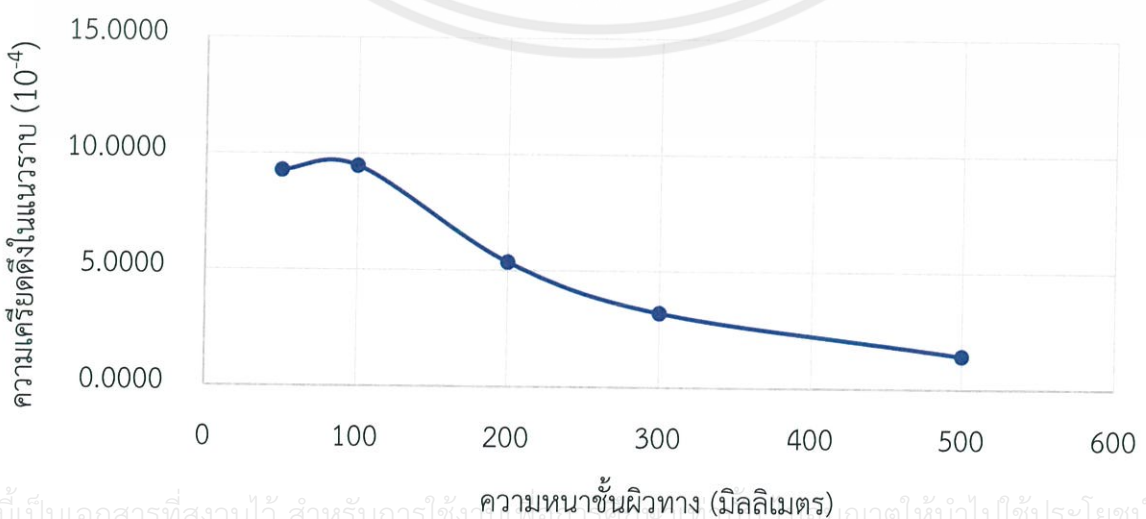
### กรณีศึกษาที่ 17



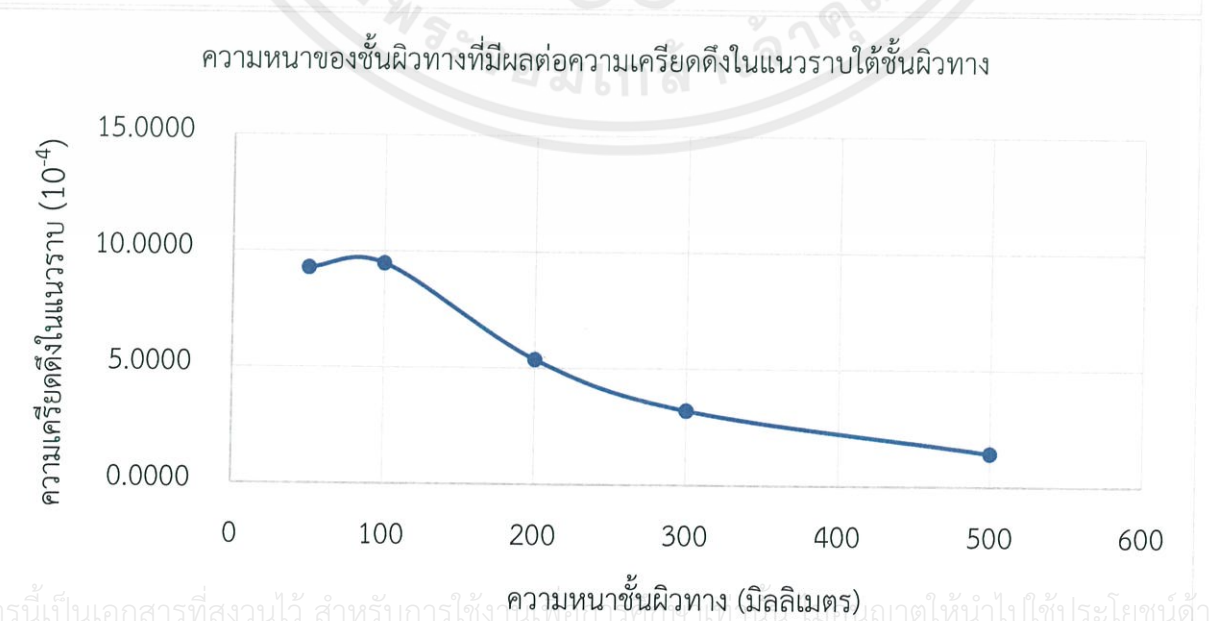
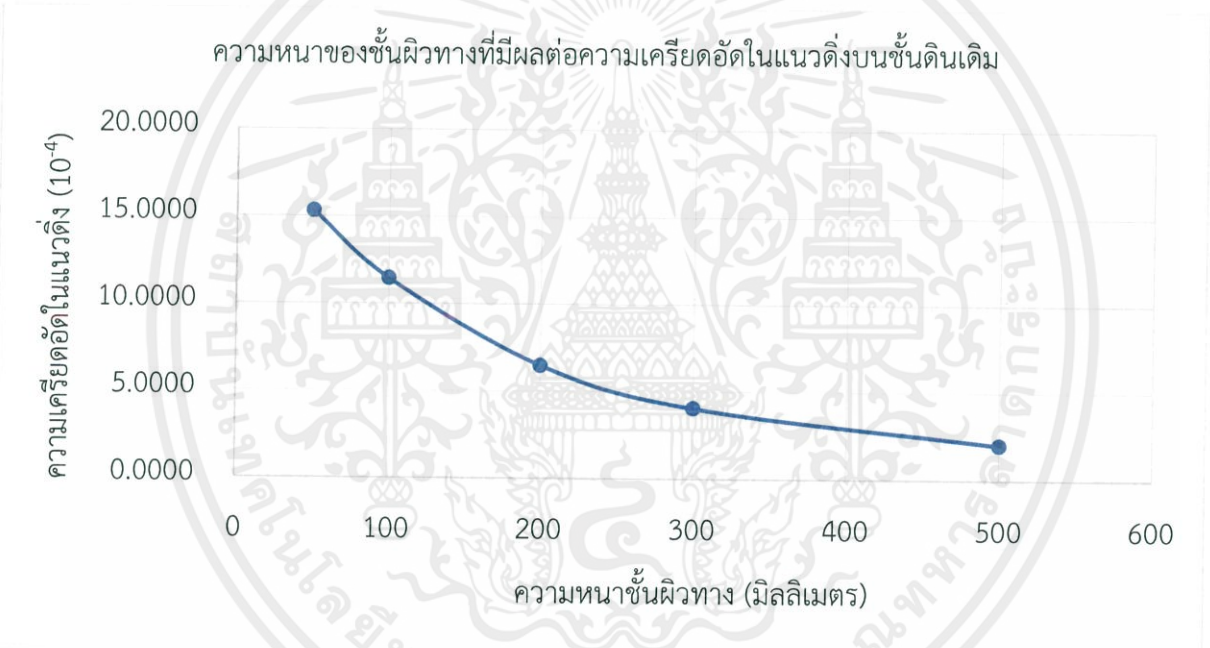
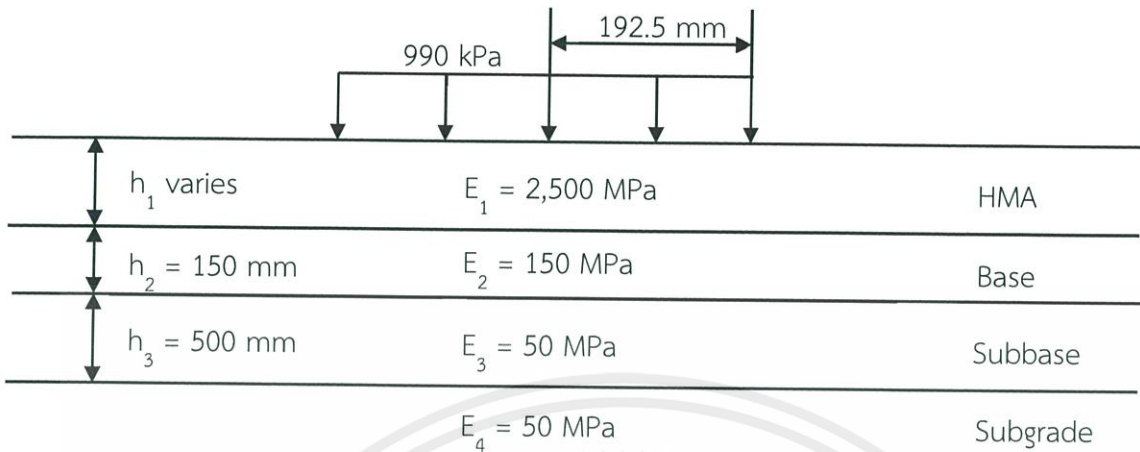
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



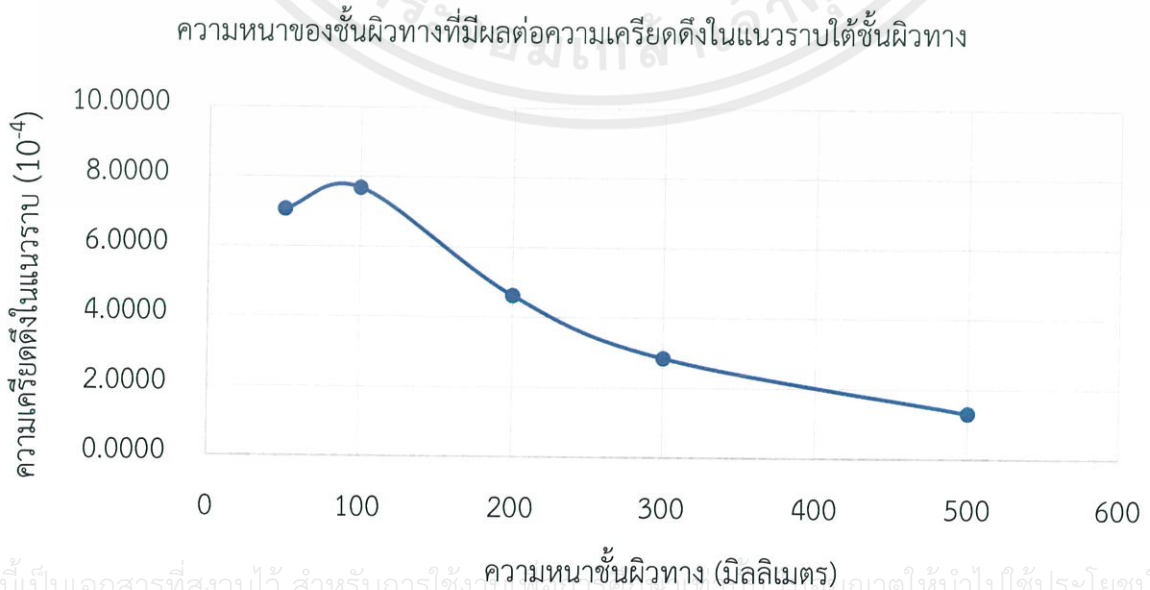
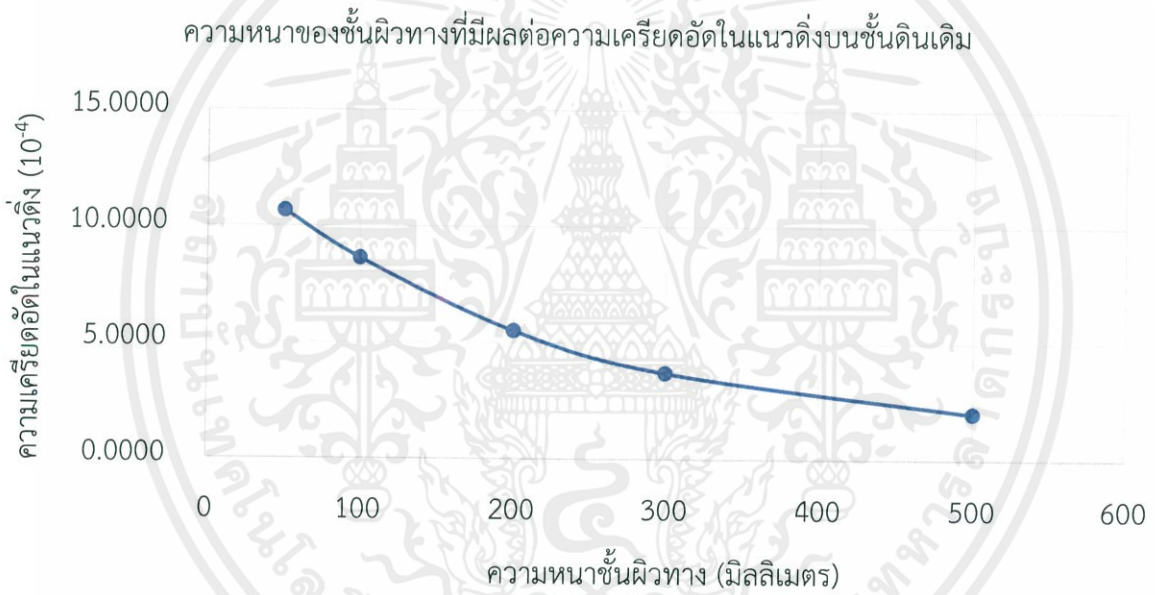
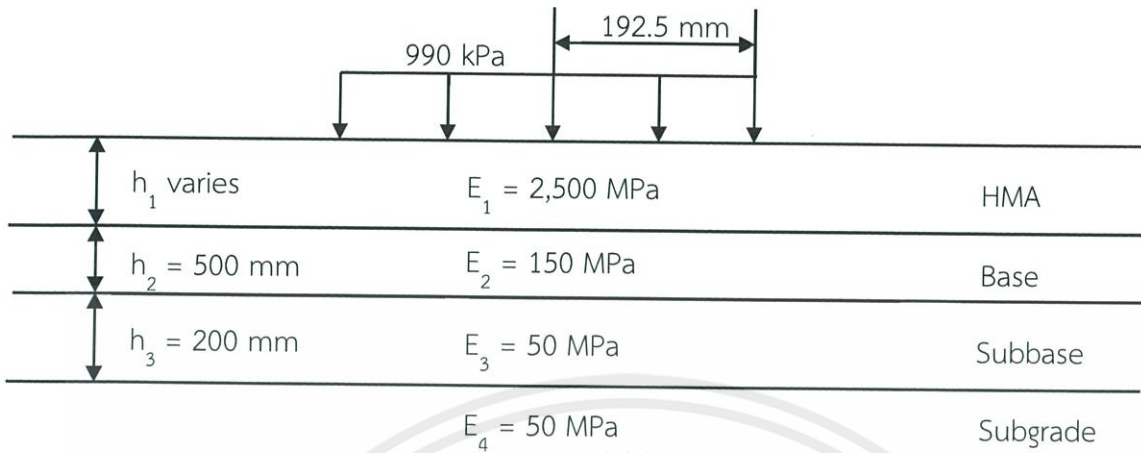
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



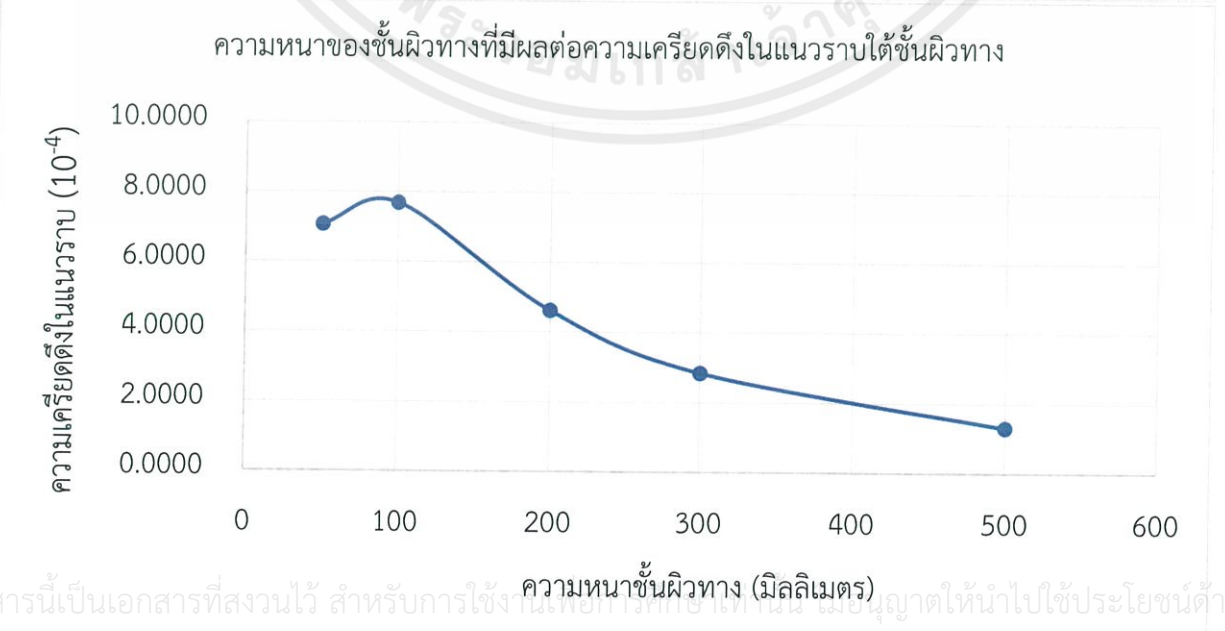
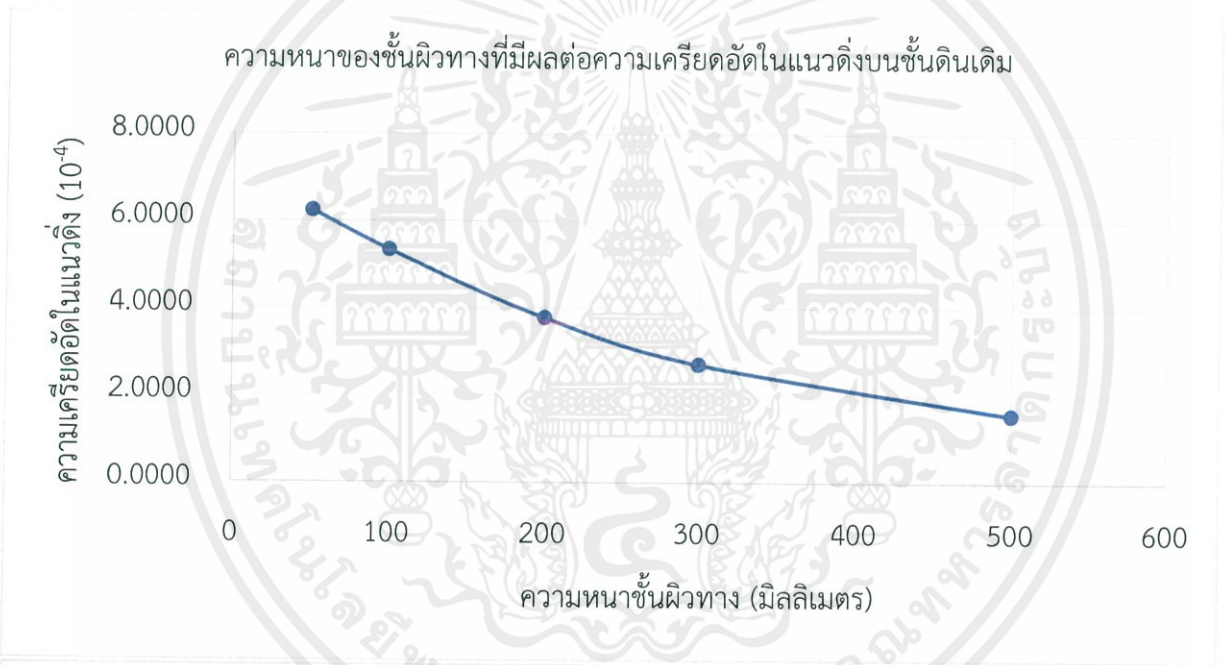
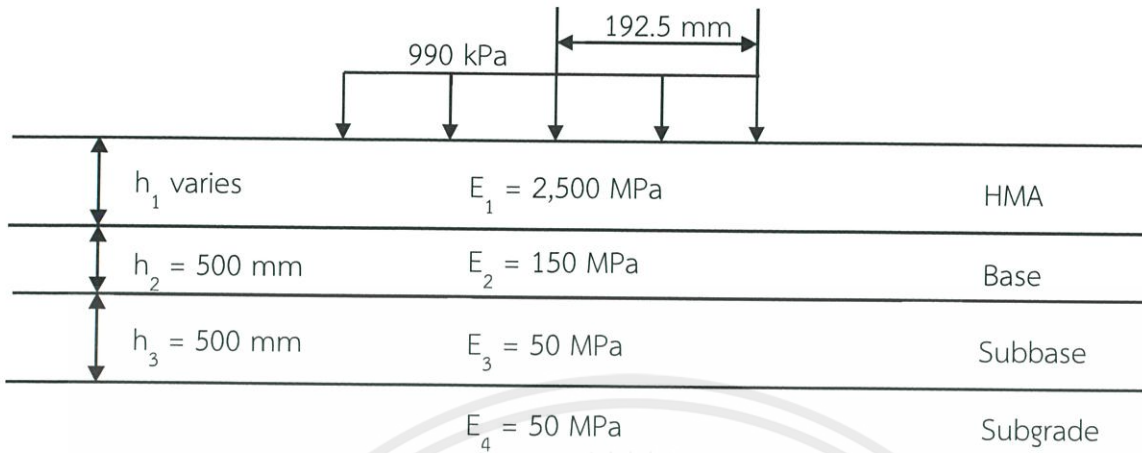
### กรณีศึกษาที่ 18



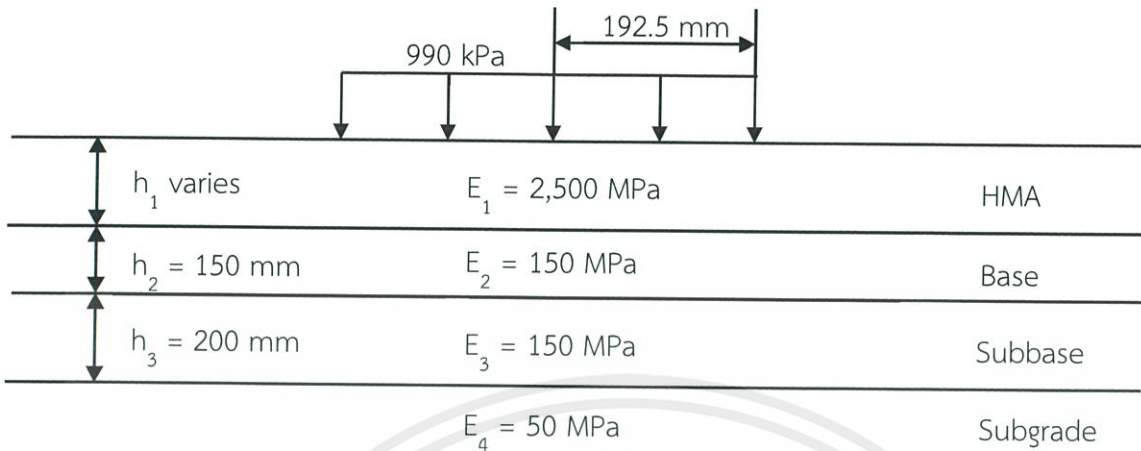
### กรณีศึกษาที่ 19



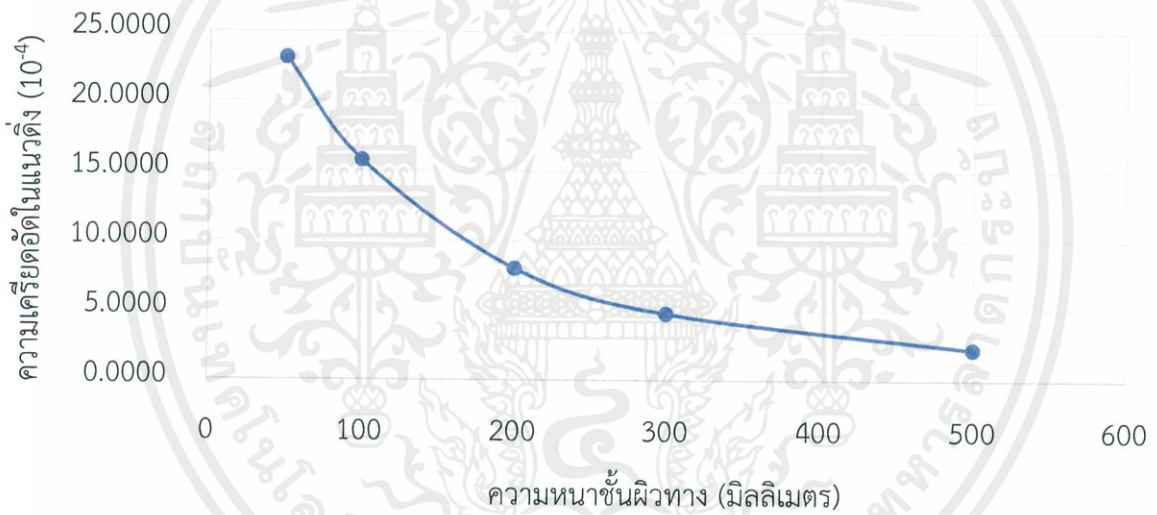
## กรณีที่ 20



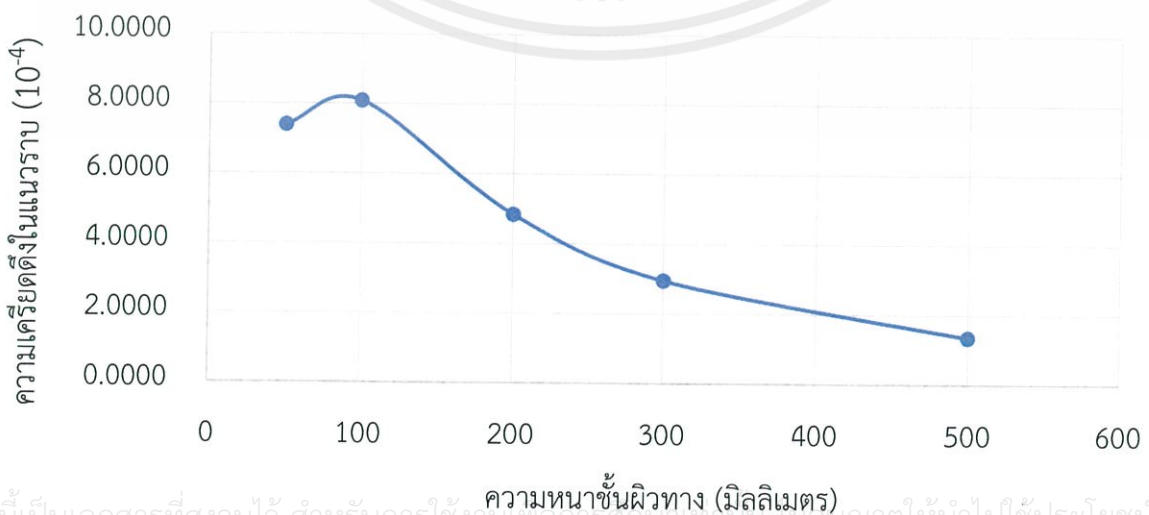
## กรณีศึกษาที่ 21



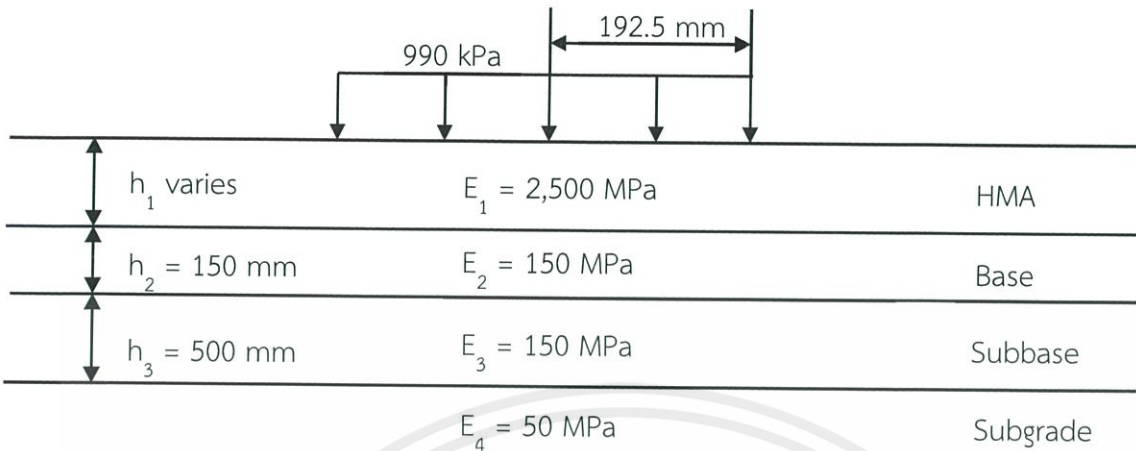
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



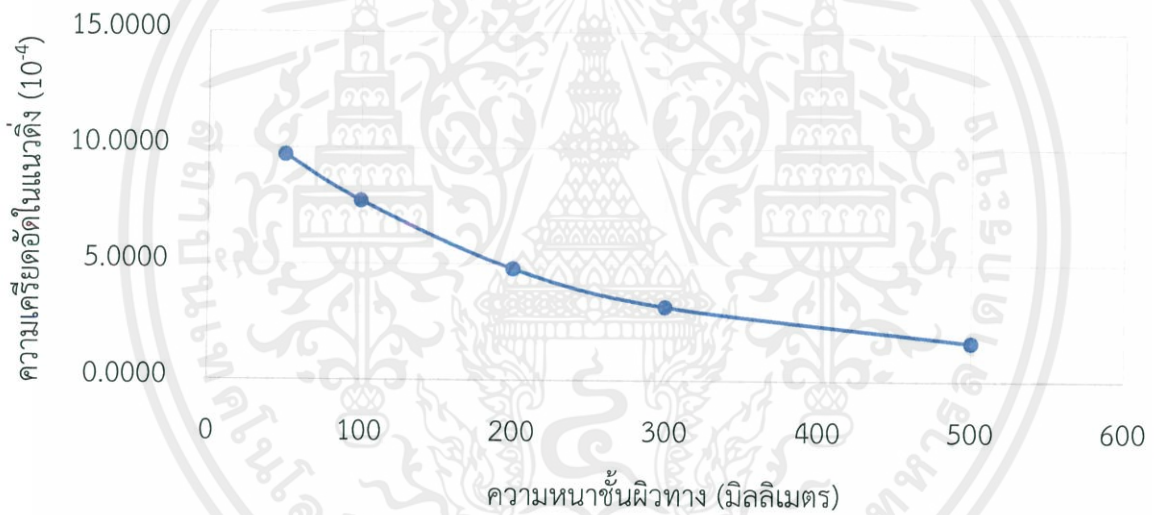
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



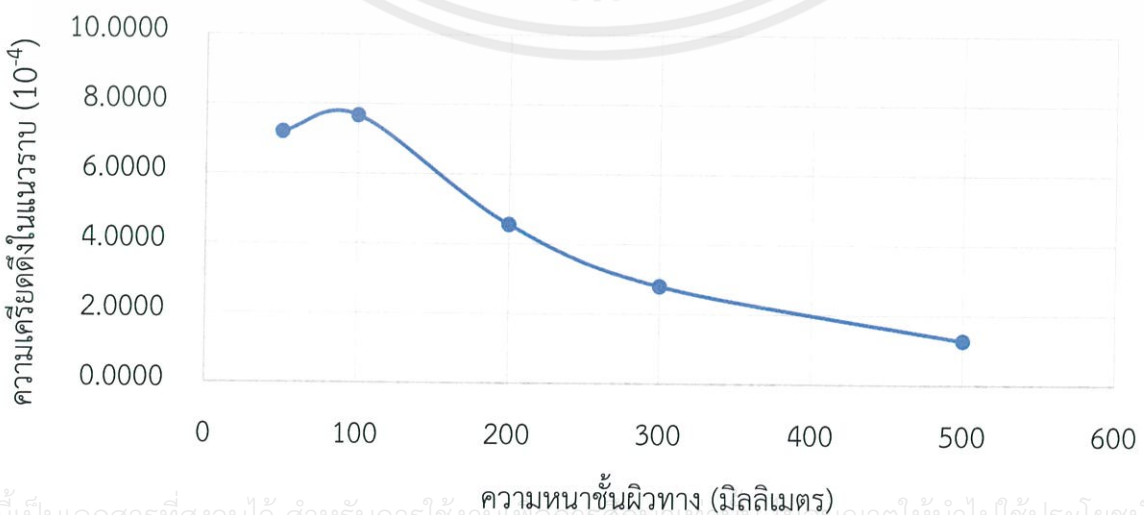
## กรณีศึกษาที่ 22



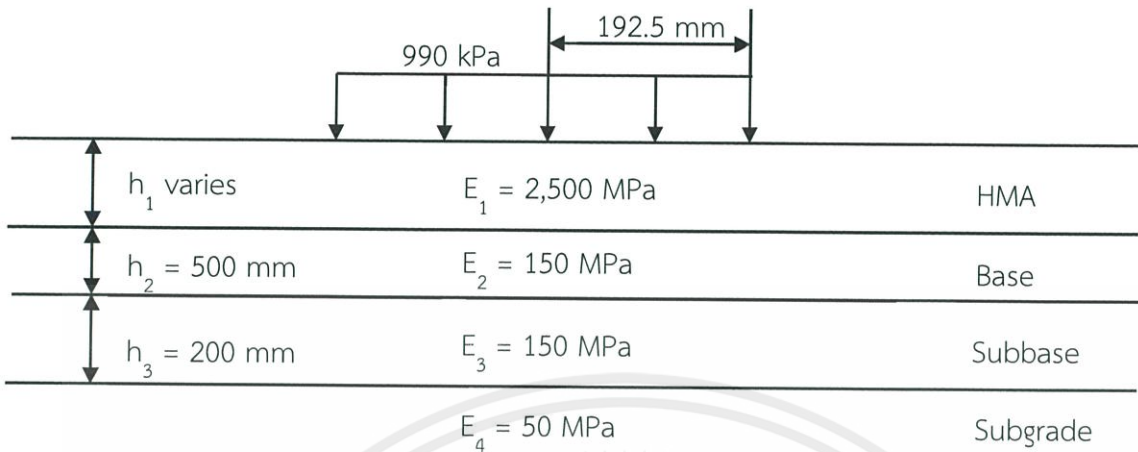
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



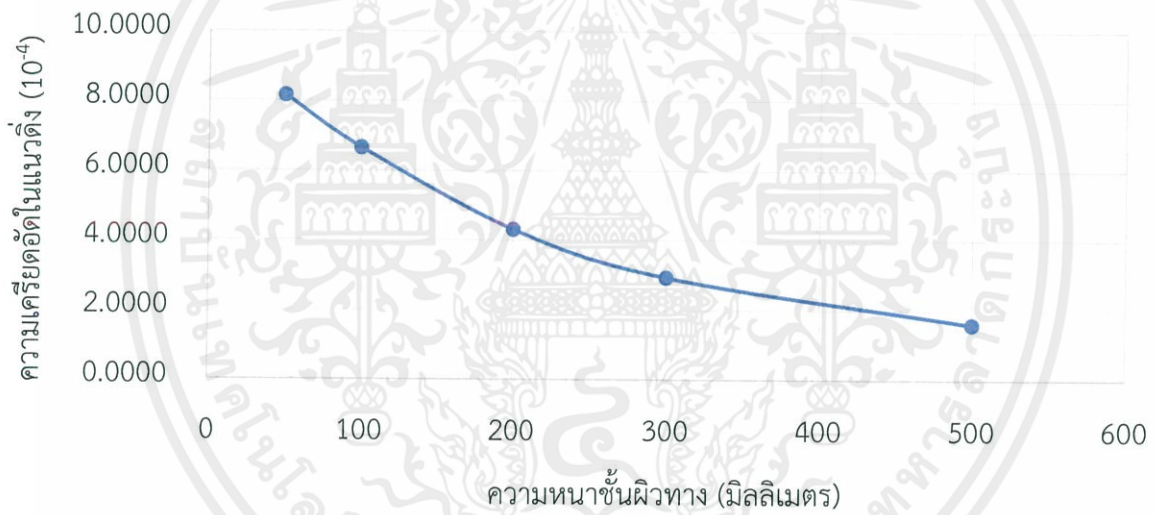
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



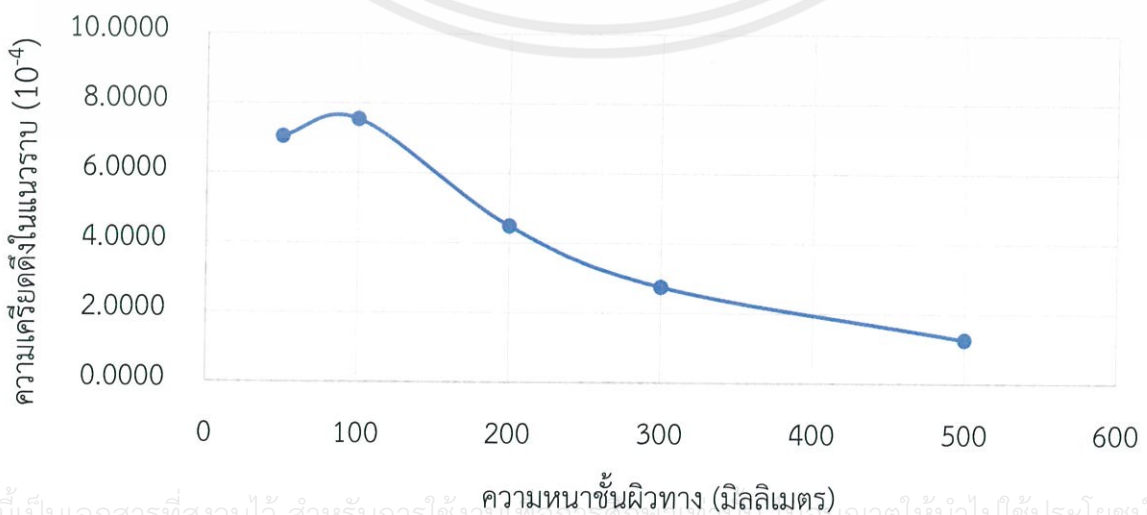
### กรณีศึกษาที่ 23



ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวดิ่ง



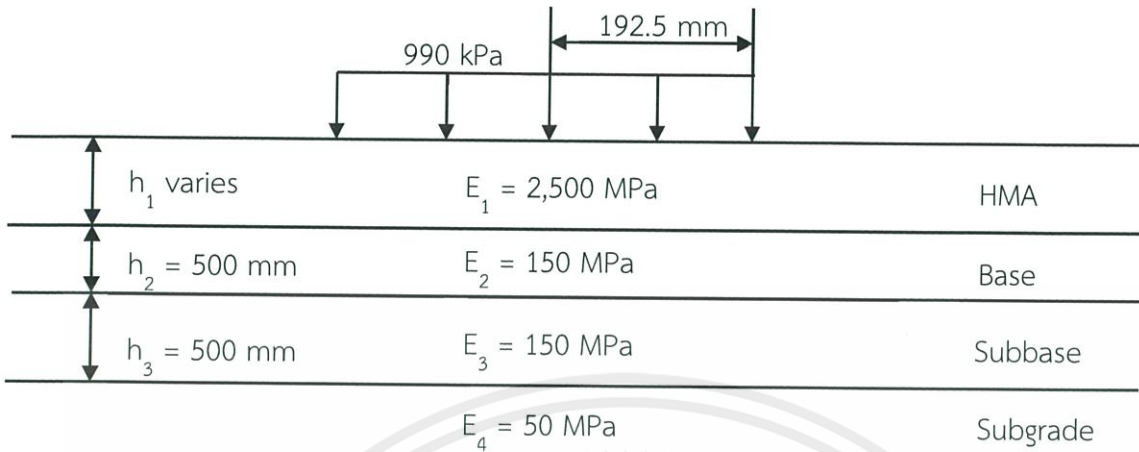
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวนอน



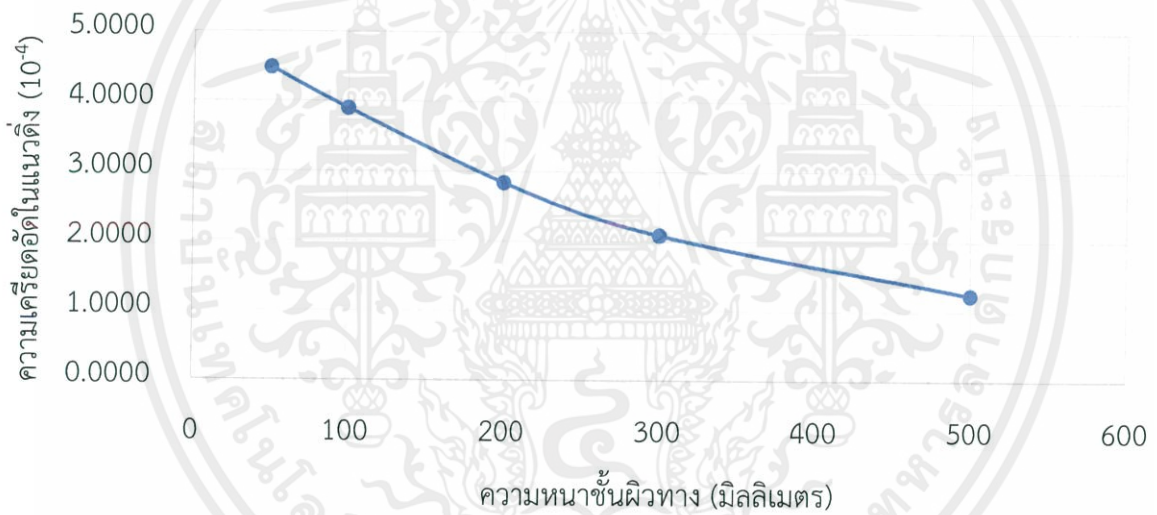
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

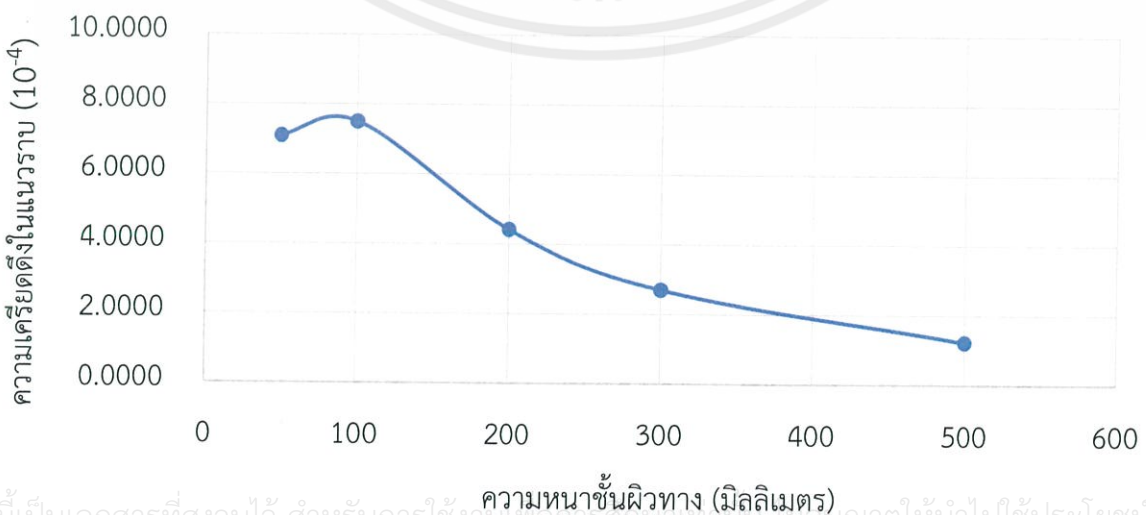
## กรณีศึกษาที่ 24



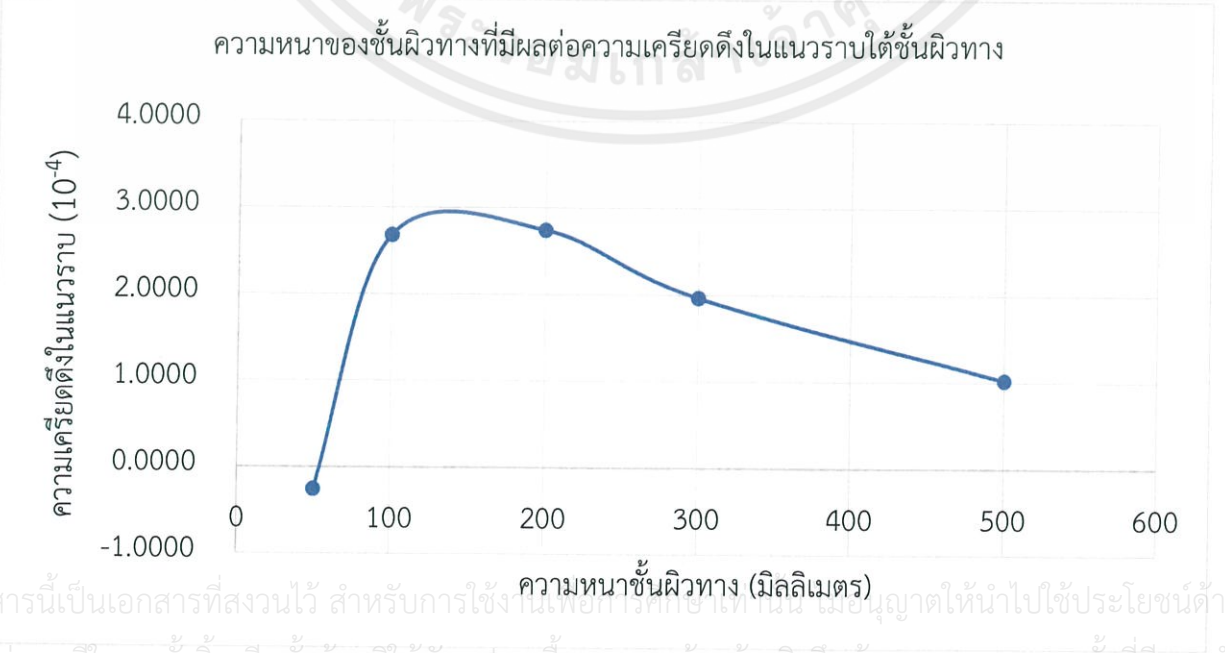
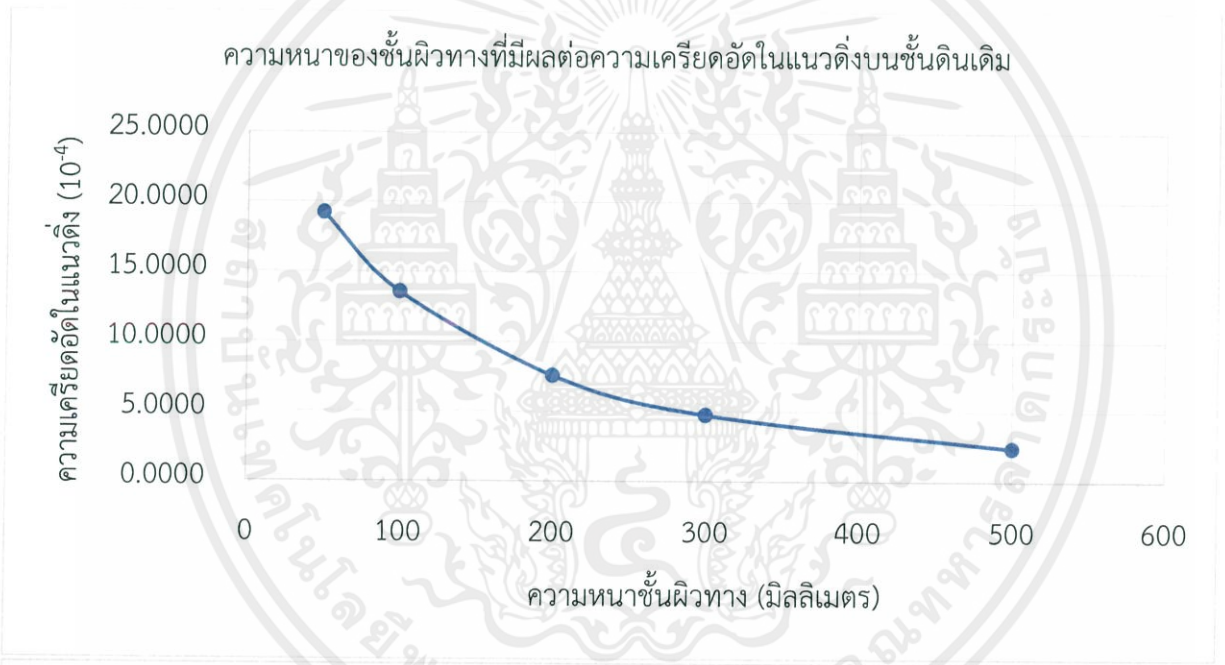
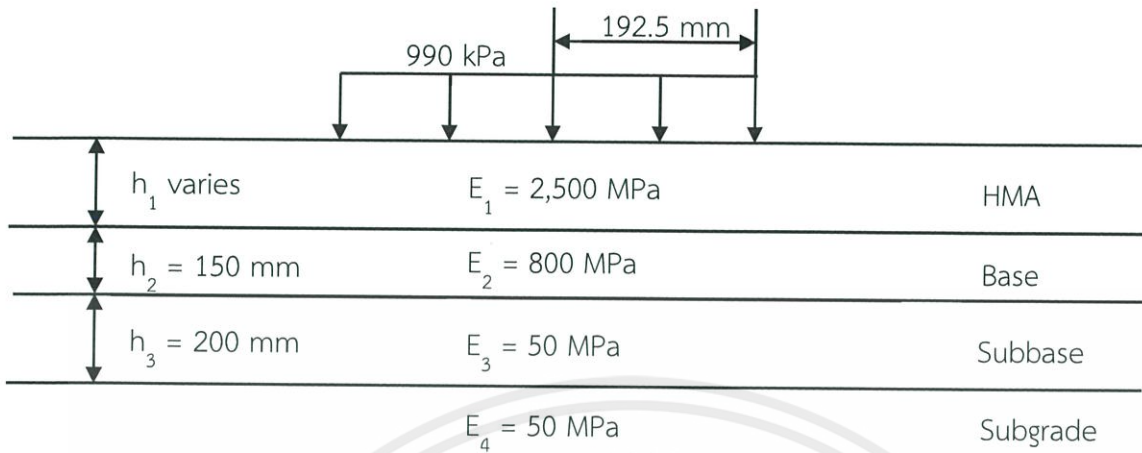
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



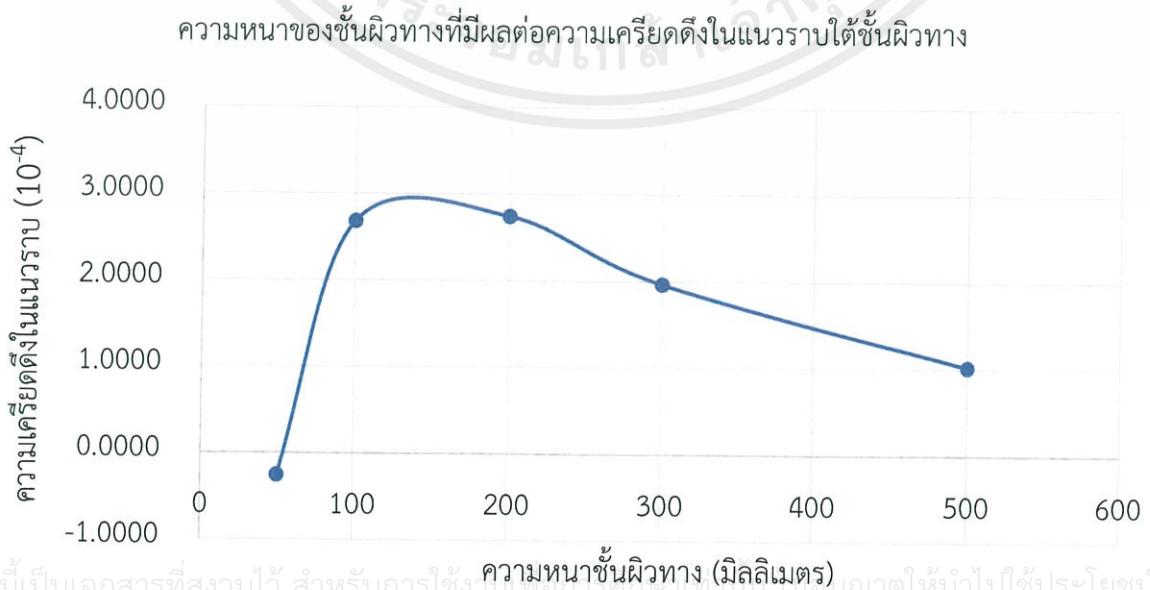
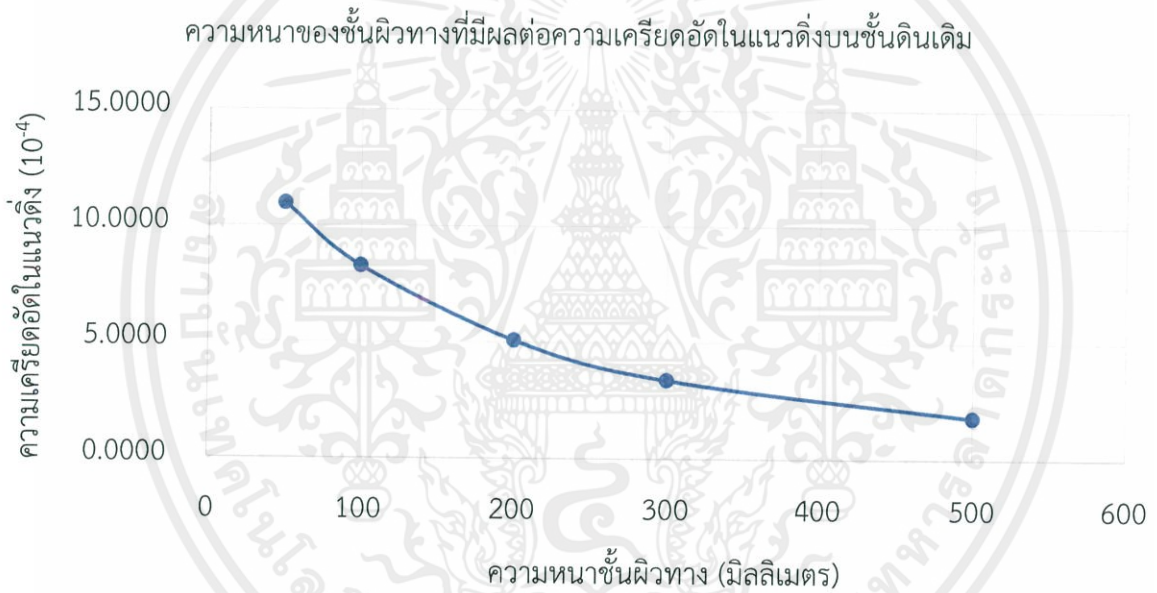
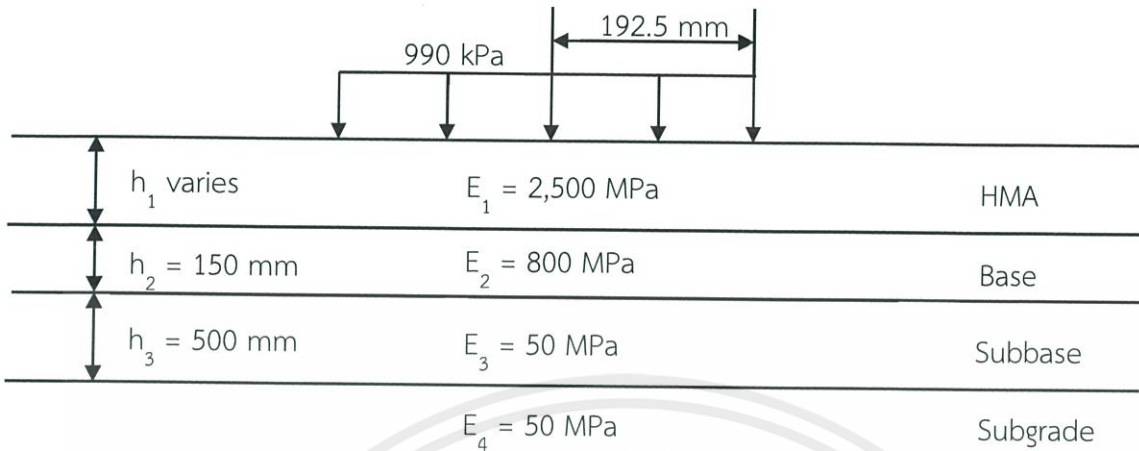
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



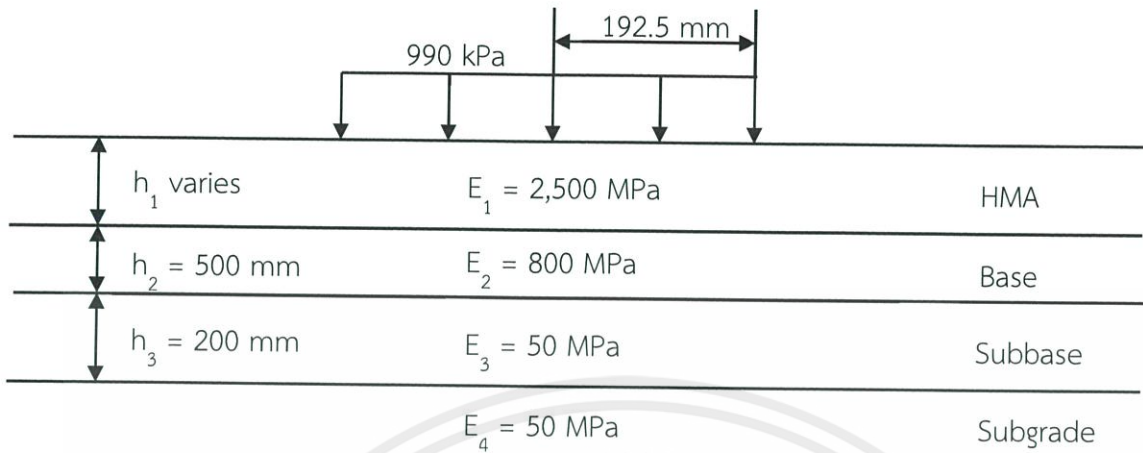
### กรณีศึกษาที่ 25



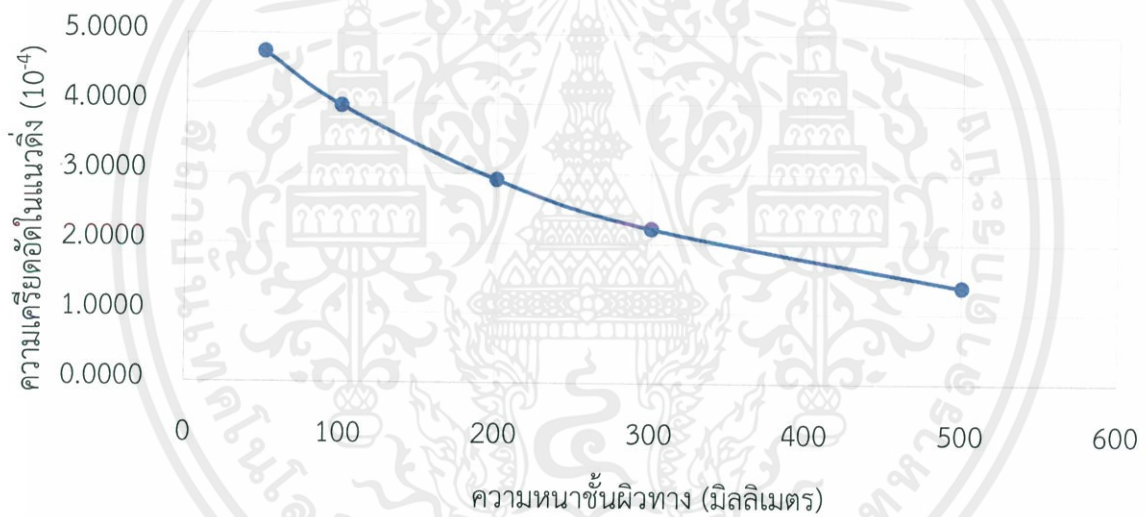
## กรณีศึกษาที่ 26



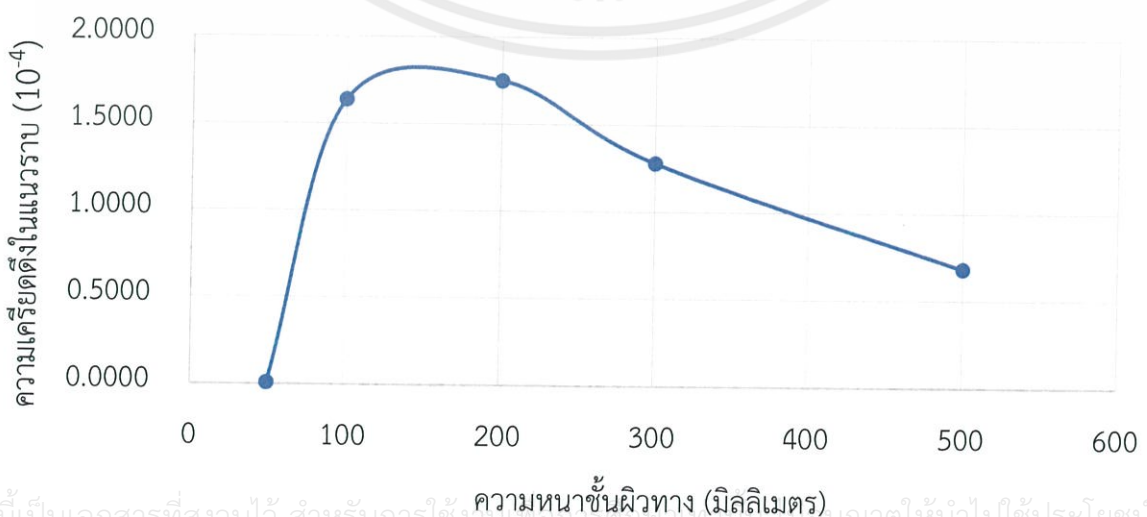
### กรณีศึกษาที่ 27



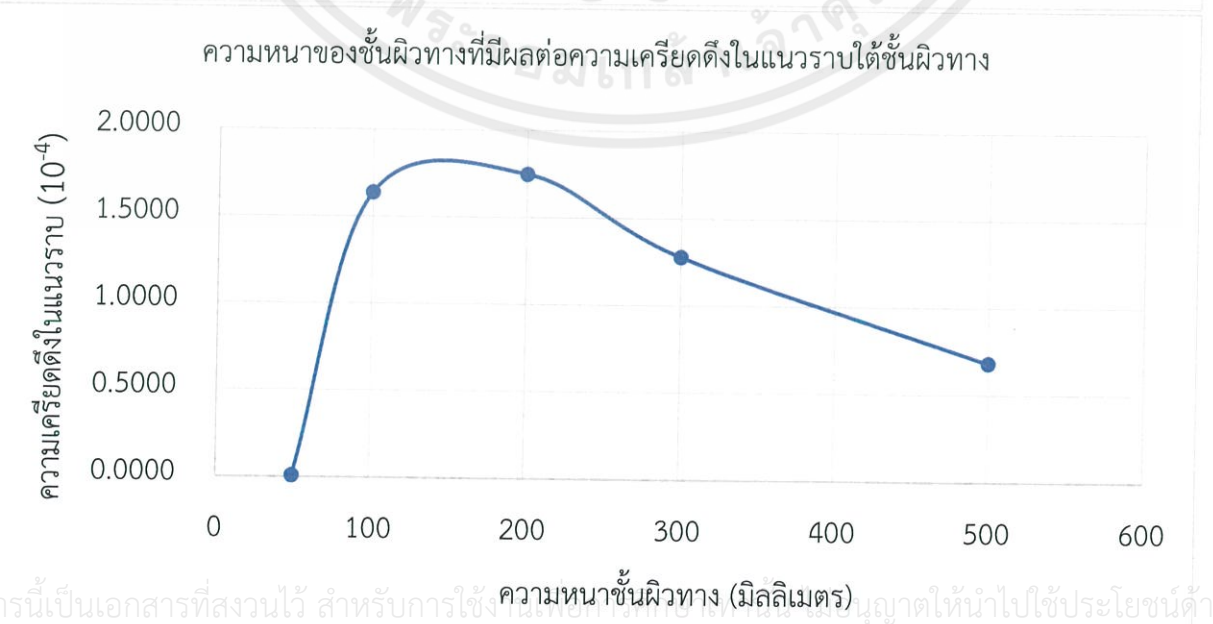
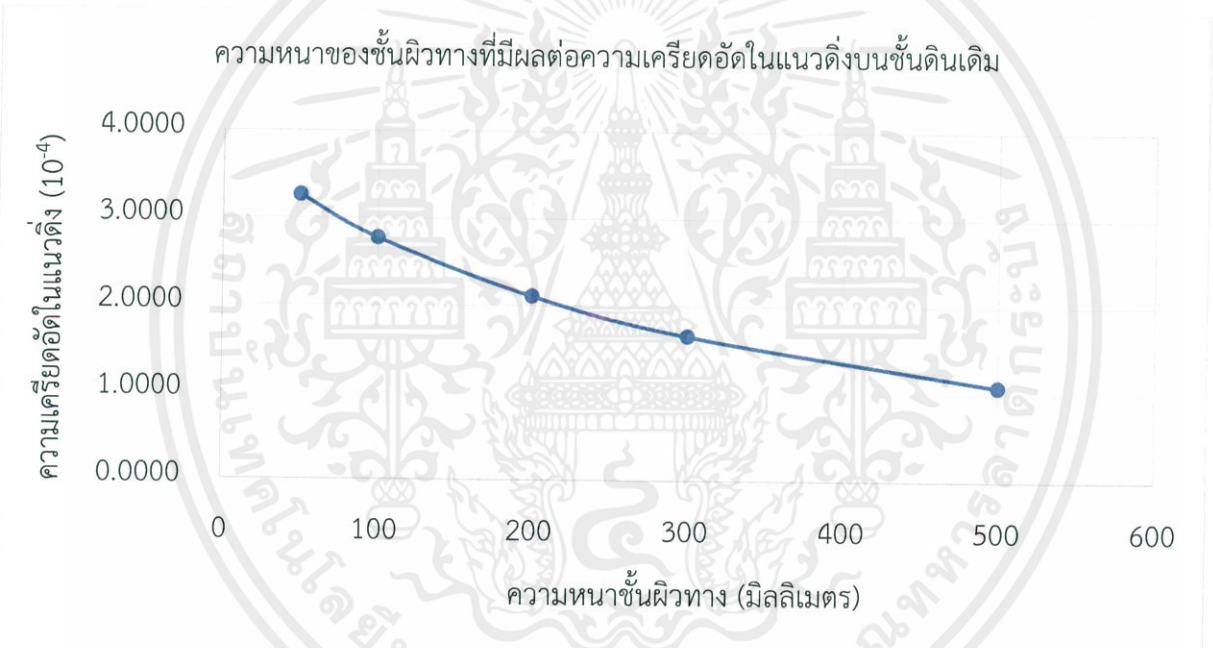
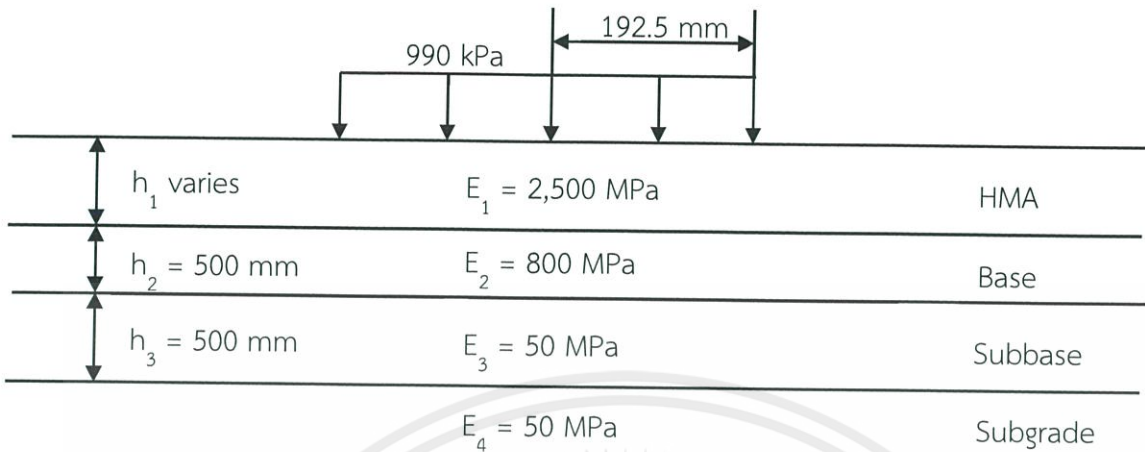
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



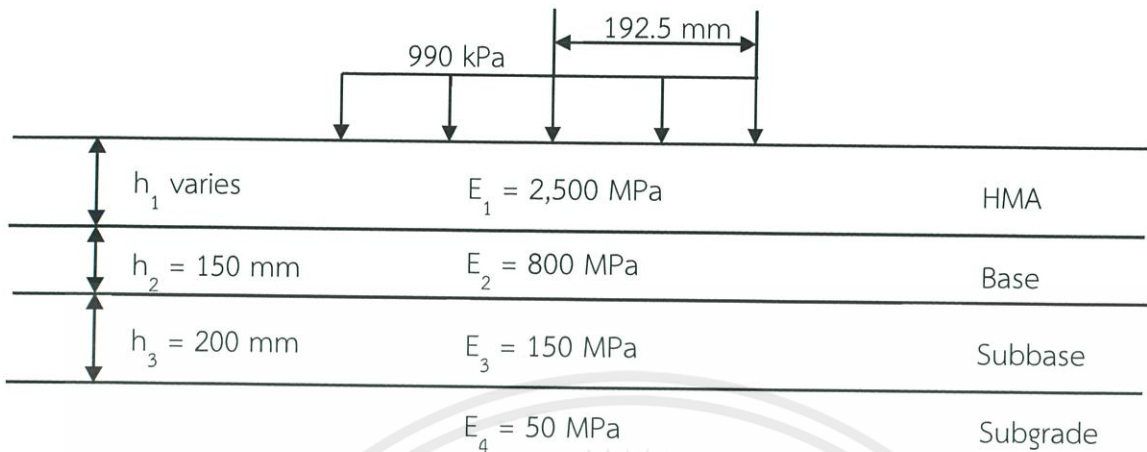
ความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



