



การประเมินพารามิเตอร์ของความแข็งแรงของชั้นดินถมคันทางจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

วิทยานิพนธ์
ของ
จิรวัดน์ โชคเกิด

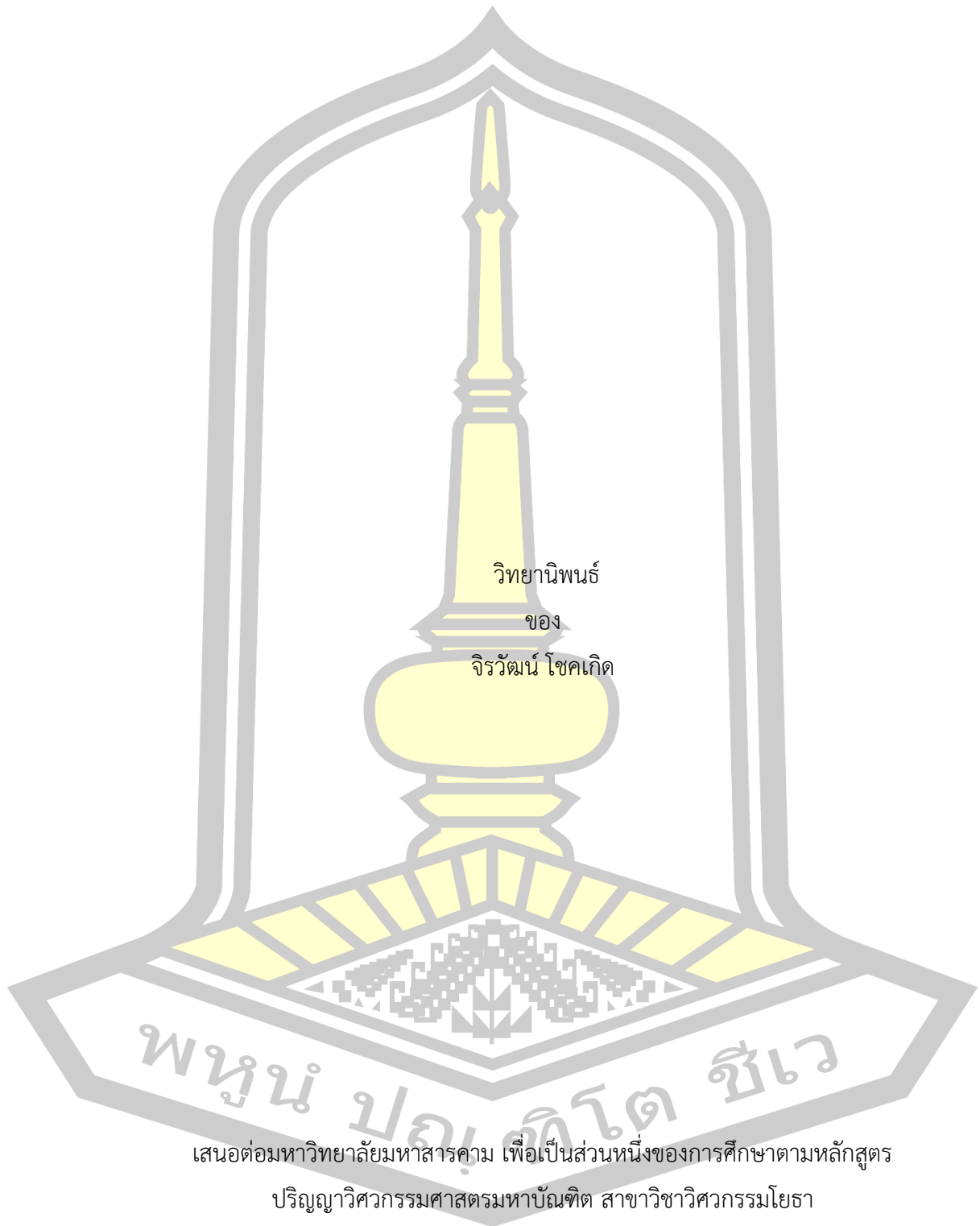
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ตุลาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การประเมินพารามิเตอร์ของความแข็งแรงของชั้นดินถมคันทางจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ



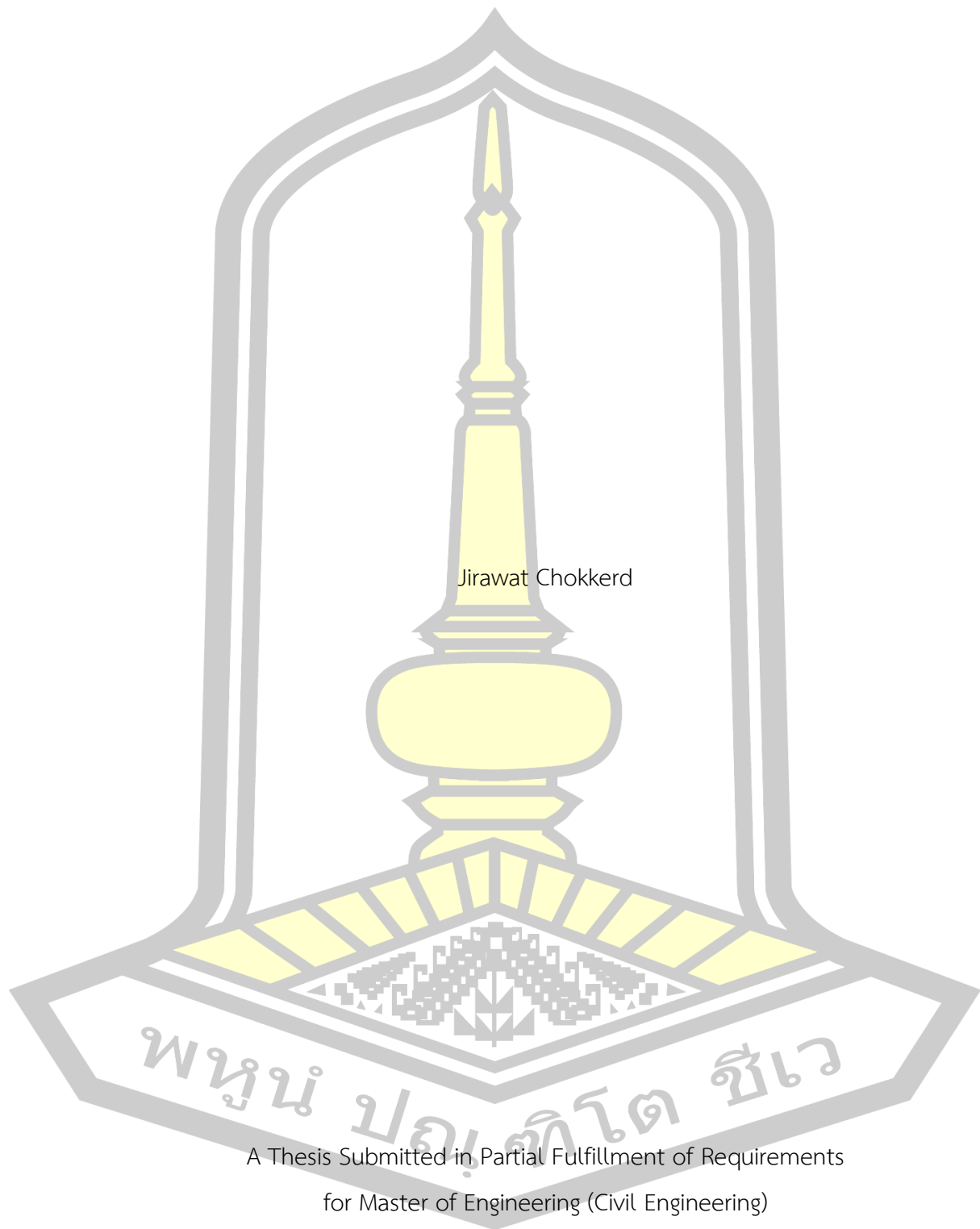
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ตุลาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Evaluation of Subgrade Strength Parameters by Laboratory Testings



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Civil Engineering)

October 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายจิรวัฒน์ โชคเกิด แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. รัตมณี นันทสาร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. นบปณม แก้วหานาม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ศีวา แก้วปลั่ง)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เล่าหวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การประเมินพารามิเตอร์ของความแข็งแรงของชั้นดินถมคันทางจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ผู้วิจัย จิรวัฒน์ โชคเกิด

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นบปณม แก้วหานาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2567

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซและการทดสอบการเจาะทะลวงด้วยกรวยแบบไดนามิก สำหรับการประเมินคุณสมบัติวัสดุดินของชั้นดินถมคันทาง เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถใช้ประเมินค่าของซีบีอาร์จากผลการทดสอบดีซีพี ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินวัสดุดินในงานวิศวกรรม ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบและเสนอความสัมพันธ์ใหม่สำหรับกลุ่มดินที่แตกต่างกัน โดยการทบทวนงานวิจัยที่ได้มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้และการทดสอบวัสดุดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจำนวน 5 จังหวัด การศึกษานี้ได้นำเสนอสมการที่ปรับปรุงใหม่ซึ่งแสดงความแม่นยำสูงในการพยากรณ์ค่าของซีบีอาร์ โดยสมการที่เสนอใหม่นี้มีความแม่นยำ เท่ากับ 0.89, 0.92, และ 0.94 สำหรับทราย ทรายปนดินเหนียวหรือดินทรายปนดินตะกอนและดินเหนียวตามลำดับ สมการเหล่านี้ถือเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับวิศวกร ช่วยให้สามารถคาดคะเนค่าซีบีอาร์ ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ เพื่อการตัดสินใจที่ดียิ่งขึ้นในโครงการวิศวกรรมต่างๆ

คำสำคัญ : แคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซ, ซีบีอาร์, การทดสอบการเจาะทะลวงด้วยกรวยแบบไดนามิก, ดีซีพี, การประเมินค่า, การคาดการณ์, ชั้นดินถมคันทาง, ทราย, ดิน, ราคาประหยัดและรวดเร็ว

TITLE Evaluation of Subgrade Strength Parameters by Laboratory Testings

AUTHOR Jirawat Chokkerd

ADVISORS Assistant Professor Nopanom Kaewhanam , Ph.D.
Assistant Professor Noppadol Sa-ngiamsak , Ph.D.

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2024
University

ABSTRACT

This study focuses on analyzing the correlation between the California Bearing Ratio (CBR) test and the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) test for evaluating the properties of subgrade soil materials. To develop an equation that can estimate CBR values based on DCP test results, enhancing the efficiency of soil material evaluation in engineering applications. By analyzing test data and proposing new correlations for different soil groups, the study reviews previous research and conducts soil material tests across five provinces in northeastern Thailand. The study presents improved equations that demonstrate high accuracy in predicting CBR values, with R^2 values of 0.89, 0.92, and 0.94 for clean sand, silty sand or sandy silt and clay, respectively. These equations provide a useful tool for engineers, allowing for quick and accurate CBR estimations, leading to better decision-making in various engineering projects.

Keyword : California Bearing Ratio, CBR, Dynamic Cone Penetrometer, DCP, estimation, prediction, subgrade, sand, soil, cheap and fast

กิตติกรรมประกาศ

ในความสำเร็จของการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่สนับสนุนด้านสถานที่และเครื่องมือในการทดสอบต่างๆ นอกจากนี้ขอขอบคุณหลายๆท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในโครงการดังนี้

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สถานศึกษาที่ให้ความรู้และทักษะความสามารถสำหรับวิชาชีพวิศวกรรมตลอดระยะเวลา 4 ปี ในระดับปริญญาตรี และ 4 ปีครึ่ง ในระดับปริญญาโท ได้พบกับผู้คน เพื่อนร่วมรุ่น คณะอาจารย์หลากหลายท่าน มีเรื่องราวเกิดขึ้นมากมาย ได้ความรู้ ประสบการณ์ และมีมิตรภาพที่ยากจะลืมเลือน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นบพนม แก้วหานาม อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยแนะนำและให้คำปรึกษาในการดำเนินงาน ให้ความรู้และประสบการณ์อันล้ำค่า นอกจากนี้ยังช่วยดูแลนิสิต ไม่ว่าจะเป็นการเรียน การทำงานวิจัย และการบริหารจัดการชีวิต คอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจที่ต่ออย่างเต็มที่ รวมถึงการทุ่มเทอย่างมากในการดำเนินการทุกขั้นตอน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพภูล เสี่ยมศักดิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เสียสละเวลาคอยช่วยเหลือนิสิต ไม่ว่าจะเป็นการเรียน การทำงานวิจัย นอกจากนั้นยังมีการให้ความรู้เฉพาะด้านสำหรับงานปฐพีกลศาสตร์ การให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และให้คำปรึกษาเพื่อแก้ปัญหาในแต่ละเรื่องเพื่อการดำเนินงานอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยชาญ โชติถนอม อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และการให้ความรู้มากมาย ไม่ว่าจะเป็นการเรียน การทำงานวิจัย นอกจากนั้นยังมีการให้ความรู้เฉพาะด้านของงานวิศวกรรมศาสตร์ การให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และให้คำปรึกษาเพื่อแก้ปัญหาในแต่ละเรื่องเพื่อการดำเนินงานอย่างราบรื่น นอกจากนั้นยังช่วยแนะนำการดำเนินชีวิตที่เรียบง่ายและประสบการณ์ที่น่าจดจำมากมาย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิลา แก้วปลั่ง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นอกจากนั้นยังมีการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และให้คำปรึกษาเพื่อแก้ปัญหาเพื่อการดำเนินงานอย่างราบรื่น การให้ความรู้สำหรับวิชาชีพวิศวกรรมโยธาดูตลอดหลายปีที่ผ่านมา นับเป็นประสบการณ์อันล้ำค่าอย่างมาก

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. รัตมณี นันทสาร รองคณบดีประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เสียสละเวลามาเป็นผู้ทรงคุณวุฒิและประธานการสอบ

วิทยานิพนธ์ นอกจากนั้นยังให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และความรู้เฉพาะด้านอันเป็นประโยชน์อย่างสูง ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ กลุ่มเพื่อนรุ่นที่ 18 ทุกคนที่อาจจะกล่าวถึงไม่หมดทุกคน ที่ได้รู้จักและมีมิตรภาพที่ดีร่วมกันตั้งแต่วันแรกที่เข้าเรียน ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เข้าเรียนด้วยกัน ทำกิจกรรมร่วมกัน อีกทั้งยังส่งเสริมสนับสนุนกันเพื่อให้การเรียนและการฝึกฝนทักษะไปไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบ่งปันอาหารและของใช้ส่วนตัวในขณะทำงานร่วมกัน ในยามที่กลุ่มเพื่อนอยู่ในสถานการณ์ที่ยากลำบากก็คอยให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันซึ่งกันและกัน ทุกคนช่วยเหลือซึ่งกันและกันและยังคงติดต่อประสานงานกันเหมือนเดิม

ขอขอบคุณ นาย ธนจิต หงษาคำ เพื่อนร่วมรุ่นที่ 18 และเพื่อนร่วมงานปริญญาโทที่คอยช่วยเหลือและร่วมแรงร่วมใจให้การปฏิบัติงานดำเนินไปได้ด้วยดี คอยแบ่งปันประสบการณ์และความคิดเห็นในขณะเวลาที่อยู่ร่วมกัน คอยสนับสนุนและดูแลกันตลอดช่วงระยะเวลา 4 ปี ในช่วงระดับปริญญาตรี อีกทั้งยังคอยตักเตือนและปรับปรุงในขณะที่ยังฝ่ายดำเนินการผิดทั้งเรื่องเรียนและการทำงาน ทำให้ทุกอย่างผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา นายสิทธิศักดิ์ ไพศุณย์ และ นายอริยะ ไชยตันเทือก ที่เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้การช่วยเหลือและมีส่วนร่วมในทุกกระบวนการทำงาน รวมถึงการใช้แรงงานอย่างหนักหน่วงเพื่อให้การดำเนินงานประสบความสำเร็จ อีกทั้งยังมอบมิตรภาพดีในฐานะรุ่นพี่และรุ่นน้องคณะวิศวกรรมศาสตร์อย่างจริงใจ พร้อมทั้งแบ่งปันความคิดเห็นและประสบการณ์อันล้ำค่า ทั้งการใช้ชีวิต ความรู้ทางวิชาชีพและความรู้รอบตัว นับเป็นเรื่องราวอันยอดเยี่ยม

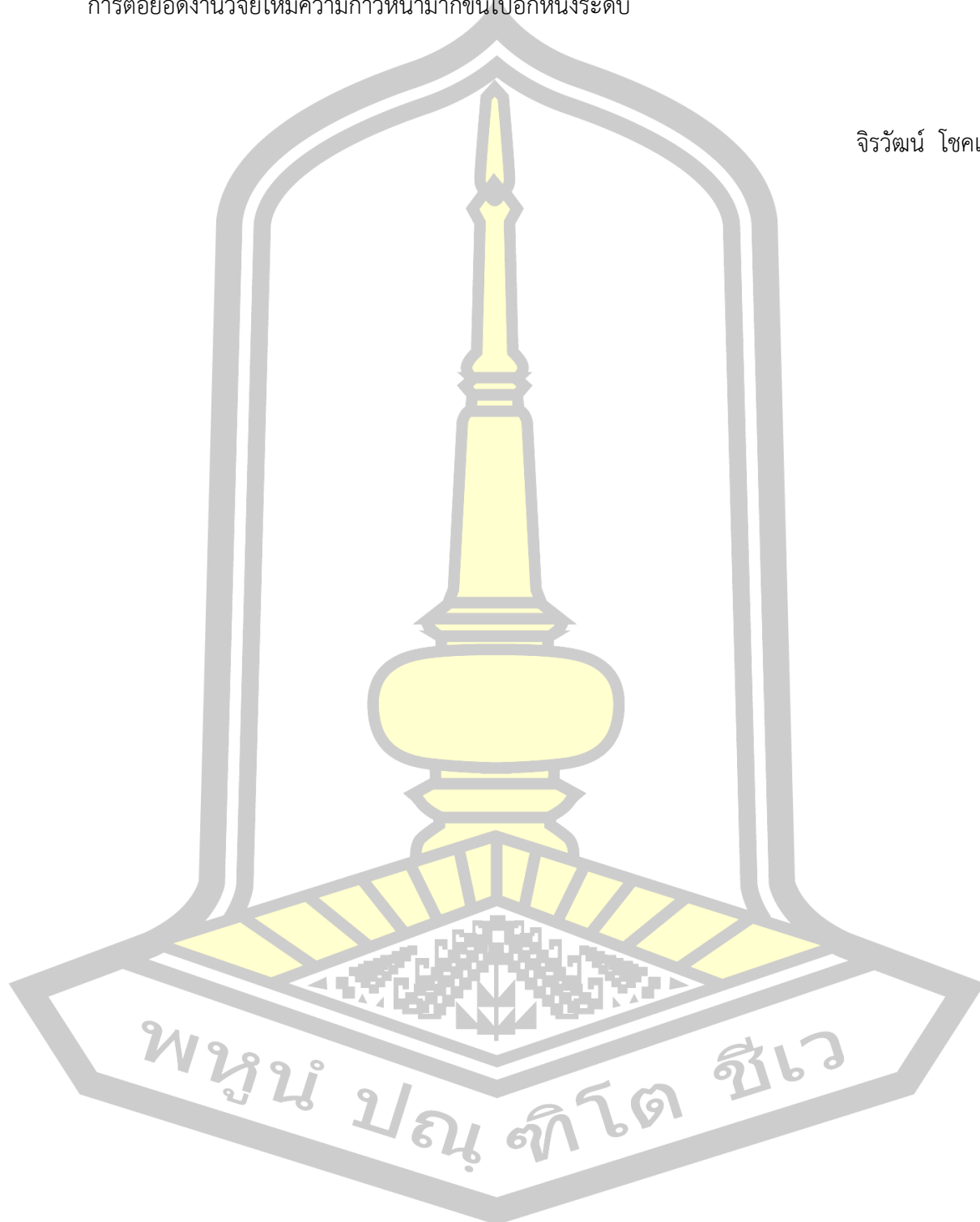
ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาโทสาขาวิศวกรรมโยธา นายณพคุณ พลขำนิ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้การช่วยเหลือและมีส่วนร่วมในกระบวนการทำงานบางส่วน เพื่อให้การดำเนินงานประสบความสำเร็จ อีกทั้งยังมอบมิตรภาพดีในฐานะรุ่นพี่และรุ่นน้องคณะวิศวกรรมศาสตร์อย่างจริงใจ คอยดูแลในขณะที่ยังทำการศึกษาระดับปริญญาโทร่วมกัน พร้อมทั้งแบ่งปันความคิดเห็นและประสบการณ์อันล้ำค่า

ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา นางสาวณารินดา นัยวัตร นางสาวสุนิษา บุตรนนท์ นางสาวกมลชนก นาลาดทา และ นายอนุวัฒน์ มาโยธา ที่เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้การช่วยเหลือและมีส่วนร่วมในกระบวนการทำงานบางส่วน รวมถึงการใช้แรงงานเพื่อให้การดำเนินงานประสบความสำเร็จ อีกทั้งยังมอบมิตรภาพดีในฐานะรุ่นพี่และรุ่นน้องคณะวิศวกรรมศาสตร์อย่างจริงใจ พร้อมทั้งแบ่งปันความคิดเห็นและประสบการณ์ การดำเนินโครงการเพื่อประโยชน์แก่ชุมชนร่วมกันและการใช้ชีวิตร่วมกันถือเป็นช่วงเวลาที่มีค่าเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา นางสาวนภัสรา ทรัพย์พงษ์ และ นางสาวศศิยากร บัวแก้ว ที่เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้การช่วยเหลือและมีส่วนร่วมในทุกกระบวนการทำงาน

รวมถึงการใช้แรงงานอย่างหนักหน่วงเพื่อให้การดำเนินงานประสบความสำเร็จ และมีความสนใจสำหรับการต่อยอดงานวิจัยให้มีความก้าวหน้ามากขึ้นไปอีกหนึ่งระดับ

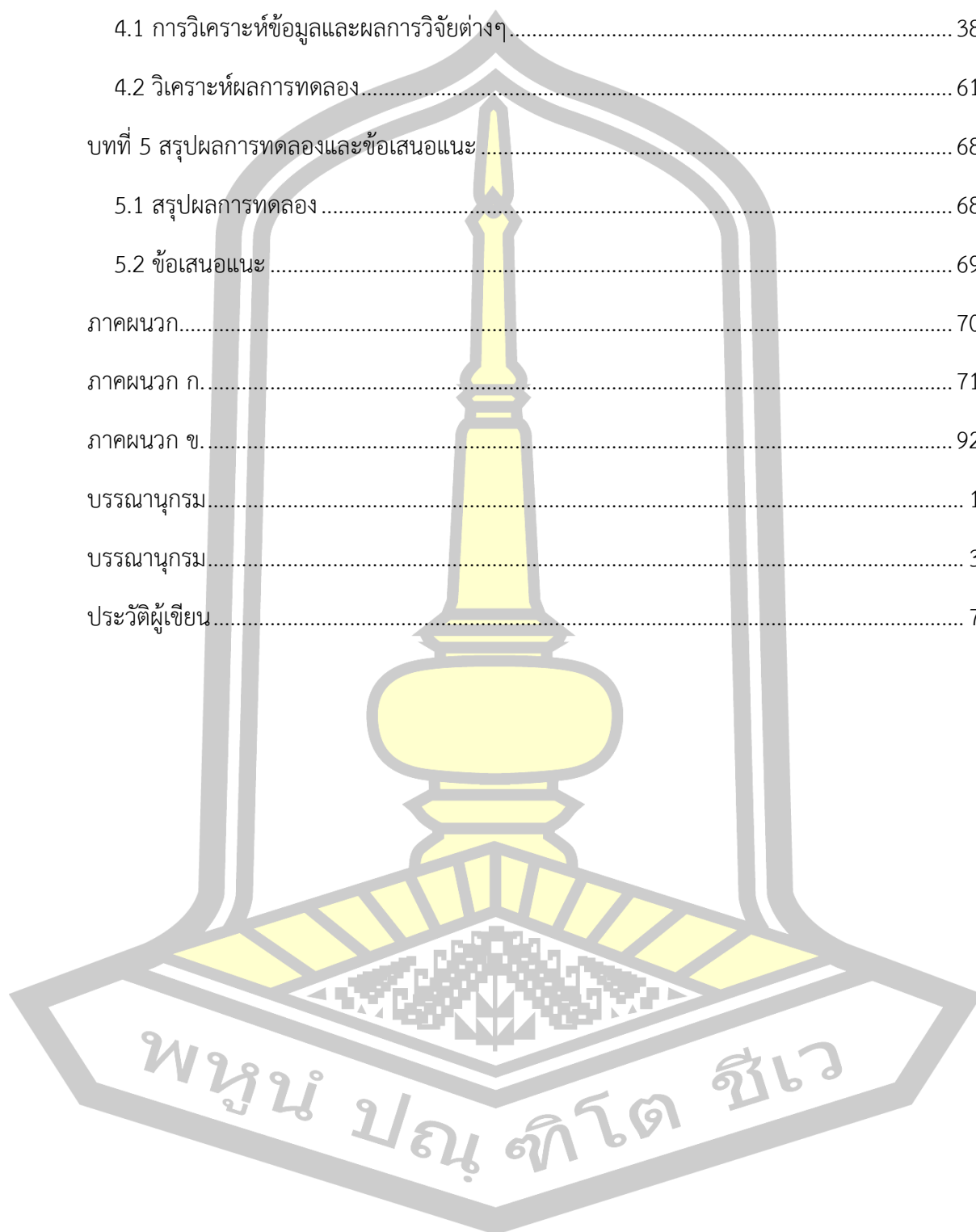
จิรวัดน์ โชคเกิด



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบถนน	5
2.1.2 การจำแนกดิน	8
2.1.3 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test).....	11
2.1.4 การทดสอบ California Bearing Ratio and Swelling test.....	13
2.1.5 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration test.....	25
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	34
3.2 การเก็บและจำแนกตัวอย่างดิน	36
3.3 การทดลอง.....	37

บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	38
4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัยต่างๆ.....	38
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	92
บรรณานุกรม.....	1
บรรณานุกรม.....	3
ประวัติผู้เขียน.....	7



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ชั้นดินถมคันทาง (Subgrade) เป็นชั้นวัสดุเดิมหรือดินจากแหล่งอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดินนั้น มีหน้าที่รองรับโครงสร้างของถนนทั้งหมดไว้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการออกแบบถนน คือ ต้องออกแบบให้ถนนมีโครงสร้างหนาพอที่จะกระจายน้ำหนักลงบนชั้นนี้ได้ต่ำกว่าความสามารถรับน้ำหนักของชั้นพื้นฐานทาง โครงสร้างของชั้นดินถมคันทางอยู่ในโครงสร้างของถนนทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นถนนแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) และถนนแบบผิวแข็ง (Rigid Pavement) ล้วนแล้วแต่มีชั้นดินถมคันทางเป็นส่วนประกอบสำคัญในการก่อสร้าง นอกจากนี้ชั้นดินถมคันทางยังช่วยป้องกันโครงสร้างชั้นทางไม่ให้ได้รับความเสียหายจากการมีน้ำท่วมขัง ด้วยเหตุผลทั้งหมดนี้ชั้นดินถมคันทางจึงมีความสำคัญซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและความแข็งแรงของถนนทุกชนิด (Aldood, 2020) (Mehrpazhouh, Moghadas Tafreshi, & Mirzababaei, 2019) (Amadi, Sadiku, Abdullahi, & Danyaya, 2018)

พารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงของวัสดุคันทางมีความสำคัญสำหรับการออกแบบและการควบคุมก่อสร้างของถนน ซึ่งมีอยู่หลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน เช่น การก่อสร้างถนนแบบยืดหยุ่นใช้ค่า California Bearing Ratio (CBR) เป็นการประเมินค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินเป็นหลักหรือการก่อสร้างถนนแบบผิวแข็งมีการทดสอบ Plate Bearing Test (PBT) เพื่อใช้ค่า Modulus of Subgrade Reaction (K-Value) เป็นพารามิเตอร์บังคับสำหรับการออกแบบ นอกจากนี้การทดลอง Unconfined Compression Test (UCS) ยังใช้ในการประเมินค่าความแข็งแรงของดินอย่างง่าย รวมไปถึงการทดสอบ Dynamic Cone Penetration test (DCP) เป็นอีกวิธีการทดสอบที่วัดความแข็งแรงของดินและสามารถประมาณค่า CBR ในสนามทางอ้อม (Du et al., 2016, Wilches et al., 2020) (Wilches, Burbano, & Sierra, 2020) (Harison, 1987) (Livneh, 1989) (George, Rao, & Shivashankar, 2009) (Consoli et al., 2016; Erzin & Turkoz, 2015; Lee, Kim, Hong, & Byun, 2019) (Carrion, Coop, & Nocilla, 2019; Lines, Williams, & Galindo - Torres, 2017) (IDOT, 2005; Sabat, 2013) (Shahien & Farouk, 2013; Stróżyk & Tankiewicz, 2014) (Ganju, Kim, Prezzi, Salgado, & Siddiki, 2016)

อย่างไรก็ตาม การทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความยากพอสมควร คือ ค่า CBR มีการทดสอบอยู่ 2 สภาพ แบบแห้ง (Unsoak) และแบบเปียก (Soak) ซึ่งใช้เวลาที่นานและพล่งกายพอสมควร และ K-value นั้นต้องใช้ความชำนาญของวิศวกรและเวลาอย่างมากรวมถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างจะสูง การทดสอบ UCS แม้จะเป็นวิธีการที่ง่ายแต่ก็ต้องใช้ความแม่นยำที่ค่อนข้าง

สูงและควบคุมได้ยากเนื่องจากดินไม่มีความดันหรือการอัดช่วยทางด้านจึงอาจทำให้การทดสอบเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ด้วยปัญหาเหล่านี้จึงมีการศึกษาหลากหลายเรื่องพยายามพัฒนาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินค้นทางที่รวดเร็วและประหยัดมากขึ้นแต่ยังคงไว้ซึ่งความแม่นยำน่าเชื่อถือ

มีการศึกษามากมายในการหาค่ากำลังของดิน (Talat & Al-Suhaibani, 1997, Salgado, R., and Yoon, S., 2003, Patel et al , 2012, Feleke & Araya, 2016, Z. U. Rehman , U. Khalid , K. Farooq , H. Mujtaba, 2017, Wilches et al., 2018) (Al-Refeai & Al-Suhaibani, 1997) (Salgado & Yoon, 2003) (Feleke & Araya, 2016) (Rehman, Khalid, Farooq, & Mujtaba, 2017) (Patel & Patel, 2013) (Patel, Patel, & Dadhich, 2013) (Rehman et al., 2017) (Taskiran, 2010) ซึ่งส่วนใหญ่เลือกใช้วิธีการทดสอบ Dynamic Cone Penetration (DCP) เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่สะดวกรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายแต่ค่าที่ได้ยังคงมีความแม่นยำที่ไม่ชัดเจนหรือไม่แน่นอน ต่อมาผู้วิจัยอีกหลายคนพัฒนาวิธีการทดลอง DCP ในการประเมินค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของชั้นดินถมค้นทางให้มีความแม่นยำมากขึ้น (Kaewhanam & Narong, 2013, Wilches et al., 2020) ในประเทศอินเดียมีการทดสอบ DCP เพื่อใช้ประเมินค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรง (Patel et al., 2013) งานวิจัยได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และค่า CBR, K-value และ UCS โดยความน่าเชื่อถือของค่าความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงแต่ยังก็ต้องใช้ความพยายามและความแม่นยำที่ค่อนข้างสูงจึงอาจส่งผลให้ความแม่นยำยังไม่เป็นที่น่าพอใจ การทดสอบดินในรัฐคุชราต (Patel & Patel, 2013) (Patel et al., 2013) (Patel & Patel, 2013) โดยการใช้พารามิเตอร์พื้นฐานอย่าง Optimum moisture content (OMC) และ Maximum Dry Density (MDD) เพื่อประเมินและทำนายค่า CBR, K-value, UCS และ DCP พบว่าค่าที่ได้จากการประเมินด้วยความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแม่นยำและน่าพอใจเป็นผลให้การดำเนินงานสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ค้นพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ระหว่าง CBR และ DCP ให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุดและสามารถดำเนินการทดสอบได้อย่างรวดเร็วและสะดวก หากสามารถนำความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินมาพัฒนาการออกแบบและก่อสร้างภายในประเทศไทยย่อมสามารถทำให้การดำเนินงานสามารถทำได้รวดเร็วและประหยัดมากยิ่งขึ้นแต่ยังคงไว้ซึ่งความถูกต้องและแม่นยำ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินภายในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีจำกัดอยู่ภายในภาคกลางและบางส่วนของประเทศไทย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลของดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยยังคงมีจำนวนค่อนข้างน้อย พื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่ด้วยดินตะกอนหรือดินทรายปนดินตะกอน แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินที่เผยแพร่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังคงมีเพียงบางพื้นที่เท่านั้น เช่น การศึกษาคุณสมบัติของดินภายในพื้นที่

จังหวัดขอนแก่น (Prommin & Nuntasarn, 2019, Arjwech & Sriwangpon, 2019, Chindaprasirt et al., 2020) (Chindraprasirt, Kampala, Arngbunta, & Horpibulsuk, 2020) พบว่ามีลักษณะเป็นดินทรายปนทราย มีการยุบตัวอย่างรุนแรง สารยึดเกาะระหว่างอนุภาคทรายคือ ดินเนื้อละเอียด (ดินตะกอนและดินเหนียว) การวิจัยพบว่าดินจากจังหวัดขอนแก่นมีคุณสมบัติความแข็งแรงที่ดี แต่ด้วยข้อมูลที่ยังไม่ครอบคลุมมากนัก นักวิจัยหลายคนจึงมีความพยายามในการศึกษาและสร้างพารามิเตอร์ของดินที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้นและง่ายต่อการอ้างอิง การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินใน 19 จังหวัดทั่วภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อย่างน้อย 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละจังหวัด (Kaewhanam et al., 2014.) (Kaewhanam et al., 2014) การจำแนกดินพบว่าดินเป็นดินปนทราย ดินส่วนใหญ่เป็น SM และดินบางชนิดคือ SM-SC หรือ SC ในระบบการจำแนกดิน USCS สำหรับระบบ AASHTO ดินส่วนใหญ่เป็น A-2-4(0) มีเพียงดินในจังหวัดมุกดาหารคือ A-2-6(0) และมีเพียงดินในจังหวัดอุบลราชธานีเท่านั้นคือ A-3(0) พารามิเตอร์ของดินดังกล่าวยืนยันว่าดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยไม่ใช่ดินเหนียวและทราย ควรสังเกตว่าสีของดินไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของดิน แต่ข้อมูลดินที่ได้จากการศึกษานี้เป็นเพียงคุณสมบัติพื้นฐานเท่านั้น

ดังนั้นการศึกษานี้ดำเนินการเพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงของดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์คือ CBR และ DCP เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงของดินเพื่อความเร็วและแม่นยำในการประเมินคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นดินถมคันทางของถนนภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.ศึกษาค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยวิธีการทดสอบ คือ การทดสอบ CBR และ DCP
- 2.ประเมินความสัมพันธ์และปรับปรุงหรือสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดิน คือ CBR และ DCP ที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.พื้นที่ในการศึกษาและเก็บตัวอย่างดินครอบคลุมพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนกลางของประเทศไทย

2. ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อประเมินและประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล 3 งานวิจัย

3. การทดลองเพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินทั้งการทดสอบ CBR และ DCP

3. จำนวนตัวอย่างของดินแบ่งโซนออกเป็น 3 พื้นที่ คือ ตัวอย่างดินจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนกลางจำนวน 5 จังหวัด คือ มหาสารคาม ขอนแก่น ชัยภูมิ ร้อยเอ็ดและกาฬสินธุ์ จังหวัดละ 3 อำเภอ แต่ละอำเภอทำการทดสอบวัสดุดินอย่างน้อย 1 หลุม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยวิธีการทดสอบ CBR และ DCP

2. ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินคือ CBR และ DCP ที่เหมาะสม



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกคือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้ คือ การออกแบบโครงสร้างของถนนทั้งแบบอ่อนตัว (Flexible Pavement) และแบบแข็งตัว (Rigid Pavement) การจำแนกดิน การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test) การทดสอบ California Bearing Ratio and Swelling test เพื่อสามารถทราบค่า %CBR และการทดสอบ Dynamic Cone Penetration เพื่อหาจำนวนครั้งในการตอก (N) นอกจากนี้ยังมีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและประเมินความสัมพันธ์ต่างๆ สำหรับเนื้อหาส่วนที่สองคือเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น งานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบต่างๆ งานวิจัยด้านดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นต้น

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบถนน

แนวคิดมูลฐานของการสร้างถนน, ที่จอดรถ, สนามบิน สำหรับทุกฤดูกาล คือ การเตรียมพื้นฐานทาง (Subgrade) ที่เหมาะสม มีการระบายน้ำ ที่จำเป็นและก่อสร้างโครงสร้างถนน (Pavement Structure) ให้มี

1. ความหนาและความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกของการจราจร (Traffic load)
2. ป้องกันการไหลซึมและการสะสมความชื้นภายในโครงสร้างถนน
3. มีผิวชั้นบนที่เรียบ, ต้านทานการลื่นไถล (Skidding Resistant), การสึกหรอ (Wearing Resistant), การบิดเบี้ยว (Distortion Resistant) และการเสื่อมคุณสมบัติจาก ลม ฟ้าอากาศและเคมีภัณฑ์ (Deterioration)

ถนนเมื่อแบ่งตามลักษณะผิวจราจรแบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. แบบยืดหยุ่นหรืออ่อนตัว (Flexible Pavement) ได้แก่ ถนนลูกรัง, ถนนลาดยาง

2. แบบกระด้าง (Rigid Pavement) ได้แก่ ถนนคอนกรีต

โครงสร้างถนนลาดยาง (Flexible Pavement Structure) หมายถึงส่วนของโครงสร้างทั้งหมดเหนือชั้นพื้นฐานทางขึ้นมา (Subgrade) โครงสร้างนี้ประกอบไปด้วยชั้นต่างๆ ดังนี้

1. ชั้นผิวทาง (ชั้นบนสุด) (Pavement หรือ Surface Course หรือ Wearing Course) เป็นชั้นที่รับการจราจรของยานโดยตรงมีความต้านทานต่อการบิด (Distortion) มีผิวหน้าเรียบสำหรับการขับชีกันน้ำได้ (Waterproof) มีความลาดเอียงแนวขวางเพื่อระบายน้ำเพื่อป้องกันความชื้นไม่ให้กัดเซาะโครงสร้างถนนและพื้นฐานทางมีความต้านทานการสึกหรอจากการจราจร (Traffic wearing) ด้านทานการลื่นไถลและมีการยึดเหนี่ยวที่ดีกับชั้นที่อยู่ข้างใต้ สำหรับชื่อเรียกเป็นภาษาอังกฤษนั้นใช้ได้ทั้งสามคำที่เห็น แต่จะเรียกว่าเป็น Surface Course ได้ในกรณีที่ชั้นนี้มีความหนาดำกว่า 3" หรือ 7.5 ซม. (บางตำรานิยมใช้ (Wearing Course) ถ้าชั้นนี้หนากว่า 3" แล้ว จะต้องทำการก่อสร้างเป็นชั้นๆ และแต่ละชั้นจะมีชื่อเรียกต่างกันไปดังนี้

1.1 ชั้นบนสุด เรียกว่า Surface Course หรือ Wearing Course

1.2 ชั้นรองลงมา เรียกว่า Binder Course

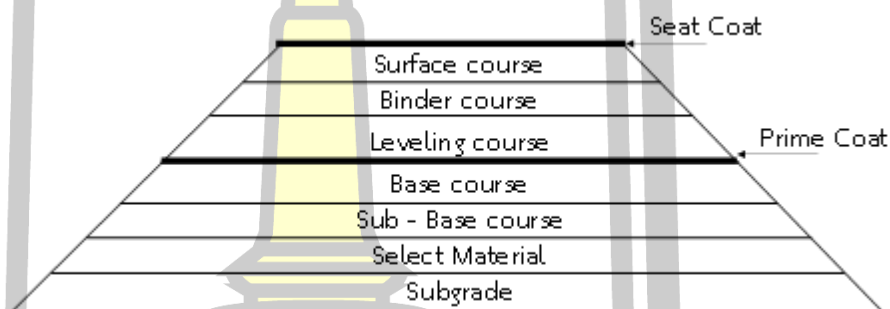
1.3 ชั้นใต้สุด (ถ้ามี) เรียกว่า Leveling Course

2. ชั้นราก (Base Course) เป็นชั้นที่อยู่ข้างใต้ผิวทาง วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเม็ด (Granular Material) ที่มีความแข็งแรงสูง จุดประสงค์การก่อสร้างก็เพื่อ "กระจายน้ำหนัก" จากล้อลงไปยังชั้นรองราก (Sub-base Course) หรือชั้นพื้นฐานทาง (Subgrade) วัสดุที่ใช้ก่อสร้างต้องมีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80 % การบดทับต้องให้ได้ 100 % ของการออกแบบ Modified AASHO โดยบดทับเป็นชั้นๆ ชั้นละไม่น้อยกว่า 4" เมื่อก่อสร้างเสร็จจะต้องมีความแน่นและความมั่นคงสูงตามที่ออกแบบไว้

