



ผลของพลังงานในการบดอัดดินที่ใช้สำหรับการก่อสร้างงานดินในจังหวัดสระแก้ว

ศุภวิชญ์ ศรีไทรคู¹ ศุภกิจ นนทนนันท์^{2*} และ ธเนศ ทองเดชศรี³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพลังงานในการบดอัดดินสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง โดยนำดินตัวอย่างจากแหล่งดินที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดสระแก้วจำนวน 4 แหล่ง มาทำการทดสอบการบดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการและการทดสอบการรับแรงเฉือนด้วยวิธี CBR เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ชนิดของดิน ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ค่าซีบีอาร์ ค่าการบวมตัวกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน 3 ระดับ ได้แก่ 290 kJ/m^3 , 604 kJ/m^3 และ $2,748 \text{ kJ/m}^3$ ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อพลังงานในการบดอัดเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลง สถานภาพของดินในด้านขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเป็นพลาสติก ค่าการบวมตัวและค่าซีบีอาร์ พบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นกับปริมาณเนื้อดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. กับค่าพลังงานในการบดอัด ผลลัพธ์ของการวิจัยในครั้งนี้สามารถทำนายค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าความชื้นที่เหมาะสม ค่าการบวมตัว และค่าซีบีอาร์ เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพการออกแบบและก่อสร้างงานดินได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การบดอัดดิน; พลังงานการบดอัด; ซีบีอาร์; คุณสมบัติดินที่บดอัด

รับพิจารณา: 18 มกราคม 2564

แก้ไข: 28 มกราคม 2564

ตอบรับ: 29 มกราคม 2564

¹ นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +662 797 0999 ต่อ 1324 อีเมล: fengskn@ku.ac.th

Effects of Compaction Energy on Soils for Earthwork Construction in Sa Kaeo Province

Supawich Srisaikoo¹ Supakij Nontananandh^{2*} and Thanet Thongdetsri³

Abstract

The objective of this research was to study effects of energy applied to soil compaction used in construction. Soil samples were collected in four areas of construction sites in Sa Kaeo province to perform compaction test and CBR in the laboratory in order to evaluate relations between soil types, maximum dry density, optimum moisture content along with the values of CBR and soil swelling, based on changes of the energy on 3 levels such as 290 kJ/m³, 604 kJ/m³ and 2,748 kJ/m³. The results revealed that the maximum dry densities increased with compaction energy while optimum moisture content decreased accordingly. It is also found that the properties of compacted soils such as soil consistency (liquid limit and plasticity index), soil swelling, CBR were in linear relations to the quantity of soil particles smaller than 0.075 mm besides the compaction energies. The results thus can be used to predict the maximum dry density, optimum moisture content, swelling and CBR in order to control quality for the appropriate design and earthwork constructions.

Keywords: soil compaction; compaction energy; CBR; property of compacted soil

Received: January 18, 2021

Revised: January 28, 2021

Accepted: January 29, 2021

¹ Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

³ Doctoral student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding Author, Tel. +66 2 797 0999 ext.1324 e-mail: fengskn@ku.ac.th

1. บทนำ

จากการที่ประเทศไทยได้เข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน และทางภาครัฐมีนโยบายในการจัดตั้งเขตเศรษฐกิจพิเศษ เพื่อส่งเสริมการสร้างเชื่อมโยงกับประเทศในภูมิภาค และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในการจ้างงานด้วยการกระจายความเจริญสู่ท้องถิ่นที่มีศักยภาพ อันจะนำไปสู่การสร้างความมั่นคงของประเทศโดยเฉพาะพื้นที่ชายแดนที่ติดกับประเทศเพื่อนบ้าน และทำให้สามารถก้าวสู่การเป็นประชาคมอาเซียนได้อย่างสมบูรณ์ โดยจังหวัดสระแก้วเป็นอีกหนึ่งพื้นที่เป้าหมายในการขยายพื้นที่เป็นบริเวณเขตเศรษฐกิจพิเศษ ส่งผลให้เกิดความเจริญและขยายตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นต้องจัดเตรียมและก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานโดยเฉพาะโครงข่ายการคมนาคมให้สมบูรณ์และสามารถใช้งานได้เหมาะสม [1]