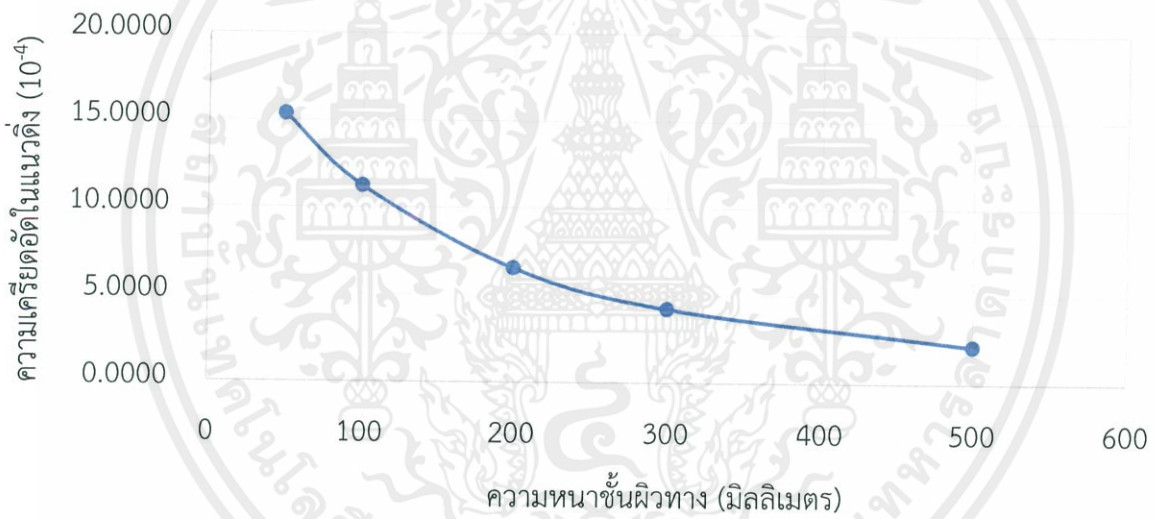
### กรณีศึกษาที่ 28



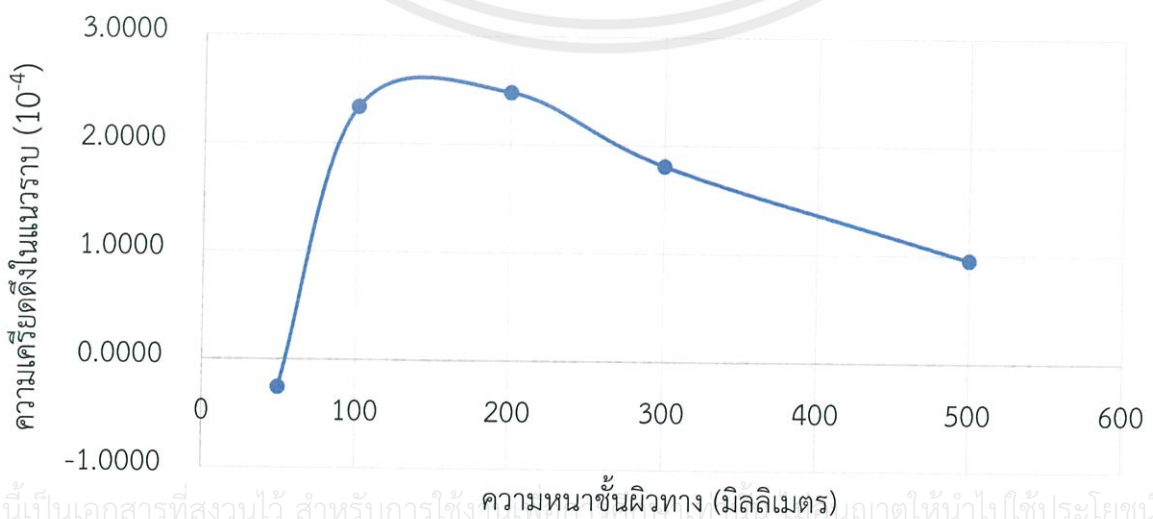
### กรณีศึกษาที่ 29



ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวดิ่ง



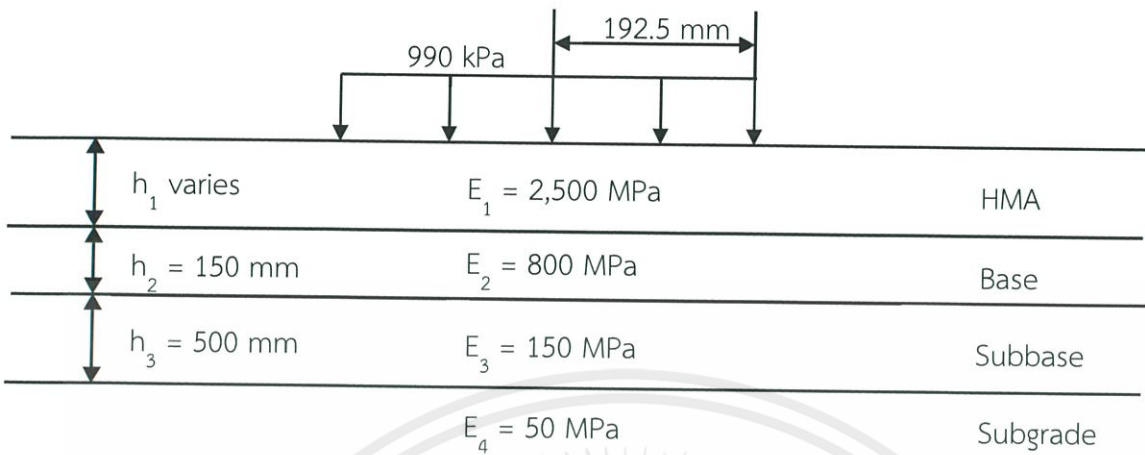
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



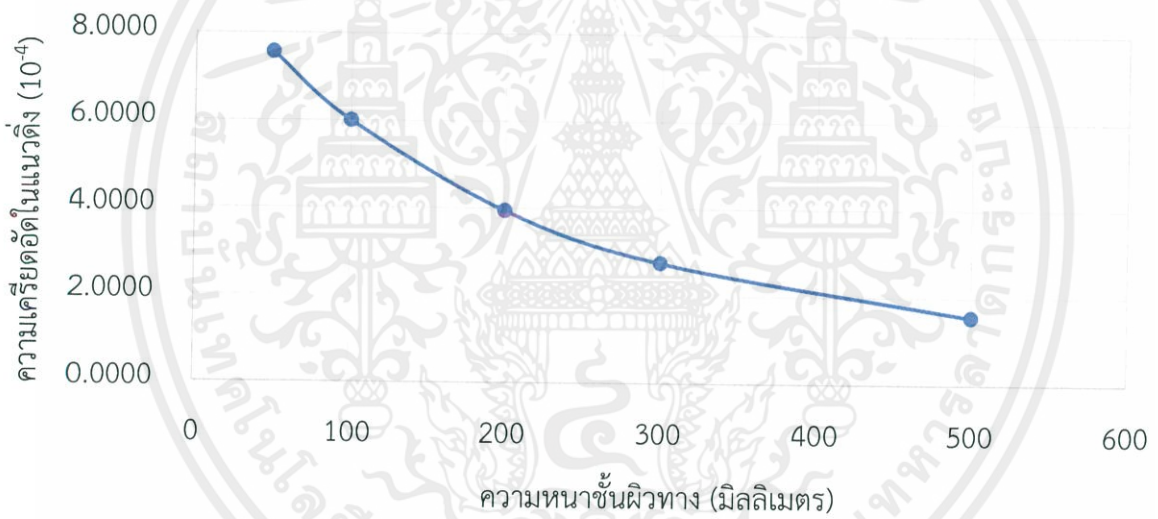
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้นิติบุคคลที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

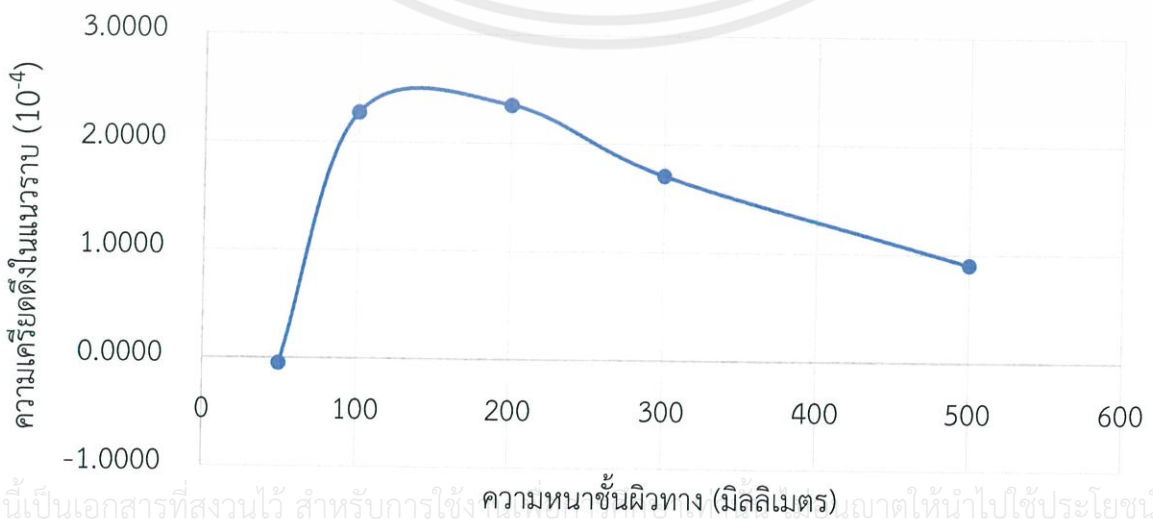
### กรณีศึกษาที่ 30



ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



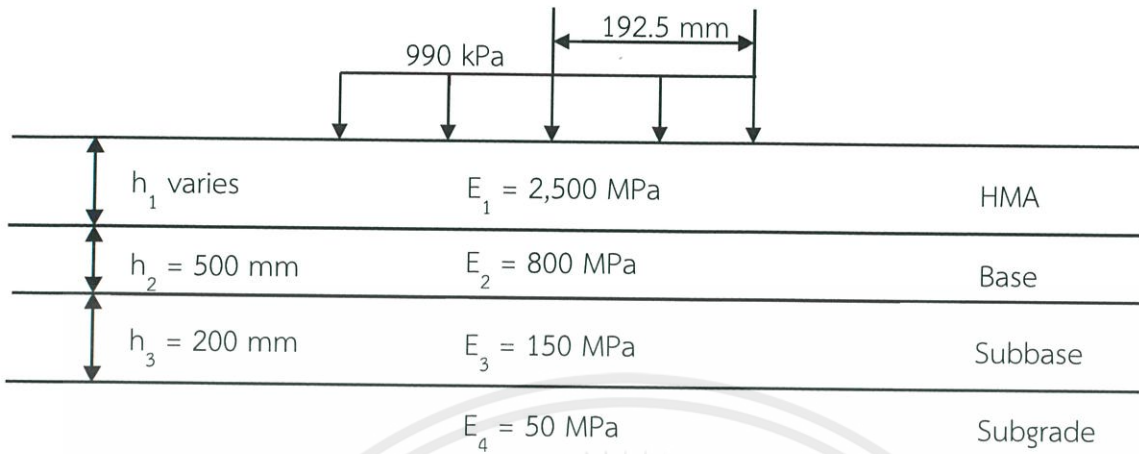
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



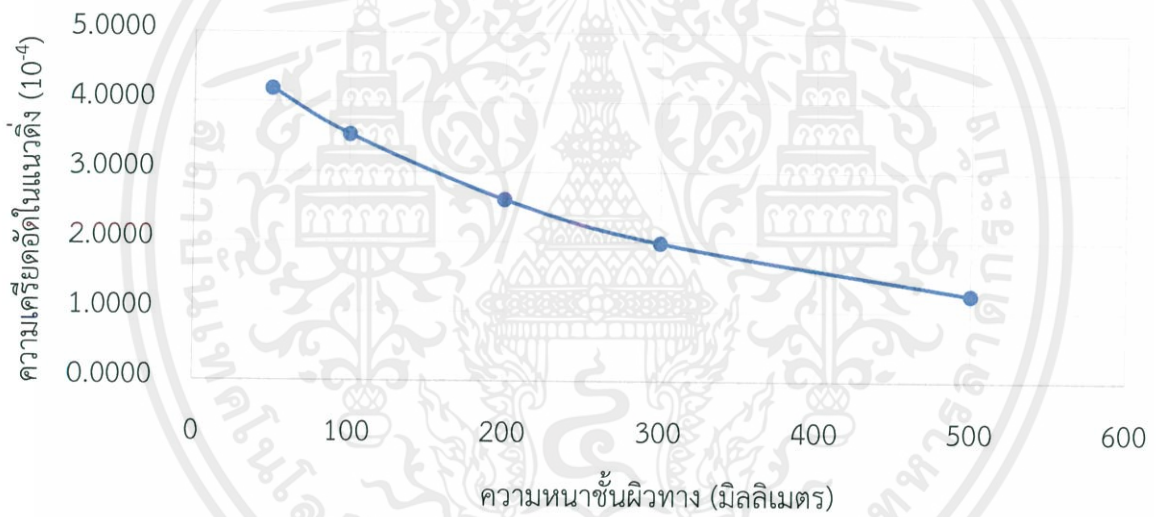
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่ให้บุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

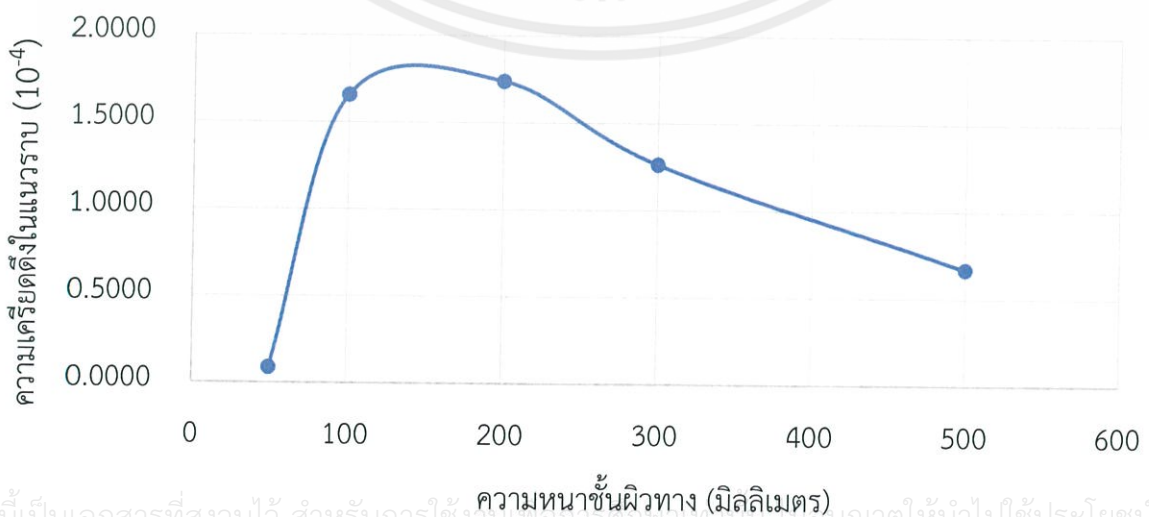
### กรณีศึกษาที่ 31



ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



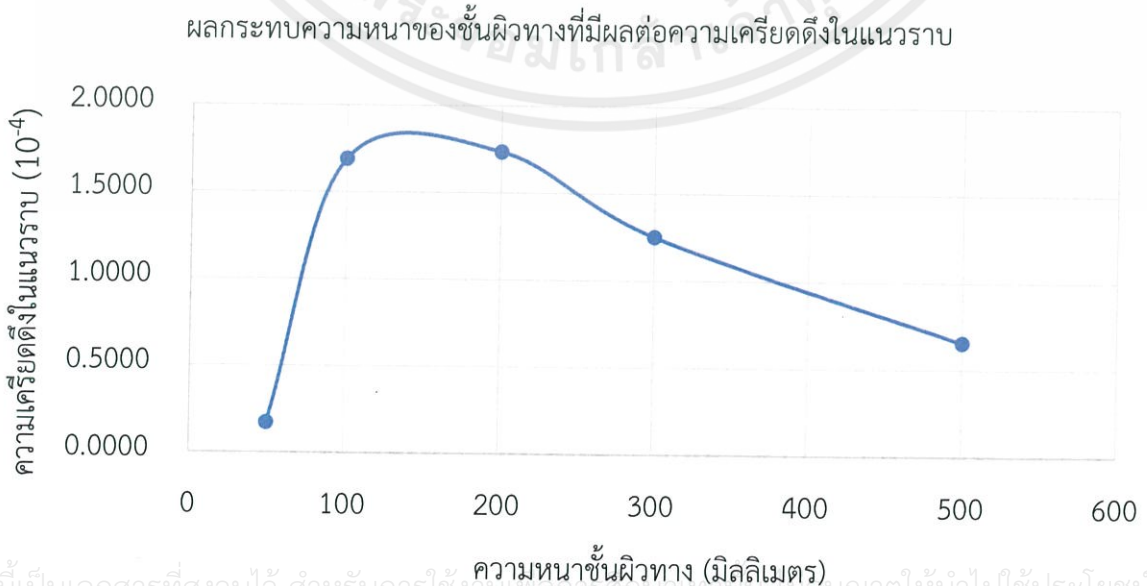
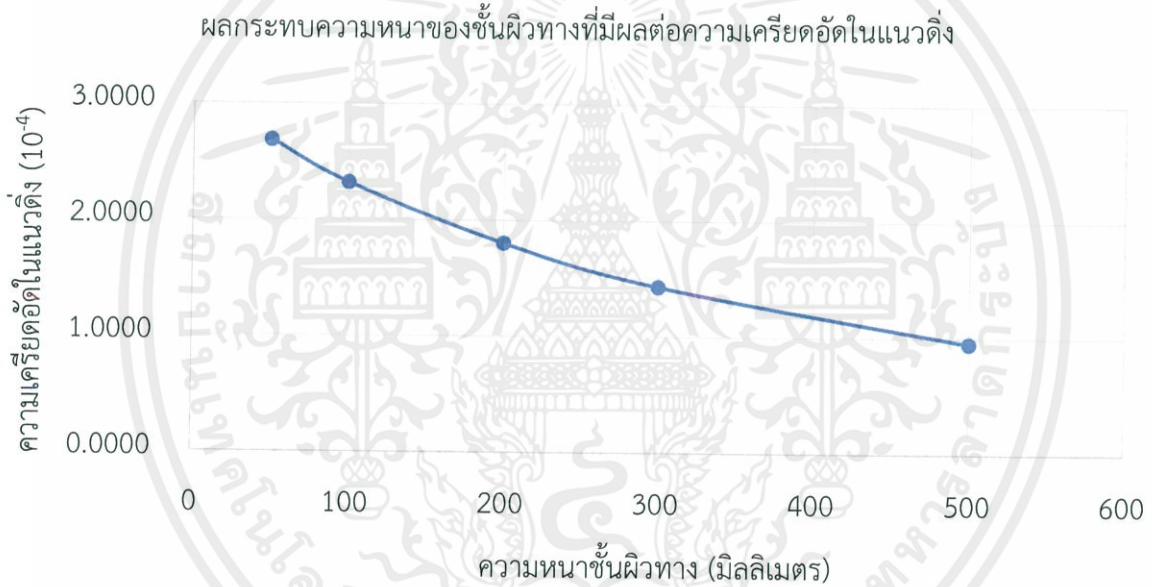
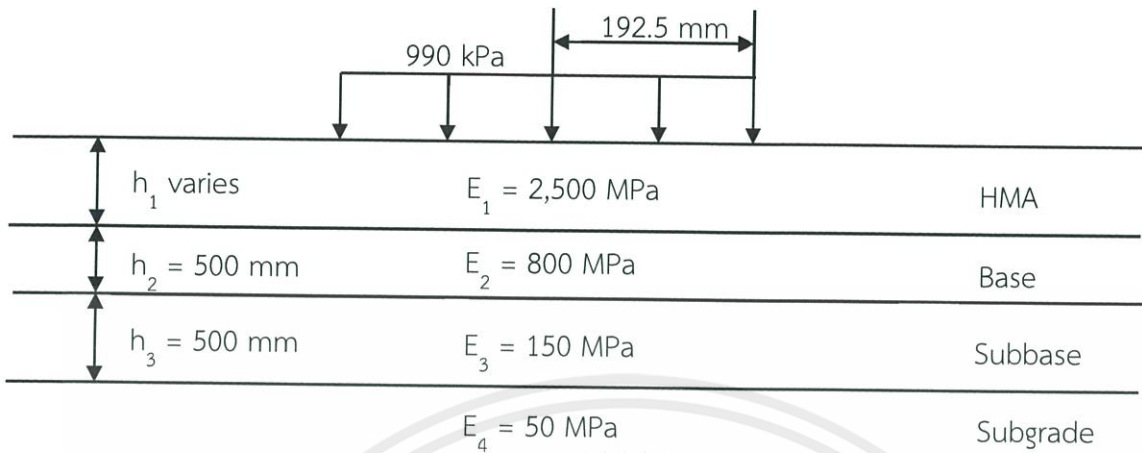
ผลกระทบความหนาของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



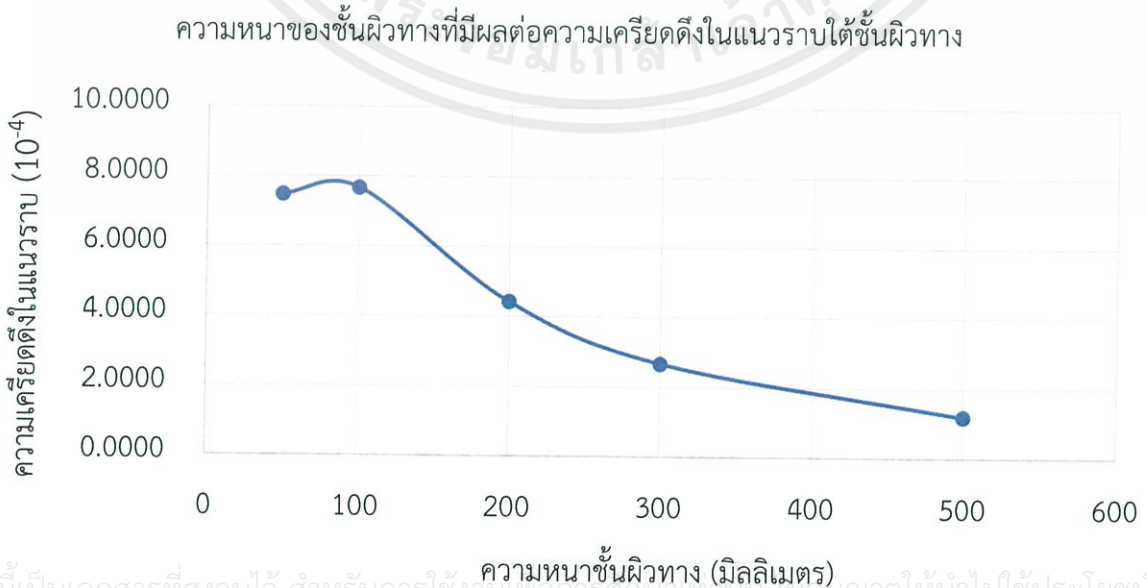
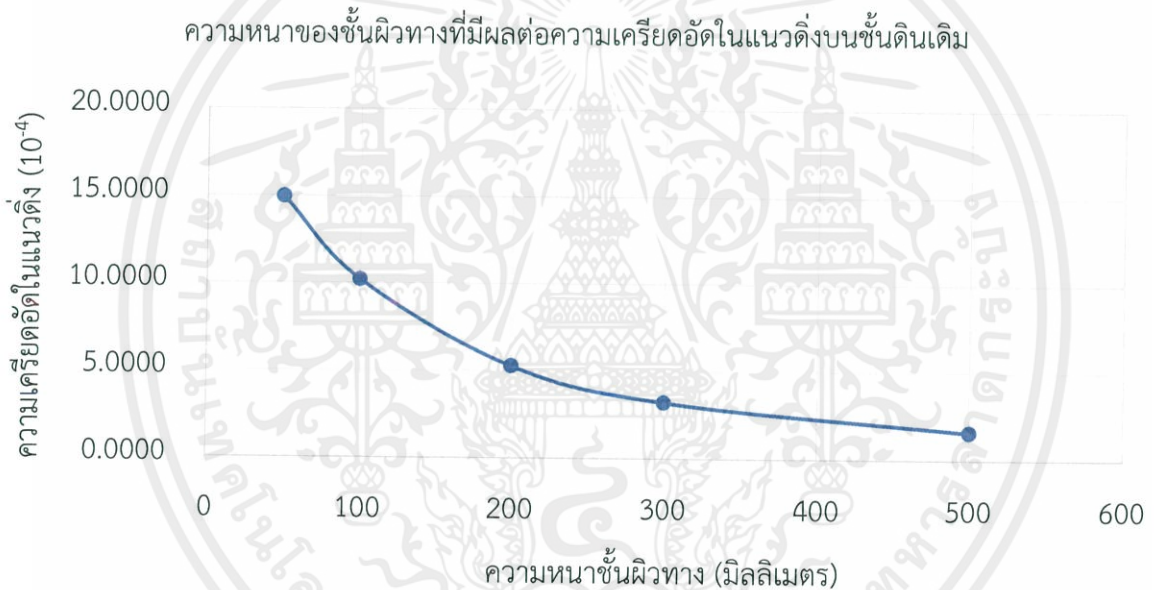
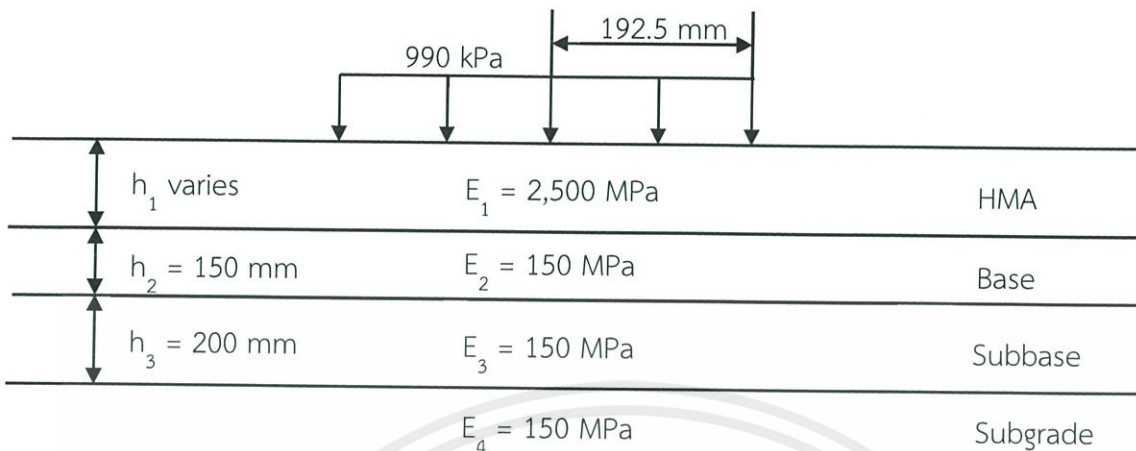
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

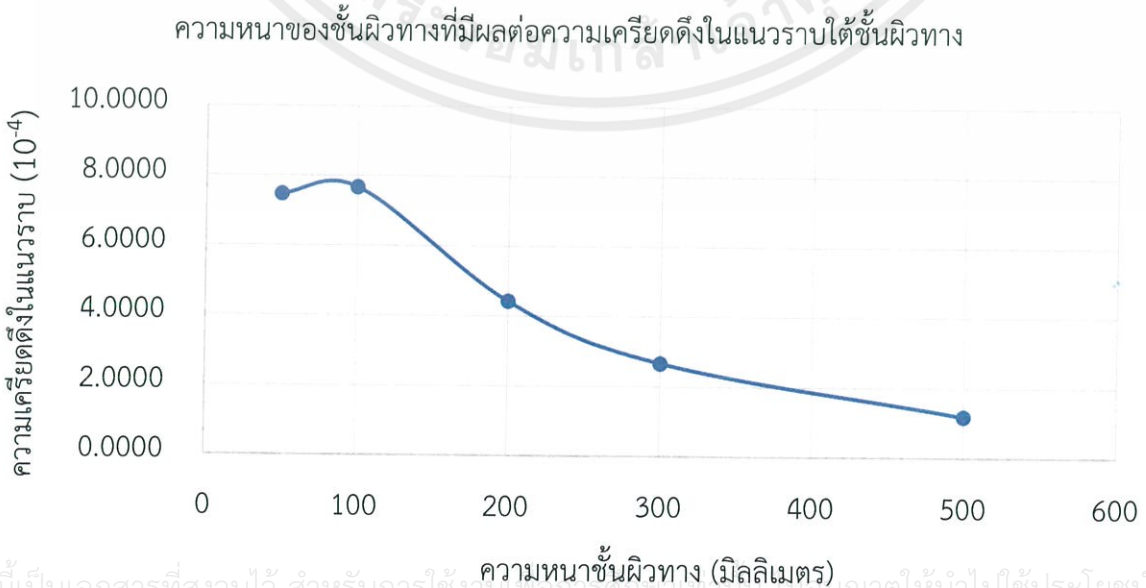
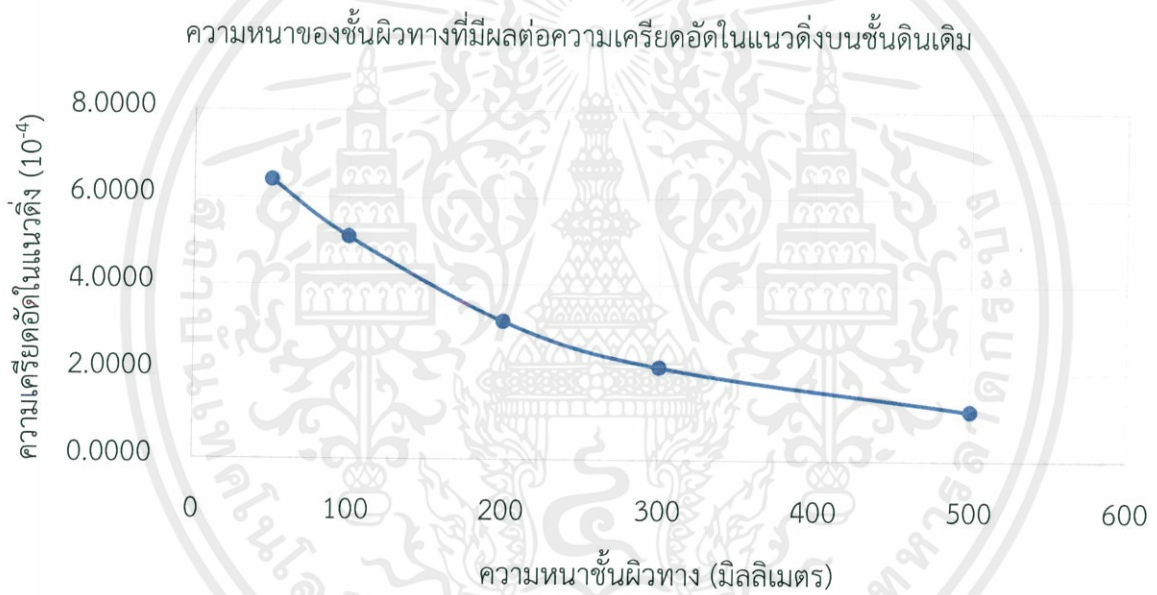
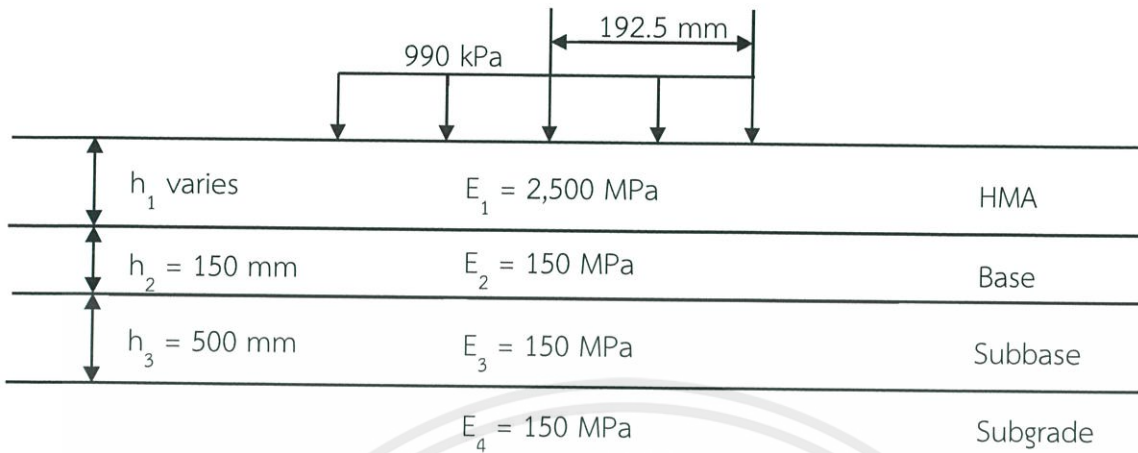
### กรณีศึกษาที่ 32



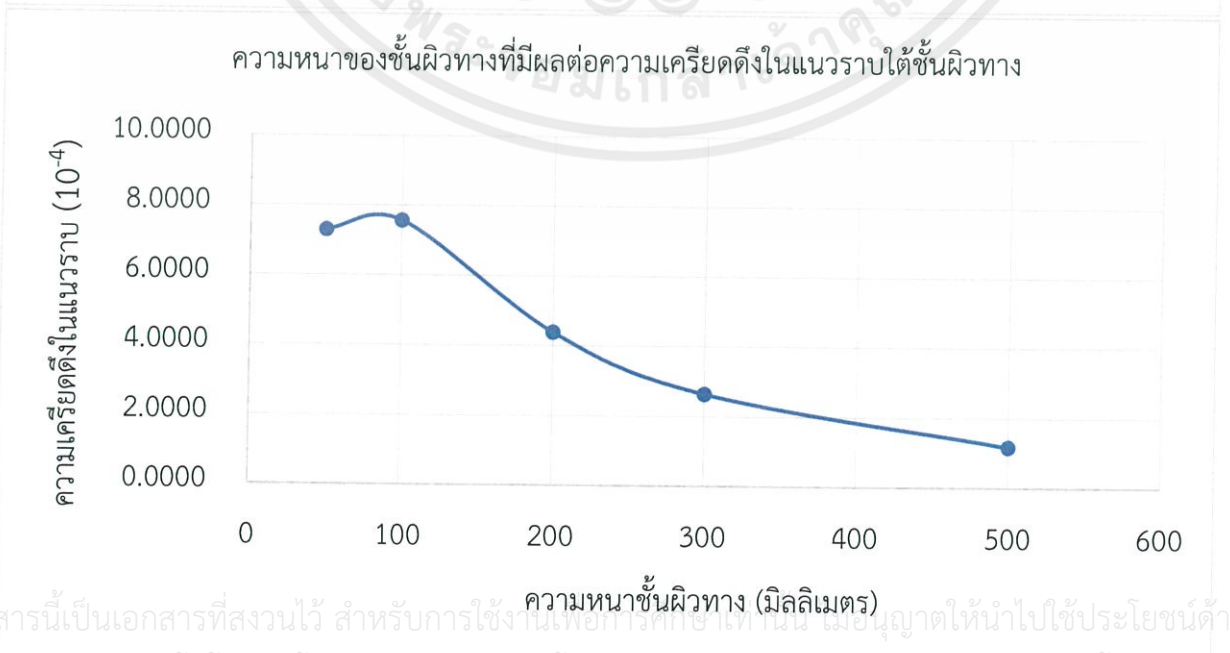
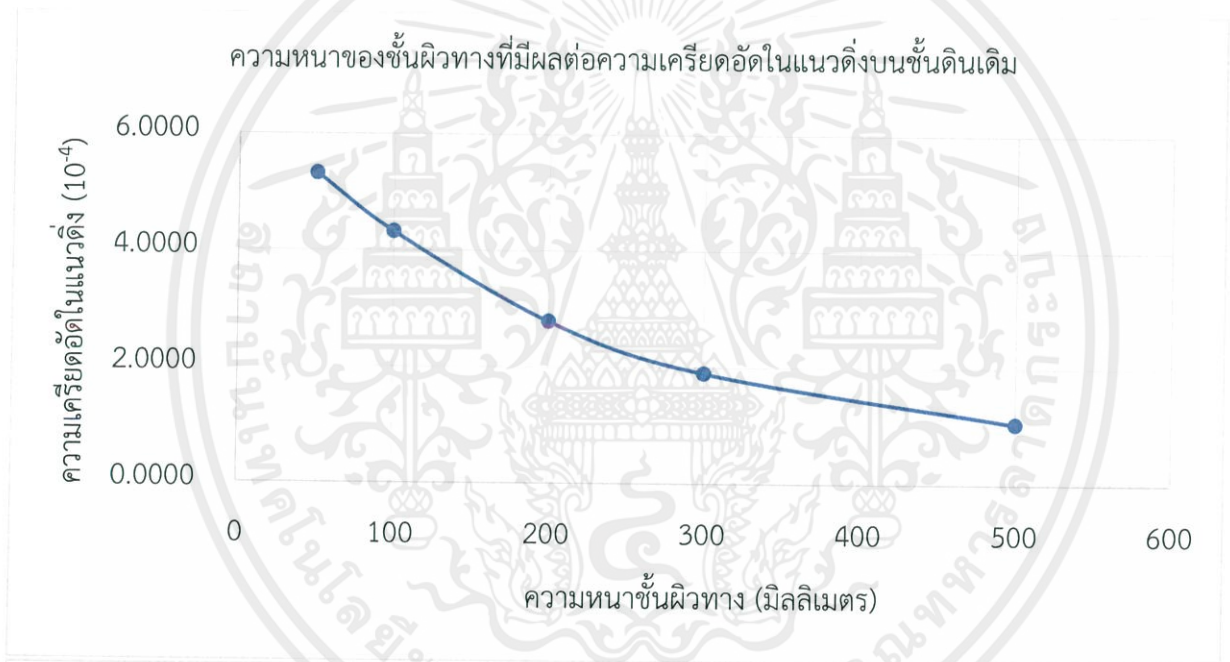
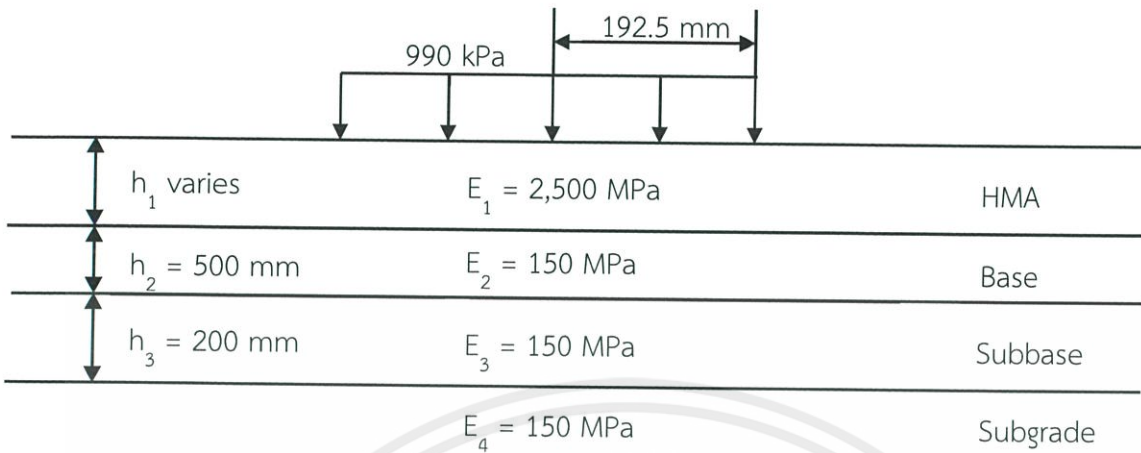
### กรณีศึกษาที่ 33



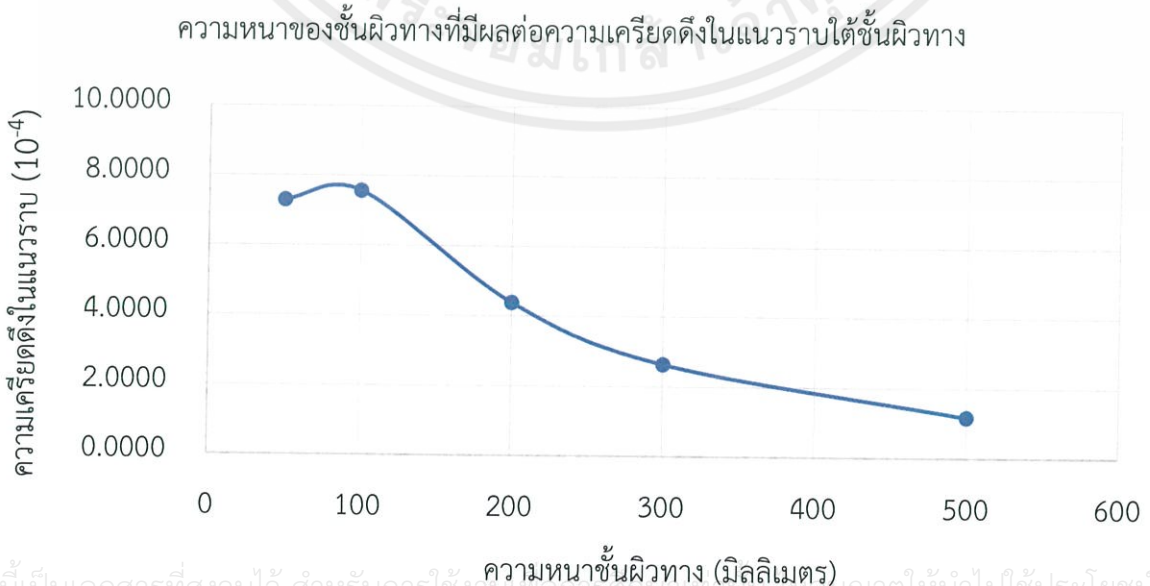
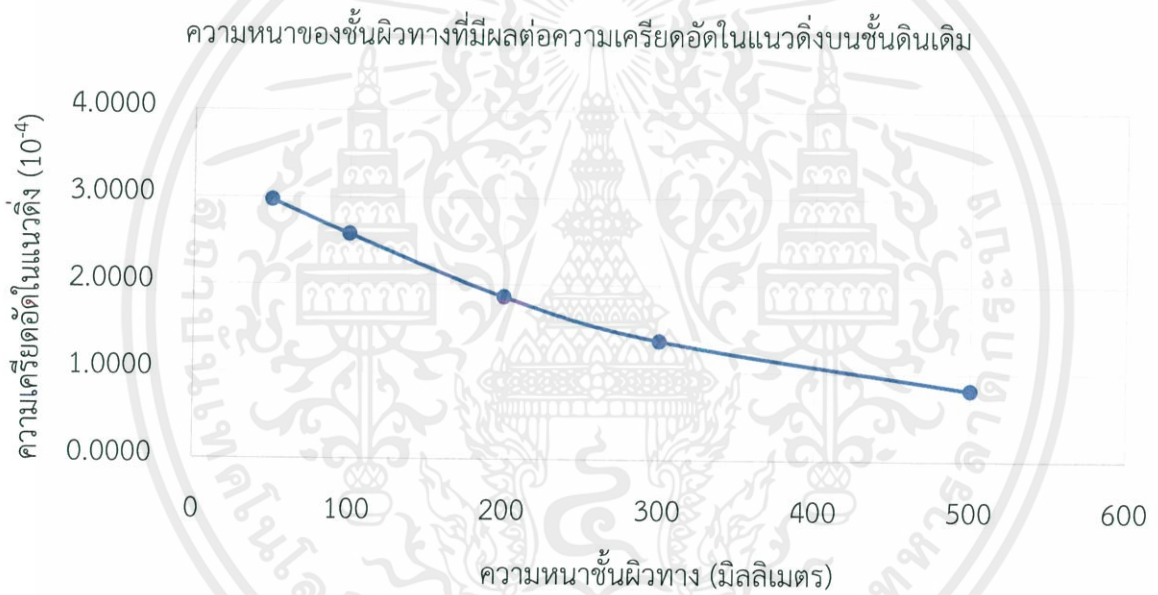
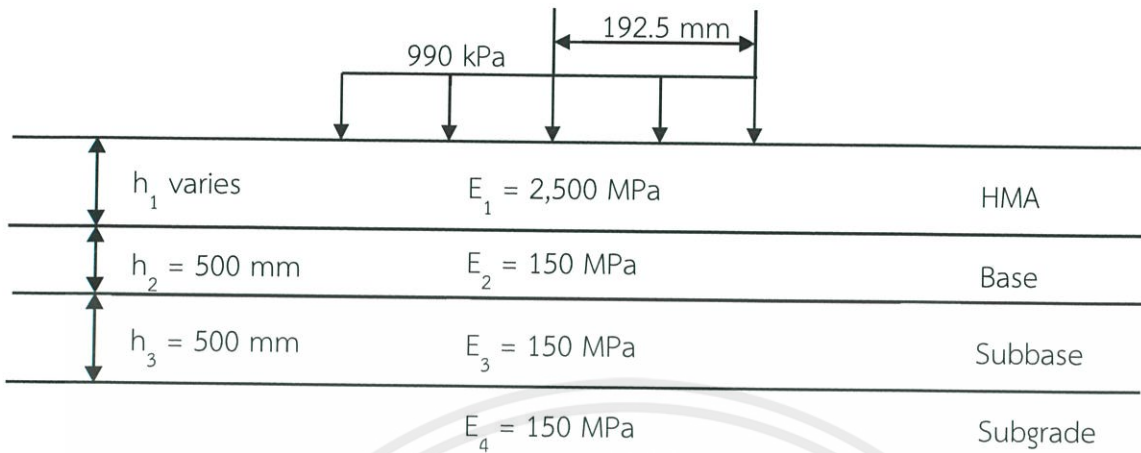
### กรณีศึกษาที่ 34



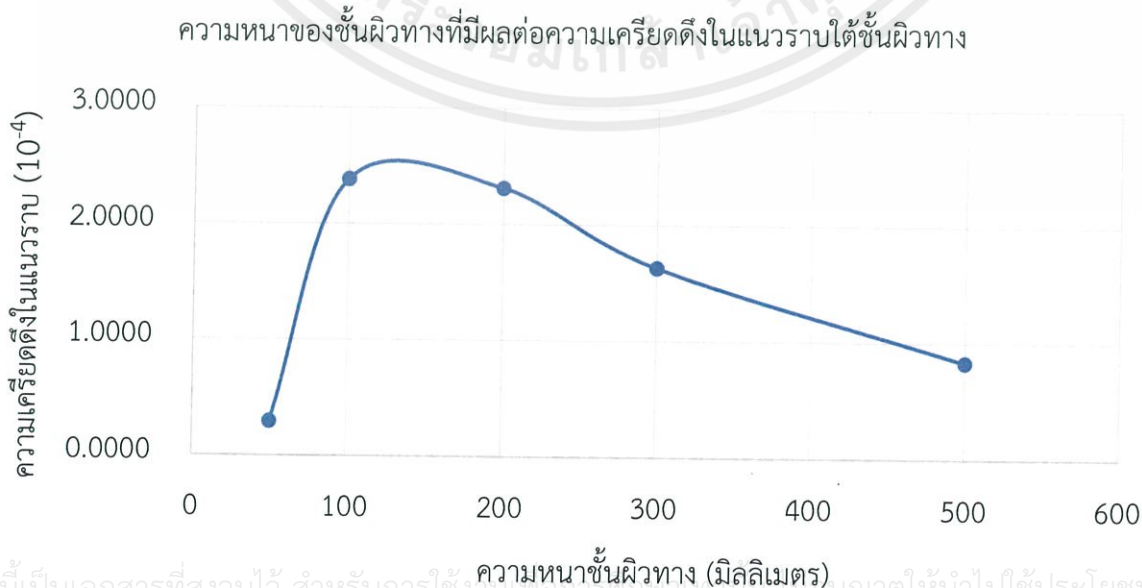
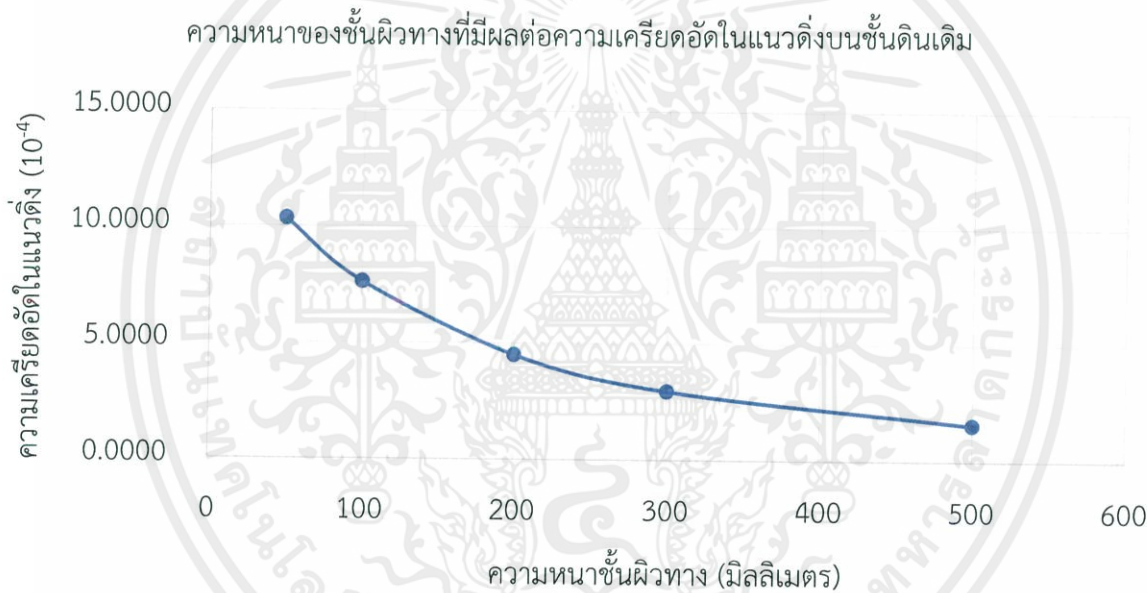
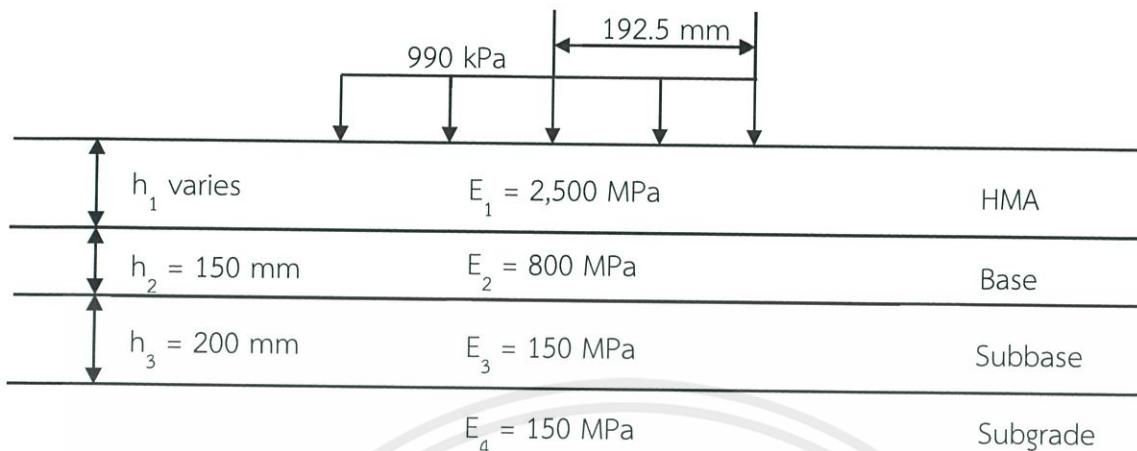
### กรณีศึกษาที่ 35



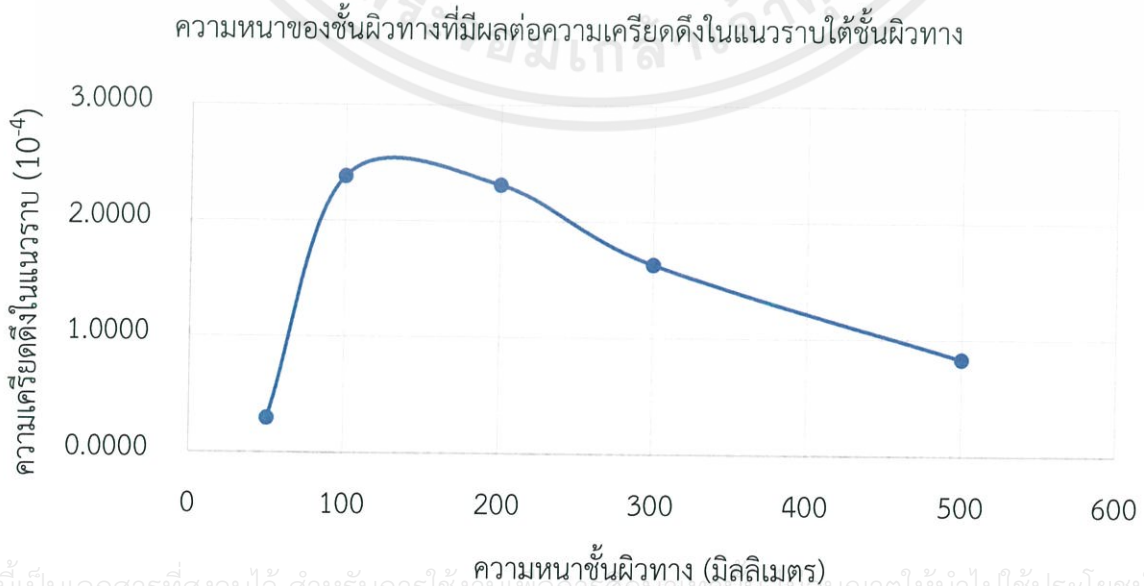
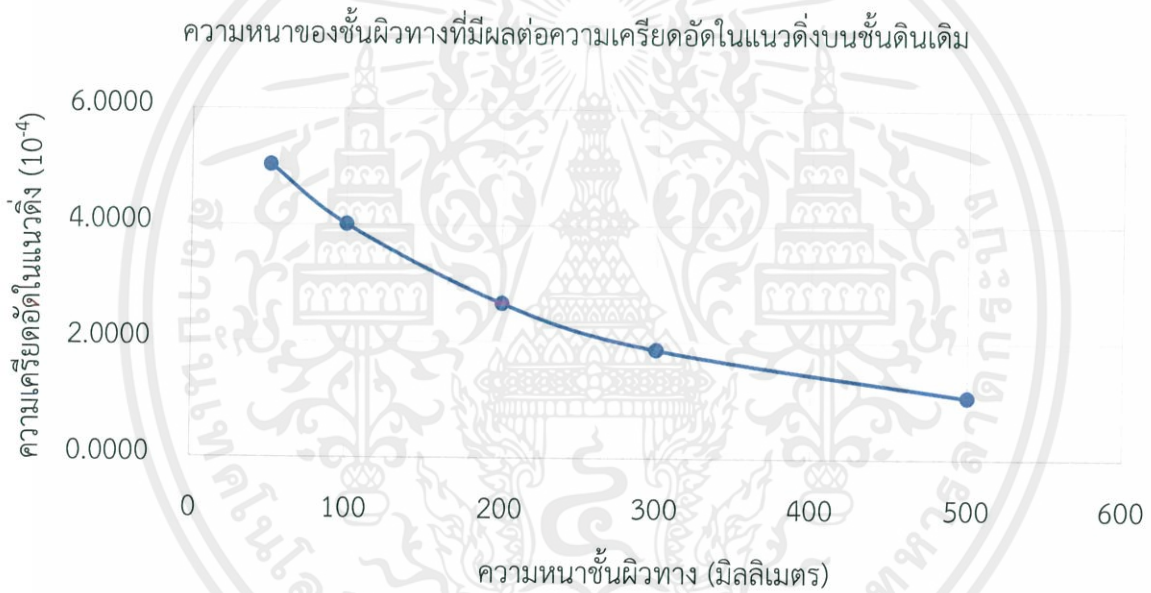
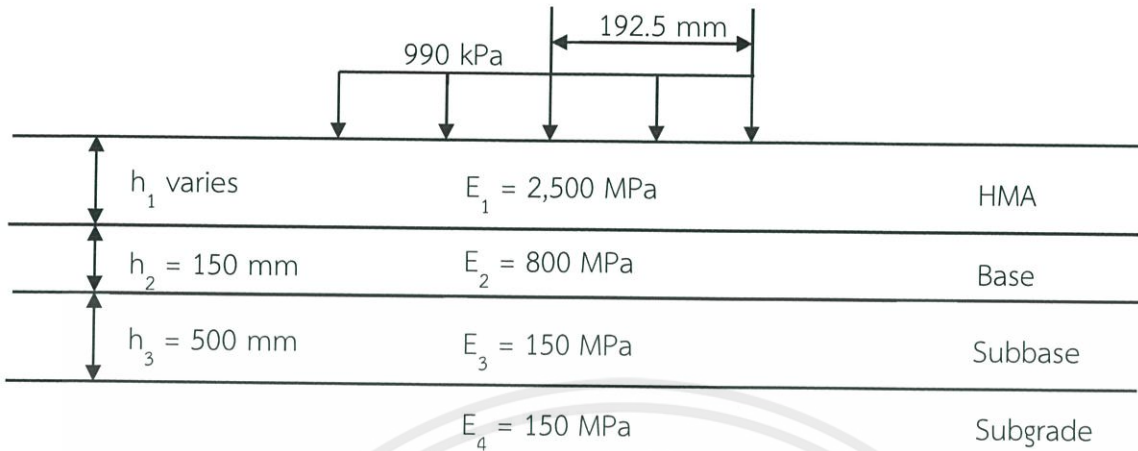
### กรณีศึกษาที่ 36



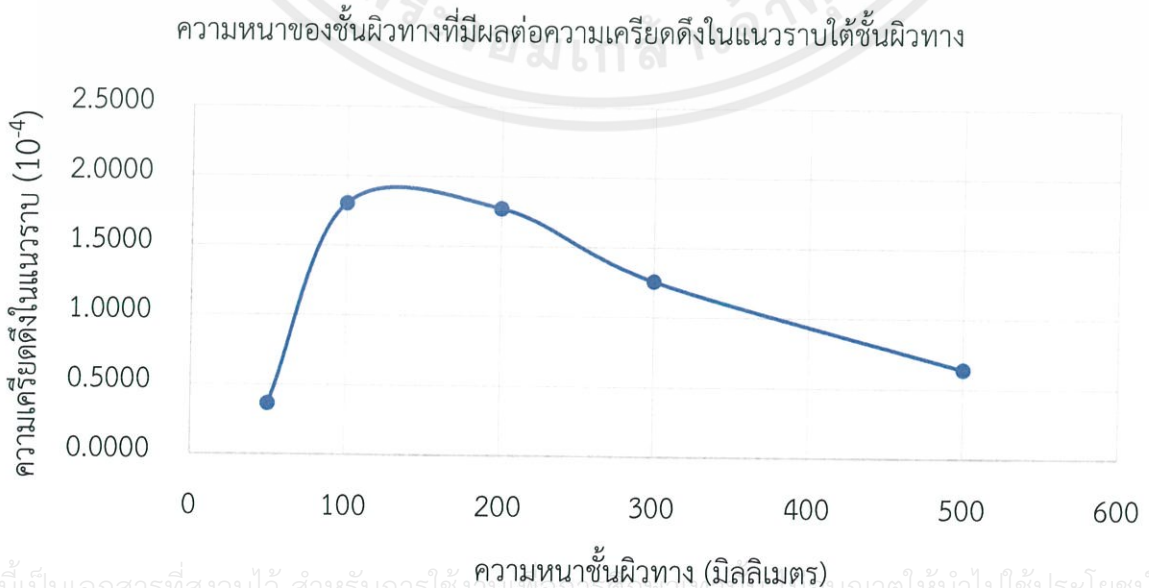
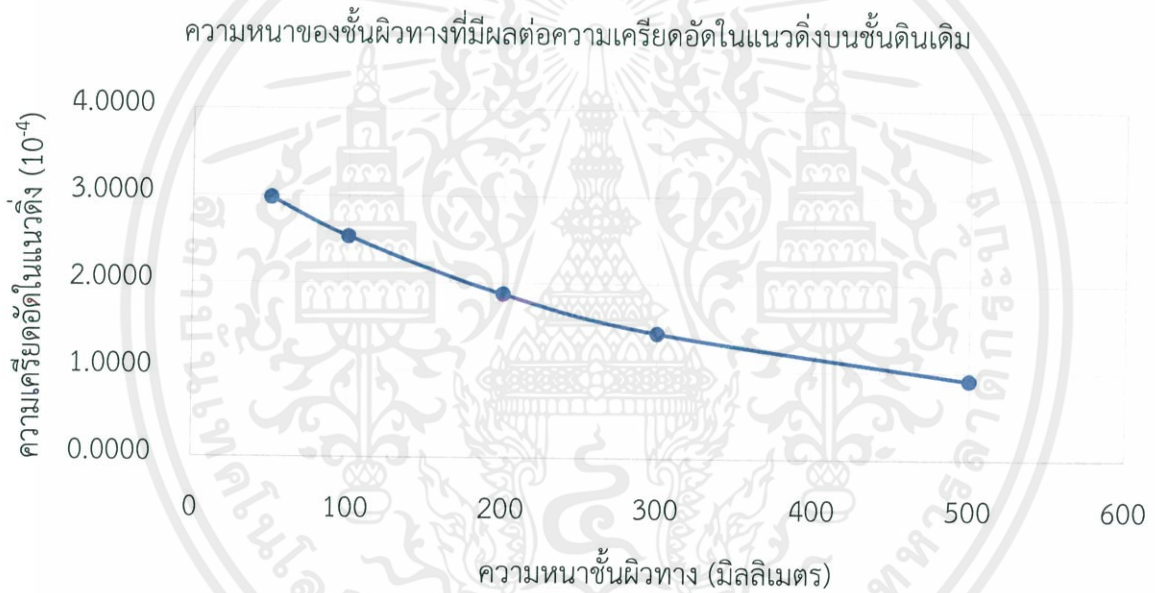
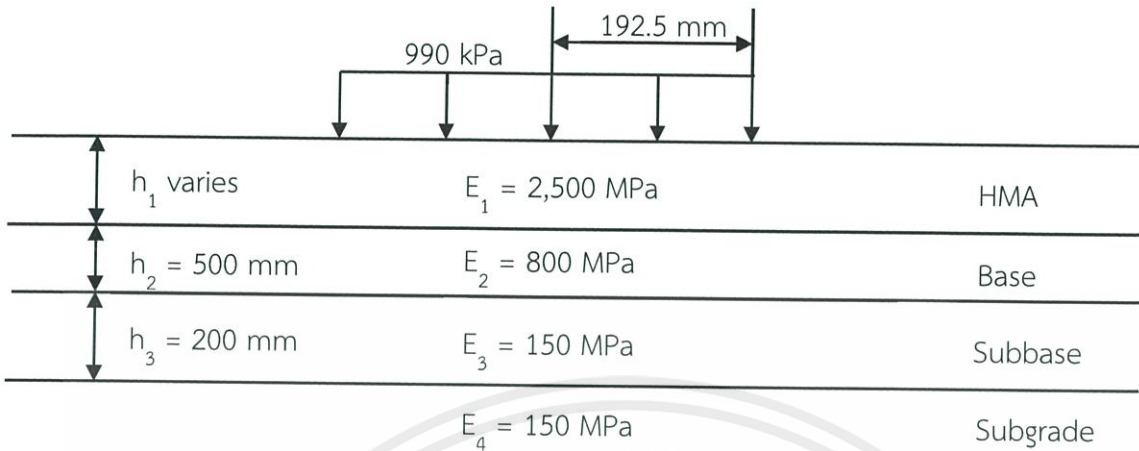
### กรณีศึกษาที่ 37



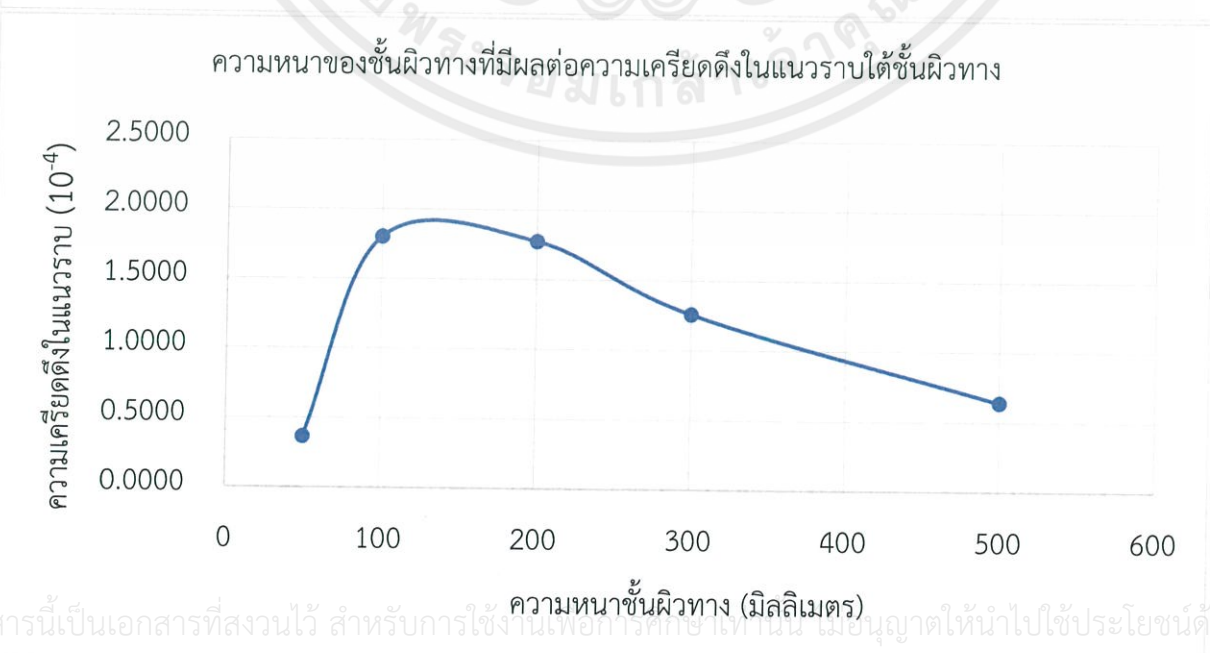
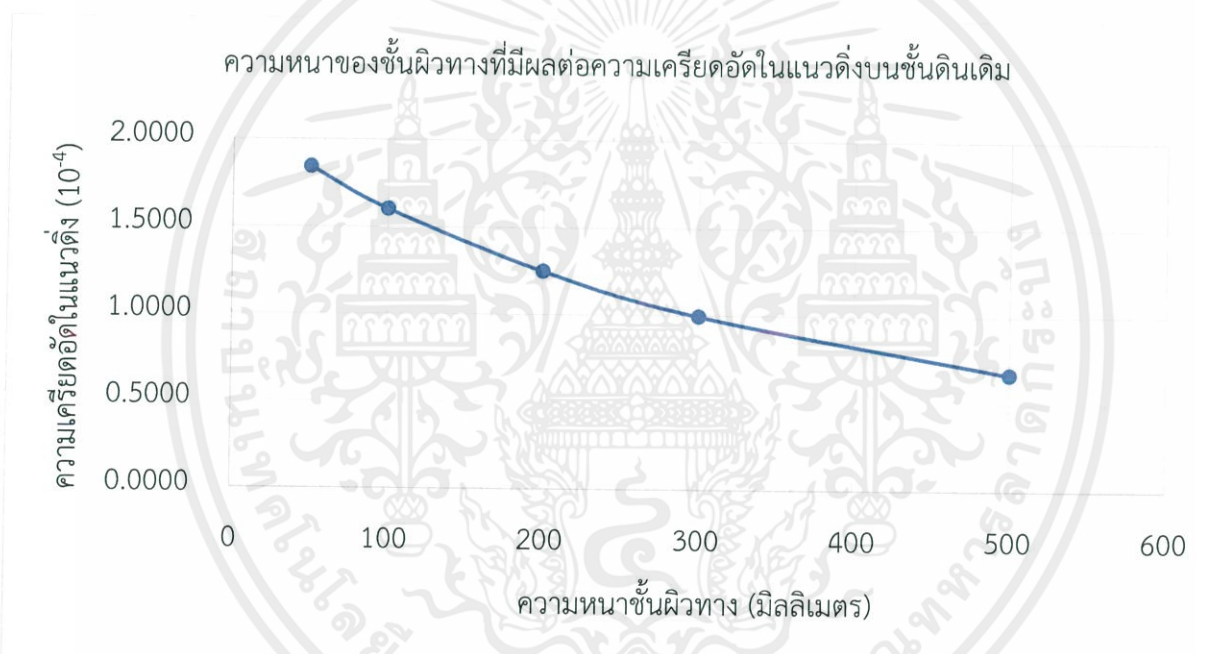
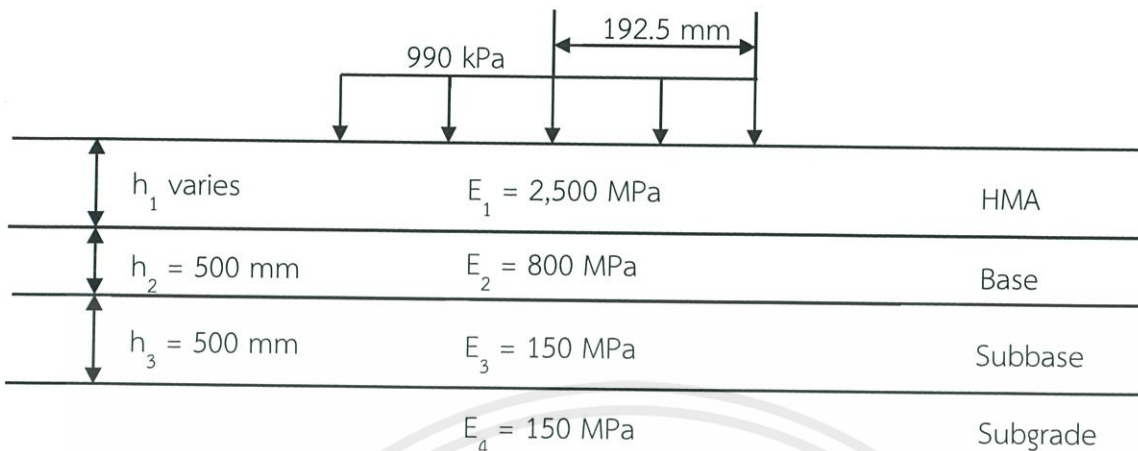
### กรณีศึกษาที่ 38




### กรณีศึกษาที่ 39



### กรณีศึกษาที่ 40

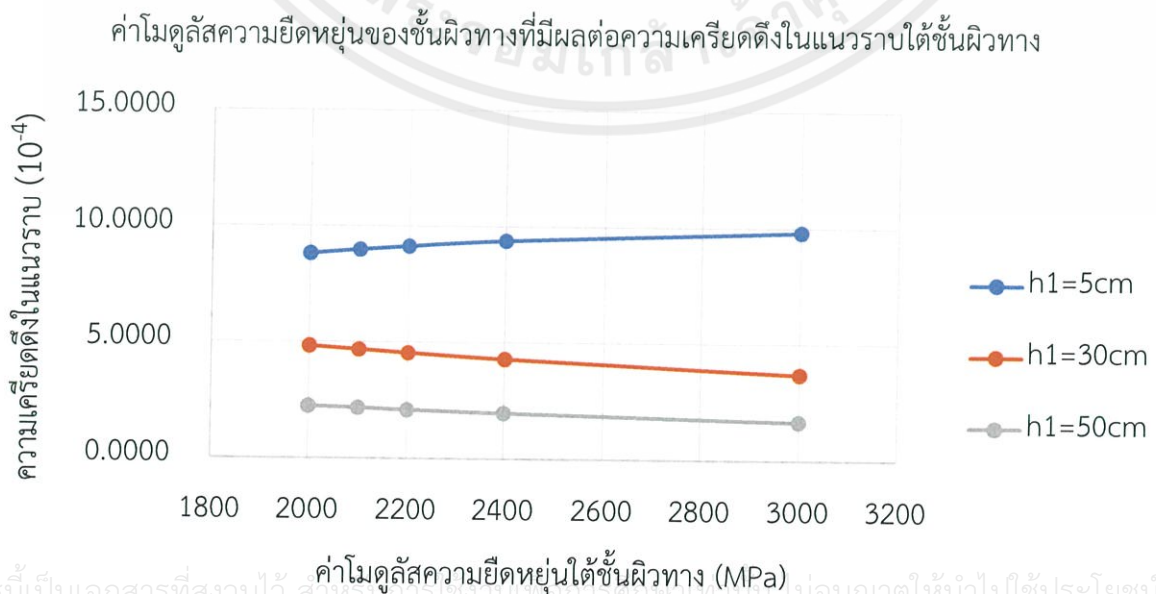
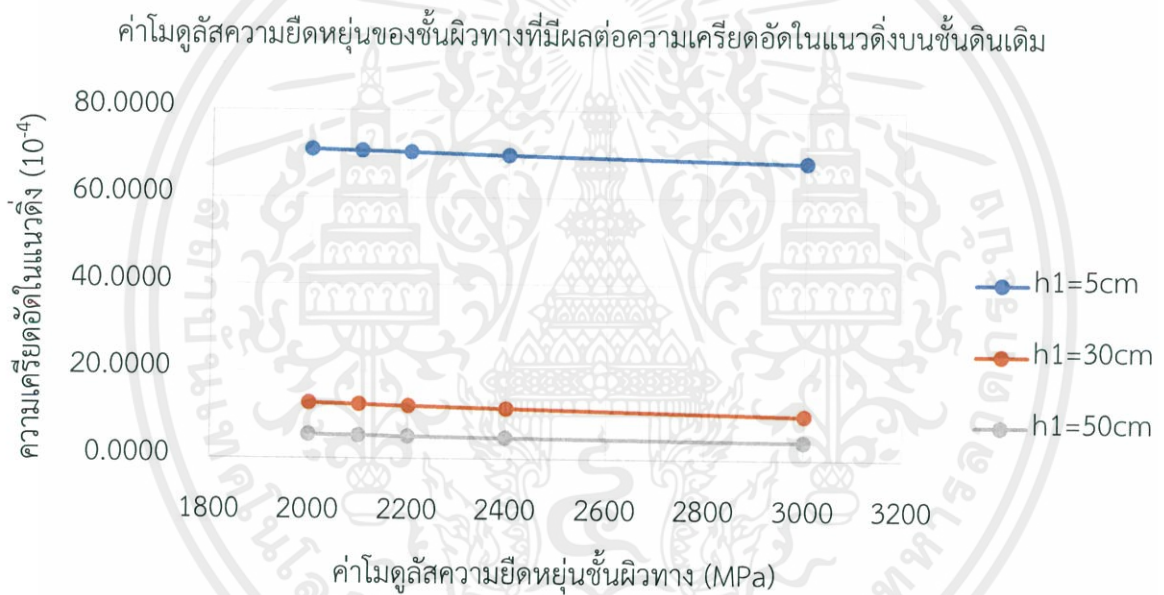
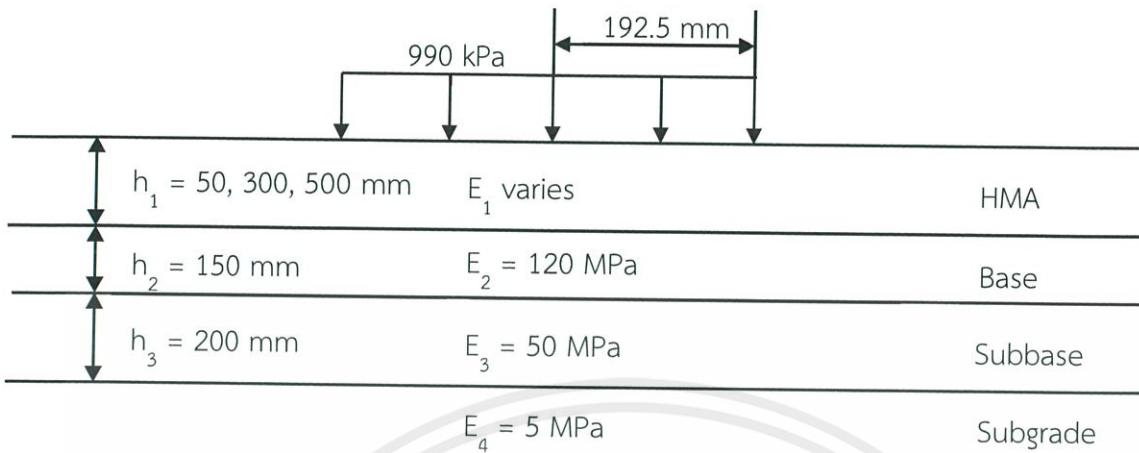


The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a crown-like structure. The entire emblem is surrounded by a decorative border. The text around the border reads "มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์" at the top and "พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" at the bottom.