3. ชั้นรองราก (Subbase Course) เป็นชั้นที่รองอยู่ใต้ชั้นราก จะทำการก่อสร้างชั้นนี้ก็ต่อเมื่อพื้นฐานทาง (Subgrade) ในบริเวณนั้นอ่อนมาก จำเป็นต้องเพิ่มความหนาของถนน ซึ่งทำได้โดยใช้วัสดุจากแหล่งใกล้เคียงที่หาง่ายและราคาถูก คุณสมบัติดีกว่าวัสดุที่ใช้ในชั้นราก คือมี CBR 20-50 แต่ความแข็งแรงของโครงสร้างถนนเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความหนาในบางครั้งเมื่อแหล่งวัสดุอยู่ใกล้ เราสามารถประหยัดวัสดุราคาแพงที่ใช้ในชั้นรากได้โดยเพิ่มความหนาของชั้นรองรากแล้วลดความหนาของชั้นรากลงได้วัสดุทั่วไปที่ใช้ ได้แก่ ดินลูกรัง,ทราย

4. ชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Material) เป็นชั้นที่อยู่ใต้สุดของโครงสร้างถนน วัสดุที่ใช้มี CBR ต่ำกว่า 20 จุดประสงค์ของการก่อสร้างก็เพื่อช่วยเพิ่มความหนาของ โครงสร้างถนนให้สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้อย่างประหยัดขึ้น

5. ชั้นพื้นฐานทาง (Subgrade) เป็นชั้นดินเดิมที่รองรับโครงสร้างของถนนทั้งหมดไว้ เป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบถนน คือ ต้องออกแบบให้ถนนมีโครงสร้างหนาพอที่จะกระจายน้ำหนักลงบนชั้นนี้ได้ต่ำกว่าความสามารถ การรับน้ำหนักของชั้นพื้นฐานทาง ในการก่อสร้างต้องมีการถากถางและถอนตอ (Clearing and Grubbing) เอาวัสดุที่ไม่ต้องการเช่น รากไม้ออก แล้วรื้อไถชั้นดินลงไปอีก 15-20 ซม. เพื่ออัดทับให้แน่น แล้วจึงเริ่ม การก่อสร้างโครงสร้างถนนต่อไป



ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของถนน

ชั้น Subgrade มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากทำหน้าที่รองรับน้ำหนักทั้งหมดจากชั้นผิวทางและชั้นวัสดุรองที่อยู่เหนือนั้น ชั้นนี้ช่วยกระจายน้ำหนักที่มาจากการจราจรไปยังชั้นดินด้านล่าง ซึ่งช่วยลดแรงกดทับที่มีผลต่อดินใต้ชั้น Subgrade ทำให้โครงสร้างทั้งหมดมีความเสถียรและปลอดภัยมากขึ้น

นอกจากนี้ ชั้น Subgrade ยังมีบทบาทสำคัญในการป้องกันการทรุดตัวของถนน หรือทางวิ่ง หากชั้นนี้ไม่แข็งแรงเพียงพอ อาจทำให้เกิดการเสียรูป ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ถนน การรักษาคุณสมบัติของ Subgrade จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง อีกทั้งชั้น Subgrade ยังช่วยในการระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งลดความเสี่ยงของน้ำสะสมที่อาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง การระบายน้ำที่ดีช่วยป้องกันการกัดเซาะและการทำลายโครงสร้างถนน การออกแบบและสร้างชั้น Subgrade ที่

แข็งแรงและมีคุณสมบัติดีจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในระยะยาว เพราะจะมีความเสี่ยงน้อยที่จะเกิดปัญหา เช่น การทรุดตัวหรือการแตกร้าวที่ต้องการการซ่อมแซมบ่อยครั้ง

นอกจากนั้นชั้น Subgrade ยังสามารถสนับสนุนโครงสร้างอื่นๆ เช่น ถนนขนาดใหญ่, สะพาน, หรือรันเวย์ในสนามบิน ซึ่งต้องการพื้นฐานที่มั่นคงในการรองรับการใช้งาน ดังนั้น ความสำคัญของชั้น Subgrade จึงไม่สามารถมองข้ามได้ เนื่องจากมีผลกระทบต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพของโครงสร้างถนนหรือทางวิ่งโดยรวม

2.1.2 การจำแนกดิน

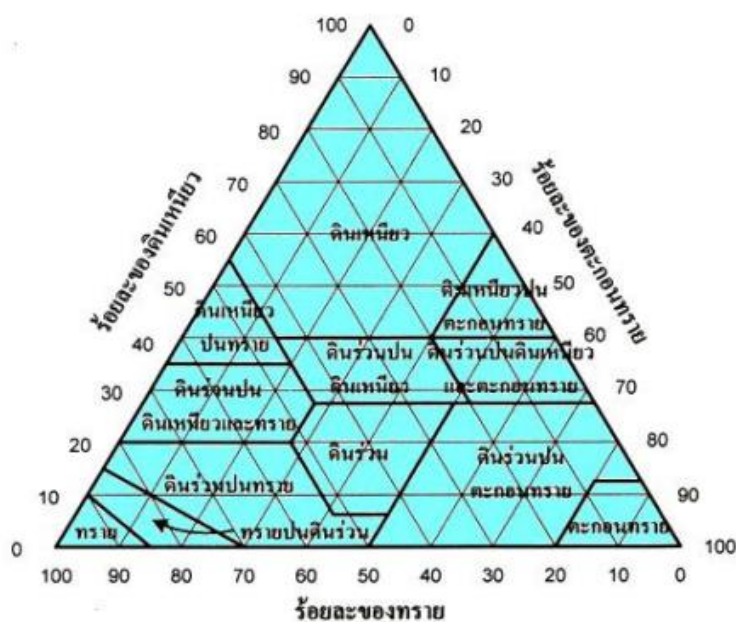
การจำแนกขนาดของดินตามขนาดของเม็ดดินนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นดินเม็ดหยาบ เช่น หิน กรวด ทราย เป็นต้น และดินเม็ดละเอียด เช่น ตะกอนทราย ดินเหนียว วัสดุแขวนลอย เป็นต้น สำหรับ ดินเม็ดหยาบจะหาขนาดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Analysis) ส่วนดินพวกเม็ดละเอียดหาขนาดโดยวิธีวัดอัตราการตกตะกอนในน้ำ (Hydrometer test)

ระบบการจำแนกประเภทของดินมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่นำไปใช้การ จำแนกประเภทของดินที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน มี 3 วิธี ดังนี้

1. แผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกประเภทดิน (Triangular Soil Classification Chart) วิธีนี้จำแนกโดยอาศัยขนาดของเม็ดดินเป็นเกณฑ์เหมาะสำหรับดินกรวดหรือทรายจากตารางจะพบว่าไม่ได้ พิจารณาค่าขีดความเหลว ขีดความเหนียว และดัชนีสภาพพลาสติก การจำแนกประเภทของดินตามขนาดของเม็ดดินที่ง่ายที่สุดสามารถทำได้โดยอาศัยรูปสามเหลี่ยม

ดัง รูปที่ 2.10

พูน ปณ จิโต ชเว



ภาพประกอบ 2.2 แผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกประเภทดิน

ที่มา (มานิต ช่วยงาน, 2552)

2. ระบบ Unified Soil Classification (USCS) ระบบนี้นิยมมากในงานวิศวกรรมฐานราก ซึ่งนอกจากจะพิจารณามวลละของดินแล้ว ยังได้นำค่าขีดความเหลว ขีดความเหนียวและดัชนีสภาพพลาสติกของมวลดินมาเป็น เกณฑ์ในการเรียกชื่อโดยใช้ตัวภาษาอังกฤษแทน เช่น G คือกรวด, S คือทราย, M คือ ดินตะกอน และ C คือดินเหนียว และเขียน 2 ตัวแทนชนิดของดินได้ GM หมายถึงกรวดปนดินตะกอน GC หมายถึง กรวดปนดินเหนียว การจำแนกประเภทของดินโดยระบบ Unified นี้เป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายมากกว่าวิธีอื่น เพราะเหมาะกับงานวิศวกรรมทั่วไป เช่น งานถมดินและงานฐานราก เป็นต้น

พูน ปณ จิต ชีเว

Major Divisions	Group Symbols	Typical Names	Laboratory Classification Criteria
Coarse-grained soils (More than half of material is larger than No. 200 sieve size)	Gravels (More than half of coarse fraction is larger than No. 4 sieve size)	GW	Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
		GP	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines
	Gravels with fines (Appreciable amount of fines)	GM ^a	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures
		GC	Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures
	Sands (More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size)	SW	Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines
		SP	Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines
	Sands with fines (Appreciable amount of fines)	SM ^a	Silty sands, sand-silt mixtures
		SC	Clayey sands, sand-clay mixtures
	Determine percentages of sand and gravel from grain-size curve. Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size), coarse-grained soils are classified as follows: Less than 5 per cent More than 12 per cent 5 to 12 per cent		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for GW Atterberg limits below "A" line or P.I. less than 4 Atterberg limits below "A" line with P.I. greater than 7 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 6; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3 Not meeting all gradation requirements for SW Atterberg limits above "A" line or P.I. less than 4 Atterberg limits above "A" line with P.I. greater than 7
	GW, GP, SW, SP GM, GC, SM, SC Borderline cases requiring dual symbols ^b		
Fine-grained soils (More than half material is smaller than No. 200 sieve)	Silt and clays (Liquid limit less than 50)	ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands, or clayey silts with slight plasticity
		CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays
		OL	Organic silts and organic silty clays of low plasticity
	Silt and clays (Liquid limit greater than 50)	MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts
		CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays
		OH	Organic clays of medium to high plasticity, organic silts
	Highly organic soils	Pt	Peat and other highly organic soils
Division of GM and SM groups into subdivisions of d and u are for roads and airfields only. Subdivision is based on Atterberg limits; suffix d used when L.L. is 28 or less and the P.I. is 6 or less; the suffix u used when L.L. is greater than 28. ^b Borderline classifications, used for soils possessing characteristics of two groups, are designated by combinations of group symbols. For example: GW-GC, well-graded gravel-sand mixture with clay binder.			

ภาพประกอบ 2.3 การจำแนกดินระบบ Unified Soil Classification (USCS)

ที่มา (<http://www.gerd.eng.ku.ac.th>)

3. ระบบ AASHTO (Classification) การจำแนกดินระบบ AASHTO นิยมใช้ในงานวิศวกรรมทาง โดยแบ่งดินเป็นกลุ่มใหญ่ 7 กลุ่ม ใช้สัญลักษณ์ A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 และ A-7 สำหรับดิน A-1, A-2, A-3 เป็นดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกิน 30% จัดเป็นดินมวลหยาบ ส่วนดินกลุ่ม A-4, A-5, A-6 และ A-7 เป็นดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 35% จัดเป็นพวกดินมวลละเอียด คือ ดินตะกอนปนดินเหนียว

General classification	Granular Materials							Silt-Clay Materials			
	(35% or Less Passing No.200)							More than 35% Passing No.200)			
Group classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Sieve analysis,percent passing:											A-7-6
No.10	50 max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No.40	30 max	50 max	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
No.200	15 max	25 max	10 min	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Charateristics of fraction passing No.40:											
Liquid limit		-	-	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity index		6 max	N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments, gravel and sand		Fine sand	Silty or clay gravel and sand				Silty siols		Clayey soils	
General rating as subgrade	Excellent to good							Fair to poor			

ภาพประกอบ 2.4 การจำแนกดินระบบ AASHTO (Classification)

ที่มา (<http://www.gerd.eng.ku.ac.th>)

2.1.3 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test)

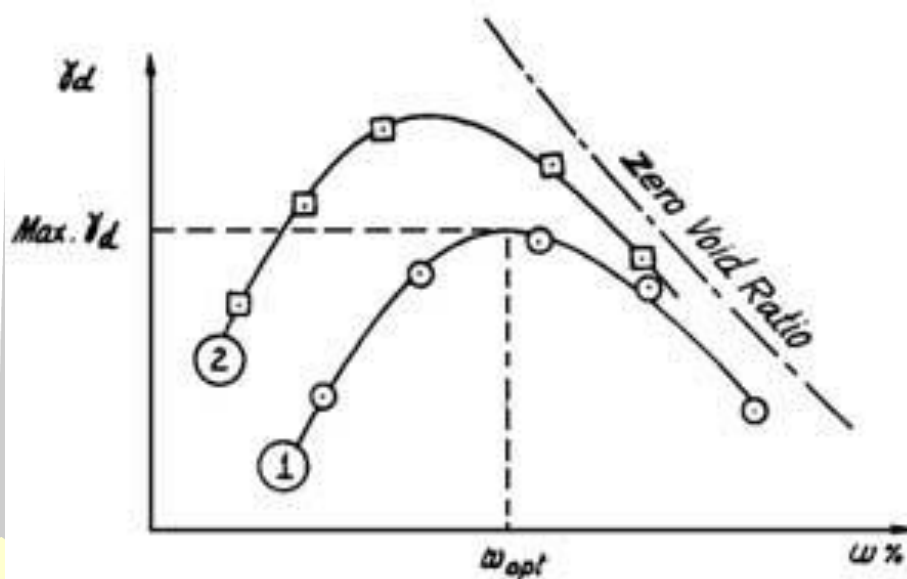
วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้ามีน้ำอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเปียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบัน ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test)

Test	Mold size	Wt. Of hammer (lb.)	No. of layer	height of drop (in)	No. of blow per layer	energy / vol. ft – lb/ft ³
Standard Proctor	Ø 4.0" x 4.6"	5.5	3	12	25	12,400
Modified Proctor	Ø 6.0" x 5.0"	5.5	3	12	56	12,400
Standard Proctor	Ø 6.0" x 5.0"	10	5	18	56	56,000
Modified Proctor	Ø 4.0" x 4.6"	10	5	18	25	56,300

ภาพประกอบ 2.5 ตารางการเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบ

Standard Proctor และ Modified Proctor

ที่มา (<http://www.gerd.eng.ku.ac.th>)



ภาพประกอบ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density และเปอร์เซ็นต์ความชื้น (% Water Content)

ที่มา (<http://www.gerd.eng.ku.ac.th>)

ในการทำการบดอัดในห้องทดลองซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาผึ่งให้แห้ง แล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาณที่พอเหมาะแล้วเริ่มทำการบดอัดใน Mold (แบบที่ใช้บดอัด)

โดยวิธีการที่จะพูดถึงรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นใน ครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อย ๆ อย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัด แต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินกับความชื้น จะปรากฏเป็น เส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า “ความหนาแน่นสูงสุด” (Maximum Dry Density) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า “ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด” (Optimum Water Content)

2.1.4 การทดสอบ California Bearing Ratio and Swelling test

CBR test เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือน (Shearing resistance) ของดินที่บดอัด จนแน่นดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ Optimum moisture content) โดยการใช้ท่อนเหล็ก กลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาทีแล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตรฐานที่ได้จากการ ทดลองกด Piston ขนาดเดียวกันนี้บนหินที่ compact แน่นที่ความลึกของ penetration เท่ากัน ค่าที่ได้นี้เรียกว่า เปอร์เซ็นต์ CBR” เทียบอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Standard Unit load เขียนเป็นสมการของอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\% \text{ CBR} = (\text{Test Unit Load} / \text{Standard Unit load}) \times 100 \quad (2.4)$$

ค่า Standard unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) มี พื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว บนหินคลุกมาตรฐานบดอัดแน่นขนาดต่างๆ กันหลายขนาดมีค่า มาตรฐานดังตารางที่ 2.1





ภาพประกอบ 2.7 การทดสอบ California Bearing Ratio Test (CBR)

ที่มา (<https://www.denichsoiltest.com>)



ภาพประกอบ 2.8 การทดสอบ California Bearing Ratio Test (CBR)

ขณะทำการกดตัวอย่างทดสอบ

ที่มา (<https://www.denichsoiltest.com>)

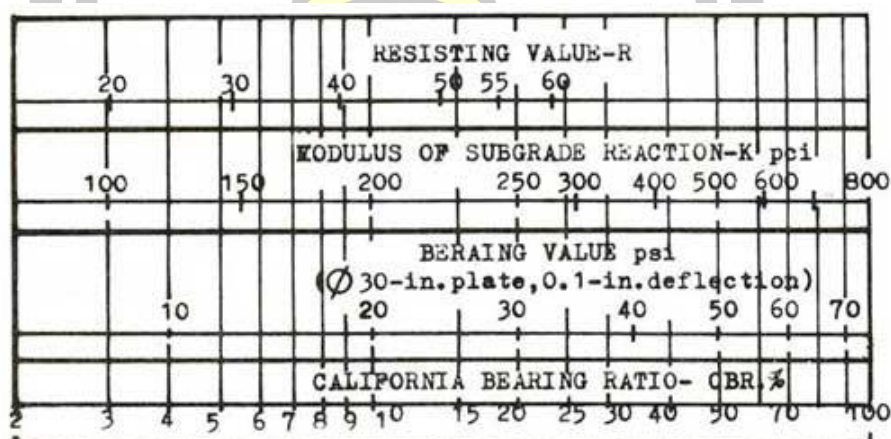
ตาราง 2.1 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่างๆ

Penetration (in)	Unit Load (Psi)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300

ที่มา (มานิต ช่างงาน, 2552 .)

ค่าร้อยละซีบีอาร์โดยทั่วไปแล้ว จะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าวผล ปรากฏออกมาว่าร้อยละซีบีอาร์ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่าที่ความลึก 0.1 นิ้ว การทดลองควรจะต้องกระทำซ้ำอีกครั้ง ซึ่งถ้าค่าร้อยละซีบีอาร์ที่ได้มายังเป็นไปในรูปเดิม ก็ให้ใช้ค่าร้อยละซีบีอาร์ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

ค่าร้อยละซีบีอาร์นำมาใช้ประโยชน์ในการออกแบบความหนาของถนนลาดยาง (flexible pavement) โดยการกำหนดความหนาจาก design charts หรืออาจใช้ช่วยในการกำหนดค่า Subgrade Modulus (K) ของดินจากตารางเปรียบเทียบเพื่อช่วยในการออกแบบถนนคอนกรีตได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR, K, R และ Bearing Value

ที่มา (รศ.จิรพัฒน์ โชติโกกร, 2555.)

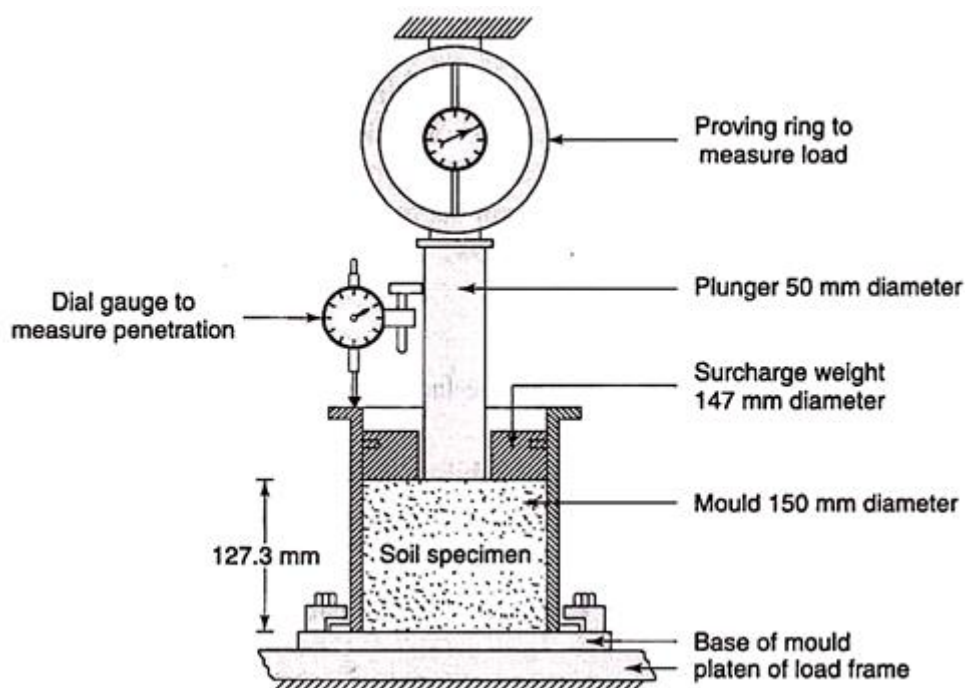
จากค่าร้อยละซีบีอาร์ของดินแต่ละชนิดยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินอย่างคร่าวๆ ว่าเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างถนนในชั้นดินถม ชั้นรองพื้นทาง (subbase) หรือชั้นพื้นทาง (base) ดังตาราง 2.2 ข้างล่างนี้

ตาราง 2.2 ความสัมพันธ์ของร้อยละซีบีอาร์และการใช้งาน

%CBR	ความเหมาะสมทางวิศวกรรม	การใช้งาน
0-3	Very Poor	Subgrade
3-7	Poor to Fair	Subgrade
7-20	Fair	Subbase
20-50	Good	Subbase, Base
50-80	Very	Good Base
>80	Excellent	Base

ที่มา (มานิต ช่างงาน, 2552)

การทดสอบซีบีอาร์ทำได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม จากตัวอย่างดินที่บดอัดแน่นตามวิธีการของ Standard หรือ Modified Proctor ดินตัวอย่างที่เตรียมสำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องเตรียมขึ้น 2 ชุด ชุดหนึ่งใช้ทดสอบหาค่า Penetration ทันทีหลังจากเตรียมตัวอย่างเสร็จอีกชุดหนึ่งจะต้องแช่น้ำไว้ 96 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอมน้ำจนอิ่มตัว และเพื่อจุดประสงค์จะวัดหาอัตราความตัวของดินด้วย ในระหว่างที่ทำการแช่น้ำอยู่จะต้องมีน้ำหนักวางกดทับบนดินตัวอย่าง (Surcharge) ไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์ หรือเท่ากับน้ำหนักของพื้นทางและผิวจราจร เหตุผลที่ทำเช่นนี้ก็เพื่อจะหาค่าซีบีอาร์ที่ควรเกิดขึ้นจริง ๆ ในสนาม กล่าวคือ ในหน้าฝนระดับน้ำใต้ดินจะสูงจนทำให้ดินที่รองรับถนนอยู่อิ่มตัวและอัตราการบวมตัวของดินที่จะมาใช้ในการก่อสร้างจะเป็นค่าหนึ่งซึ่งสามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติและความเหมาะสมในการใช้งานของวัสดุนั้น



ภาพประกอบ 2.10 ภาพจำลองการทดสอบ California Bearing Ratio and Swelling test
(CBR test)

ที่มา (สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ, 2549)



ภาพประกอบ 2.11 การทดสอบ California Bearing Ratio and Swelling test ในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์สำหรับทดสอบมีดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 2.12 Compaction Hammer



ภาพประกอบ 2.13 แบบหล่อบดอัดตัวอย่างดิน (CBR Mold)



ภาพประกอบ 2.14 Spacer disc



ภาพประกอบ 2.15 Surcharge (Slotte Weight and Circular Weight)



ภาพประกอบ 2.16 สามขาวัดการบวมตัว (Tripod)



ภาพประกอบ 2.17 แผ่นวัดการบวมตัว (Swell Plate)

ที่มา (www.nanasupplier.com)



ภาพประกอบ 2.18 เกจวัดการบวมตัว (Dial Indicator)

ที่มา (www.rancadee.com)



ภาพประกอบ 2.19 C.B.R. Testing Machine

การเตรียมตัวอย่างดินสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. ดินตัวอย่าง ก่อนจะนำมาทดลองจะต้องปล่อยให้แห้งในห้องปฏิบัติการ (air dry) แบ่งดินออกเป็นกองตามวิธี Quartering แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/4" ให้ทิ้งไปและชดเชยด้วยดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4" แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ด้วยจำนวนน้ำหนักเท่ากัน

2. หาจุด Optimum moisture content โดยวิธี Modified Proctor method

สำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ต้องมีการแช่น้ำ (Unsoaked CBR Test) มีวิธีการดังนี้

1. ชั่งดินที่เตรียมไว้ประมาณ 12 ปอนด์ หรือ 6 กก. และนำดินตัวอย่างประมาณ 100 กรัม เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (initial water content) ที่มีอยู่ในดินตัวอย่าง
2. เตรียม mold ไว้ 2 ชุด ชั่งหาน้ำหนัก mold (เฉพาะ mold ไม่รวม base plate)
3. ประกอบ mold เข้ากับ base plate และ spacer (ขนาด $\varnothing 6" \times 2"$) ใช้กระดาษกรอง $\varnothing 6"$ ปูทับบน spacer เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดกับแผ่นเหล็ก
4. กระทุ้งดินอัดแน่นใน mold ตามวิธี compaction test ASTM D 1557 optimum moisture content $\pm 2\%$
5. หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้นและจำนวนครั้งแล้วถอด collar ออก ใช้ไม้บรรทัดเหล็ก (Straight edge) ปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบ mold พร้อมกับซ่อมแซมผิวบนของดินตัวอย่างให้เรียบเสมอกับปาก mold
6. ถอด base plate และ spacer disc ออก นำ mold และดินไปชั่งหาน้ำหนัก เพื่อจะนำไปหา wet density
7. เอากระดาษกรองวางบน base plate เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดแผ่นเหล็ก ประกอบ mold ที่มีดินอัดแน่นนี้เข้ากับ base plate โดยให้ปาก mold ด้านที่มีดินเสมopakวางบน base plate และส่วนที่มีช่องว่าง 2.5 นิ้วอยู่ด้านบน
8. วางแผ่นเหล็ก surcharge อย่างน้อย 10 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใน mold
9. จัดวาง mold พร้อมดินตัวอย่างเข้าเครื่องกดทดลองซึ่งมี piston ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตร.นิ้ว ประกอบติดอยู่ จัดให้ผิวหน้าของดินใน mold แตะสัมผัสกับ piston ดังกล่าว จัดเข็ม dial gauge ที่จะใช้วัด penetration ให้อยู่ที่จุดศูนย์
10. จัดการ Load ในอัตรา 0.05 นิ้วต่ออนาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับ

penetration 0, 0.025, 0.050, 0.750, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400 และ 0.500 นิ้ว

11. เสริมแล้วถอด mold ออกจากเครื่องกดทดลองเก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม (fined grained soil) หรือประมาณ 500 กรัม (coarse grained soil) นำไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (water content)

สำหรับตัวอย่างดินที่มีการแช่น้ำ (Soaked sample) ทำข้อ 12 – 18 เพิ่มเติม

12. วางแผ่นเหล็ก surcharge หน้า 10 ปอนด์ ลงบนดินตัวอย่างใส่ swell plate สำหรับวัดอัตราการบวมของดิน ซึ่งมีด้านชั้นเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลาง plate ก่อนวางแผ่นเหล็ก surcharge ลงบนดินตัวอย่างจะต้องเอากระดาษรองวางคั่นใต้แผ่น surcharge เสียก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว

13. แช่ mold ที่เตรียมไว้ในข้อ 12 นี้ ในภาชนะที่เตรียมไว้ให้น้ำท่วม surcharge ประมาณ 1 นิ้ว ใช้ dial gauge อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับ tripod แล้ววางบนปาก mold จัดให้ปลายของ dial gaugeแตะสัมผัสกับก้าน swelling plate เพื่อวัดค่าการบวมตัวของดินต่อไป

14. แช่ดินตัวอย่างไว้ประมาณ 4 วัน จดค่าการบวมตัวจาก dial gauge ทุกวันจนครบ 4 วัน (ถ้าหากค่าการบวมตัวคงที่อาจจะหยุดอ่านได้หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)

15. หลังจากแช่ครบ 4 วันแล้วยก mold ออกจากน้ำและวางตะแคง mold เพื่อรินน้ำทิ้ง และปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้ น้ำไหลออกจาก mold จนหมด

16. นำ mold พร้อมดินไปชั่งหาน้ำหนัก

17. ทำการทดลองตามวิธีข้อ 9 – ข้อ 10

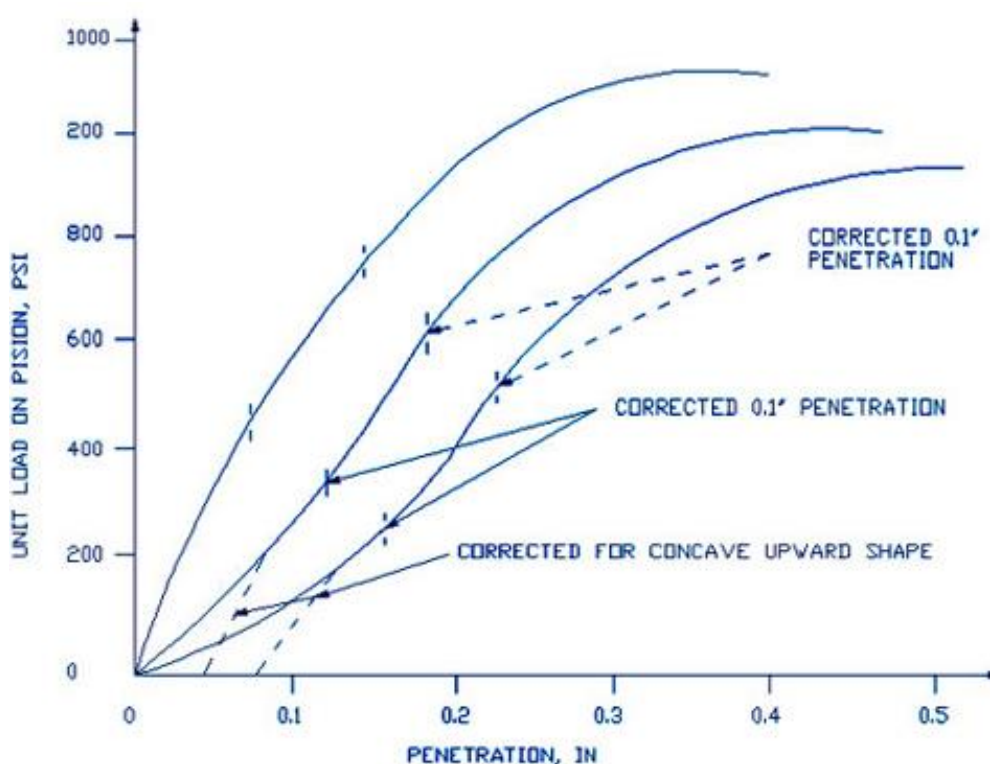
18. เก็บดินตัวอย่างจาก soaked sample ไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ในการคำนวณสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. คำนวณหาค่าแรงกดโดยสมการ;

$$\text{Test Unit Load} = \text{Penetration Load} / 3 \text{ Psi} \quad (2.5)$$

2. เขียนกราฟระหว่าง Test unit load ในแกนตั้งกับ penetration ในแกนนอน จากค่าที่ได้ทั้ง Unsoaked และ Soaked sample ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน โดยปกติแล้วจะได้รูป curve โค้งคว่ำผ่านจุด origin แต่บางครั้งอาจจะปรากฏว่า curve ที่ได้มีลักษณะโค้งหงายในช่วงแรก ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการแก้ไขให้ได้ค่าที่ถูกต้องด้วยการลากเส้นตรงให้สัมผัสกับ curve ตรงส่วนที่มี slope สูงที่สุด ไปตัดกับแกนนอนที่จุดนั้นเป็น origin ใหม่และ origin ใหม่จะต้องอยู่ทางด้านขวาของ origin เดิมเสมอ เรียกว่า “Initial Correction”



ภาพประกอบ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดและระยะจม
ที่มา (มานิต ช่วยงาน, 2552)

3. อ่านค่า test unit load จากกราฟที่ 0.1 และ 0.2 นิ้ว จากกราฟ และคำนวณหา ค่า %CBR จากสมการที่ 2.1 โดยค่า standard unit load ใช้ค่าจากตารางที่ 2.1
4. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นและ dry density ของดินตัวอย่างทั้งสอง
5. ถ้า % CBR ที่ 0.2 “มีค่ามากกว่า % CBR ที่ 0.1 ให้ทำการทดสอบอีกครั้ง ถ้าผล ยังเหมือนเดิมให้ใช้ % CBR ที่ 0.2”

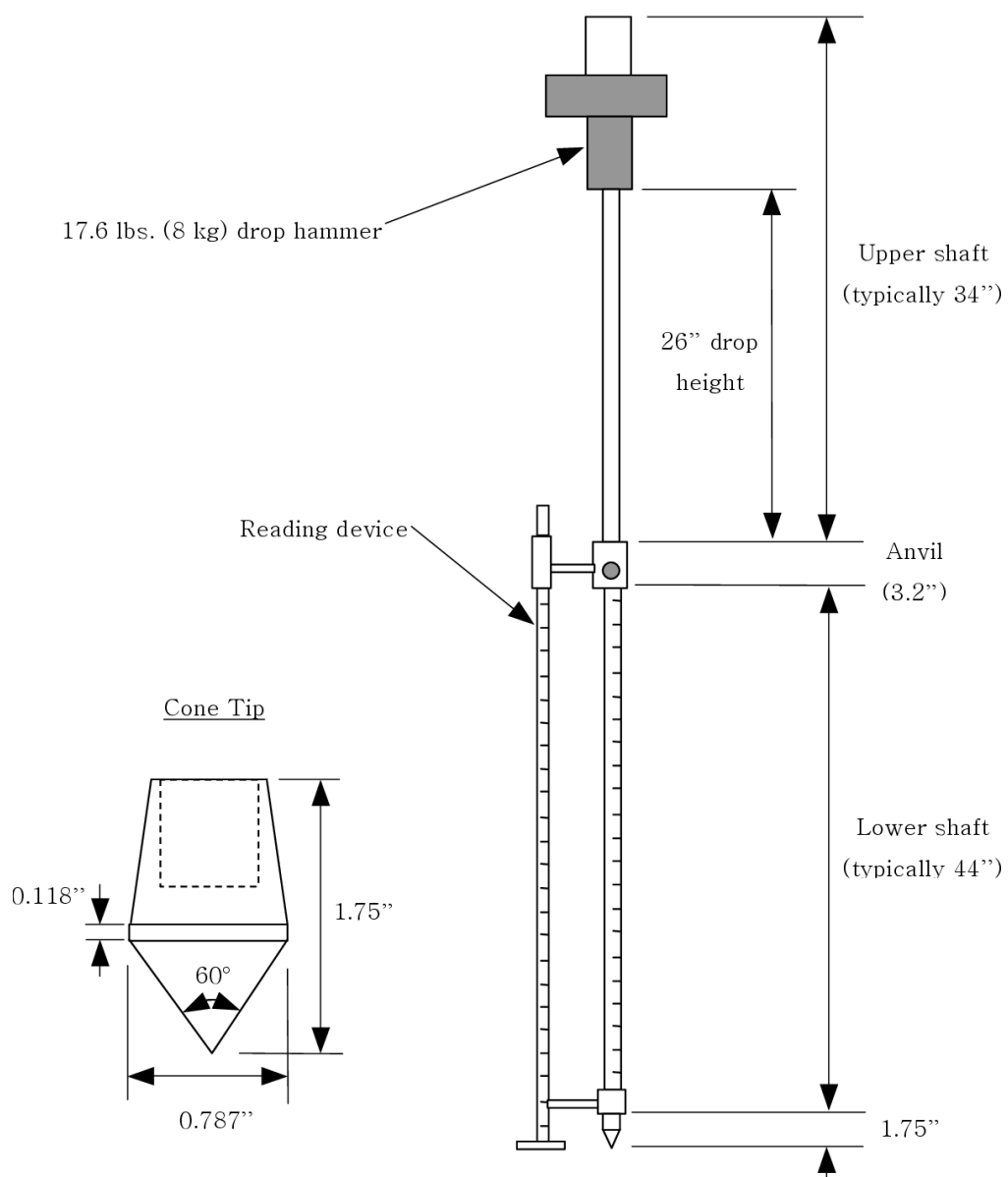
2.1.5 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration test

การทดสอบ DCP เป็นการวัดค่าความต้านทานต่อการจมของหัวเจาะรูปกรวย เรียกว่าค่า DCPI มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อครั้ง (mm/blow) ทดสอบโดยการปล่อยตุ้ม น้ำหนักขนาด 8 kg. ลงก้านเจาะโดยมีหัวเจาะรูปกรวยเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm. องศาของ กรวย 60 องศา ต่ออยู่กับปลายก้านเจาะและบันทึกระยะที่หัวเจาะรูปกรวยจมลงชั้นดิน ผลที่ ได้สามารถประมาณค่า CBR ในสนาม

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้เรียกว่า Dynamic Cone Penetrometer เป็น อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาความแข็งแรงของดินหรือโครงสร้างชั้นทาง ส่วนใหญ่จะเป็น วัสดุสแตนเลส ยกเว้นส่วนหัวกรวยที่เป็นเหล็กหรือวัสดุที่ต้านทานการสึกกร่อน ซึ่งมี ส่วนประกอบดังนี้

- 1.แท่งตอก (Drive Rod) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร
- 2.หัวกรวย (Point Tip) หัวกรวย 60 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานกรวย 20 มิลลิเมตร
- 3.ตุ้มน้ำหนักขนาด 8 กิโลกรัม ระยะยก 575 มิลลิเมตร
- 4.ข้อต่อ (Coupler Assembly)
- 5.ที่จับ (Handle)





ภาพประกอบ 2.21 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test
ที่มา (<https://www.semanticscholar.org>)



ภาพประกอบ 2.22 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test
ที่มา (<https://pavementinteractive.org>)



ภาพประกอบ 2.23 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test บนถนนสายหนึ่ง
ที่มา (<http://westcoastroadtesting.com>)

วิธีการทดสอบ Dynamic Cone Penetration test สามารถกระทำได้โดยให้ถือเครื่องมือ DCP ในแนวตั้ง ยกตุ้มน้ำหนักขึ้นจนถึงระดับ Handle แต่ไม่ให้ลูกตุ้มกระทบ จากนั้นปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงอย่างอิสระกระทบกับข้อต่อให้หัวกรวยจมลงไป โดยทั่วไป ความลึกที่ทดสอบจะมีระยะไม่เกิน 900 มิลลิเมตร บันทึกระยะจมและจำนวนครั้งในการตอก (Number of Blow)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ CBR, PBT, DCP และ UCS ในการประเมินค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Talat Al-Refeai, A. Al-Suhaibani (1996) เป็นกลุ่มนักวิจัยแรกๆที่ประยุกต์ใช้การทดสอบ DCP ในการประเมินค่าและทำนายค่า CBR ได้โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\text{Log (CBR)} = 2.494 - 1.0672 (\text{Log D}) \quad (2.10)$$

Rodrigo Salgado and Sungmin Yoon (2003) ทำการทดสอบภาคสนาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์ของผลลัพธ์ การทดสอบภาคสนามรวมถึง DCP และ Nuclear gauge tests ในการวางแผนก่อสร้างถนนหลายแห่งได้

$$M_r = -3279PI + 114100 \quad (2.11)$$

Mukesh A. patel, HS Patel (2012) ประยุกต์ใช้ค่า DCP และค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน คือ ค่าความหนาแน่นของดินสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) และค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) ในการประเมินค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินและทำนายค่า CBR, KPBT, DCP และ UCS พบว่าสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{CBR} = 5.61152798 \text{ MDD} - 3.484842045 \cdot 10^{-2} \text{ OMC} - 4.290247861 \cdot 10^{-2} \text{ MLL} + 2.129233306 \text{ DCP} - 108.8112801 \quad (2.12)$$

$$\text{K-Value} = 4.209888602 \cdot 10^{-1} \text{ MDD} + 8.30973734 \cdot 10^{-4} \text{ OMC} + 5.717608247 \cdot 10^{-3} \text{ MLL} + 1.567547777 \cdot 10^{-1} \text{ DCP} - 8.772343264 \quad (2.13)$$

$$\text{UCS} = 6.904701568 \cdot 10^{-1} \text{ MDD} - 1.146947823 \cdot 10^{-2} \text{ OMC} - 1.704888589 \cdot 10^{-2} \text{ MLL} + 0.299916777 \text{ DCP} - 12.61710035 \quad (2.14)$$

Mukesh A. Patel, H.S. Patel, Gautam Dadhich (2013) ได้มีการประยุกต์ใช้ค่าจากการทดลอง DCP ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และค่าความชื้น (Moisture Content) เพื่อประเมินและทำนายค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินในประเทศอินเดีย ทั้งค่า CBR, KPBT และ UCS สามารถสร้างความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$\text{CBR} = 0.26235 \text{ DCP} - 0.29716 W_{LW} - 0.34399 \text{ MC} + 18.59709 ; R^2 = 0.83 \quad (2.15)$$

$$\text{UCS} = 0.07904 \text{ DCP} - 0.05686 W_{LW} - 0.07359 \text{ MC} + 3.223091 ; R^2 = 0.70 \quad (2.16)$$

$$\text{KPBT} = 0.00271 \text{ DCP} - 0.001 W_{LW} - 0.00057 \text{ MC} + 0.10859 ; R^2 = 0.96 \quad (2.17)$$