การบดอัดดินเป็นการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีทางกลที่ทำได้ง่ายและประหยัดที่สุด โดยช่วยให้ดินมีคุณสมบัติในการรับแรงเฉือนได้ดีขึ้น ลดการทรุดตัวของดิน คุณสมบัติความที่บ้น้ำที่สูงขึ้น ควบคุมการบวมตัวและการหดตัวของดิน ยืดอายุความทนทาน [2] ซึ่งจะมีการทดสอบควบคุมกันกับการทดสอบซีบีอาร์ (CBR, California Bearing Ratio) [3] เพื่อที่จะพิจารณาความสามารถในกำลังรับแรงเฉือนของดินและใช้สำหรับการออกแบบก่อสร้างถนน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพลังงานในการบดอัดดินประเภทต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการก่อสร้างงานดินเพื่อคัดเลือกใช้เป็นวัสดุงานดิน โดยมุ่งไปที่การทดสอบการบดอัดดินโดยใช้พลังงานในการบดอัดดิน 3 ระดับได้แก่ 290 kJ/m^3 , 604 kJ/m^3 และ $2,748 \text{ kJ/m}^3$ และการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้วด้วยวิธีทดสอบค่าซีบีอาร์ โดยการวิจัยนี้จะช่วยยืนยันการคัดเลือกวัสดุดินสำหรับการก่อสร้างโดยพิจารณาจากคุณสมบัติของดินที่บดอัดซึ่งเป็นดินเดิมที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว ได้แก่ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ค่าซีบีอาร์ และค่าการบวมตัวของดิน ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการก่อสร้างและประหยัดค่าใช้จ่ายลดต้นทุนการก่อสร้างจากการเลือกใช้พลังงานที่เหมาะสมกับดินนั้น ๆ

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Lee and Suedkamp [4] ได้พบว่าดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวระหว่าง 30 – 70 % จะทำให้โค้งของการบดอัดมีลักษณะแบบจุดยอดจุดเดียวจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นเหมาะสม (γ_d และ OMC) งานวิจัยโดย Hammond [5] พบความสัมพันธ์ของค่าขีดจำกัดพลาสติกและขีดจำกัดเหลวมีความสัมพันธ์กับความชื้นเหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดดินและมีลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้น

อย่างไรก็ตาม Hilf [6] พบว่าโค้งการบดอัดดินสามารถวิเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนช่องว่างของดินและอัตราส่วนช่องว่างน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเดียวกับโค้งการบดอัดดินที่เสนอโดย Proctor โดยที่จุดยอดจะแสดงค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด (e_{min})

พลังงานที่ใช้ในการบดอัดดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ Yoder [7] ได้ศึกษาการให้พลังงานในการบดอัดดินโดยอ้างอิงการทดสอบของ Proctor [8] พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่เกิดจากการบดอัดดินโดยใช้พลังงานตามมาตรฐานการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (ASTM D698) [9] มีค่าน้อยกว่าการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557) [10] อยู่ในช่วง 85% - 97% โดยมีค่าความชื้นเหมาะสมที่มากกว่าเล็กน้อยอยู่ในช่วง 2% - 5% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่บดอัด Drew [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยด้านพลังงานที่มีผลต่อการบดอัดดิน โดยพบว่า พลังงานที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นลดลง

Chinon [12] ได้ศึกษาคุณสมบัติการบดอัดของดินถมคันทางและค่าซีบีอาร์ พบว่า ค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเป็นพลาสติกของดินมีผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เนื่องจากความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.

Horpibulsuk et al. [13], [14] พบว่าค่าซีบีอาร์และหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเนื้อละเอียด ดินลูกรัง หินคลุกมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับพลังงานในฟังก์ชัน Semi-log นอกจากนี้ยังพบว่าค่าซีบีอาร์และหน่วยน้ำหนักแห้งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