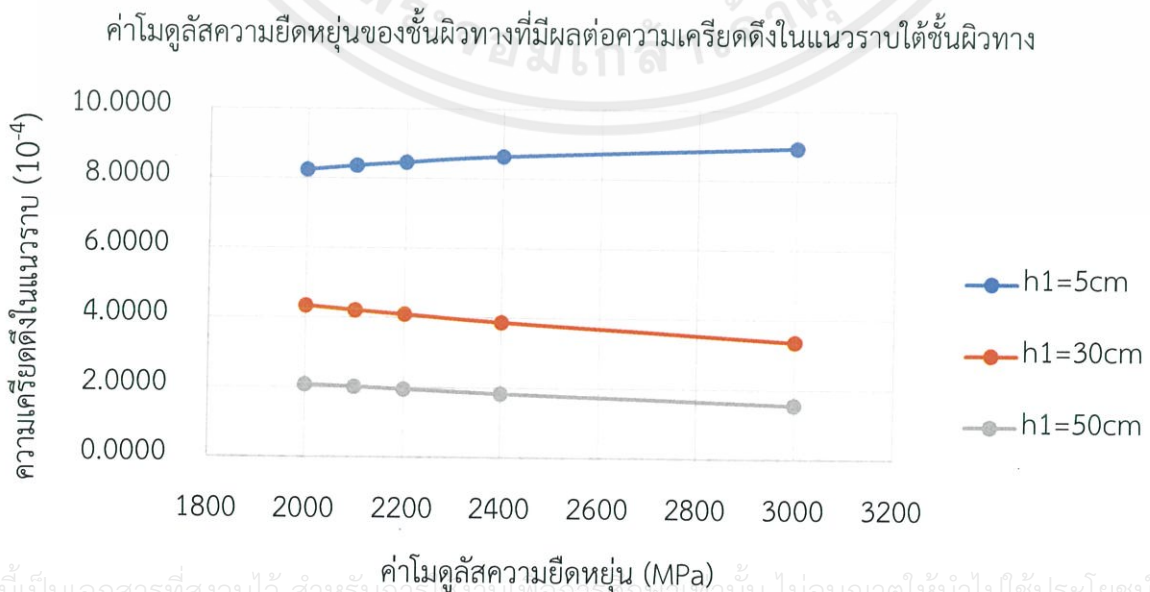
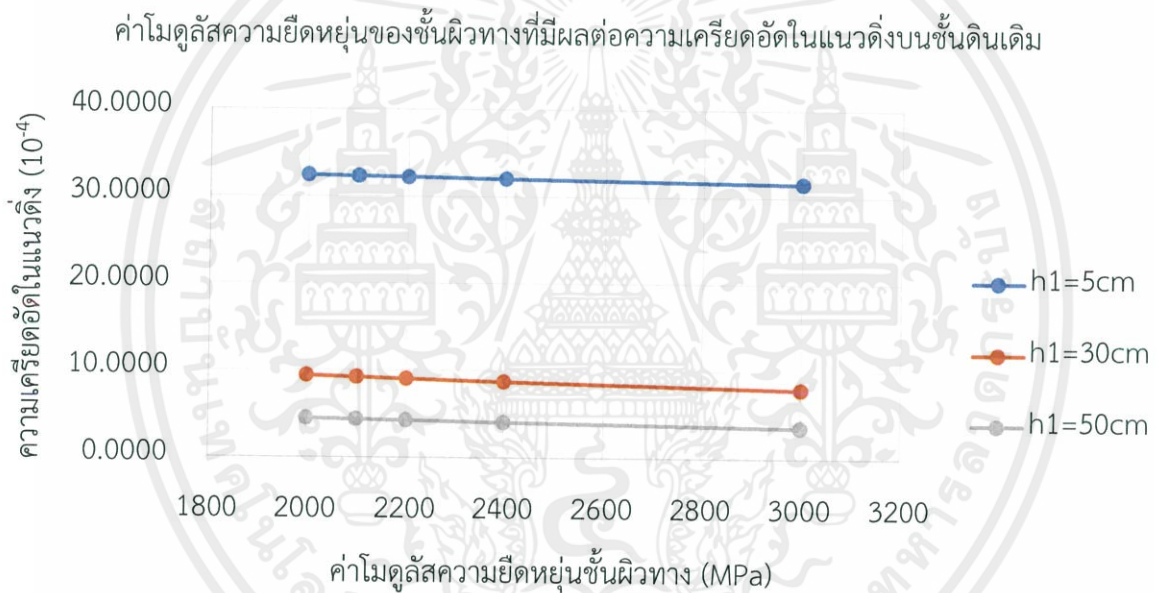
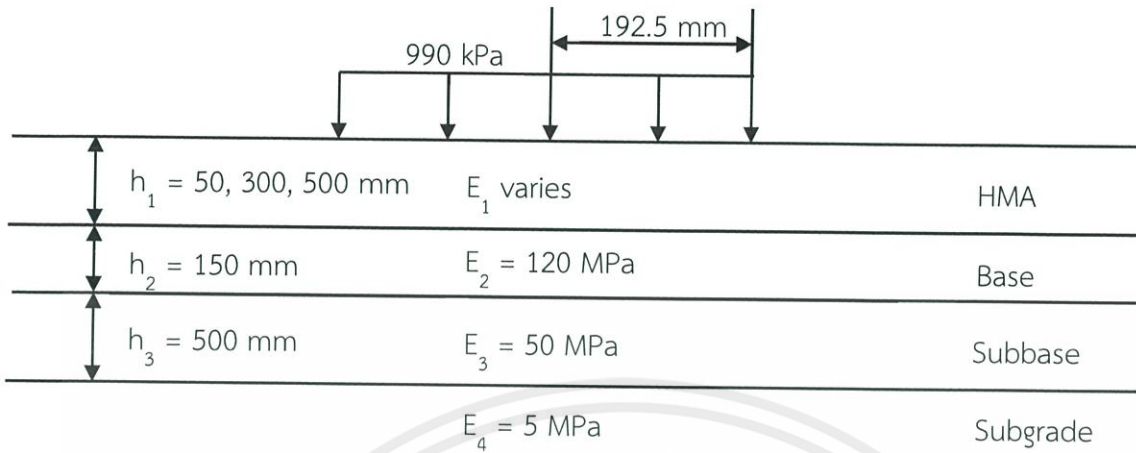
การวิเคราะห์ความเครียดอัดในแนวดิ่งบนชั้นดินเดิม และการวิเคราะห์ความเครียดดึง  
ในแนวราบใต้ชั้นผิวทางพิจารณาด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทาง  
(Vertical Compressive Strain Analysis on Top of Subgrade And  
Horizontal Tensile Strain Analysis under Bottom of Surface by using  
Elastic Modulus of Surface Layer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

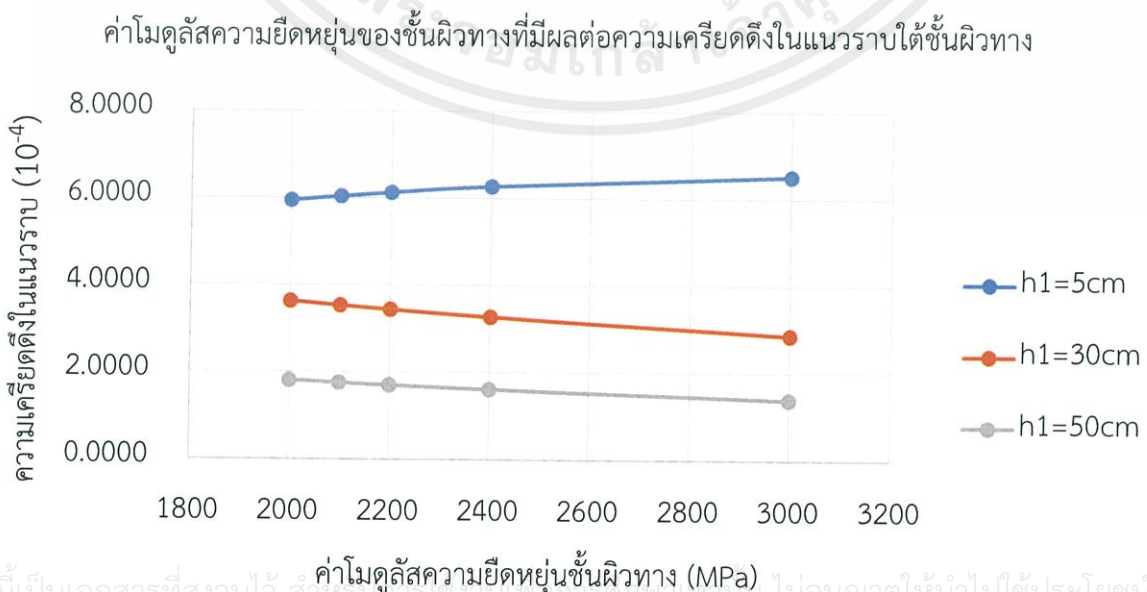
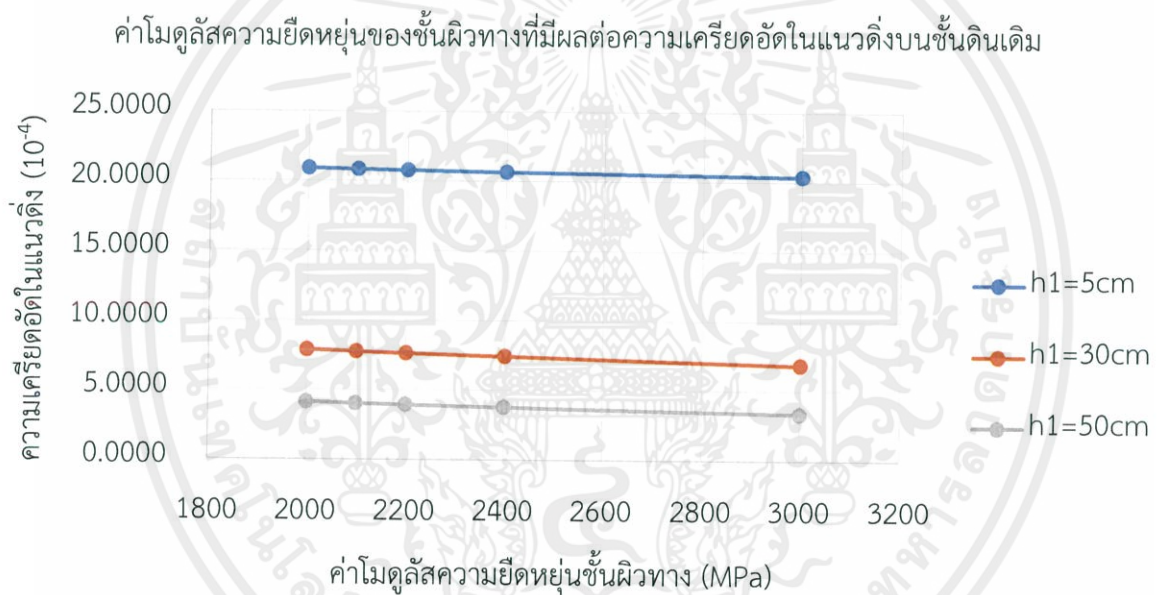
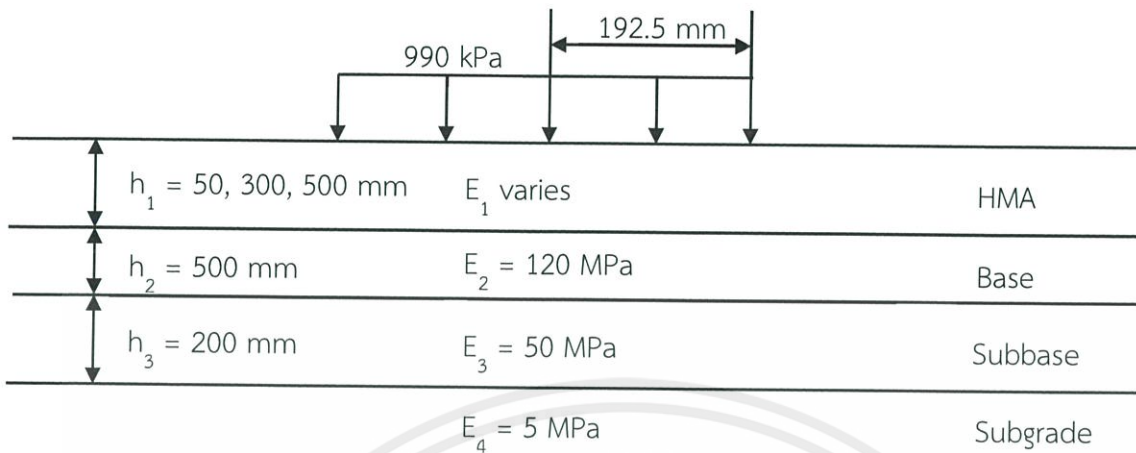
# กรณีศึกษาที่ 1



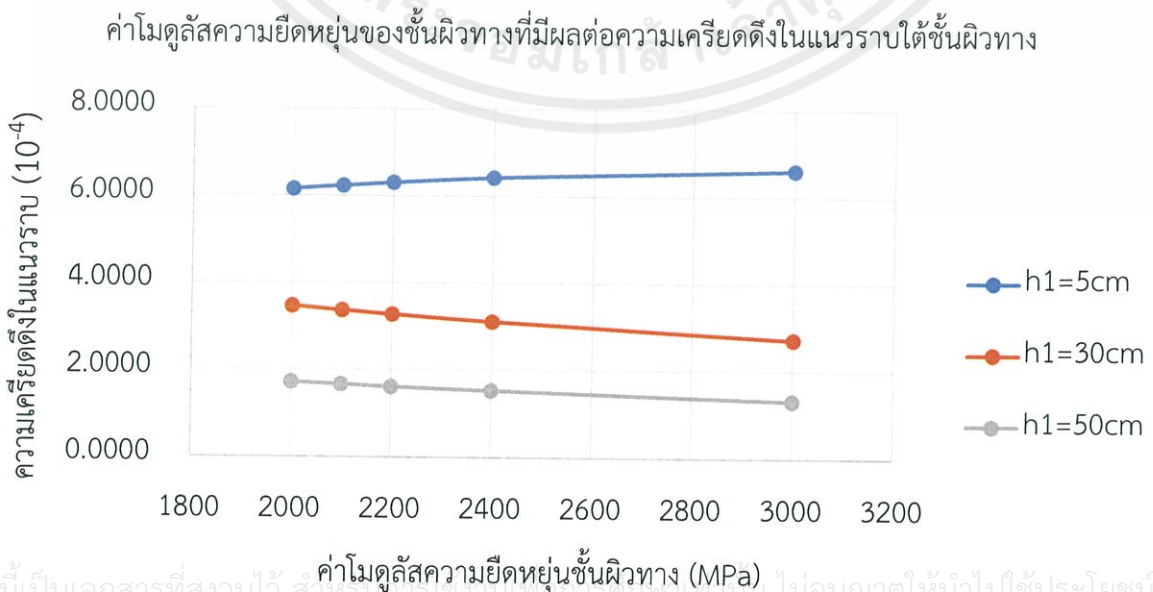
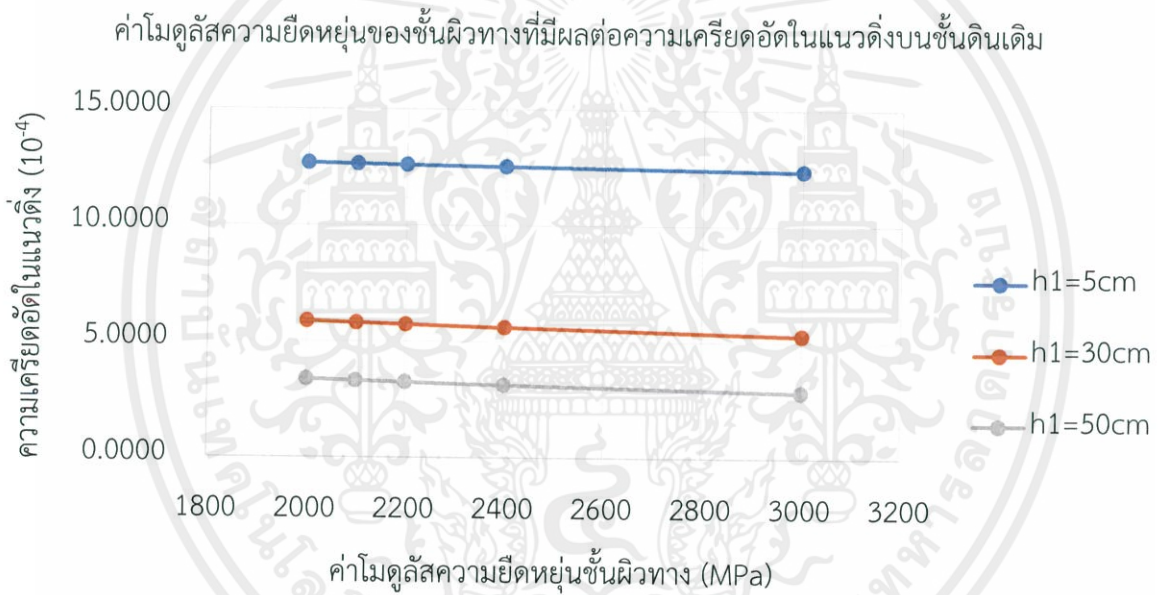
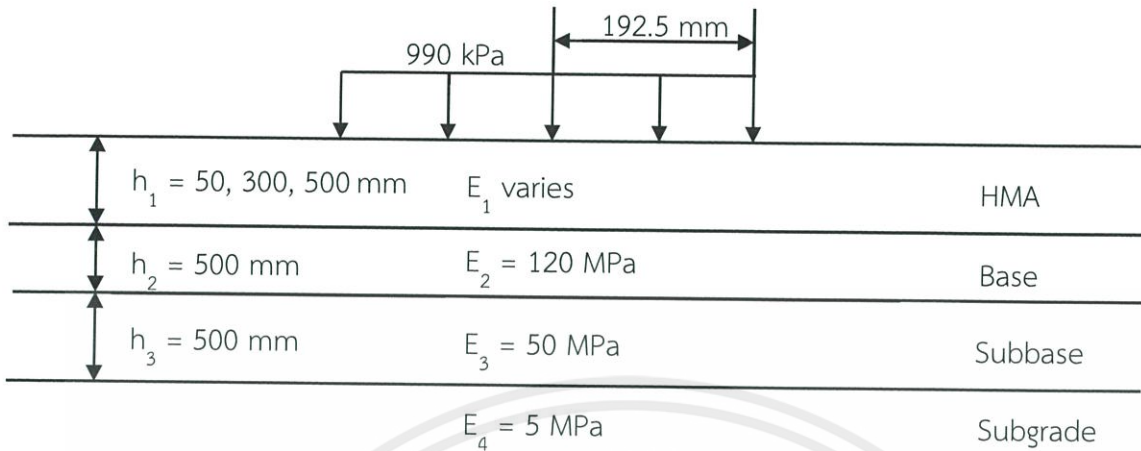
## กรณีศึกษาที่ 2



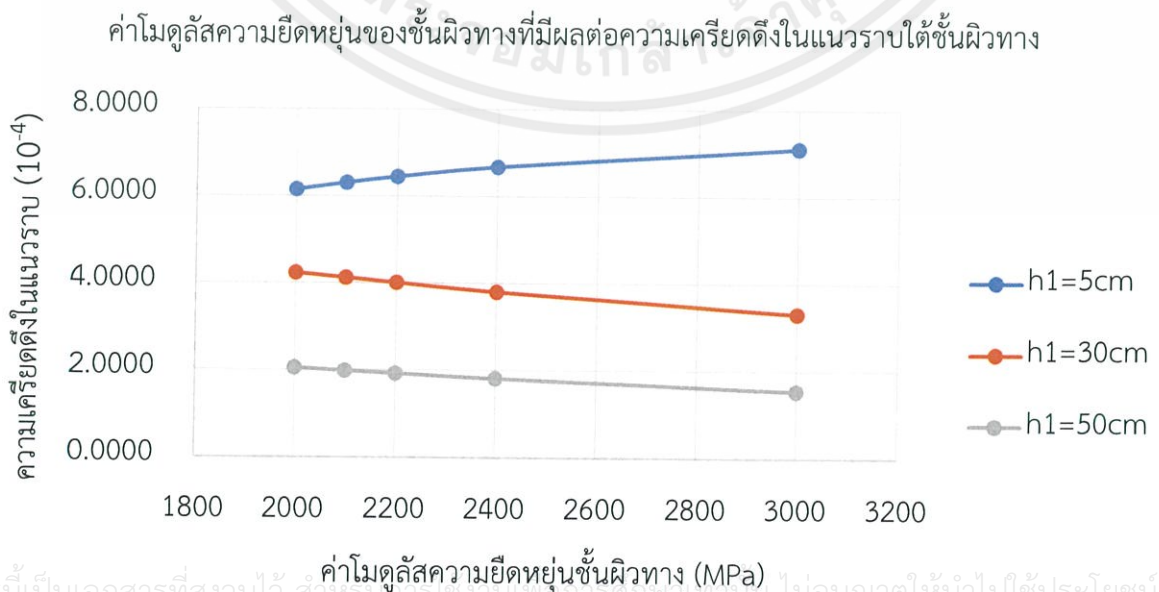
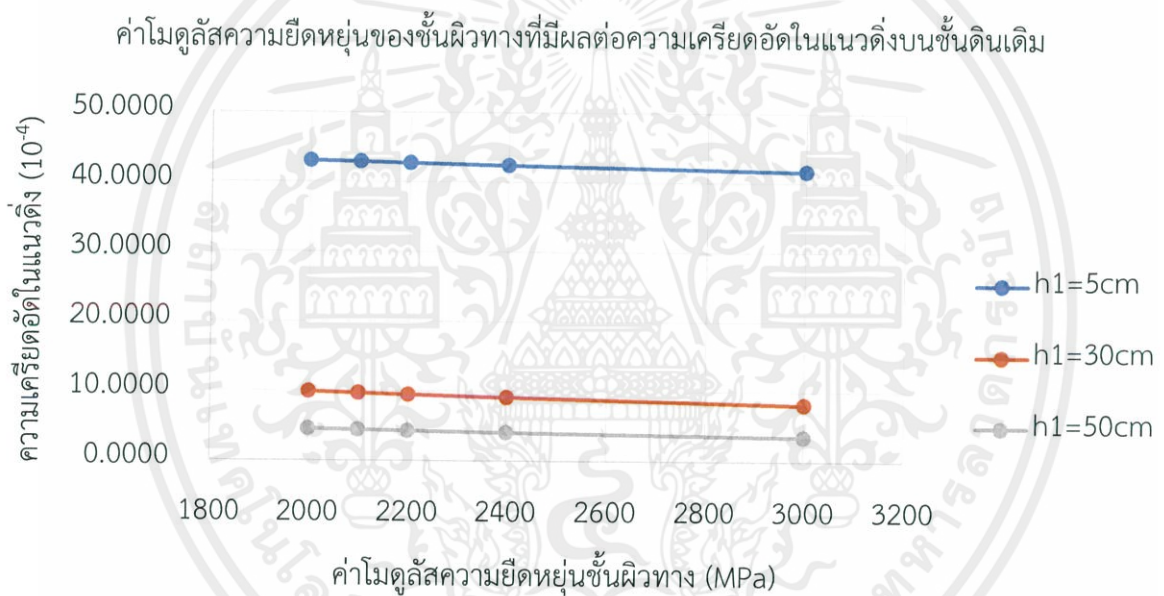
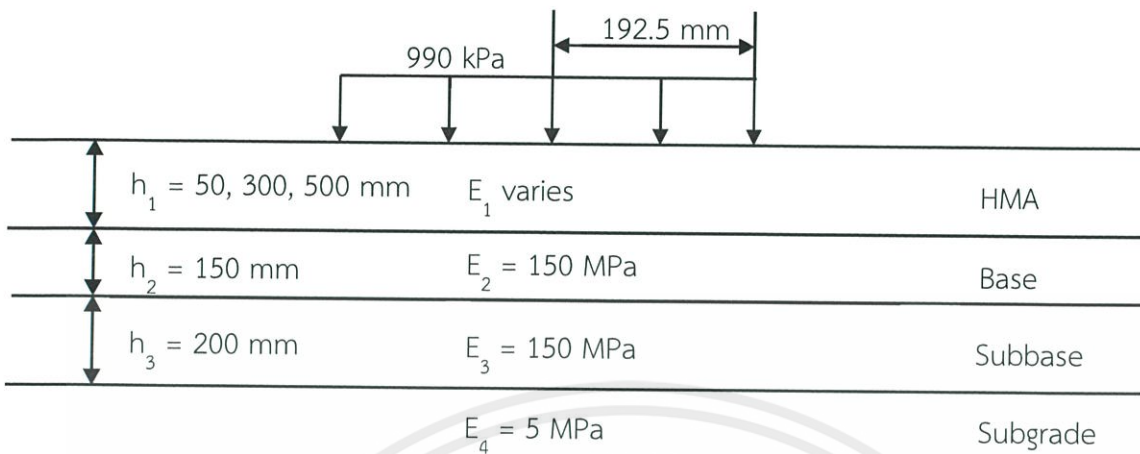
### กรณีศึกษาที่ 3



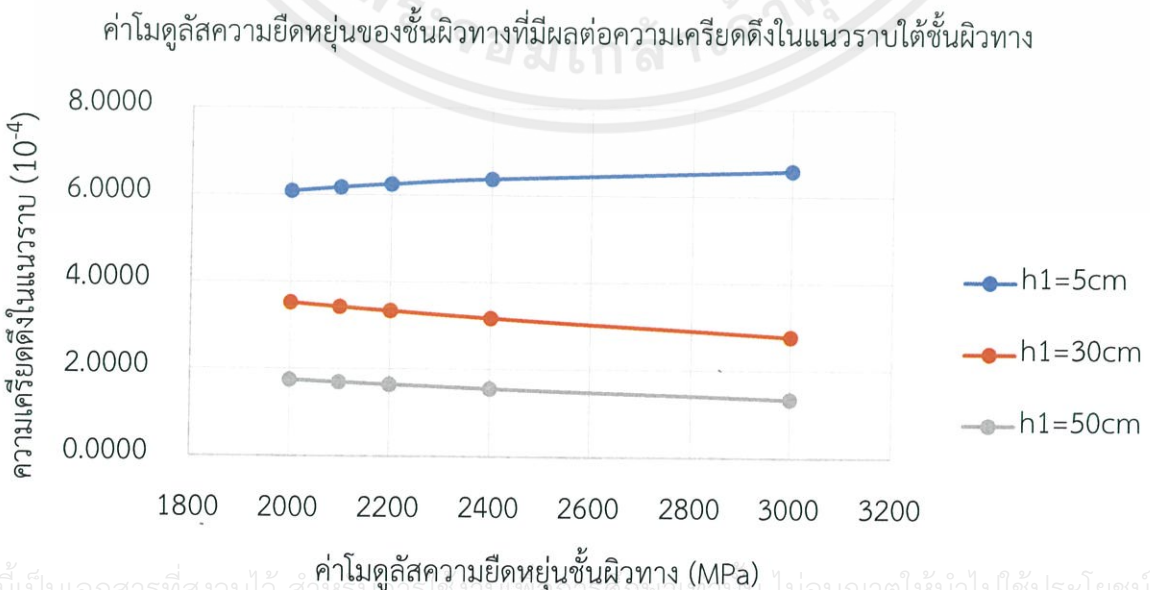
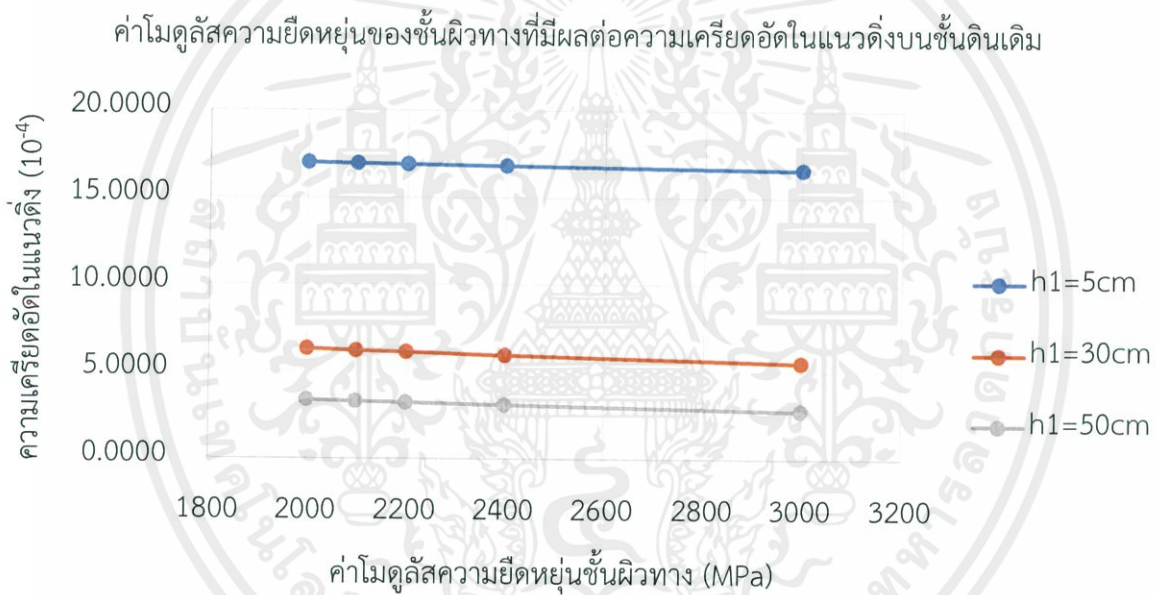
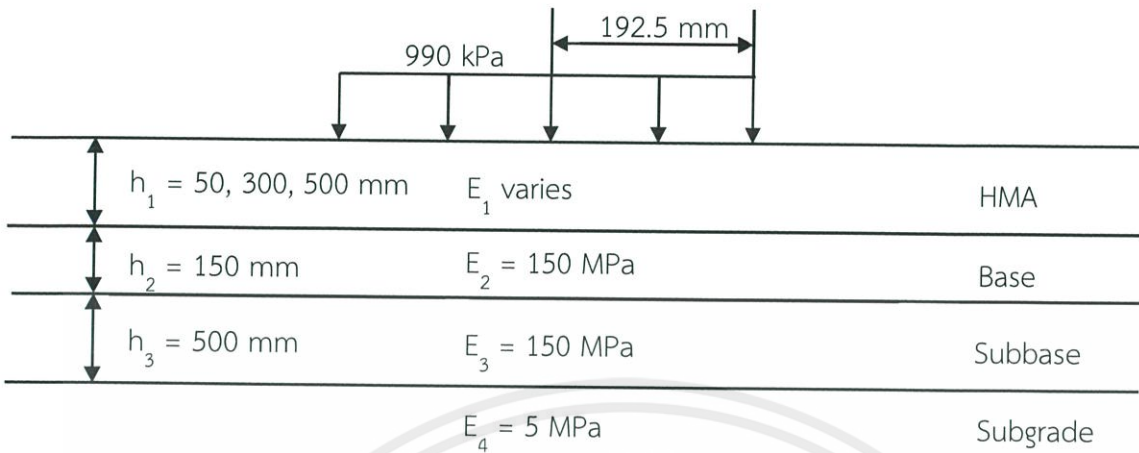
### กรณีศึกษาที่ 4



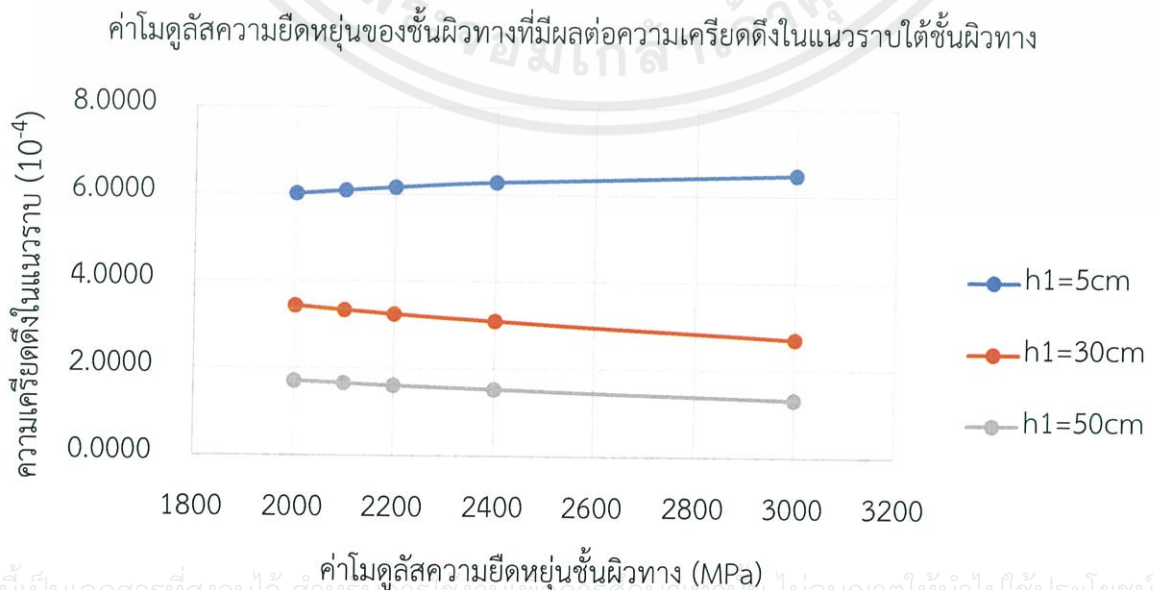
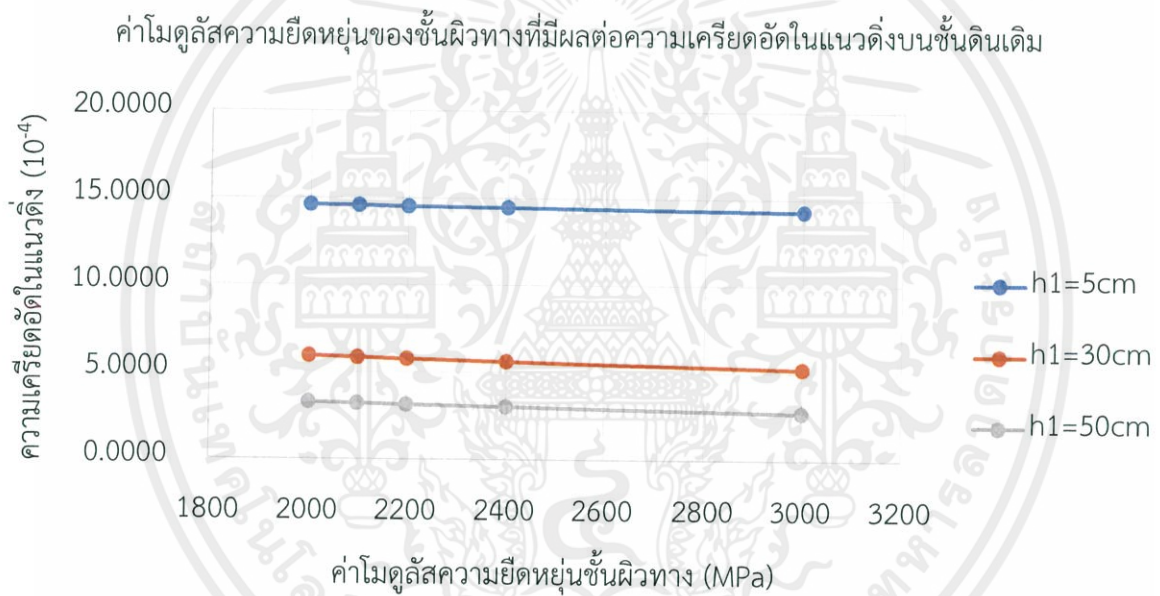
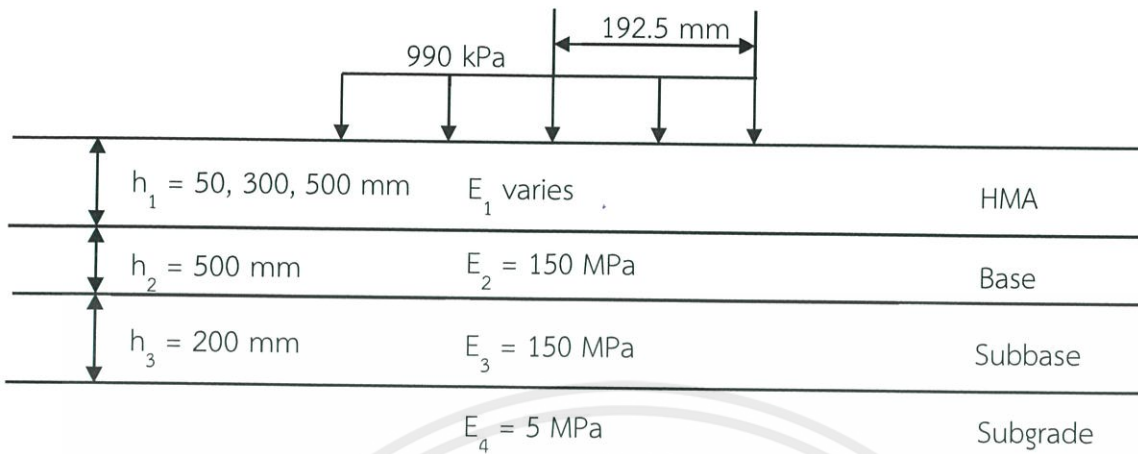
### กรณีศึกษาที่ 5



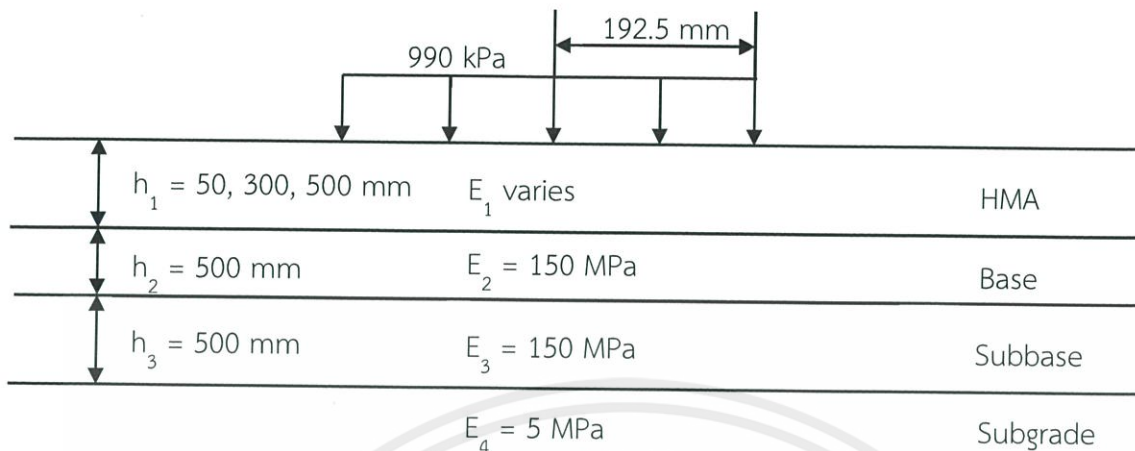
### กรณีศึกษาที่ 6



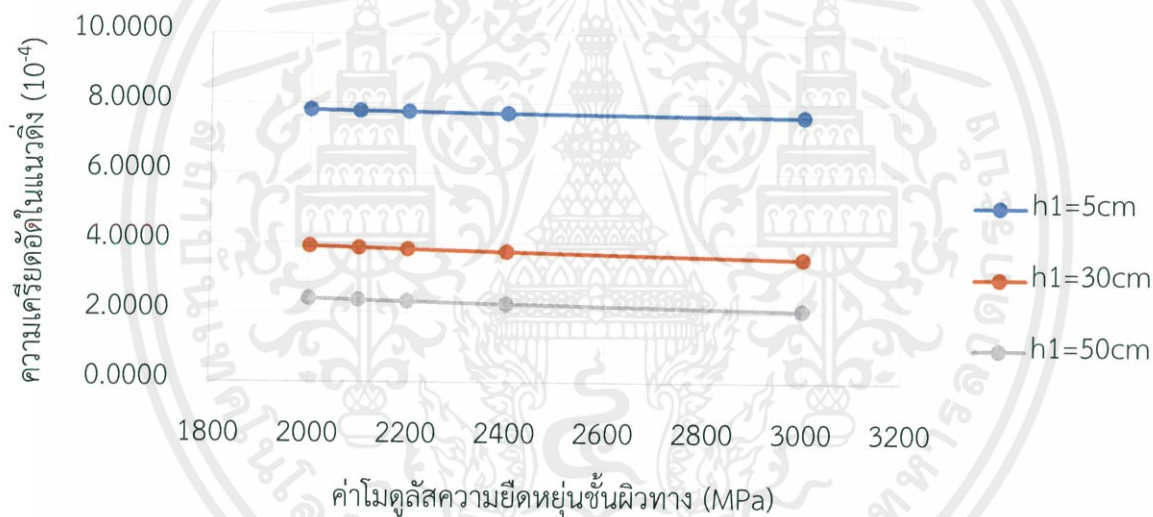
## กรณีศึกษาที่ 7



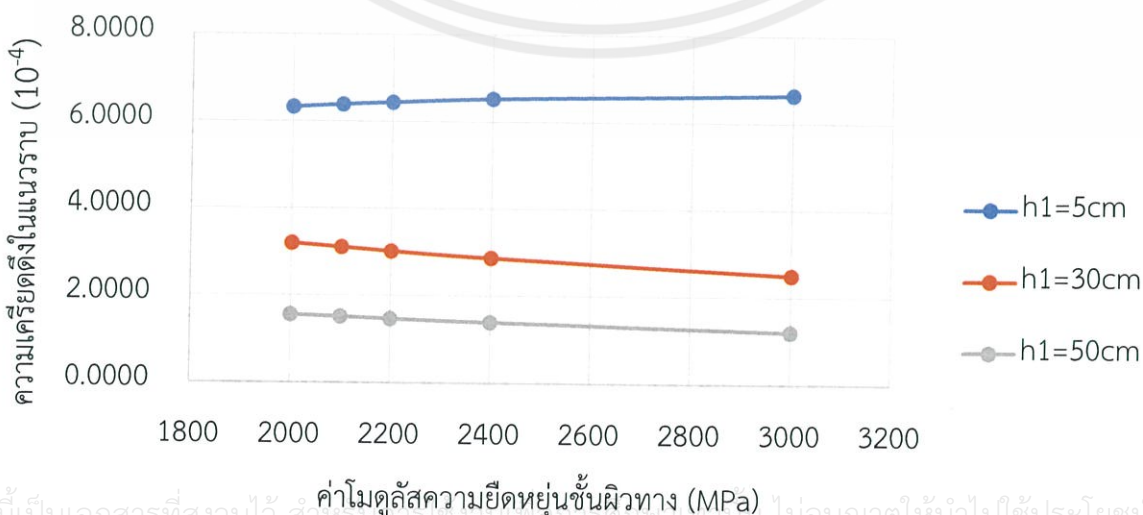
### กรณีศึกษาที่ 8



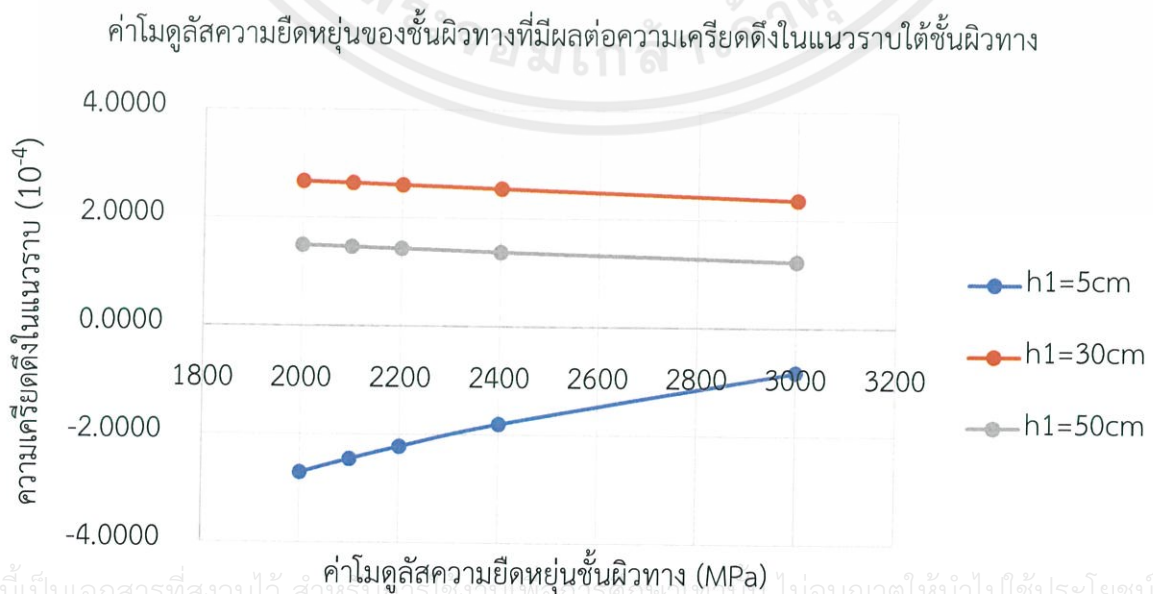
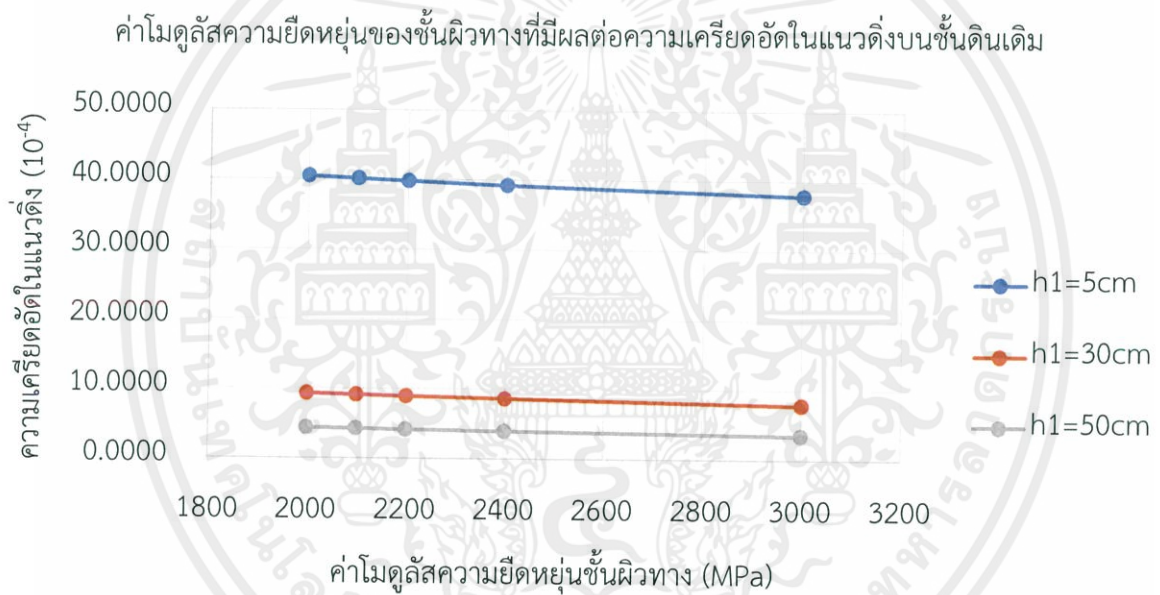
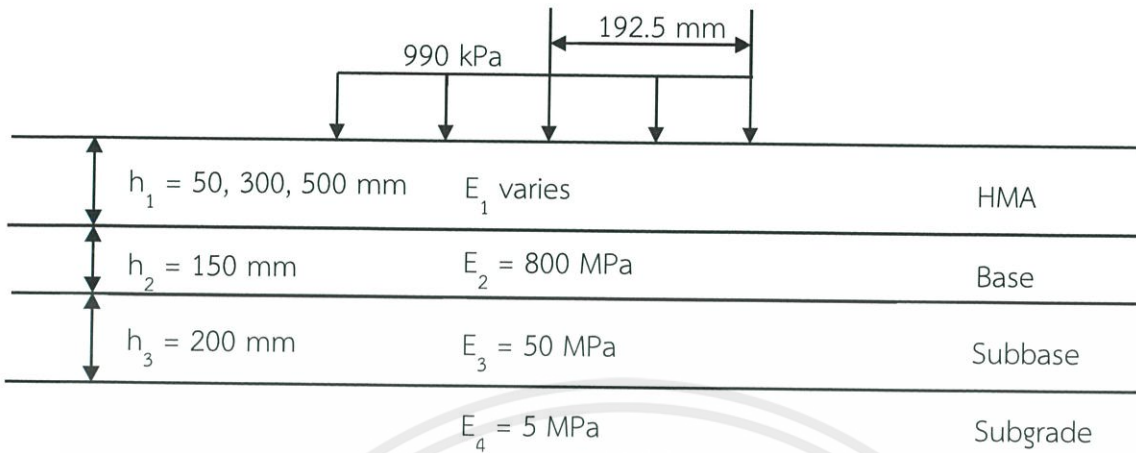
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



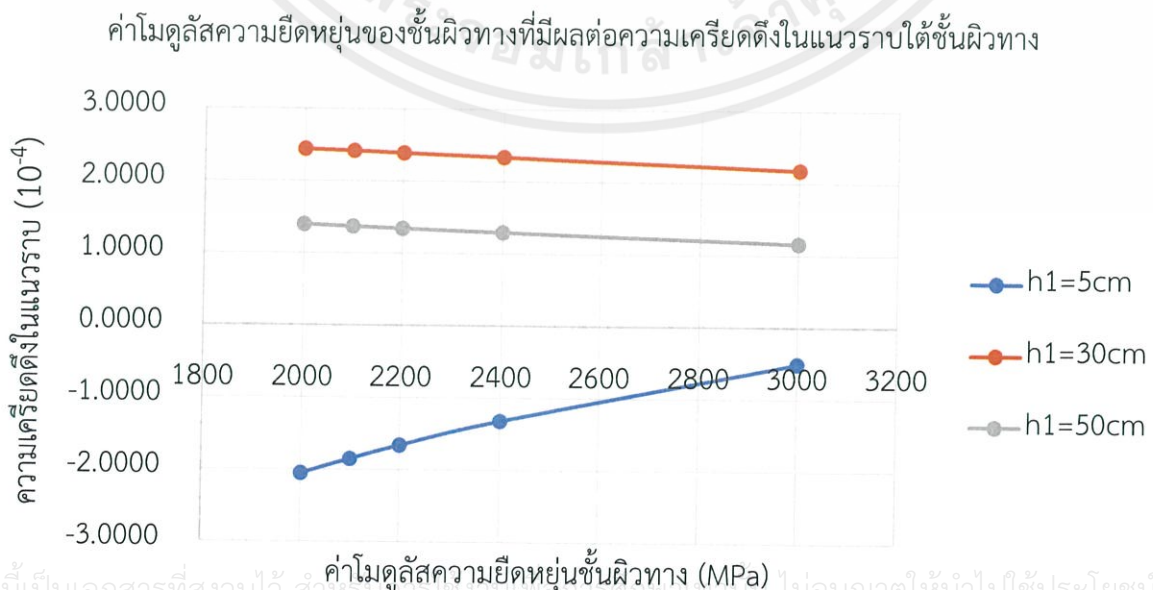
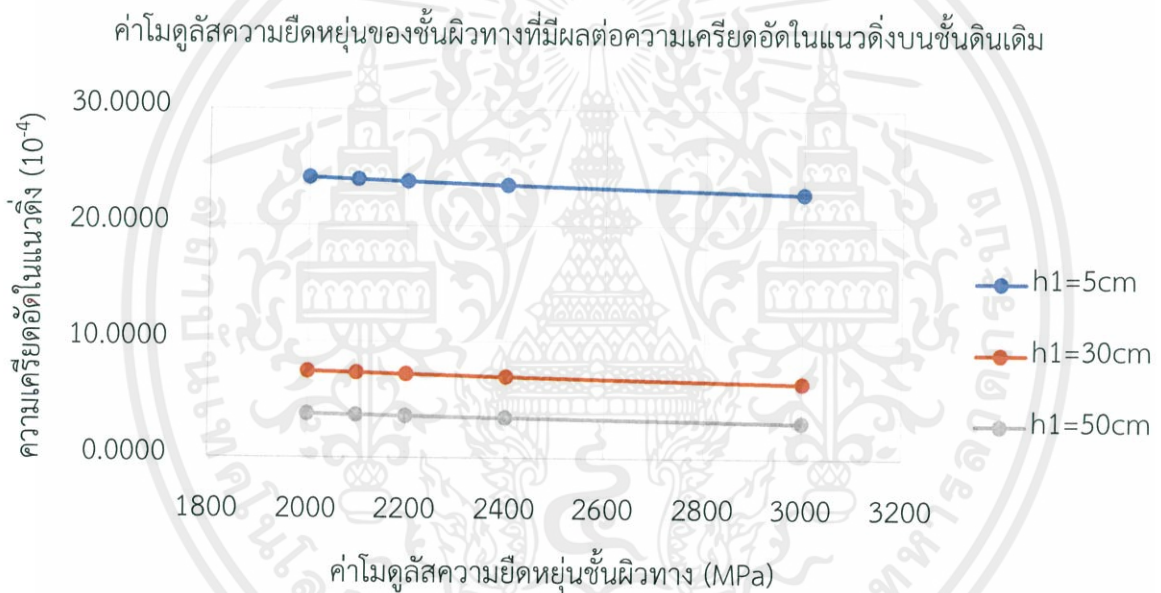
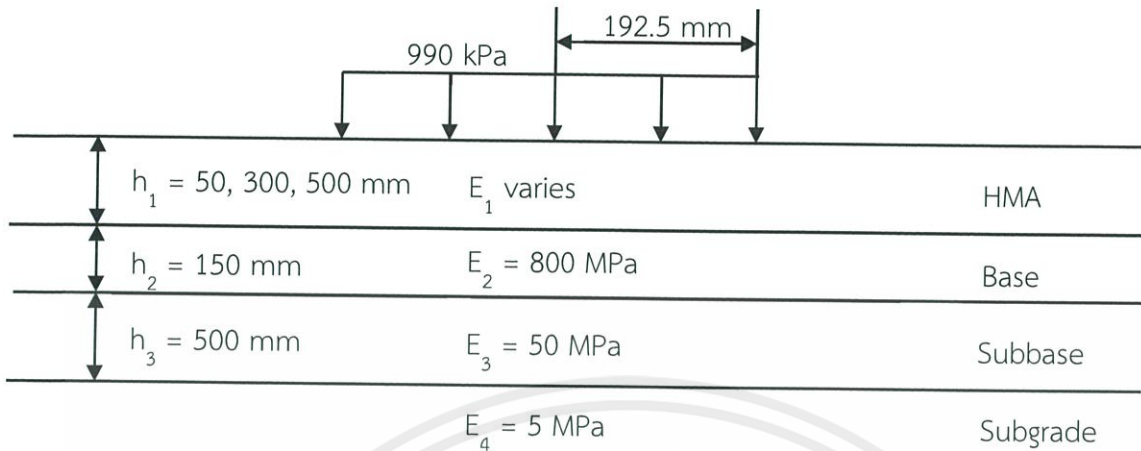
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



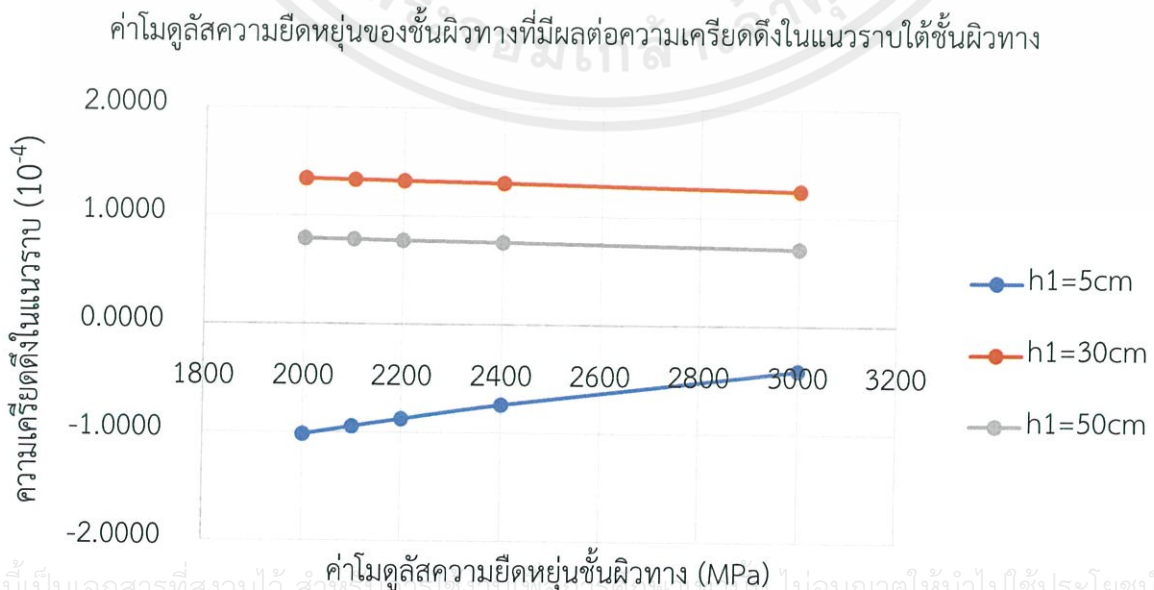
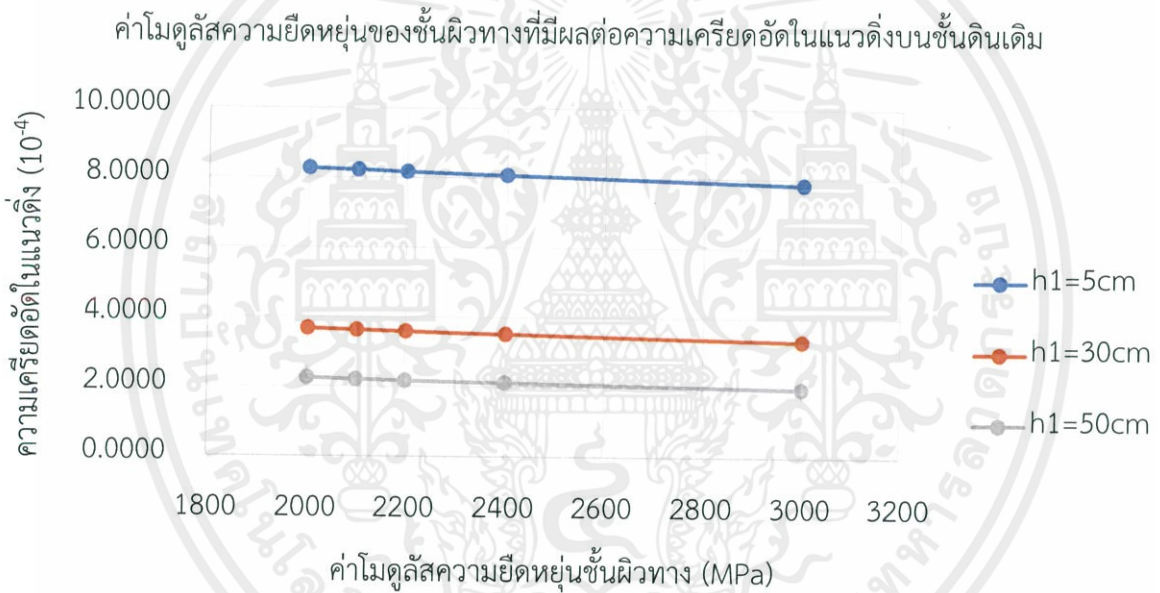
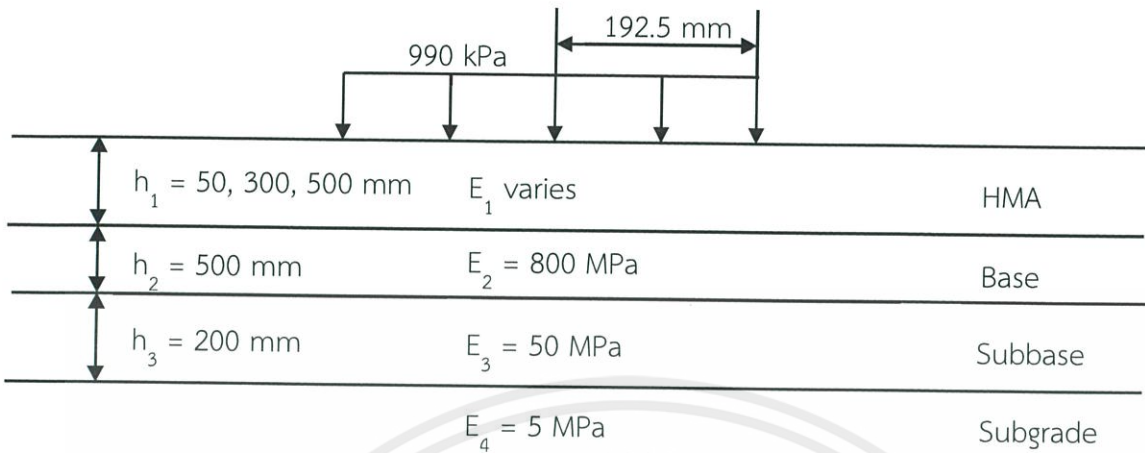
### กรณีศึกษาที่ 9