ความสัมพันธ์ที่ได้ถือว่ามีค่าความแม่นยำค่อนข้างสูงแต่ยังคงมีความยุ่งยากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ยังคงมีมากจนเกินไปและการทดลอง DCP แม้จะดำเนินการได้อย่างง่ายดายแต่ยังคงต้องใช้ความแม่นยำที่ค่อนข้างสูง ต่อมา Mukesh A. patel, HS Patel (2013) มีการประยุกต์ใช้ค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน คือ ค่าความหนาแน่นของดินสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) และค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ในการประเมินค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินและทำนายค่า CBR, KPBT, DCP และ UCS พบว่าสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{CBR} = 2.408004415 \text{ MDD} - 1.283426806 \cdot 10^{-1} \text{ OMC} - 39.34504338 \quad (2.18)$$

$$\text{DCP} = -1.682957215 \text{ MDD} - 4.280249908 \cdot 10^{-2} \text{ MDD} + 36.70444589 \quad (2.19)$$

$$\text{KPBT} = 1.065500484 \cdot 10^{-1} \text{ MDD} - 5.564304956 \cdot 10^{-3} \text{ OMC} - 1.861151555 \quad (2.20)$$

$$\text{UCS} = 3.366843974 \cdot 10^{-1} \text{ MDD} - 2.524360634 \cdot 10^{-2} \text{ OMC} - 5.060560998 \quad (2.21)$$

ความสัมพันธ์ที่ได้ถือว่ามีค่าความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นและมีความสะดวกง่ายดายในการประเมินและทำนายค่าพารามิเตอร์ของดินในประเทศอินเดีย

Gebremariam G. Feleke and Alemgena A. Araya (2016) นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง DCP และ CBR สำหรับวัสดุ Subgrade ในท้องถิ่น ความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้พิจารณาพฤติกรรมของวัสดุ Subgrade และช่วยประหยัดเวลาและต้นทุนของงานวิศวกรรมเบื้องต้นและละเอียดของโครงการถนนได้เป็นอย่างมาก ชุดการทดสอบ DCP, CBR แบบแช่น้ำที่ความชื้นเหมาะสม (OMC) และ CBR ที่ยังไม่ได้แช่น้ำในห้องปฏิบัติการ ความสัมพันธ์ของผลการทดสอบภาคสนามและในห้องปฏิบัติการระหว่าง CBR และ DCP จะถูกสร้างขึ้นสำหรับดินที่มีเนื้อละเอียดและหยาบ ความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นระหว่างค่า DCP และ CBR สำหรับดินเนื้อละเอียดแสดงให้เห็นได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบ

S.No.	Equation	R ²	Remark
Fine grained soils (FG)			
1	$\log_{10}\text{SCBR}=2.015-0.906\log_{10}\text{DCPI}$	0.930	Strong relationship
2	$\log_{10}\text{UCBR}=1.6677-0.895\log_{10}\text{DCPI}$	0.902	Strong relationship
3	$\log_{10}\text{SCBR}=0.397+0.917\log_{10}\text{UCBR}$	0.847	Strong relationship
Coarse grained soils (CG)			
4	$\log_{10}\text{SCBR}=2.197-0.852\log_{10}\text{DCPI}$	0.836	Strong relationship
5	$\log_{10}\text{UCBR}=1.953-1.167\log_{10}\text{DCPI}$	0.898	Strong relationship
6	$\log_{10}\text{SCBR}=0.818+0.697\log_{10}\text{UCBR}$	0.850	Strong relationship

ภาพประกอบ 2.25 ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และ DCP
ที่มา (Gebremariam G. Feleke and Alemgena A. Araya, 2016)

Z. U. Rehman, U. Khalid, K. Farooq, H. Mujtaba (2017) การทำนายเป็นเครื่องมือสำคัญทางวิศวกรรมที่ใช้เพื่อทำการตัดสินใจที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก เพื่อให้วิศวกรคาดการณ์พฤติกรรมของวัสดุทางธรณีใช้ได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างพื้นฐาน CBR เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั่วไป ดำเนินการประเมินแรงเฉือนและความแข็ง โมดูลัสของ Subgrade สำหรับการออกแบบถนน CBR การทดสอบเป็นการทดสอบที่ลำบาก ดังนั้น จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประเมินค่า CBR อย่างรวดเร็ว การศึกษาพยายามที่จะพัฒนาแบบจำลองที่ถูกต้องเพื่อกำหนด ค่า CBR จากคุณสมบัติดัชนีของดิน แบบจำลองพัฒนาตามขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกสำหรับดินเม็ดละเอียด ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอและ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดสำหรับดินเนื้อหยาบ

$$\text{CBR} = 0.7 \text{ Cu} - 0.045 \text{ MDD} - 3.1414 \quad (2.22)$$

$$\text{CBR} = -0.11 \text{ LL} - 0.452 \text{ PI} - 15.773 \quad (2.23)$$

Fernando Jove Wilches, Jhon Jairo Feria Díaz and José Rodrigo Hernandez Ávila (2018) ทำการประเมินสมการระหว่าง California Bearing Ratio (CBR) และ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) สำหรับดินของเมือง Sincelejo ในโคลอมเบีย เพื่อให้สามารถกำหนดความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน Subgrade ในการออกแบบถนนได้อย่างประหยัดและเหมาะสม ตัวอย่างดิน 46 ตัวอย่างจากทางใต้ของเมืองถูกนำไปทดสอบใน DCP และ CBR ภายในห้องปฏิบัติการ CBR สมการที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนมากกว่า 80%

$$\text{CBR} = 112.03 / \text{DCP}^{0.803} \quad (2.24)$$

Nopanom Kaewhanam, Prasat Juntasan and Somkiat Narong (2013) ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ DCP และการบดอัดของวัสดุที่ได้มาตรฐานสำหรับระดับชั้นดินที่กรมทางหลวงกำหนด ตัวอย่างดินจากสถานที่ก่อสร้าง 12 แห่ง อัดแน่นเพื่อให้ได้ความหนาแน่นต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ การทดสอบ DCP ดำเนินการที่หลุมในภาคสนาม จากนั้นจึงทำการทดสอบหลายชุดเพื่อระบุการจำแนกประเภทดินและวัดการทดลอง การบดอัด ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเป่า DCP และการบดอัดสามารถจำลองเป็น $\ln(x)+b$ โดยที่ y คือการบดอัด และ x คือจำนวนการพัด DCP พารามิเตอร์โมเดล $y = a$ ได้มาจากดินสี่ประเภท: A-2-4, A-3, A-4 และ A-7-5 โมเดลได้รับการตรวจสอบโดย เปรียบเทียบการบดอัดที่คาดการณ์ไว้กับการวัดที่ภาคสนามจริงสามแห่ง ค่าที่คาดการณ์และค่าที่ได้จากการวัดภาคสนามจริงโดยมีความแตกต่างน้อยกว่า 5% และได้เร็วกว่า โดยใช่วิธีการปัจจุบันทั่วไป

Nopanom Kaewhanam and et al (2014) เป็นที่ทราบกันดีว่าชนิดและประเภทของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยไม่ใช่ดินทรายบริสุทธิ์หรือดินเหนียวบริสุทธิ์ คุณสมบัติของดินของดินในภูมิภาคนี้เผยแพร่ในบางพื้นที่เท่านั้น จากการศึกษาวิจัยพบว่า ดินเป็นส่วนผสมของทรายละเอียด ตะกอน และ/หรือดินเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าสีของดินมีความแตกต่างกัน ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เก็บตัวอย่างดินจาก 19 จังหวัดทั่วภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การทดสอบในห้องปฏิบัติการที่รวมอยู่ในการศึกษานี้คือการตรวจสอบด้วยสายตาสำหรับสี น้ำหนักต่อหน่วยทั้งหมด ความถ่วงจำเพาะ การวิเคราะห์ตะแกรง การวิเคราะห์ไฮโดรมิเตอร์ ชีตจำกัดของ Atterberg การบด

อัด และ CBR (อัตราส่วนแบร์ริงแคลิฟอร์เนีย) ผลการวิจัยพบว่า สีของดินแบ่งออกเป็น 2 สี คือ สีแดง และสีเหลือง ดินส่วนใหญ่เป็น SM และดินบางส่วนคือ SM-SC และ SC ค่าความถ่วงจำเพาะคือ 2.63-2.69 ค่าเฉลี่ย 2.66 น้ำหนักรวมต่อหน่วยประมาณ 16-17 kN/m³ CBR อยู่ที่ประมาณ 4%-12% และ 24%-36% ในบางพื้นที่ พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพไม่ขึ้นกับสีของดิน

Fernando Jove Wilches, Jhon Jairo Feria Díaz and José Rodrigo Hernandez Ávila (2020) สมการสหสัมพันธ์ระหว่าง California Bearing Ratio (CBR) และ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) สำหรับดินของเมือง Sincelejo ในโคลอมเบีย เพื่อให้สามารถกำหนดความสามารถในการรับน้ำหนักของดินที่ลดระดับลงในการออกแบบทางเท้าได้อย่างประหยัดและเหมาะสม ตัวอย่างดิน 46 ตัวอย่างจากทางใต้ของเมืองถูกนำไปทดสอบในแหล่งกำเนิด (DCP) และห้องปฏิบัติการ (CBR กับตัวอย่างที่ไม่เปลี่ยนแปลง) แผนภาพการกระจายและเส้นโค้งสหสัมพันธ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดมากกว่า 80% ได้รับการพัฒนา กล่าวคือ สมการที่พบมีการแสดงข้อมูลที่ดีของการทดสอบที่ดำเนินการ ดินมีลักษณะเด่นเป็นดินเหนียว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจัดทำชั้นดินถมคันทางในการออกแบบทางเท้า

Prinya CHINDAPRASIRT, Apichit KAMPALA, Anukun ARNGBUNTA and Suksun HORPIBULSUK (2020) ชั้นดินในจังหวัดขอนแก่นตั้งอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นดินเนื้อละเอียดที่มีลมพัดมาเกาะ ปกติจะเรียกว่า " Loess or Khon Kaen Loess" ดินที่อยู่ในชั้นนี้จะถูกรบกวน ถูกดึงออกมาจากหลุมและถูกบดอัดในภายหลังสำหรับการใช้งานด้านโครงสร้างพื้นฐาน การบดอัดทำให้เกิดทรายปนทรายหรือดินเหนียวปนทรายที่มีคุณสมบัติที่คาดเดาไม่ได้ แม้ว่าจะจำเป็นสำหรับการออกแบบโครงสร้างพื้นฐาน แต่การศึกษาเกี่ยวกับ Khon Kaen Loess ยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น จึงตรวจสอบพฤติกรรมการบดอัดและทำนายค่าพารามิเตอร์ของดินที่ปริมาณดินเหนียวต่างๆ ภายใต้ชุดพลังงานการบดอัดที่ Khon Kaen Loess ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักหน่วยสูงสุดของการทำให้แห้งของตัวอย่างอาจสัมพันธ์กับน้ำหนักหน่วยของการทำให้แห้งที่ขีดจำกัดพลาสติก (PL) ในขณะที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด (OWC) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับ PL ตัวอย่างที่มีค่า PL สูงกว่าน้ำเสนอ OWC ที่สูงกว่า นอกจากนี้ สามารถประมาณค่าน้ำหนักหน่วยแห้งสูงสุดและ OWC ของตัวอย่างโดยใช้สมการที่พัฒนาขึ้นซึ่งตรวจสอบกับผลการวิจัยอื่นๆ

T. Prommin and R. Nuntasarn (2019) ดินเหลืองขอนแก่น จัดเป็นทรายปนทราย (SM) หรือ ทรายดินเหนียว (SC) เป็นแหล่งสะสมของลมพัดที่มีโครงสร้างรังผึ้ง ดังนั้นระดับความอึดตัวที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุของค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนที่ลดลงและการตั้งถิ่นฐานของดินเหลืองขอนแก่นที่เพิ่มขึ้น การศึกษานี้ประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของดินขอนแก่นที่ไม่ถูกรบกวนระหว่างสภาพเปียกและแห้งโดยการทดสอบดรัมลูกปืนจาน นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่มีสาย (cohesion, c และมุมเสียดสี, ϕ) ระหว่างความอึดตัวและตัวอย่างแบบแห้งยังถูกตรวจสอบ

โดยการทดสอบแบบสามแกนภายใต้สภาวะที่ไม่ผ่านการแยกน้ำที่ยังไม่รวมเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ ยังได้ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ไม่มีการระบายน้ำของดินเหนียวแข็งที่ไม่นำน้ำจากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ จำกัด เนื่องจากระดับความอิ่มตัวต่ำ การทดสอบเริ่มต้นถูกสังเกตจากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของดินและน้ำ (SWCC) โดยการทดสอบแผ่นแรงดัน ผลการแบกเพลพบวกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของคอนกรีตดินเหนียว ซึ่งระดับความอิ่มตัวสูงกว่า 45% อยู่ที่ประมาณ 35 kPa ความจุเบร้งสูงสุดของคอนกรีตดินเหนียวที่ 8% ขององศาความอิ่มตัวนั้นเกิน 1,100 kPa นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ที่ดีเยี่ยมระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่ไม่ได้รับการทดสอบจากการทดสอบ UU แบบสามแกน (c และ ϕ) ในระบบการตกค้างและกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดด้วยการทดสอบแบบเมตริกซ์ นอกจากนี้ การคาดคะเนโดยใช้ทฤษฎีของ Terzaghi และแรงเฉือนที่ไม่ได้รับการฝึกฝนจากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ จำกัด ให้ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดที่เหมาะสมมากกว่าสมการกำลังรับน้ำหนักทั่วไปสำหรับการอัดตัวของดิน

Rungroj Arjwech and Pakawat Sriwangpon (2019) Loess ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของวิทยาเขตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มันถูกระบุว่าเป็นดินที่ยุบได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวโดยใช้การวิเคราะห์คลื่นพื้นผิวหลายช่องสัญญาณ (MASW) และหลุมเจาะ วิธีแผ่นดินไหว ผลลัพธ์ของ MASW แสดงว่าความเร็วของคลื่นเฉือนแปรผันจาก 242 ถึง 329 m/s ในขณะที่คลื่นอัด ความเร็วอยู่ที่ 371 ถึง 740 m/s ผลลัพธ์ของวิธี downhole แสดงว่าความเร็วของคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 210 ถึง 323 m/s ในขณะที่ ความเร็วของคลื่นอัดจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 420 ถึง 771 m/s ความเร็วของคลื่นร่างกายที่ได้รับจากวิธี MASW จะแตกต่างกันไป 25% จากที่ได้รับโดยใช้วิธี downhole โมดูลัสของ Young ที่คำนวณจากผลลัพธ์เหล่านี้ได้รับการตรวจสอบด้วยข้อมูล จากการวิจัยครั้งก่อนและมากกว่า การทดสอบทางธรณีเทคนิคแบบสถิต วิธี MASW ค่อนข้างคุ้มค่า ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นทางเลือกแทนการทดสอบทางธรณีเทคนิคเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความยืดหยุ่นของดิน

พูน ปณ จิต ชเว

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

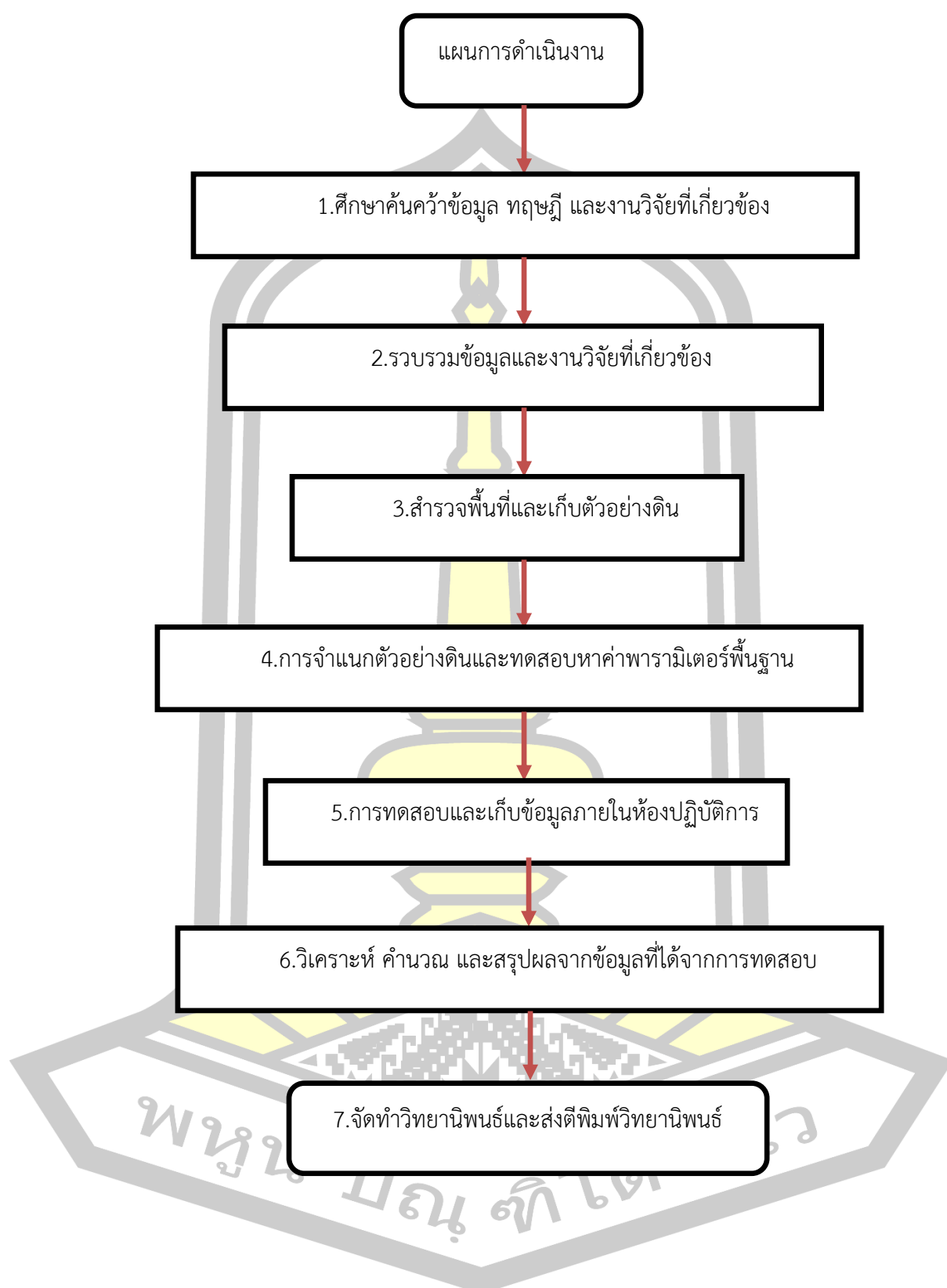
การศึกษาและประเมินค่าพารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงของตัวอย่างดิน คือ CBR และ DCP ต้องมีความเข้าใจในเรื่องทฤษฎีและการปฏิบัติได้อย่างชัดเจนและสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้การดำเนินงานสามารถดำเนินไปได้อย่างราบเรียบ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดแผนการดำเนินงานออกเป็นขั้นตอนต่างๆ เพื่อสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างเป็นระบบ และสามารถปฏิบัติงานให้บรรลุวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่กำหนด ดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานวิจัยช่วยให้ผู้วิจัยได้ดำเนินงานเป็นไปตามแผนที่วางเอาไว้ จึงได้มีการสร้างแผนไว้ดังต่อไปนี้ เพื่อเป็นแนวปฏิบัติในการทำงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์และเป้าหมาย โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะวิธีการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินภายในห้องปฏิบัติการ
2. รวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดิน รวมไปถึงข้อมูลของดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย
3. สำรวจพื้นที่เพื่อหาแหล่งของดินและเก็บตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบ เพื่อให้ได้มาซึ่งตัวอย่างดินที่จะใช้ในการทดสอบ ทำให้สามารถจำแนกชนิดของดินและทำให้ง่ายต่อการดำเนินการทดสอบ
4. ทำการจำแนกตัวอย่างดินพร้อมทั้งทดสอบหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของตัวอย่าง คือ ค่า OMC และ MDD จากการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test)
5. ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลภายในห้องปฏิบัติการ คือ การทดสอบ CBR และ DCP ดำเนินการเก็บข้อมูลและผลของการทดสอบต่างๆเพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป
6. วิเคราะห์ คำนวณ และสรุปผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ หากมีข้อผิดพลาดต้องทำการตรวจสอบข้อผิดพลาด และเมื่อข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องจึงสามารถสรุปผลได้
7. จัดทำวิทยานิพนธ์และส่งตีพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขั้นตอนในการดำเนินงานสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.1 และตาราง 3.1



ภาพประกอบ 3.1 แผนการและขั้นตอนการดำเนินงาน

ตาราง 3.1 ตารางแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	ระยะเวลาในการทำงาน									
	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค
1.ศึกษาคนควาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→									
2.รวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		←→								
3.สำรวจพื้นที่และเก็บตัวอย่างดิน			←→							
4.การจำแนกตัวอย่างดินและทดสอบหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน				←→						
5.การทดสอบและเก็บข้อมูลภายในห้องปฏิบัติการ				←→						
6.วิเคราะห์ คำนวณ และสรุปผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ					←→					
7.จัดทำวิทยานิพนธ์และส่งตีพิมพ์วิทยานิพนธ์								←→		

3.2 การเก็บและจำแนกตัวอย่างดิน

3.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน

1. เคลียร์พื้นที่ที่จะทำการขุดและเก็บตัวอย่างดิน
2. ดินตัวอย่างเป็นดินที่ถูกรบกวน (Disturbed Sample)
3. เก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่สำรวจ 3-4 ตัวอย่าง ประมาณ 5-6 กิโลกรัม

3.2.2 การจำแนกตัวอย่างดิน

การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างแบบรบกวน (Disturbed Sample) และดำเนินการจำแนกดินตามระบบ AASHTO (Classification)

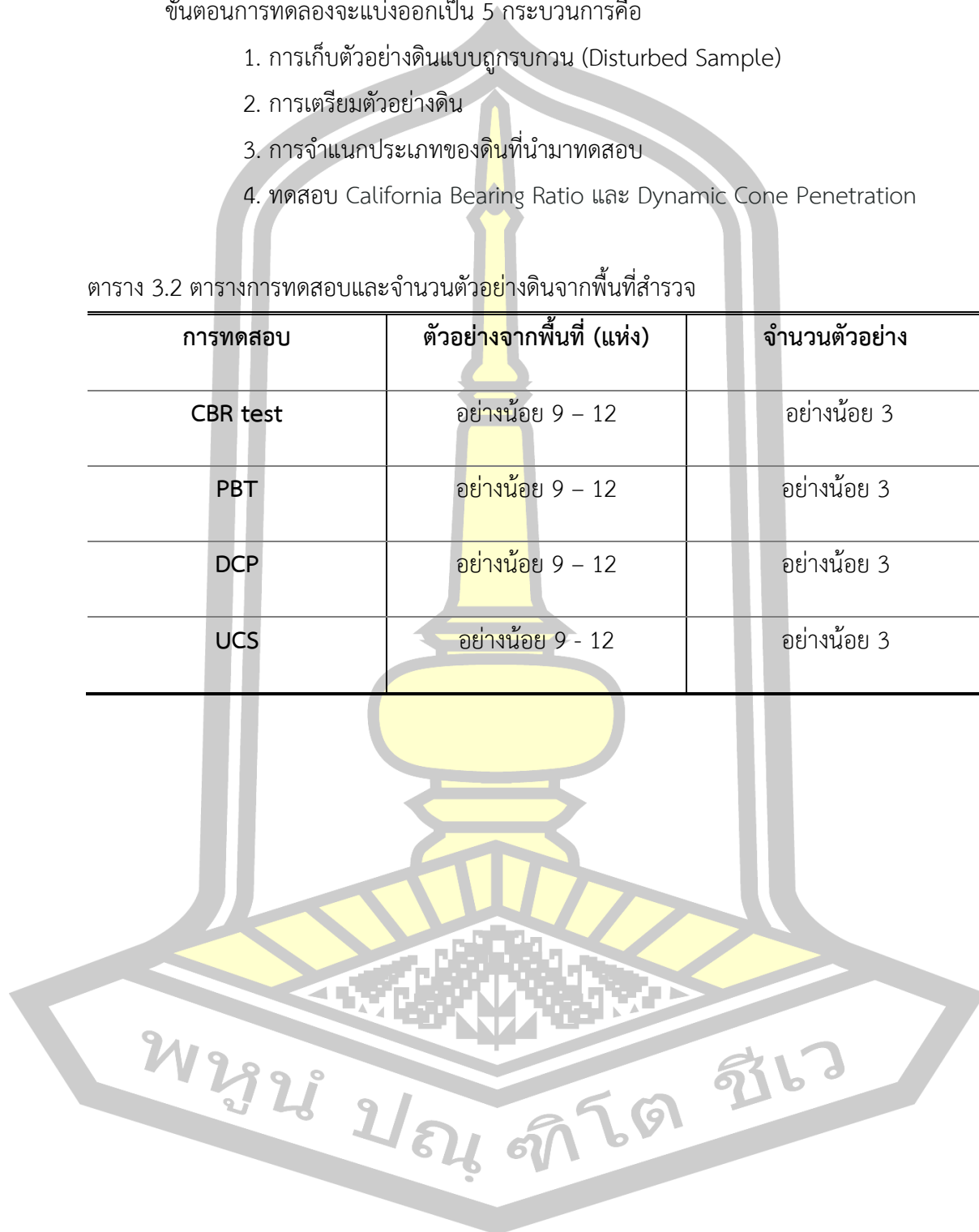
3.3 การทดลอง

ขั้นตอนการทดลองจะแบ่งออกเป็น 5 กระบวนการคือ

1. การเก็บตัวอย่างดินแบบถูกรบกวน (Disturbed Sample)
2. การเตรียมตัวอย่างดิน
3. การจำแนกประเภทของดินที่นำมาทดสอบ
4. ทดสอบ California Bearing Ratio และ Dynamic Cone Penetration

ตาราง 3.2 ตารางการทดสอบและจำนวนตัวอย่างดินจากพื้นที่สำรวจ

การทดสอบ	ตัวอย่างจากพื้นที่ (แห่ง)	จำนวนตัวอย่าง
CBR test	อย่างน้อย 9 – 12	อย่างน้อย 3
PBT	อย่างน้อย 9 – 12	อย่างน้อย 3
DCP	อย่างน้อย 9 – 12	อย่างน้อย 3
UCS	อย่างน้อย 9 - 12	อย่างน้อย 3



บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล

จากแผนการศึกษางานวิจัยจำนวนมาก นักวิจัยจำนวนมากพยายามเลือกใช้พารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินจำนวนมากในการศึกษา เช่น คุณสมบัติพื้นฐานของดิน ค่า OMC ค่า MDD และค่า DCP เป็นผลทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินและค่า CBR เพื่อเอาชนะข้อจำกัดและอุปสรรคด้านต่างๆ เนื่องด้วยว่าค่า DCP สามารถให้ค่าความสัมพันธ์ที่ดีในการใช้งานสำหรับ CBR หัวข้อนี้นักวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

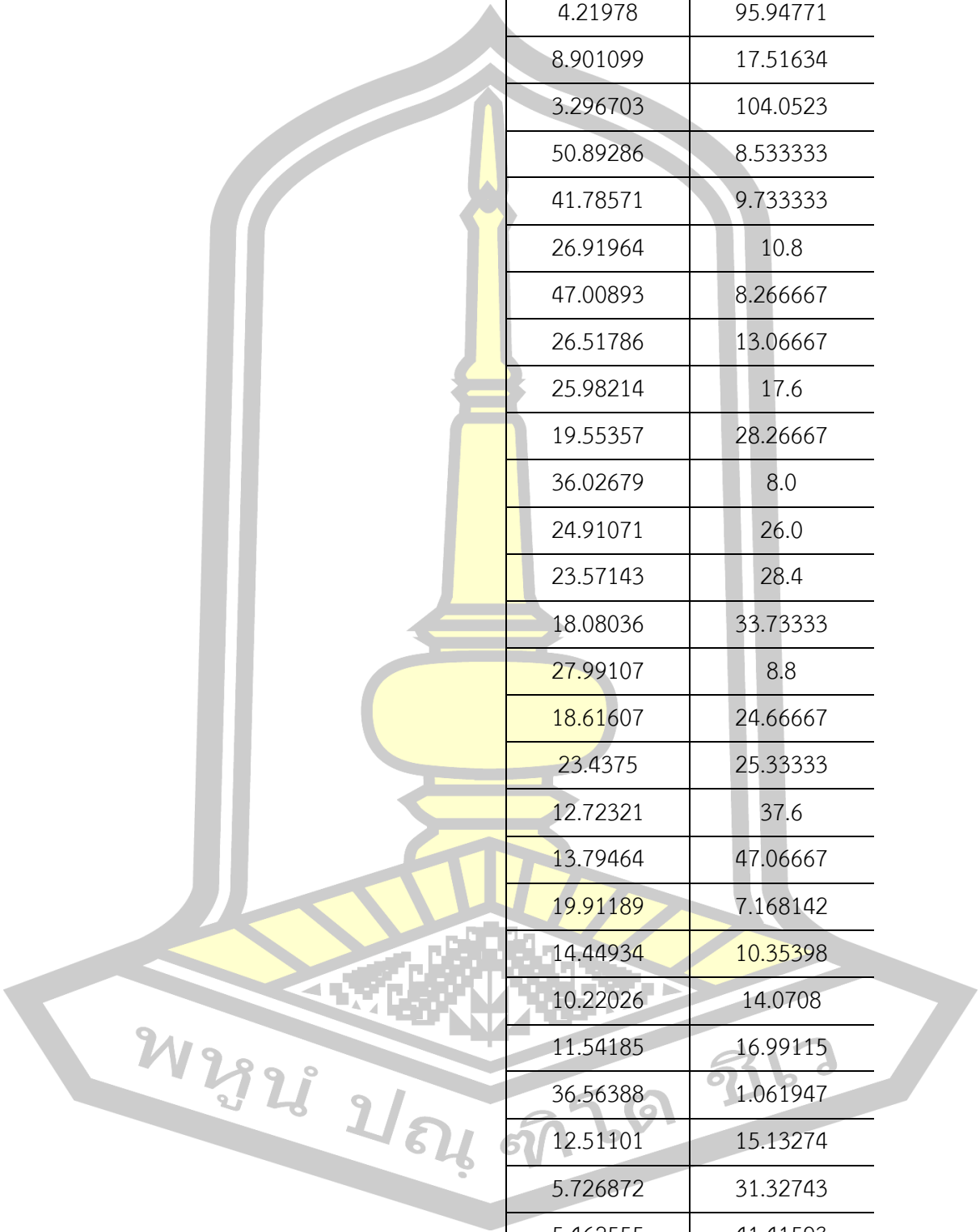
- การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัยต่างๆระหว่างค่า DCP และ CBR จากหลากหลายภูมิภาค เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ดีและมีค่าความแม่นยำที่สูง
- การทดสอบตัวอย่างดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเพื่อยืนยันความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัยต่างๆ

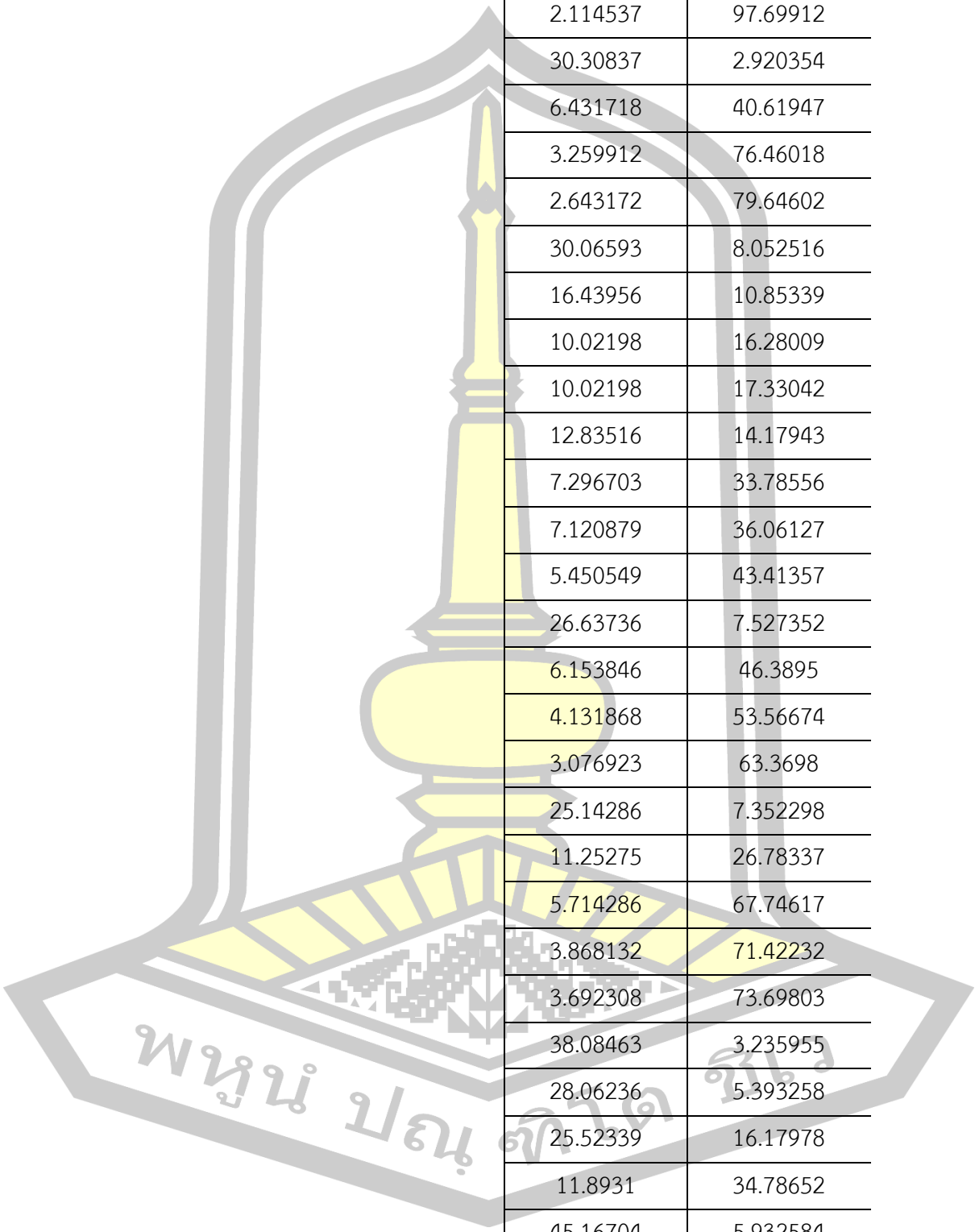
จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยจำนวนมาก ผู้วิจัยทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลผลการทดลองจากงานวิจัยของ Talal Al-Refeai and A. Al-Suhaibani, Gebremariam G. Feleke และ Fernando Jove Wilches ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Dynamic Cone Penetration Test

ผู้วิจัย	DCP	%CBR
Talal Al-Refeai and A. Al-Suhaibani	18.92308	10.98039
	14.24176	21.43791
	11.14286	27.97386
	9.362637	24.31373
	27.49451	1.30719
	10.08791	19.60784
	9.56044	24.57516
	5.208791	60.39216



9.296703	13.33333
4.21978	95.94771
8.901099	17.51634
3.296703	104.0523
50.89286	8.533333
41.78571	9.733333
26.91964	10.8
47.00893	8.266667
26.51786	13.06667
25.98214	17.6
19.55357	28.26667
36.02679	8.0
24.91071	26.0
23.57143	28.4
18.08036	33.73333
27.99107	8.8
18.61607	24.66667
23.4375	25.33333
12.72321	37.6
13.79464	47.06667
19.91189	7.168142
14.44934	10.35398
10.22026	14.0708
11.54185	16.99115
36.56388	1.061947
12.51101	15.13274
5.726872	31.32743
5.462555	41.41593
7.22467	42.21239
4.140969	52.83186



2.555066	66.37168
2.114537	97.69912
30.30837	2.920354
6.431718	40.61947
3.259912	76.46018
2.643172	79.64602
30.06593	8.052516
16.43956	10.85339
10.02198	16.28009
10.02198	17.33042
12.83516	14.17943
7.296703	33.78556
7.120879	36.06127
5.450549	43.41357
26.63736	7.527352
6.153846	46.3895
4.131868	53.56674
3.076923	63.3698
25.14286	7.352298
11.25275	26.78337
5.714286	67.74617
3.868132	71.42232
3.692308	73.69803
38.08463	3.235955
28.06236	5.393258
25.52339	16.17978
11.8931	34.78652
45.16704	5.932584
22.98441	5.932584
12.82851	30.74157

	8.685969	56.62921
	33.14031	9.168539
	20.17817	8.898876
	12.82851	52.85393
	8.418708	101.1236
	32.2049	4.314607
	13.76392	9.977528
	8.953229	74.42697
	7.750557	100.8539
	35.02222	3.733333
	21.24444	8.533333
	13.6	17.6
	9.244444	19.2
	36	10.66667
	26.57778	2.133333
	19.28889	6.133333
	8.888889	33.86667
	7.288889	35.2
	6.311111	38.13333
	8.177778	39.2
	3.111111	89.6
	15.46667	11.2
	4.8	59.46667
	3.377778	95.73333
Fernando Jove Wilches	60.0	2.8
	22.5	8.3
	78.0	3.0
	32.4	7.0
	30.7	5.2
	74.0	3.4

54.5	2.7
72.0	2.8
20.4	4.8
120.0	1.9
61.5	3.4
43.0	4.2
51.5	4.3
34.0	6.0
107.5	2.6
55.0	4.0
51.5	5.0
37.6	8.7
62.5	4.1
58.0	3.8
71.0	4.0
72.5	2.8
46.0	8.8
48.5	4.5
95.0	1.6
45.0	4.1
72.0	3.1
34.5	4.9
49.0	4.3
77.5	1.8
27.3	7.0
56.5	3.4
33.5	6.0
51.8	4.4
55.5	3.6
36.5	5.0

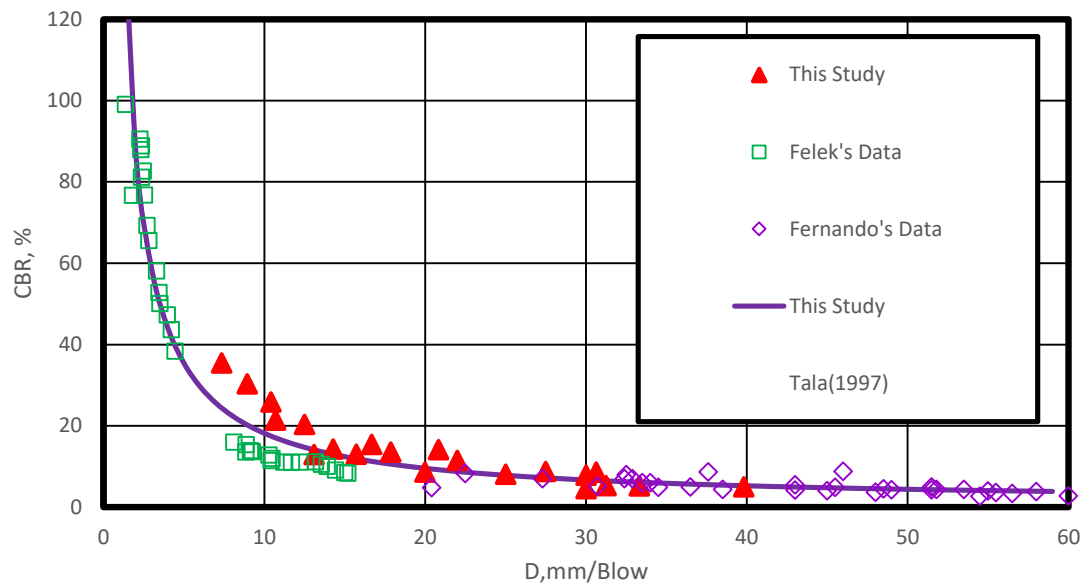
	110	3.8
	90.0	2.9
	43.0	5.5
	73.5	2.7
	38.5	4.4
	32.9	7.0
	48.0	3.7
	53.5	4.4
	32.5	8.0
	45.5	4.9
Gebremariam G. Feleke	13.19	4.7
	10.29	5.7
	10.48	6.3
	14.23	4.2
	12.22	4.9
	11.68	5.1
	15.00	4.1
	15.20	3.8
	13.55	4.8
	11.20	5.2
	9.25	5.6
	10.43	5.8
	9.15	6.7
	8.87	6.4
	8.10	6.7
	13.18	4.7
	9.14	6.7
	8.86	7.0
	2.55	32.2
	3.96	14.8

	3.29	25.0
	2.33	37.2
	3.50	24.5
	4.44	14.0
	2.36	32.0
	2.82	30.0
	2.35	36.2
	2.71	25.2
	2.26	32.9
	2.47	33.3
	4.21	16.0
	1.36	64.4
	1.80	34.6
	3.45	23.0

จากผลการทดสอบและทบทวนงานวิจัยจำนวนมาก ค้นพบว่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินอย่าง DCP มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่น โดยค่า DCP ที่มีค่าน้อยบ่งบอกถึงค่า CBR ที่มีค่ามาก จากนั้นเส้นแนวโน้มจะค่อยๆมีแนวโน้มแปรผกผันกัน จนเมื่อถึงจุดหนึ่งจะมีแนวโน้มเริ่มคงที่เป็นเส้นตรงและค่า CBR จะไม่เปลี่ยนแปลง

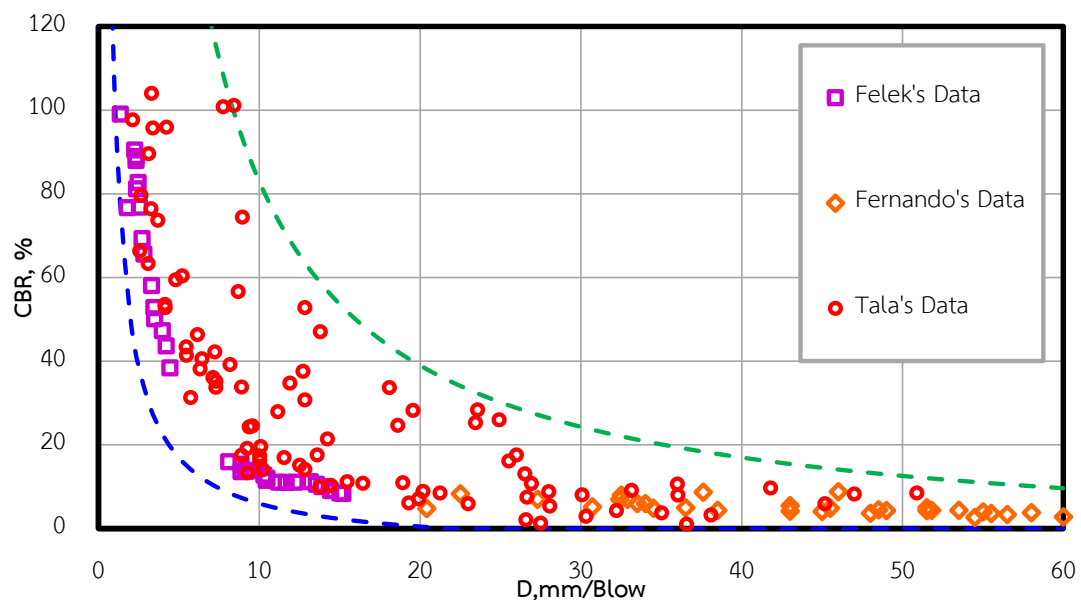
การศึกษางานวิจัยจำนวนมากค้นพบว่าตัวอย่างดินแต่ละพื้นที่มีแนวโน้มแบบเดียวกัน แต่จะจับกลุ่มกันตามแต่ละภูมิภาค เช่น Gebremariam G. Feleke ทำการศึกษาตัวอย่างดินภายใน Ethiopia, Africa และ Fernando Jove Wilches ทำการวิจัยตัวอย่างดิน Colombia, South America ซึ่งมีภูมิประเทศที่แตกต่างกัน เมื่อรวบรวมข้อมูลทั้งหมดเป็นชุดเดียวกันเดียวกันเพื่อตรวจสอบเส้นแนวโน้มและหาความสัมพันธ์ที่ดี

พูน ปณ จิต ชเว



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando และ Felek

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ CBR ของตัวอย่างดินของ Feleke และ Fernando พบว่าชุดข้อมูลมีการกระจายตัวแตกต่างกันตามภูมิประเทศ แต่มีแนวโน้มที่สามารถสร้างความสัมพันธ์ที่ดีได้ แต่เนื่องด้วยงานวิจัยอาจจะยังไม่เพียงพอที่จะสามารถสรุปได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando, Felek และ Tala

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 ค้นพบว่างานวิจัยของ Al-Refeai, Al-Suhaibani ซึ่งทำการศึกษาตัวอย่างดินจาก Saudi Arabia ค้นพบว่าการกระจายของผลการทดสอบแปรปรวนเป็นอย่างมาก จึงไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง DCP และ %CBR ได้อย่างชัดเจน เนื่องด้วยตัวอย่างดินจากงานวิจัยเป็นดินเฉพาะถิ่น อาจไม่เหมาะสมสำหรับการรวบรวมเป็นชุดข้อมูลเดียวกัน เพื่อหาความสัมพันธ์อย่างง่าย

เมื่อผู้วิจัยทำการศึกษาเพิ่มมากขึ้น ค้นพบว่าม้งานวิจัยจำนวนมากที่พยายามสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ CBR โดยส่วนใหญ่จะใช้ความสัมพันธ์ในรูปแบบ Logarithm ซึ่งยังเป็นรูปแบบสมการที่ค่อนข้างยากพอสมควร

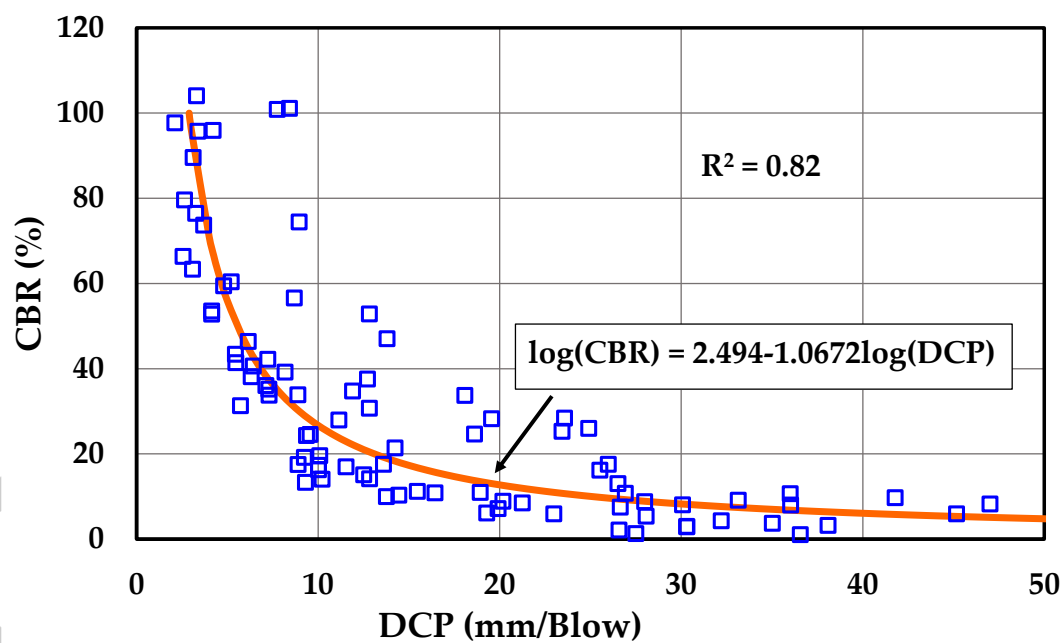
ตารางที่ 4.1 Correlation ของนักวิจัย

Researcher	Correlation
(1) Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2.494 - 1.0672\text{log}(\text{DCP})$
(2) G. Feleke, A. Araya (2016)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2.015 - 0.906\text{log}(\text{DCP})$
(3) Fernando Jove Wilches et al. (2018)	$\text{CBR} = 112.03/\text{DCP}^{0.808}$
(4) Harrison J.A. (1986)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2.81 - 1.32\text{log}(\text{DCP})$
(5) Livneh (1987)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2.20 - 0.71\text{log}(\text{DCP})^{1.5}$
(6) U.S. Army Corps of Engineers (1992)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2.465 - 1.12\text{log}(\text{DCP})$
	$\text{CBR} = 292/\text{DCP}^{1.12}$
(7) TRL	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2.48 - 1.057\text{log}(\text{DCP})$
(8) Yitagesu (2012)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2.954 - 1.496\text{log}(\text{DCP})$
(9)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 0.84 - 1.26\text{log}(\text{DCP})$

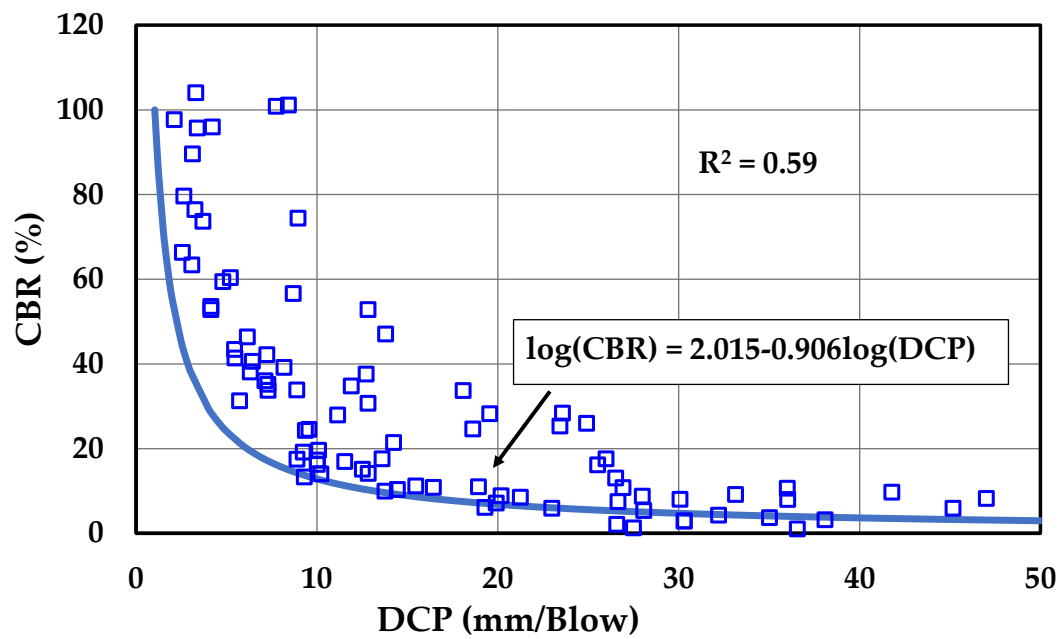
สมการความสัมพันธ์ระหว่าง DCP และ CBR ในรูปแบบต่างๆ เมื่อทำการคำนวณตัวอย่างดินของ Al-Refeai, Al-Suhaibani G. Feleke, A. Araya และ Fernando Jove Wilches et al ความแม่นยำของสมการสามารถให้ผลที่ดีในบางช่วงเท่านั้น ไม่สามารถให้ค่าความแม่นยำสูงเทียบเท่ากันได้ จึงเป็นผลที่บ่งบอกว่าดินที่มีความเฉพาะในแต่ละพื้นที่ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่ดีร่วมกันได้และสมการสามารถใช้กับตัวอย่างดินเฉพาะพื้นที่เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 – 4.26

ตารางที่ 4.3 R2 สำหรับงานวิจัยต่างๆ

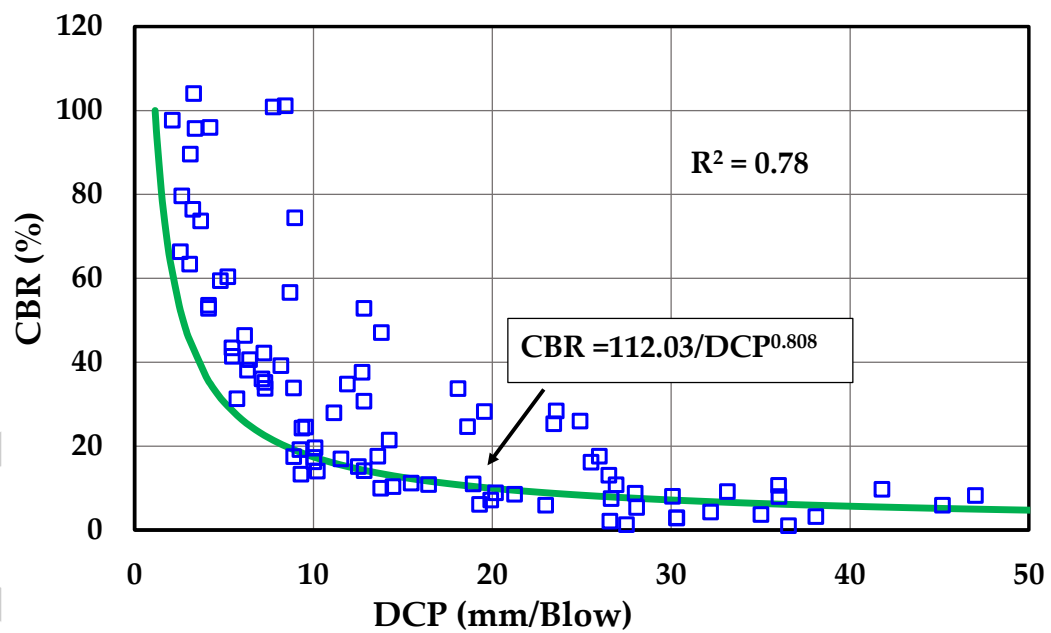
Equation Number	Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)	G. Feleke, A. Fernando Jove Wilches et al. (2018)
(1)	0.82	0.45
(2)	0.59	0.85
(3)	0.78	0.92
(4)	0.43	0.00
(5)	0.85	0.74
(6)	0.82	0.67
(7)	0.83	0.51
(8)	0.09	0.00
(9)	0.03	0.06



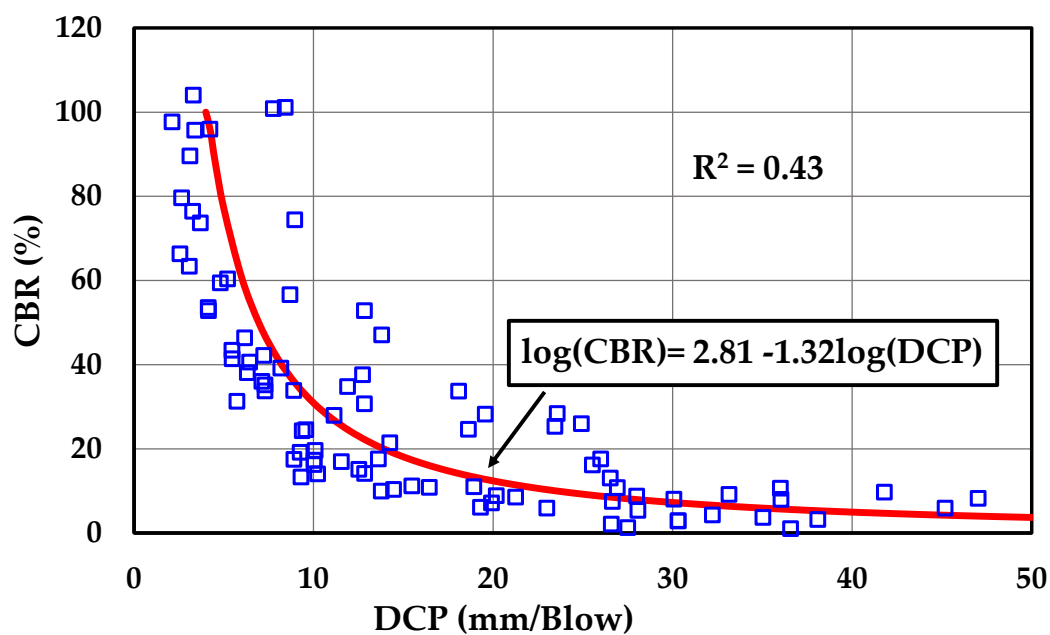
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)
โดยใช้สมการของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)
โดยใช้สมการของ G. Feleke, A. Araya (2016)

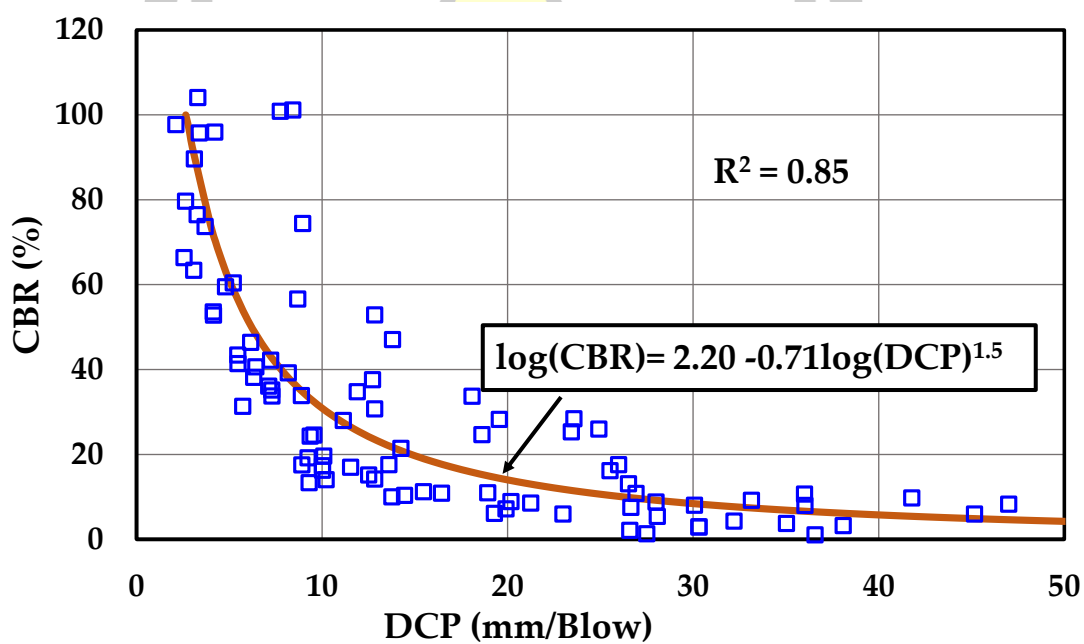


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)
โดยใช้สมการของ Fernando Jove Wilches et al. (2018)



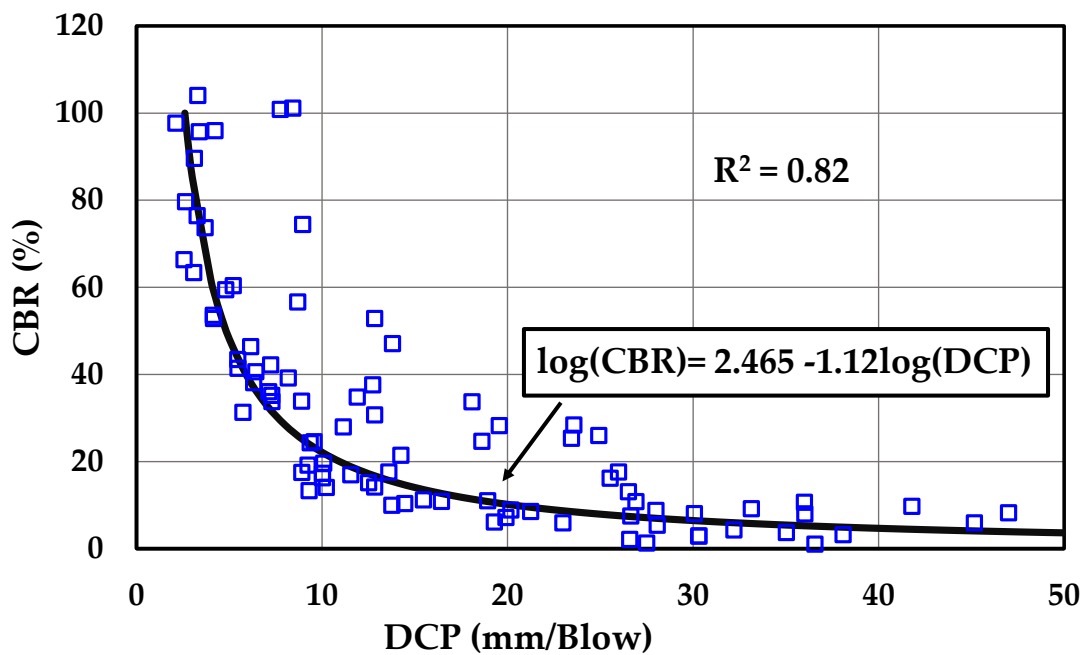
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)

โดยใช้สมการของ Harrison J.A. (1986)

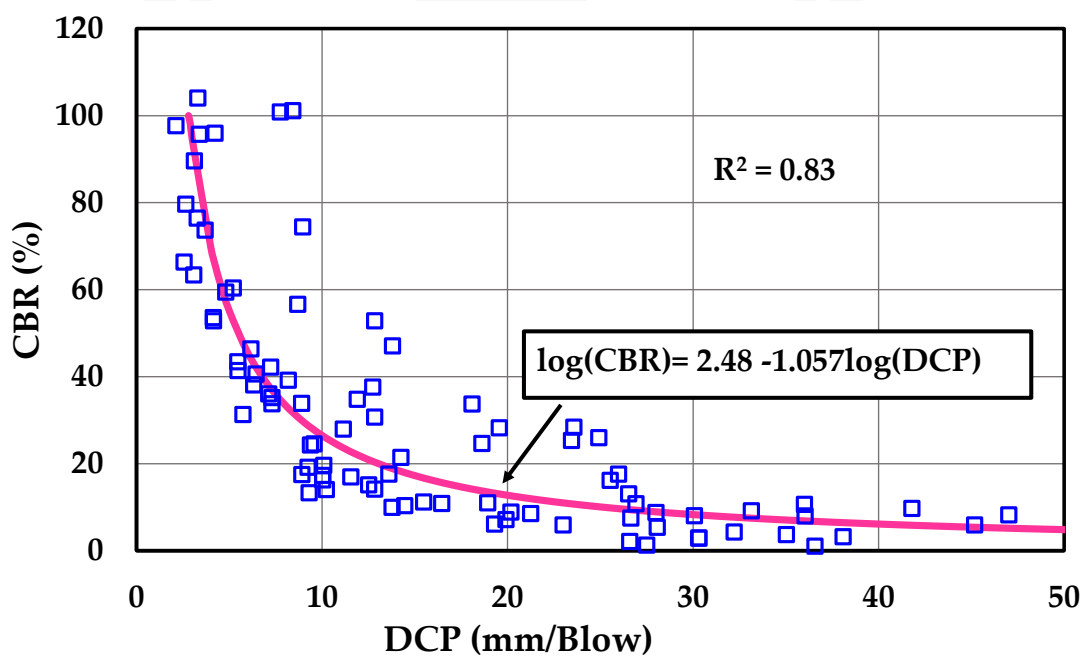


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)

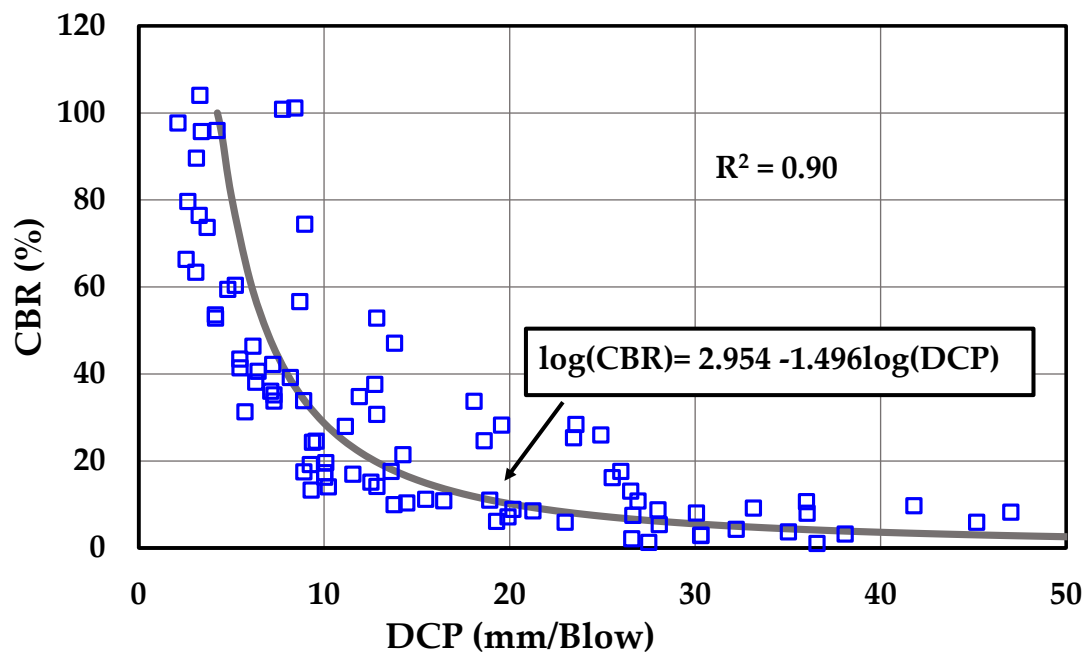
โดยใช้สมการของ Livneh (1987)



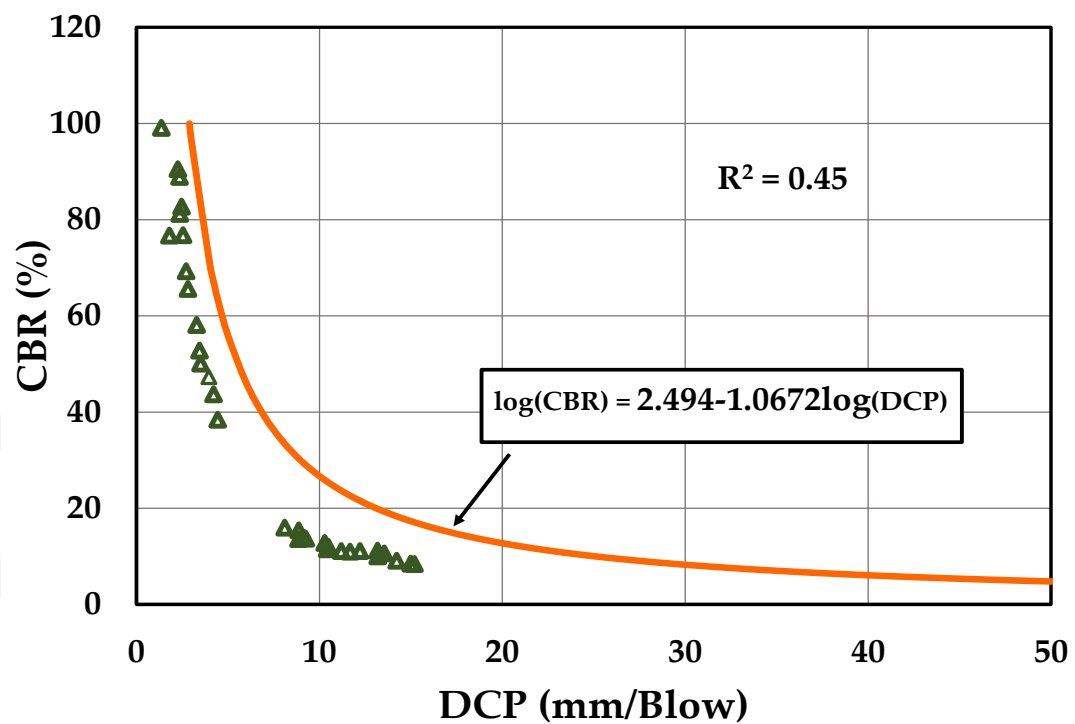
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)
โดยใช้สมการของ U.S. Army Corps of Engineers (1992)



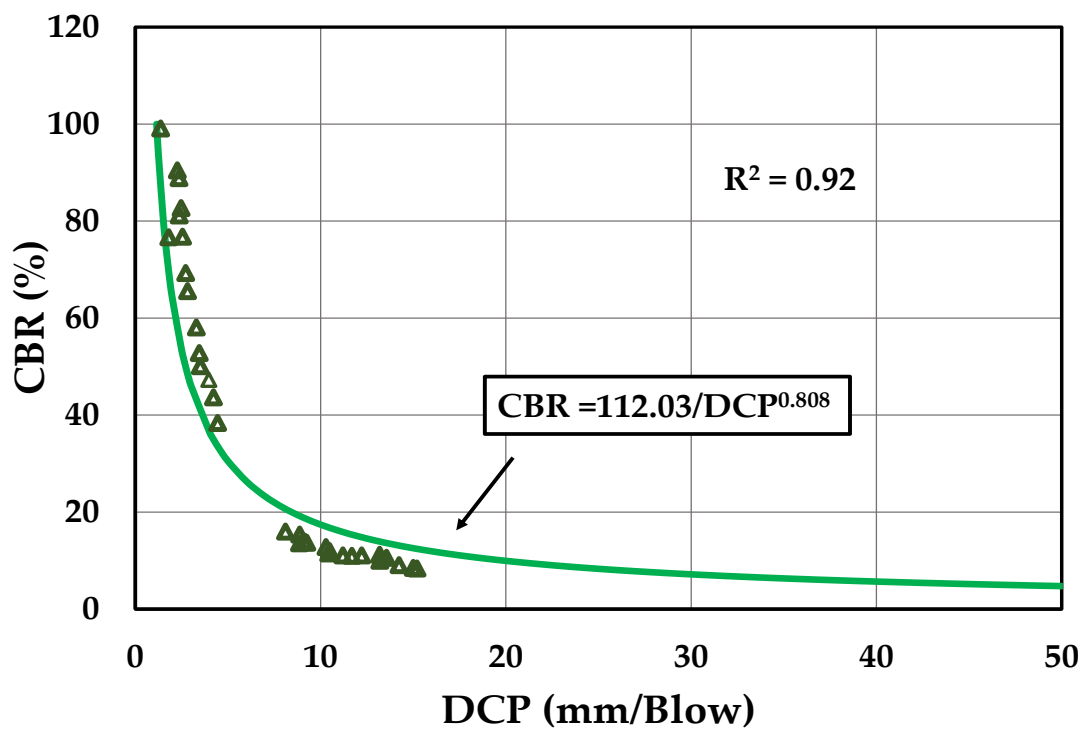
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)
โดยใช้สมการของ TRL



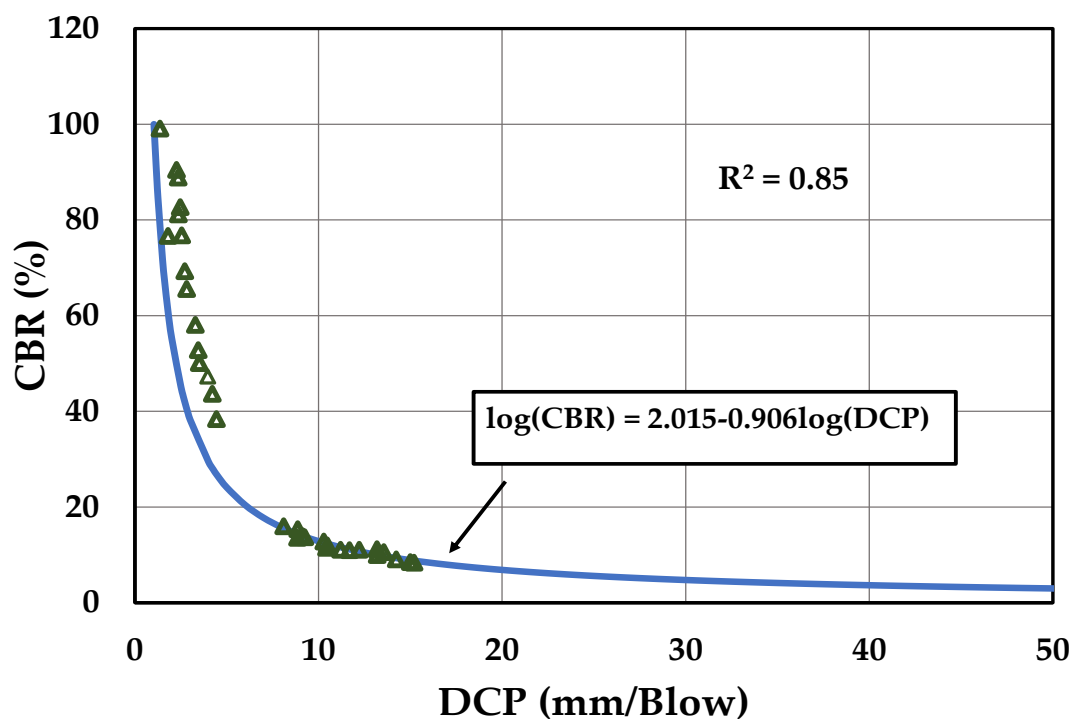
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996) โดยใช้สมการของ Yitagesu (2012)



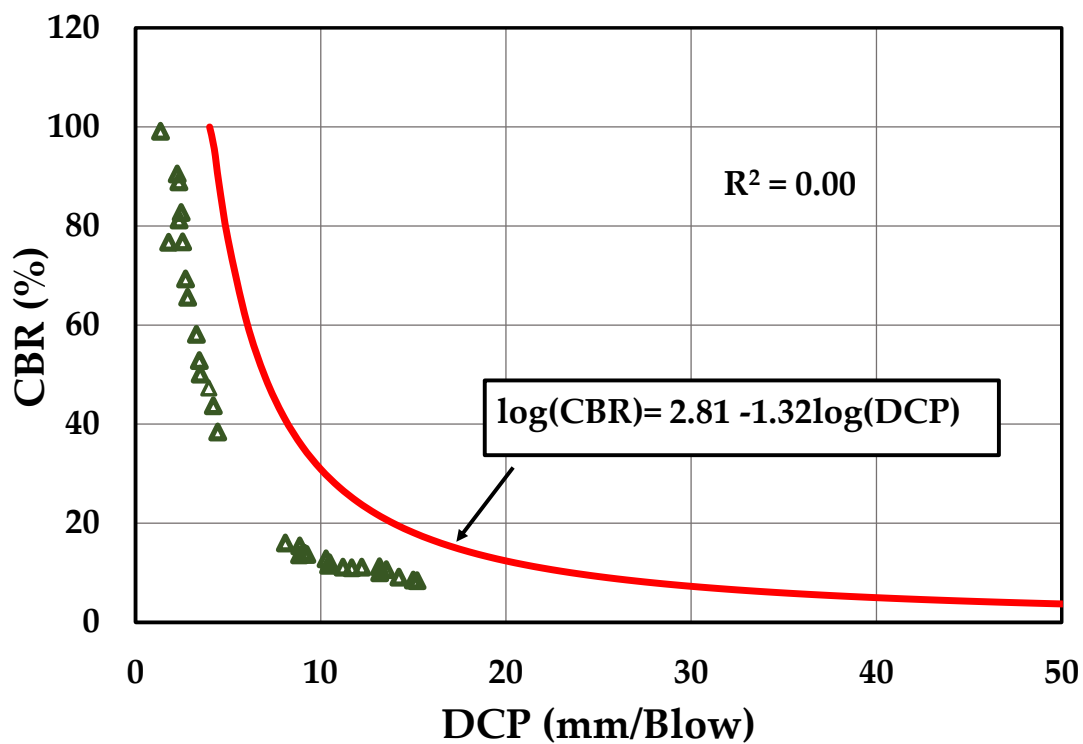
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016) โดยใช้สมการของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)



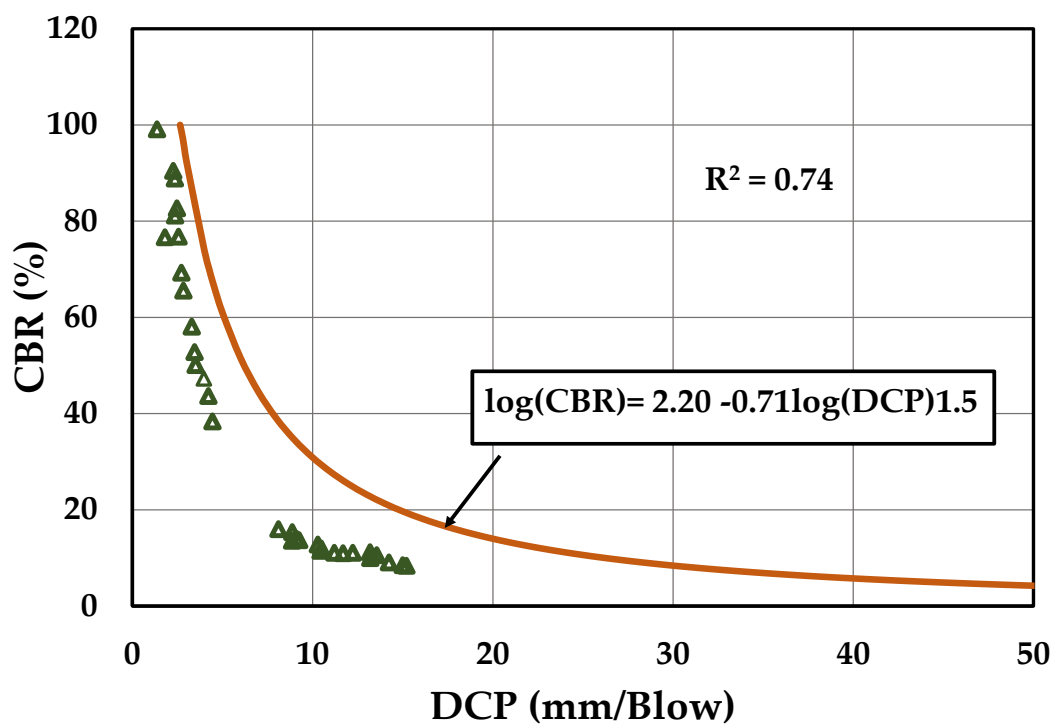
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016) โดยใช้สมการของ Fernando Jove Wilches et al. (2018)



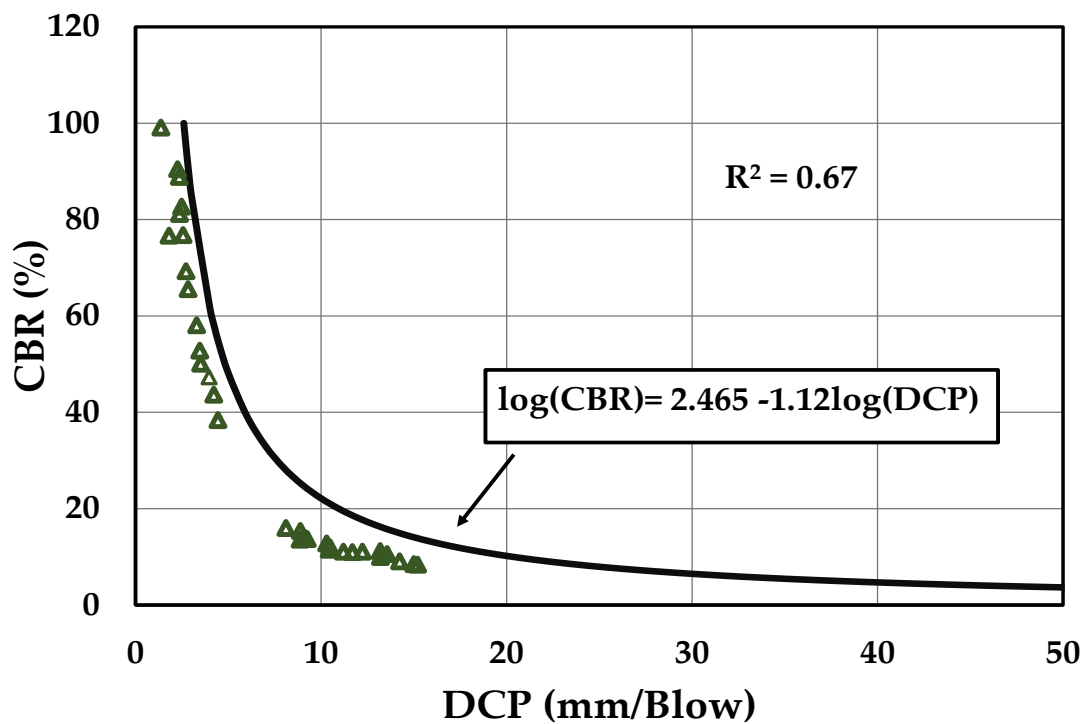
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016) โดยใช้สมการของ G. Feleke, A. Araya (2016)



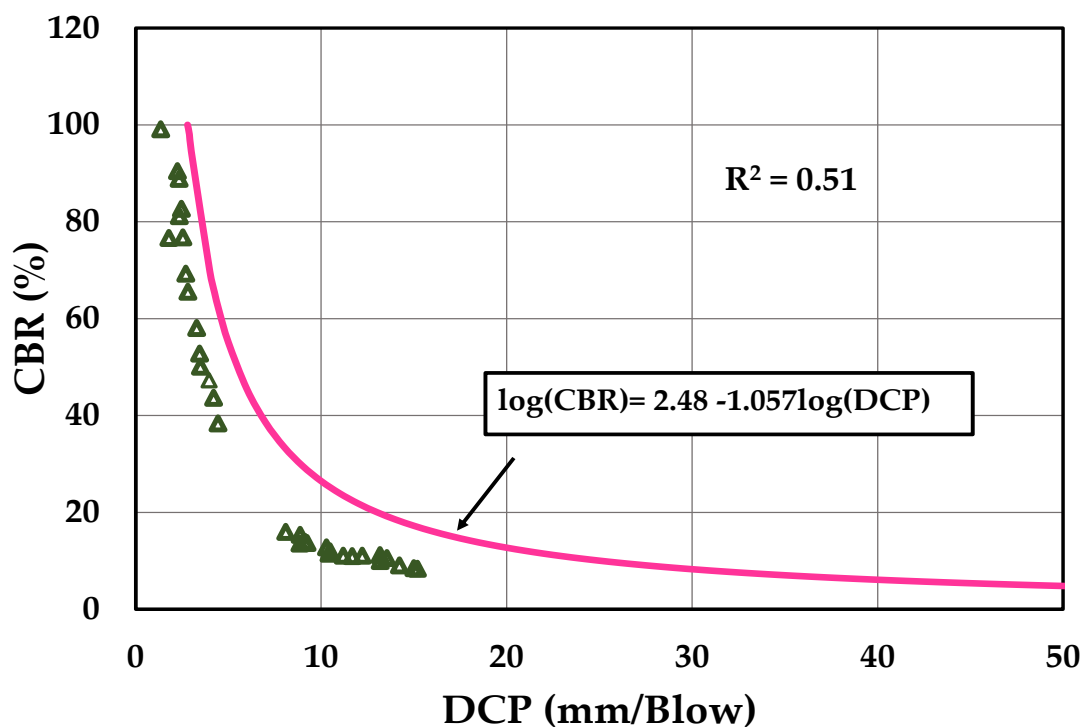
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016)
โดยใช้สมการของ Harrison J.A. (1986)