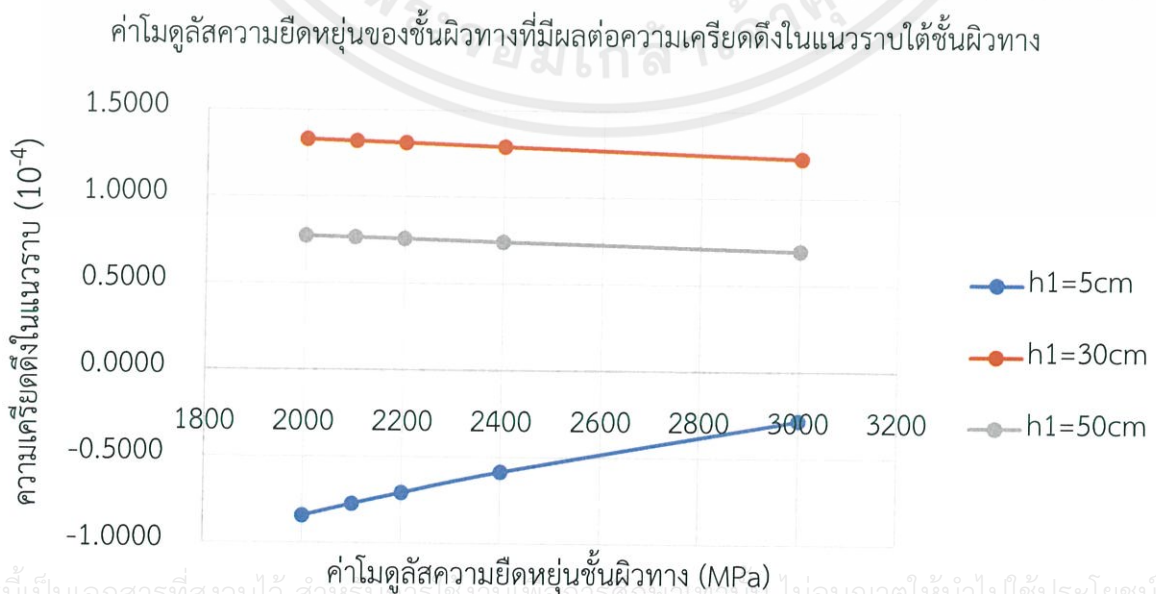
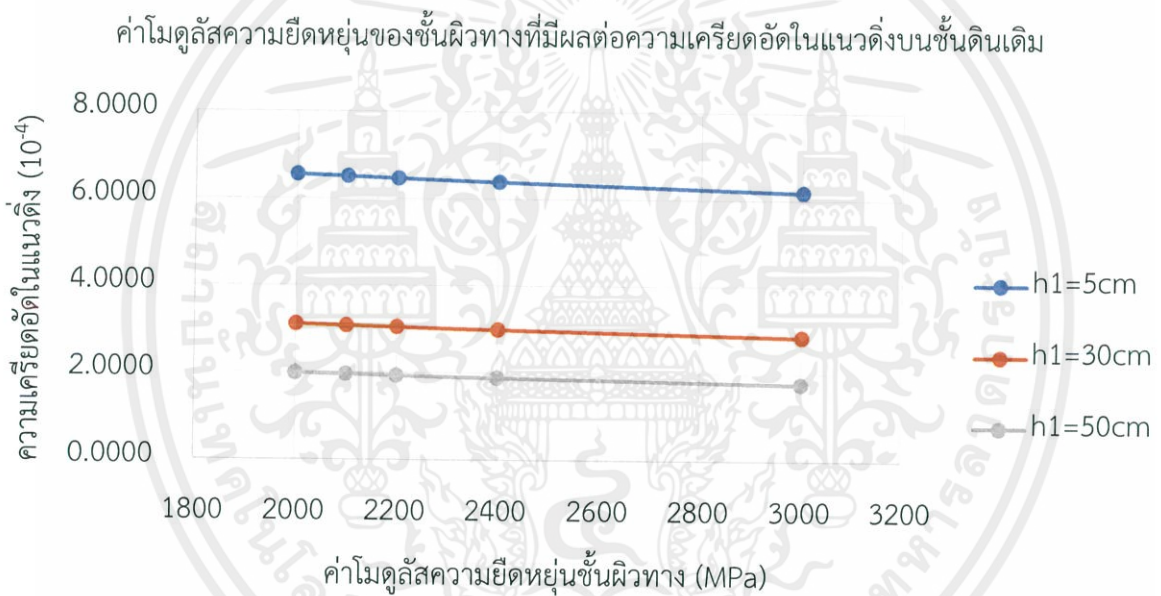
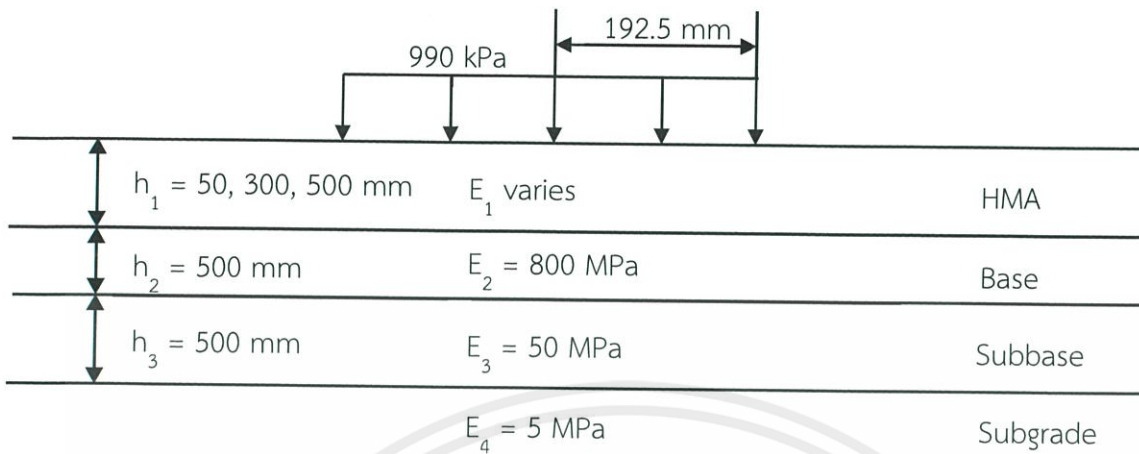
### กรณีศึกษาที่ 10



# กรณีศึกษา 11



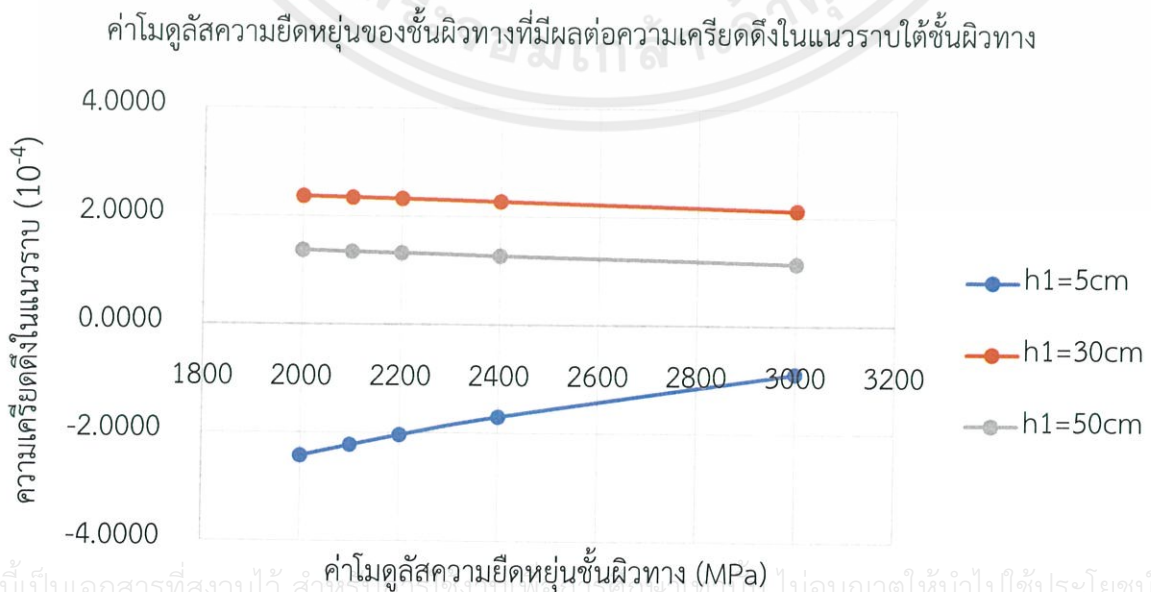
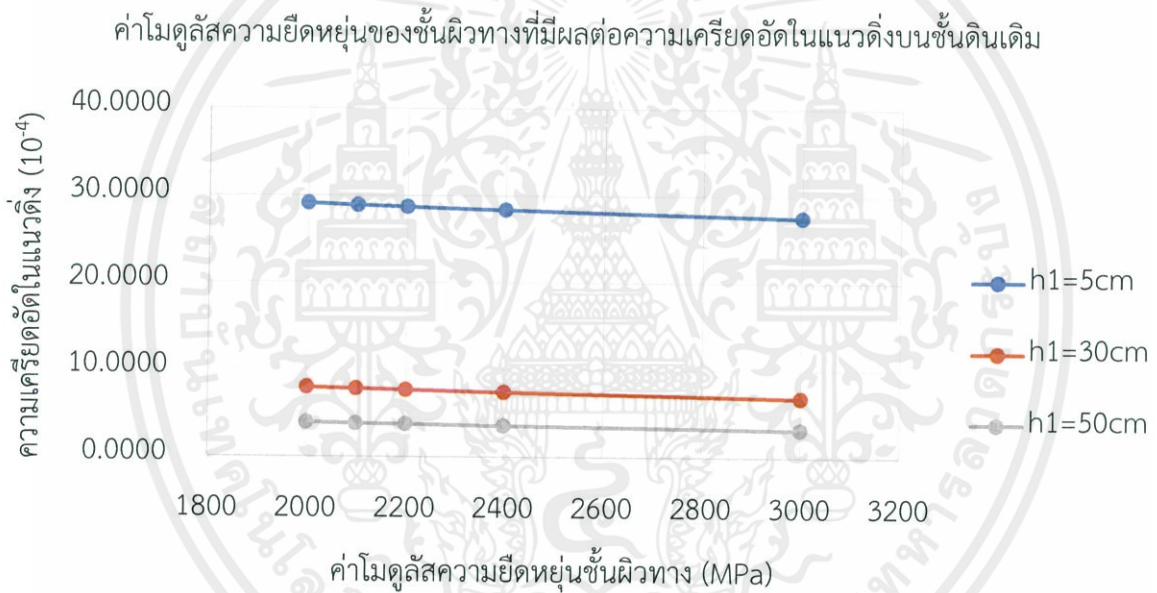
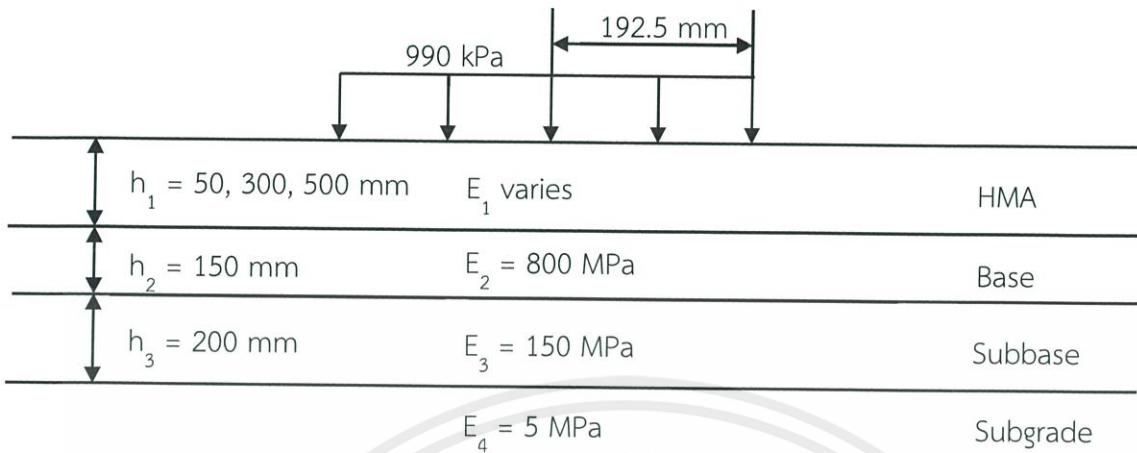
## กรณีศึกษาที่ 12



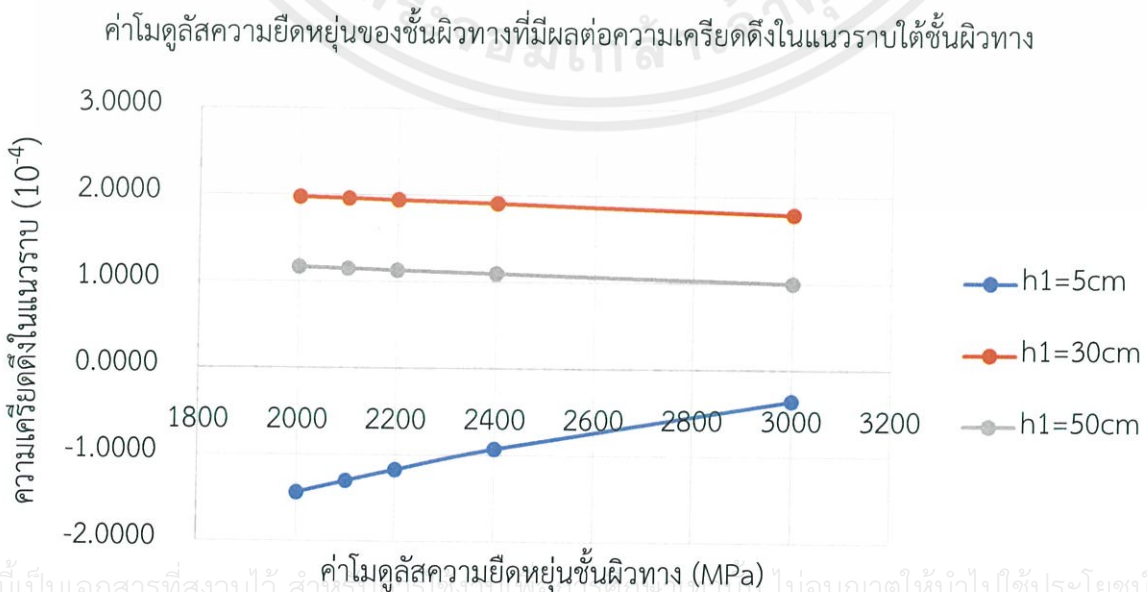
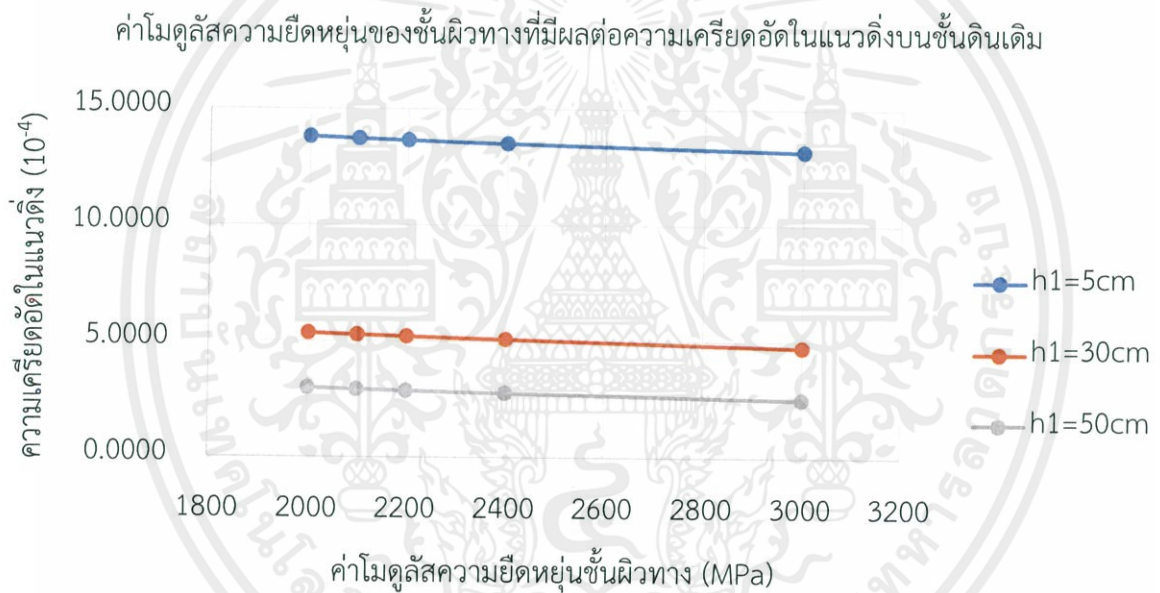
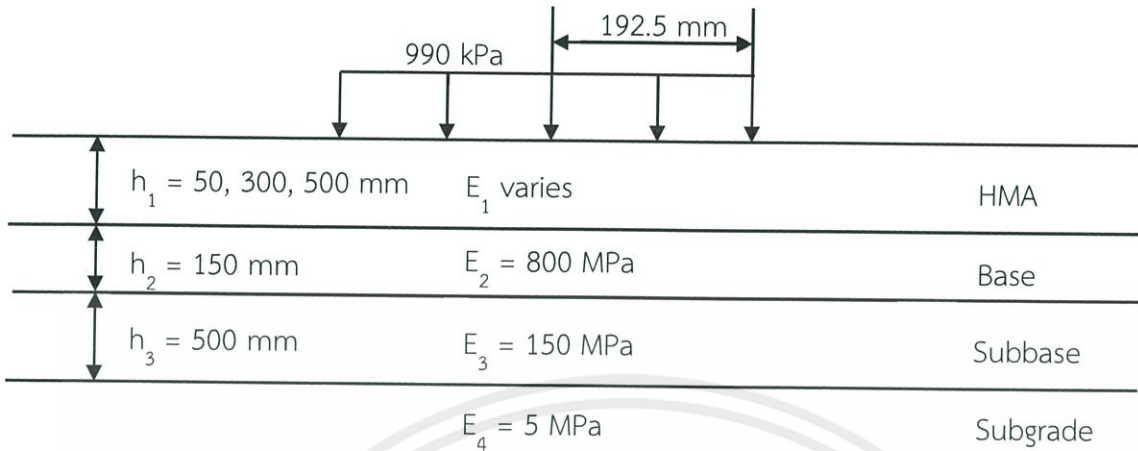
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนหน้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

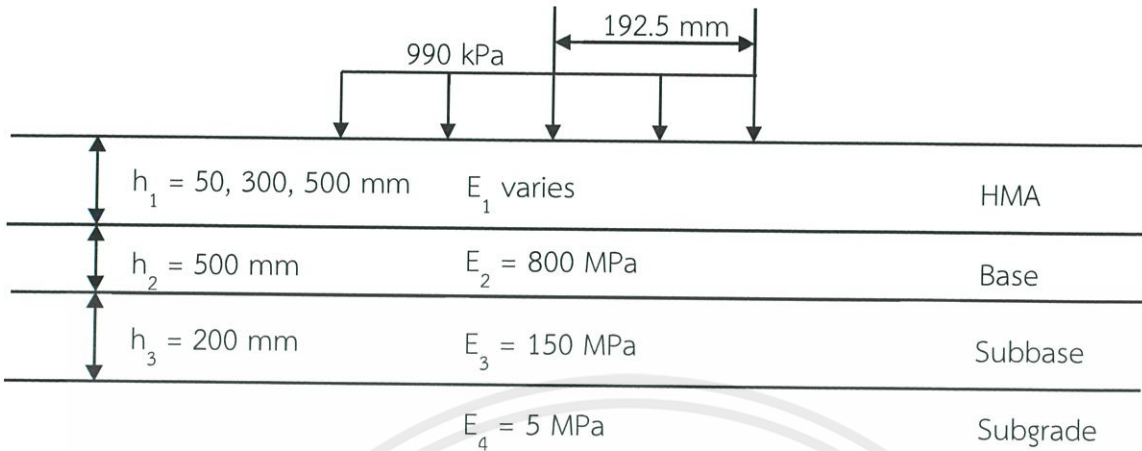
### กรณีศึกษาที่ 13



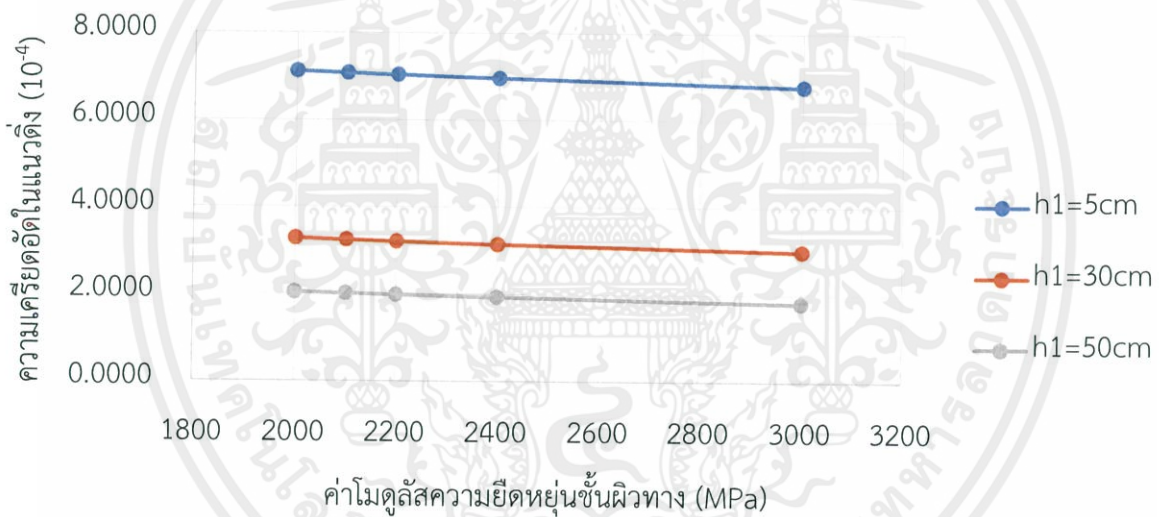
### กรณีศึกษาที่ 14



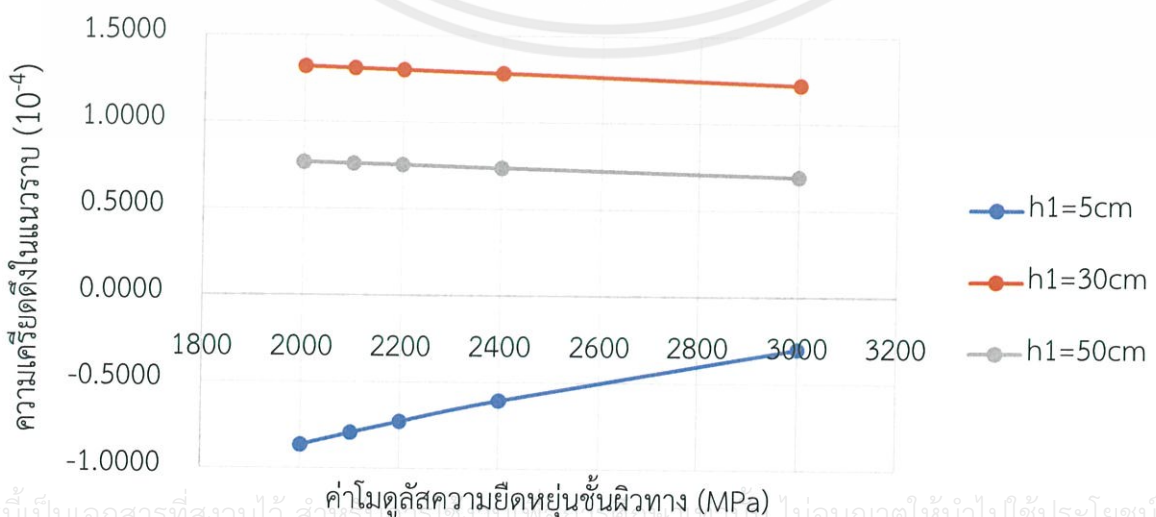
### กรณีศึกษาที่ 15



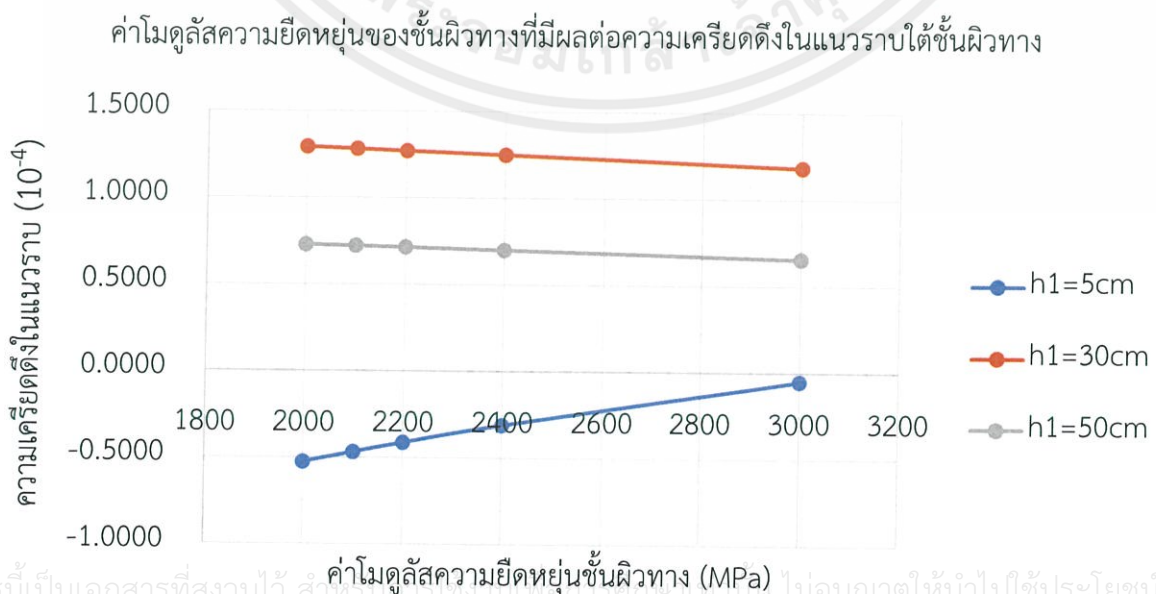
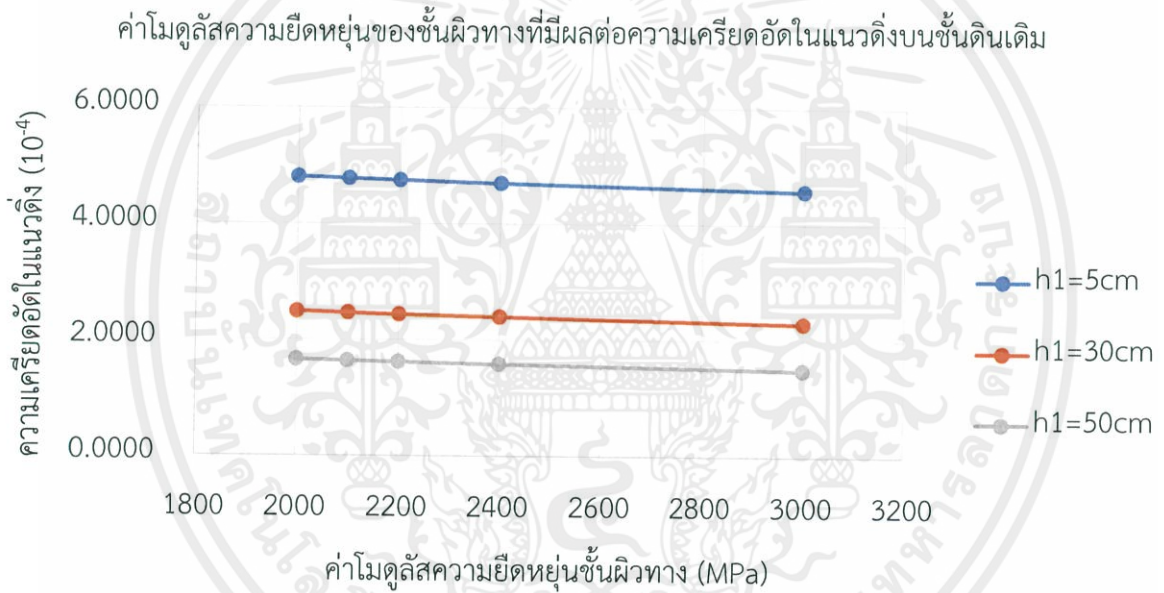
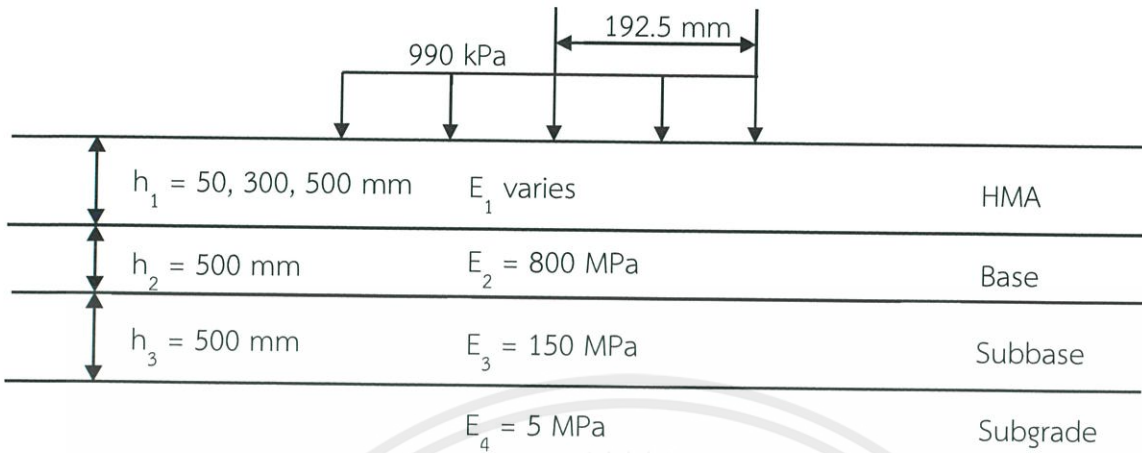
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



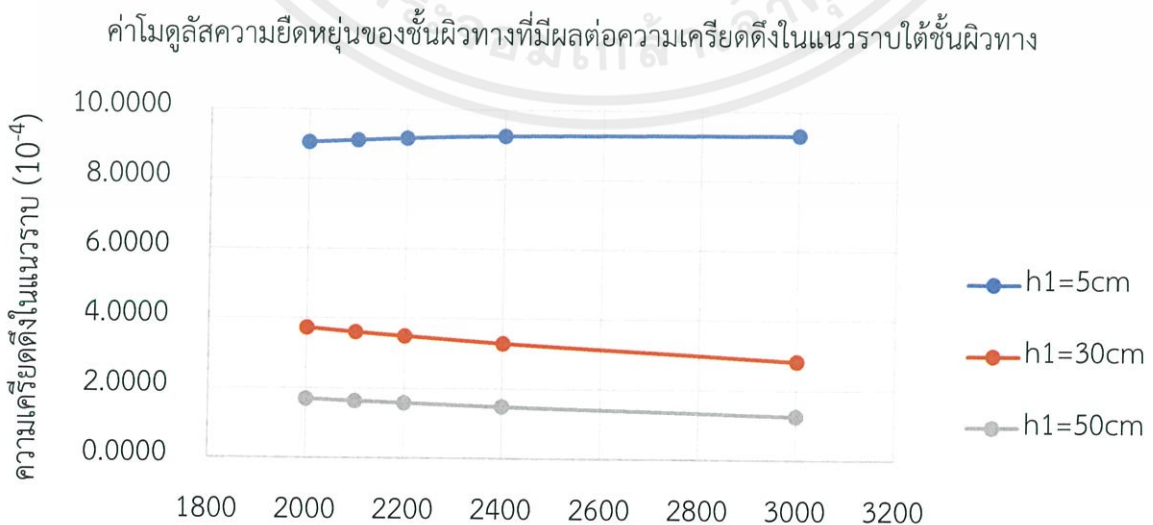
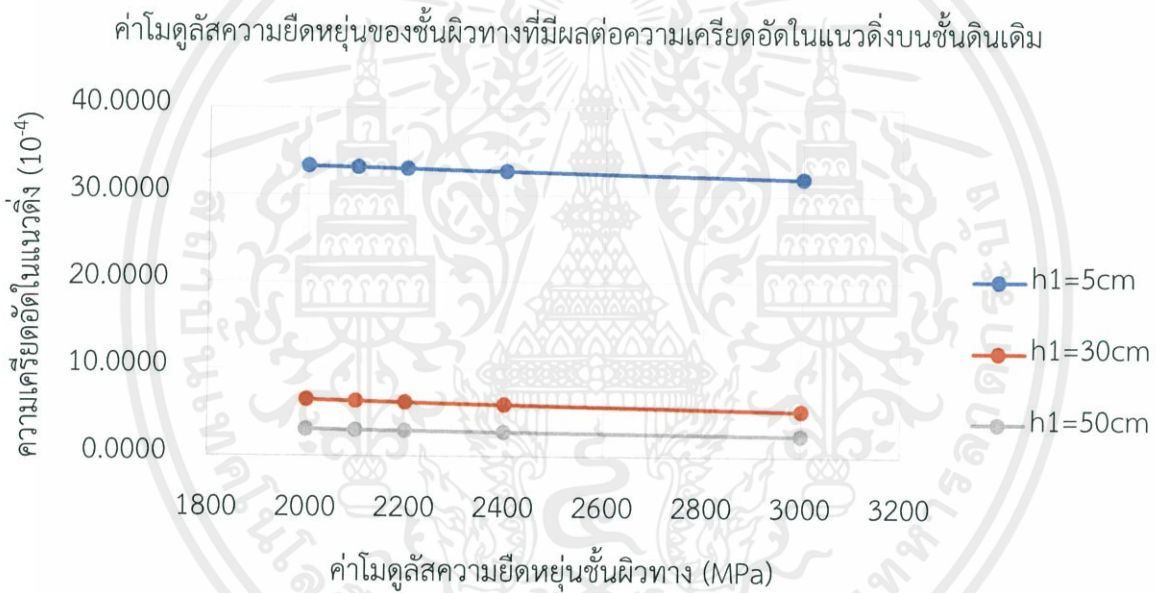
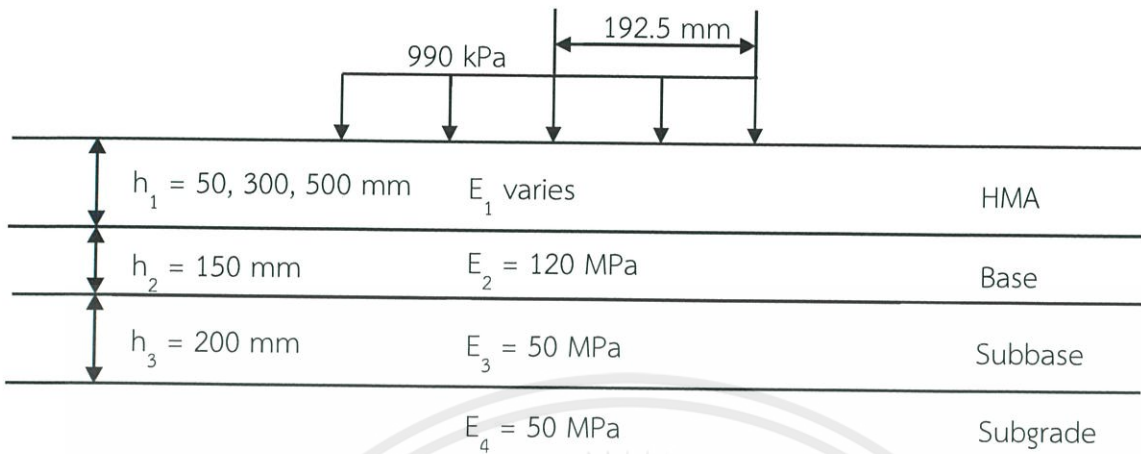
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



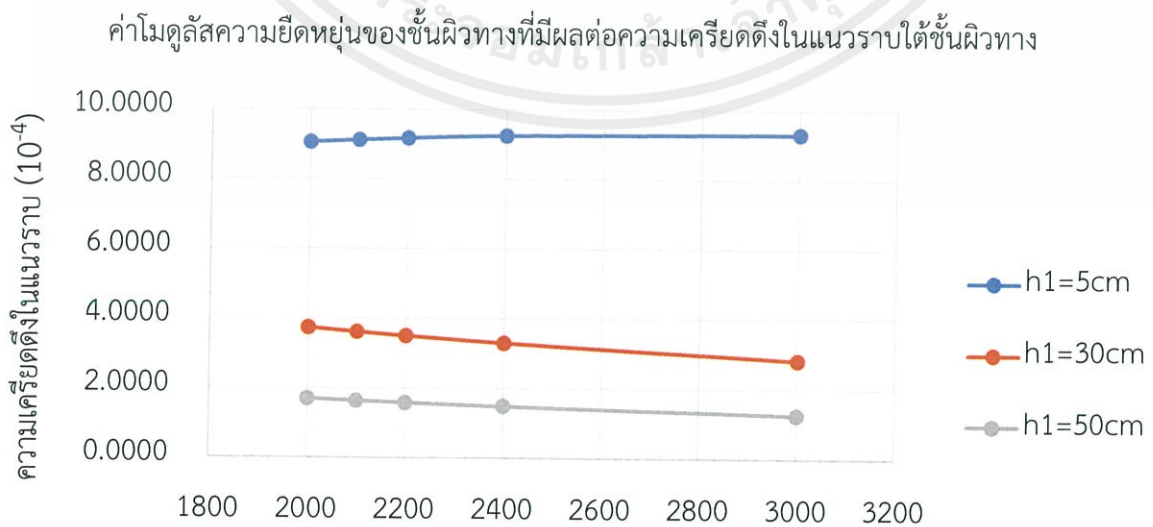
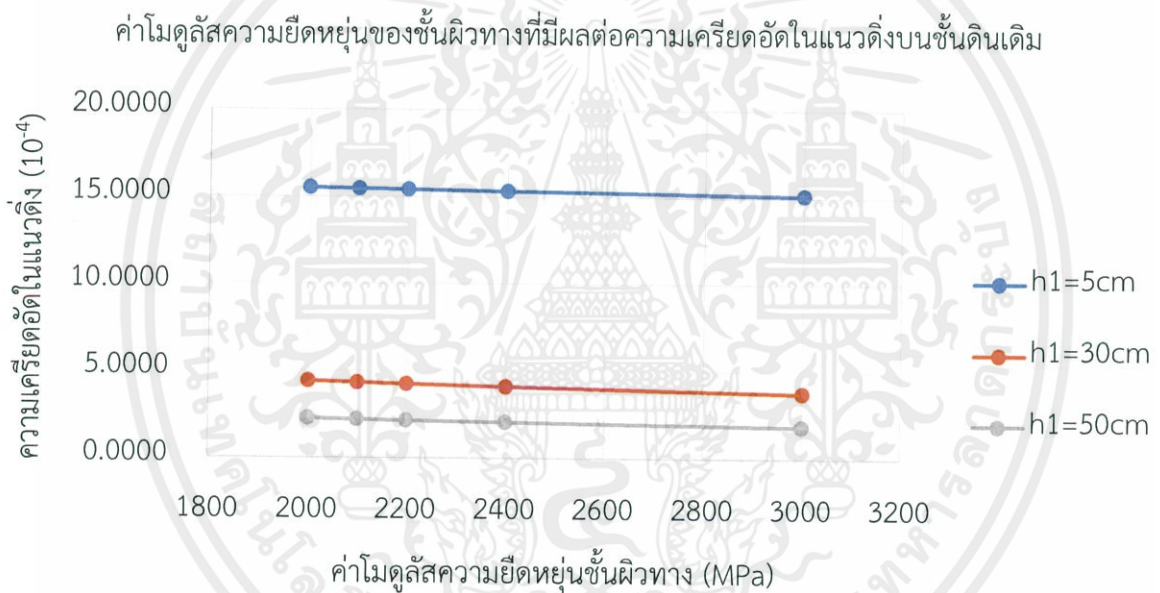
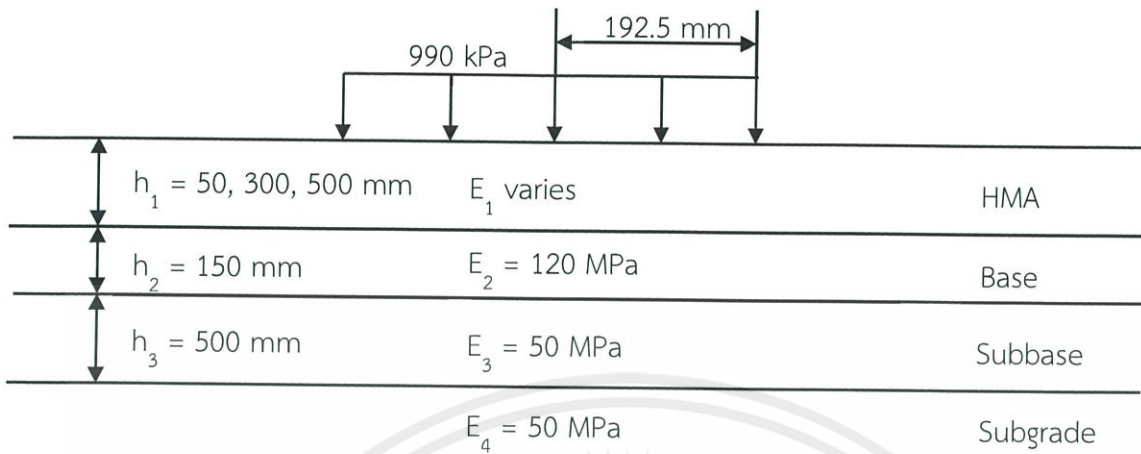
### กรณีศึกษาที่ 16



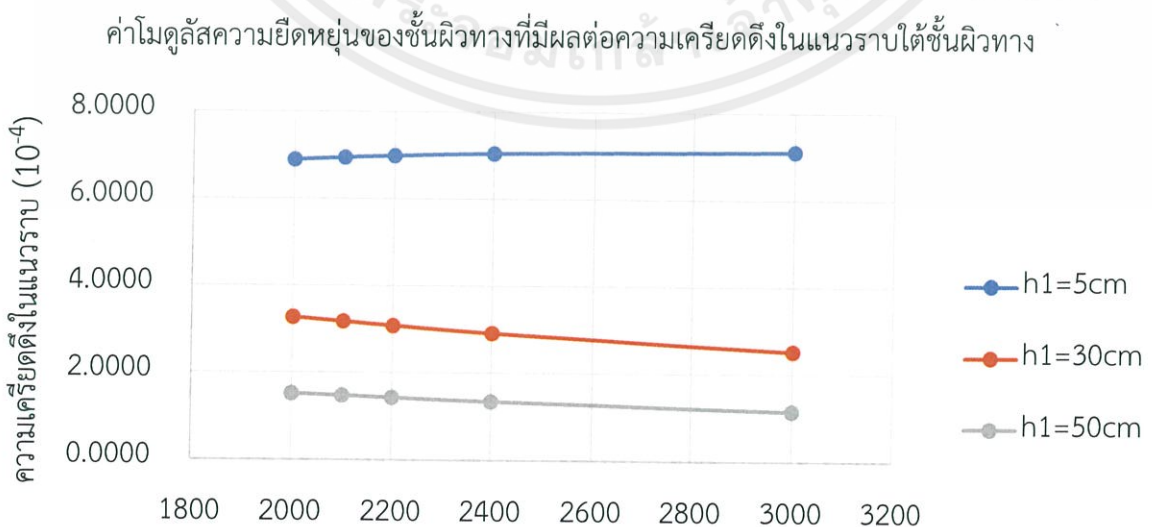
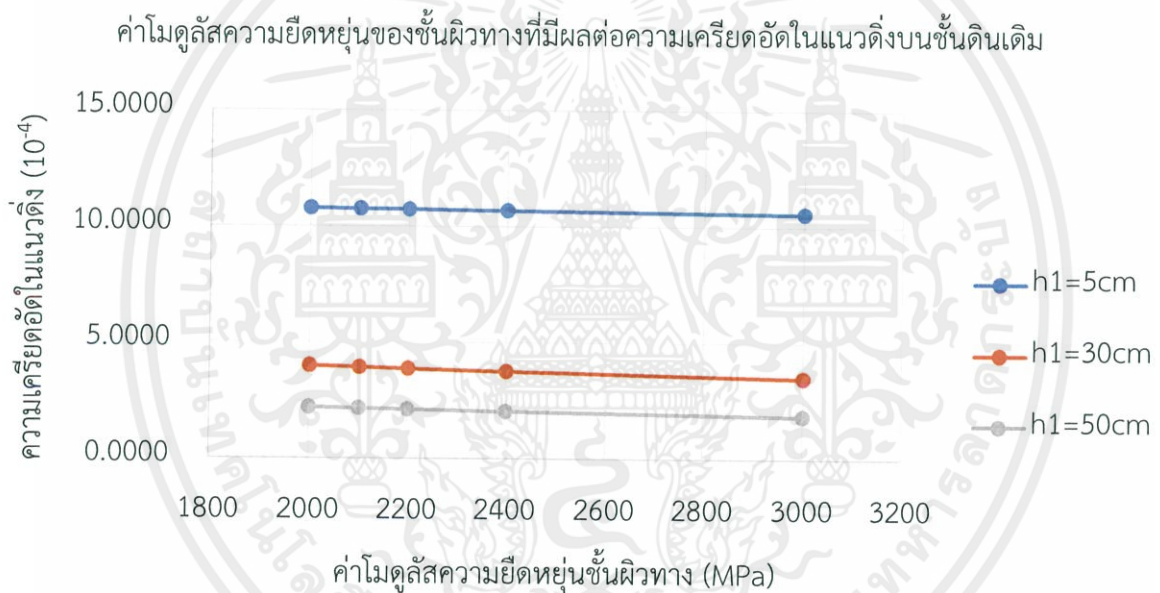
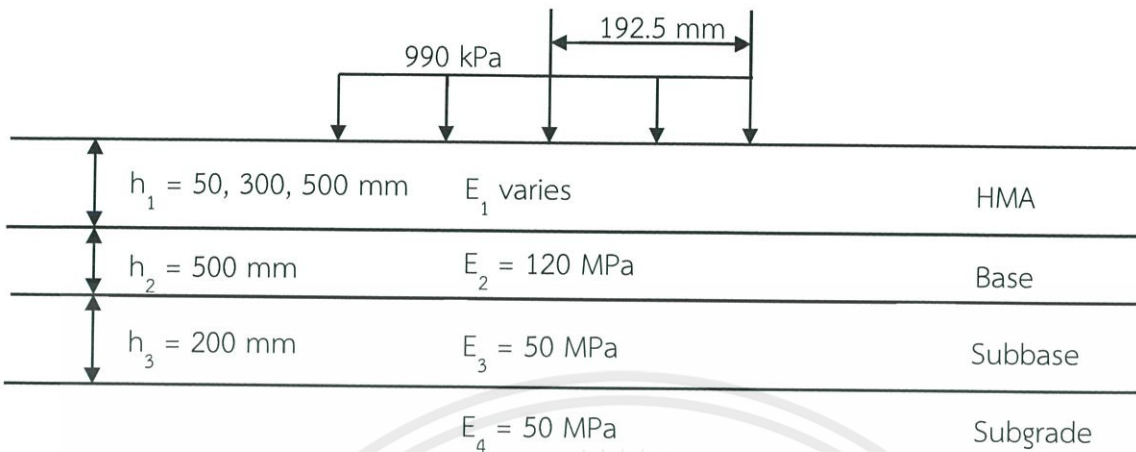
### กรณีศึกษาที่ 17



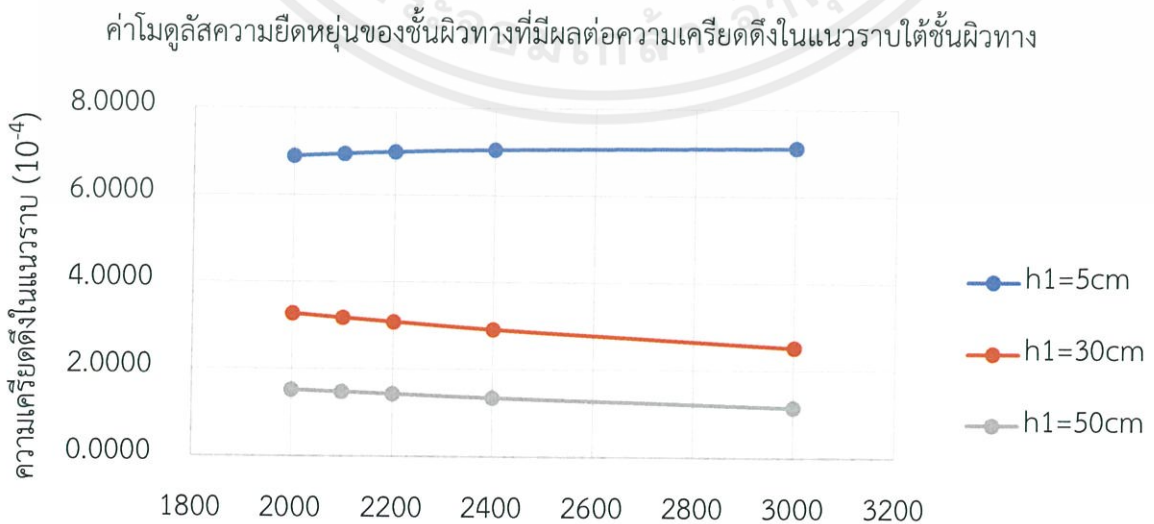
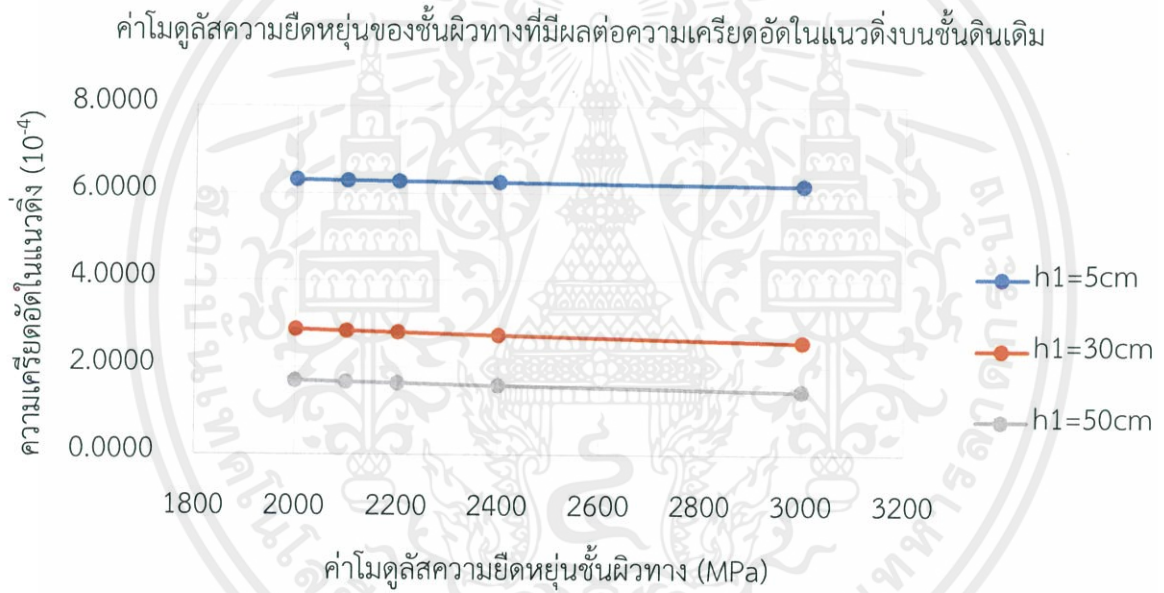
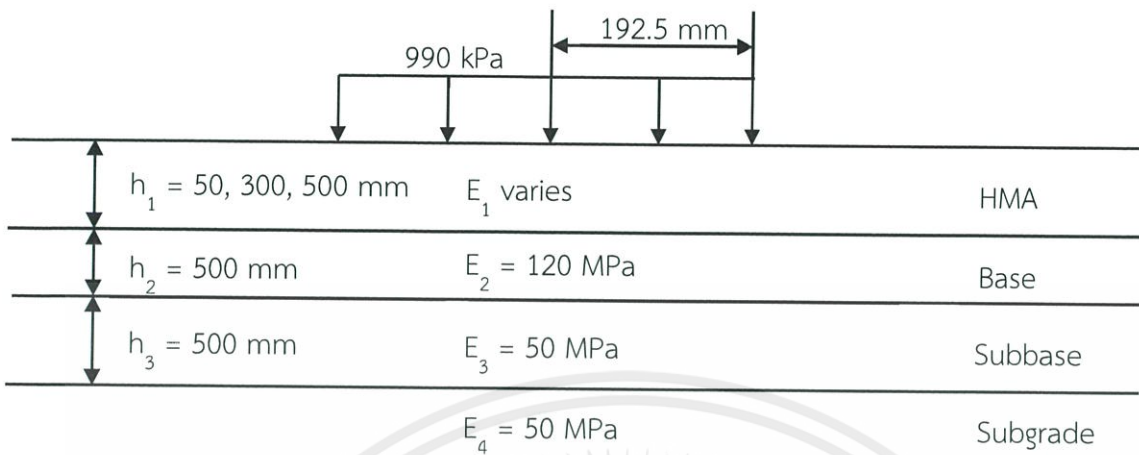
### กรณีศึกษาที่ 18



### กรณีศึกษาที่ 19

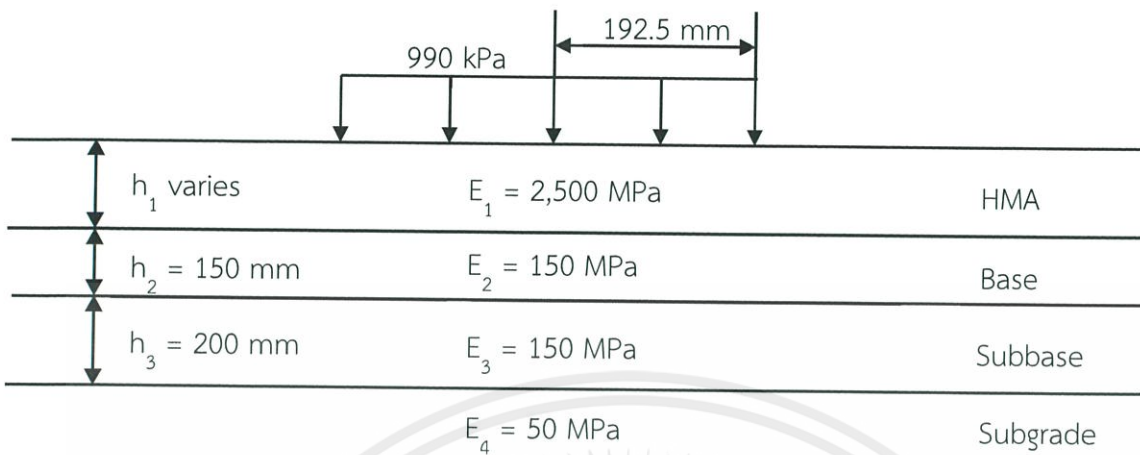


## กรณีศึกษาที่ 20

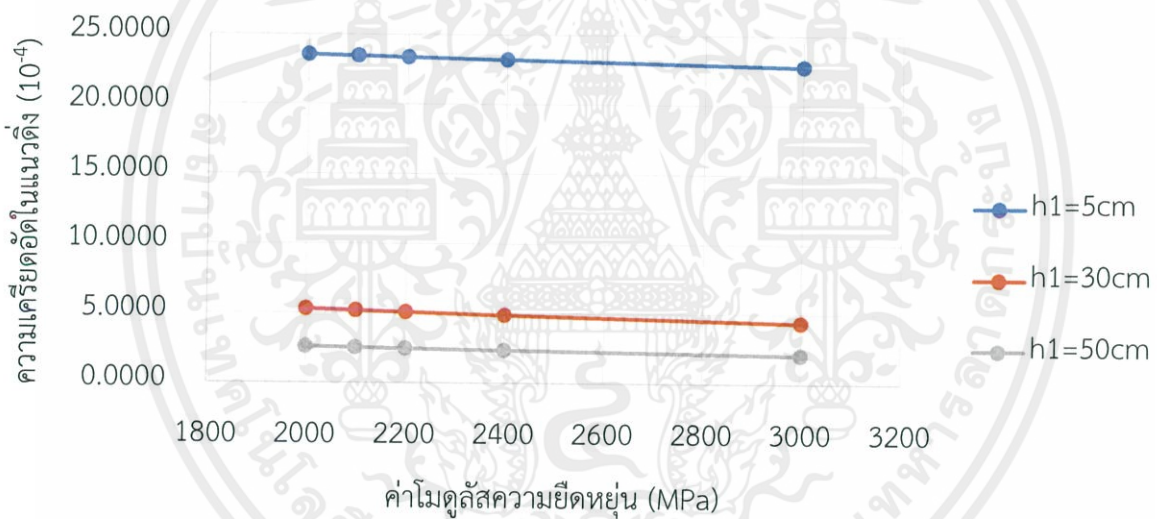


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

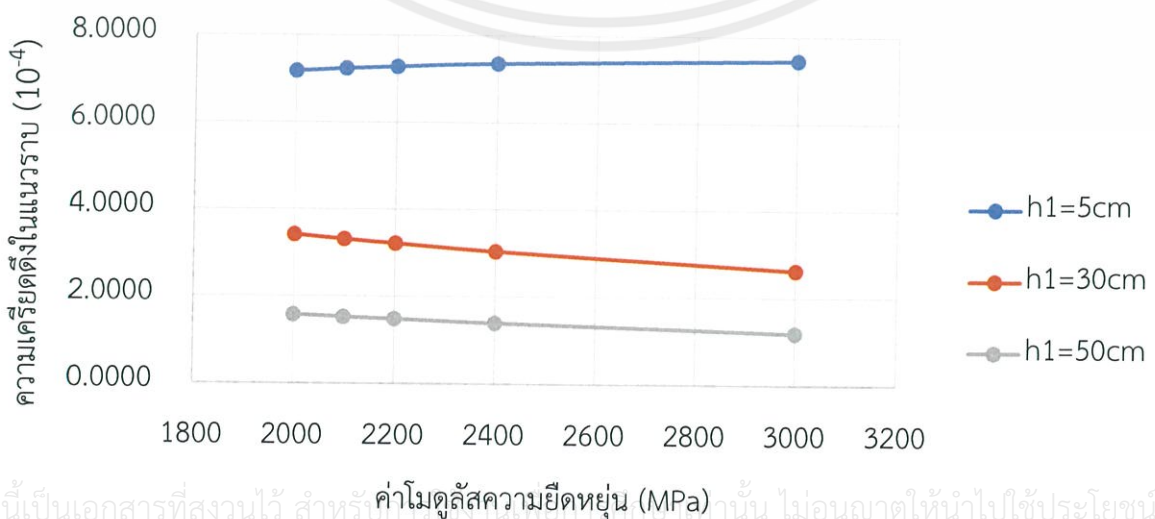
## กรณีศึกษาที่ 21



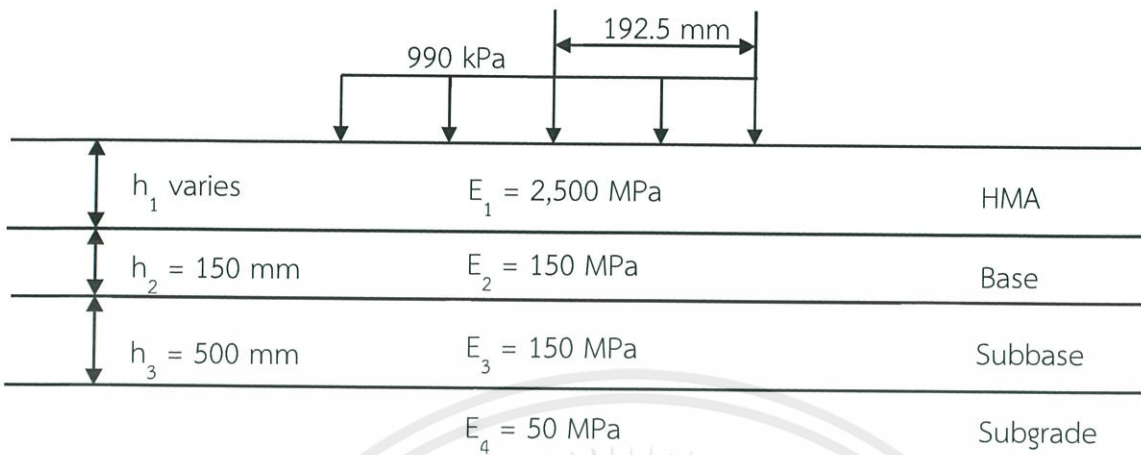
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวดิ่ง



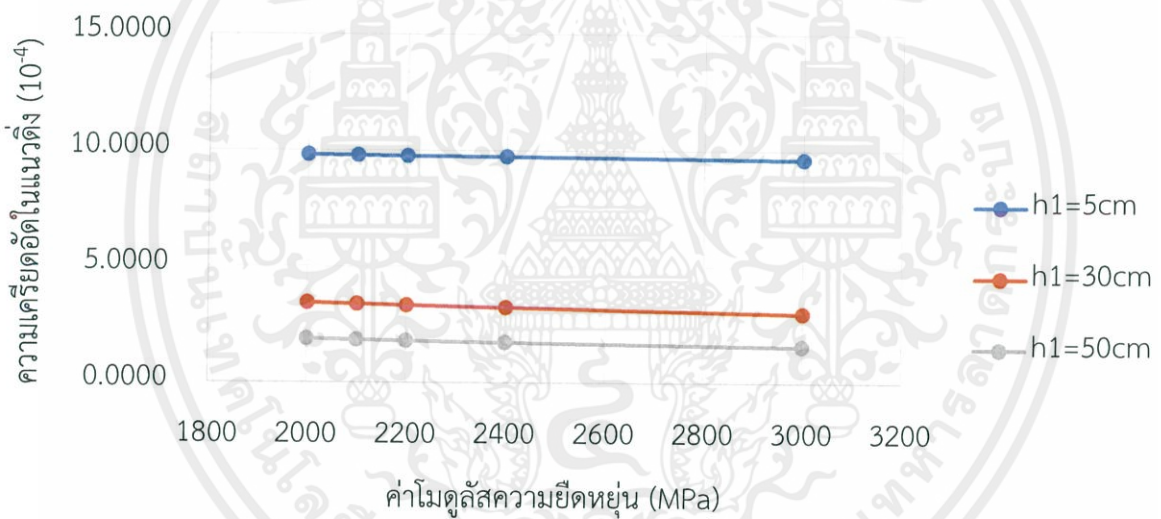
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



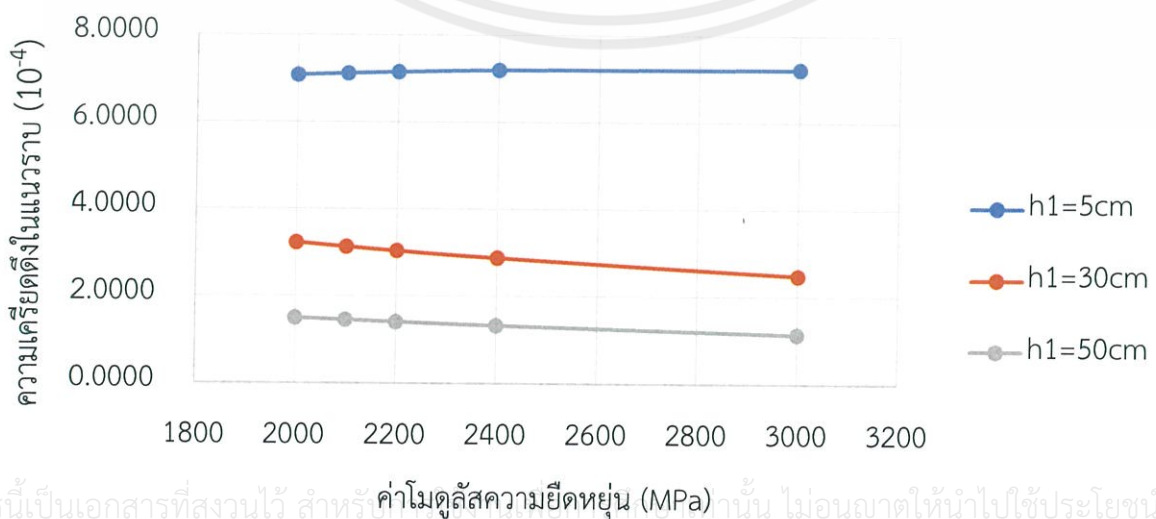
## กรณีศึกษาที่ 22



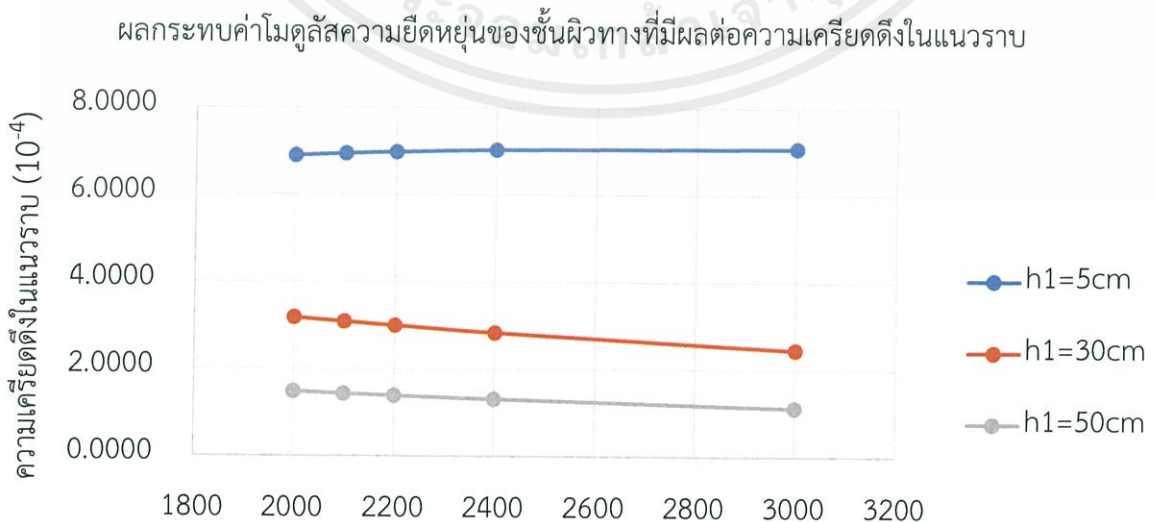
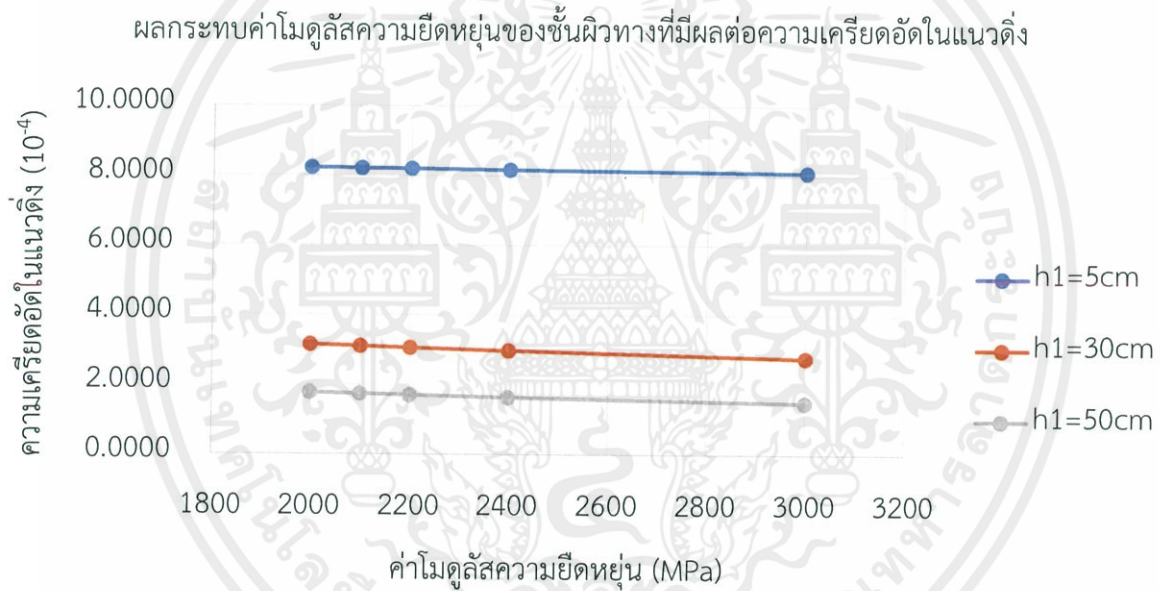
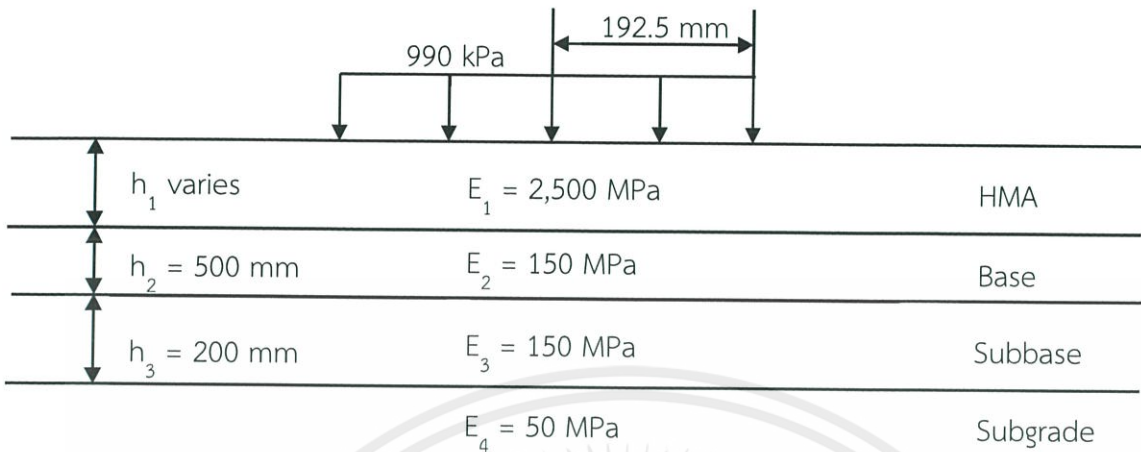
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ

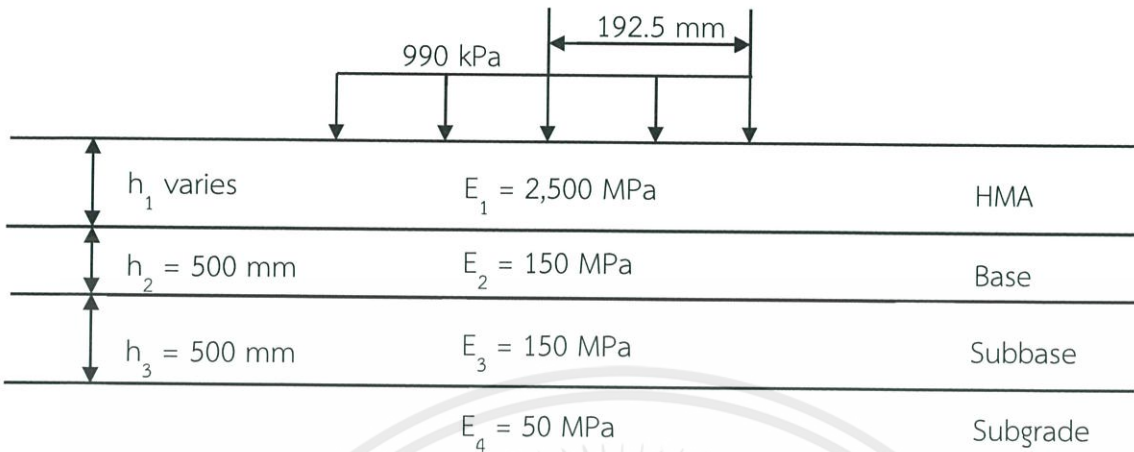


### กรณีศึกษาที่ 23

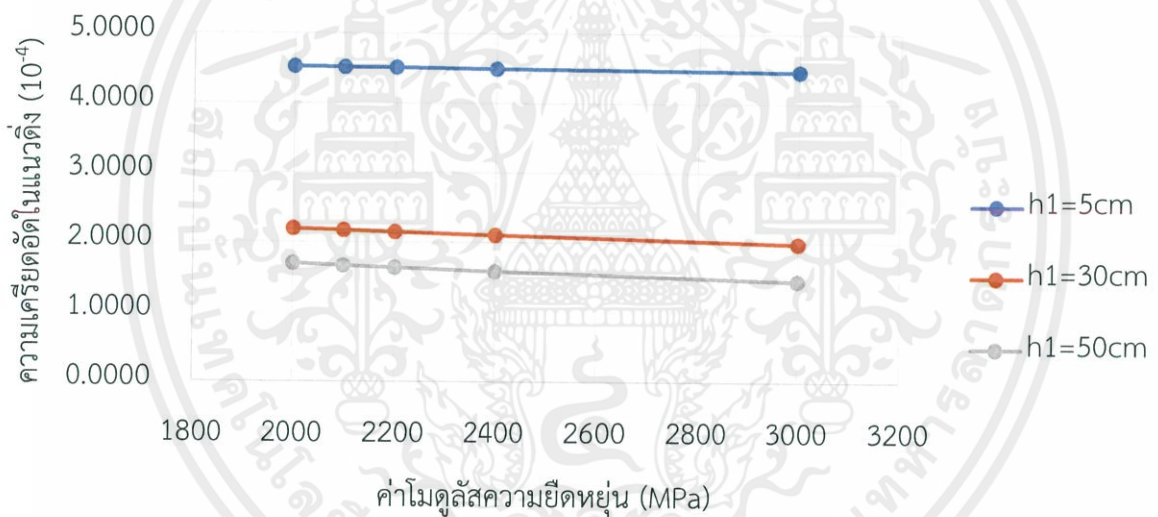


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

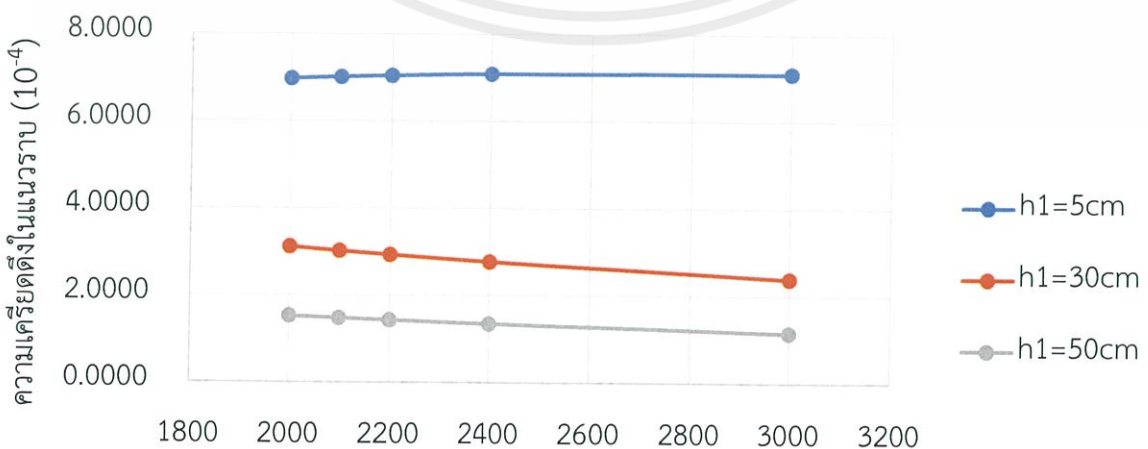
## กรณีศึกษาที่ 24



ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง

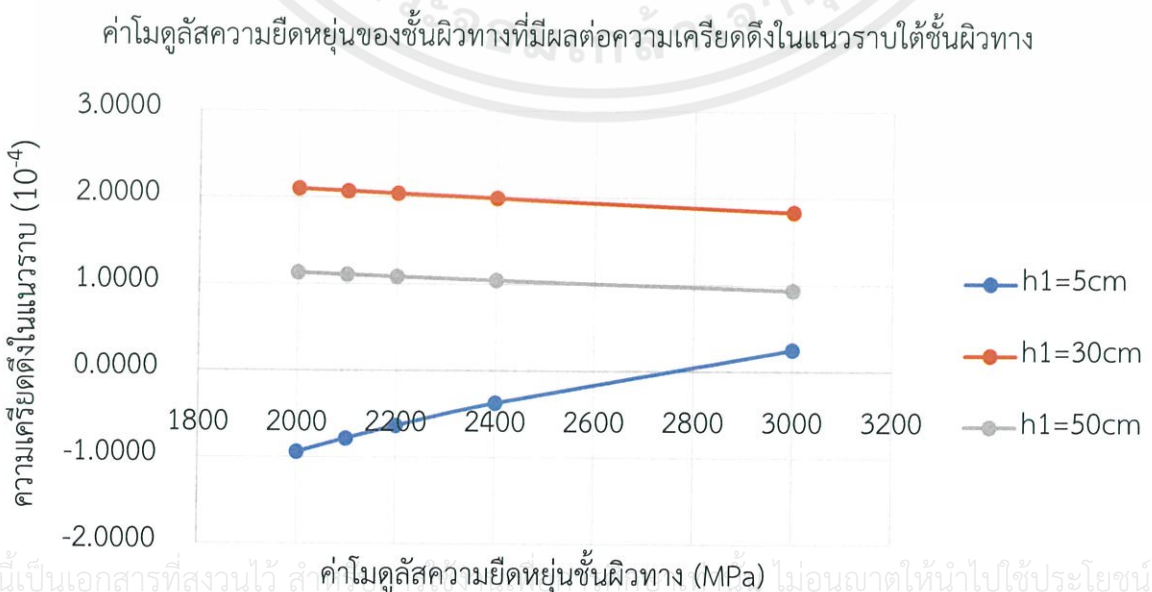
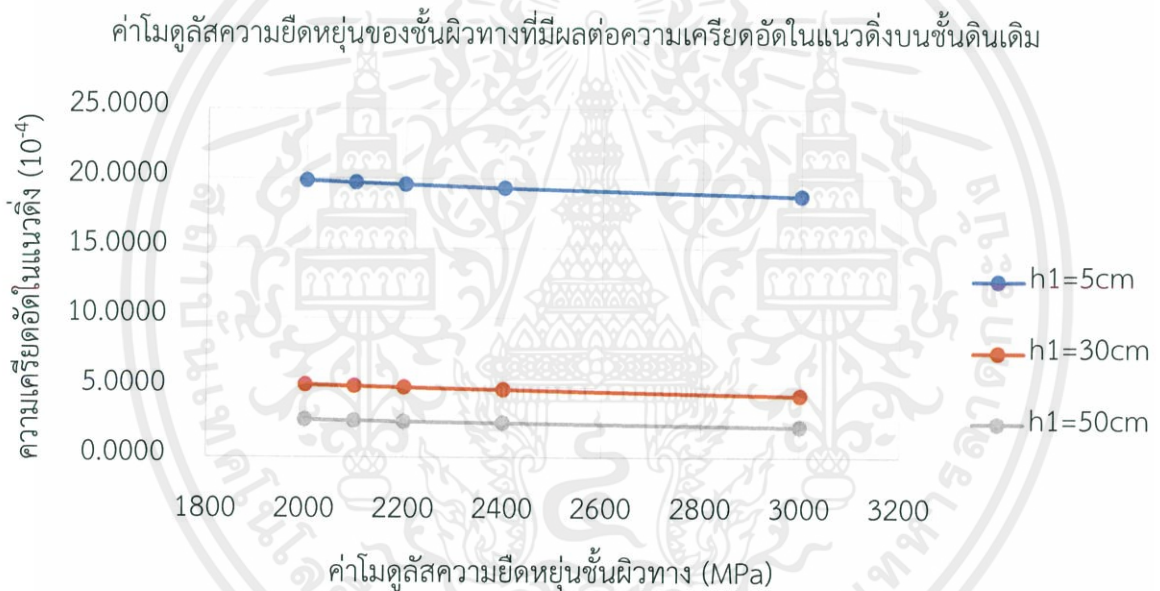
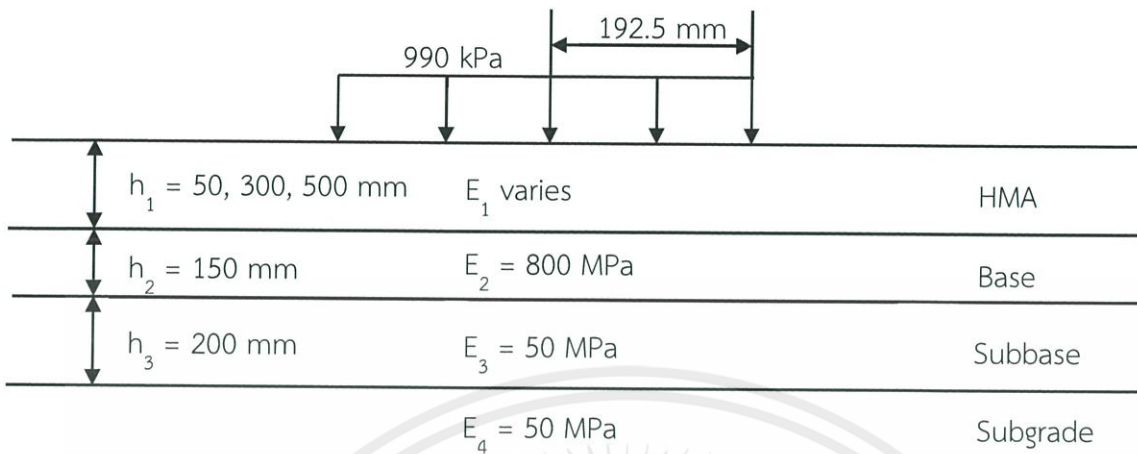


ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



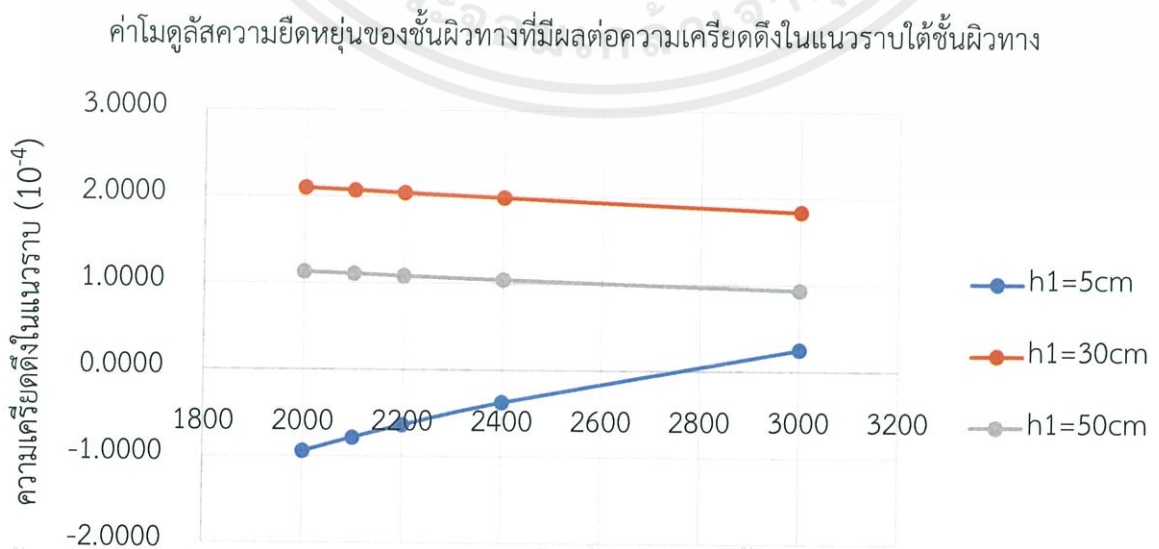
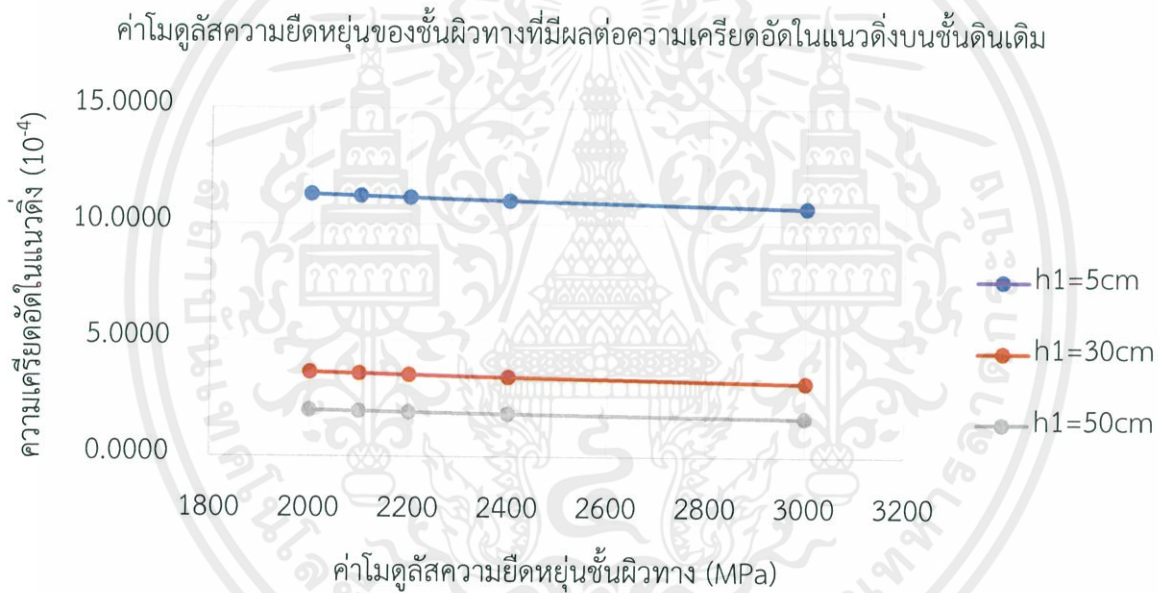
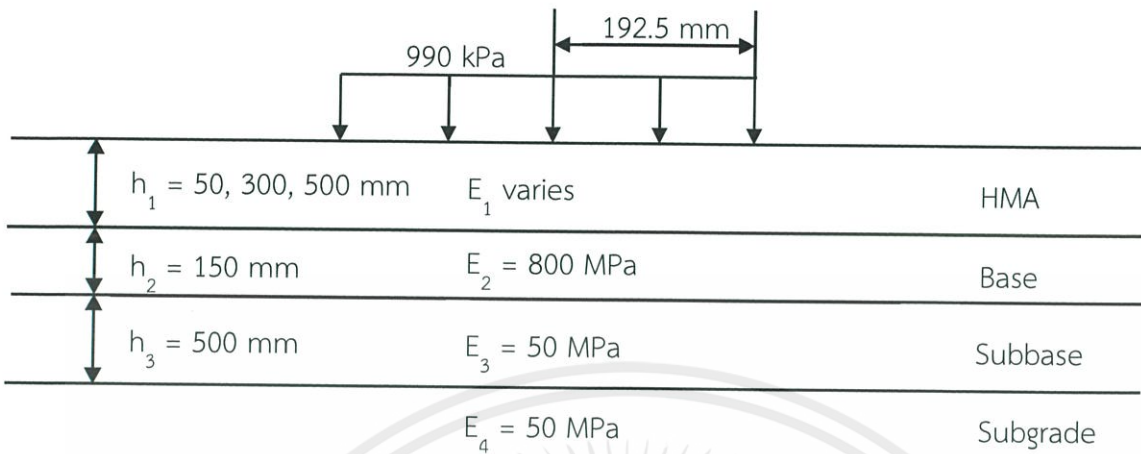
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

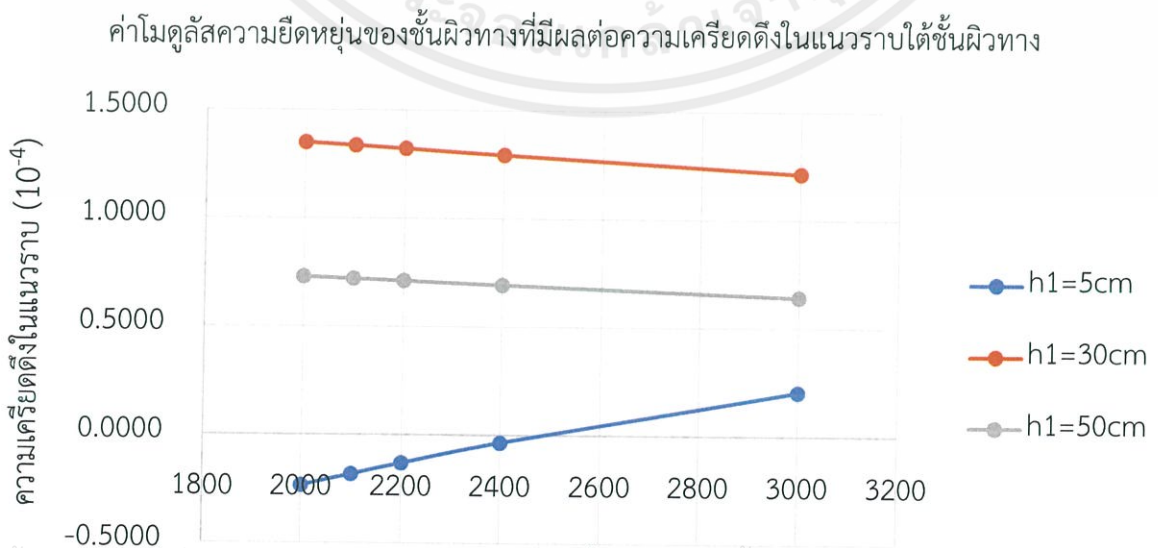
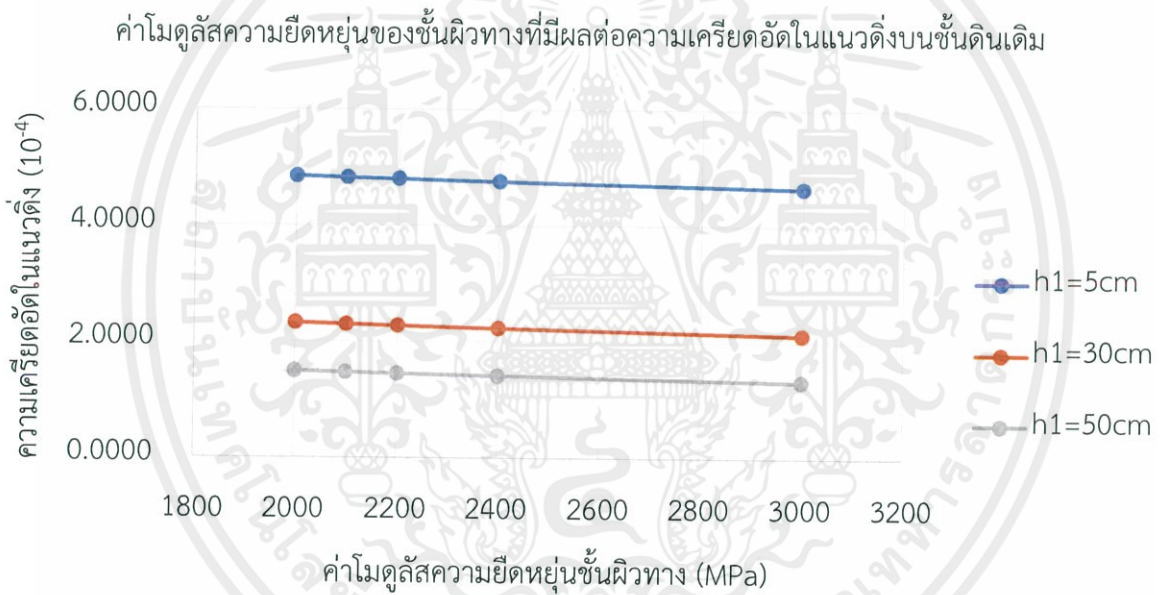
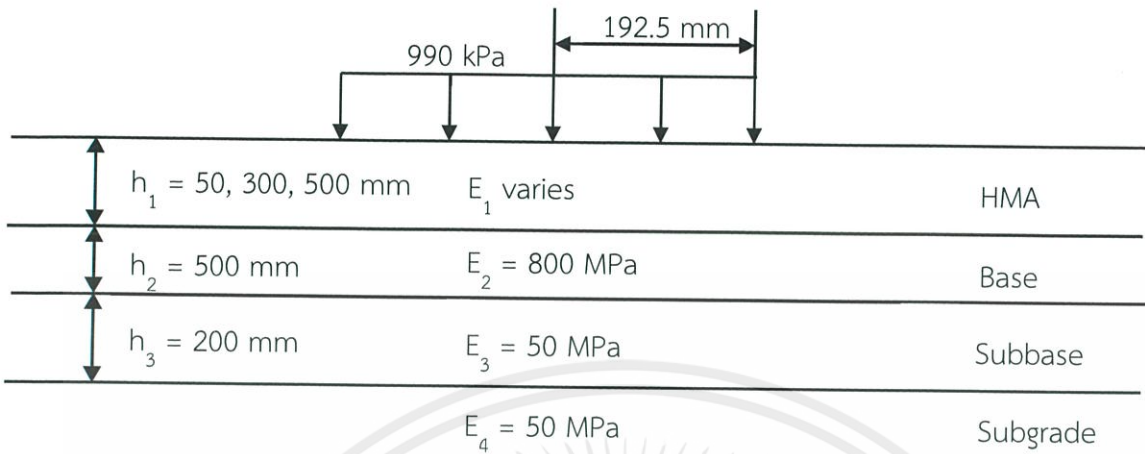
## กรณีศึกษาที่ 26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทาง (MPa) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรรมนำไปใช้

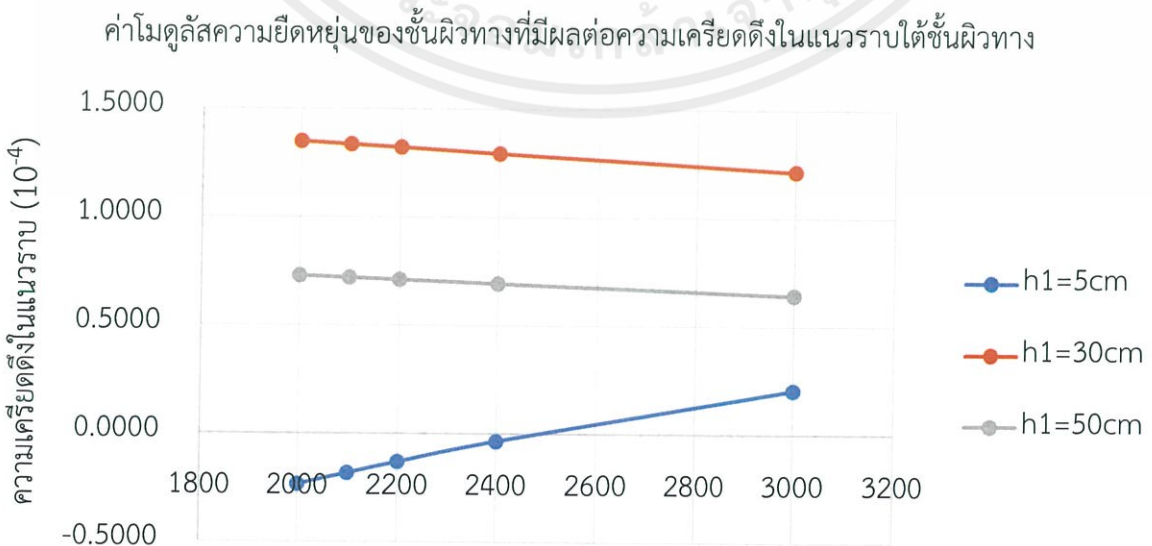
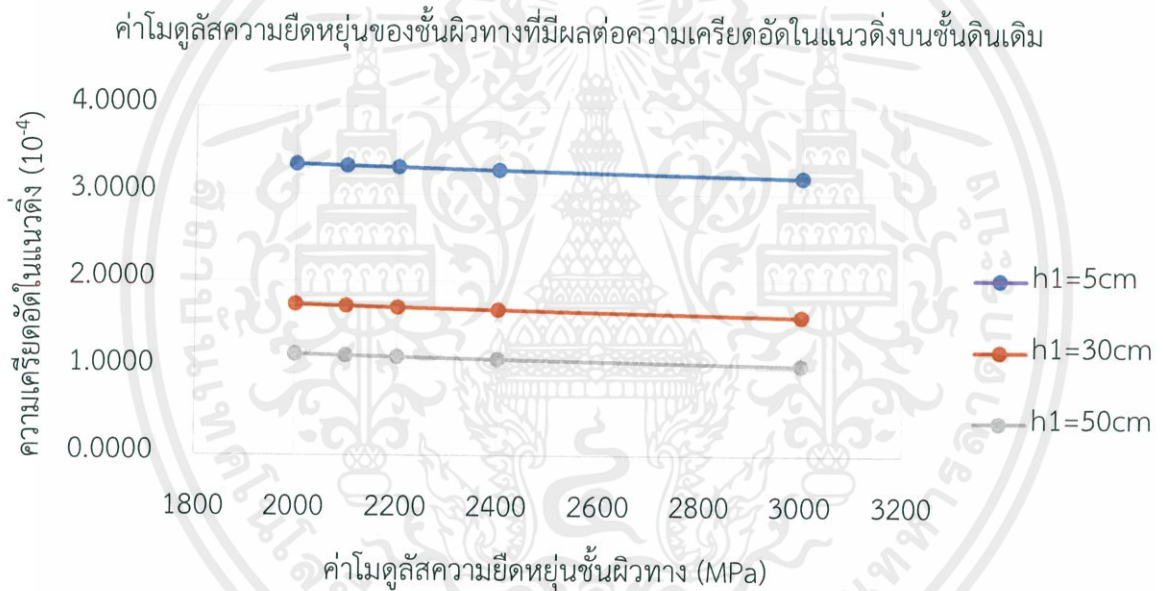
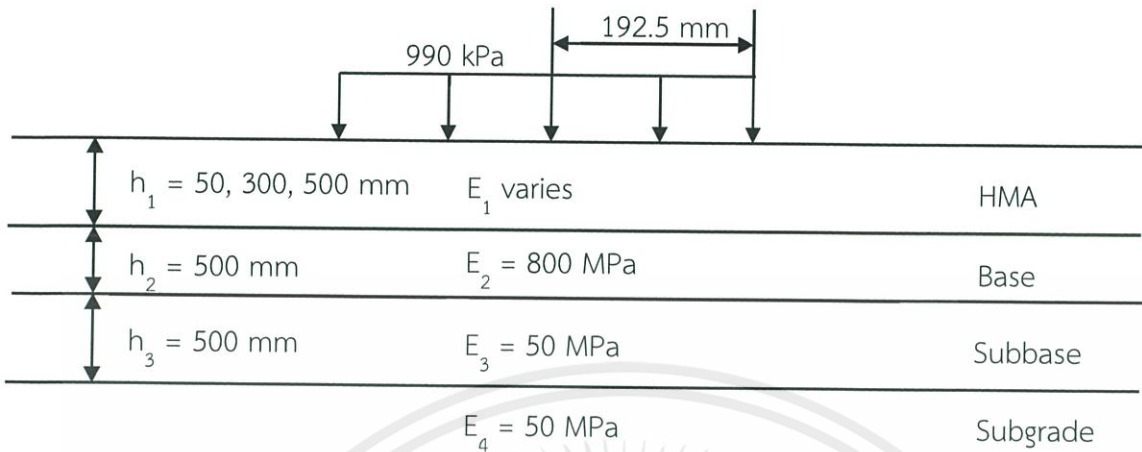
### กรณีศึกษาที่ 27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นชั้นผิวทาง (MPa) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

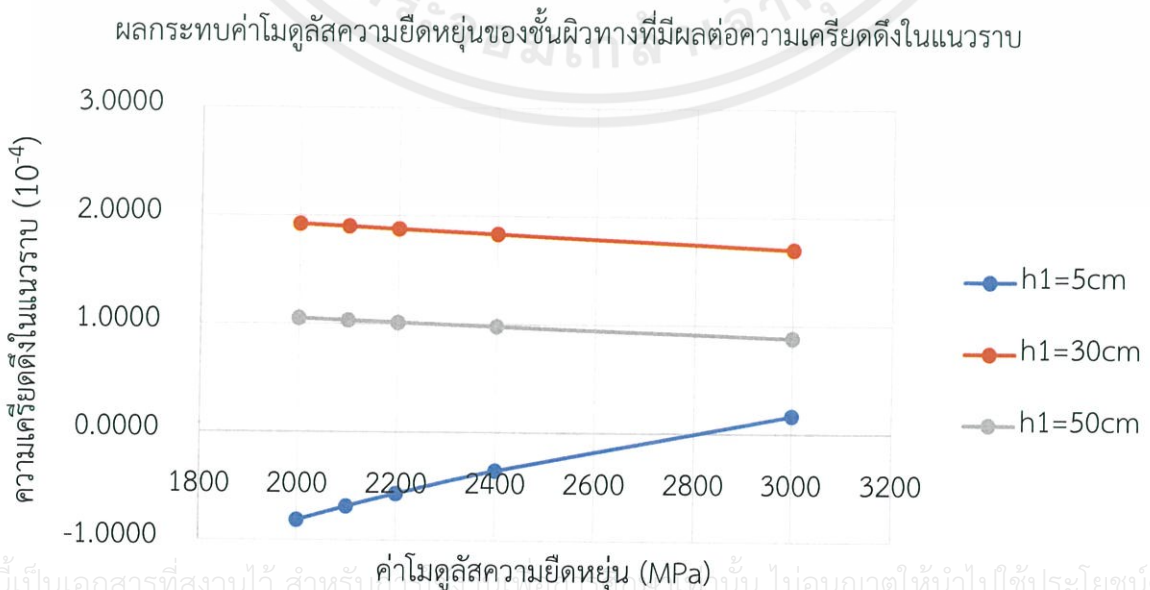
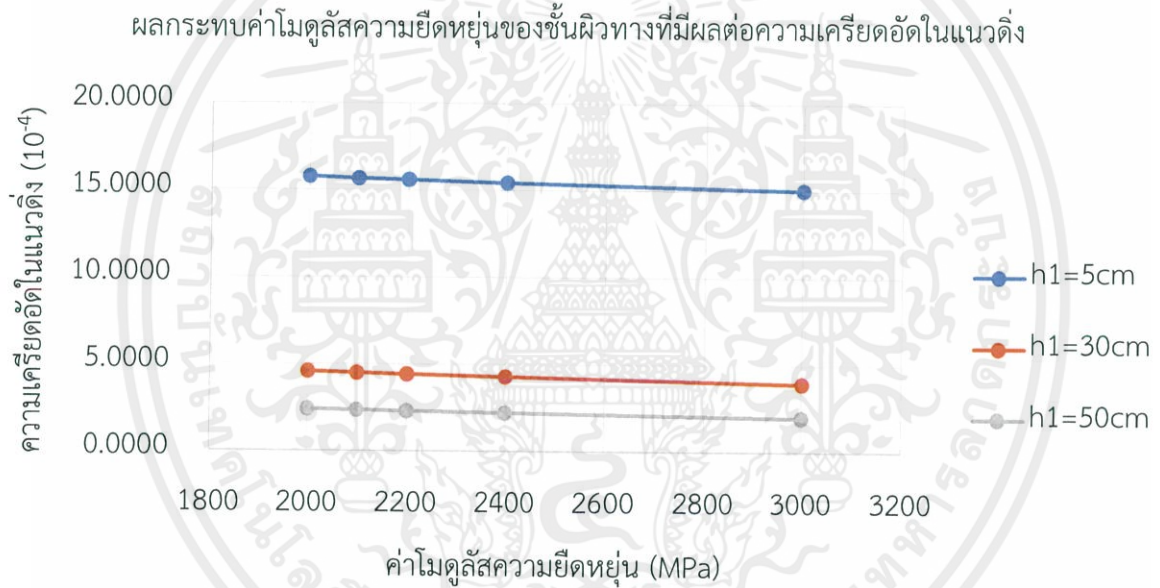
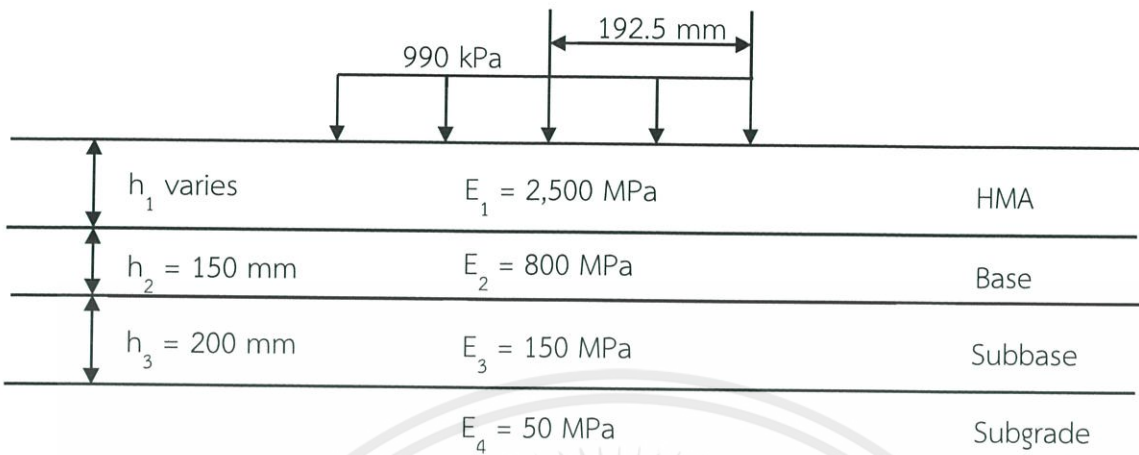
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 28

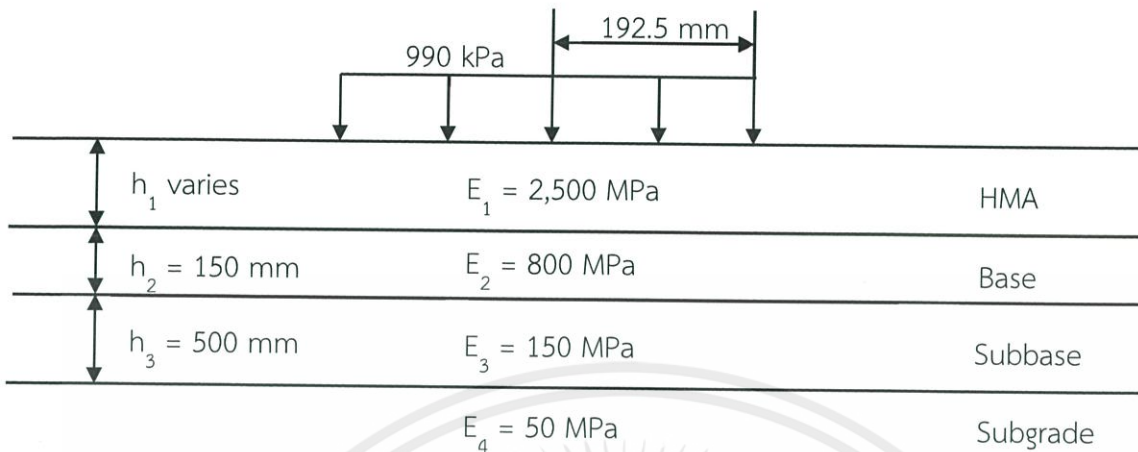


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีศึกษา

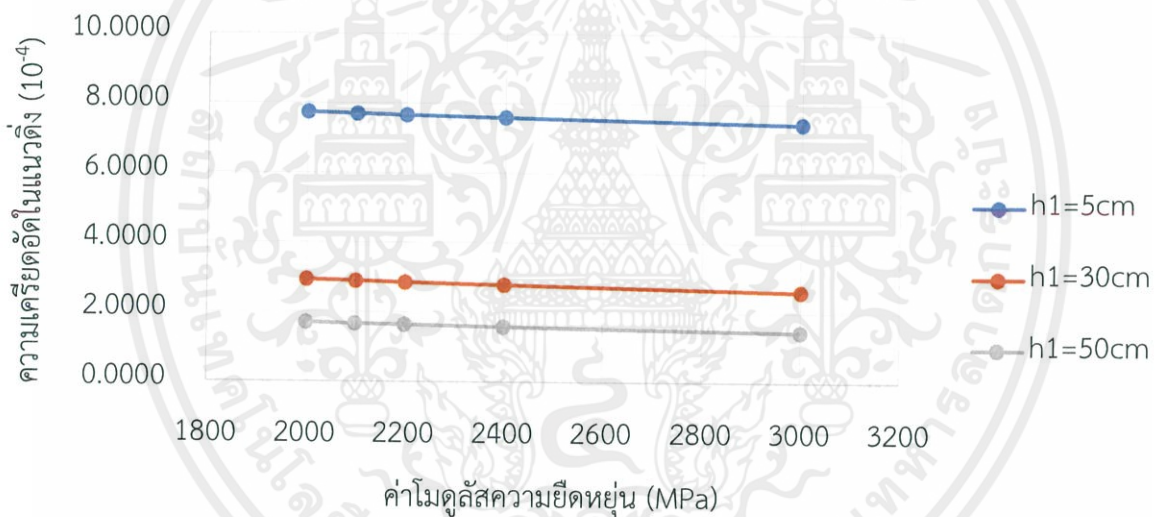
## กรณีศึกษาที่ 29



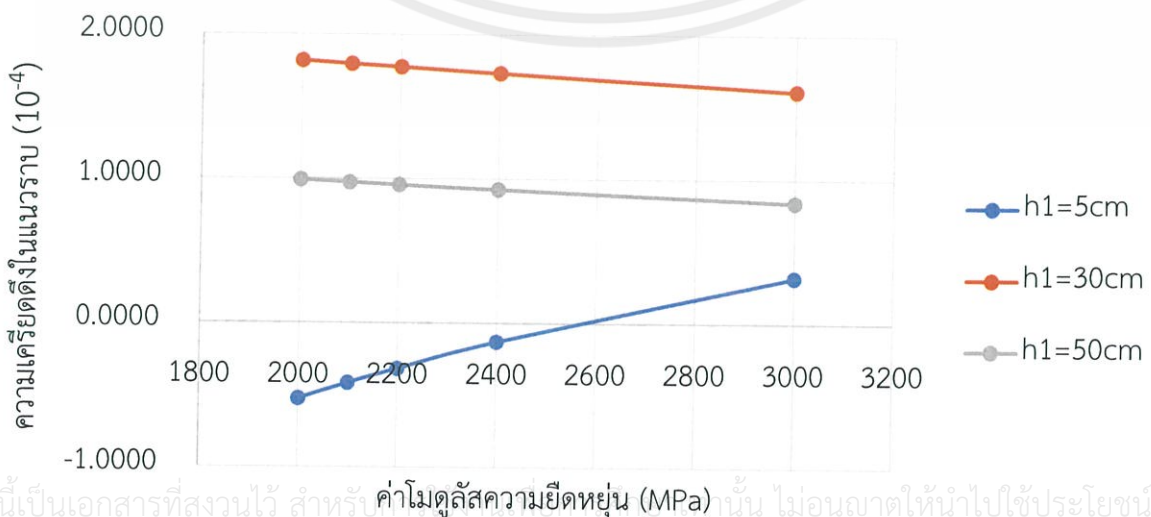
### กรณีศึกษาที่ 30



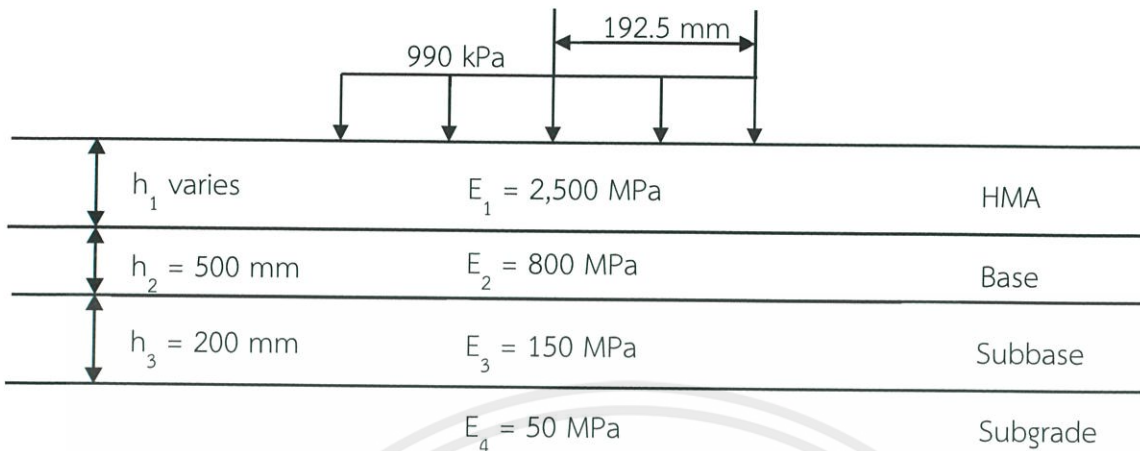
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



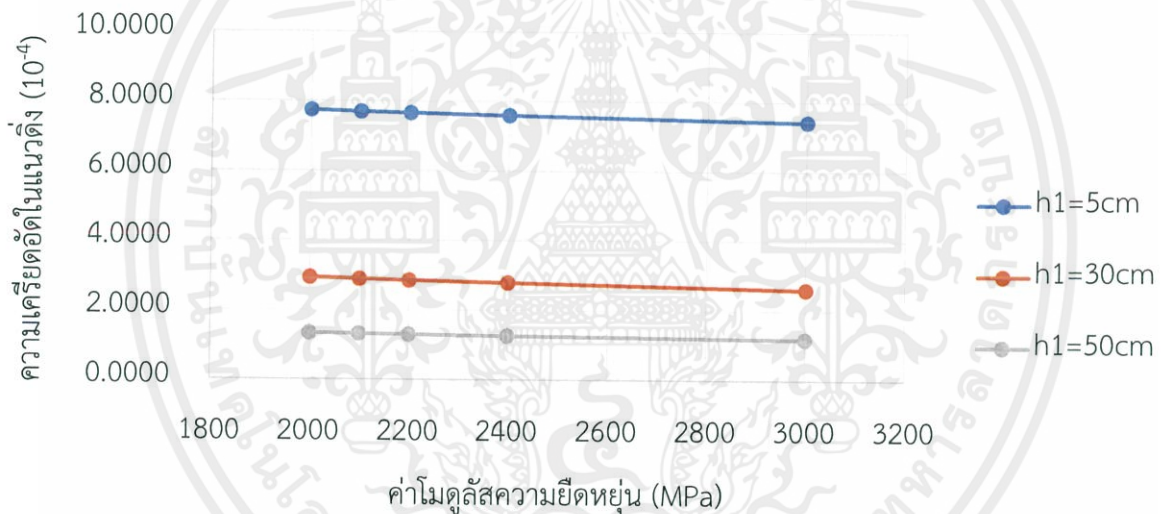
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



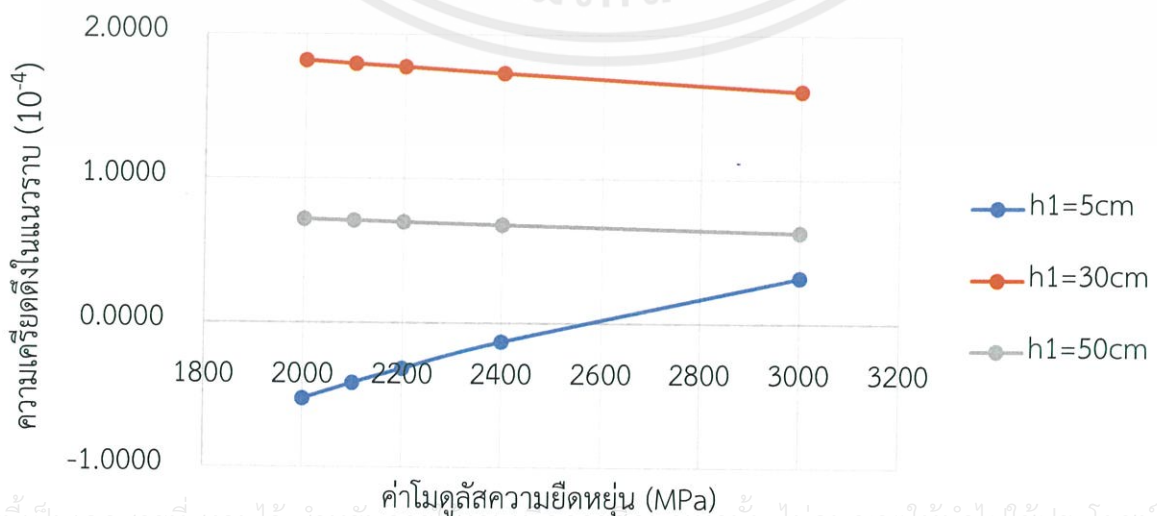
### กรณีศึกษาที่ 31



ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



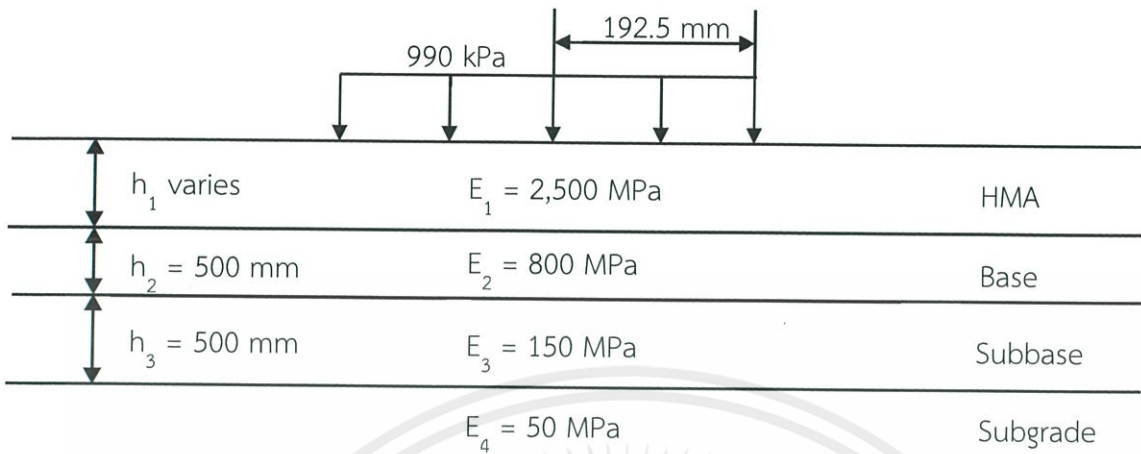
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



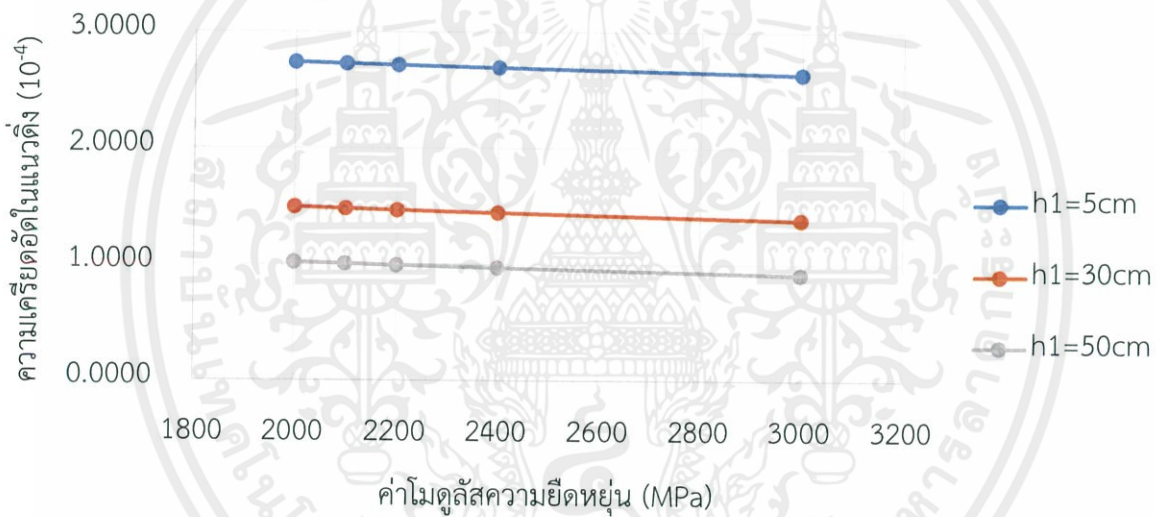
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

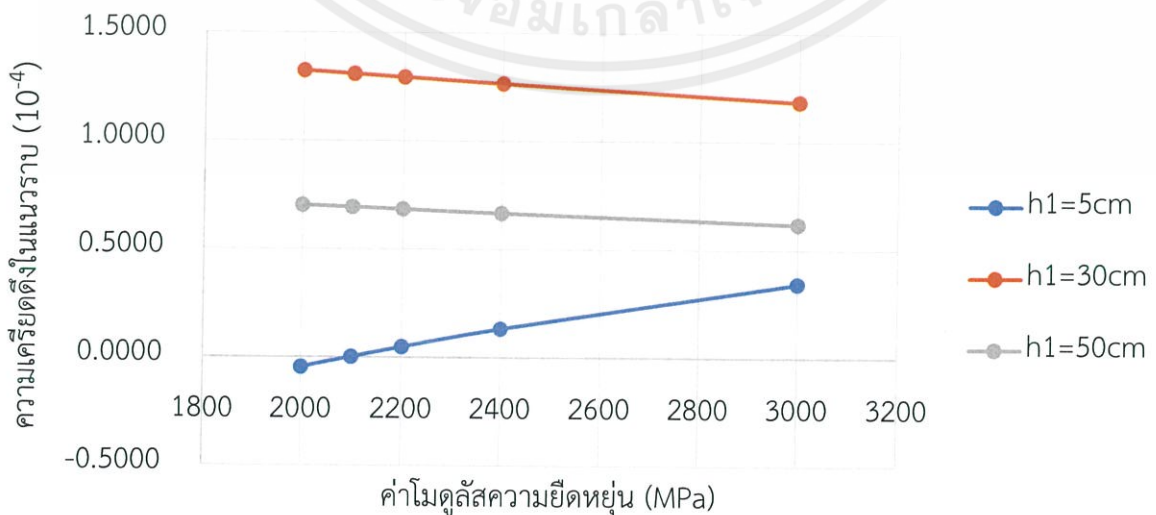
### กรณีศึกษาที่ 32



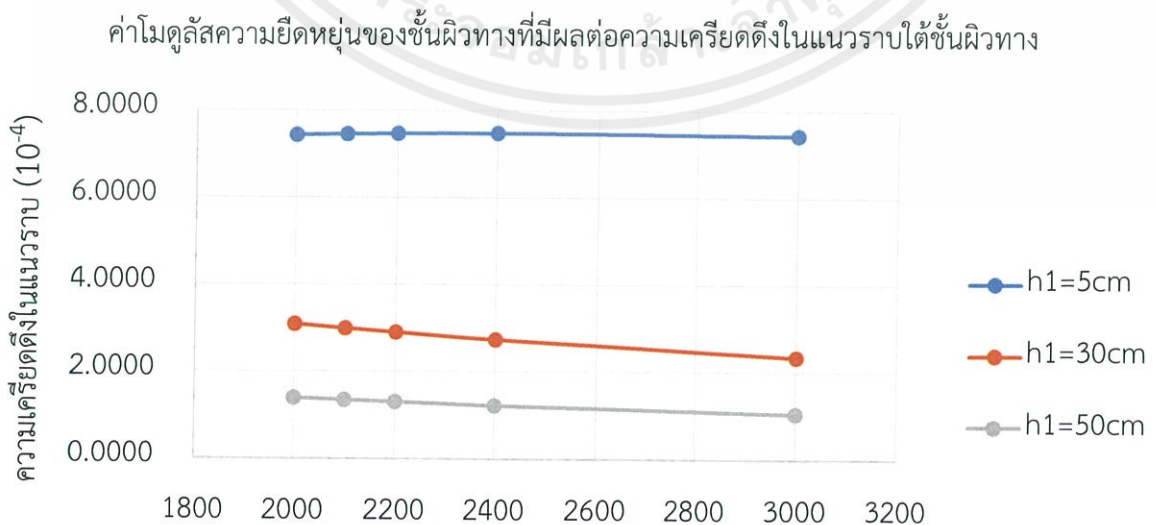
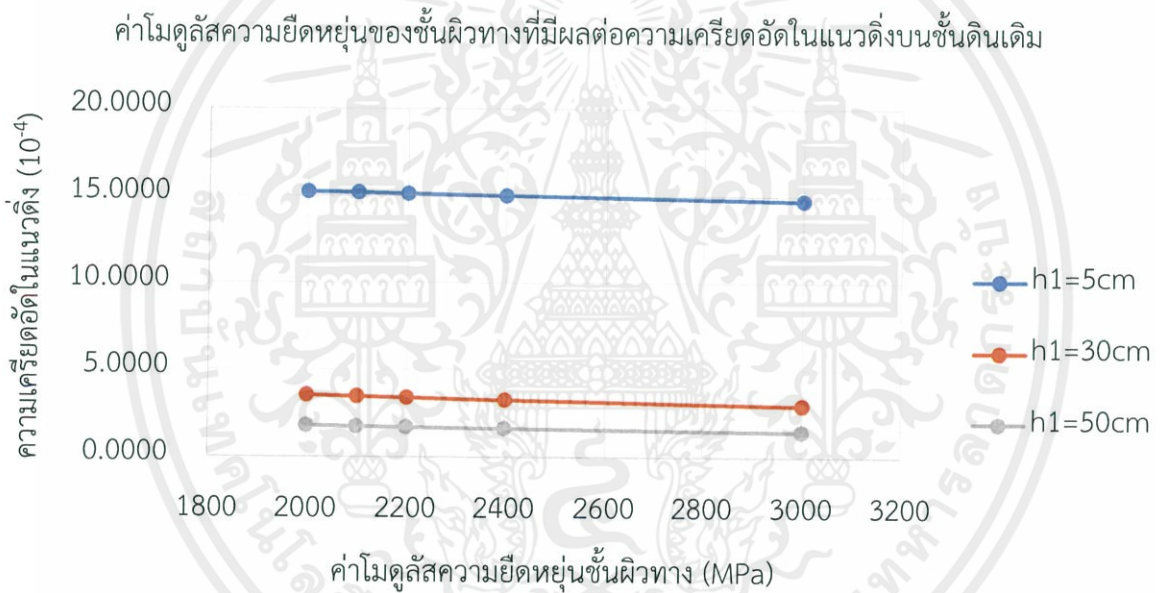
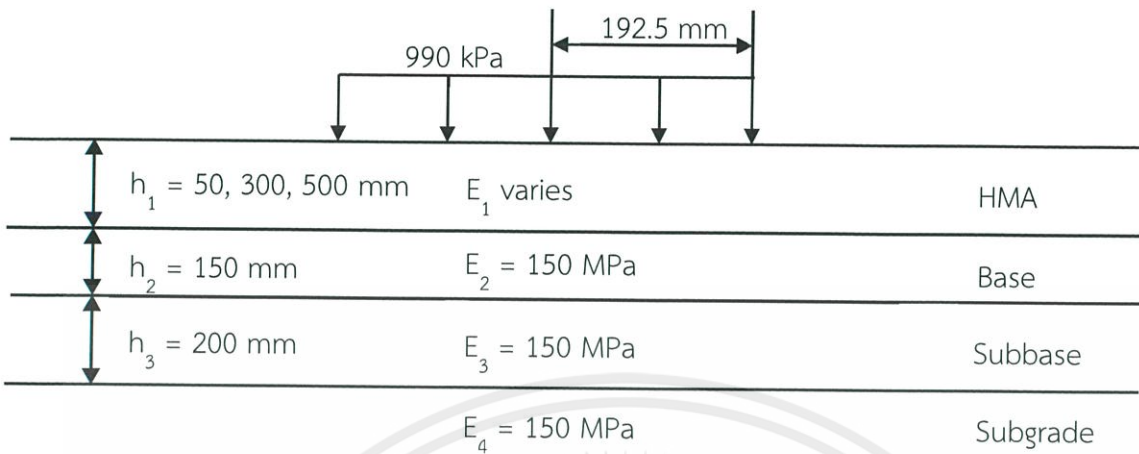
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้ง



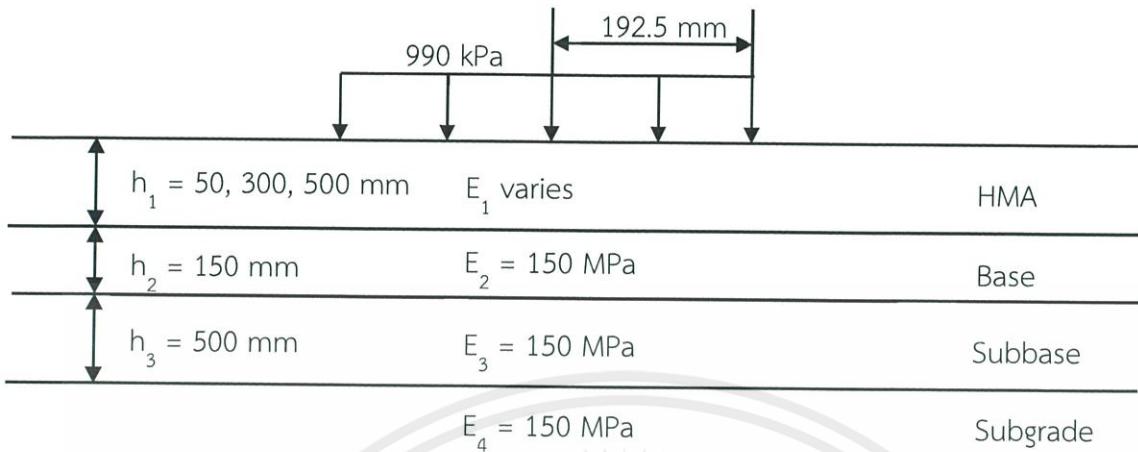
ผลกระทบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบ



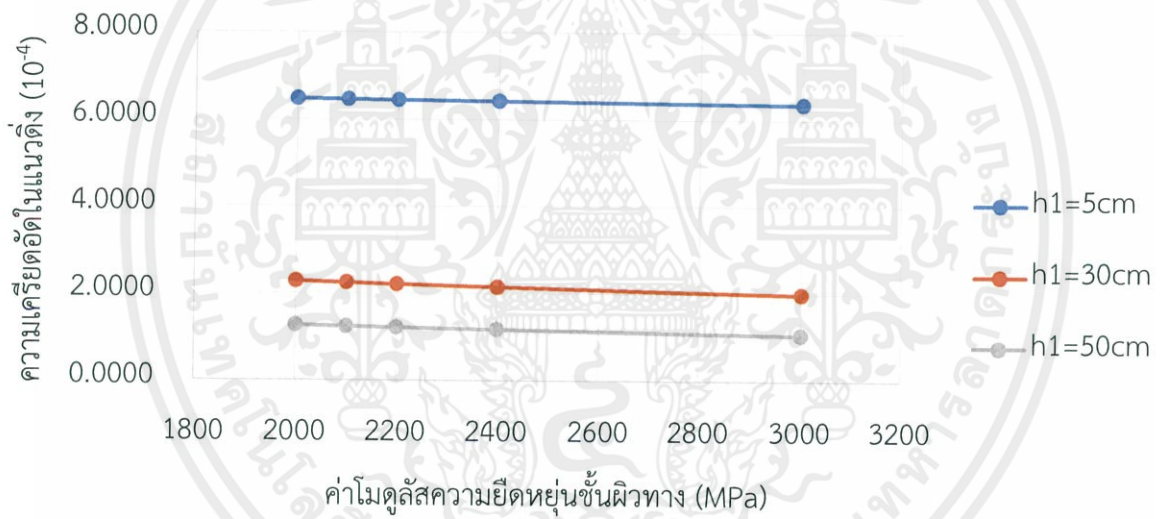
### กรณีศึกษาที่ 33



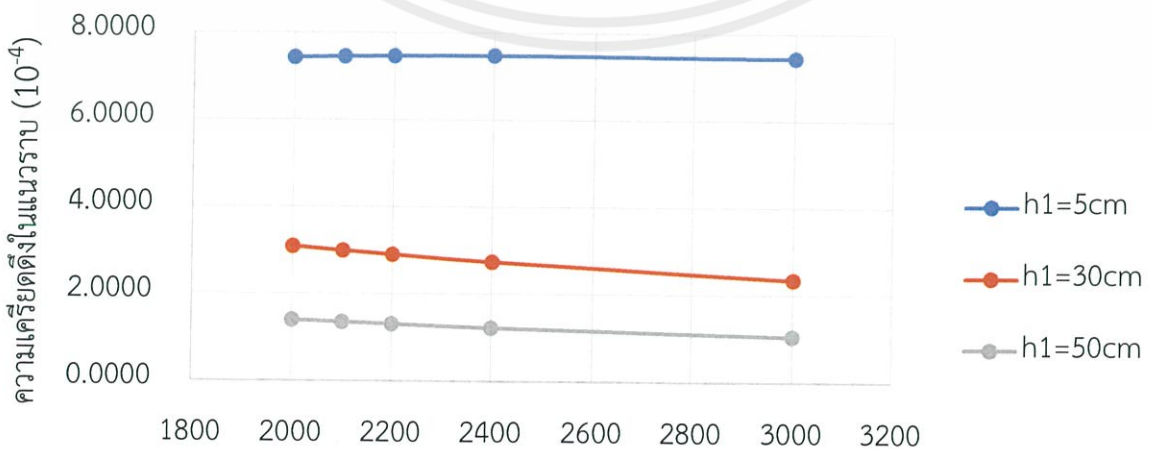
### กรณีศึกษาที่ 34



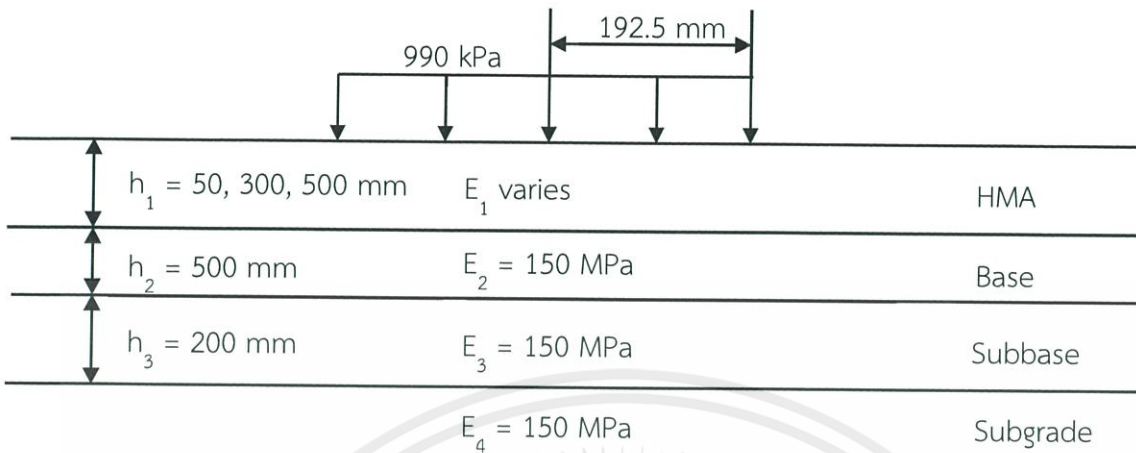
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวดิ่งบนชั้นดินเดิม



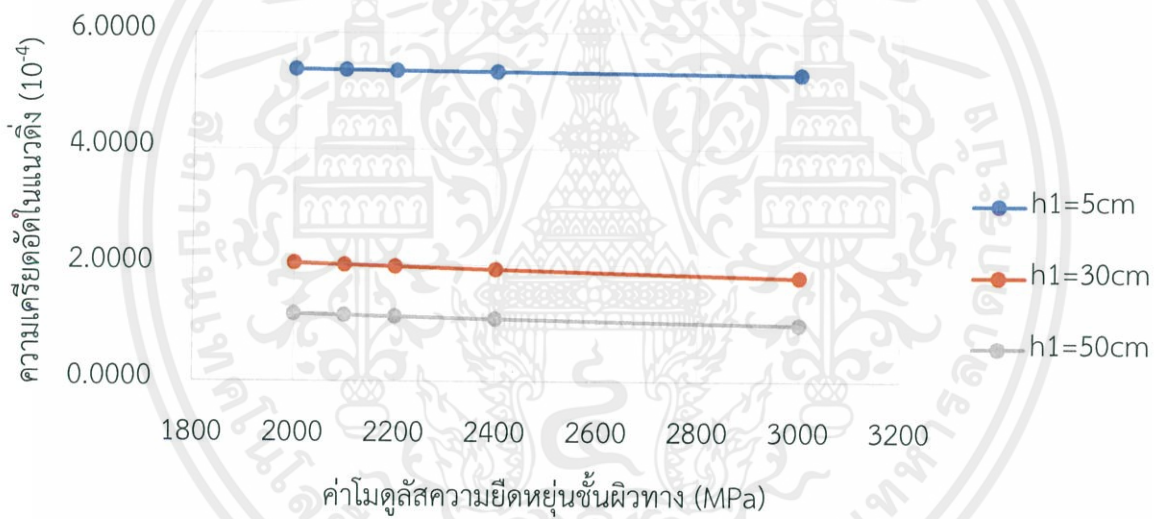
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