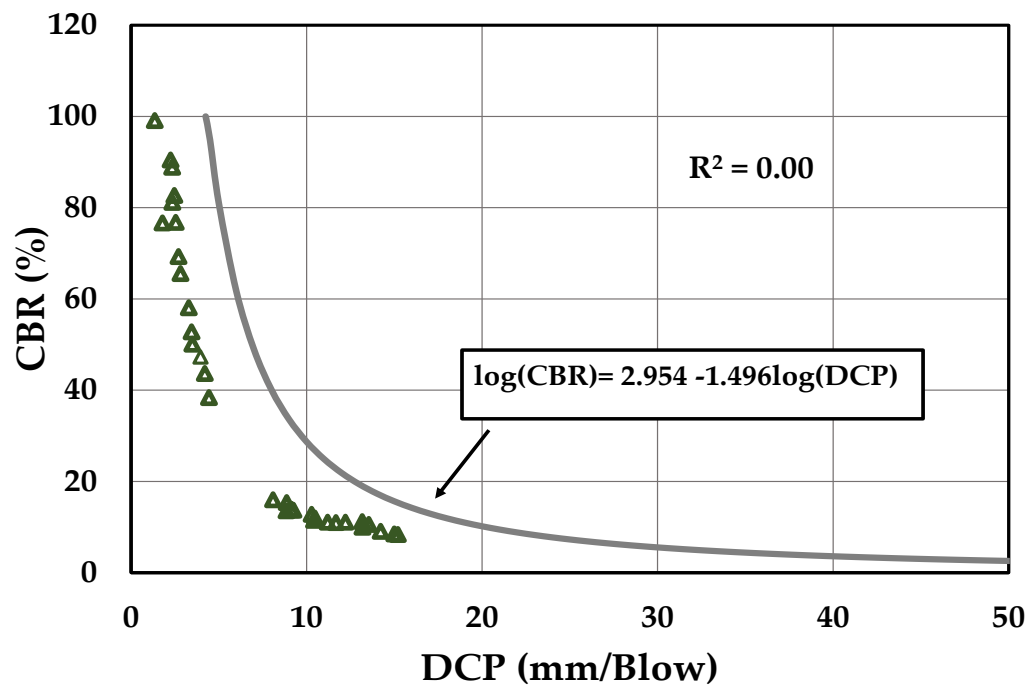
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016)
โดยใช้สมการของ Livneh (1987)



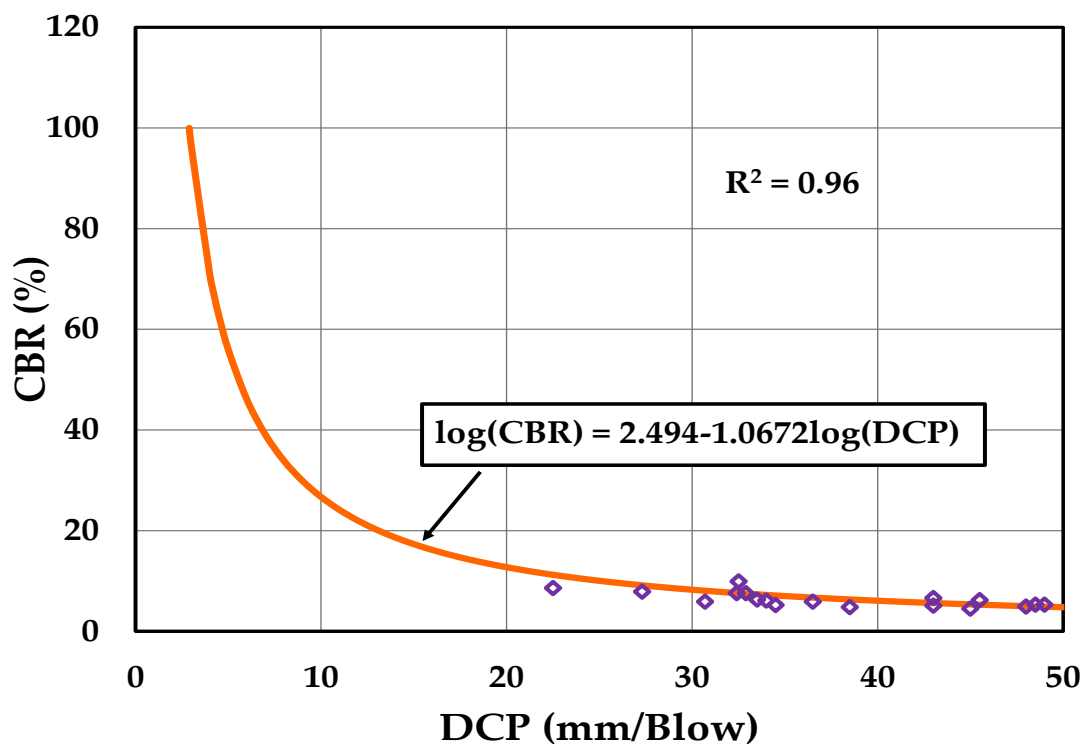
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016)
โดยใช้สมการของ U.S. Army Corps of Engineers (1992)



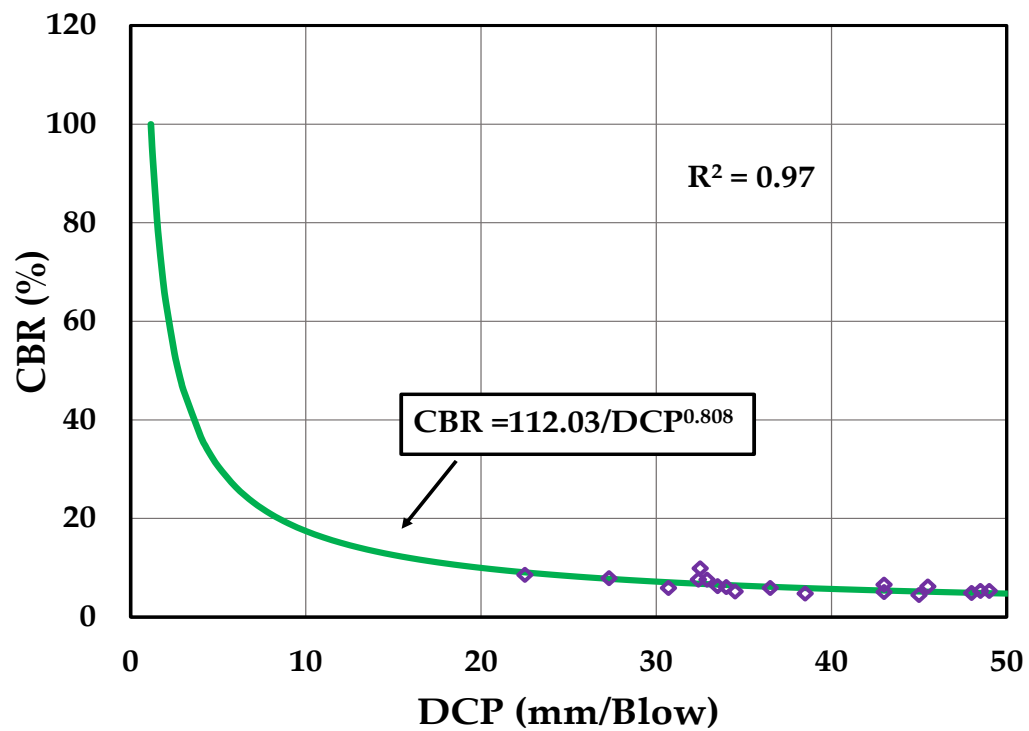
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016)
โดยใช้สมการของ TRL



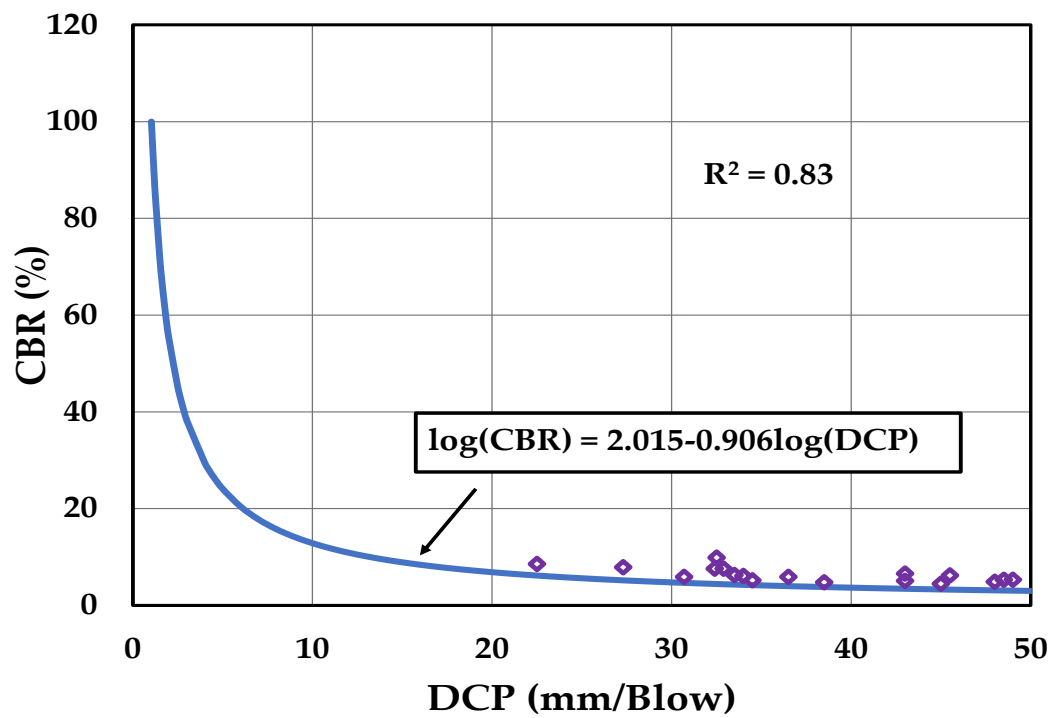
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ G. Feleke, A. Araya (2016) โดยใช้สมการของ Yitagesu (2012)



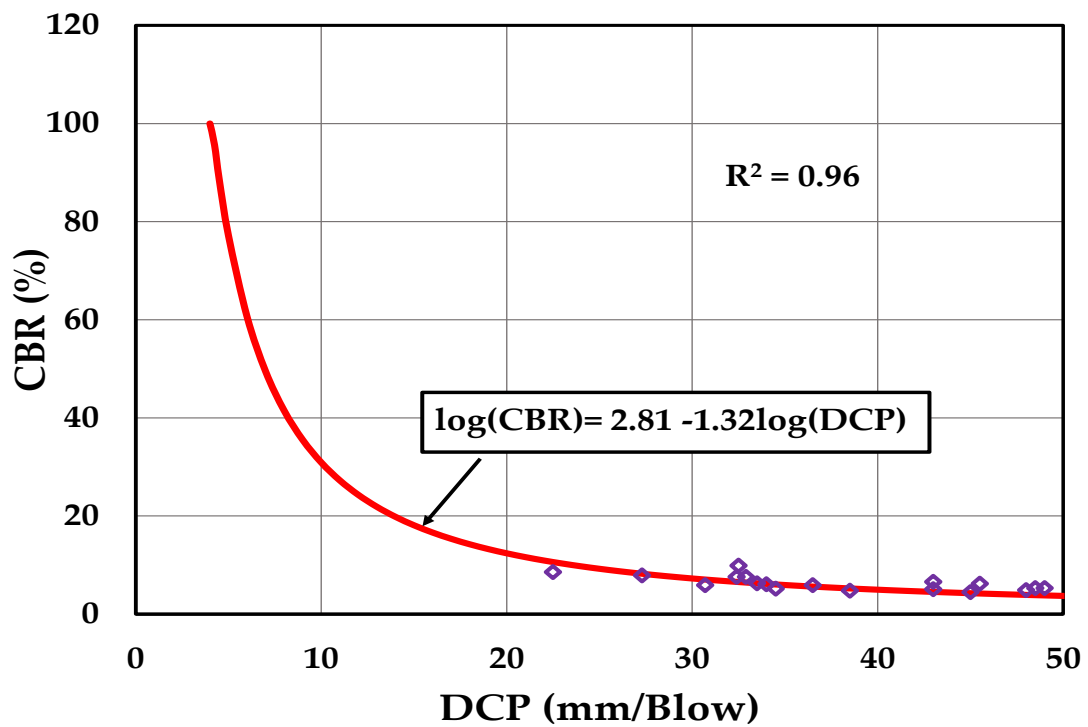
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ Al-Refeai, Al-Suhaibani (1996)



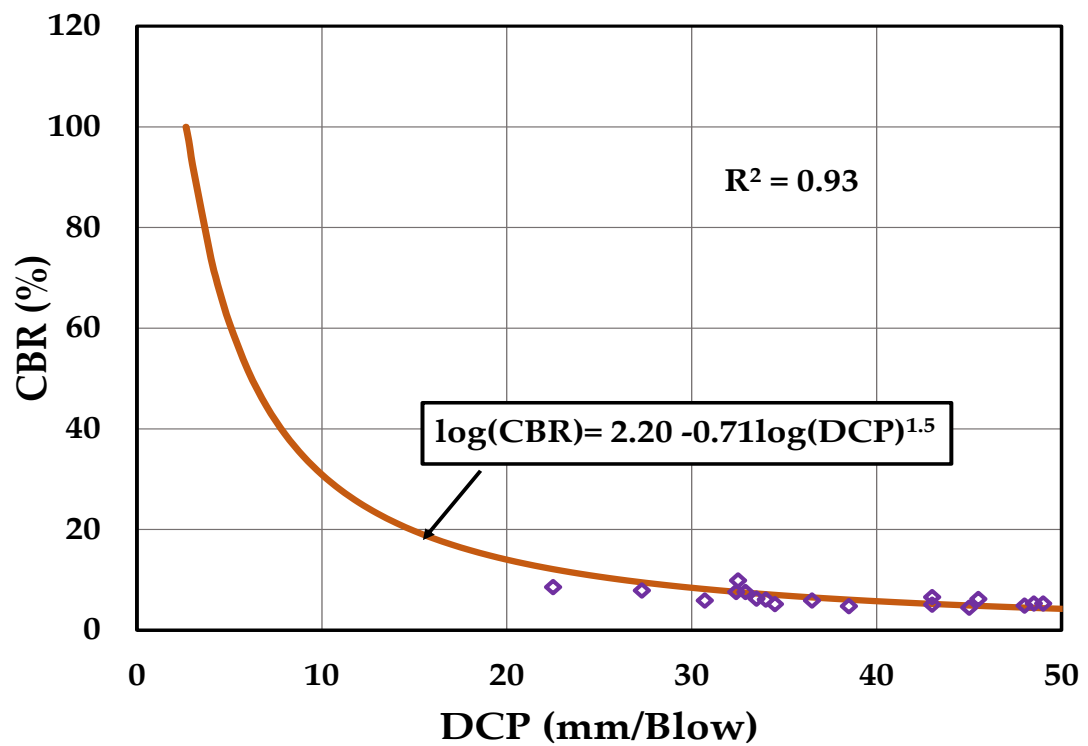
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ Fernando Jove Wilches et al. (2018)



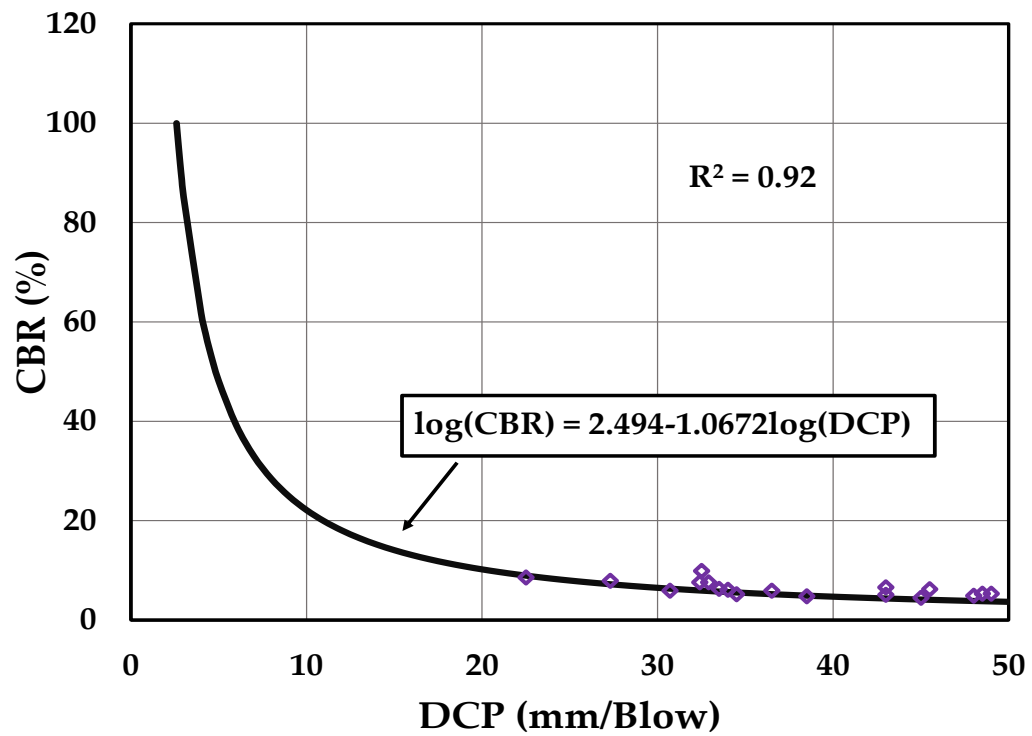
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ G. Feleke, A. Araya (2016)



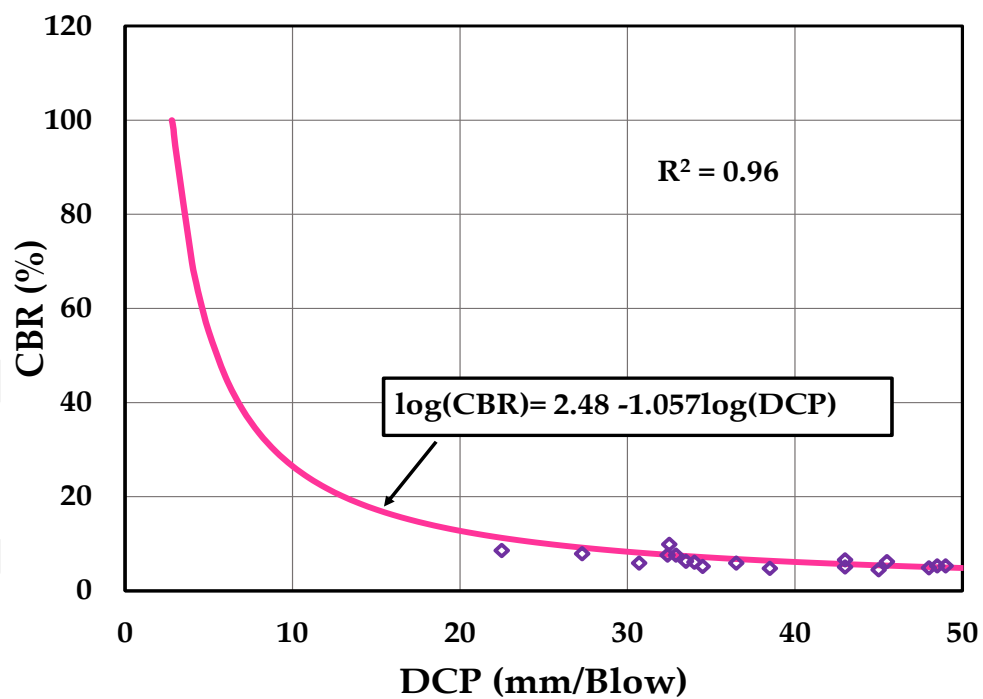
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ Harrison J.A. (1986)



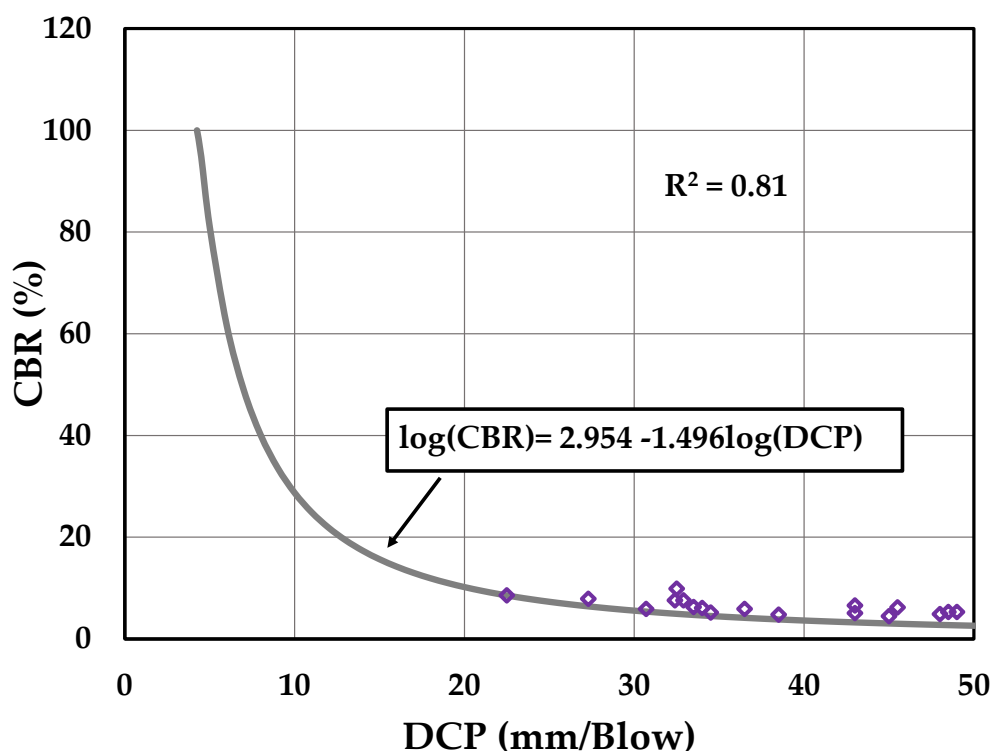
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ Livneh (1987)



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ U.S. Army Corps of Engineers (1992)



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ TRL

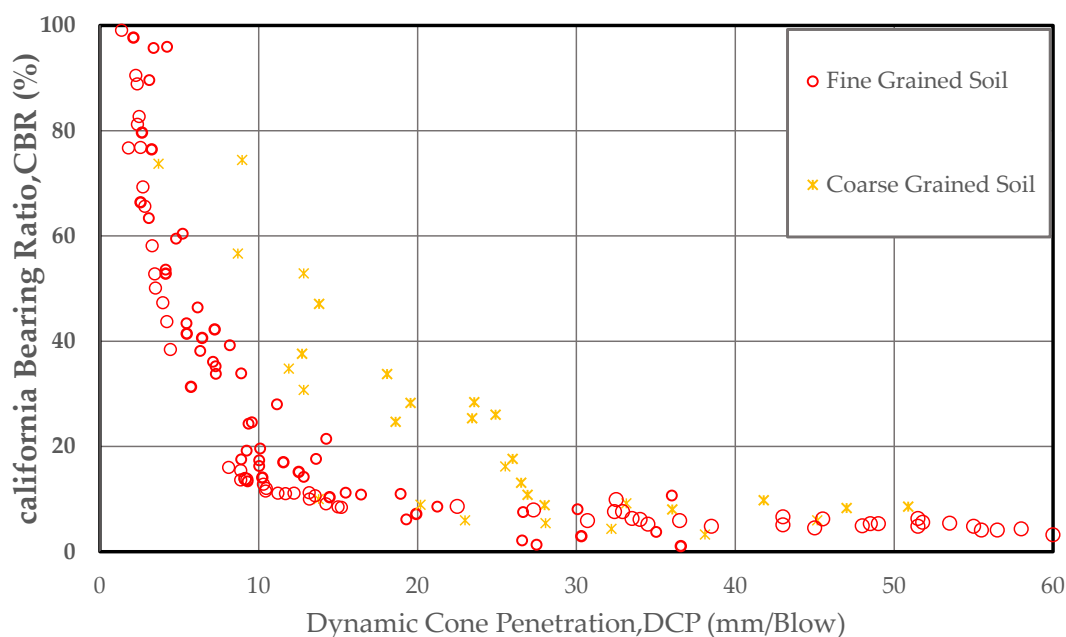


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของ Fernando Jove Wilches et al. (2018) โดยใช้สมการของ Yitagesu (2012)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สมการความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ ค้นพบว่าตัวอย่างดินมีความเฉพาะในแต่ละพื้นที่และมีการกระจายตัวค่อนข้างน้อย ทำให้ค่าความแม่นยำของสมการไม่คงที่ เช่น ข้อมูลของ Fernando Jove Wilches et al. มีค่า DCP ที่สูงส่งผลให้ค่า CBR ค่อนข้างต่ำและเริ่มคงที่ ค่าความแม่นยำจึงค่อนข้างสูง แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าสมการเหล่านั้นมีค่าความสัมพันธ์ที่ดีเนื่องจากผลการทดสอบมีเพียงช่วงปลายของเส้นกราฟ แต่ในทางกลับกันข้อมูลของ G. Feleke, A. Araya มีค่าความสัมพันธ์ที่แปรปรวนมากกว่าเนื่องจากผลการทดสอบมีเพียงช่วงเดียวและเป็นช่วงของเส้นกราฟที่โค้งลงไม่คงที่ จากทั้งสองกรณีจึงบ่งบอกได้ว่าผลการทดสอบค่า DCP และ CBR ของงานวิจัยที่ผ่านมายังคงเป็นข้อมูลเฉพาะพื้นที่ ส่งผลให้การวิเคราะห์เส้นแนวโน้มโดยรวมไม่สามารถรวมเป็นผลข้อมูลชุดเดียวกันได้

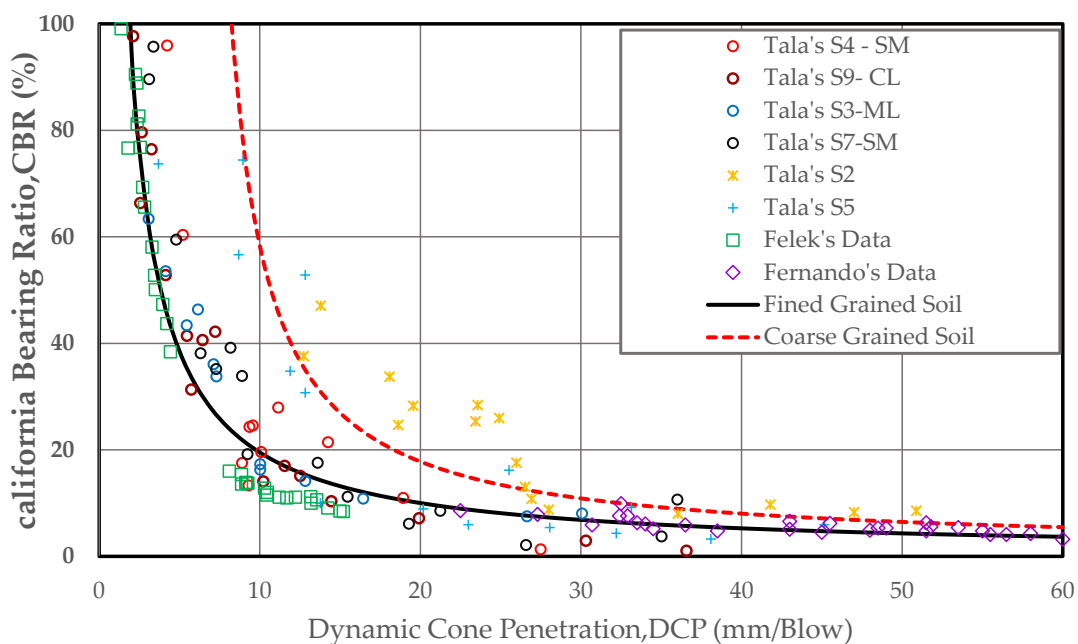
เมื่อผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ข้อมูลและศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม ค้นพบว่าผลการทดสอบจากงานวิจัยจำนวนมากสามารถจัดกลุ่มโดยใช้ขนาดผลของเม็ดดิน คือ ตัวอย่างดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ซึ่งมีผลต่อการค่า DCP และ CBR โดยตัวอย่างดินเม็ดหยาบจะมีค่า DCP และ CBR ที่สูงกว่าตัวอย่างดินเม็ดละเอียด ด้วยขนาดของเม็ดดินที่มีความแตกต่างกันย่อมส่งผลต่อกำลังของดินให้มีความแตกต่างกัน เป็นผลให้ผลการทดสอบมีค่าการกระจายตัวอย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์ข้อมูล ค้นพบว่าตัวอย่างดินของงานวิจัยโดยส่วนใหญ่เป็นดินเม็ดละเอียด แต่งานวิจัยของ Al-Refeai, Al-Suhaibani มีผลการทดสอบของตัวอย่างดินเม็ดหยาบคือ S2 และ S5 ซึ่งมีแนวโน้มที่อยู่สูงกว่าตัวอย่างดินเม็ดละเอียด จึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีเส้นแนวโน้มเฉพาะระหว่าง ดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของตัวอย่างดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด

แนวโน้มที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกได้ว่าตัวอย่างดินเม็ดหยาบจะมีค่า DCP และ CBR สูงกว่า ตัวอย่างดินเม็ดละเอียด ตัวอย่างดินจากงานวิจัยของ Al-Refeai, Al-Suhaibani มีบางส่วนเป็นดินเม็ดหยาบ คือ SP และ SP-SM ในระบบ USCS หรือ A-1-a ในระบบ ASSTHO ซึ่งมีคุณสมบัติของดินทรายเป็นส่วนประกอบที่น้อย ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้สูงสุด 15% เมื่อพิจารณาข้อมูลเพิ่มเติมพบว่ามีดินอีกชนิดคือ SM ซึ่งจัดอยู่ในช่วงดินเม็ดละเอียด จึงเกิดสมมติฐานว่าการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด น่าจะใช้คุณสมบัติของทรายเป็นตัวกำหนดแบ่งช่วง ทำให้สามารถเกิดเส้นแนวโน้มที่ชัดเจน ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นสร้างเส้นแนวโน้มได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของตัวอย่างดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด

เส้นแนวโน้มทั้งสองครอบคลุมตัวอย่างดินจากงานวิจัยจำนวนมาก เพื่อยืนยันความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้มีการทดสอบตัวอย่างดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยมีพื้นที่ในจังหวัดมหาสารคาม ขอนแก่น กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ดและชัยภูมิ จำนวน 21 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบ DCP และ CBR พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ของทั้งสองการทดสอบว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการดำเนินงานวิจัยช่วยให้ผู้วิจัยได้ดำเนินงานเป็นไปตามแผนที่วางเอาไว้ โดยการเก็บตัวอย่างดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 5 จังหวัด ได้แก่ มหาสารคาม ขอนแก่น ชัยภูมิ ร้อยเอ็ดและกาฬสินธุ์ โดยดำเนินการเก็บตัวอย่างภายในแต่ละจังหวัดจำนวน 3 อำเภอ อำเภอละ 1 ตัวอย่าง พร้อมทำการทดสอบจำแนกดินตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการจำแนกดิน

สถานที่		Atterberg's Limits		Gs	AASHTO	USCS
		LL(%)	PL(%)			
มหาสารคาม	อ.เมือง	18.27	12.73	2.69	A-2-4	SC-SM
	อ.บรบือ	24.50	11.29	2.67	A-2-6	SC

	อ.กันทรวิชัย	15.99	11.48	2.65	A-2-4	SC-SM
ขอนแก่น	อ.บ้านไผ่	17.43	8.39	2.65	A-2-4	SC
	อ.ชนบท	19.27	9.52	2.67	A-2-4	SC
	อ.โคกโพธิ์ชัย	20.12	8.97	2.65	A-2-6	SC
ชัยภูมิ	อ.เมือง	19.50	4.02	2.66	A-2-6	SC
	อ.แก้งคร้อ	18.02	8.45	2.68	A-2-4	SC
	อ.คอนสวรรค์	21.89	5.45	2.63	A-2-6	SC
ร้อยเอ็ด	อ.โพนทราย	15.78	4.94	2.67	A-2-6	SC
	อ.โพนทอง	20.56	11.70	2.67	A-2-4	SC
	อ.หนองพอก	27.56	7.52	2.66	A-2-6	SC
กาฬสินธุ์	อ.กมลาไสย	19.95	11.73	2.64	A-2-4	SC
	อ.ฆ้องชัย	23.21	8.60	2.63	A-2-6	SC
	อ.ร่องคำ	18.27	12.19	2.62	A-2-4	SC-SM

การทดสอบหาความแข็งแรงของดิน จำเป็นจะต้องทำการทดสอบ Compaction เพื่อหาความชื้นที่เหมาะสมสำหรับดินแต่ละชนิด ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบเพื่อหาความชื้นที่เหมาะสมสำหรับแต่ละตัวอย่างดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ Compaction และ CBR

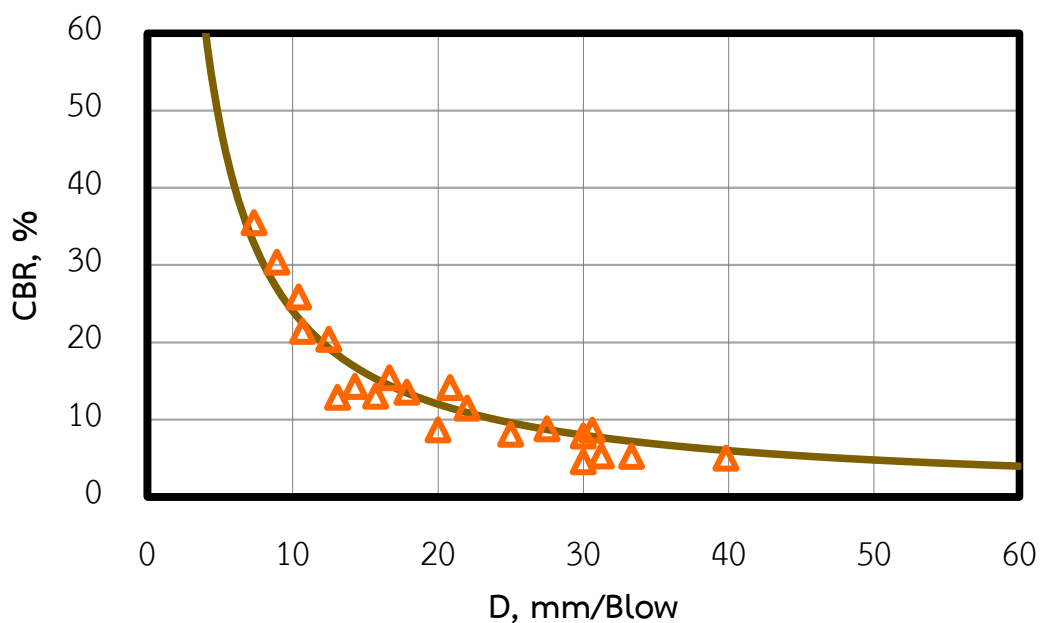
สถานที่/พารามิเตอร์		Compaction test		CBR (%)		
		%OMC	MDD	Unsoak	Soak	Swelling
มหาสารคาม	อ.เมือง	9.80	1.84	14.18	9.98	0.00
	อ.บรบือ	9.83	1.79	12.92	9.07	0.00
	อ.กันทรวิชัย	11.60	1.71	5.32	4.58	4.67
ขอนแก่น	อ.บ้านไผ่	9.62	1.75	8.66	7.86	0.00
	อ.ชนบท	9.81	1.74	8.13	7.11	0.00
	อ.โคกโพธิ์ชัย	9.50	1.79	7.88	6.65	5.07
ชัยภูมิ	อ.เมือง	10.00	1.89	15.44	14.51	0.00
	อ.แก้งคร้อ	11.50	1.64	4.54	3.02	2.38
	อ.คอนสวรรค์	9.60	1.76	21.42	19.05	0.00

ร้อยเอ็ด	อ.โพธิ์ชัย	10.10	1.73	8.82	6.35	1.00
	อ.โพนทอง	10.10	1.78	11.50	10.88	14.69
	อ.หนองพอก	9.98	1.86	13.02	10.88	0.26
กาฬสินธุ์	อ.กมลาไสย	9.95	1.94	20.37	13.81	0.50
	อ.ฆ้องชัย	10.20	1.86	13.55	10.28	0.00
	อ.ร่องคำ	9.62	1.85	14.28	11.09	1.03

การทดสอบเพื่อหาค่า %CBR และค่า DCP ดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ผู้วิจัยทำการทดสอบเพื่อหาค่า %CBR ทั้งสองสภาวะ คือ Unsoak CBR และ Soak CBR พร้อมทั้งหาค่าการบวมตัวของดิน (Swelling)

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ DCP และ %CBR

สถานที่		CBR (%)			DCP
		Unsoak	Soak	Swelling	
มหาสารคาม	อ.เมือง	14.18	9.98	0.00	20.83
	อ.บรบือ	12.92	9.07	0.00	13.10
	อ.กันทรวิชัย	5.32	4.58	4.67	31.25
ขอนแก่น	อ.บ้านไผ่	8.66	7.86	0.00	20.00
	อ.ชนบท	8.13	7.11	0.00	25.00
	อ.โคกโพธิ์ชัย	7.88	6.65	5.07	30.00
ชัยภูมิ	อ.เมือง	15.44	13.00	0.00	16.67
	อ.แก้งคร้อ	4.54	3.02	2.38	30.00
	อ.คอนสวรรค์	21.42	19.05	0.00	10.70
ร้อยเอ็ด	อ.โพธิ์ชัย	8.82	6.35	1.00	27.50
	อ.โพนทอง	11.50	10.88	14.69	22.00
	อ.หนองพอก	13.02	10.88	0.26	15.71
กาฬสินธุ์	อ.กมลาไสย	20.37	13.81	0.50	12.50
	อ.ฆ้องชัย	13.55	10.28	0.00	17.86
	อ.ร่องคำ	9.80	1.853	14.28	11.09