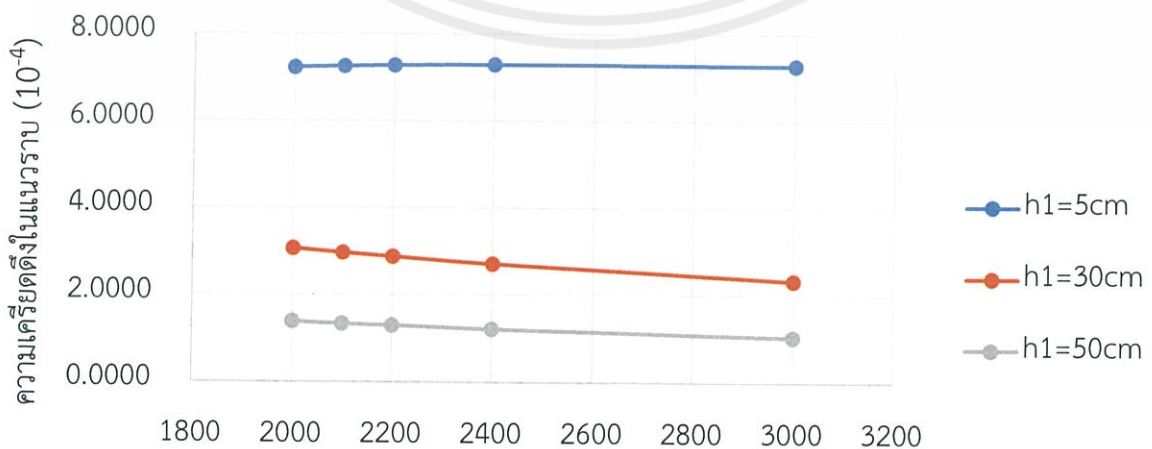
### กรณีศึกษา 35



ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม

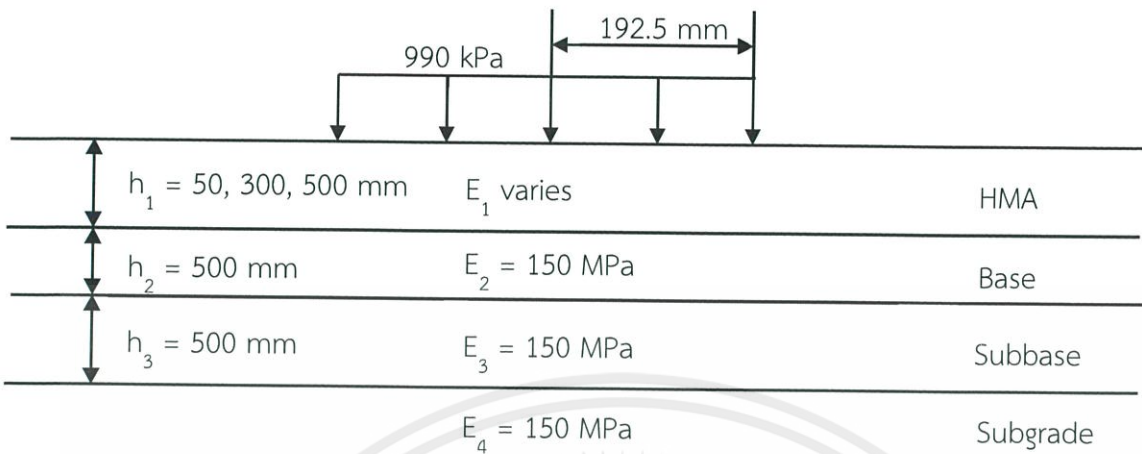


ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง

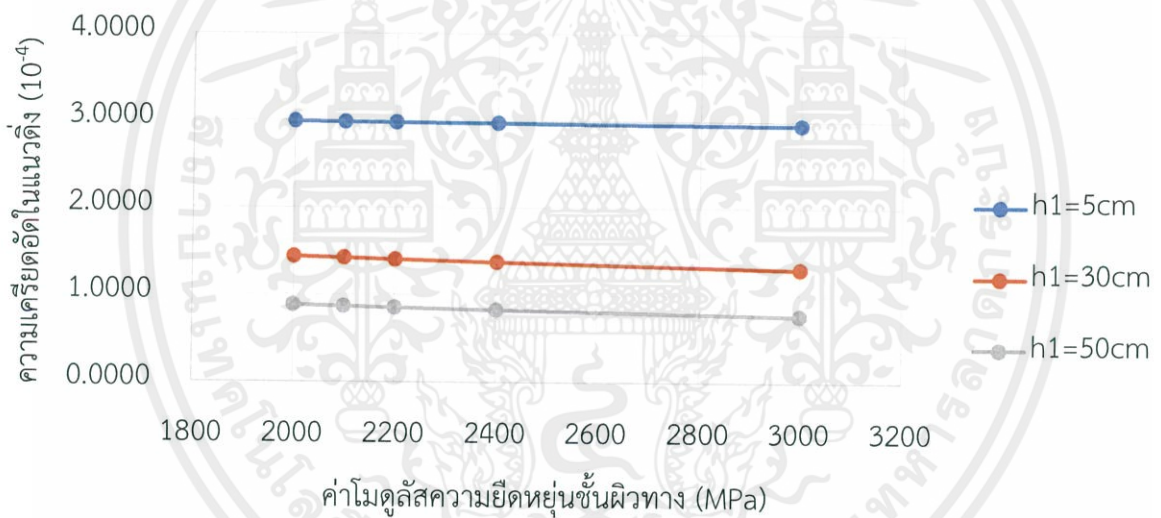


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

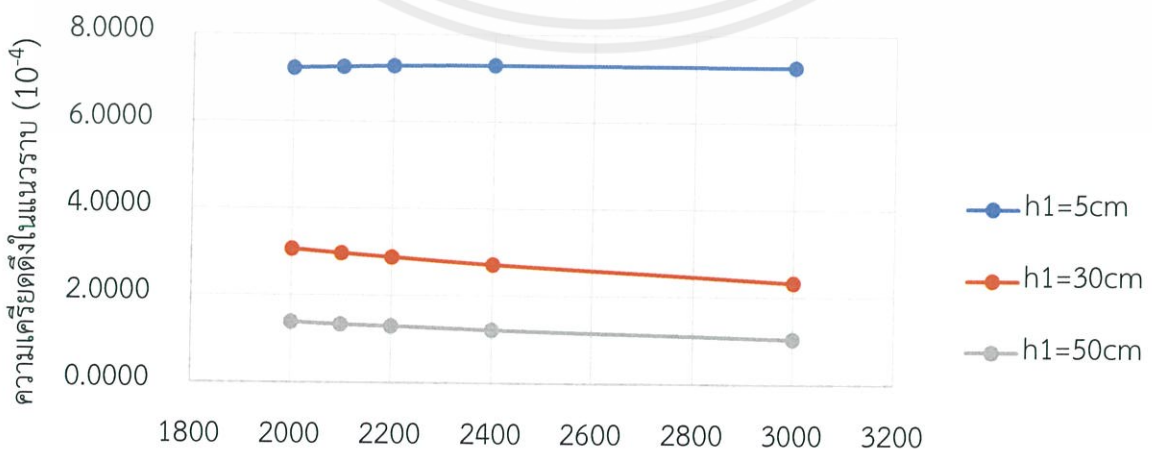
### กรณีศึกษาที่ 36



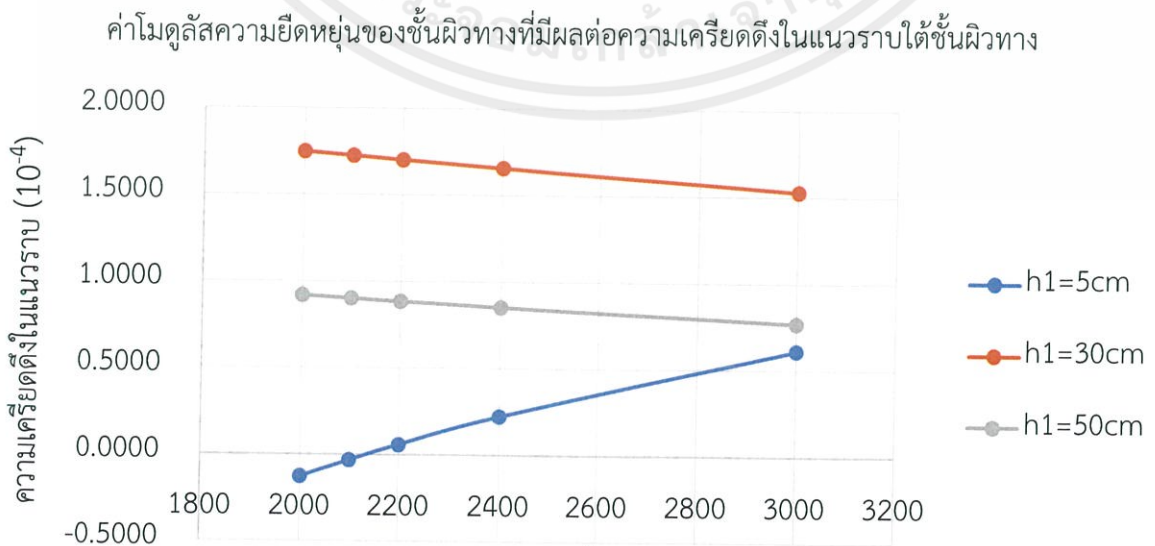
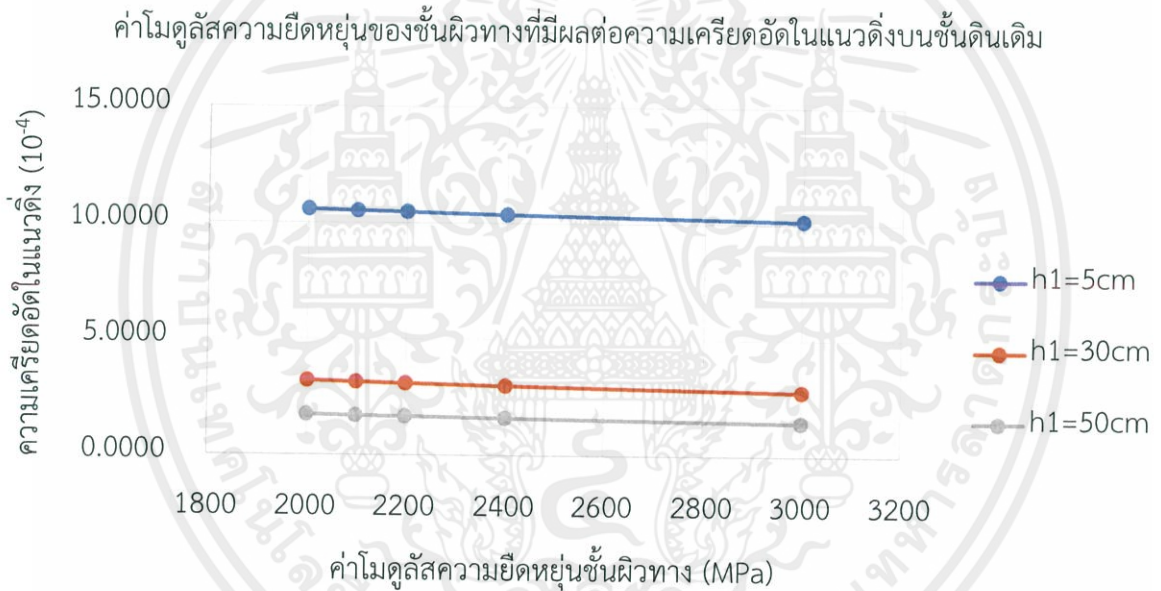
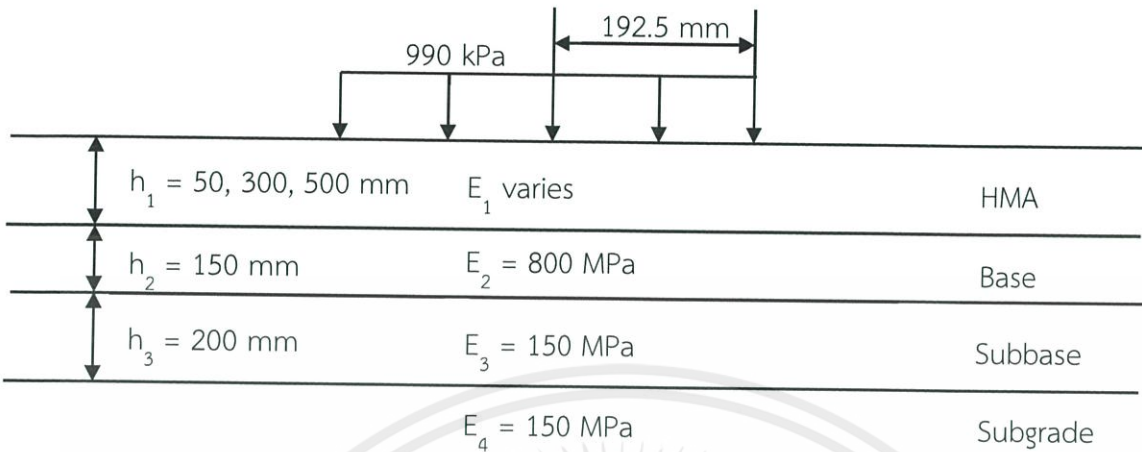
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวดิ่งบนชั้นดินเดิม



ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดตั้งในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง

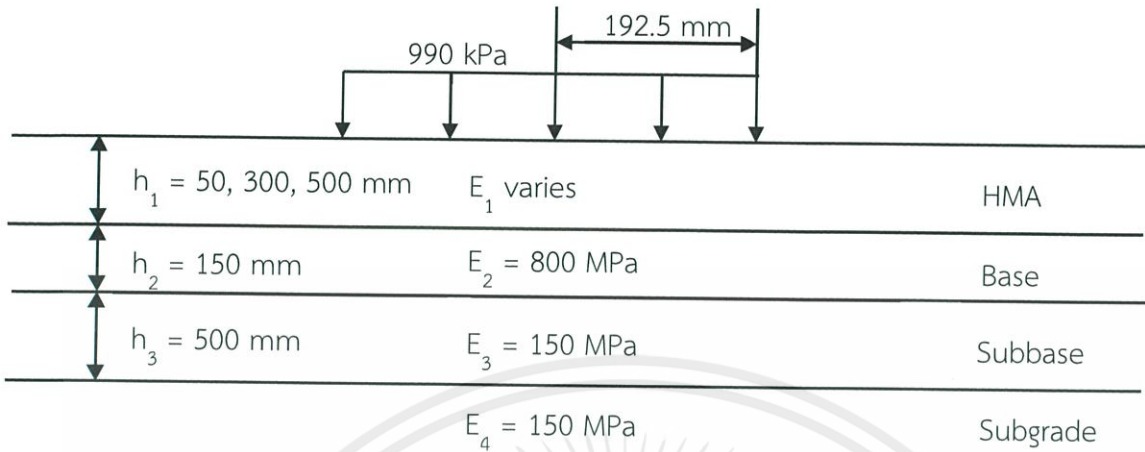


### กรณีศึกษาที่ 37

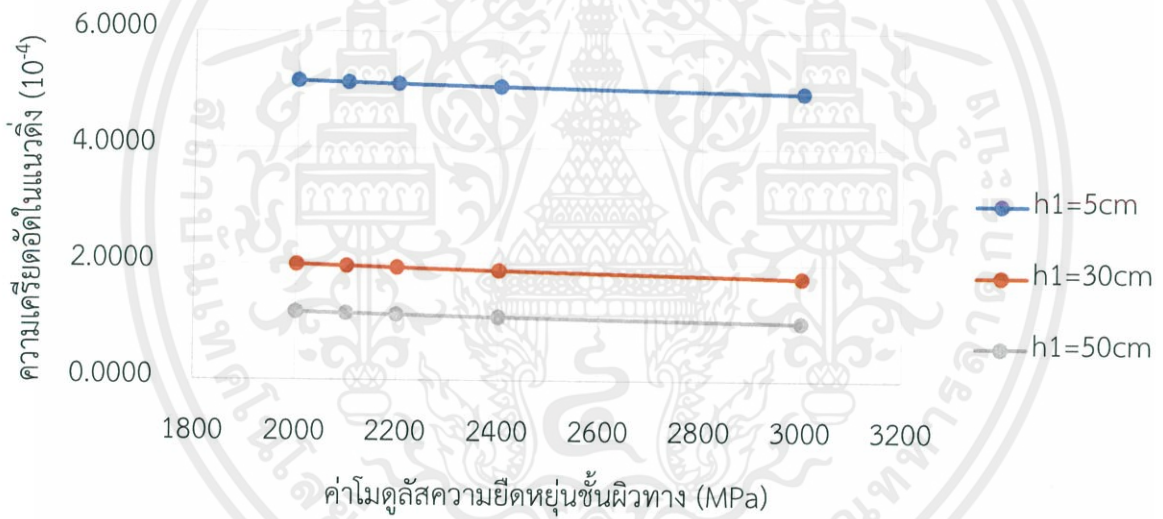


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับใช้เฉพาะงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

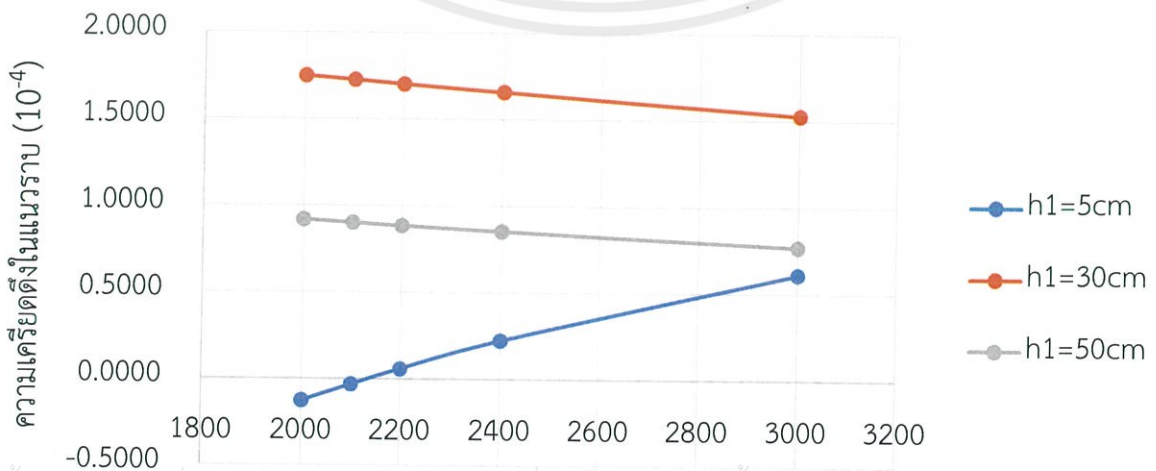
กรณีศึกษาที่ 38



ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



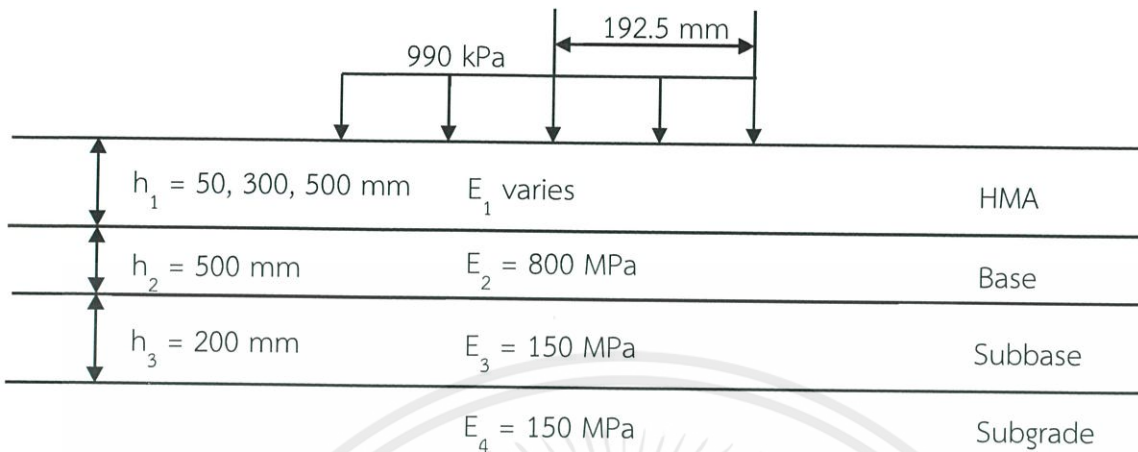
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



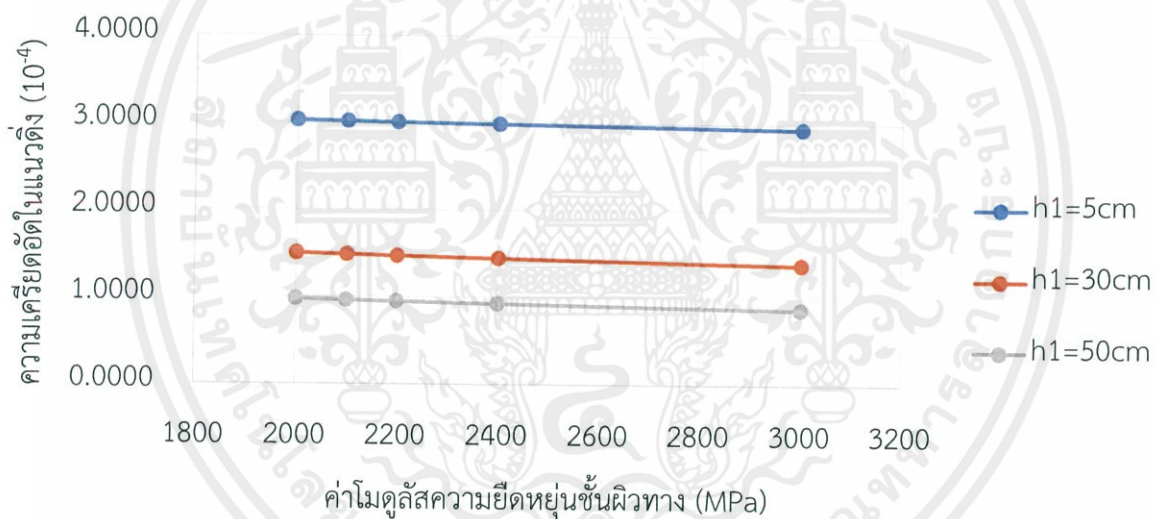
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

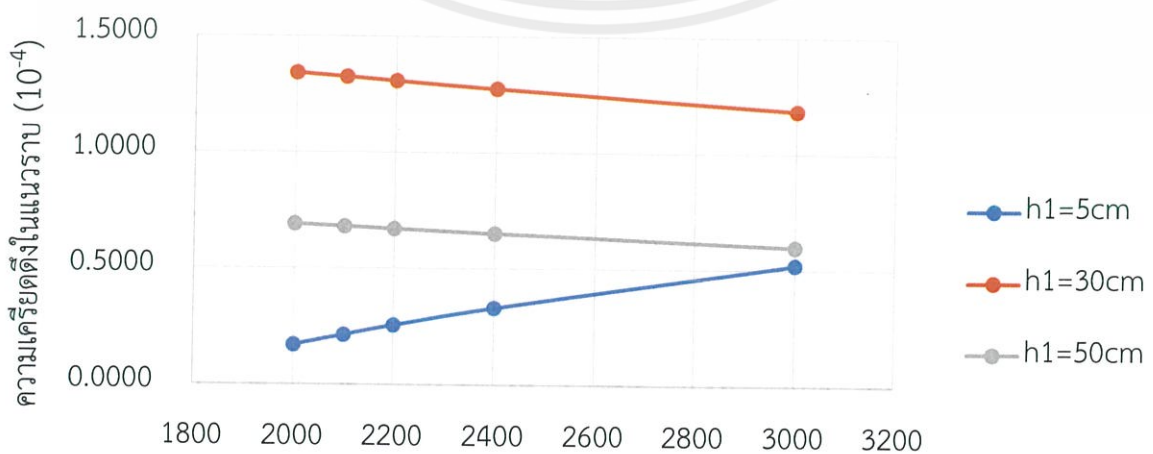
### กรณีศึกษาที่ 39



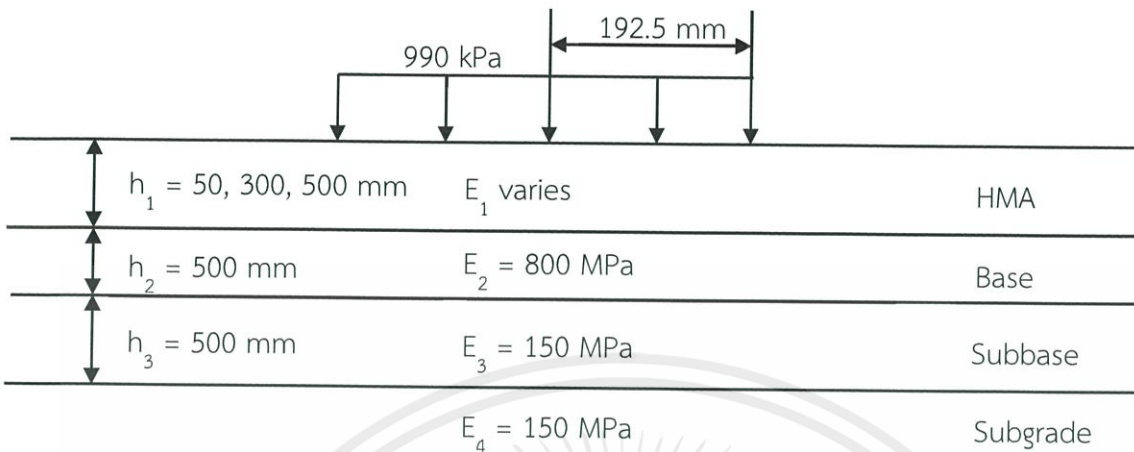
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



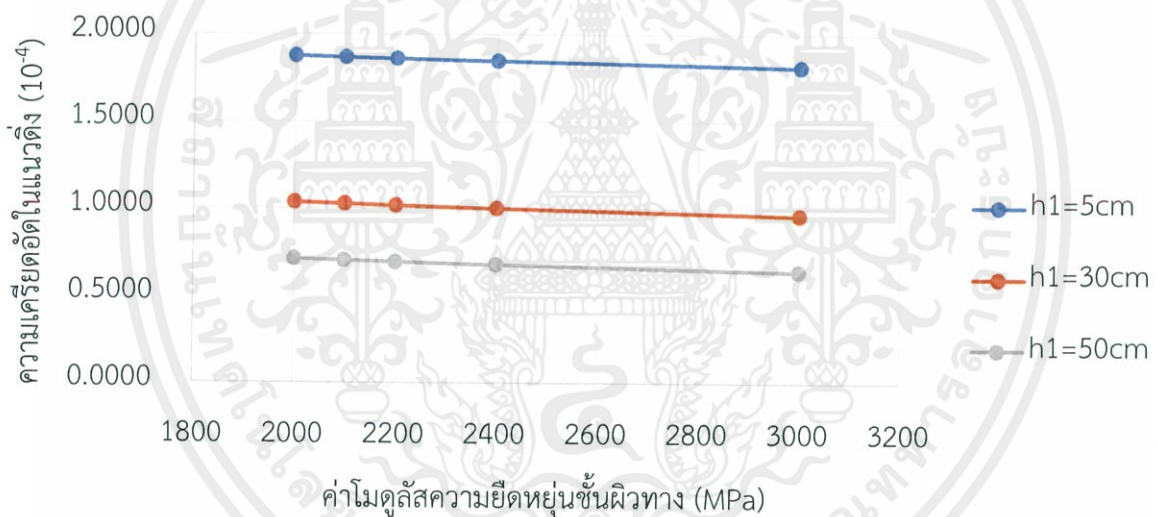
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



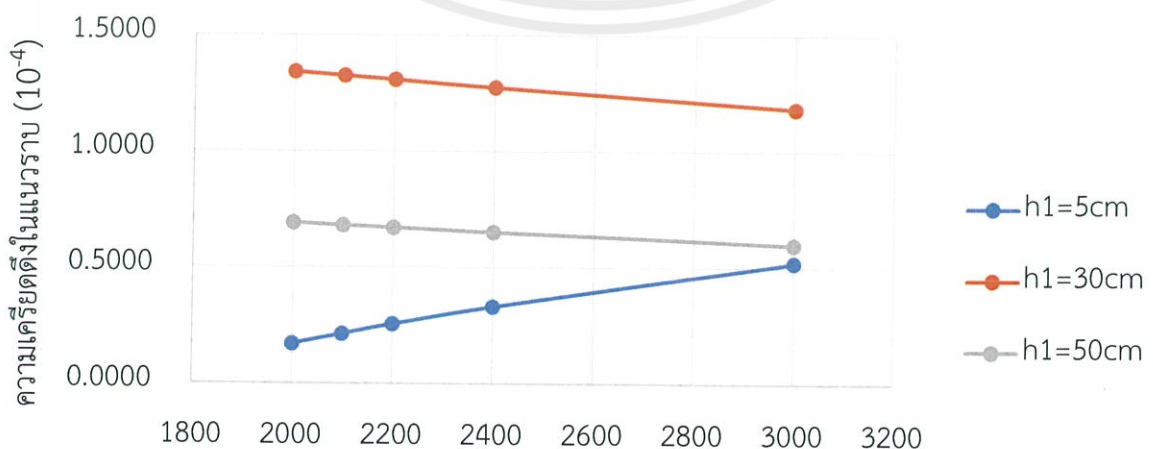
### กรณีศึกษาที่ 40



ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดอัดในแนวตั้งบนชั้นดินเดิม



ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นผิวทางที่มีผลต่อความเครียดดึงในแนวราบใต้ชั้นผิวทาง



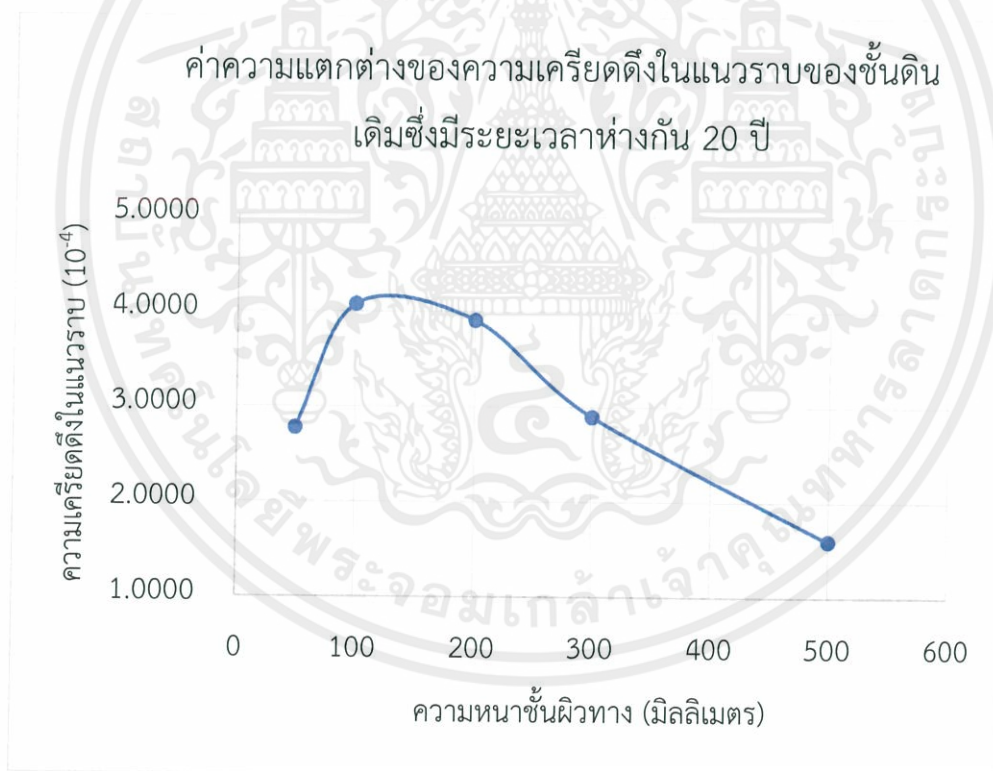
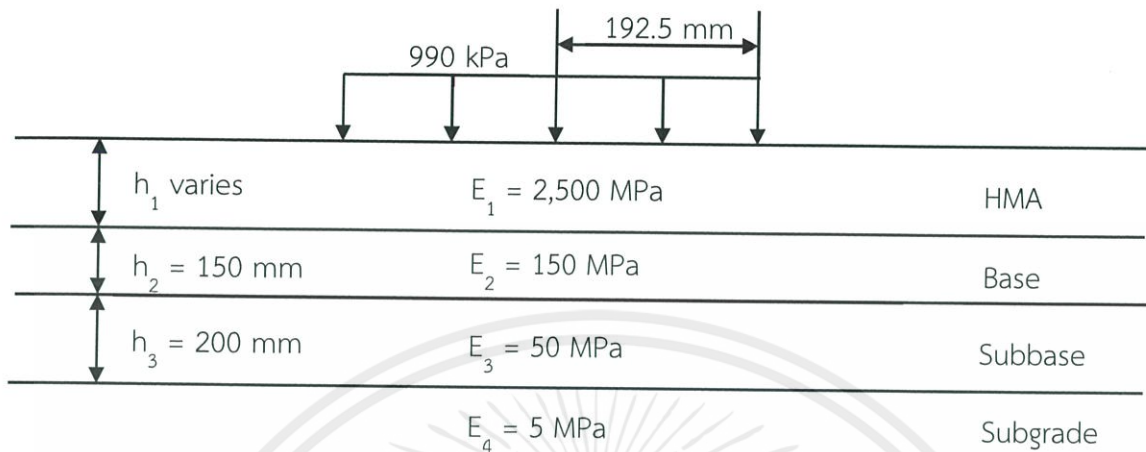
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การวิเคราะห์ความเสียหาย (การแตกร้าว) อันเนื่องจากความหนาของชั้นผิวทาง ที่มีผลต่อ  
ความเครียดดึงในแนวราบบนชั้นดินเดิม ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  
ของวัสดุชั้นทางห่างกัน 20 ปี  
( DAMAGE ANALYSIS – FATIGUE CRACKING )

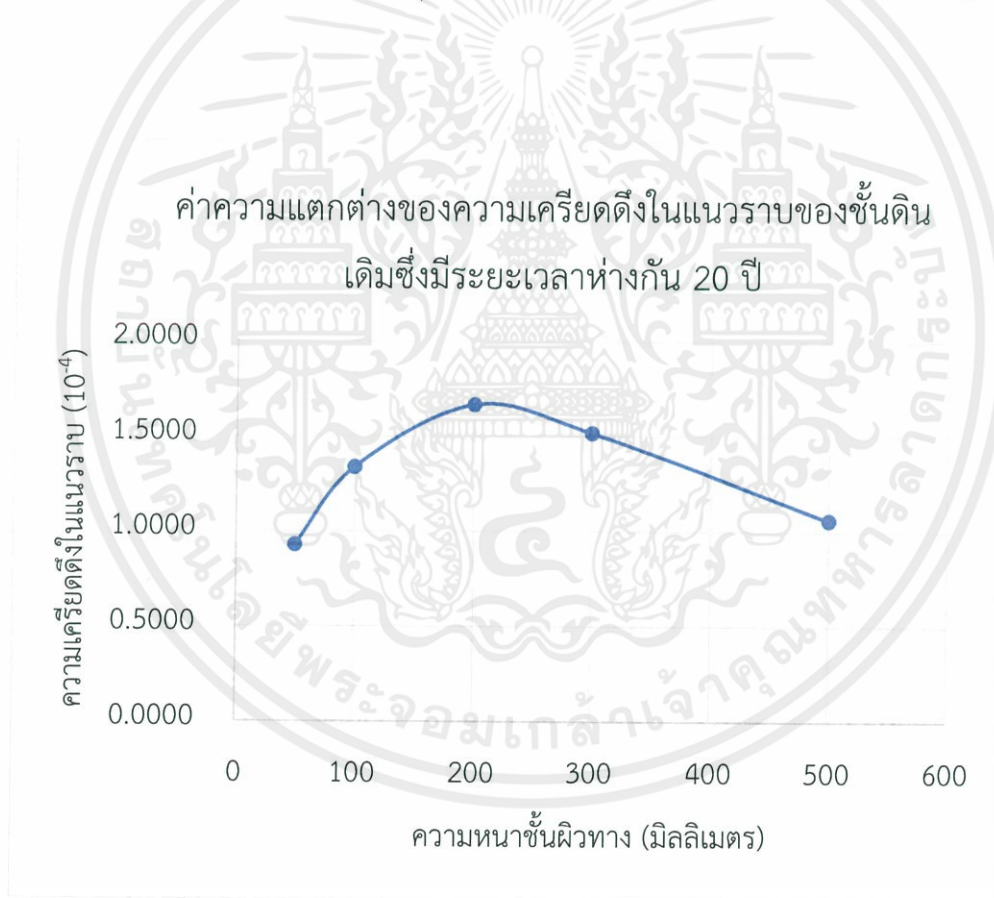
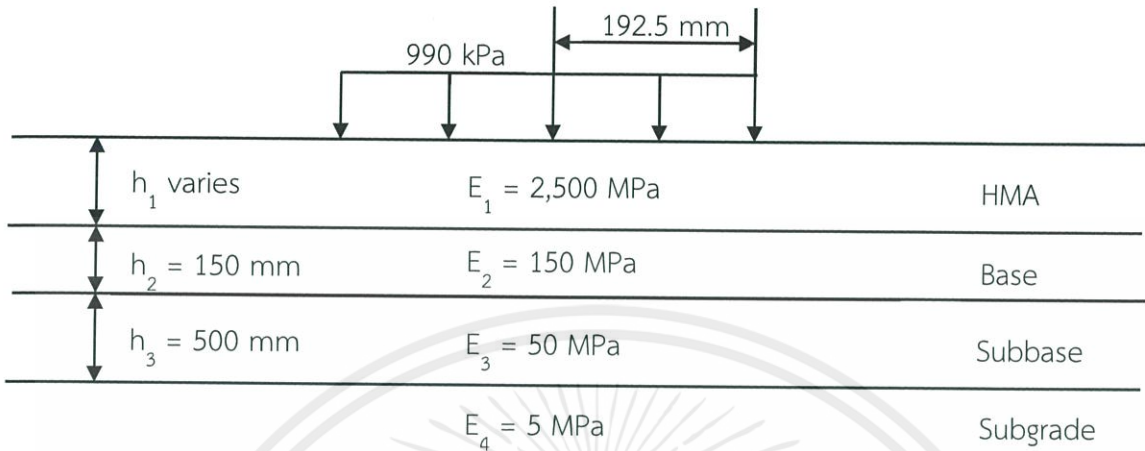
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กรณีศึกษาที่ 1



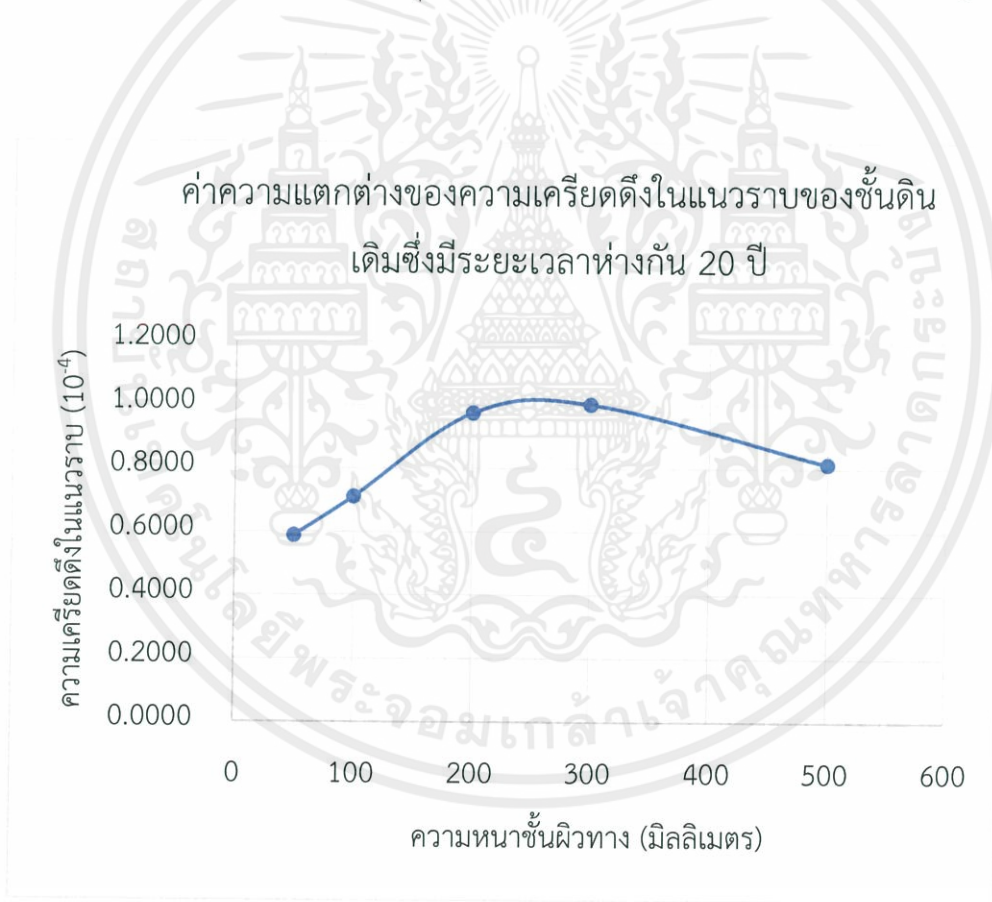
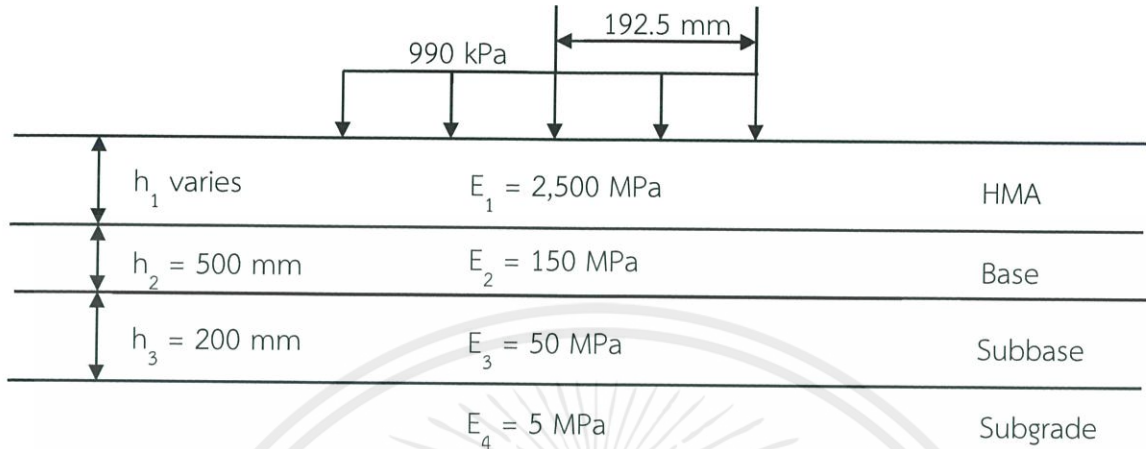
กราฟที่ 1 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 2



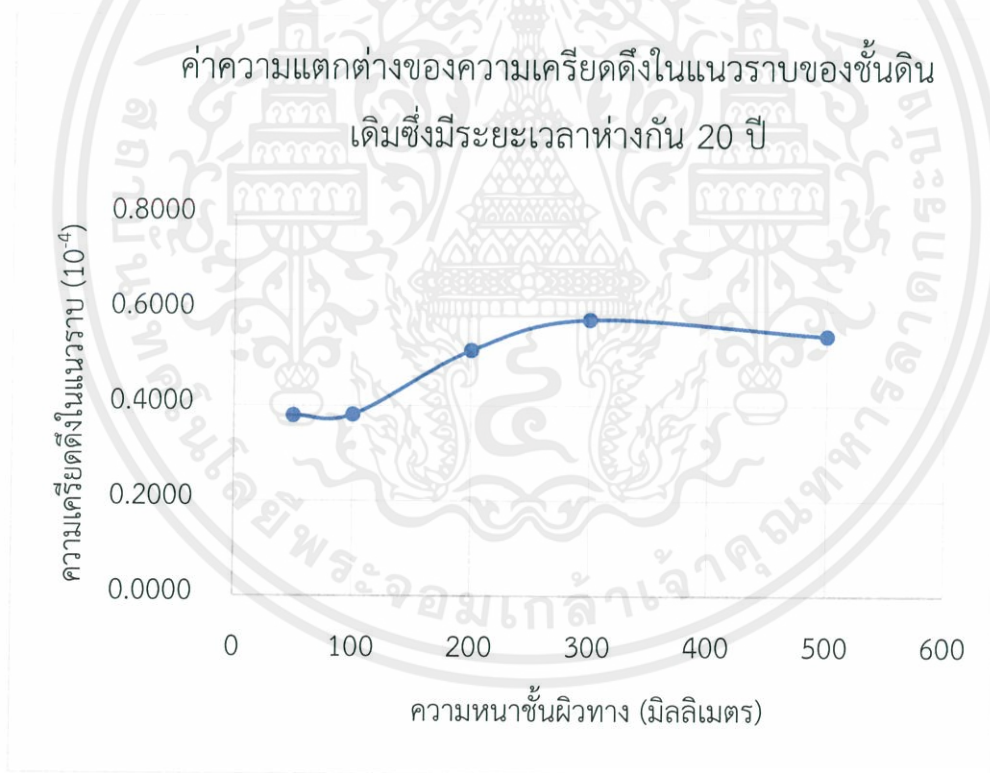
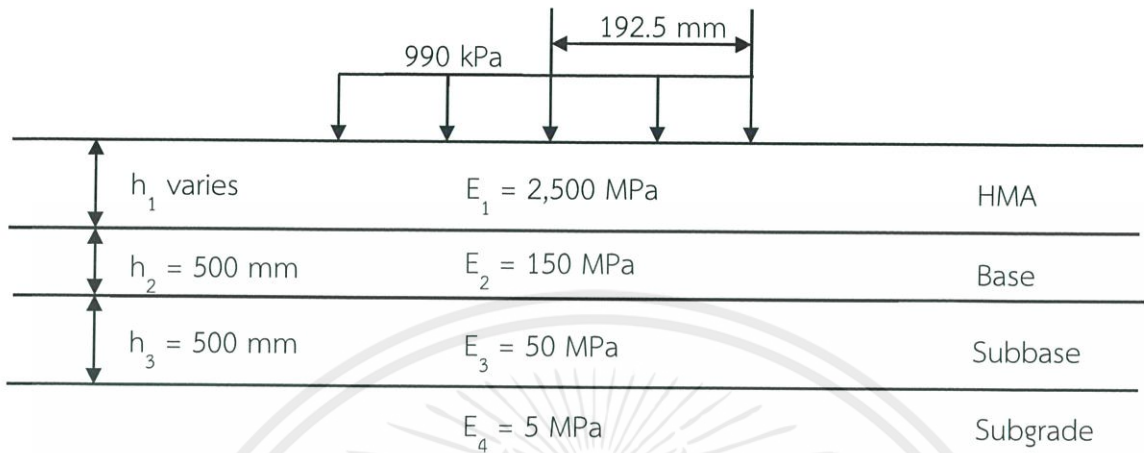
กราฟที่ 2 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 3



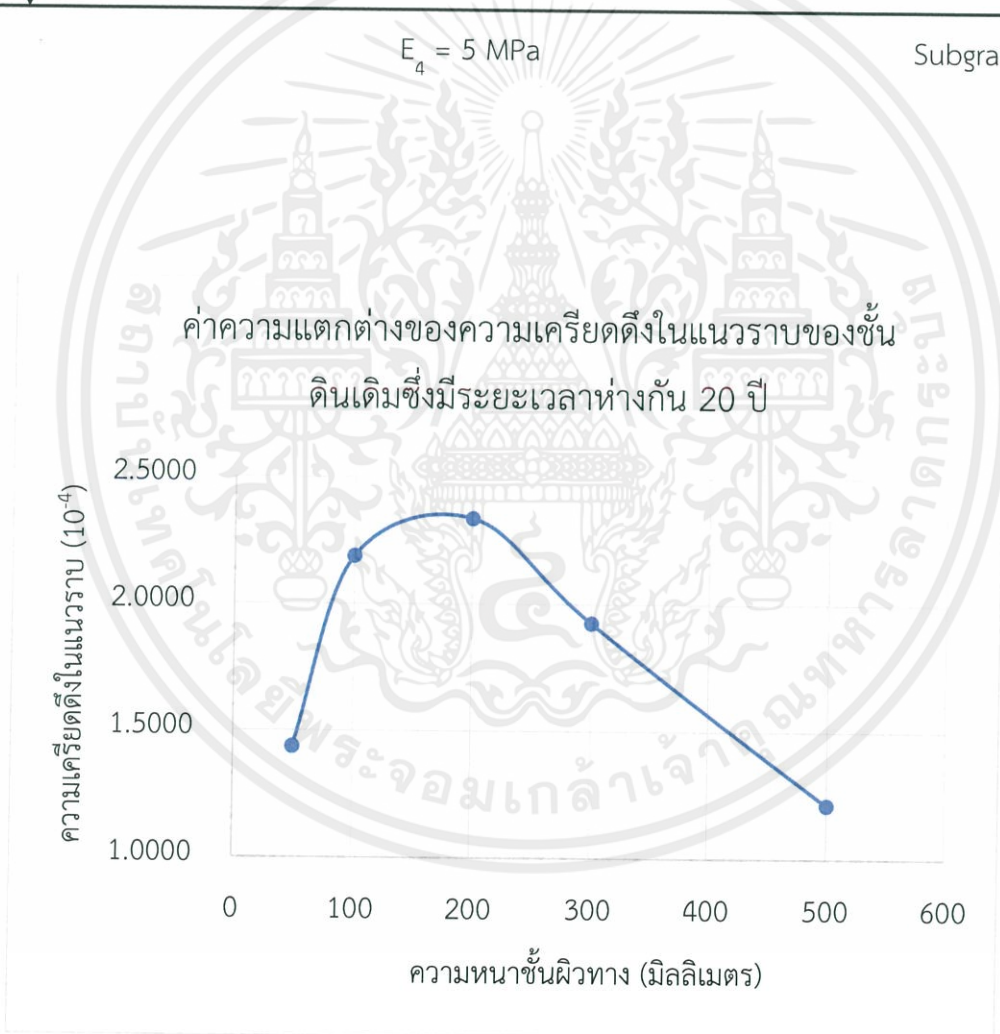
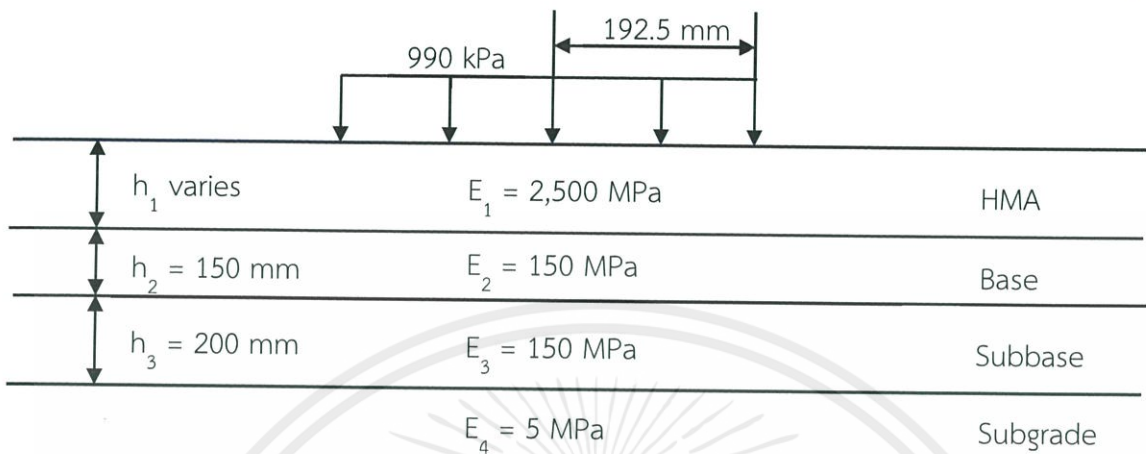
กราฟที่ 3 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 4



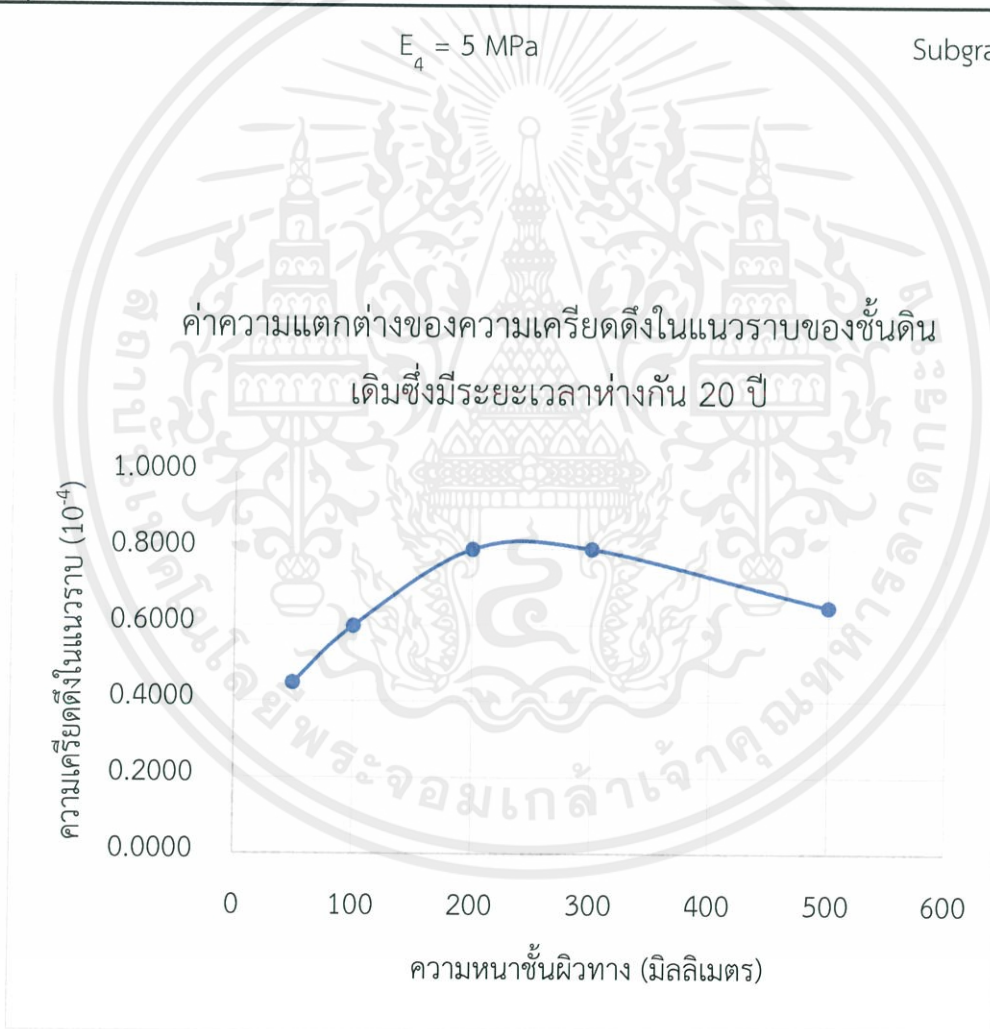
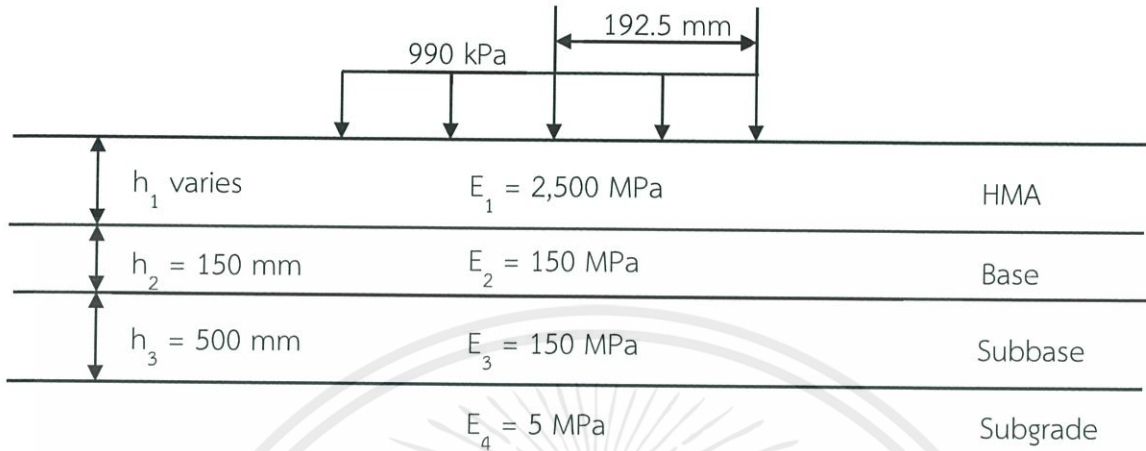
กราฟที่ 4 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 5



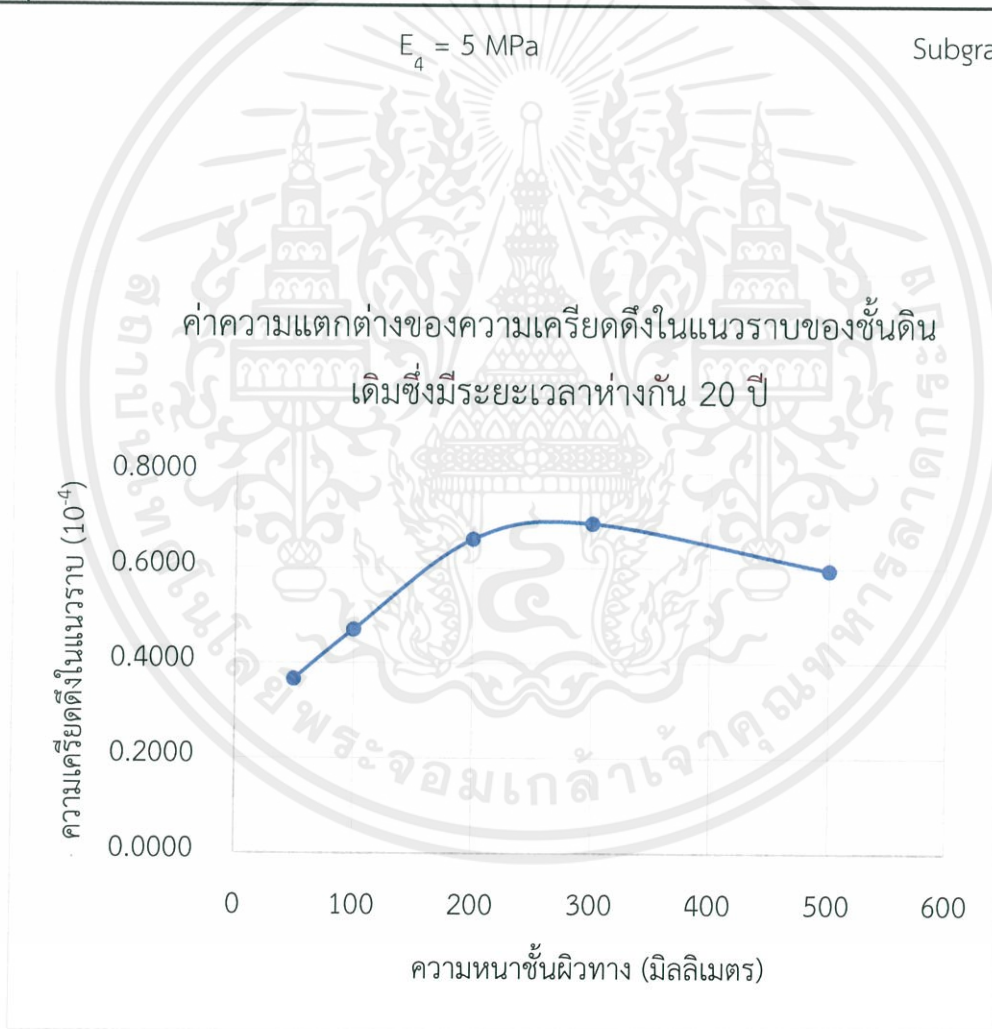
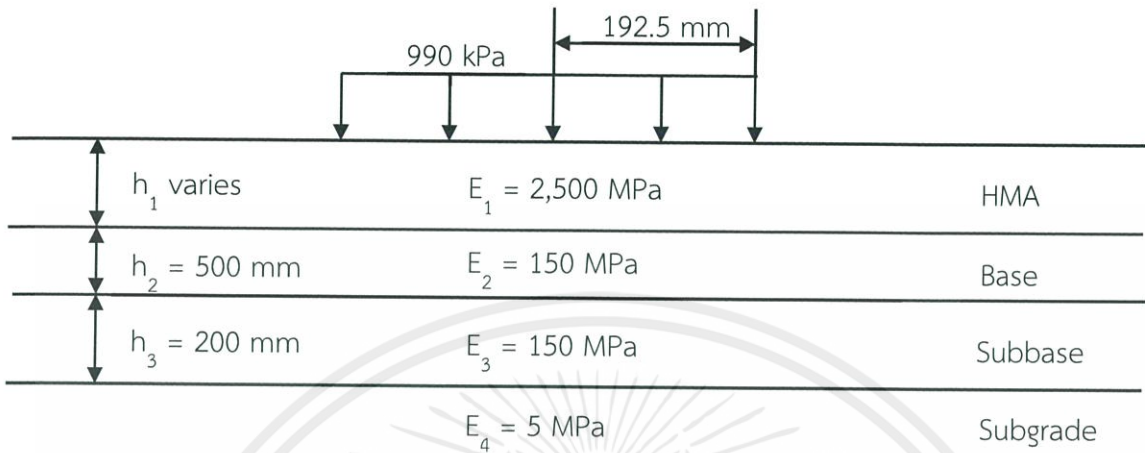
กราฟที่ 9 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 6



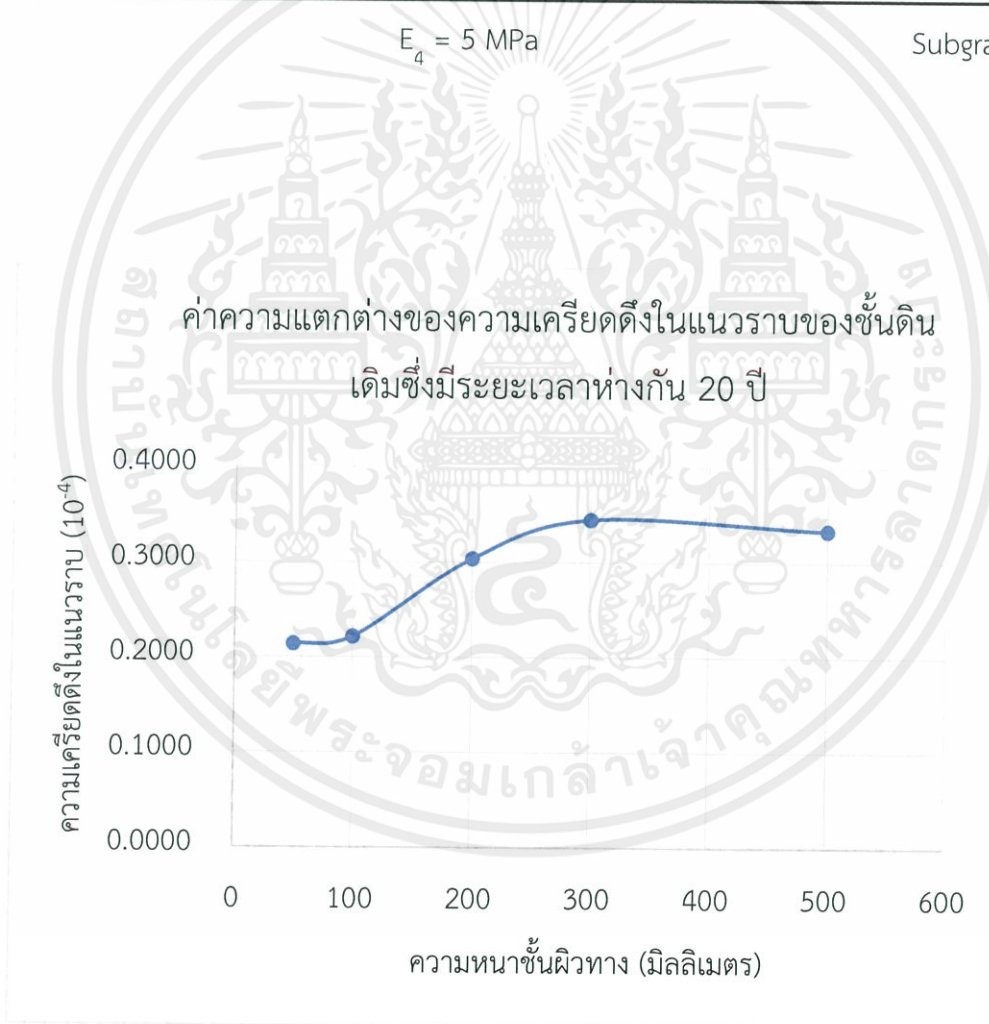
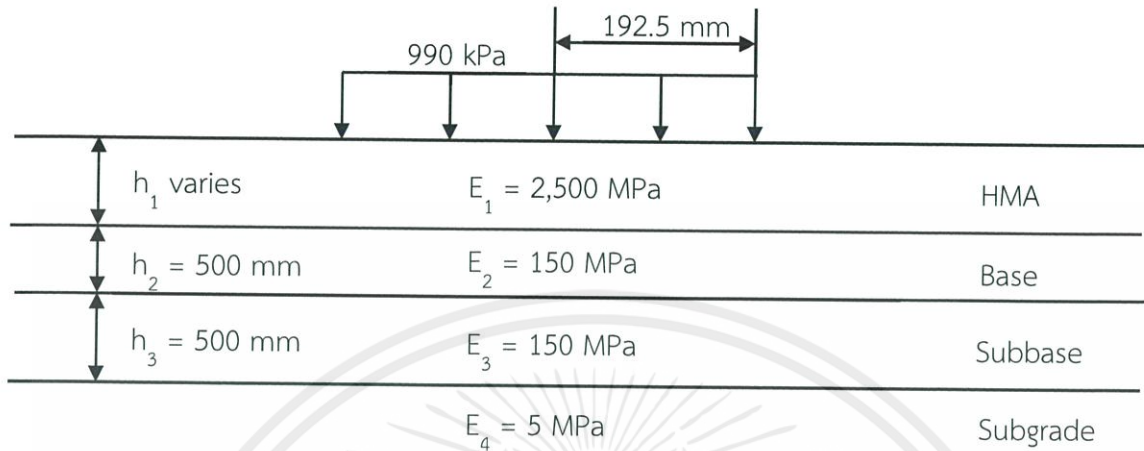
กราฟที่ 10 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 7



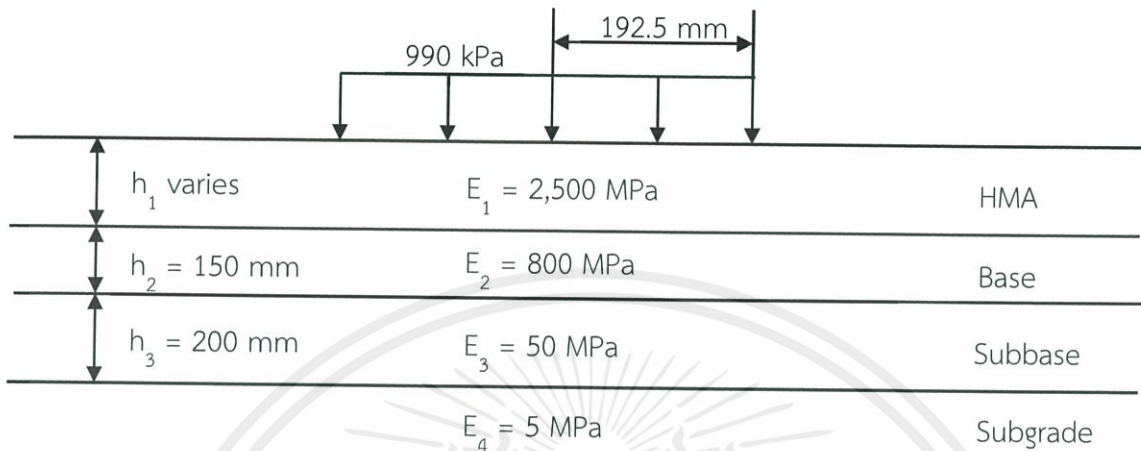
กราฟที่ 11 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 8

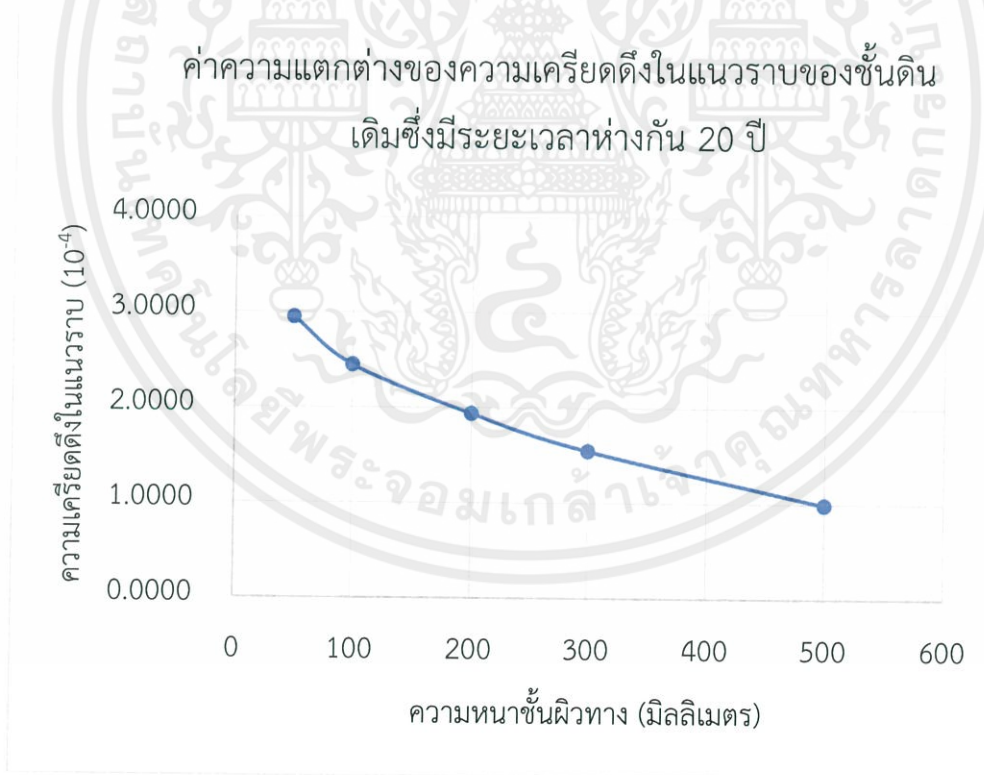


กราฟที่ 12 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 9

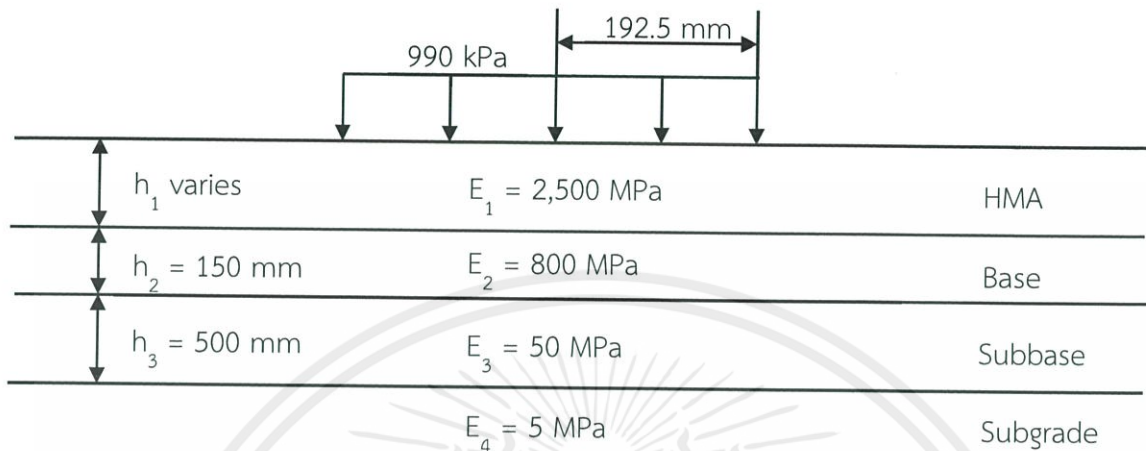


ค่าความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนของชั้นดิน  
เดิมซึ่งมีระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