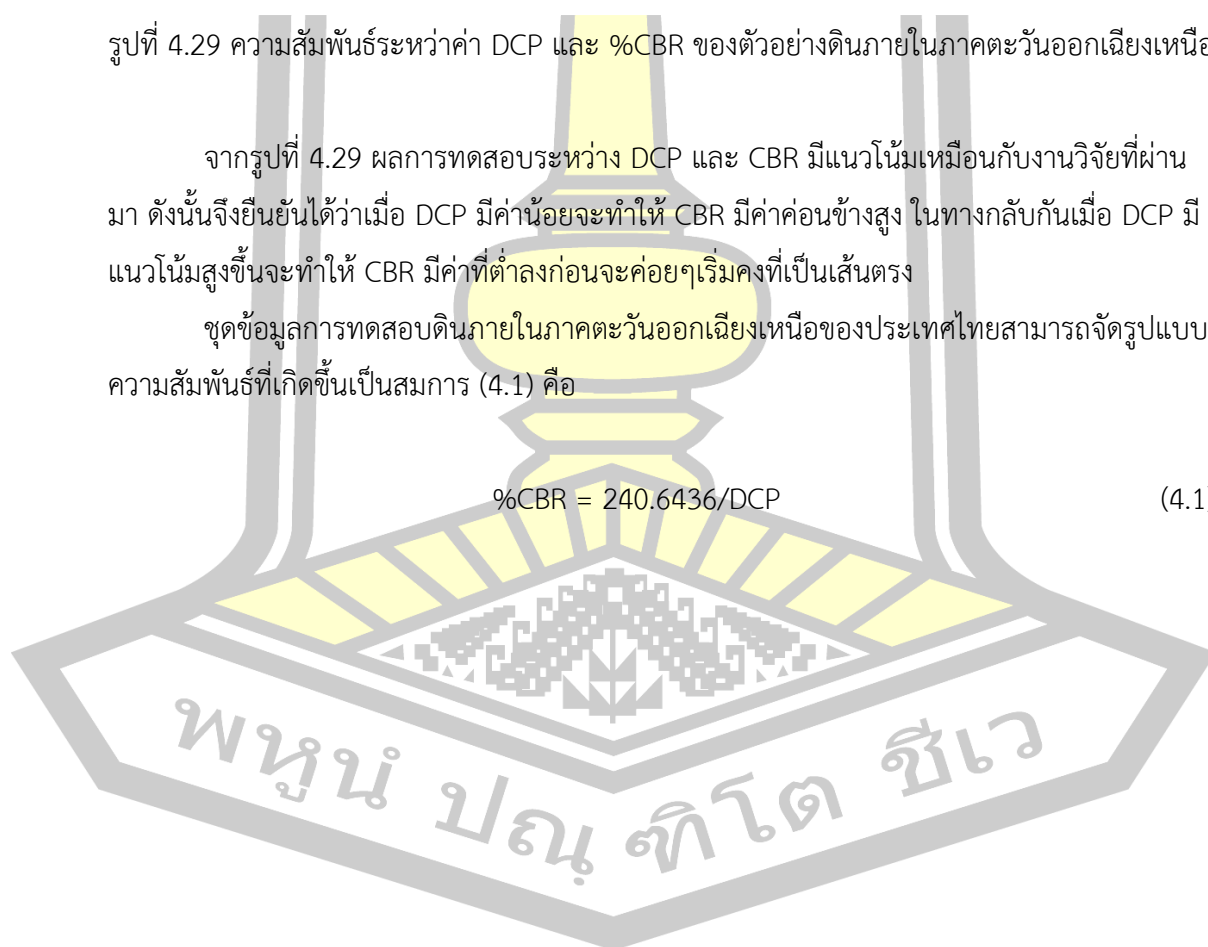


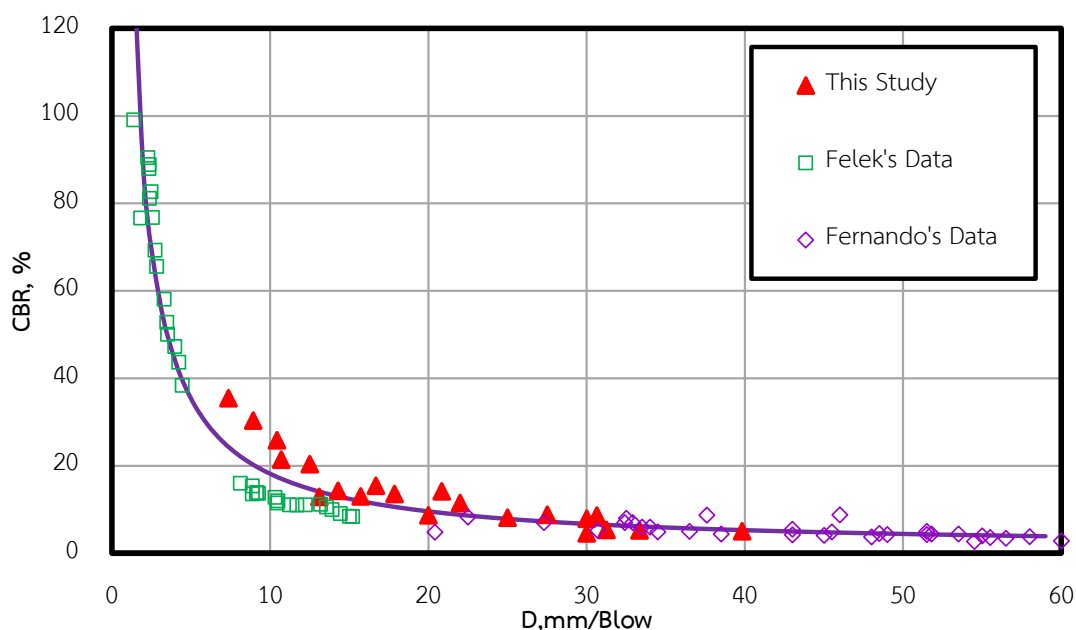
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของตัวอย่างดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จากรูปที่ 4.29 ผลการทดสอบระหว่าง DCP และ CBR มีแนวโน้มเหมือนกับงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าเมื่อ DCP มีค่าน้อยจะทำให้ CBR มีค่าค่อนข้างสูง ในทางกลับกันเมื่อ DCP มีแนวโน้มสูงขึ้นจะทำให้ CBR มีค่าที่ต่ำลงก่อนจะค่อยๆเริ่มคงที่เป็นเส้นตรง

ชุดข้อมูลการทดสอบดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยสามารถจัดรูปแบบความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเป็นสมการ (4.1) คือ

$$\%CBR = 240.6436/DCP \quad (4.1)$$

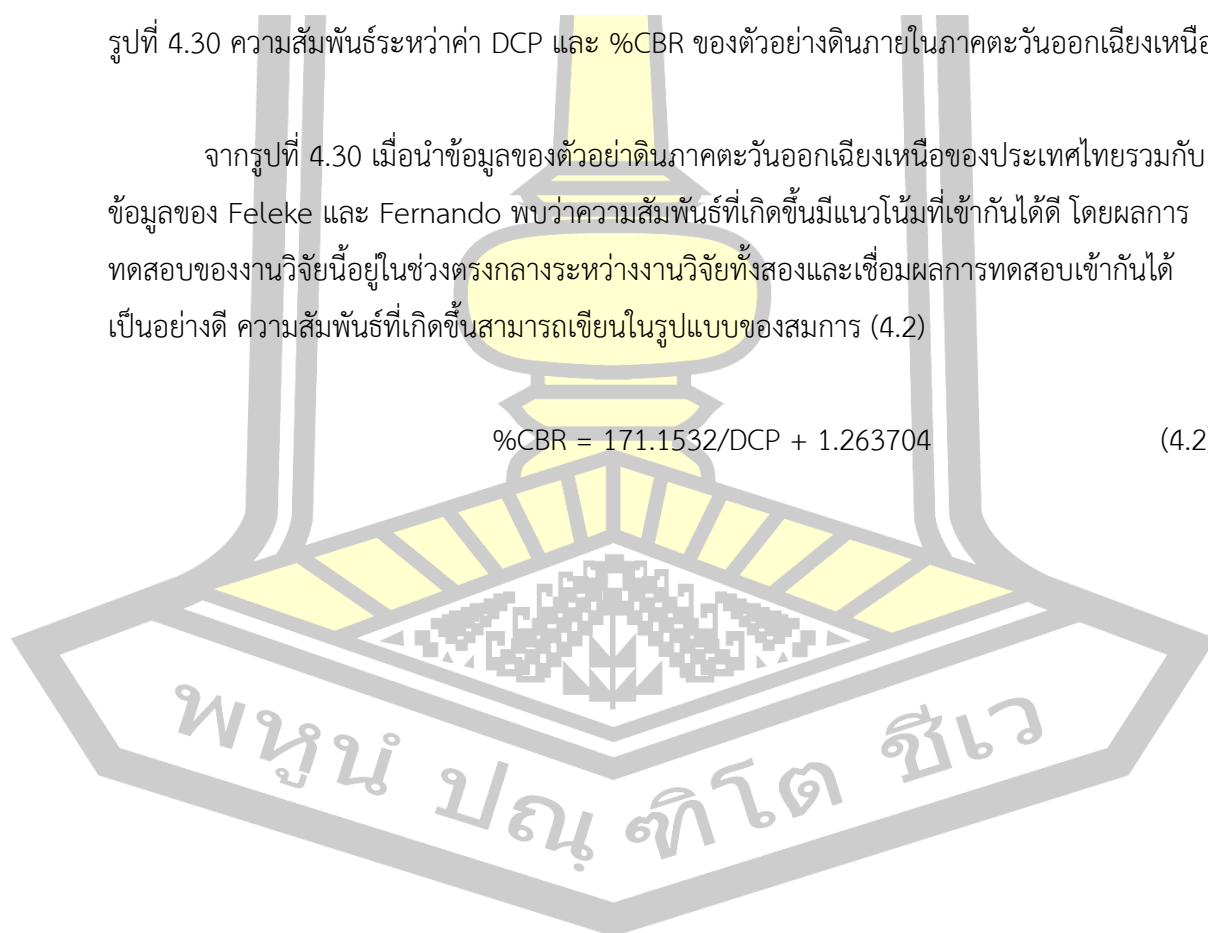


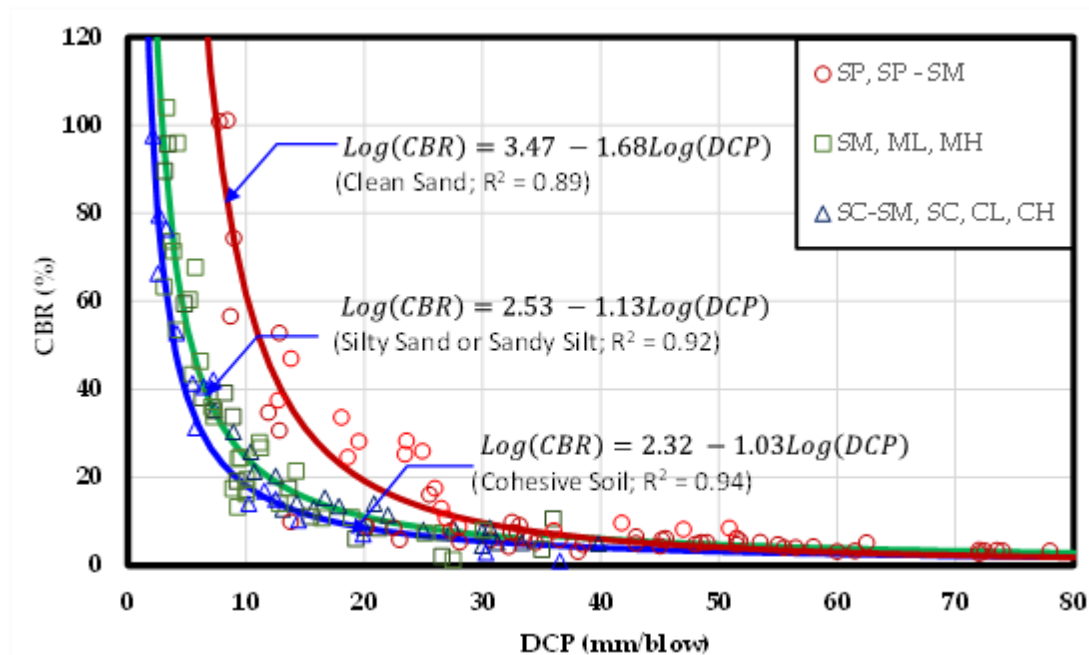


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของตัวอย่างดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จากรูปที่ 4.30 เมื่อนำข้อมูลของตัวอย่างดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยรวมกับข้อมูลของ Feleke และ Fernando พบว่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่เข้ากันได้ดี โดยผลการทดสอบของงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงตรงกลางระหว่างงานวิจัยทั้งสองและเชื่อมผลการทดสอบเข้ากันได้เป็นอย่างดี ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนในรูปแบบของสมการ (4.2)

$$\%CBR = 171.1532/DCP + 1.263704 \quad (4.2)$$





รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DCP และ %CBR ของตัวอย่างดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และงานวิจัยอื่นๆ

จากรูปที่ 4.31 เมื่อรวบรวมข้อมูลงานวิจัยทั้งหมดเป็นชุดข้อมูลเดียวกัน สามารถจัดรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง DCP และ CBR ได้เป็น 2 กรณี คือ ชุดข้อมูลของตัวอย่างดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด ความสัมพันธ์ที่ 2 กรณีมีเส้นแนวโน้มที่ดีและสามารถประเมินค่า CBR ด้วย DCP ได้แม่นยำระดับหนึ่ง ผู้วิจัยจึงเสนอความสัมพันธ์ของเส้นแนวโน้มทั้งสองในรูปแบบสมการ (4.3) และ (4.4)

$$\text{Log (CBR)} = 3.47 - 1.68\text{Log (DCP)} \text{ (Clean Sand; } R^2 = 0.89) \quad (4.3)$$

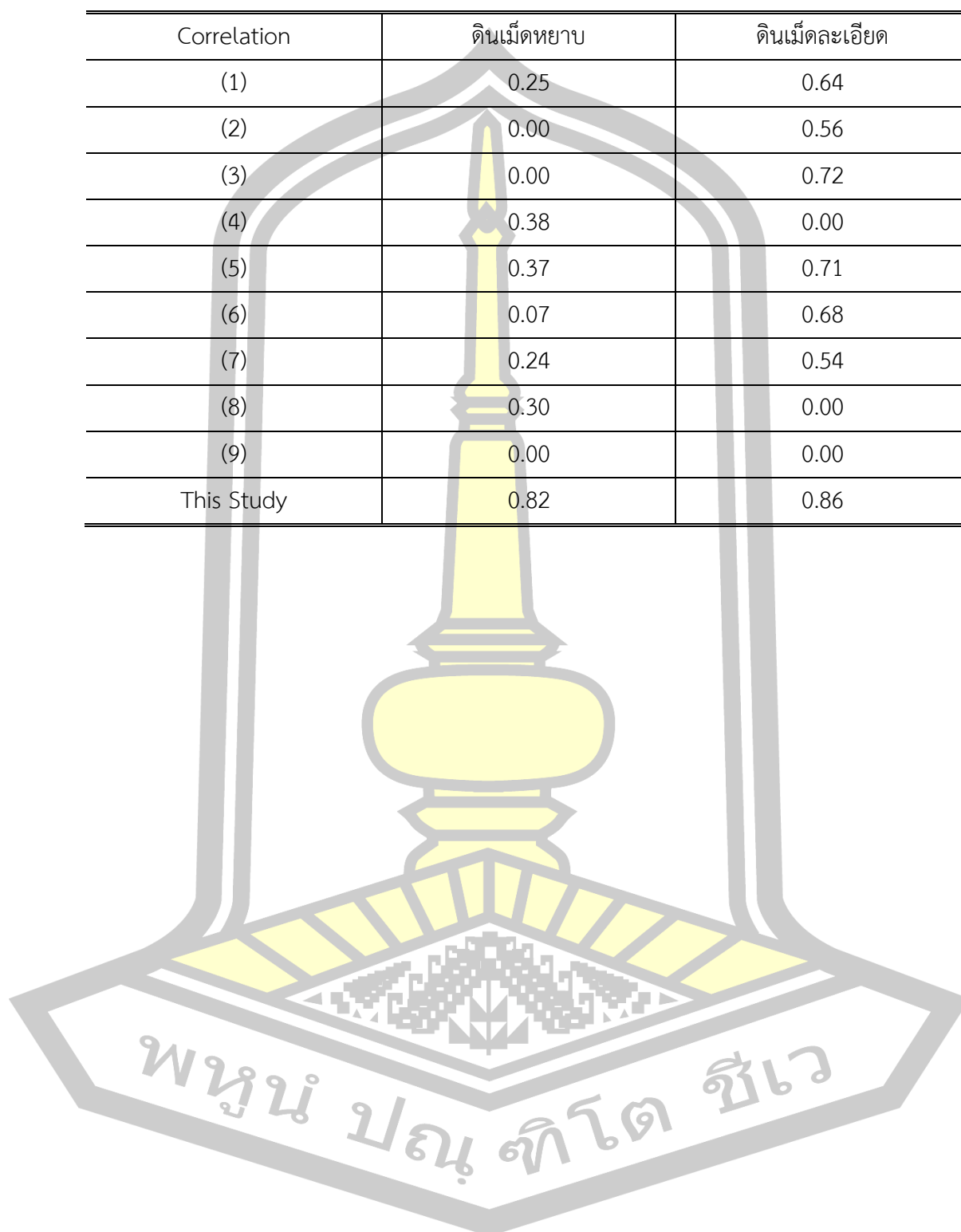
$$\text{Log (CBR)} = 2.53 - 1.13\text{Log (DCP)} \text{ (Silty Sand; } R^2 = 0.92) \quad (4.4)$$

$$\text{Log (CBR)} = 2.32 - 1.03\text{Log (DCP)} \text{ (Cohesion Soil; } R^2 = 0.94) \quad (4.5)$$

พร้อมกันนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแม่นยำของสมการที่ปรับปรุงขึ้นใหม่ โดยการประเมินเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์รูปแบบอื่นสำหรับตัวอย่างดินแบบ General ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 R² แบบ General

Correlation	ดินเม็ดหยาบ	ดินเม็ดละเอียด
(1)	0.25	0.64
(2)	0.00	0.56
(3)	0.00	0.72
(4)	0.38	0.00
(5)	0.37	0.71
(6)	0.07	0.68
(7)	0.24	0.54
(8)	0.30	0.00
(9)	0.00	0.00
This Study	0.82	0.86



บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ค่าแคลิฟอร์เนียเบร็งเรโซที่ได้จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตและการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด พบว่ามีค่าที่ได้มีความแตกต่างกันตามแต่ละภูมิภาค ตัวอย่างของดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินที่ใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้ค่า CBR มีความใกล้เคียงกันด้วย แต่เมื่อได้ทำการสำรวจงานวิจัยอื่นค้นพบว่ามีความโน้มเอียงกลุ่มเช่นเดียวกัน แต่จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปตามพื้นที่ศึกษา

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ค้นพบว่ามึนักวิจัยจำนวนหนึ่งเคยทำการศึกษาและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และ DCP โดยมีความสัมพันธ์ทั้งหมด 9 สมการ เมื่อทำการวิเคราะห์และประเมินสมการทั้ง 9 โดยใช้ผลการทดสอบจากงานวิจัยจำนวน 3 เรื่องและผลการทดสอบวัสดุดินภายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่าค่าความแม่นยำยังไม่เป็นที่พอใจเนื่องจากแต่ละความสัมพันธ์อาจให้ค่าความแม่นยำที่น่าเชื่อถือสำหรับวัสดุในบางพื้นที่เท่านั้นหรืออาจไม่มีความแม่นยำเลย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงหรือเสนอความสัมพันธ์ชุดใหม่เพื่อให้สามารถใช้ประเมินค่า CBR ได้โดยทั่วไปและมีความน่าเชื่อถือในระดับที่น่าพอใจ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สามารถประเมินค่า CBR โดยใช้ความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงของดินคือค่า DCP เฉพาะพื้นที่การศึกษาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีค่าความสัมพันธ์คือ $\%CBR = 240.6436/DCP$ แต่เนื่องด้วยผู้วิจัยต้องการค่าความสัมพันธ์ที่มีความแม่นยำและครอบคลุมตัวอย่างของดิน อีกทั้งยังต้องเป็นความสัมพันธ์ที่ไม่มีความซับซ้อนมากเกินไปให้มากที่สุด จึงทำการศึกษารวบรวมข้อมูลทั้งหมดและสามารถทำการวิเคราะห์เพื่อสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้คือ

$$\text{Log (CBR)} = 3.47 - 1.68\text{Log (DCP)}; R^2 = 0.89 \text{ สำหรับดินทราย}$$

$$\text{Log (CBR)} = 2.53 - 1.13\text{Log (DCP)}; R^2 = 0.92 \text{ สำหรับดินทรายปะปนดินตะกอน}$$

$$\text{Log (CBR)} = 2.32 - 1.03\text{Log (DCP)}; R^2 = 0.94 \text{ สำหรับดินเหนียวหรือดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว}$$

จากค่าความสัมพันธ์ที่ปรับปรุงใหม่และค่าความแม่นยำในการประเมินค่าความแข็งแรงของดิน ผู้วิจัยมีความเห็นว่าเพียงพอแล้วกับการนำไปใช้ประเมินค่าความแข็งแรงของดินได้โดยทั่วไปและมีความแม่นยำที่น่าพึงพอใจ ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. Dynamic Cone Penetration Test เป็นการทดสอบที่รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายภายในสนาม แต่การทดลองนี้เป็นการทดสอบความแข็งแรงของตัวอย่างดินตามธรรมชาติในเบื้องต้น การทดลองที่ได้จึงเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ในการทดลองครั้งต่อไปควรศึกษาและทดลองโดยวิธีการทดลองอื่นๆเพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือมากขึ้น

2. ด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงอาจจะมีปัญหาในการทดลอง และอาจทำให้ผลของการทดลองมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นก่อนที่จะทำการทดสอบทุกครั้งควรจะมีการตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ

3. การทดสอบนี้เป็นการทดสอบสำหรับขั้นตอนการสำรวจและออกแบบแหล่งวัสดุเพื่อความรวดเร็วและประหยัดงบประมาณเพียงเท่านั้น





ภาคผนวก

พหุมนุ ปณ จิต ชีเว

ภาคผนวก ก.

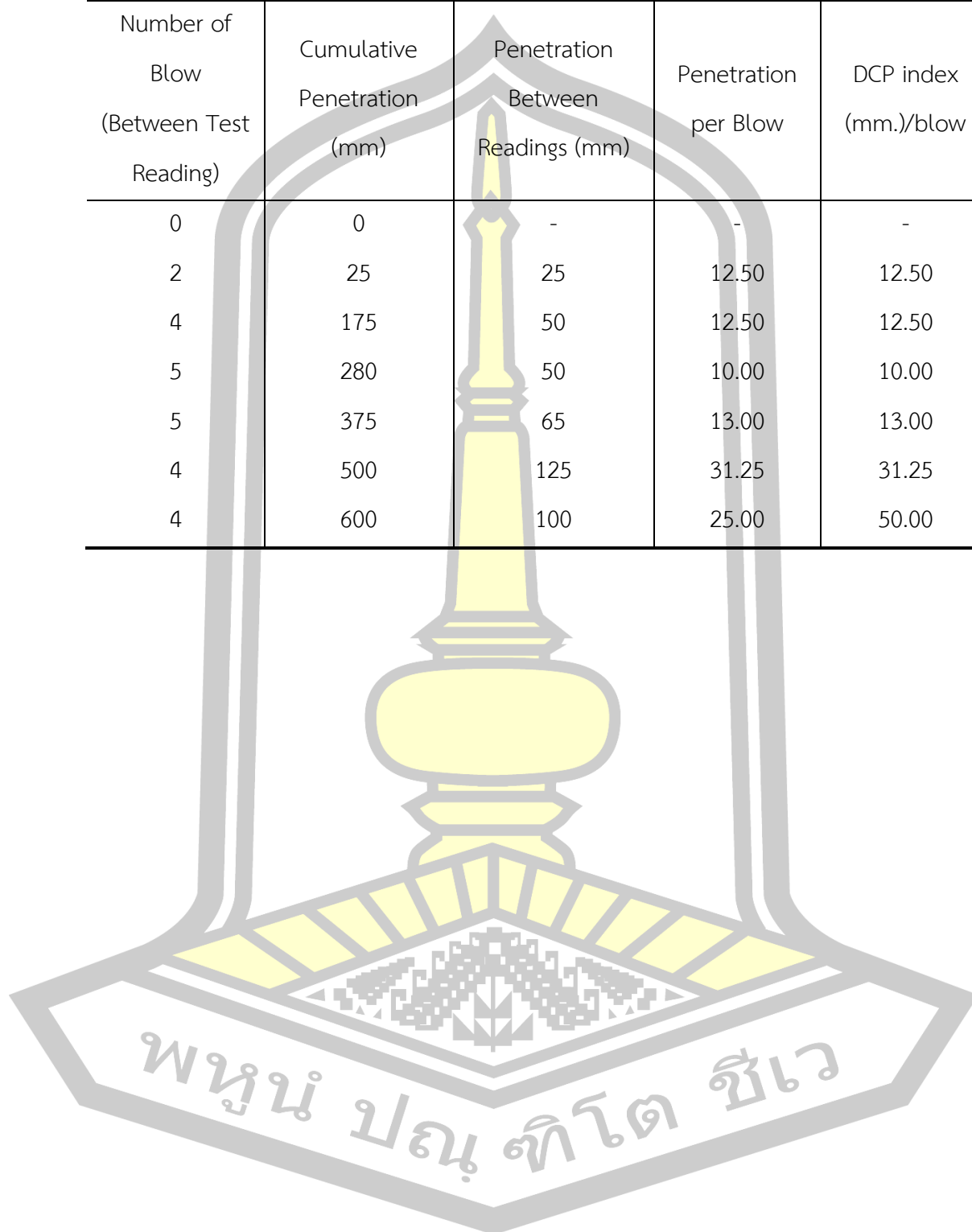
ตารางที่ 1 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.เมือง จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
3	25	25	8.33	8.33	27.17
4	55	30	7.50	7.50	30.57
5	125	70	14.00	14.00	15.20
5	175	50	10.00	10.00	22.15
5	205	30	6.00	6.00	39.25
6	230	25	4.17	4.17	59.05
5	280	50	10.00	10.00	22.15
6	310	30	5.00	5.00	48.14
5	375	65	13.00	13.00	16.51
7	500	125	17.86	17.86	11.57
10	604.15	104.15	10.42	20.83	9.74



ตารางที่ 2 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
2	25	25	12.50	12.50	17.25
4	175	50	12.50	12.50	17.25
5	280	50	10.00	10.00	22.15
5	375	65	13.00	13.00	16.51
4	500	125	31.25	31.25	6.18
4	600	100	25.00	50.00	3.65



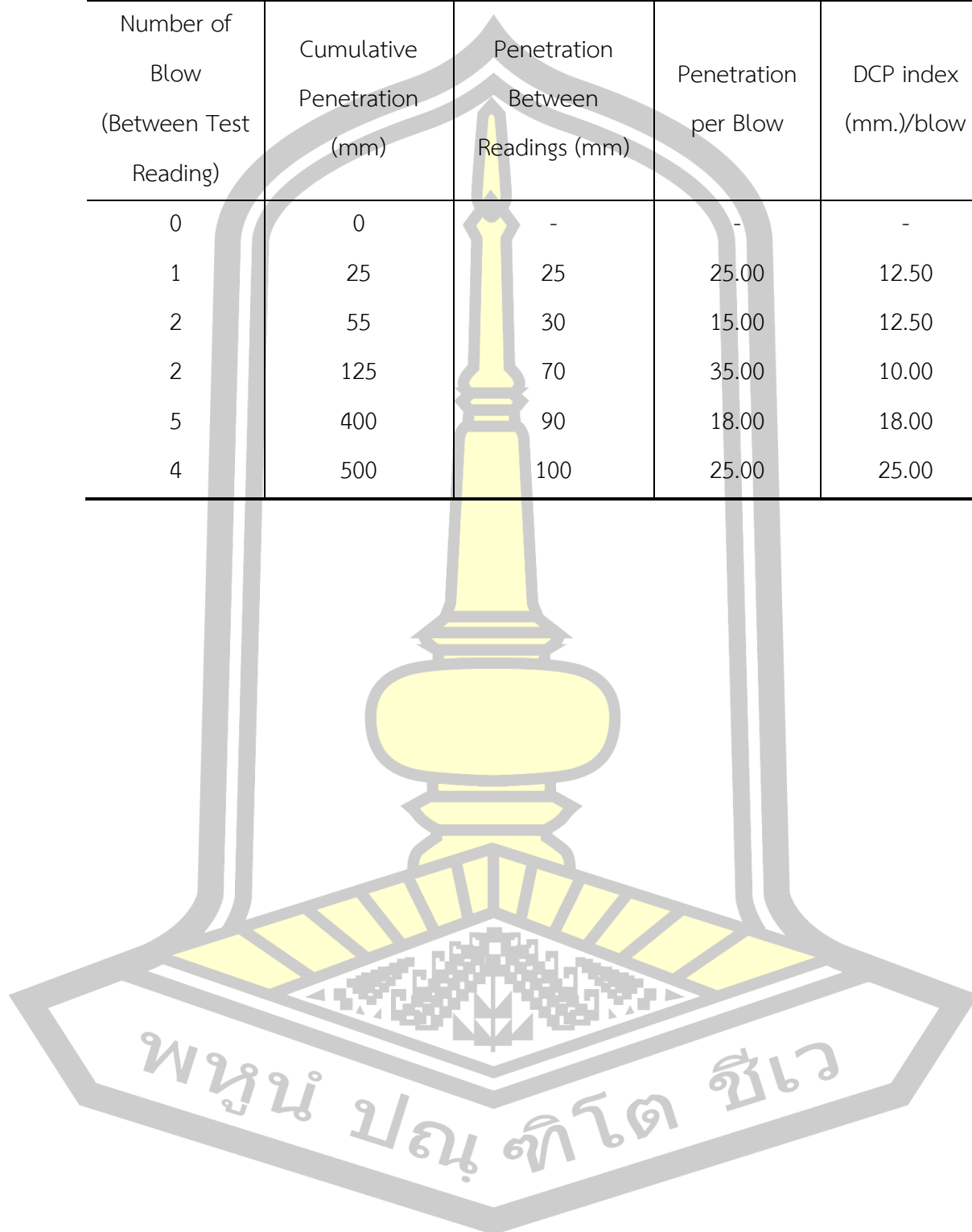
ตารางที่ 3 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.บรบือ จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
3	25	25	8.33	8.33	27.17
4	55	30	7.50	7.50	30.57
5	125	70	14.00	14.00	15.20
5	175	50	10.00	10.00	22.15
5	205	30	6.00	6.00	39.25
6	230	25	4.17	4.17	59.05
5	280	50	10.00	10.00	22.15
6	310	30	5.00	5.00	48.14
5	375.5	65.5	13.10	13.10	16.37
5	500.5	125	25.00	25.00	7.94
6	600.5	100	16.67	33.33	5.75



ตารางที่ 4 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.ชนบท จ.ขอนแก่น

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	12.50	17.25
2	55	30	15.00	12.50	17.25
2	125	70	35.00	10.00	22.15
5	400	90	18.00	18.00	11.47
4	500	100	25.00	25.00	7.94



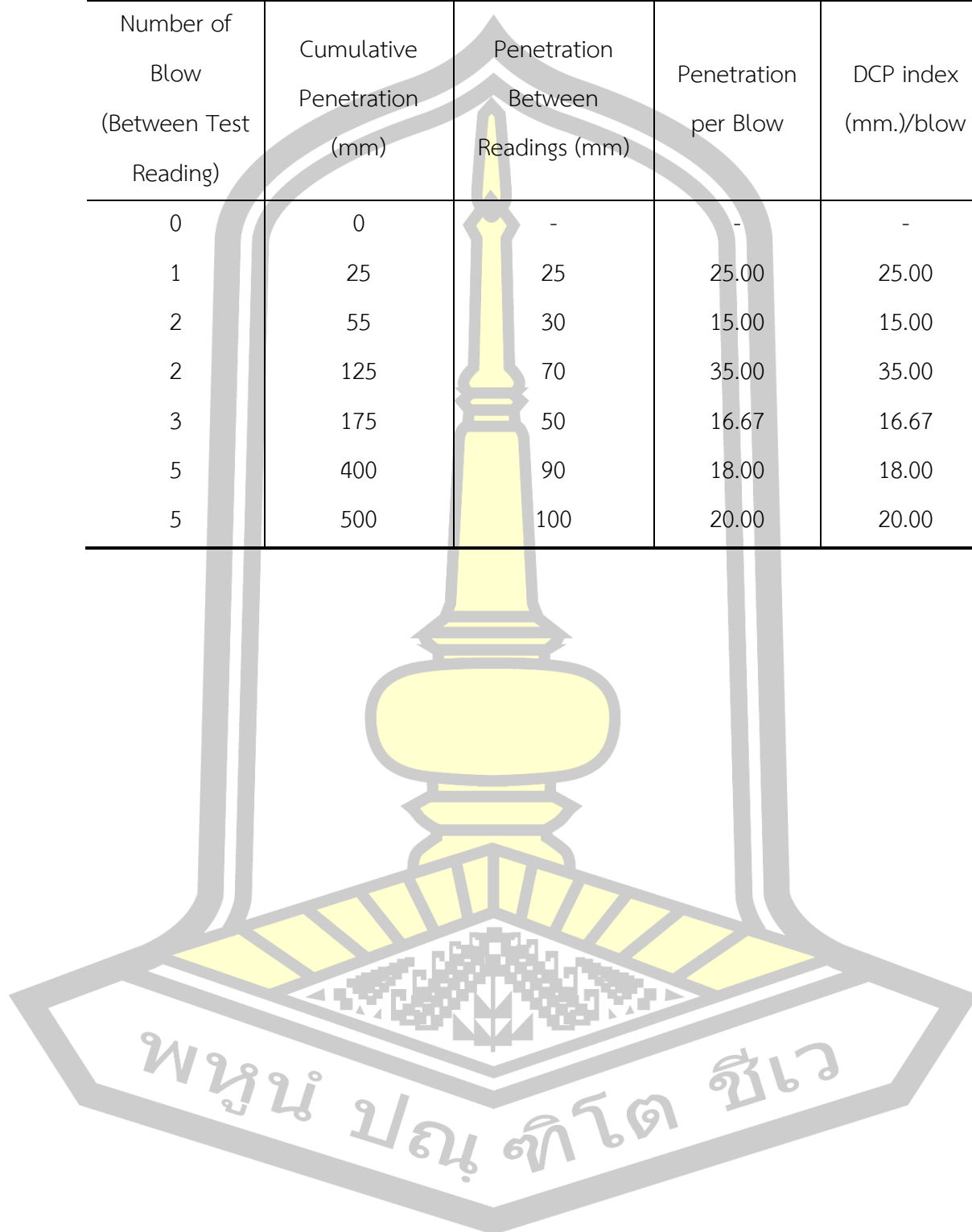
ตารางที่ 5 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.โคกโพธิ์ชัย จ.ขอนแก่น

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
3	175	50	16.67	16.67	12.50
5	205	30	6.00	6.00	39.25
5	230	25	5.00	5.00	48.14
5	280	50	10.00	10.00	22.15
5	310	30	6.00	6.00	39.25
5	350	40	8.00	8.00	28.44
5	500	150	30.00	30.00	6.47
4	600	100	25.00	50.00	3.65



ตารางที่ 6 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
3	175	50	16.67	16.67	12.50
5	400	90	18.00	18.00	11.47
5	500	100	20.00	20.00	10.19



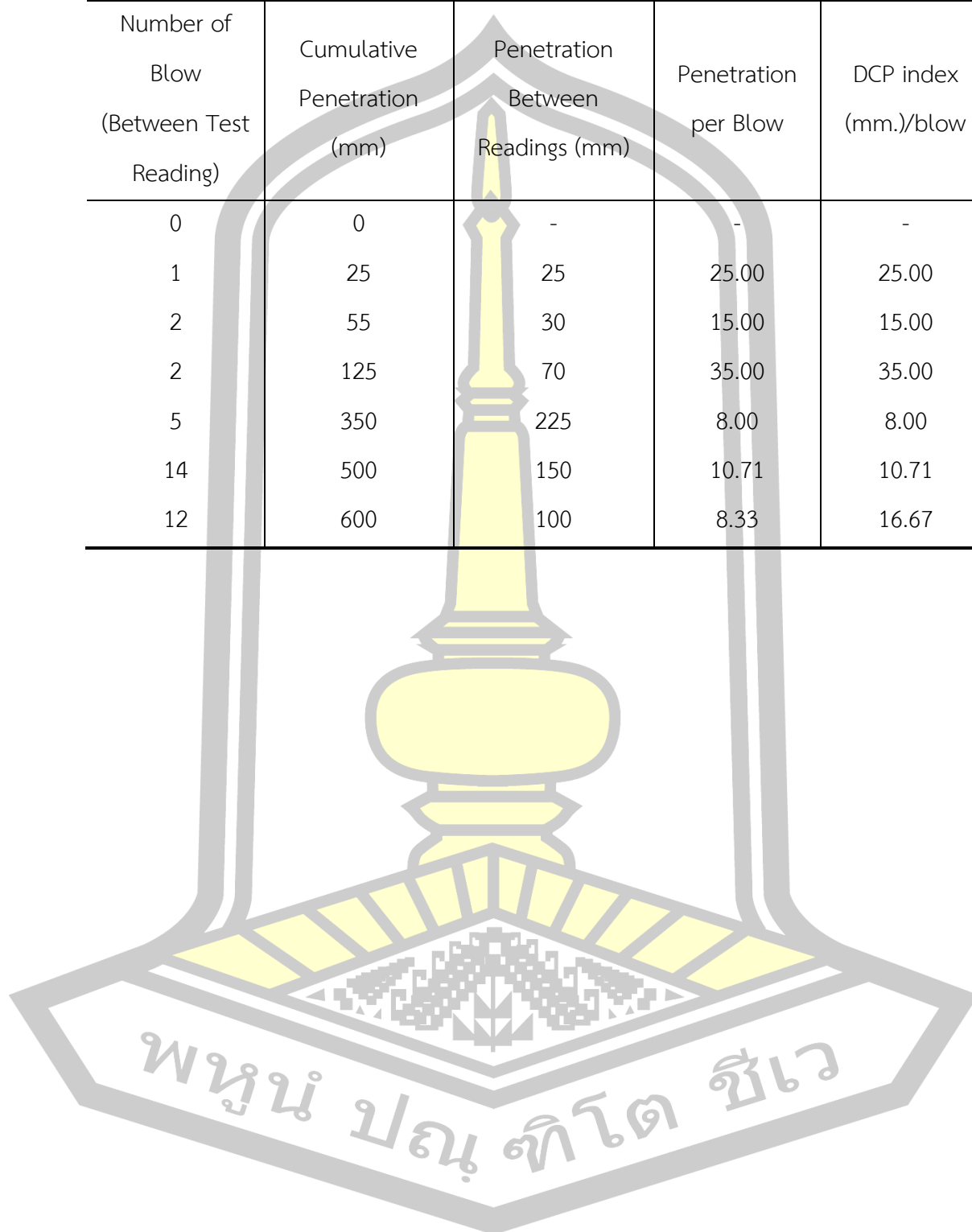
ตารางที่ 7 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.แก้งคร้อ จ.ชัยภูมิ

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	1.00	25.00
2	50	25	12.50	1.00	12.50
2	75	25	12.50	1.00	12.50
3	100	25	8.33	1.00	8.33
4	150	50	12.50	1.00	12.50
5	200	50	10.00	1.00	10.00
5	250	50	10.00	1.00	10.00
5	300	50	10.00	1.00	10.00
5	350	50	10.00	1.00	10.00
5	500	150	30.00	1.00	30.00
10	600	100	10.00	2.00	20.00



ตารางที่ 8 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
5	350	225	8.00	8.00	28.44
14	500	150	10.71	10.71	20.50
12	600	100	8.33	16.67	12.50



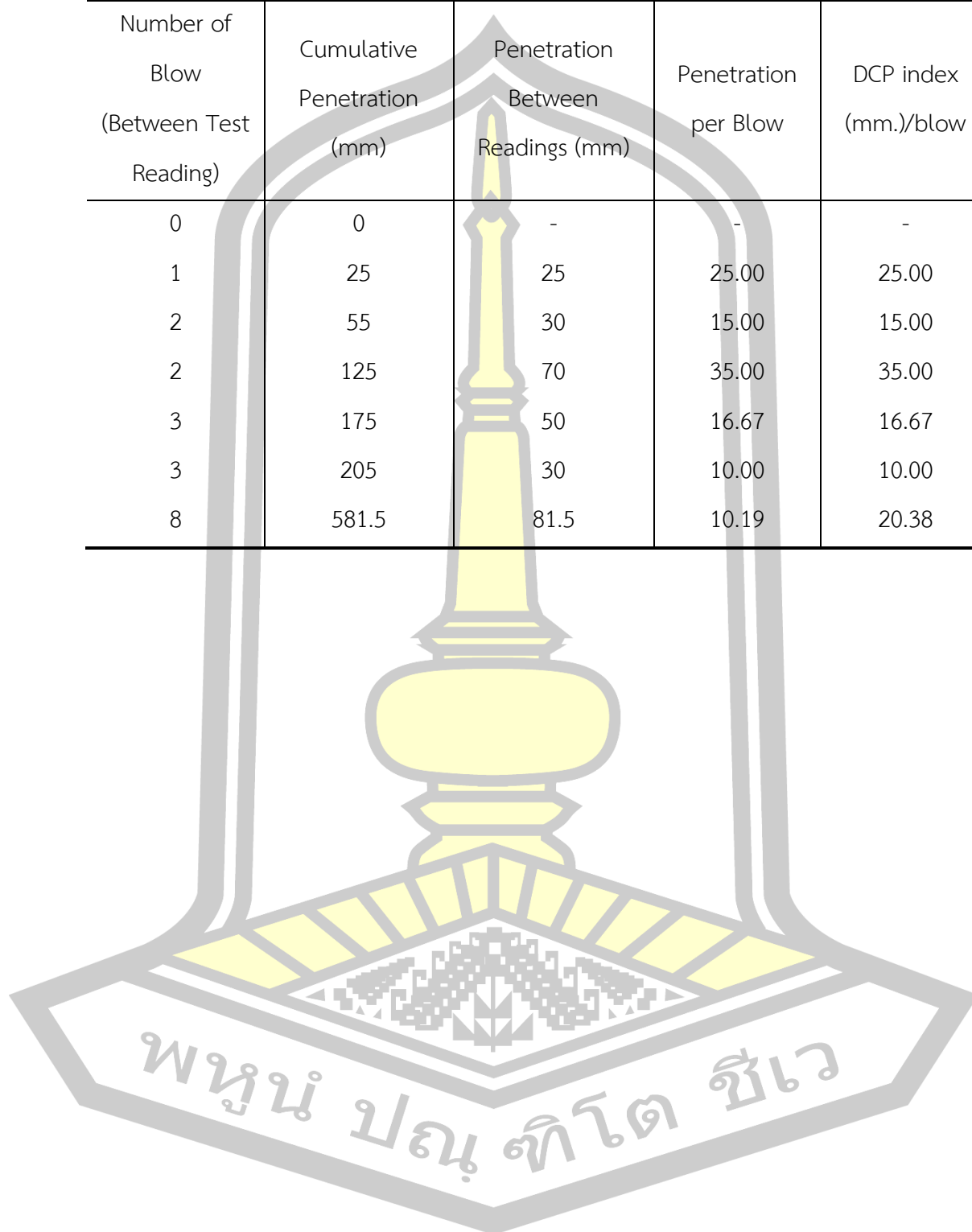
ตารางที่ 9 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.เมือง จ.ชัยภูมิ

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
3	175	50	16.67	16.67	12.50
5	205	30	6.00	6.00	39.25
5	230	25	5.00	5.00	48.14
5	280	50	10.00	10.00	22.15
5	310	30	6.00	6.00	39.25
5	350	40	8.00	8.00	28.44
5	500	150	30.00	30.00	6.47
4	600	100	25.00	50.00	3.65



ตารางที่ 10 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.กมลาไสย จ.ชัยภูมิ

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
3	175	50	16.67	16.67	12.50
3	205	30	10.00	10.00	22.15
8	581.5	81.5	10.19	20.38	9.98



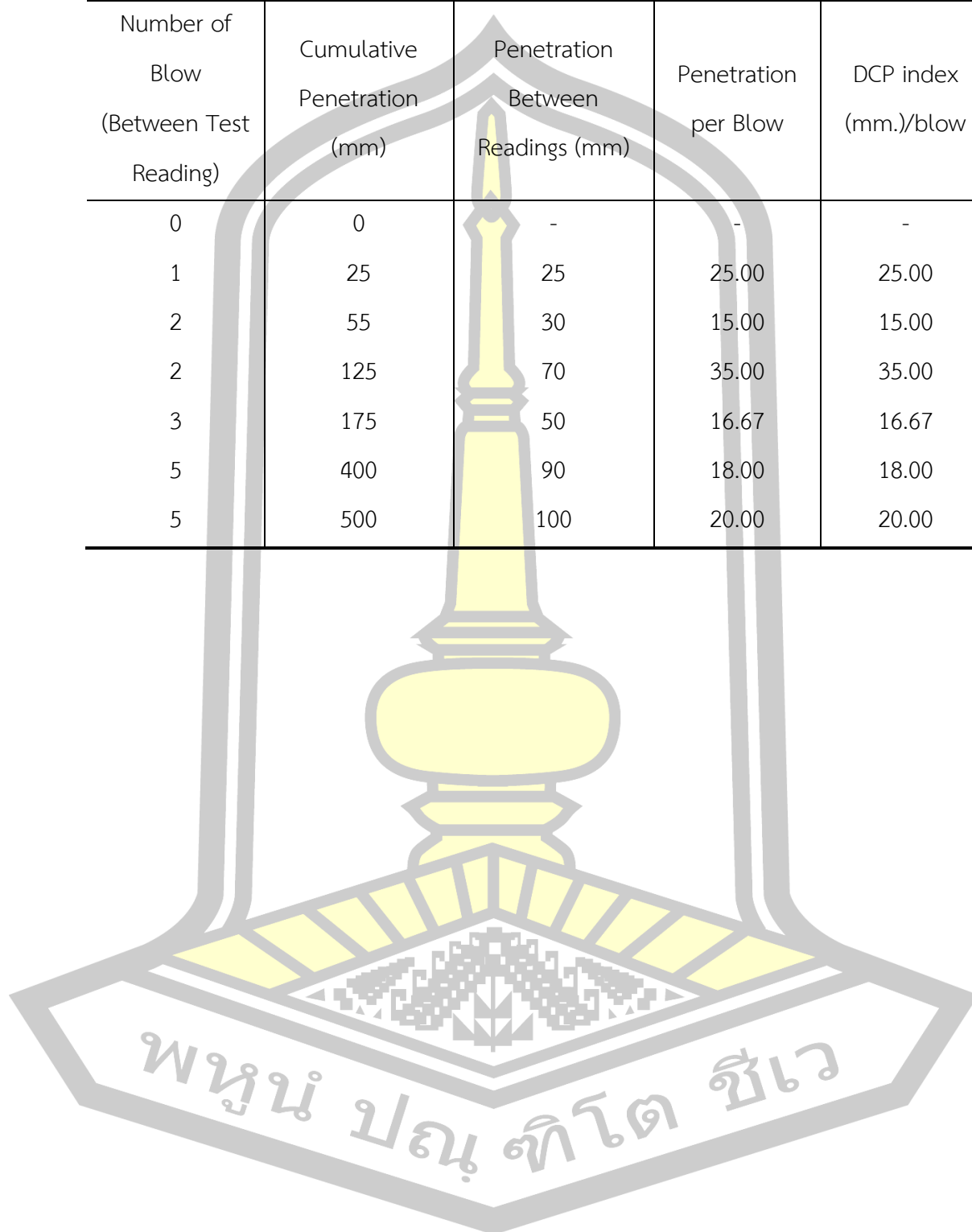
ตารางที่ 11 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.ห้วยชัย จ.กาฬสินธุ์

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
3	175	50	16.67	16.67	12.50
5	205	30	6.00	6.00	39.25
5	230	25	5.00	5.00	48.14
5	280	50	10.00	10.00	22.15
7	310	30	4.29	4.29	57.22
8	375	65	8.13	8.13	27.95
7	500	125	17.86	17.86	11.57
6	600	100	16.67	33.33	5.75



ตารางที่ 12 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.ร่อนคำ จ.กาฬสินธุ์

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
3	175	50	16.67	16.67	12.50
5	400	90	18.00	18.00	11.47
5	500	100	20.00	20.00	10.19



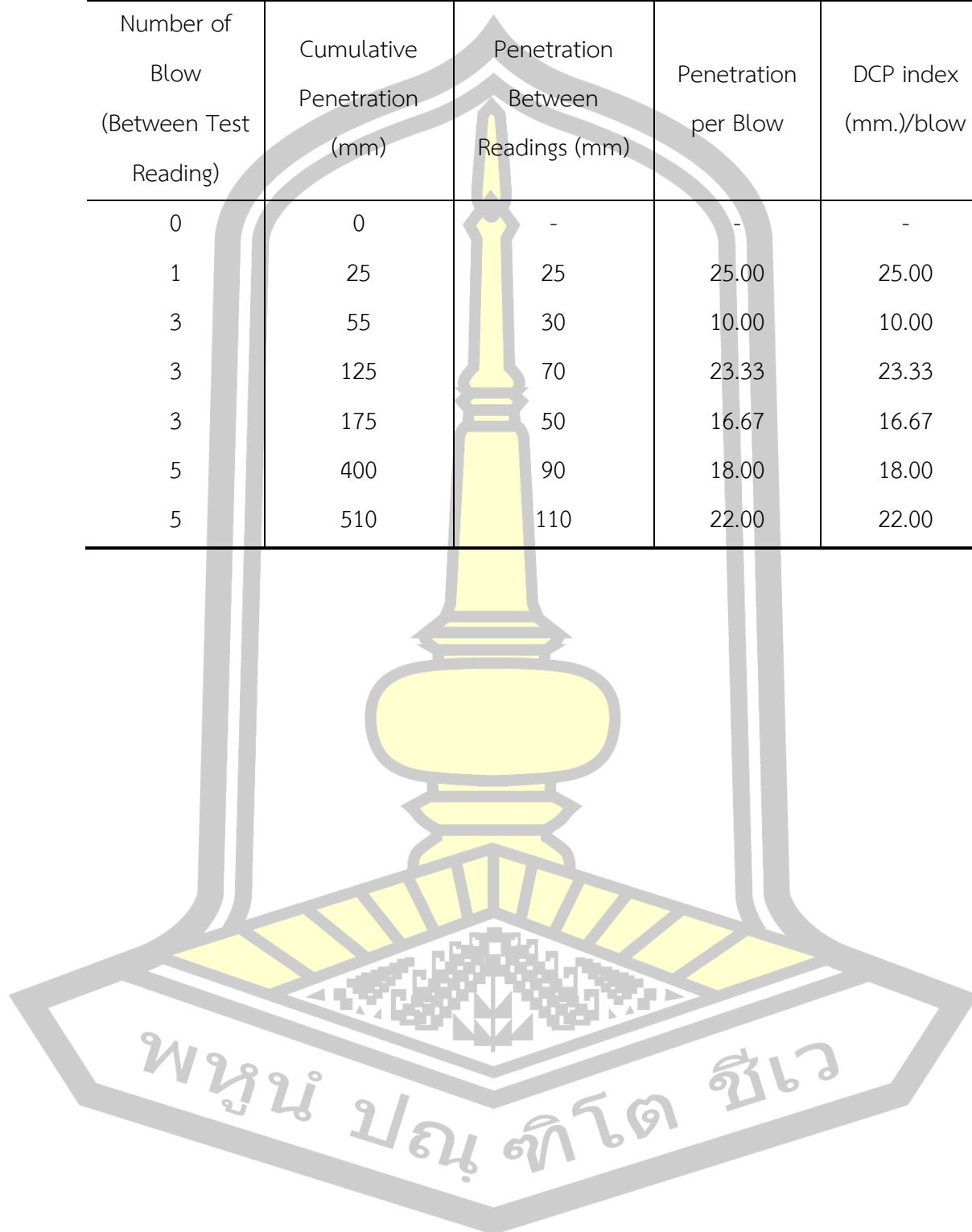
ตารางที่ 13 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.โพธิ์ชัย จ.ร้อยเอ็ด

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
2	125	70	35.00	35.00	5.45
3	175	50	16.67	16.67	12.50
5	205	30	6.00	6.00	39.25
5	230	25	5.00	5.00	48.14
5	280	50	10.00	10.00	22.15
5	310	30	6.00	6.00	39.25
5	400	90	18.00	18.00	11.47
4	510	110	27.50	27.50	7.13
10	600	90	9.00	18.00	11.47



ตารางที่ 14 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.โพธิ์ทอง จ.ร้อยเอ็ด

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
3	55	30	10.00	10.00	22.15
3	125	70	23.33	23.33	8.58
3	175	50	16.67	16.67	12.50
5	400	90	18.00	18.00	11.47
5	510	110	22.00	22.00	9.16



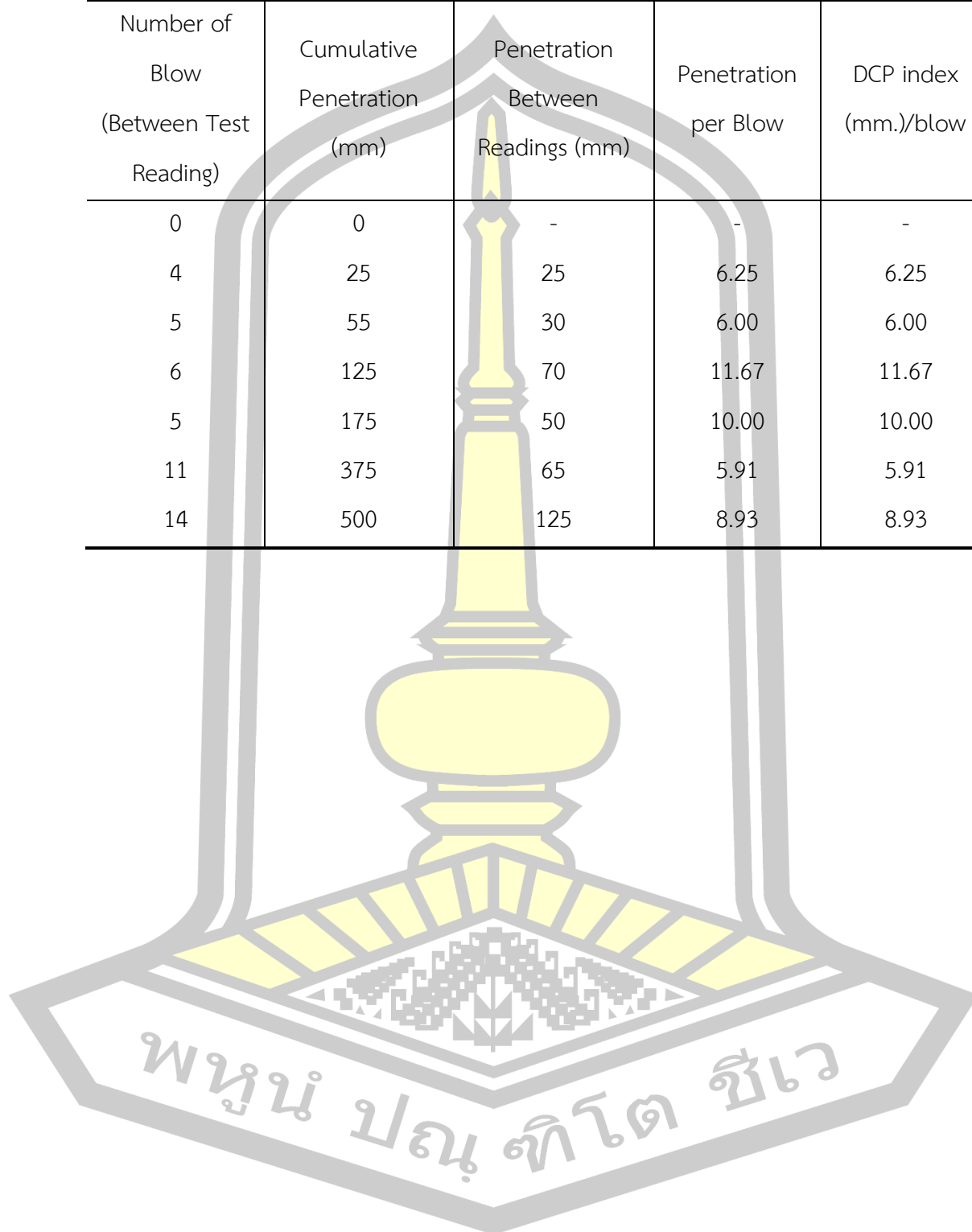
ตารางที่ 15 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.หนองพอก จ.ร้อยเอ็ด

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
2	25	25	12.50	12.50	17.25
3	55	30	10.00	10.00	22.15
4	125	70	17.50	17.50	11.84
4	175	50	12.50	12.50	17.25
4	205	30	7.50	7.50	30.57
5	230	25	5.00	5.00	48.14
5	280	50	10.00	10.00	22.15
6	310	30	5.00	5.00	48.14
5	400	90	18.00	18.00	11.47
7	510	110	15.71	15.71	13.35
9	600	90	10.00	20.00	10.19



ตารางที่ 16 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
4	25	25	6.25	6.25	37.50
5	55	30	6.00	6.00	39.25
6	125	70	11.67	11.67	18.64
5	175	50	10.00	10.00	22.15
11	375	65	5.91	5.91	39.93
14	500	125	8.93	8.93	25.15



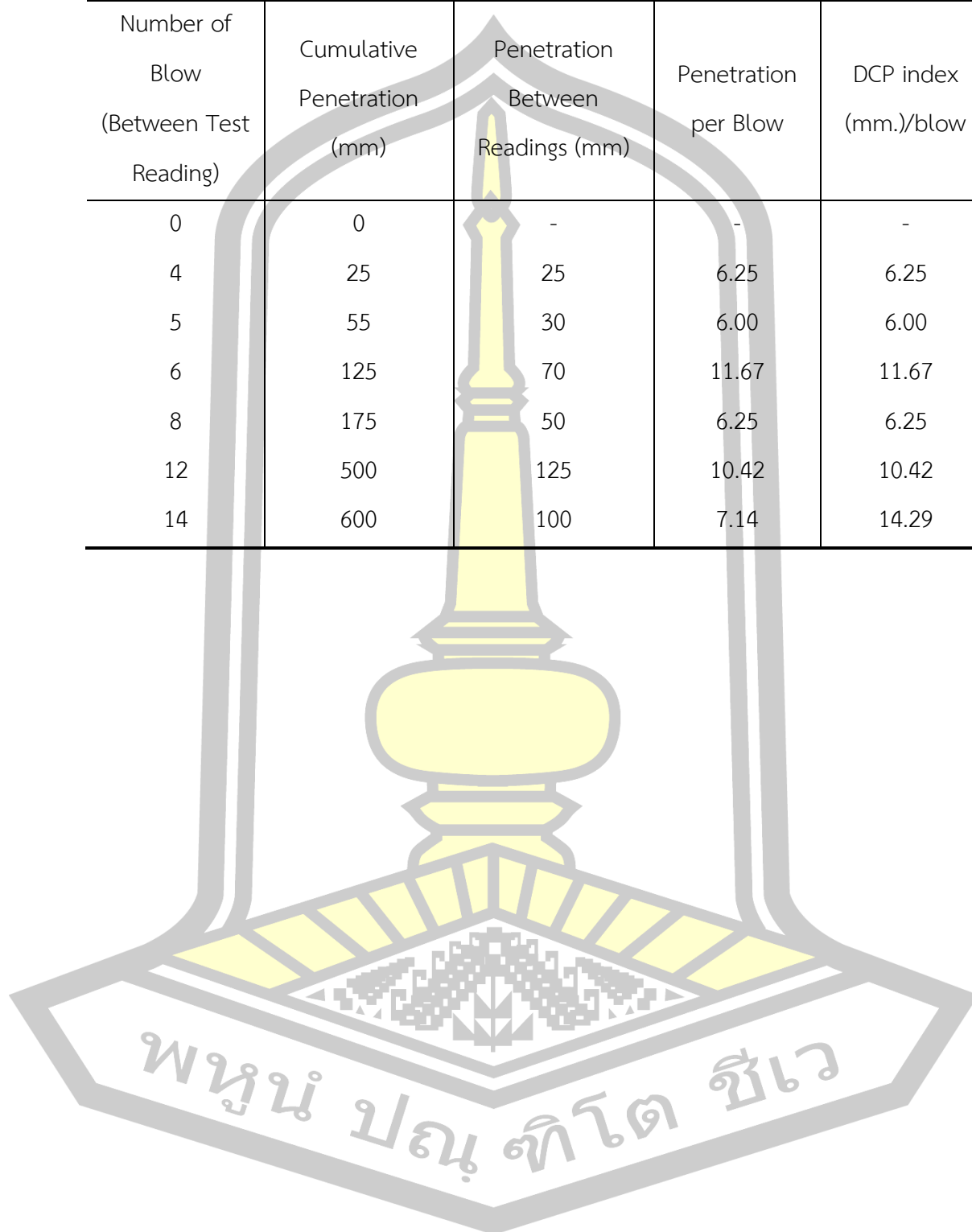
ตารางที่ 17 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
3	25	25	8.33	8.33	27.17
4	55	30	7.50	7.50	30.57
5	125	70	14.00	14.00	15.20
4	175	50	12.50	12.50	17.25
5	205	30	6.00	6.00	39.25
5	230	25	5.00	5.00	48.14
6	250	20	3.33	3.33	75.82
5	300	50	10.00	10.00	22.15
4	400	100	25.00	25.00	7.94
3	500	100	33.33	33.33	5.75
4	600	100	25.00	50.00	3.65



ตารางที่ 18 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.นาตุณ จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
4	25	25	6.25	6.25	37.50
5	55	30	6.00	6.00	39.25
6	125	70	11.67	11.67	18.64
8	175	50	6.25	6.25	37.50
12	500	125	10.42	10.42	21.16
14	600	100	7.14	14.29	14.86



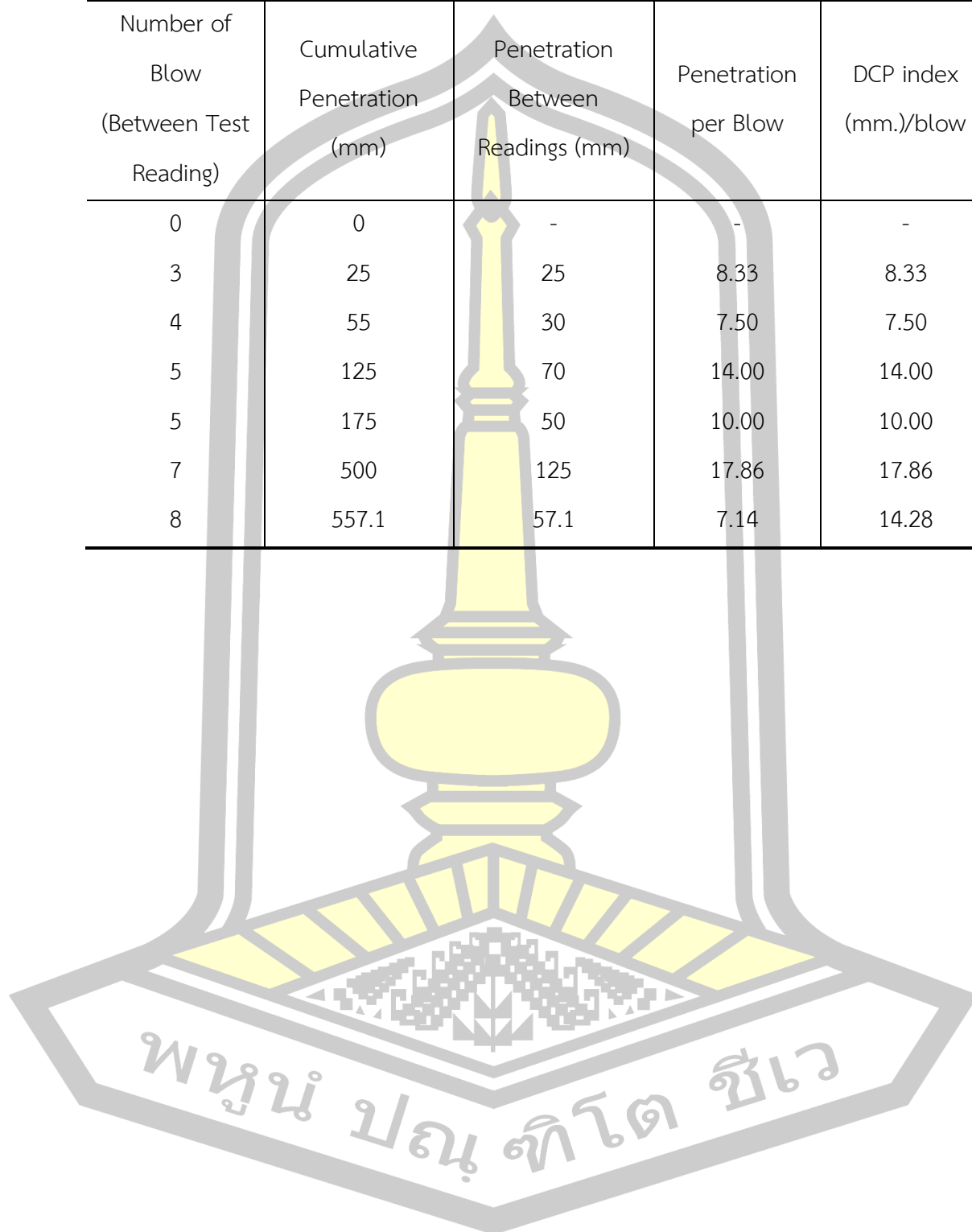
ตารางที่ 19 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.นาดี จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
4	25	25	6.25	6.25	37.50
5	55	30	6.00	6.00	39.25
6	125	70	11.67	11.67	18.64
5	175	50	10.00	10.00	22.15
5	205	30	6.00	6.00	39.25
6	230	25	4.17	4.17	59.05
8	280	50	6.25	6.25	37.50
9	310	30	3.33	3.33	75.82
14	375	65	4.64	4.64	52.31
17	500	125	7.35	7.35	31.26
11	600	100	9.09	18.18	11.34



ตารางที่ 20 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.เมือง จ.มหาสารคาม

Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
3	25	25	8.33	8.33	27.17
4	55	30	7.50	7.50	30.57
5	125	70	14.00	14.00	15.20
5	175	50	10.00	10.00	22.15
7	500	125	17.86	17.86	11.57
8	557.1	57.1	7.14	14.28	14.87

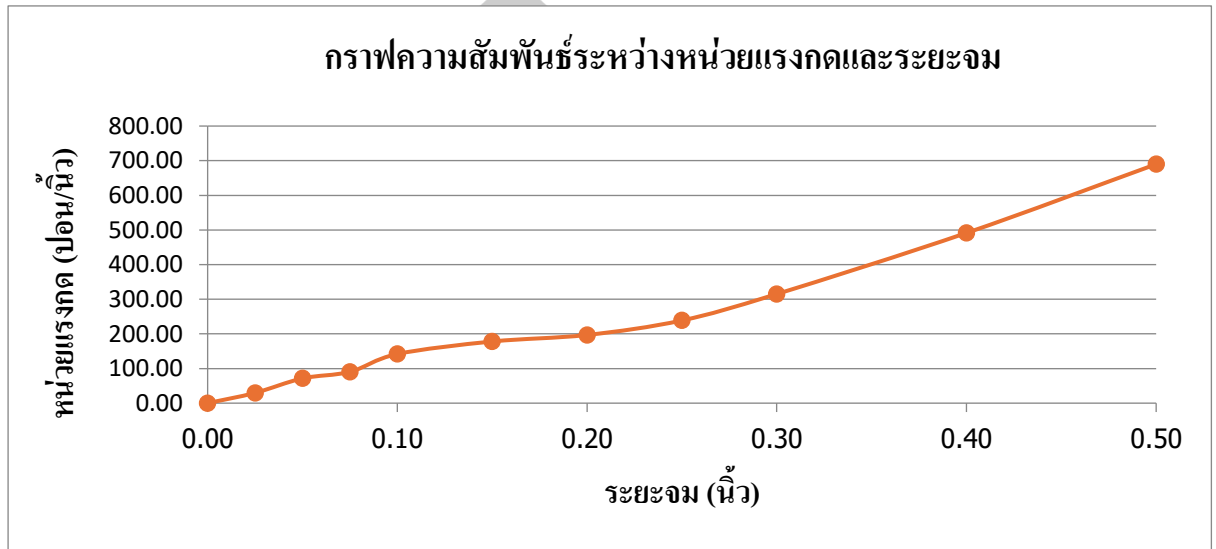


ตารางที่ 21 การทดสอบ Dynamic Cone Penetration Test พื้นที่ อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม

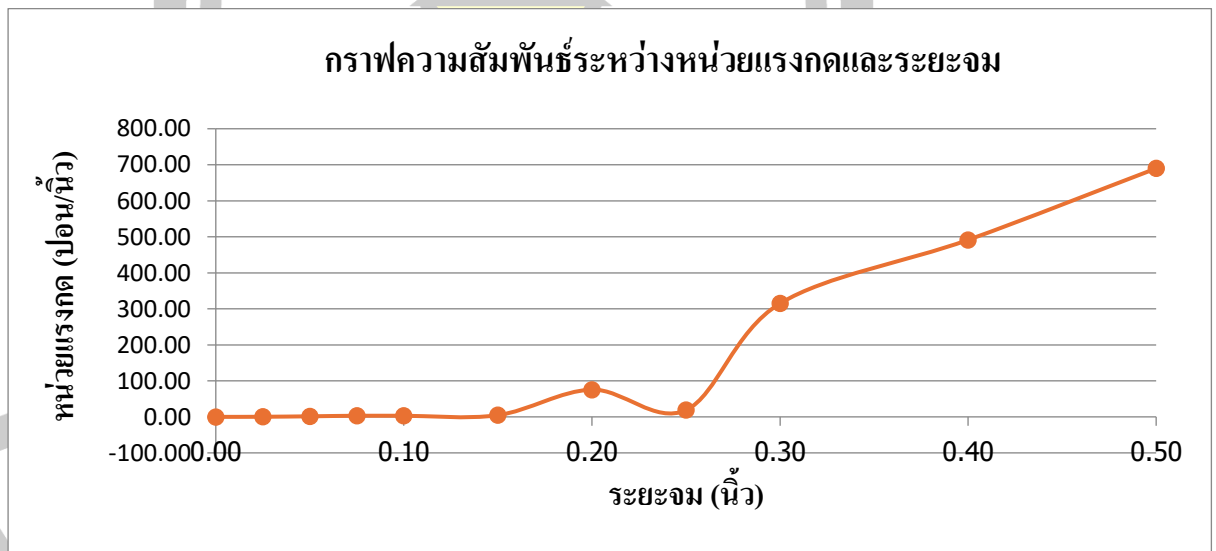
Number of Blow (Between Test Reading)	Cumulative Penetration (mm)	Penetration Between Readings (mm)	Penetration per Blow	DCP index (mm.)/blow	%CBR
0	0	-	-	-	-
1	25	25	25.00	25.00	7.94
2	55	30	15.00	15.00	14.07
5	125	70	14.00	14.00	15.20
5	175	50	10.00	10.00	22.15
5	205	30	6.00	6.00	39.25
3	230	25	8.33	8.33	27.17
3	280	50	16.67	16.67	12.50
3	310	30	10.00	10.00	22.15
7	375	65	9.29	9.29	24.07
9	503.6	128.6	14.29	14.29	14.85
8	600	96.4	12.05	24.10	8.27



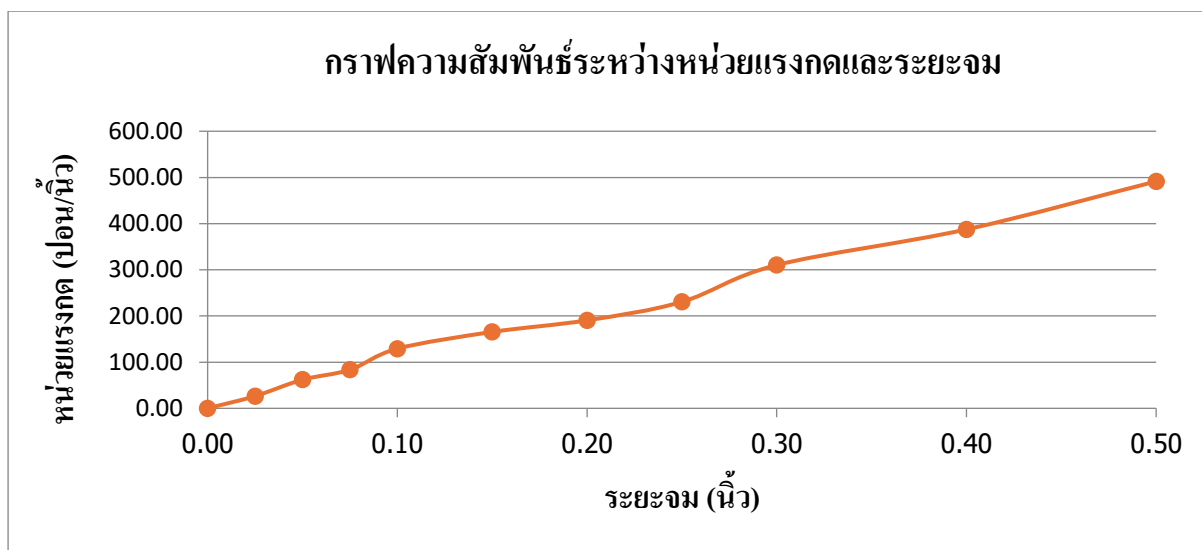
ภาคผนวก ข.



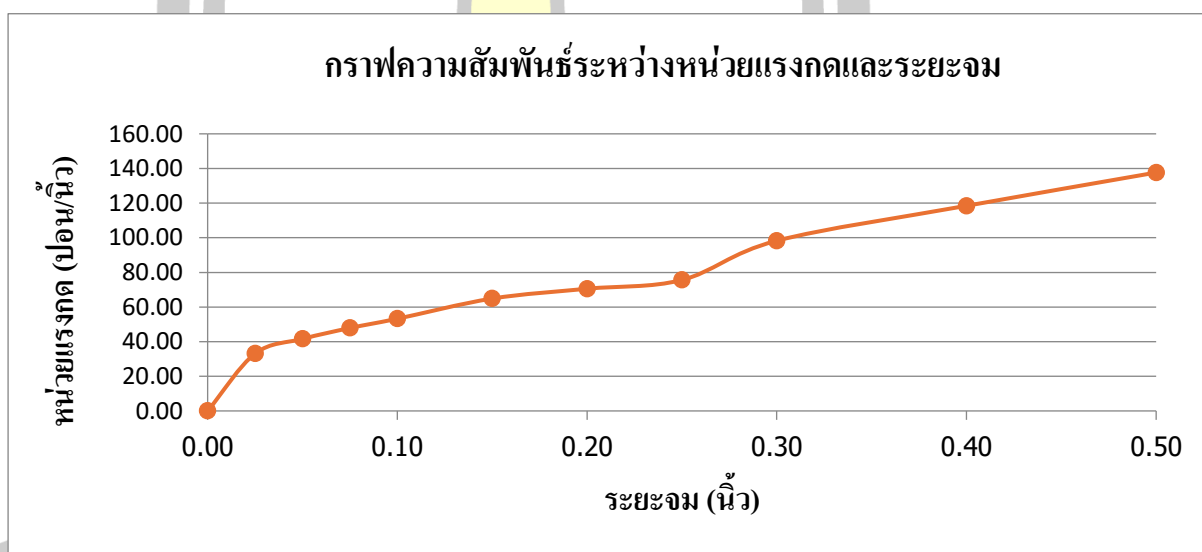
ภาพประกอบ 1 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.เมือง จ.มหาสารคาม



ภาพประกอบ 2 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.เมือง จ.มหาสารคาม

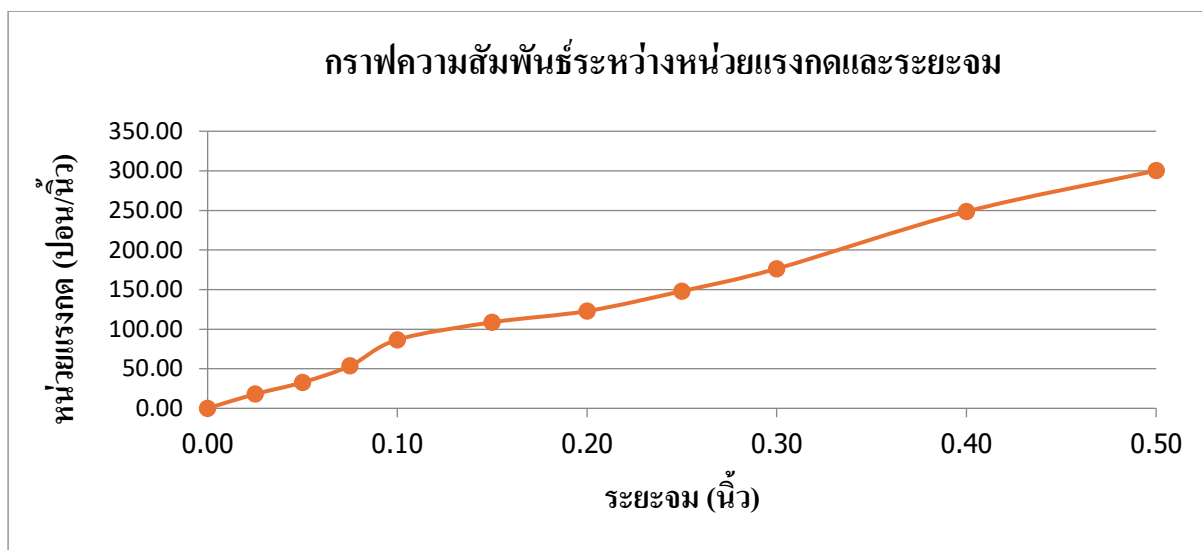


ภาพประกอบ 3 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.บรปือ จ.มหาสารคาม

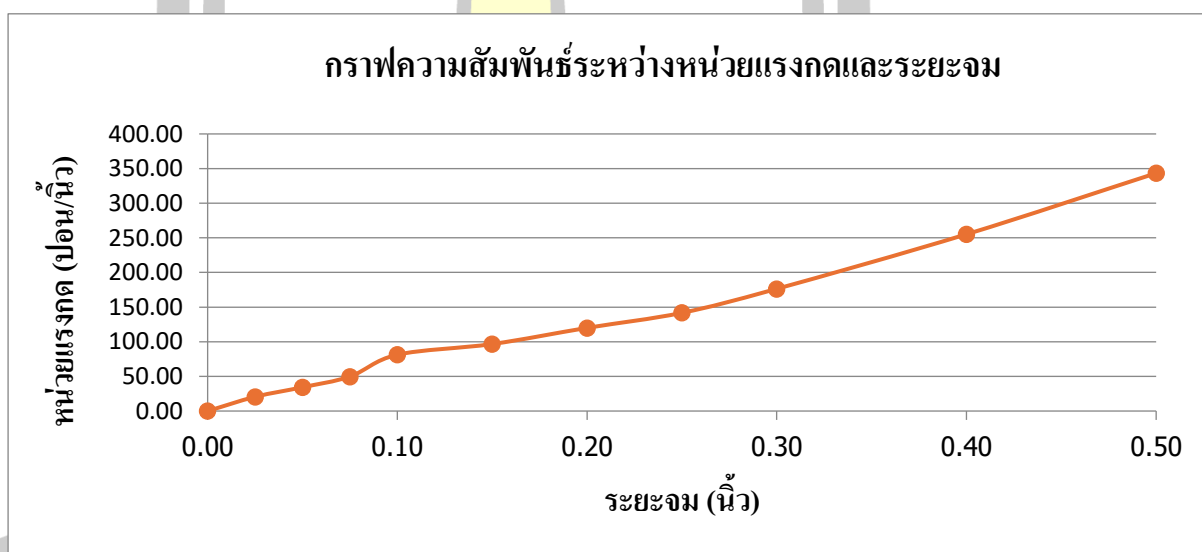


ภาพประกอบ 4 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว

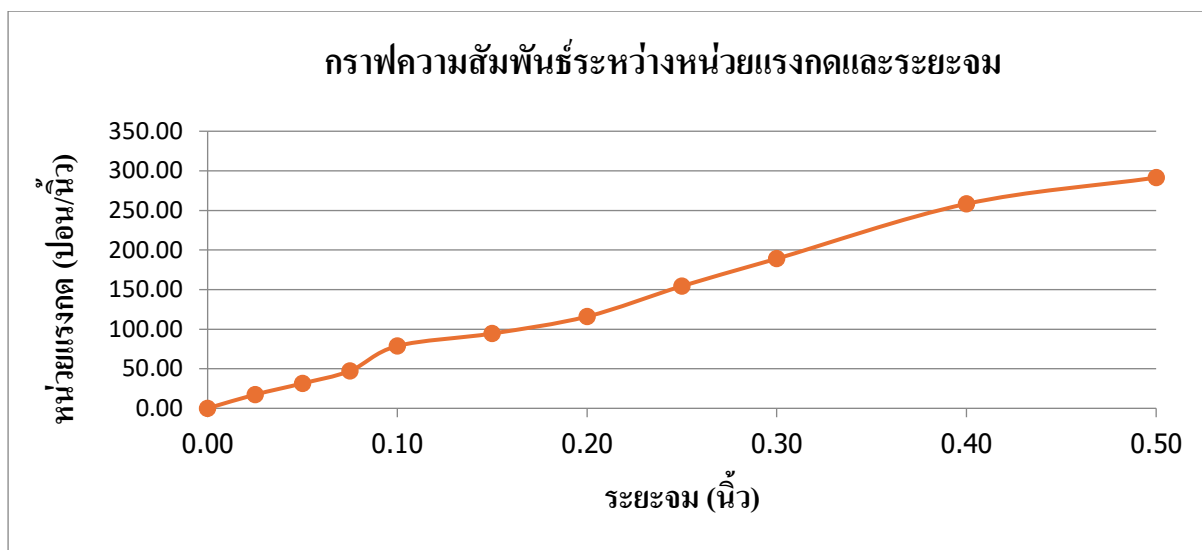


ภาพประกอบ 5 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น

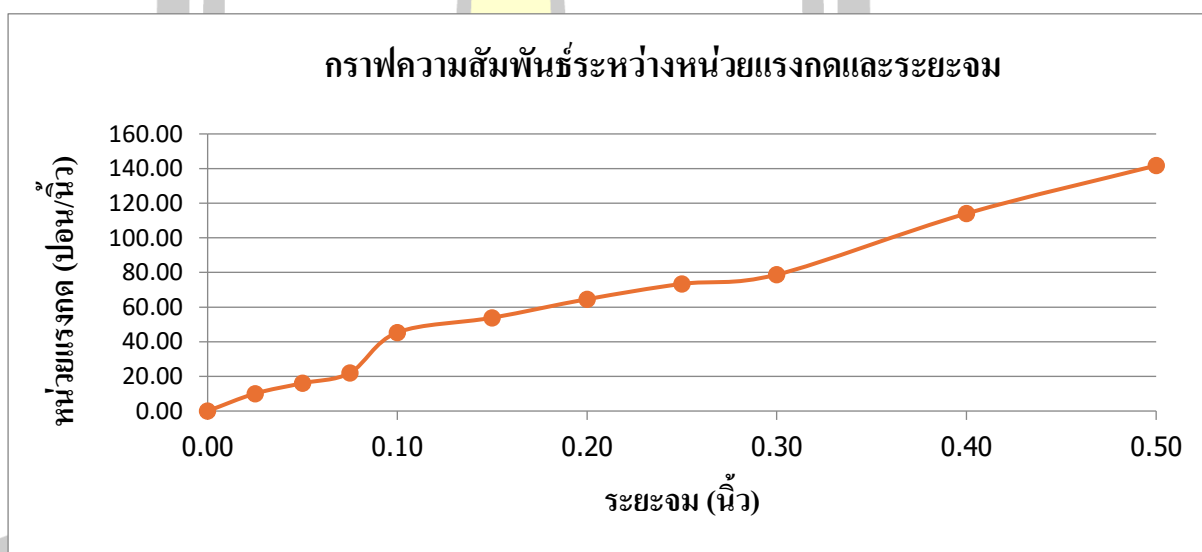


ภาพประกอบ 6 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.ชนบท จ.ขอนแก่น

พูน ปณ ทิโต ชีเว

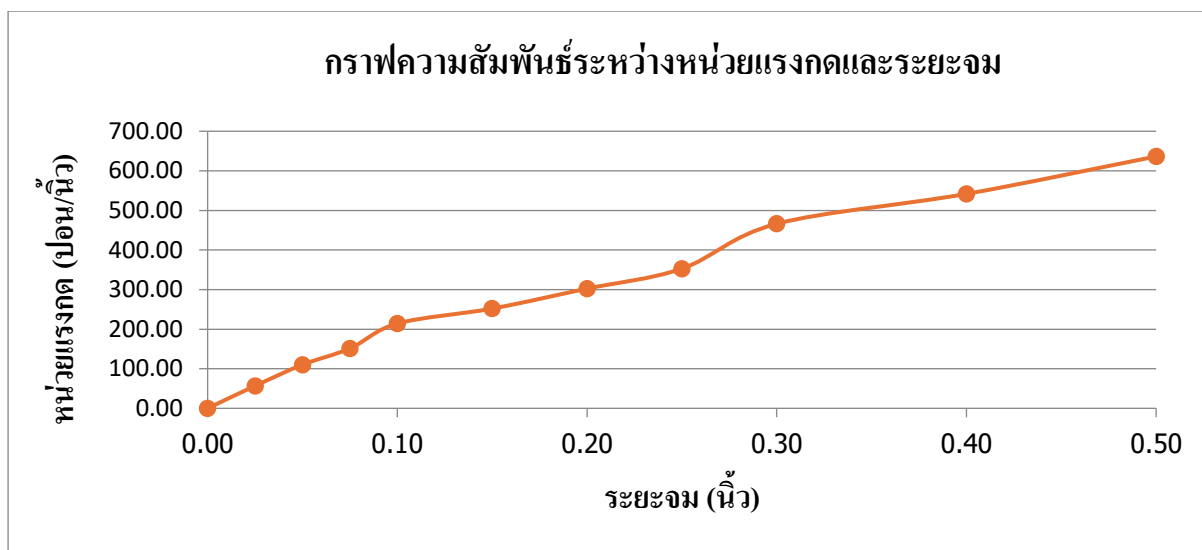


ภาพประกอบ 7 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.โคกโพธิ์ไชย จ.ขอนแก่น