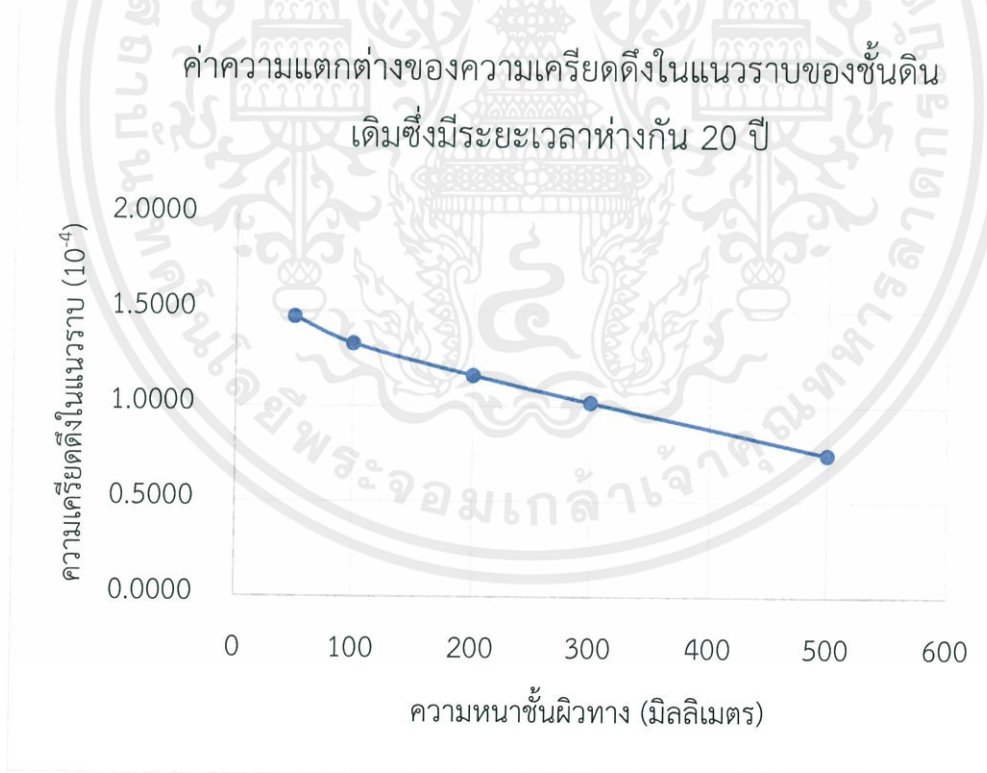


กราฟที่ 17 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 10

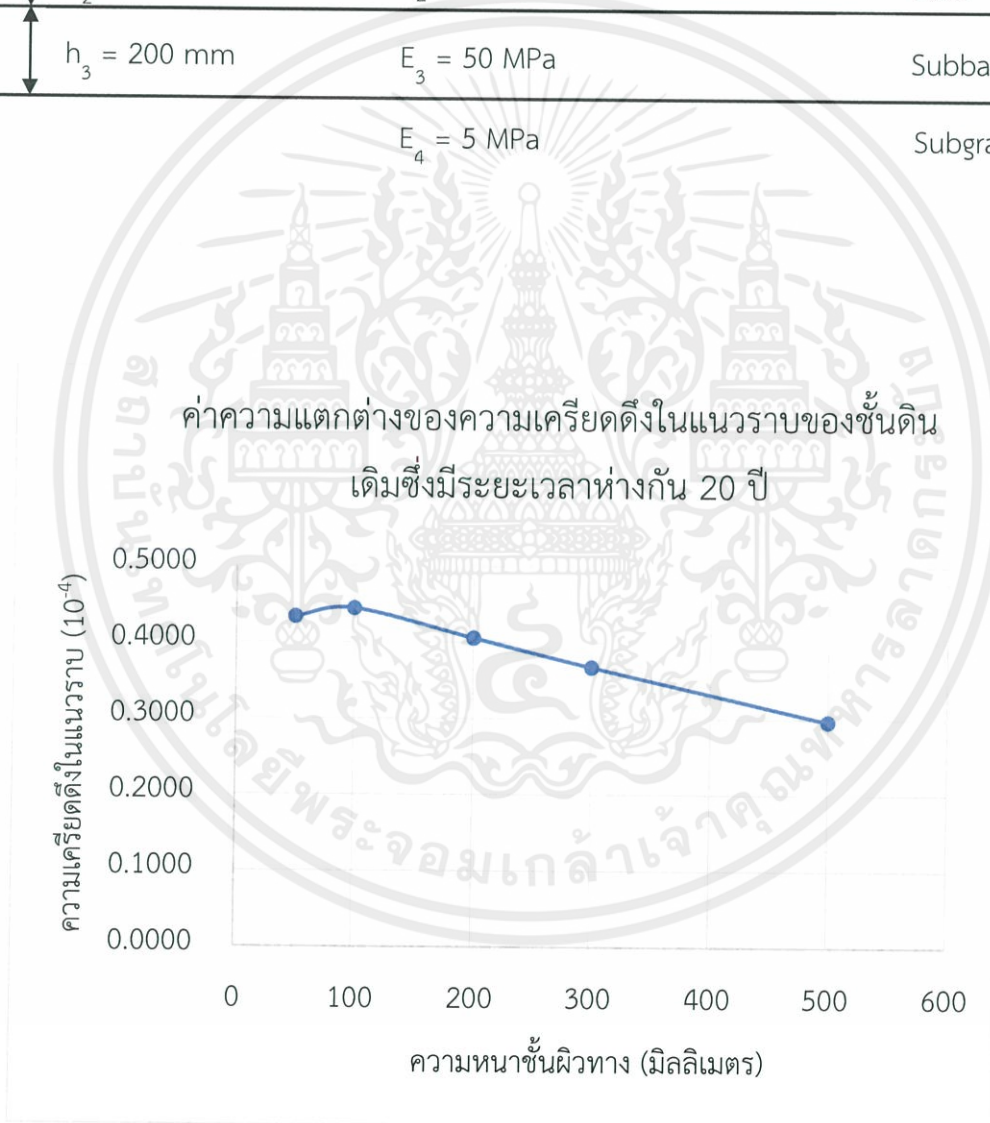
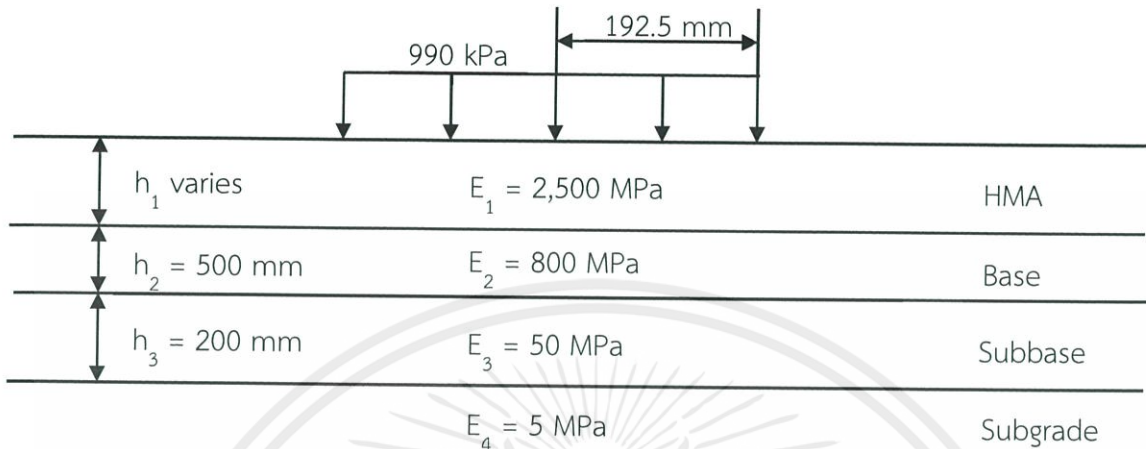


ค่าความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนของชั้นดิน  
เดิมซึ่งมีระยะเวลาห่างกัน 20 ปี



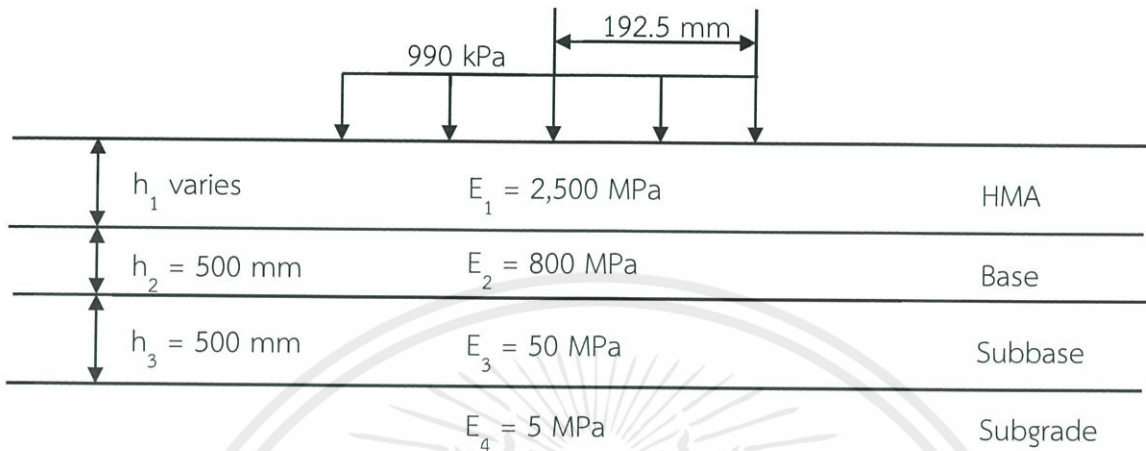
กราฟที่ 18 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 11

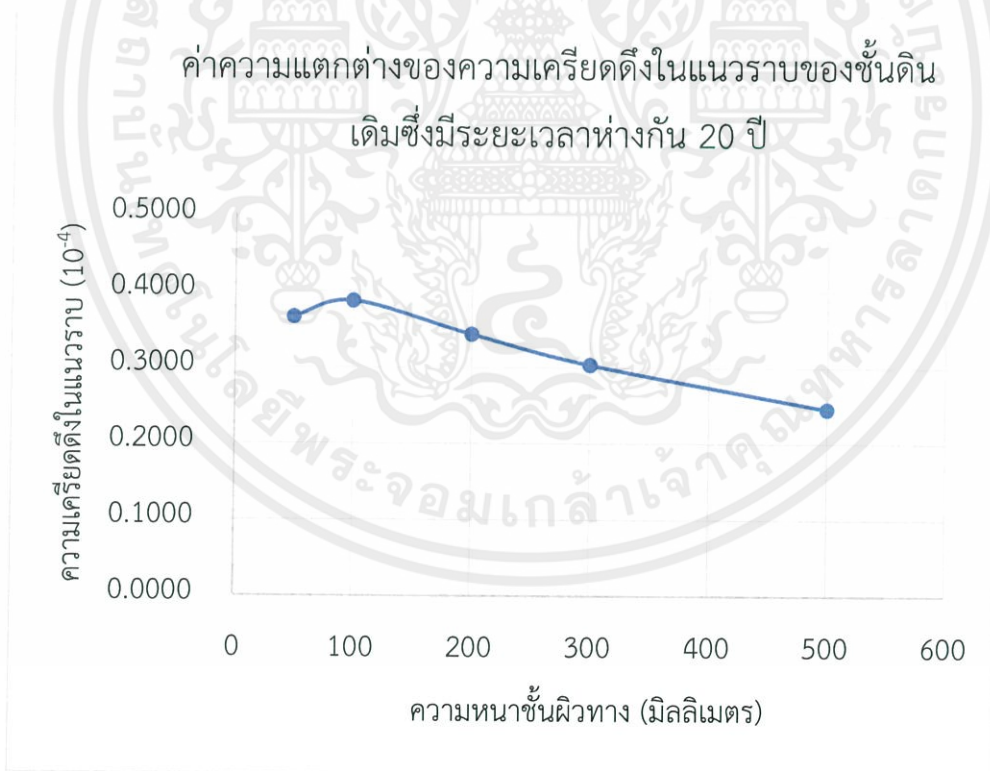


กราฟที่ 19 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 12

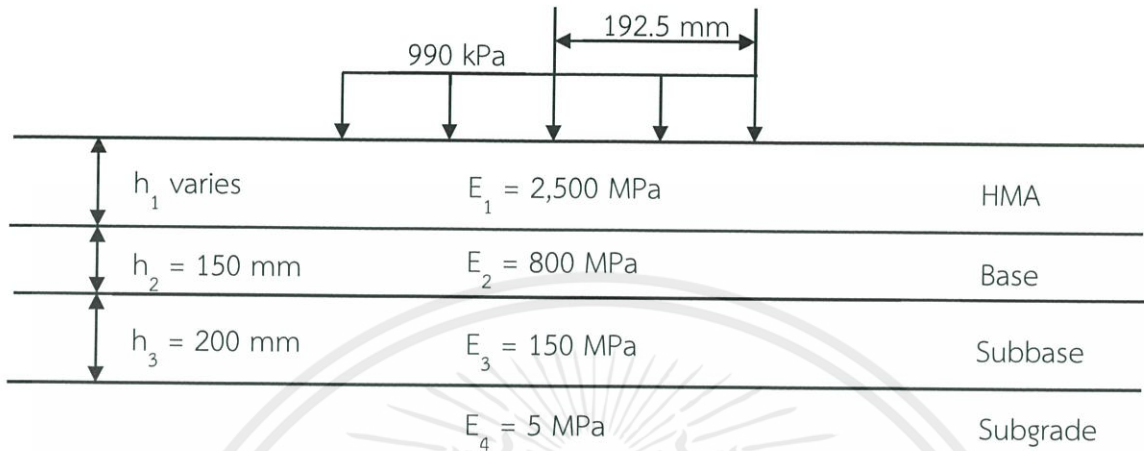


ค่าความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนของชั้นดิน  
เดิมซึ่งมีระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

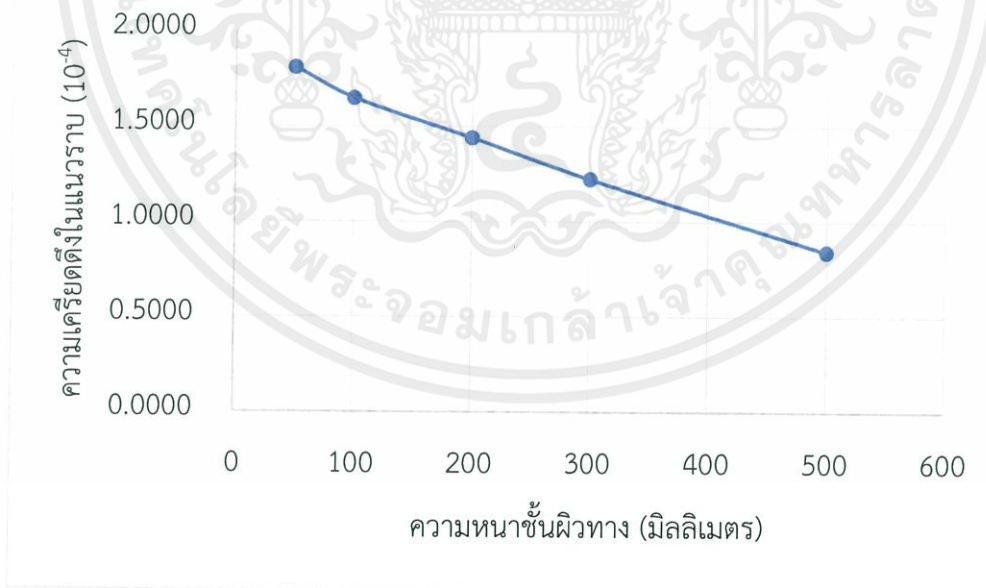


กราฟที่ 20 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 13

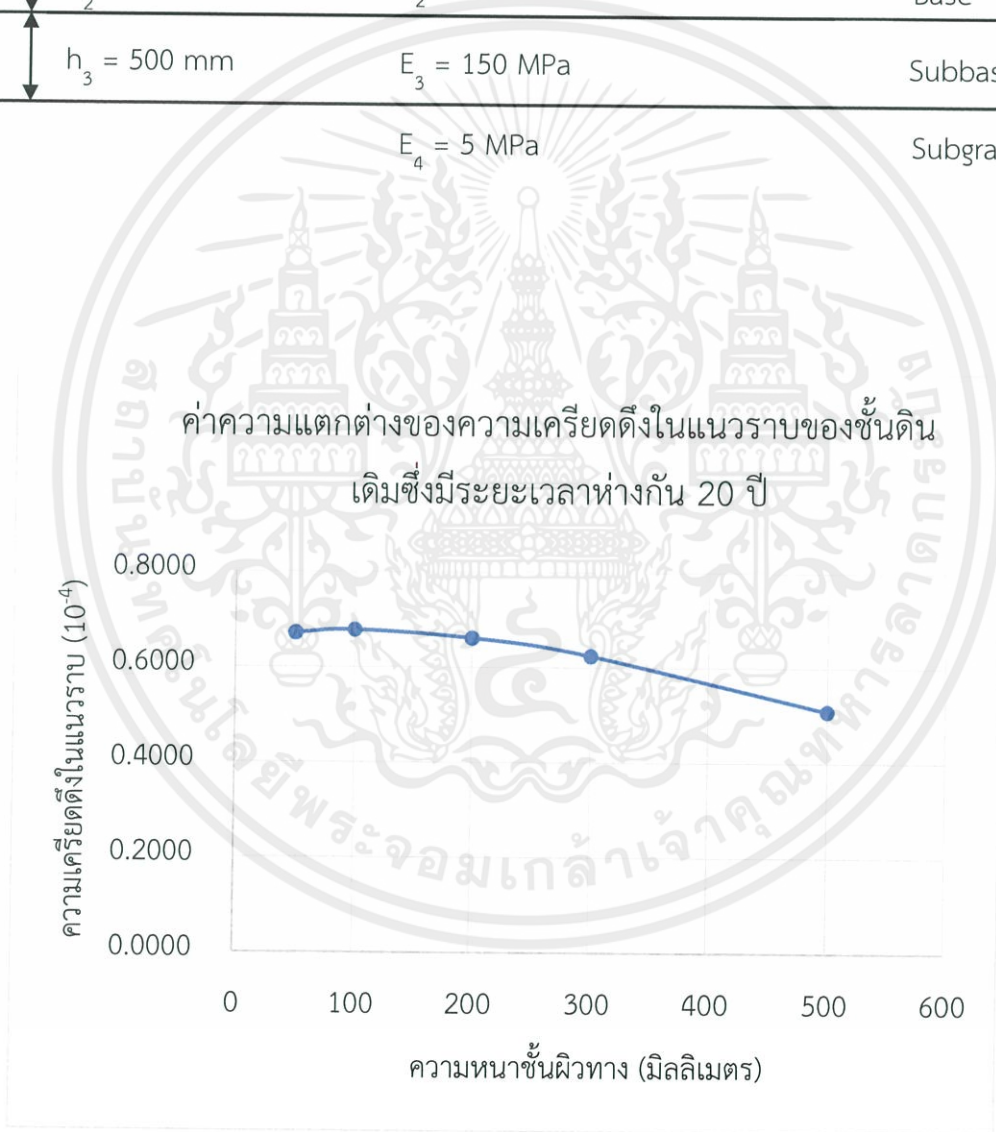
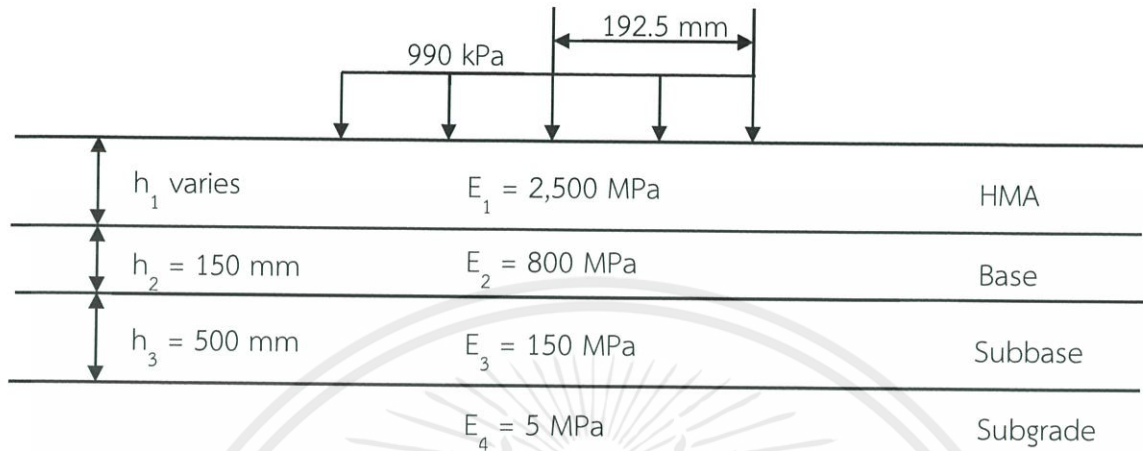


ค่าความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบของชั้นดินเดิมซึ่งมีระยะเวลาห่างกัน 20 ปี



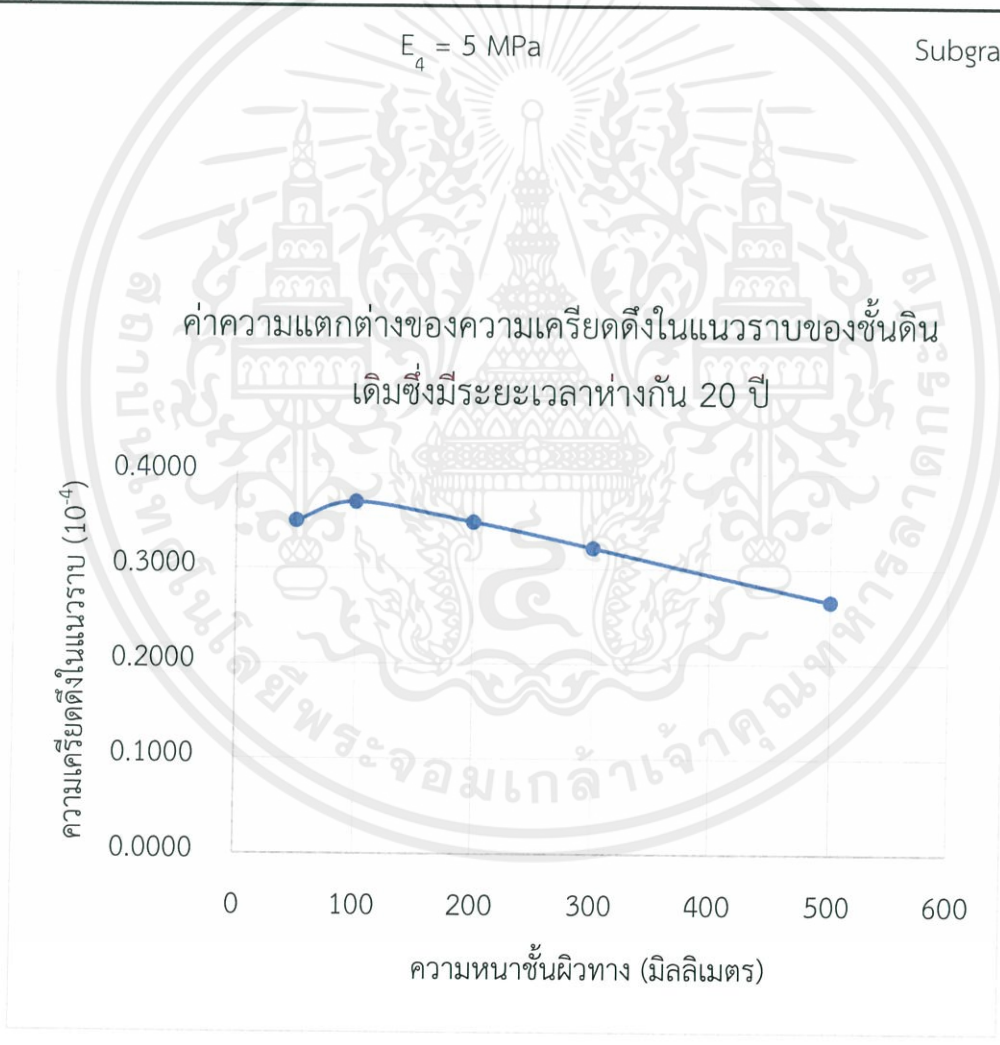
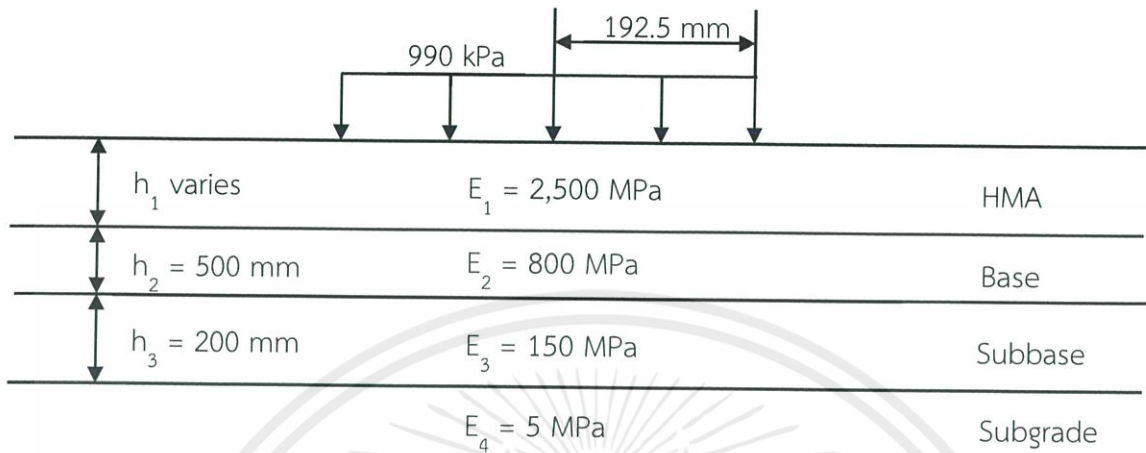
กราฟที่ 25 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 14



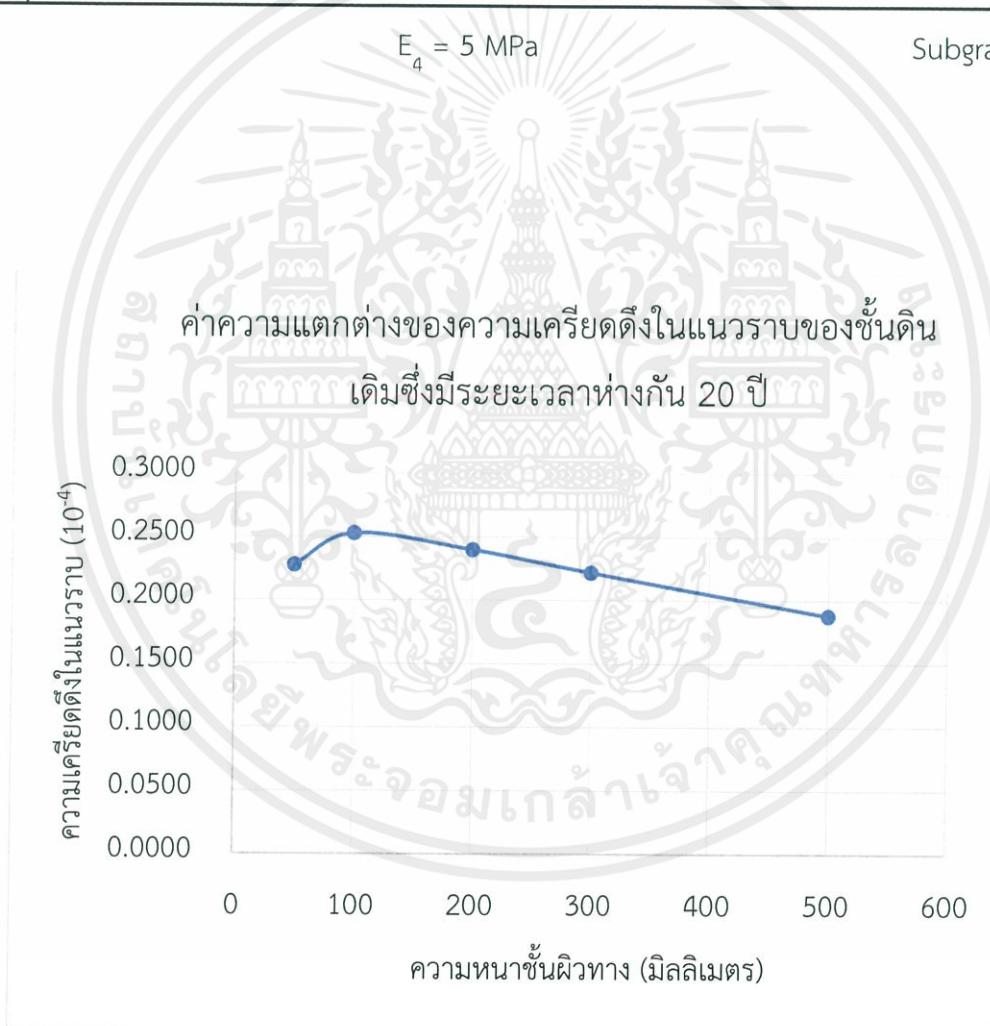
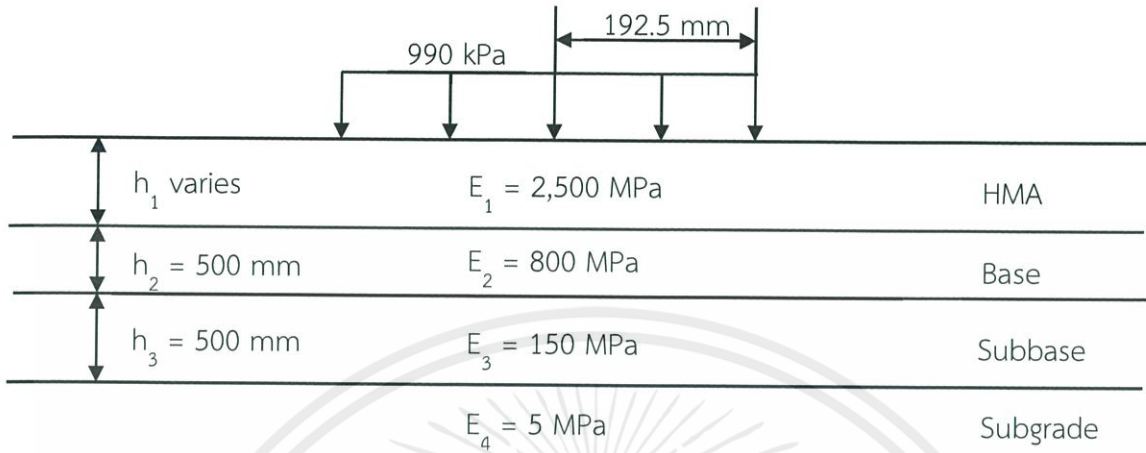
กราฟที่ 26 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 15



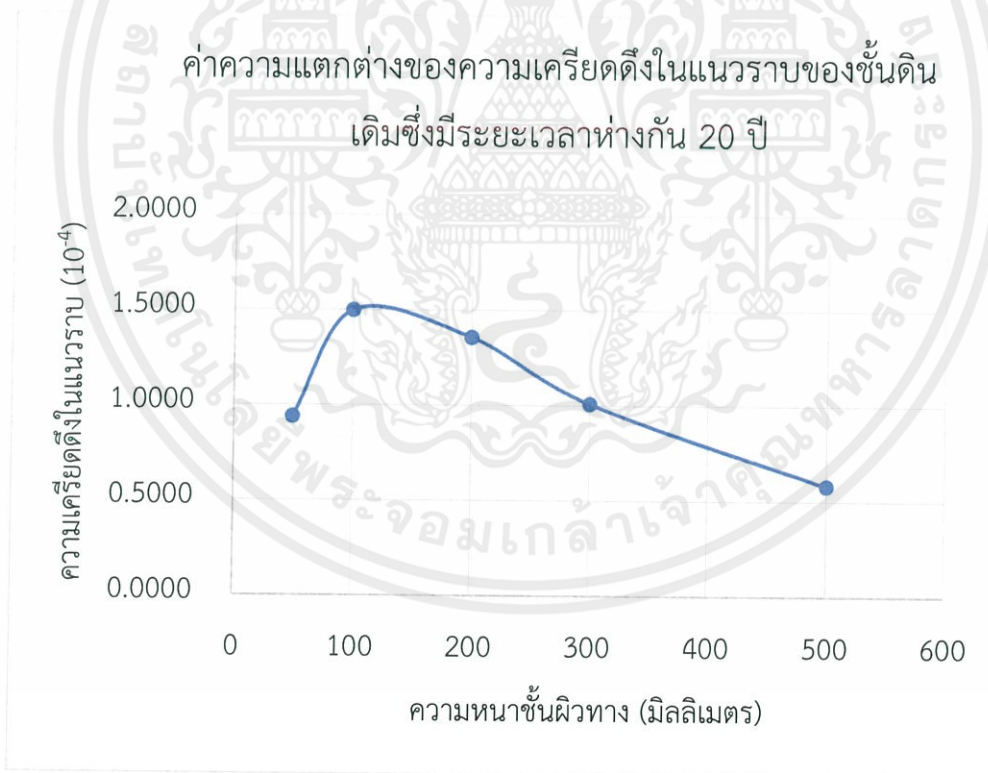
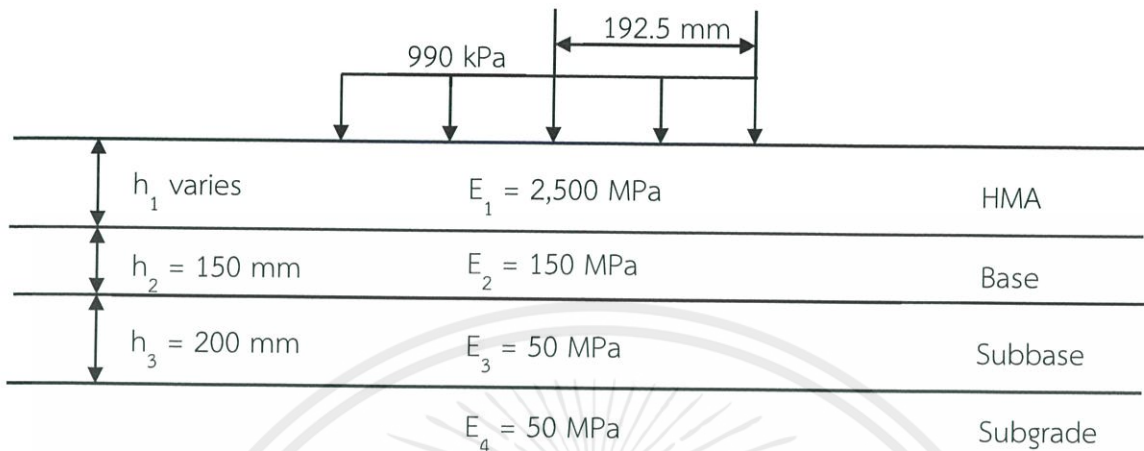
กราฟที่ 27 กราฟแสดงค่าความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 16



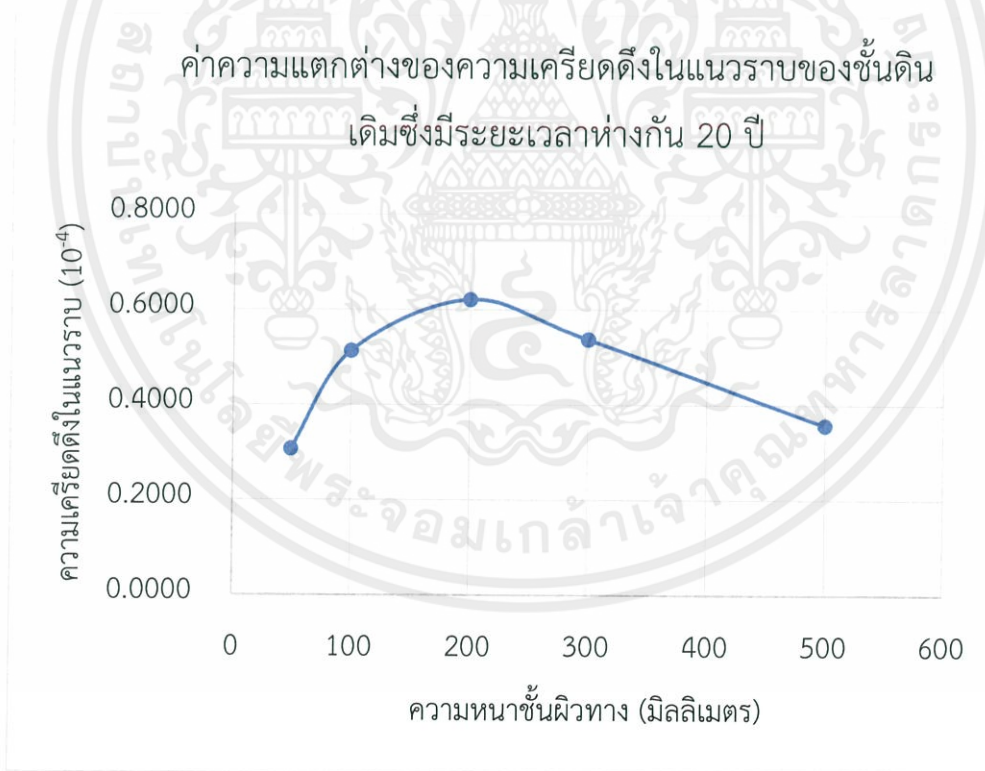
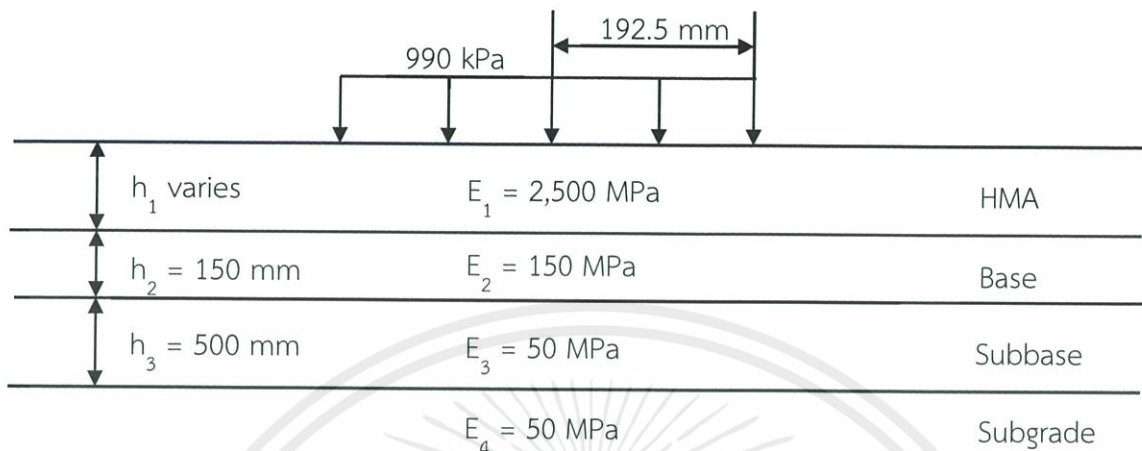
กราฟที่ 28 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 17



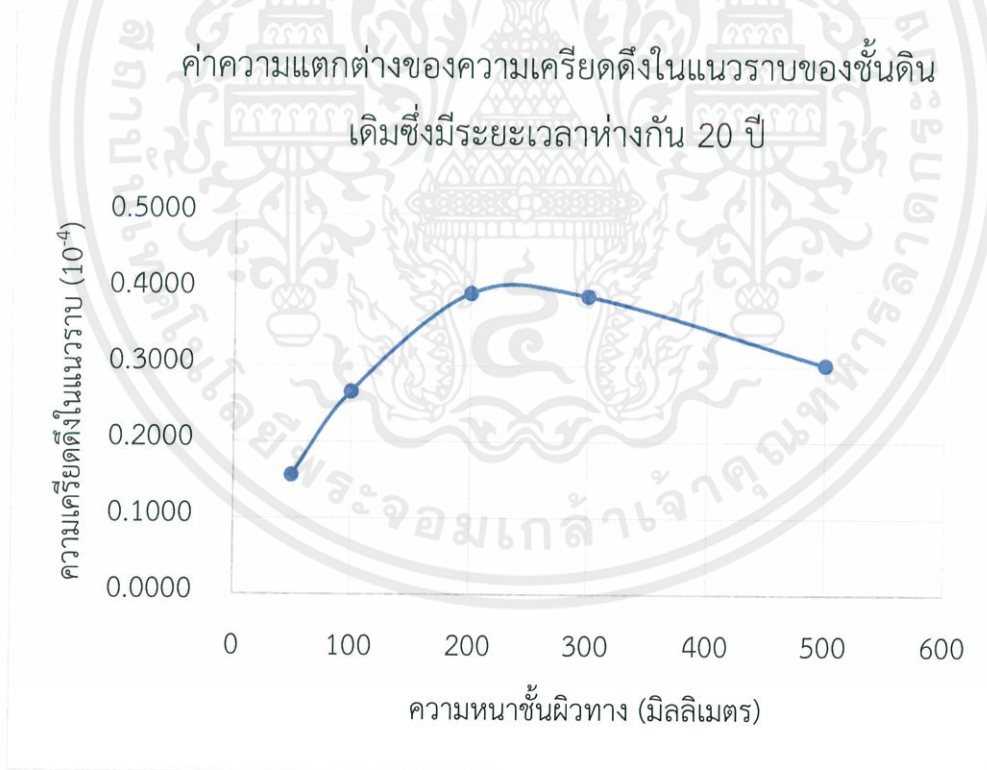
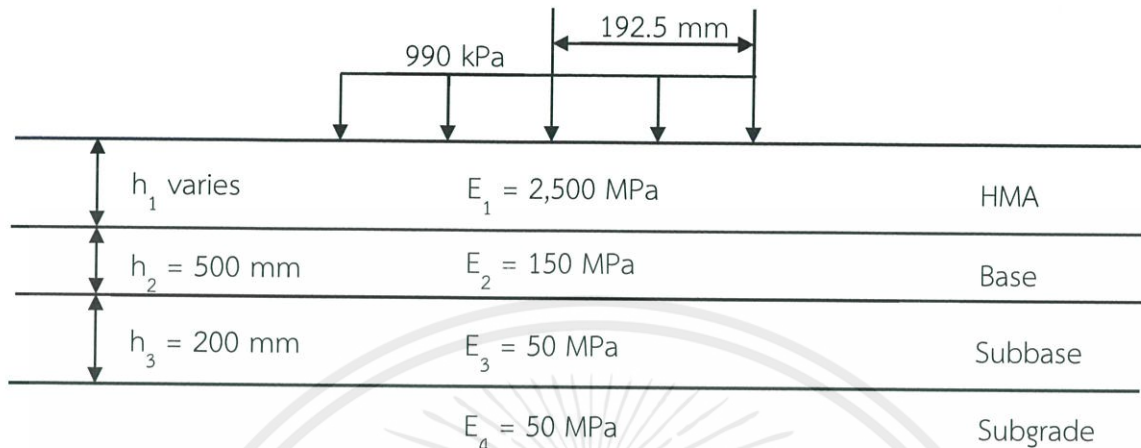
กราฟที่ 5 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 18



กราฟที่ 6 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

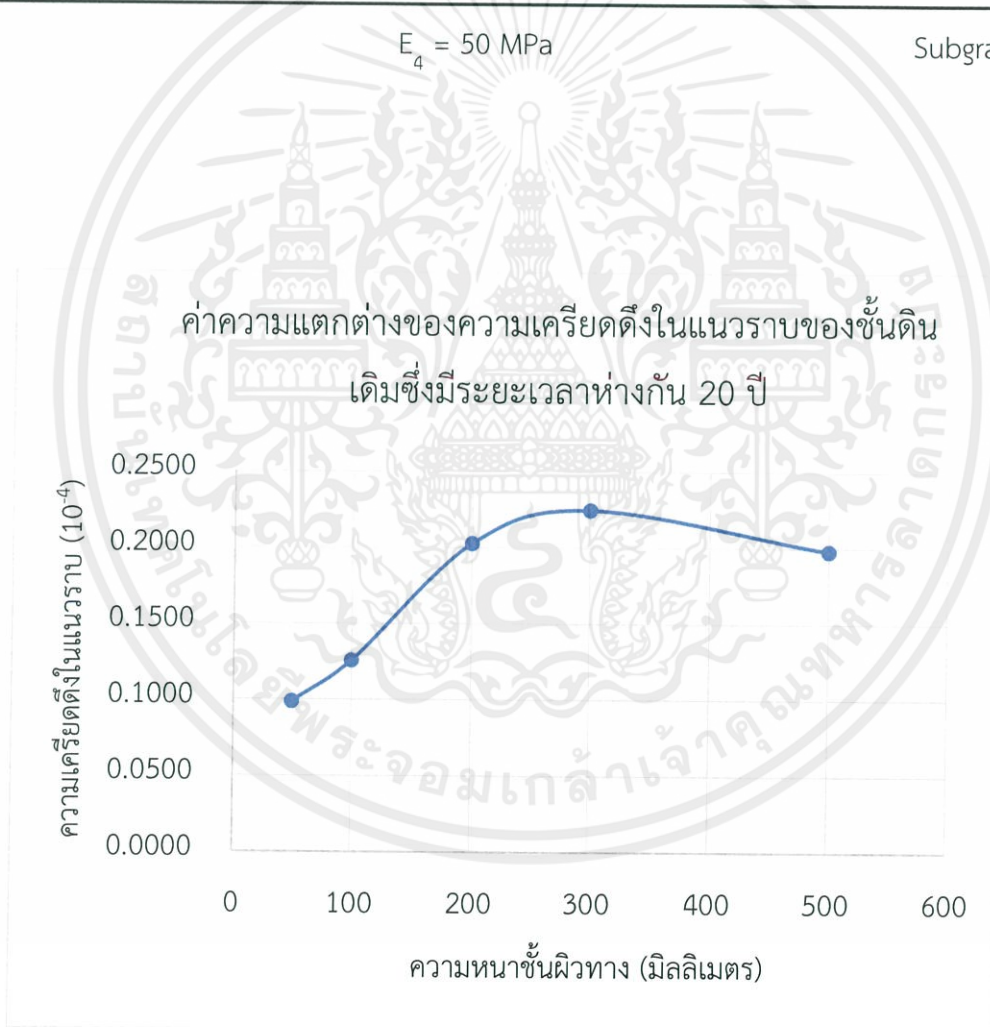
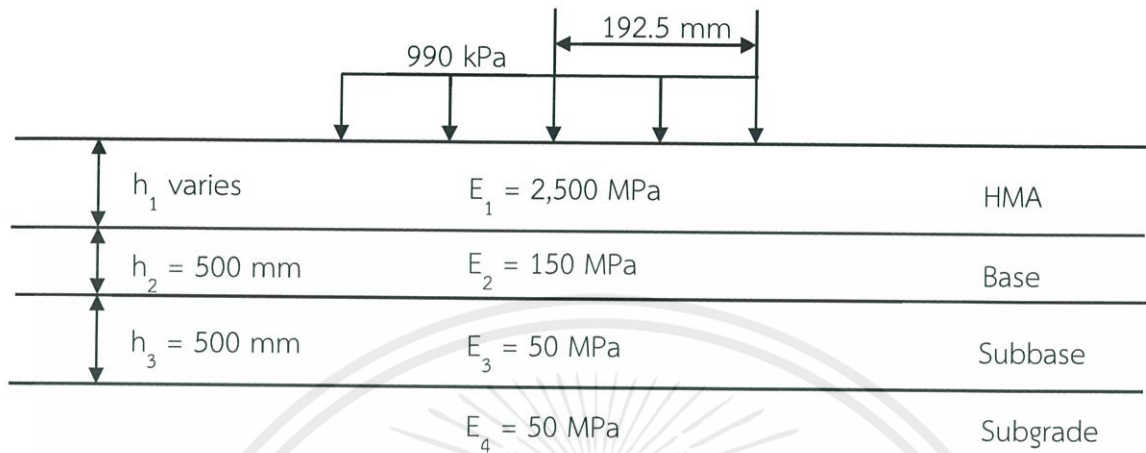
## กรณีศึกษาที่ 19



กราฟที่ 7 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

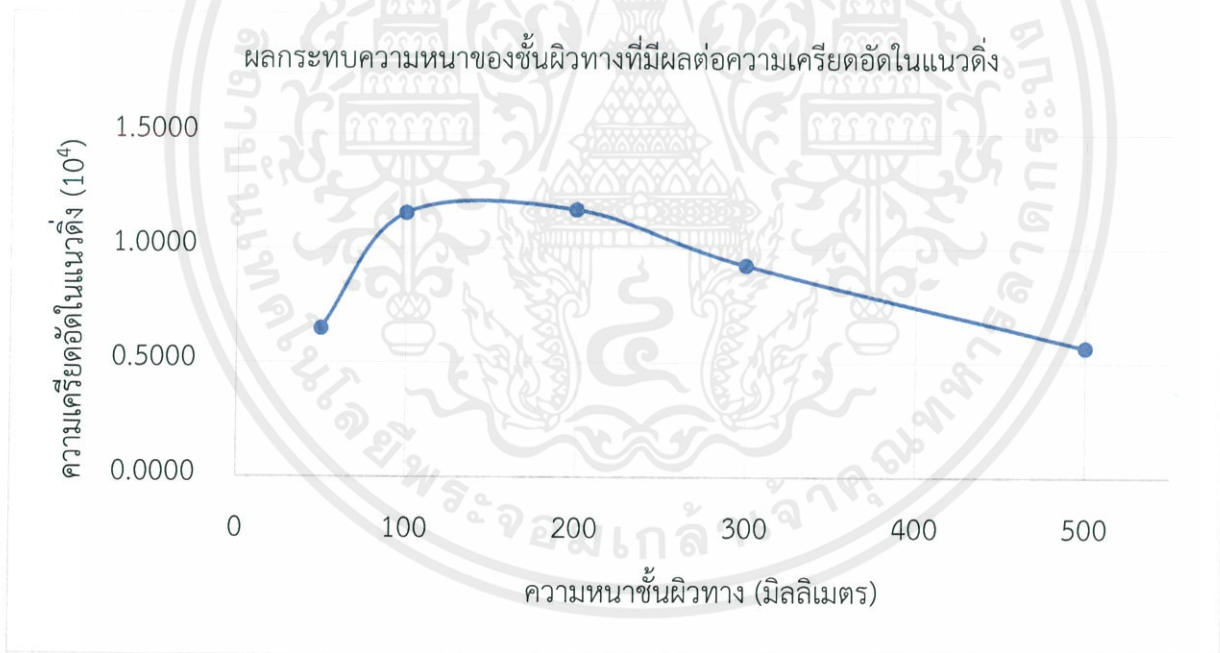
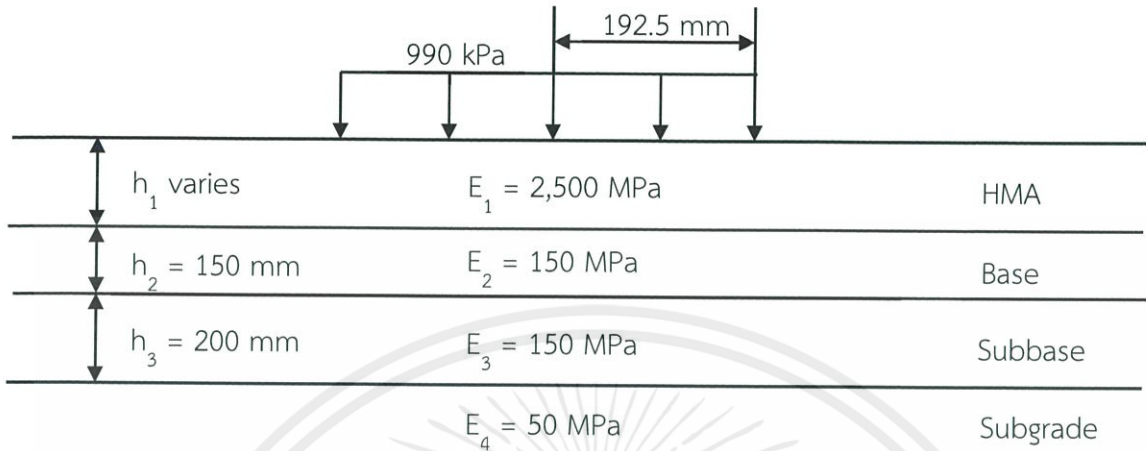
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 20



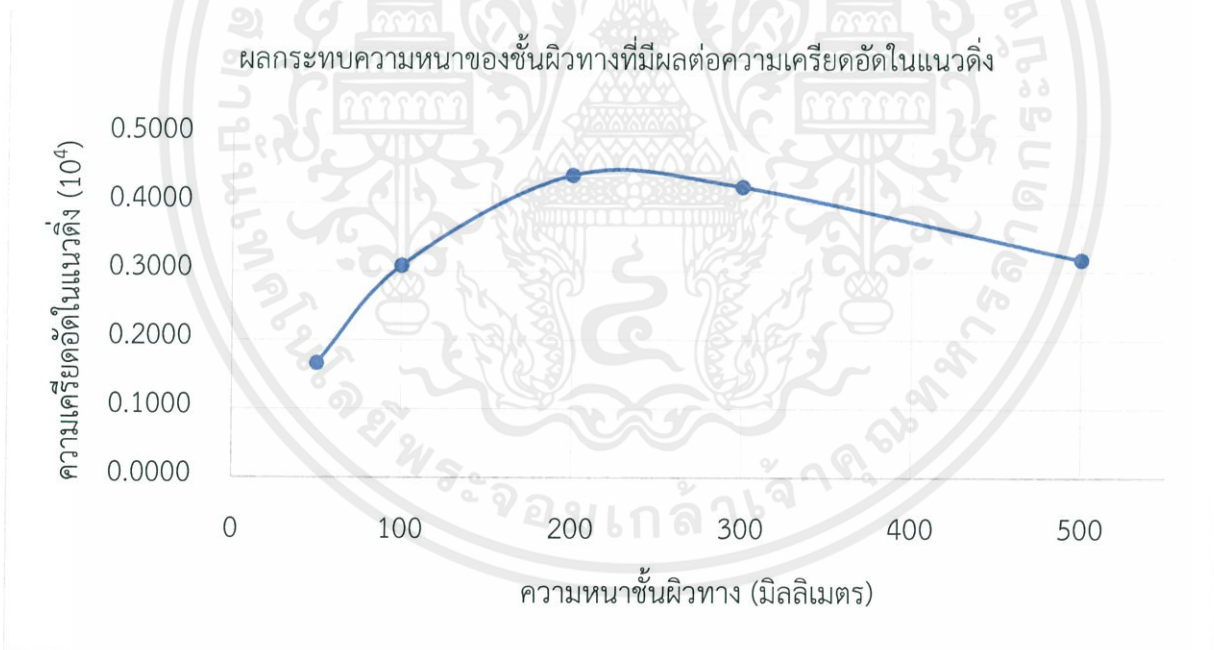
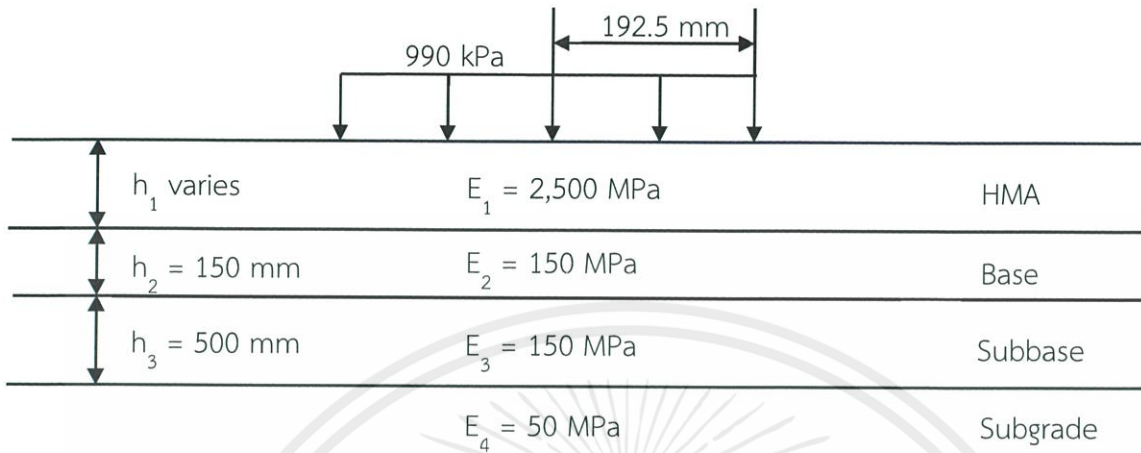
กราฟที่ 8 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 21



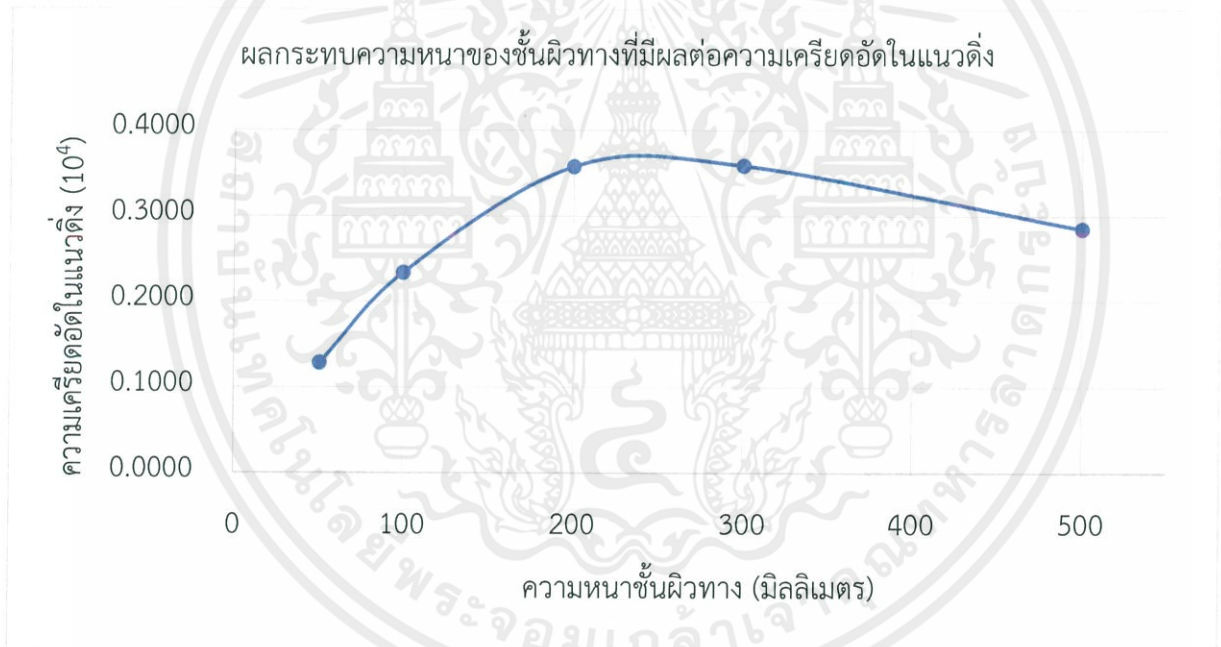
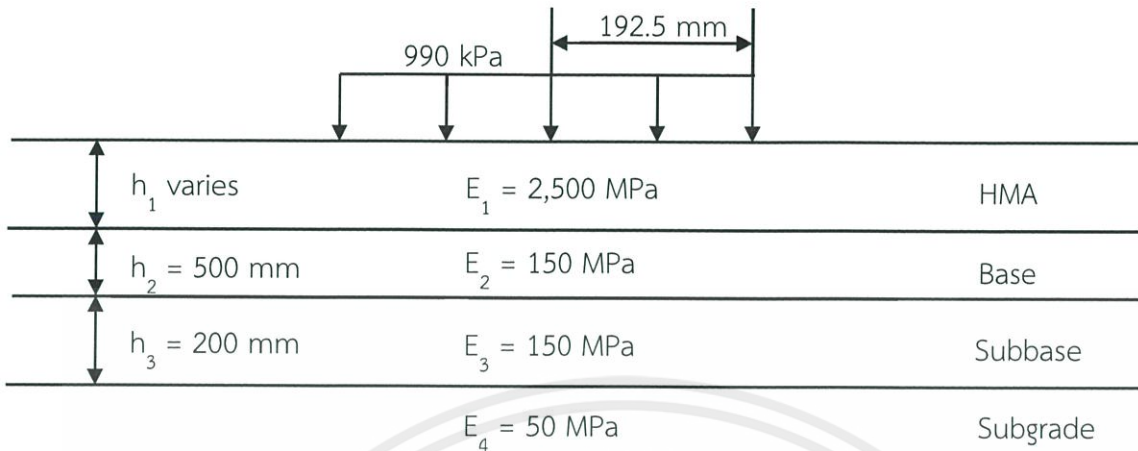
กราฟที่ 21 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 22



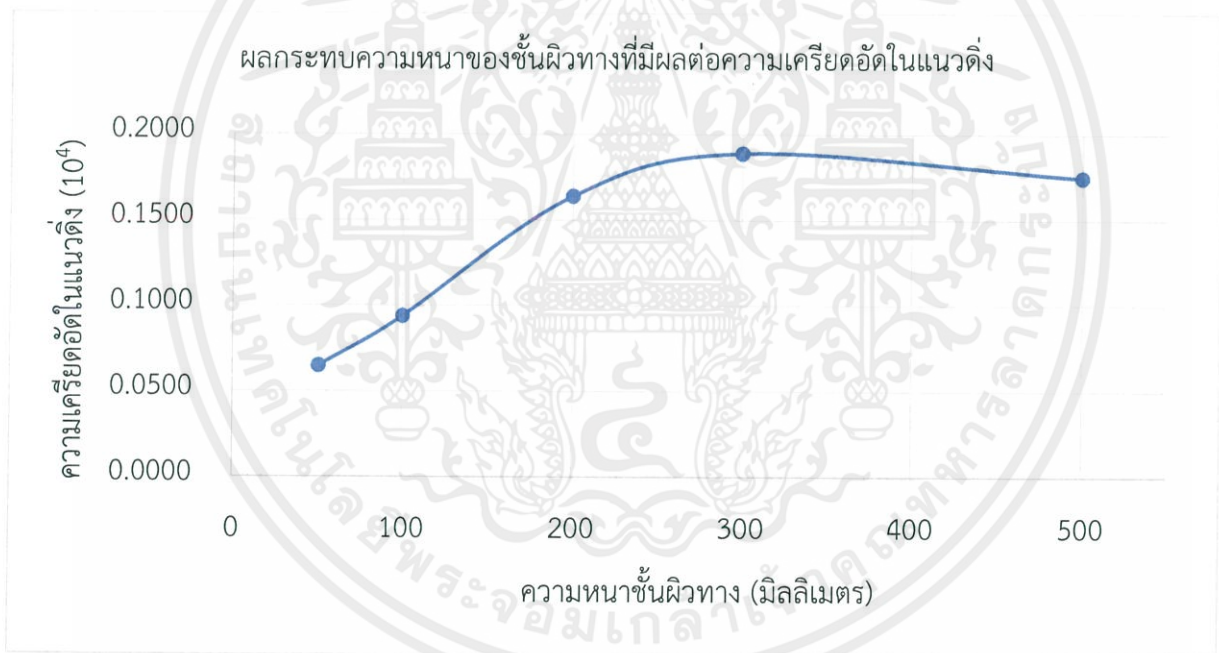
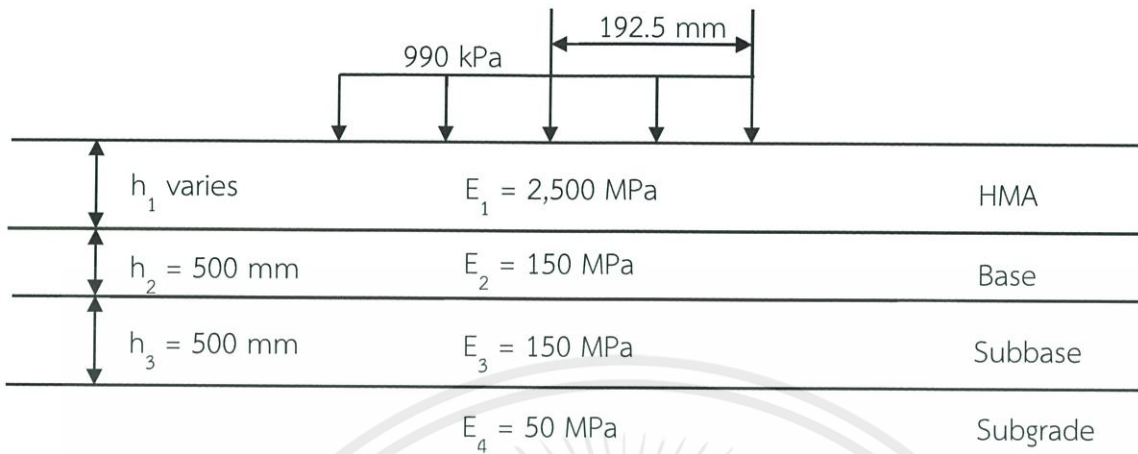
กราฟที่ 22 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 23



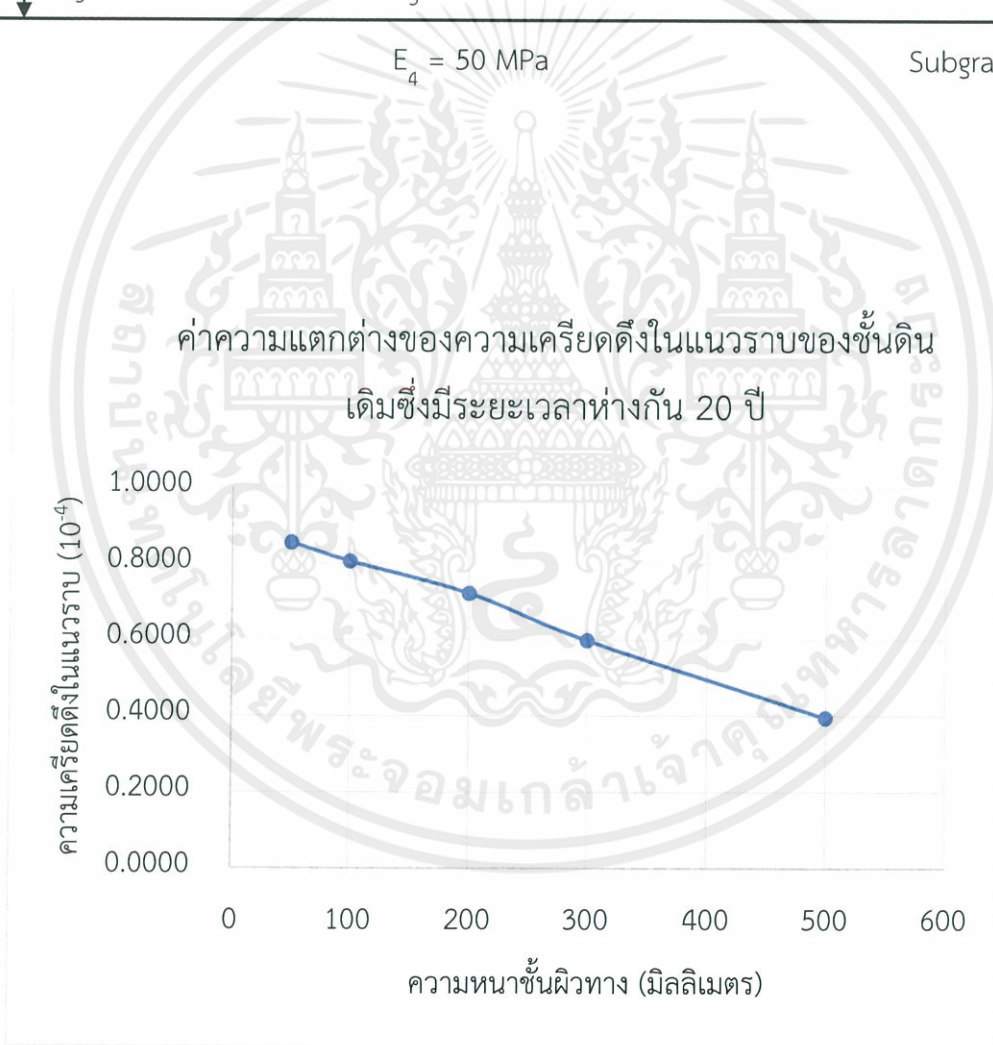
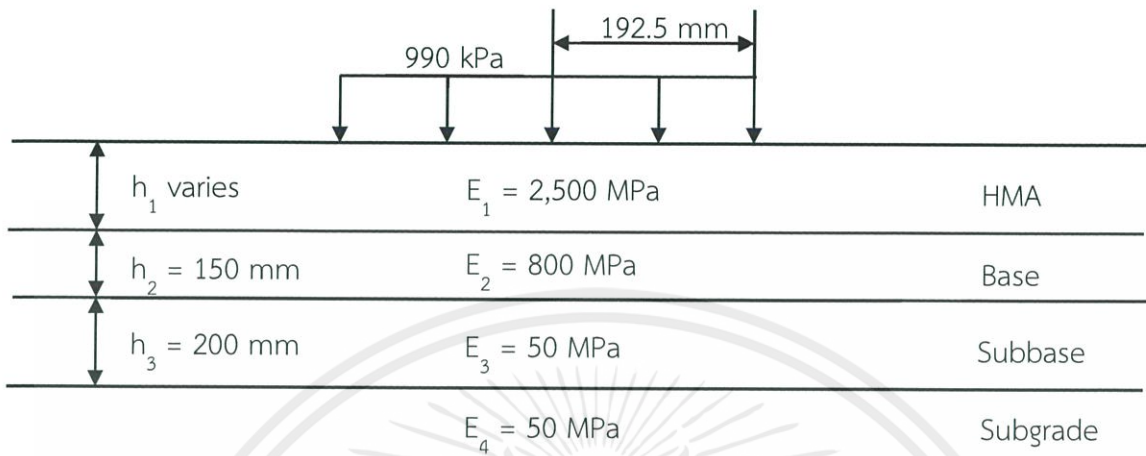
กราฟที่ 23 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 24



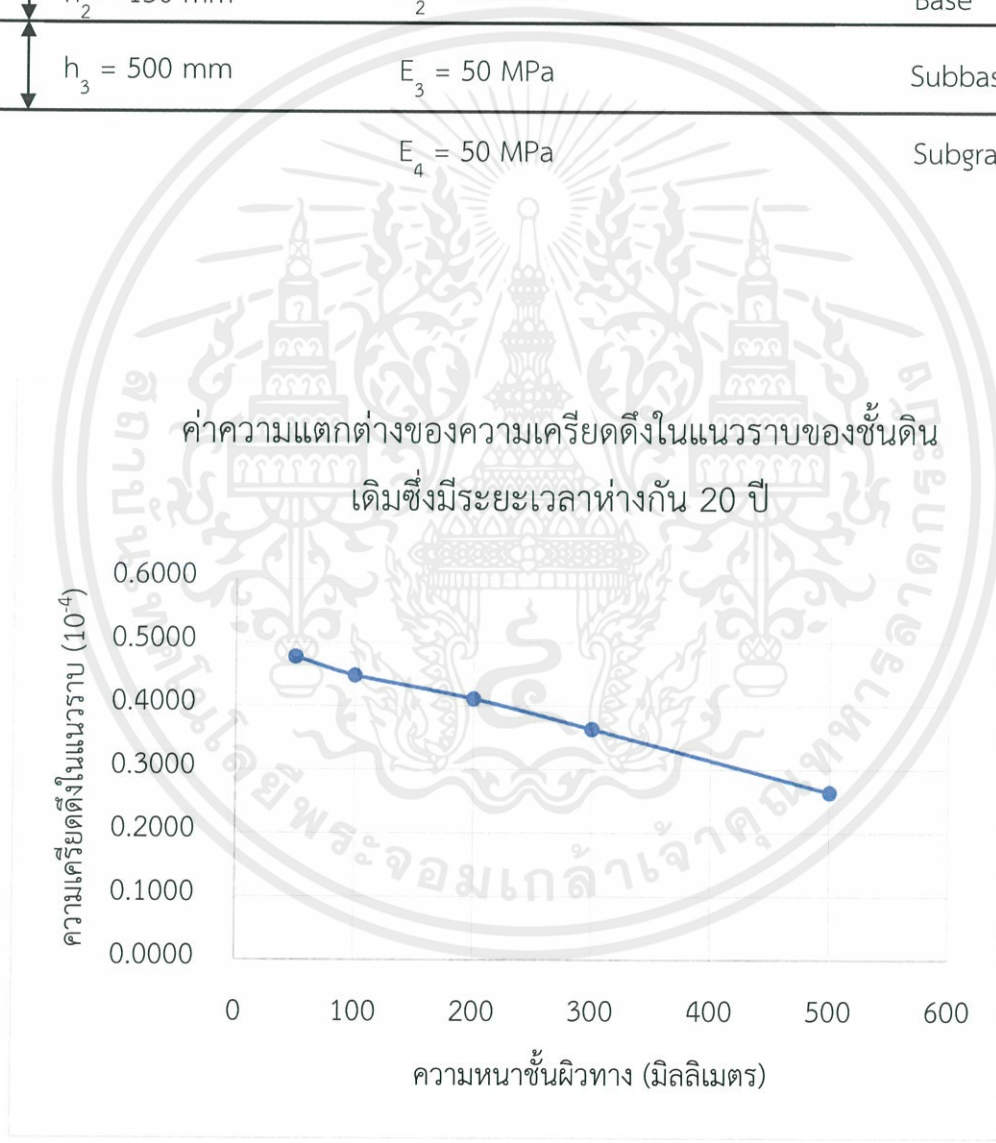
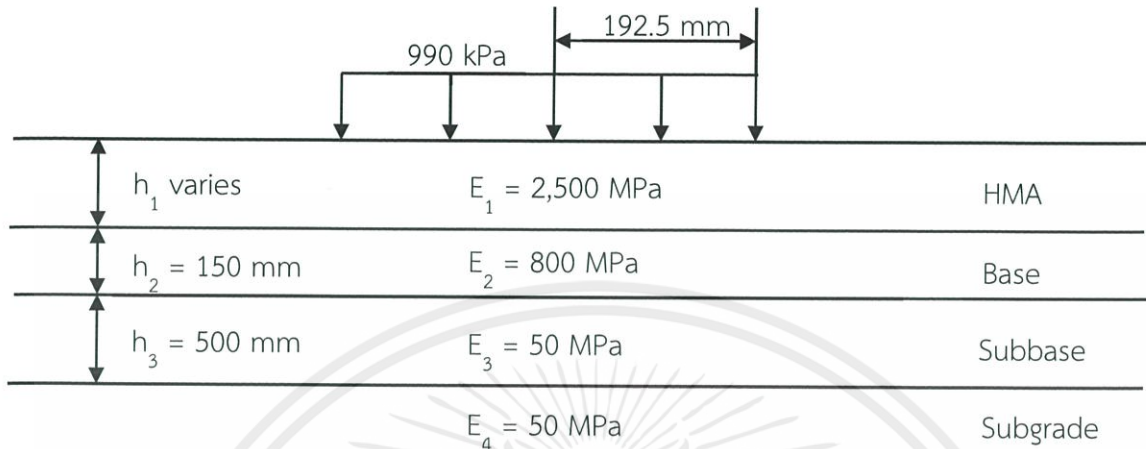
กราฟที่ 24 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 25



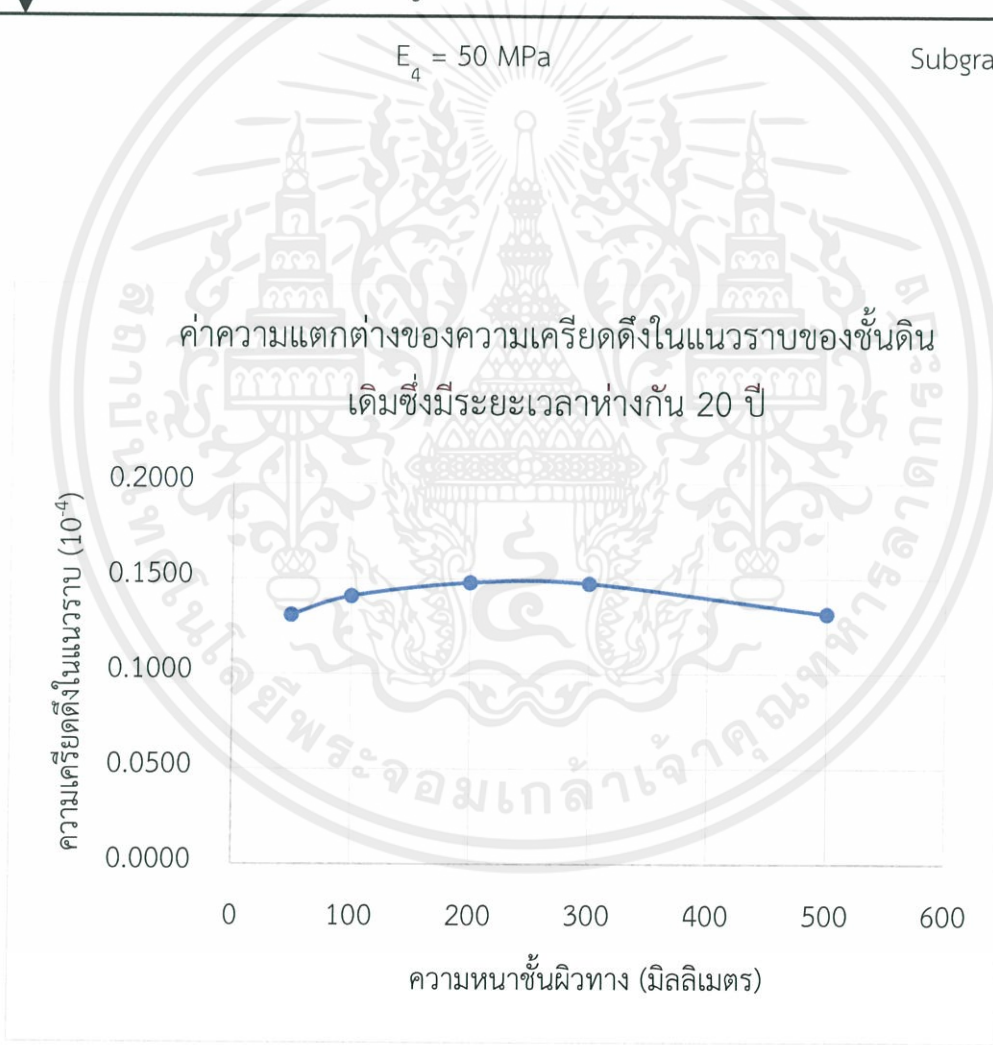
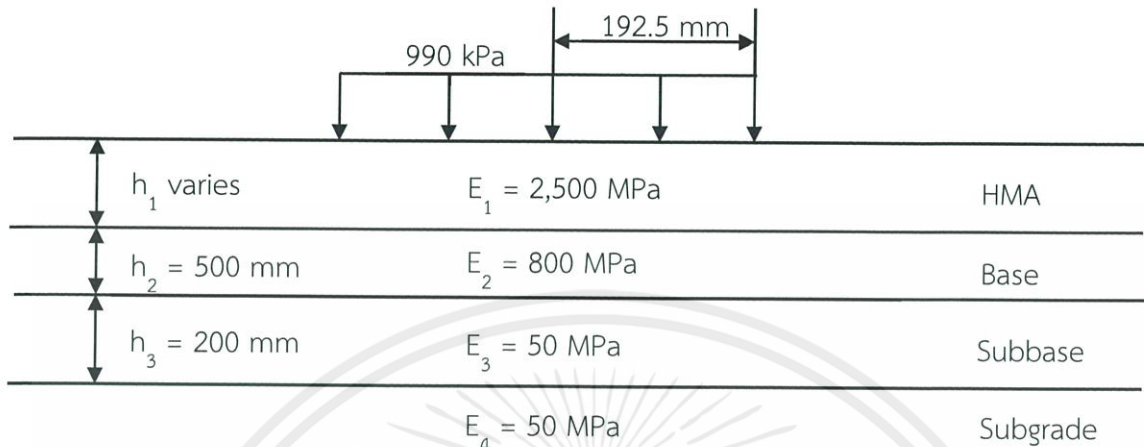
กราฟที่ 21 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

กรณีศึกษาที่ 26



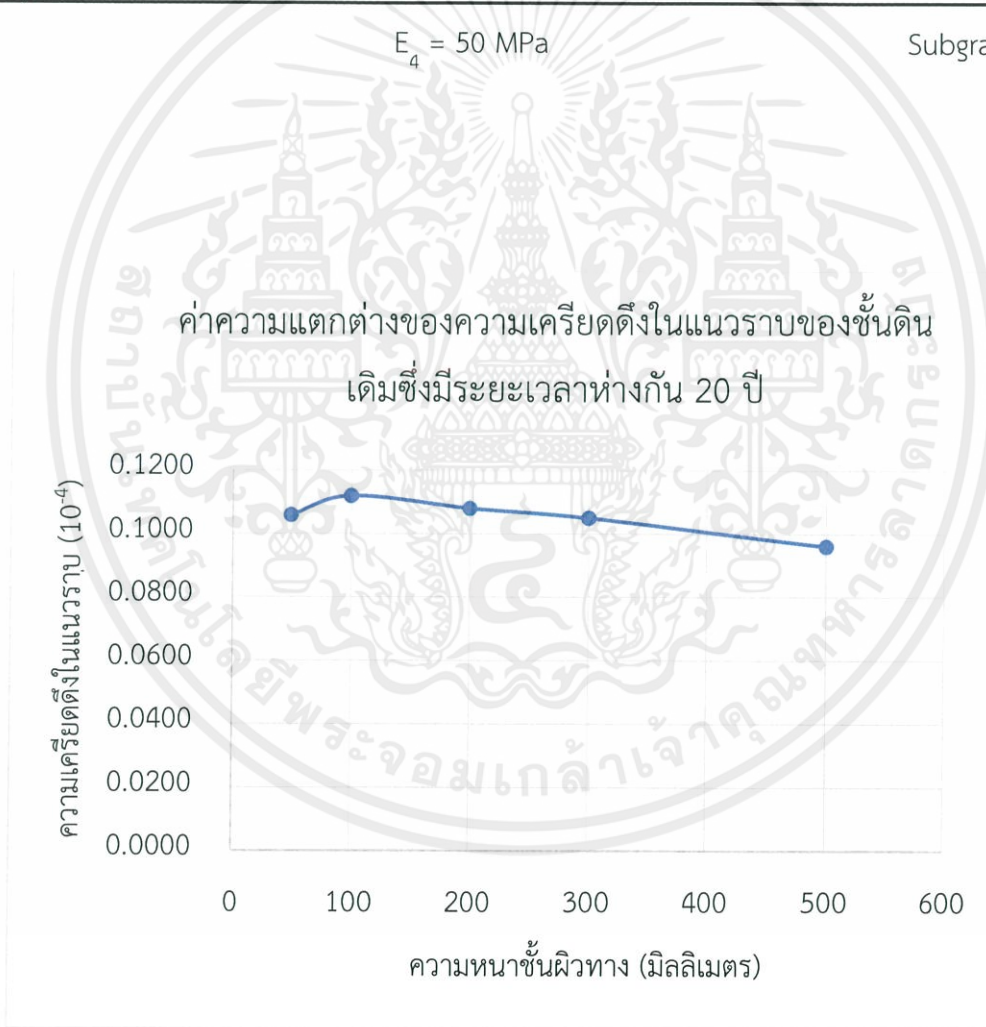
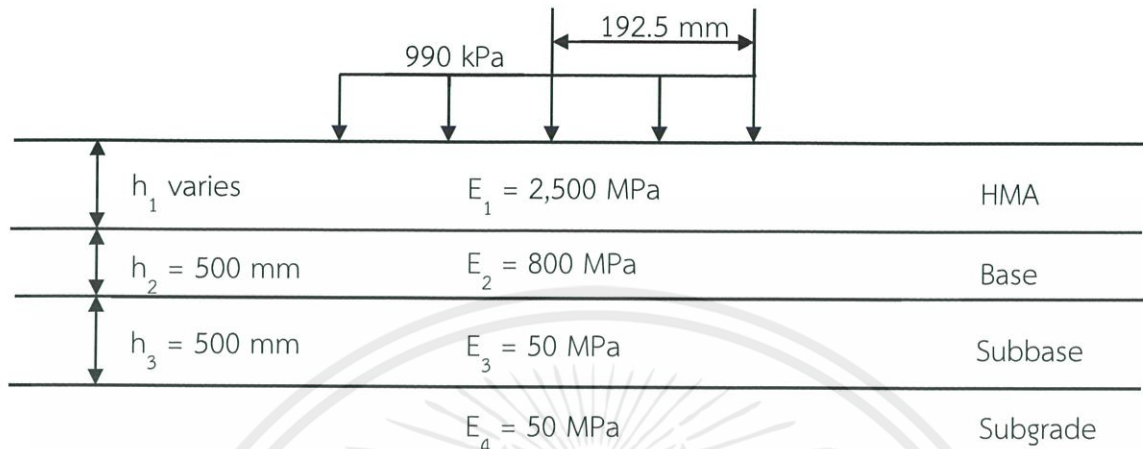
กราฟที่ 22 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

กรณีศึกษาที่ 27



กราฟที่ 23 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

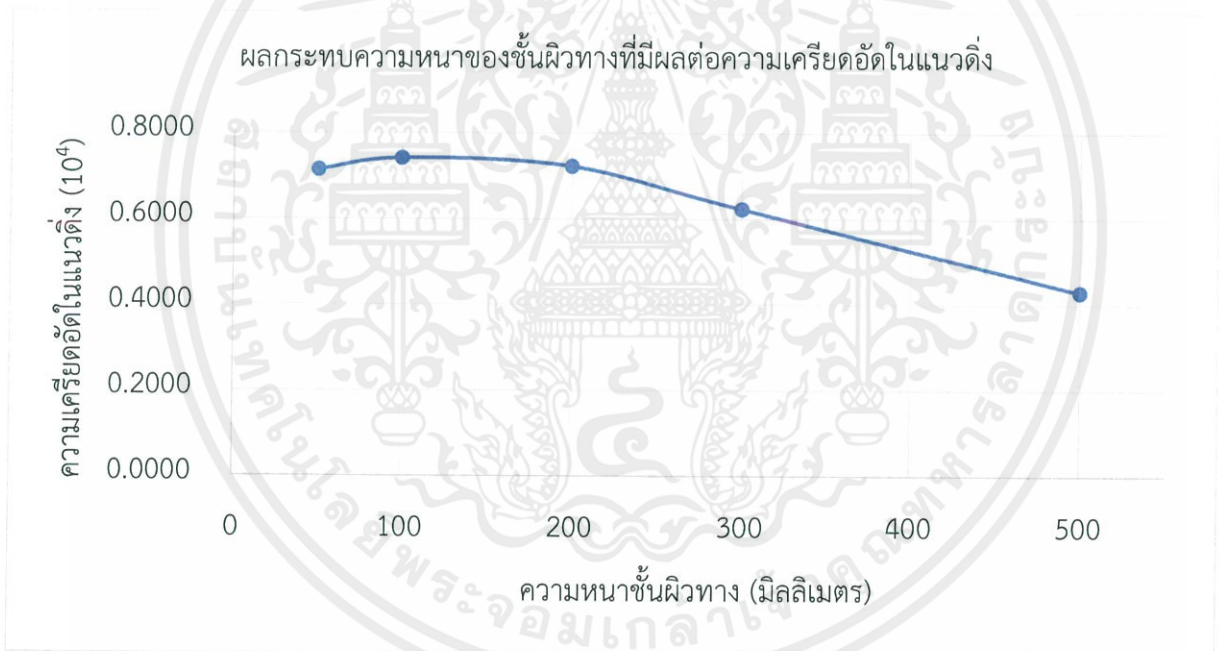
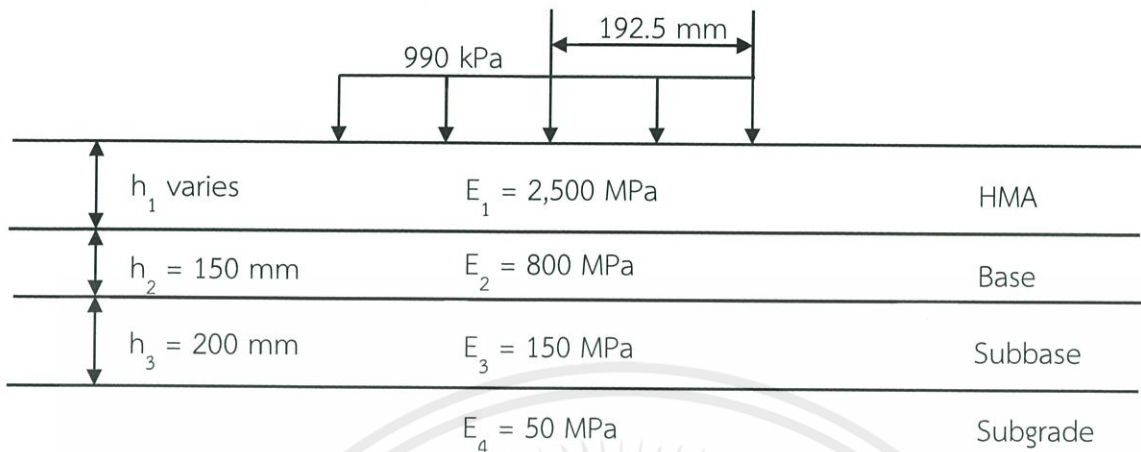
## กรณีศึกษาที่ 28



กราฟที่ 24 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

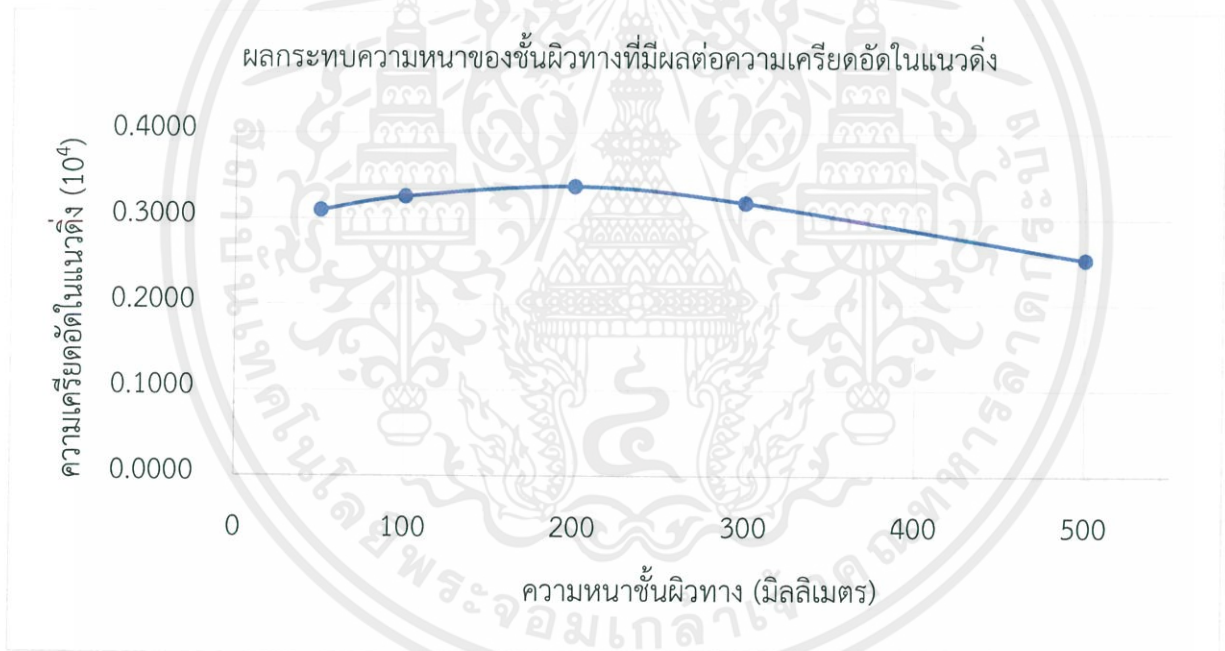
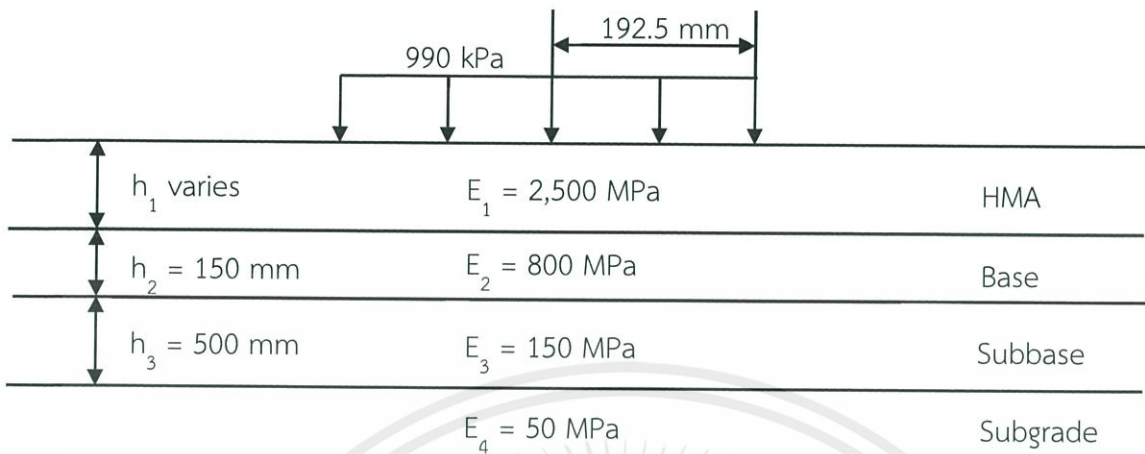
### กรณีศึกษาที่ 29



กราฟที่ 29 กราฟแสดงความแตกต่างของความเค้นอัดในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

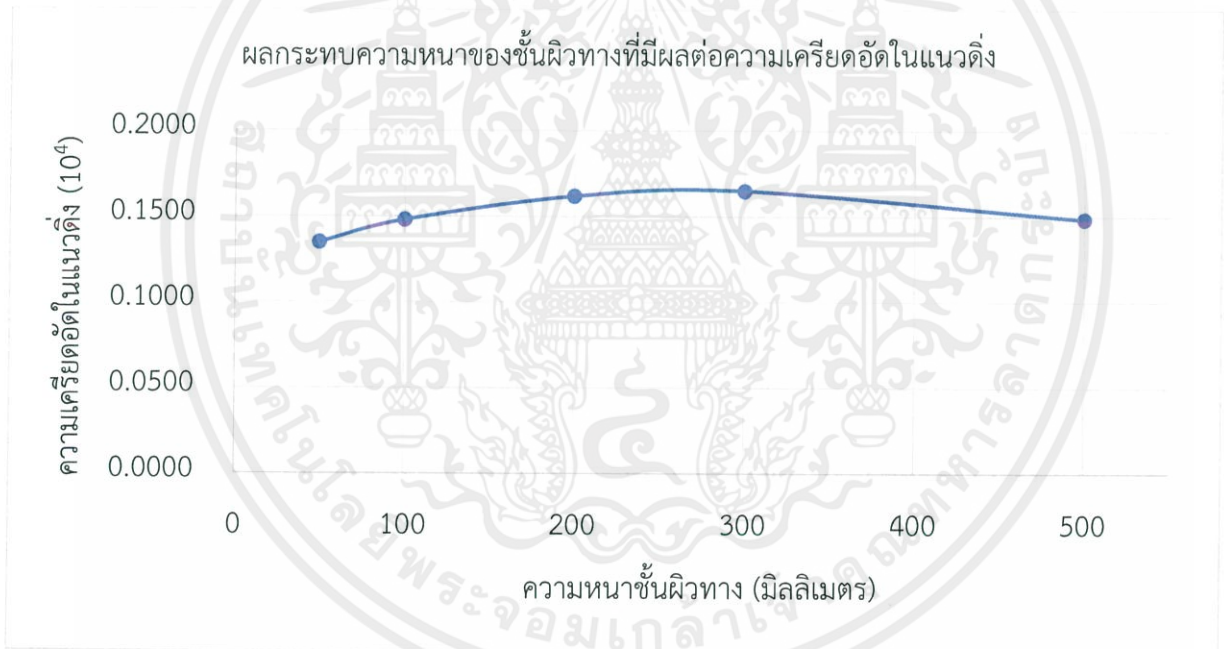
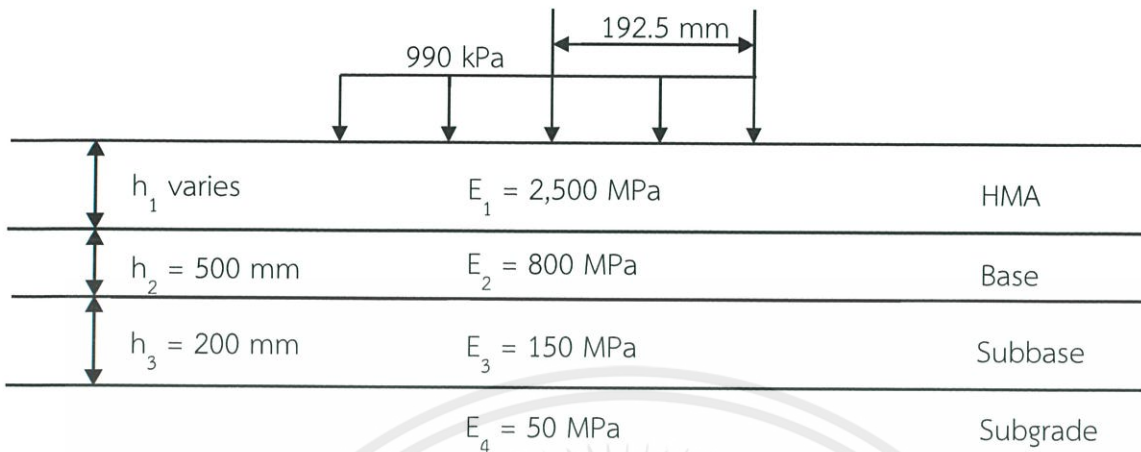
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีศึกษาที่ 30



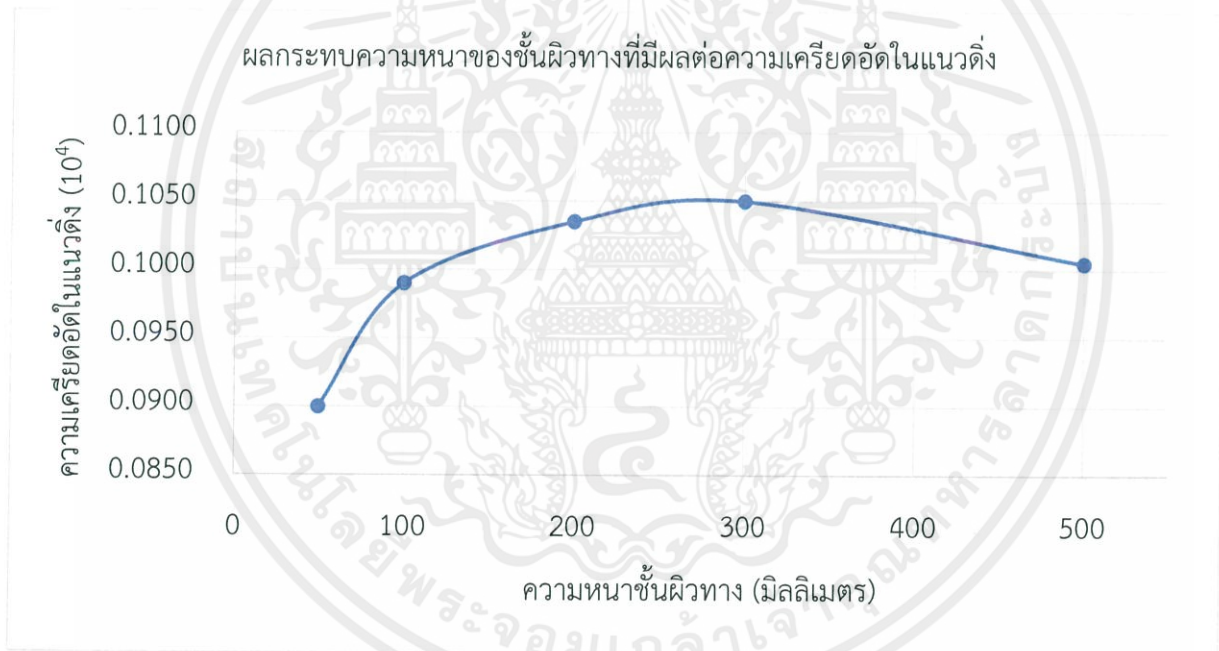
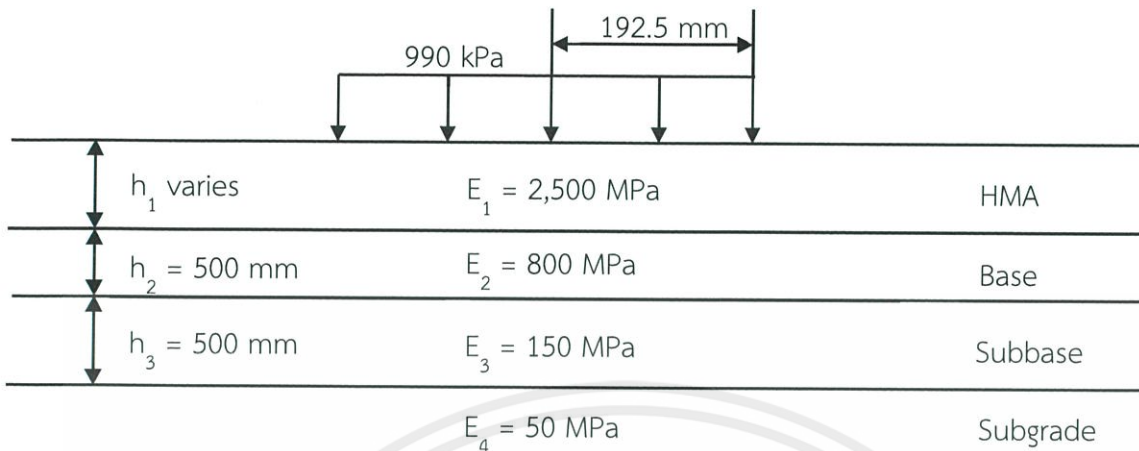
กราฟที่ 30 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดิ่งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 31



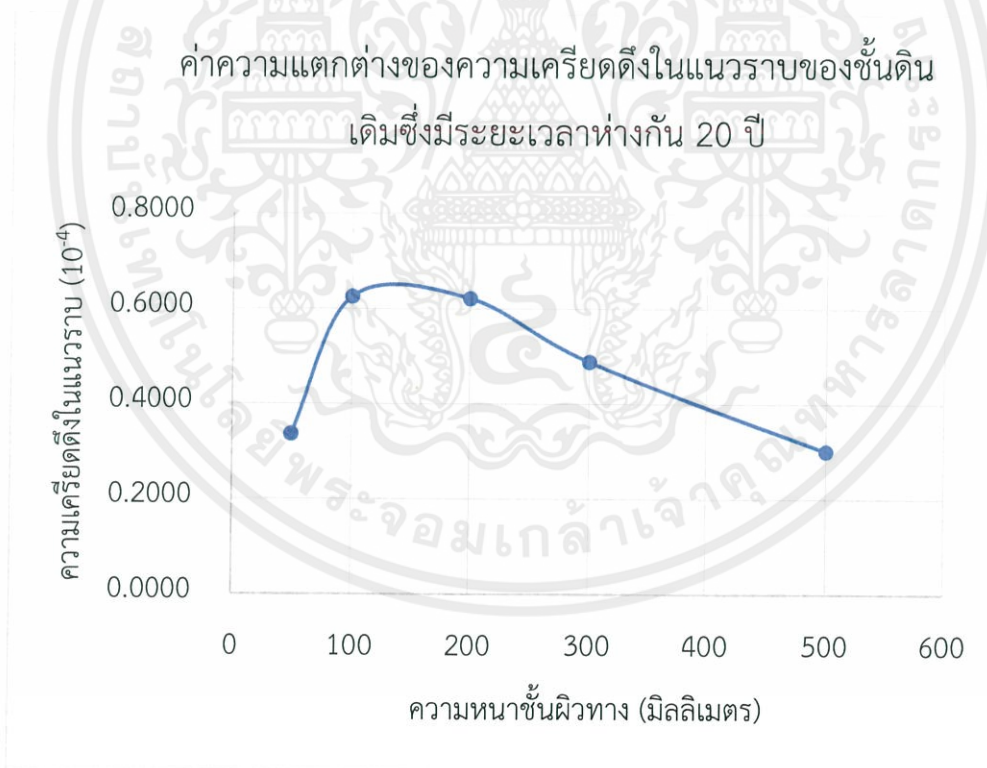
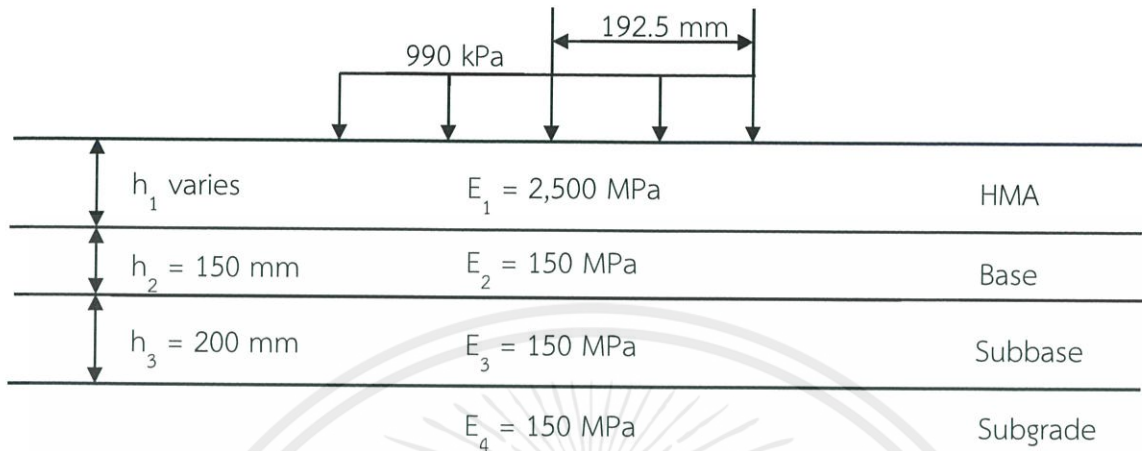
กราฟที่ 31 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 32



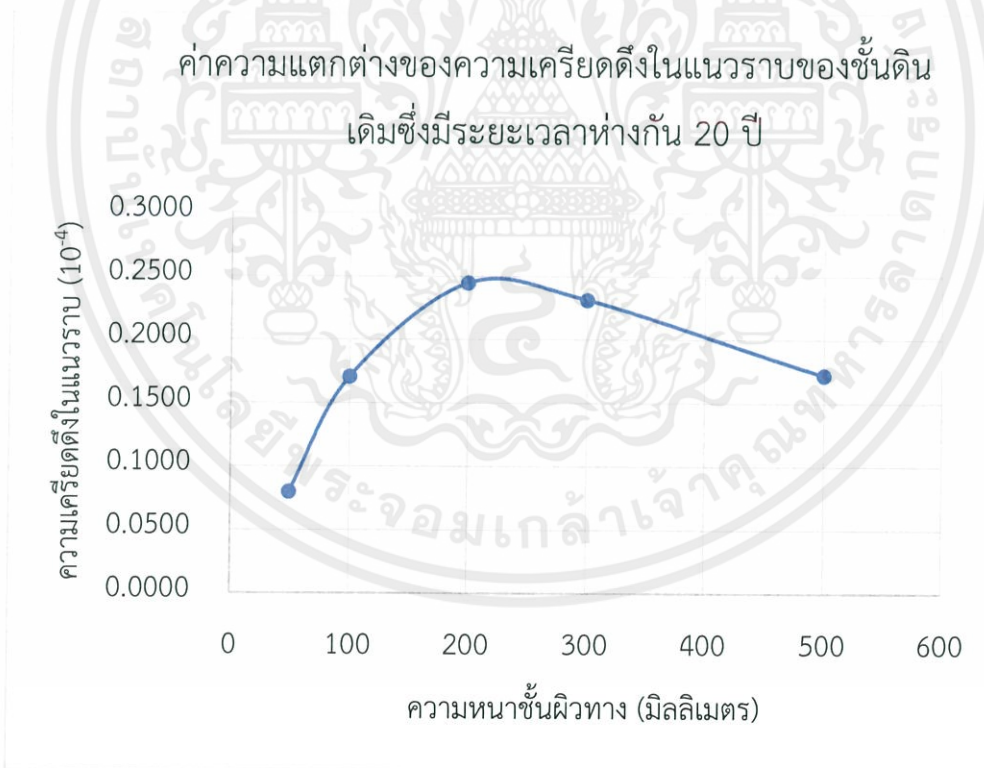
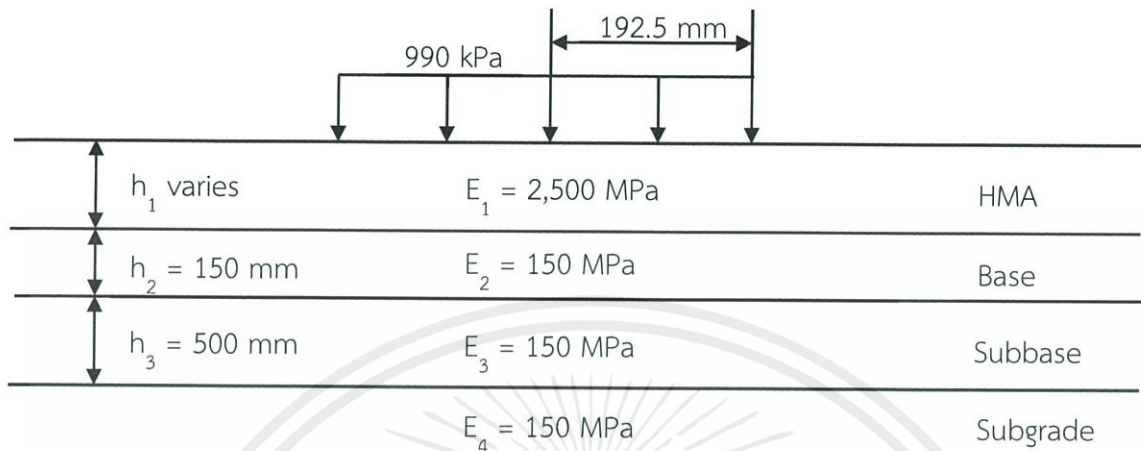
กราฟที่ 32 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 33



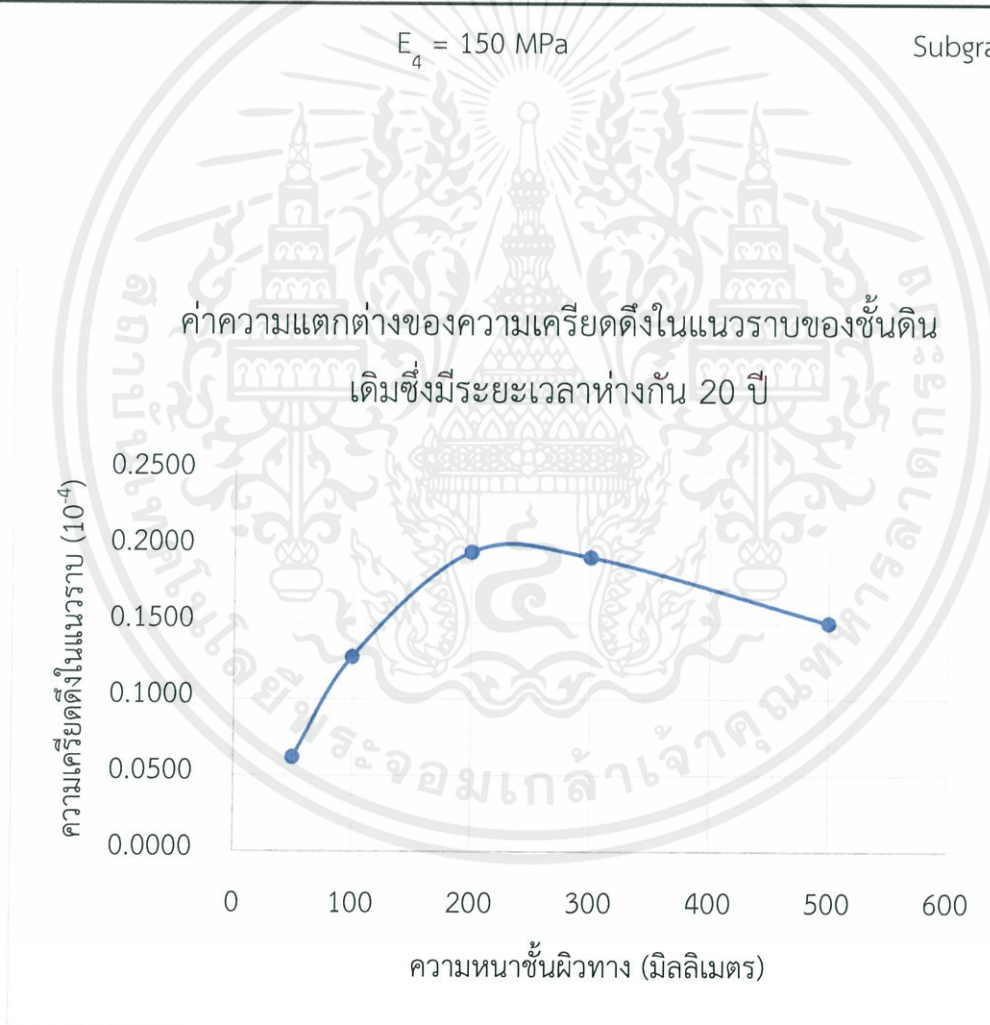
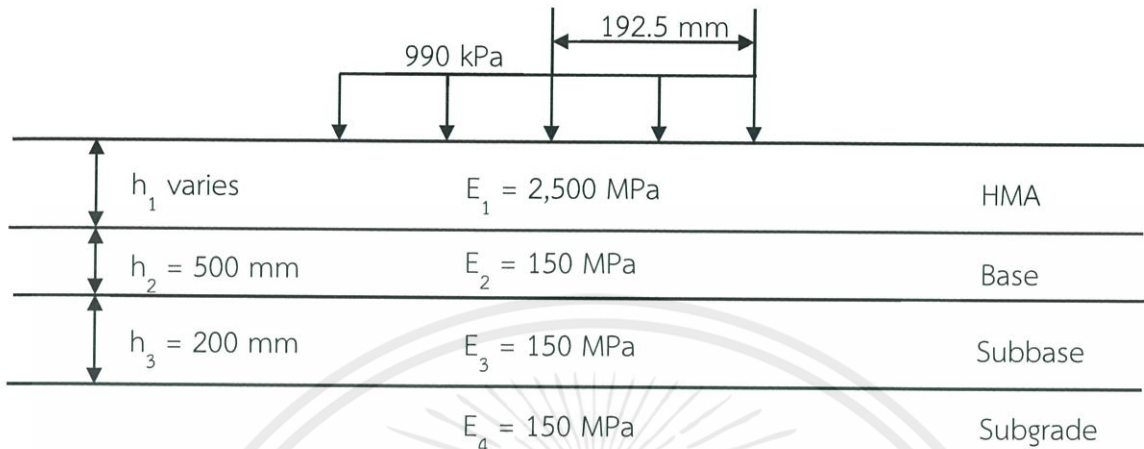
กราฟที่ 13 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 34



กราฟที่ 14 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

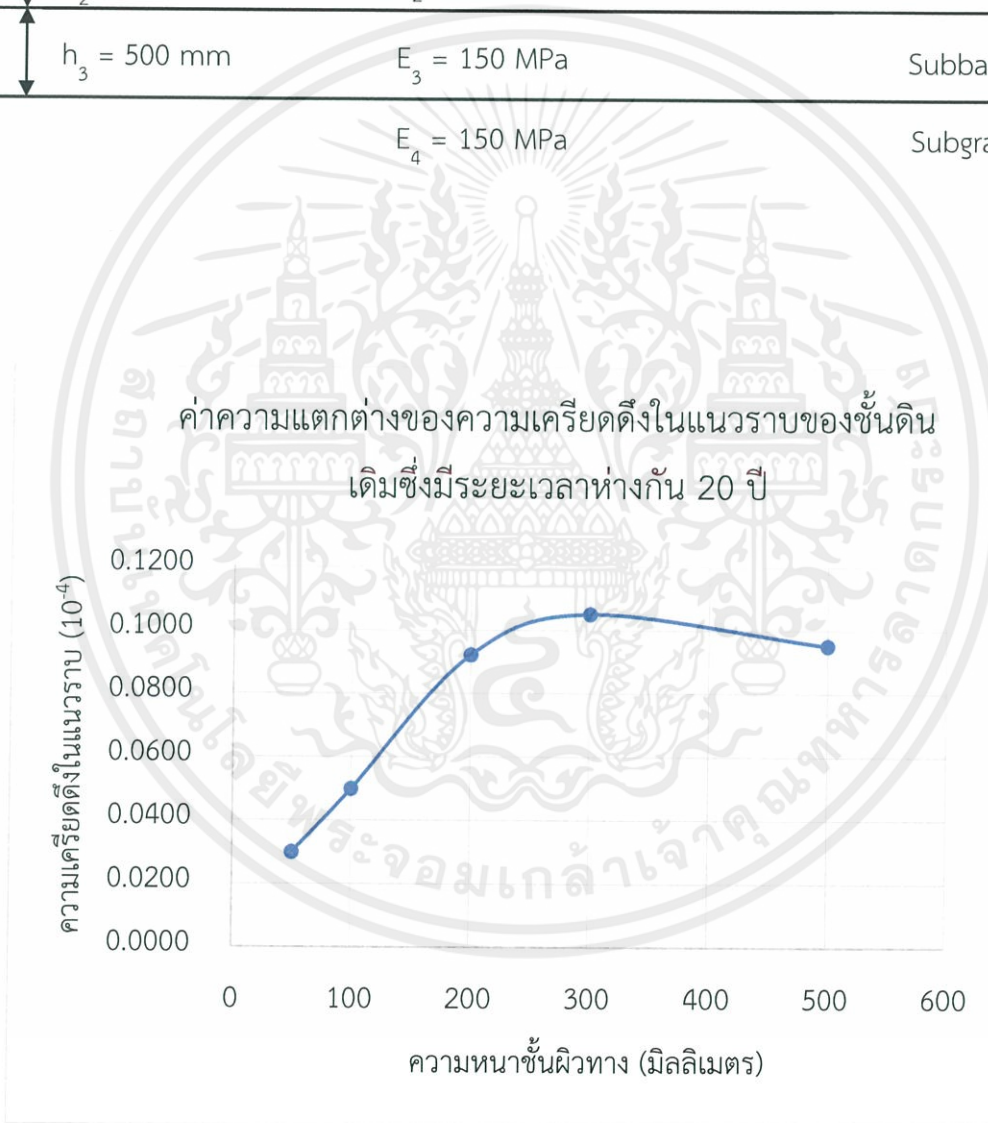
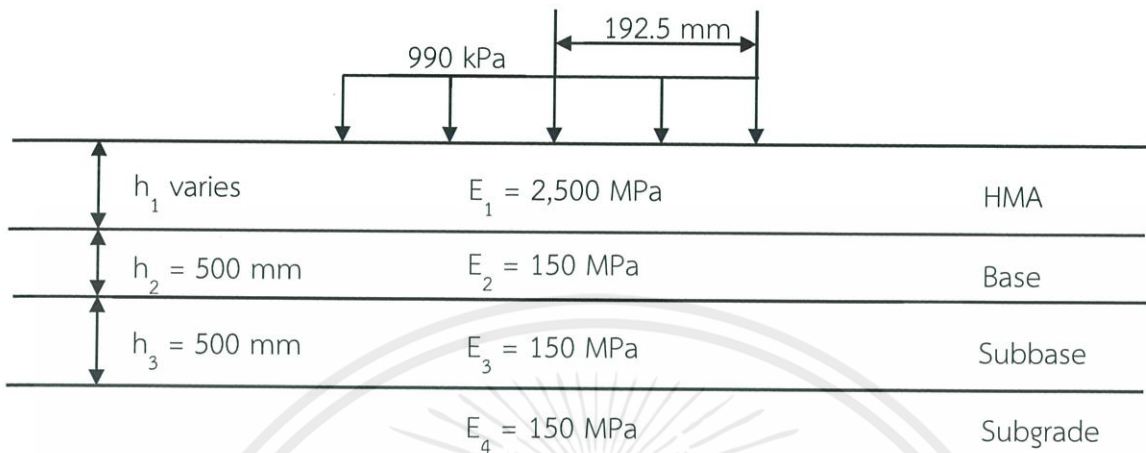
### กรณีศึกษาที่ 35



กราฟที่ 15 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

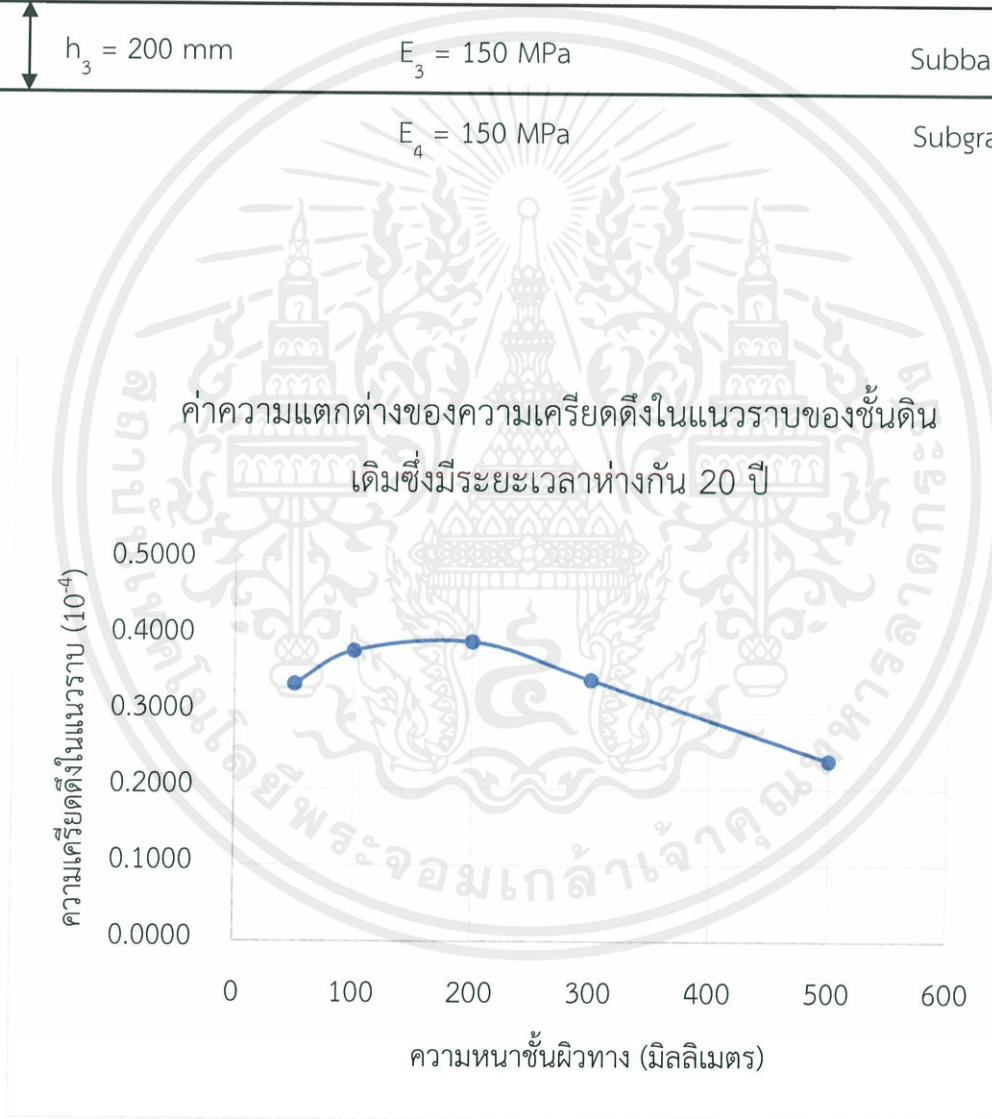
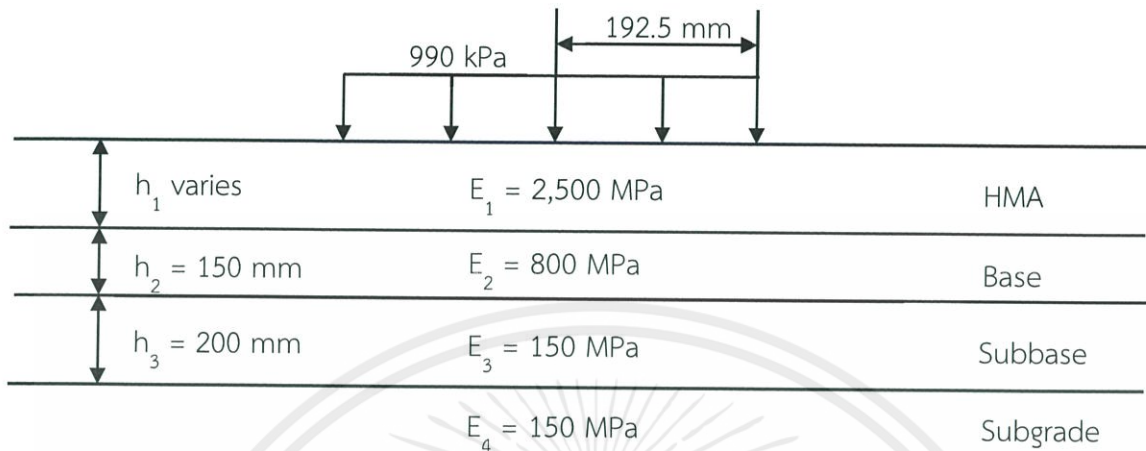
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีศึกษาที่ 36



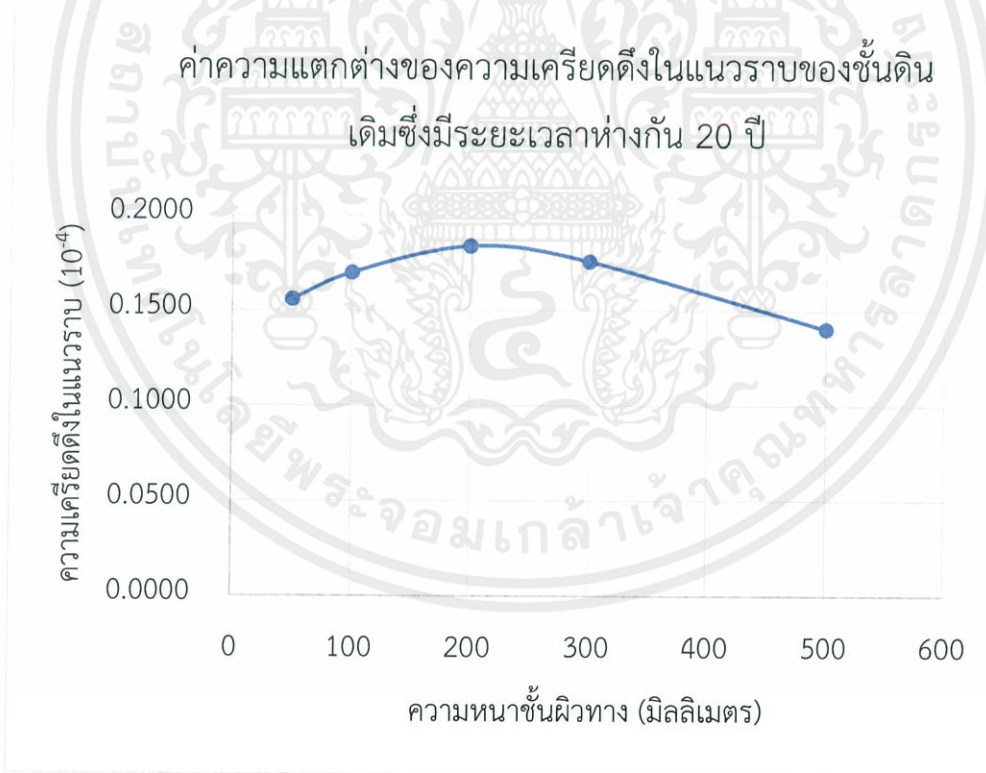
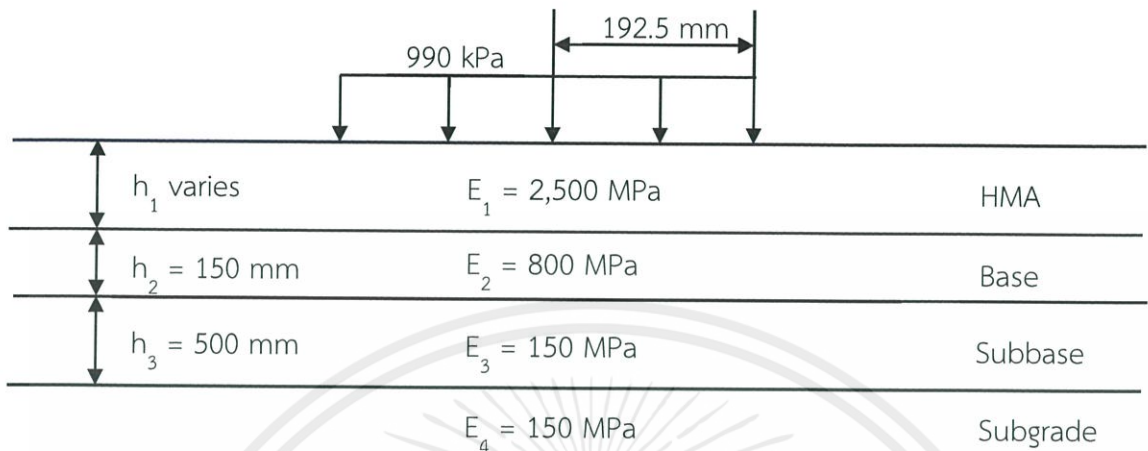
กราฟที่ 16 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวนอนที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

กรณีศึกษาที่ 37



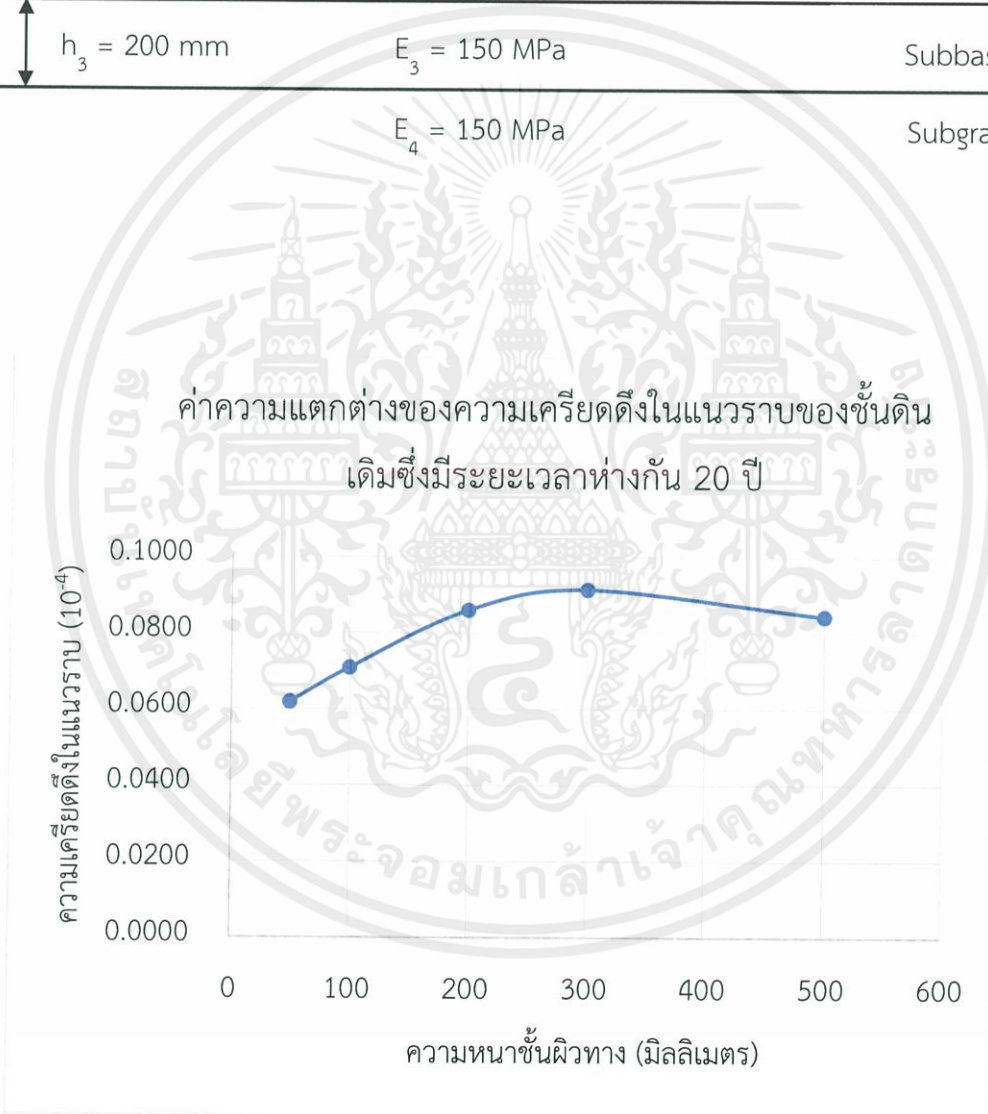
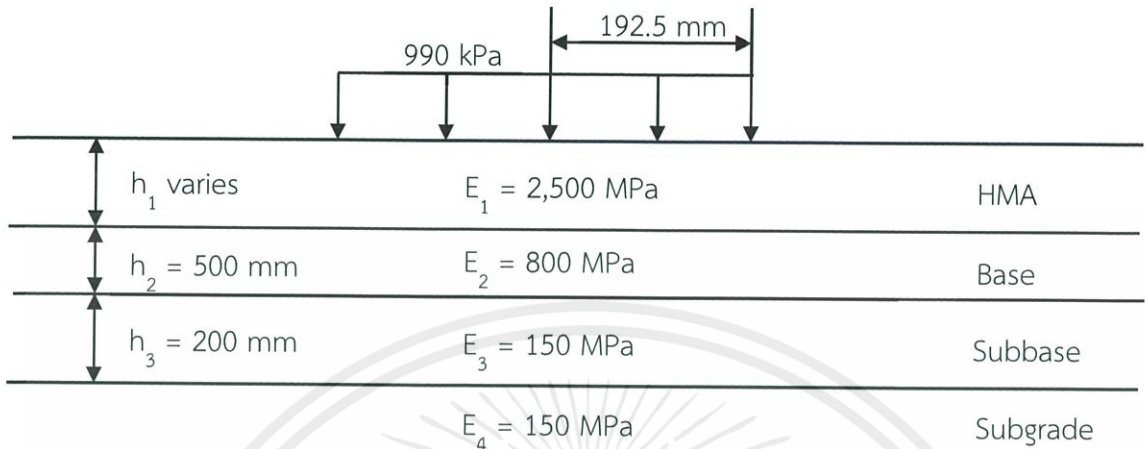
กราฟที่ 29 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 38



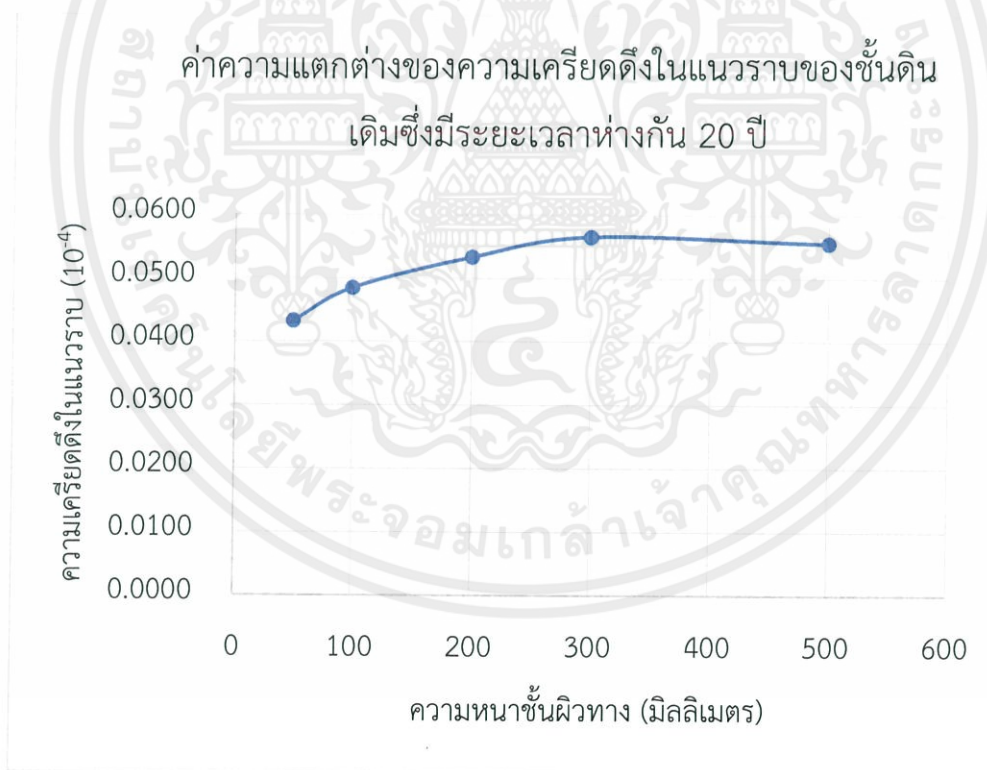
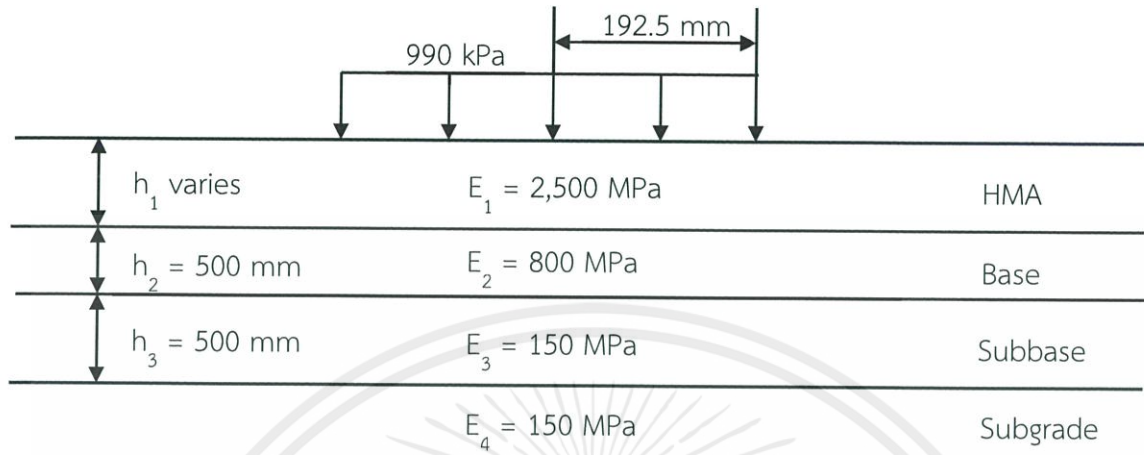
กราฟที่ 30 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดดึงในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

### กรณีศึกษาที่ 39



กราฟที่ 31 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี

## กรณีศึกษาที่ 40



กราฟที่ 32 กราฟแสดงความแตกต่างของความเครียดตั้งในแนวราบที่ระยะเวลาห่างกัน 20 ปี