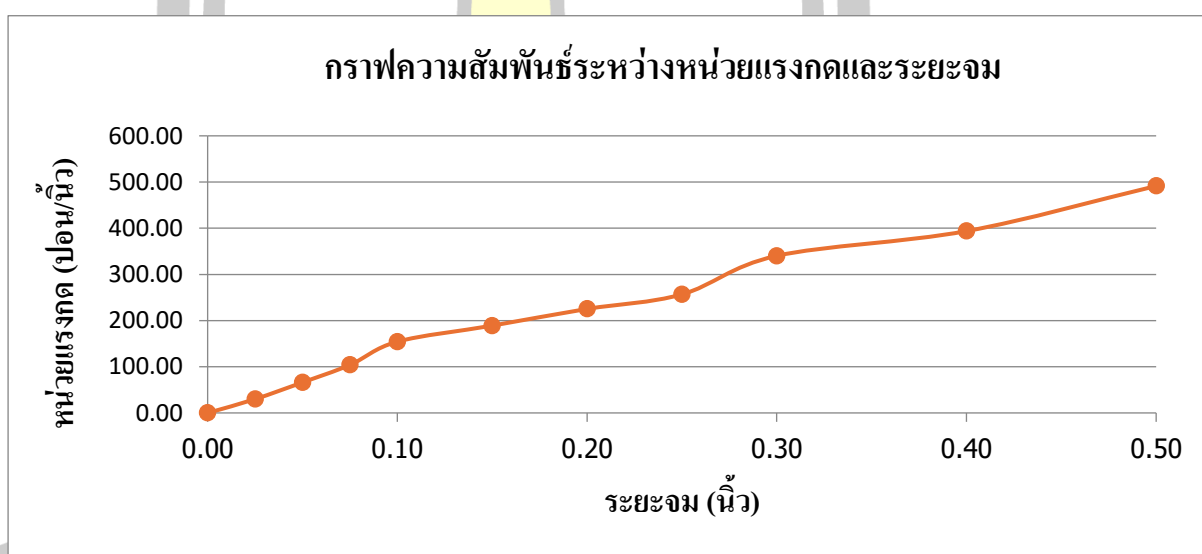


ภาพประกอบ 8 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.แก้งคร้อ จ.ชัยภูมิ

พูน ปณ ทิโต ชีเว

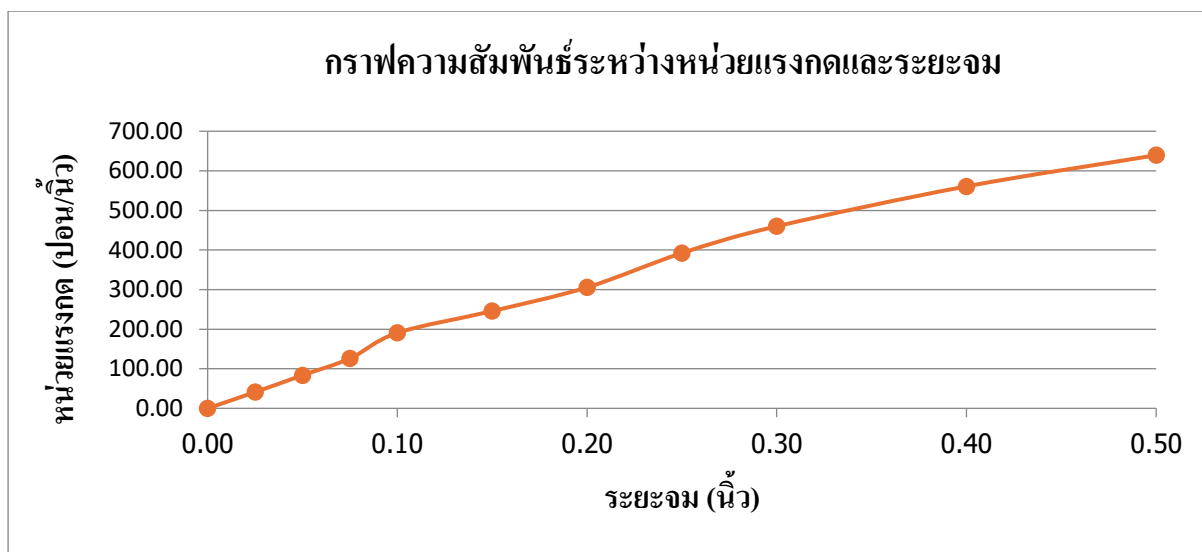


ภาพประกอบ 9 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ

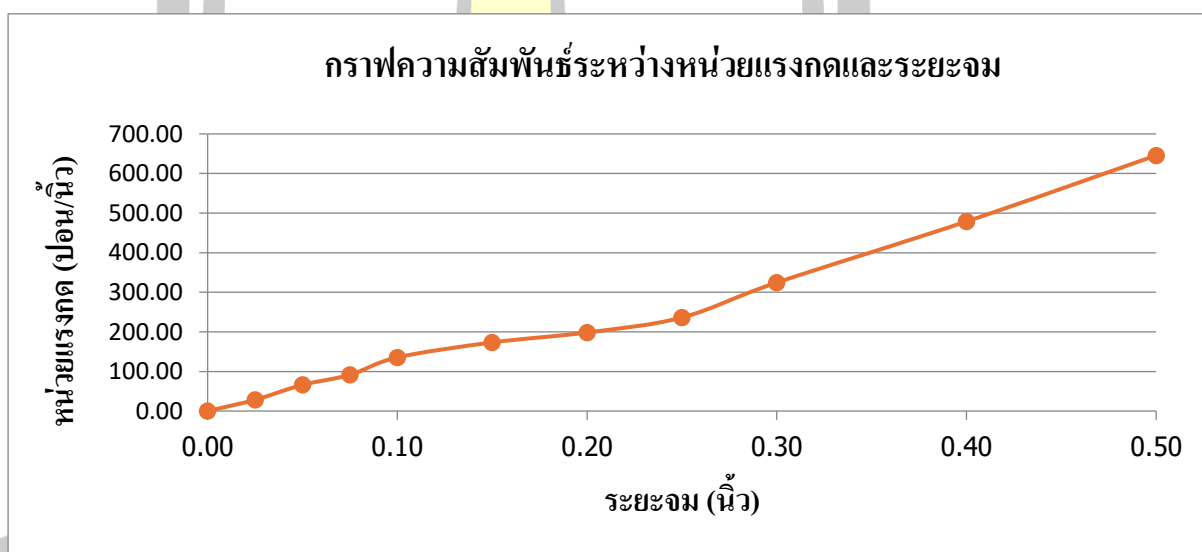


ภาพประกอบ 10 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.เมือง จ.ชัยภูมิ

พูน ปณ ทิโต ชีเว

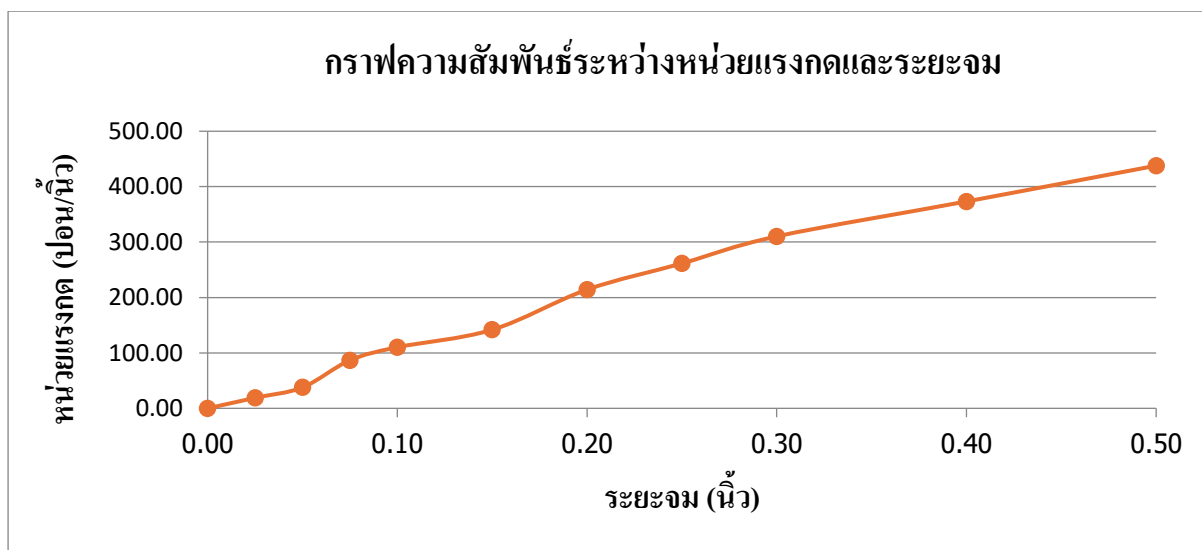


ภาพประกอบ 11 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.กมลาไสย จ.กาฬสินธุ์

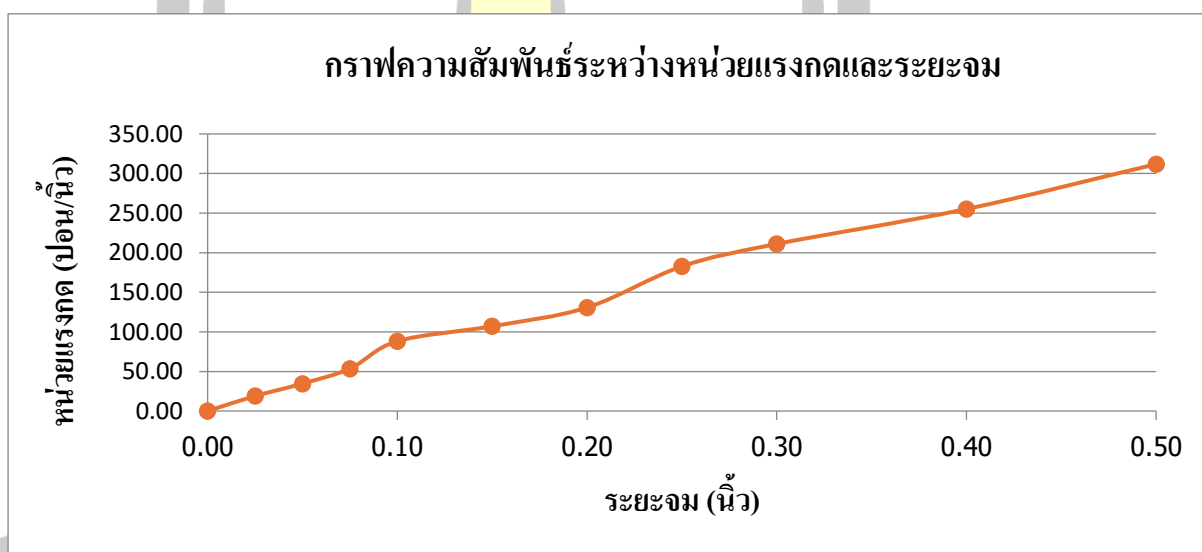


ภาพประกอบ 12 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.ฆ้องชัย จ.กาฬสินธุ์

พูน ปณ ทิโต ชีเว

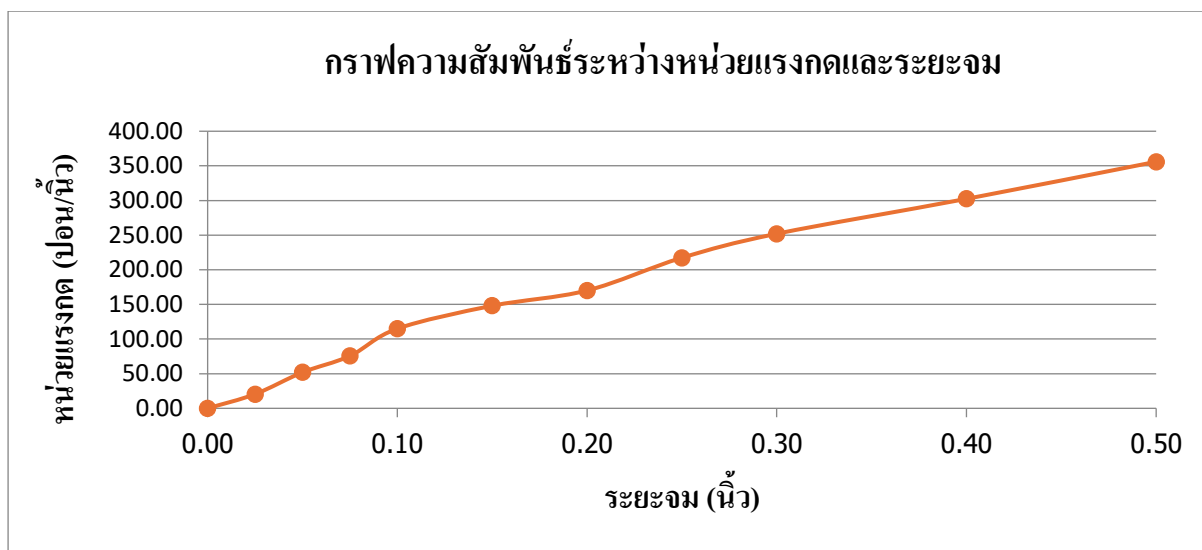


ภาพประกอบ 13 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.ร้องคำ จ.กาฬสินธุ์

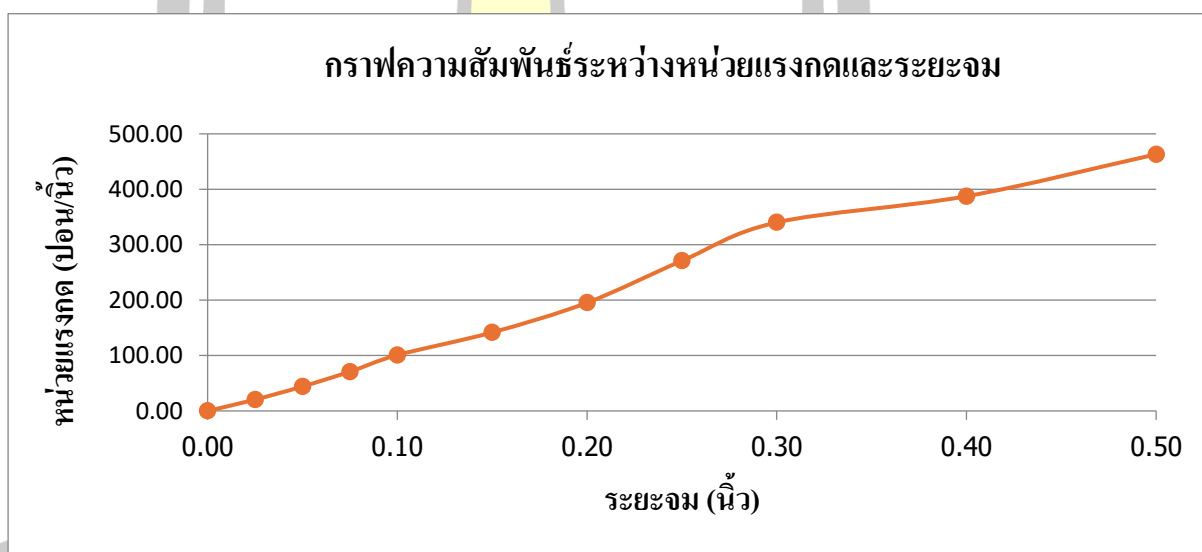


ภาพประกอบ 14 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.โพธิ์ชัย จ.ร้อยเอ็ด

พูน ปณ ทิโต ชีเว

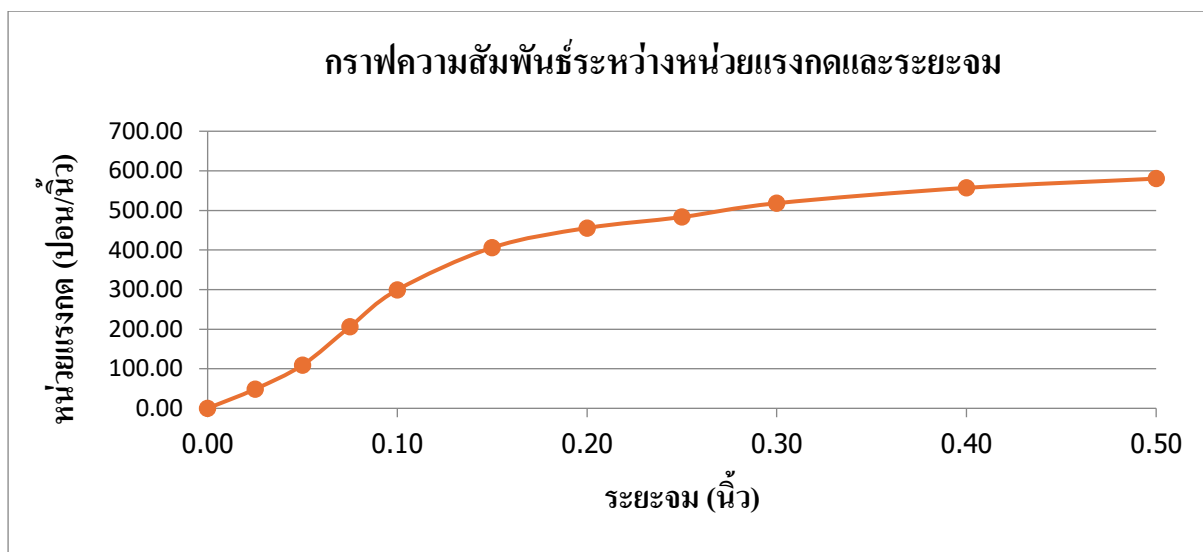


ภาพประกอบ 15 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.โพนทอง จ.ร้อยเอ็ด

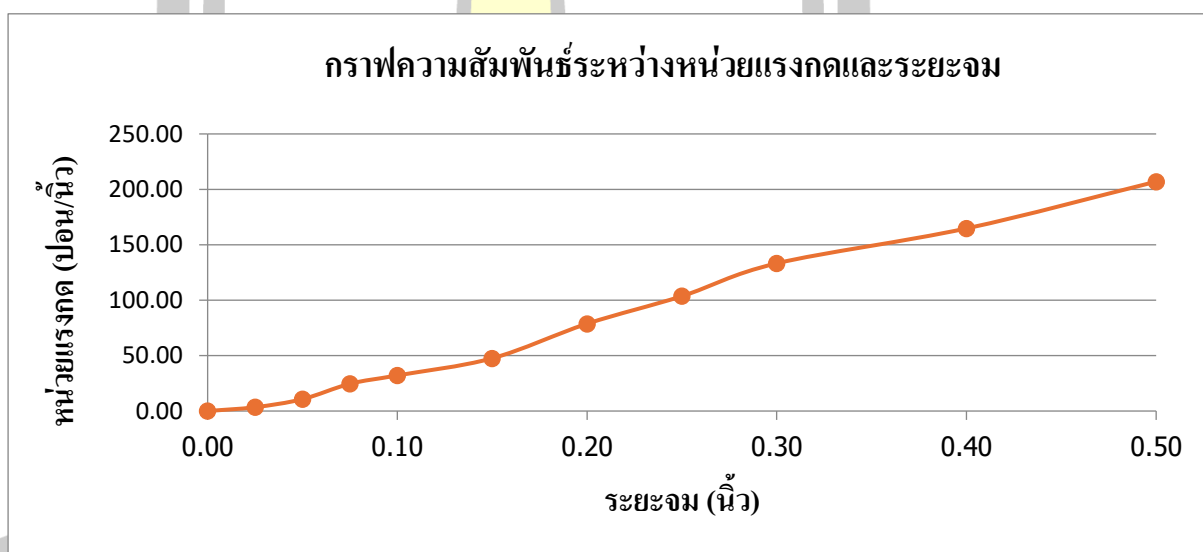


ภาพประกอบ 16 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.หนองพอก จ.ร้อยเอ็ด

พูน ปณ ติโต ชีเว

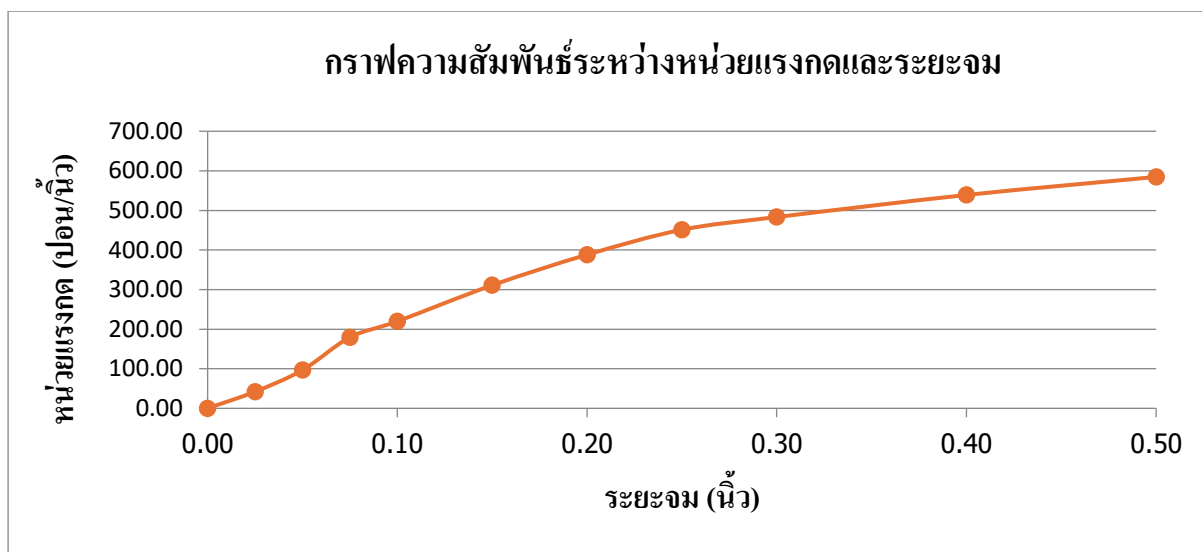


ภาพประกอบ 17 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม

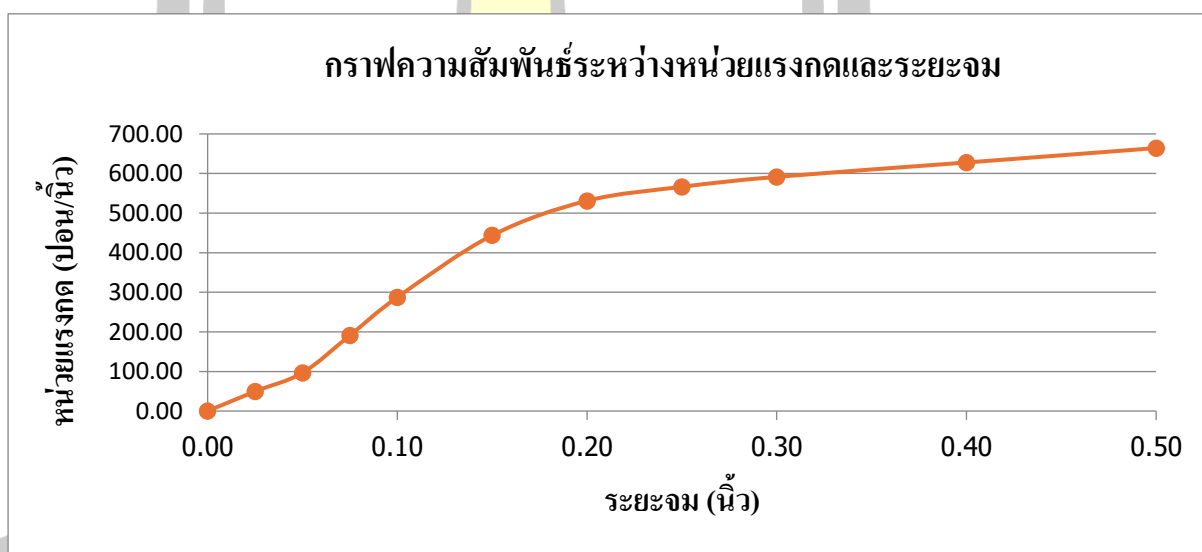


ภาพประกอบ 18 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 19 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.นาตุ้ม จ.มหาสารคาม



ภาพประกอบ 20 กราฟผลการทดสอบ CBR ของพื้นที่ อ.นาตุ้ม จ.มหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว

บรรณานุกรม

- Arjwech, R., & Sriwangpon, P. (2021). Evaluating the engineering properties of loess soil using seismic methods. *Songklanakarin J. Sci. Technol*, 43(1), 259–268.
- Chindaprasirt, P., Kampala, A., Arngbunta, A., & Horpibulsuk, S. (2020). Prediction of Compaction Parameters of Khon Kaen Loess Soil †. *J Sci & Tech*, 17(12), 1367–1378. <http://wjst.wu.ac.th>
- Du, Y. J., Jiang, N. J., Liu, S. Y., Horpibulsuk, S., & Arulrajah, A. (2016). Field evaluation of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue. *Soils and Foundations*, 56(2), 301–314. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.012>
- Feleke, G. G., & Araya, A. A. (2016). *PREDICTION OF CBR USING DCP FOR LOCAL SUBGRADE MATERIALS*.
- Kaewhanam, N., Chaisaeng, J., Chaisaeng, P., Outsaha, P., Yuwarach, S., & Chaiyasan, C. (2014). *The updated physical properties of soil in Northeast Thailand*.
- Kaewhanam, N., & Narong, S. (2013). *Evaluation of Highway Subgrade Compaction by Dynamic Cone Penetrometer*. 4–6.
- Patel, M. A., In, M. C., & Patel, H. S. (2012). *Experimental Study to Correlate the Test Results of PBT, UCS, and CBR with DCP on Various soils in soaked condition*.
- Patel, M. A., & Patel, H. S. (2013). Laboratory assessment to correlate strength parameter from physical properties of subgrade. *Procedia Engineering*, 51, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.029>
- Patel, M. A., Patel, H. S., & Dadhich, G. (2013). Prediction of Subgrade Strength Parameters from Dynamic Cone Penetrometer Index, Modified Liquid Limit and Moisture Content. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.117>
- Prommin, T., & Nuntasarn, R. (2019). Ultimate bearing capacity of collapsing Khon Kaen loess. *International Journal of GEOMATE*, 17(63), 87–94. <https://doi.org/10.21660/2019.63.14858>

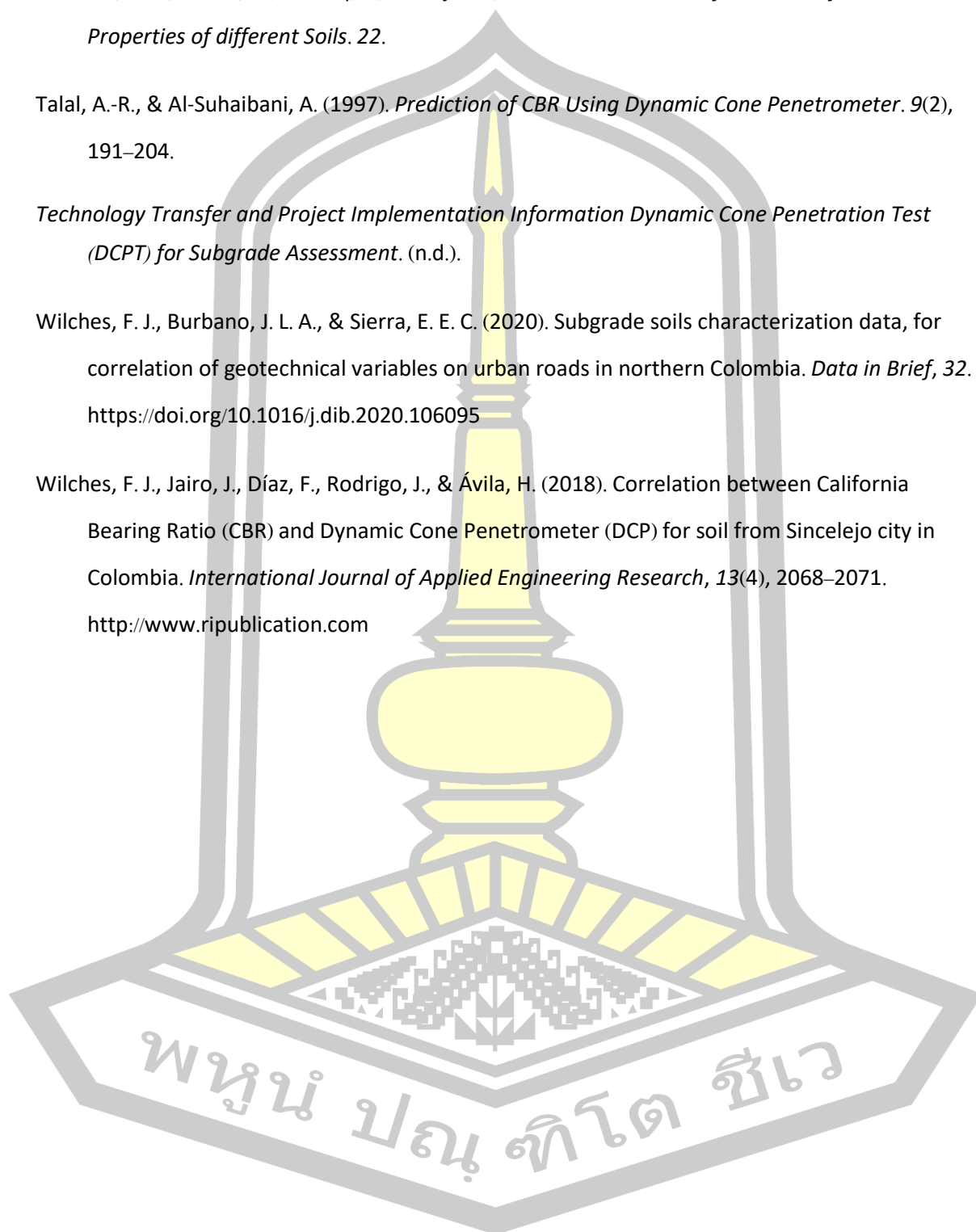
Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). *Prediction of CBR Value from Index Properties of different Soils*. 22.

Talal, A.-R., & Al-Suhaibani, A. (1997). *Prediction of CBR Using Dynamic Cone Penetrometer*. 9(2), 191–204.

Technology Transfer and Project Implementation Information Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) for Subgrade Assessment. (n.d.).

Wilches, F. J., Burbano, J. L. A., & Sierra, E. E. C. (2020). Subgrade soils characterization data, for correlation of geotechnical variables on urban roads in northern Colombia. *Data in Brief*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106095>

Wilches, F. J., Jairo, J., Díaz, F., Rodrigo, J., & Ávila, H. (2018). Correlation between California Bearing Ratio (CBR) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for soil from Sincelejo city in Colombia. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(4), 2068–2071. <http://www.ripublication.com>

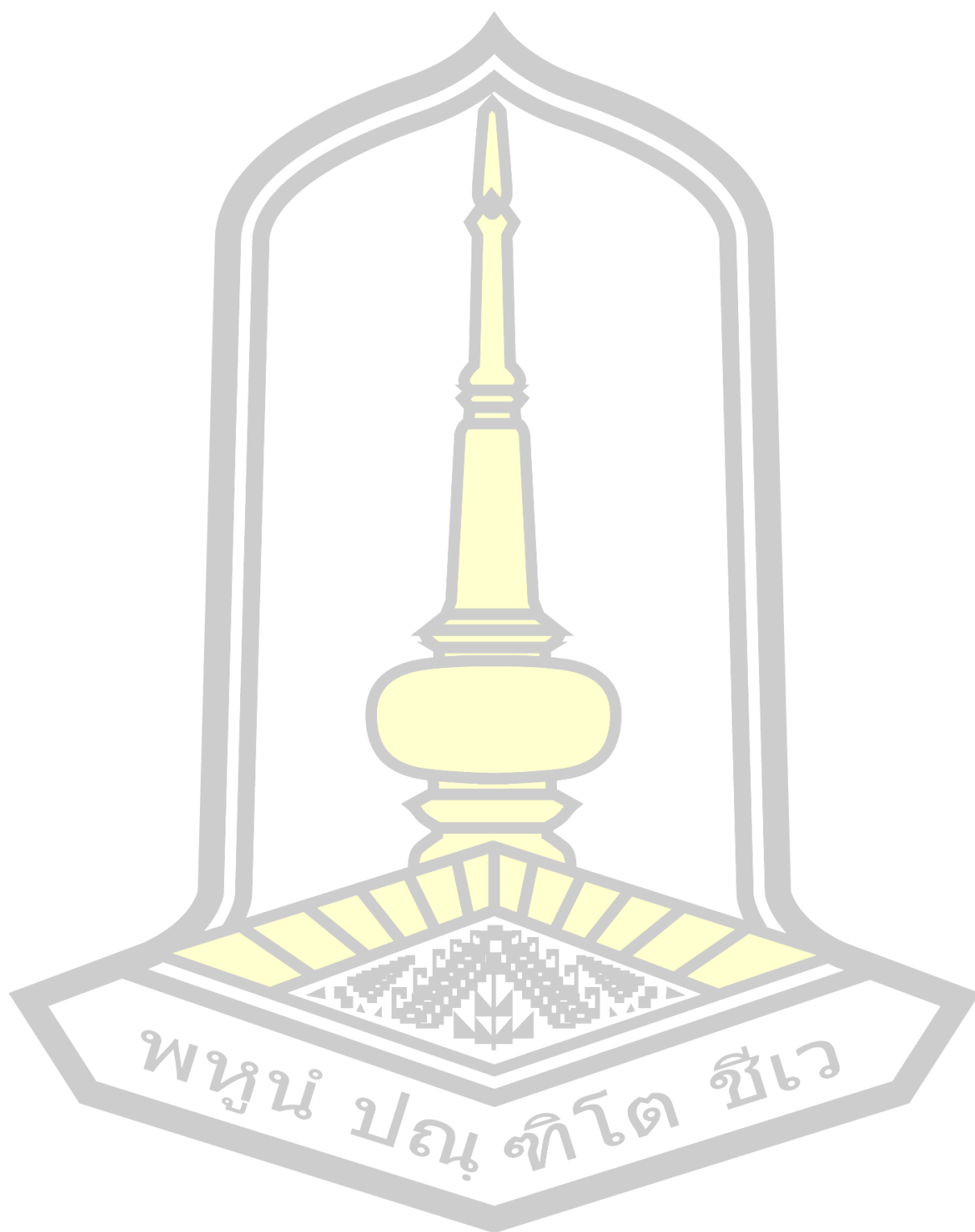


บรรณานุกรม

- Al-Refeai, T., & Al-Suhaibani, A. (1997). Prediction of CBR Using Dynamic Cone Penetrometer. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 9(2), 191-203. doi:10.1016/s1018-3639(18)30676-7
- Aldaoood, A. (2020). Impact of fine materials on the saturated and unsaturated behavior of silty sand soil. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(3), 717-725. doi:10.1016/j.asej.2019.11.005
- Amadi, A. A., Sadiku, S., Abdullahi, M., & Danyaya, H. A. (2018). Case study of construction quality control monitoring and strength evaluation of a lateritic pavement using the dynamic cone penetrometer. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(5), 530-539. doi:10.1016/j.ijprt.2018.07.001
- Carrion, M. A., Coop, M. R., & Nocilla, A. (2019). Assessment of the effects of the structure on the compression behaviour of a young alluvial silty soil. *Soils and Foundations*, 59(4), 1024-1036. doi:10.1016/j.sandf.2019.04.004
- Chindraprasirt, P., Kampala, A., Arngbunta, A., & Horpibulsuk, S. (2020). Engineering Characteristics of Khon Kaen Loess as Construction Material. *IALT*, 22(1344-9656), 228-238.
- Consoli, N. C., Vaz Ferreira, P. M., Tang, C.-S., Veloso Marques, S. F., Festugato, L., & Corte, M. B. (2016). A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes. *Soils and Foundations*, 56(6), 1082-1088. doi:10.1016/j.sandf.2016.11.011
- Erzin, Y., & Turkoz, D. (2015). Use of neural networks for the prediction of the CBR value of some Aegean sands. *Neural Computing and Applications*, 27(5), 1415-1426. doi:10.1007/s00521-015-1943-7
- Feleke, G. G., & Araya, A. A. (2016). *Prediction of CBR using DCP for local subgrade materials*. Paper presented at the The 1st International Conference on Transportation and Road Research, Mombasa, Kenya.

- Ganju, E., Kim, H., Prezzi, M., Salgado, R., & Siddiki, N. Z. (2016). Quality assurance and quality control of subgrade compaction using the dynamic cone penetrometer. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(11), 966-975.
doi:10.1080/10298436.2016.1227664
- George, V., Rao, N. C., & Shivashankar, R. (2009). PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(3), 189-199. doi:10.1080/10298430802342765
- Harison, J. A. (1987). Correlation between California bearing ratio and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils. *Instn Ciu. Engrs*, 83, 833 - 844.
- IDOT. (2005). *PAVEMENT TECHNOLOGY ADVISORY - DYNAMIC CONE PENETROMETER - PTA-T4*. Retrieved from
- Kaewhanam, N., Chaisaeng, J., Chaisaeng, P., Outsaha, P., Yuwarach, S., & Chaiyasan, C. (2014). *The updated physical properties of soil in Northeast Thailand*. Paper presented at the The 6th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI), Apsara Angkor Resort & Conference, Siem Reap, Kingdom of Cambodia.
- Lee, J.-S., Kim, S. Y., Hong, W.-T., & Byun, Y.-H. (2019). Assessing subgrade strength using an instrumented dynamic cone penetrometer. *Soils and Foundations*, 59(4), 930-941. doi:10.1016/j.sandf.2019.03.005
- Lines, S., Williams, D. J., & Galindo - Torres, S. A. (2017). *Determination of Thermal Conductivity of Soil Using Standard Cone Penetration Test*. Paper presented at the 2nd International Conference on Advances on Clean Energy Research, ICACER 2017, Berlin, Germany.
- Livneh, M. (1989). Validation of Correlations Between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests. *Transp. Res.*, 1219, 56 - 67.
- Mehrpazhouh, A., Moghadas Tafreshi, S. N., & Mirzababaei, M. (2019). Impact of repeated loading on mechanical response of a reinforced sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(4), 804-814.
doi:10.1016/j.jrmge.2018.12.013

- Patel, M. A., & Patel, H. S. (2013). Laboratory Assessment to Correlate Strength Parameter from Physical Properties of Subgrade. *Procedia Engineering*, 51, 200-209. doi:10.1016/j.proeng.2013.01.029
- Patel, M. A., Patel, H. S., & Dadhich, G. (2013). Prediction of Subgrade Strength Parameters from Dynamic Cone Penetrometer Index, Modified Liquid Limit and Moisture Content. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 245-254. doi:10.1016/j.sbspro.2013.11.117
- Rehman, Z. U., Khalid, U., Farooq, K., & Mujtaba, H. (2017). Prediction of CBR Value from Index Properties of different Soils. *UET*, 22, 17 - 26.
- Sabat, A. K. (2013). Prediction of california bearing ratio of a soil stabilized with lime and quarry dust using artificial neural network. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18.
- Salgado, R., & Yoon, S. (2003). *Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) for Subgrade Assessment*. Retrieved from
- Shahien, M. M., & Farouk, A. (2013). Estimation of deformation modulus of gravelly soils using dynamic cone penetration tests. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 633-640. doi:10.1016/j.asej.2013.01.008
- Stróżyk, J., & Tankiewicz, M. (2014). The Undrained Shear Strength of Overconsolidated Clays. *Procedia Engineering*, 91, 317-321. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.067
- Taskiran, T. (2010). Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Advances in Engineering Software*, 41(6), 886-892. doi:10.1016/j.advengsoft.2010.01.003
- Wilches, F. J., Burbano, J. L. A., & Sierra, E. E. C. (2020). Subgrade soils characterization data, for correlation of geotechnical variables on urban roads in northern Colombia. *Data in Brief*, 32. doi:10.1016/j.dib.2020.106095



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายจิรวุฒน์ โชคเกิด
วันเกิด	1 ธันวาคม 2540
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 35 บ้านค้อน้อย ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏ มหาสารคาม พ.ศ. 2557 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสารคามพิทยาคม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรม โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2567 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทัต ชีเว