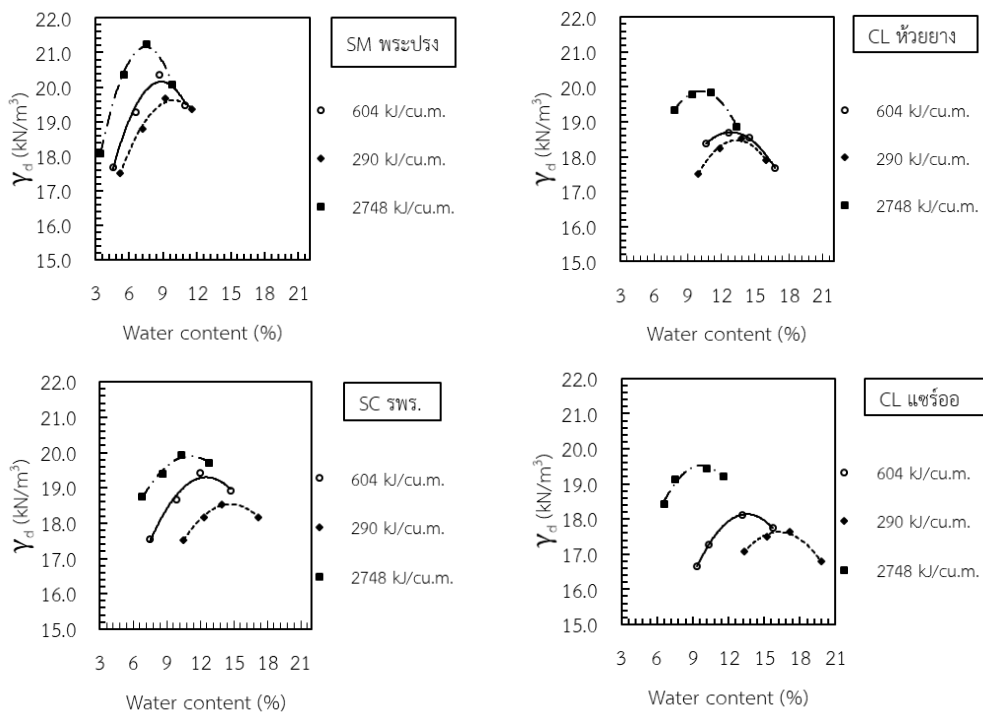
วัสดุดินที่นำมาทดสอบนำมาจากพื้นที่ก่อสร้างจริงในจังหวัดสระแก้ว ซึ่งเป็นโครงการด้านโครงสร้างพื้นฐานในจังหวัดสระแก้ว 4 โครงการ ได้แก่ โครงการก่อสร้างอ่างเก็บน้ำแซร์อ โครงการปรับปรุงอ่างเก็บน้ำพระปรัง โครงการปรับปรุงอ่างเก็บน้ำห้วยยาง และโครงการก่อสร้างอาคารผู้โดยสารนอก 10 ชั้นโรงพยาบาลสมเด็จพระยุพราชสระแก้ว (รพร.) โดยได้ทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (G_s) การหาขนาดและขนาดคละของดินโดยร่อนผ่านตะแกรงและการทดสอบขีดจำกัดอัตรเตอร์เปิร์ก เพื่อจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification (USCS) ดังแสดงในตารางที่ 1

4. ผลการดำเนินการ

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินที่โรงพยาบาลสมเด็จพระยุพราชสระแก้ว พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 10% - 13% และ 18.5 - 19.9 kN/m^3 ดินที่อ่างเก็บน้ำพระปรัง อยู่ในช่วง 7% - 10% และ 19.5 - 21.2 kN/m^3 ดินที่อ่างเก็บน้ำห้วยยางมีค่าอยู่ในช่วง 9% - 13% และ 18.3 - 19.8 kN/m^3 สำหรับดินที่อ่างเก็บน้ำแซร์อมีค่าอยู่ในช่วง 9% - 17% และ 17.5 - 19.8 kN/m^3 ดังรูปที่ 1 แสดงโค้งของการบดอัดดินโดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการบดอัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินและการจำแนกดินที่ใช้ในโครงการ

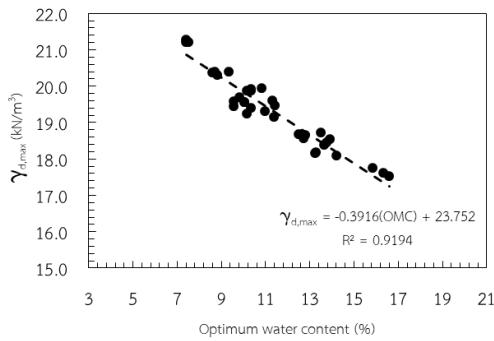
SOIL SAMPLE	G_s	SIEVE ANALYSIS								ATTEBERG'S LIMITS			SOIL TYPE
		1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#50	#100	#200	LL.	PL.	PI.	
รพร.	2.77	97.4	89.1	78.7	69	58.4	-	48.1	37.1	34.5	20.7	13.8	SC
ห้วยยาง	2.55	99.5	98.9	96.1	92.6	84.3	77.8	64.4	60.5	27.9	18.2	9.7	CL
แซร์อ	2.60	98.3	96.9	89.5	82.9	78.6	76.1	66.6	78.9	28.7	19.1	9.6	CL
พระปรัง	2.57	-	100	99.7	98.7	88.2	75.8	58	35.5	-	NP	-	SM



รูปที่ 1 โค้งการบดอัดของดินในโครงการด้วยพลังงานที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินด้วยค่าพลังงานที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังสมการที่ (1) และรูปที่ 2

$$\gamma_{d,max} = -0.3916(OMC) + 23.752 \quad (1)$$

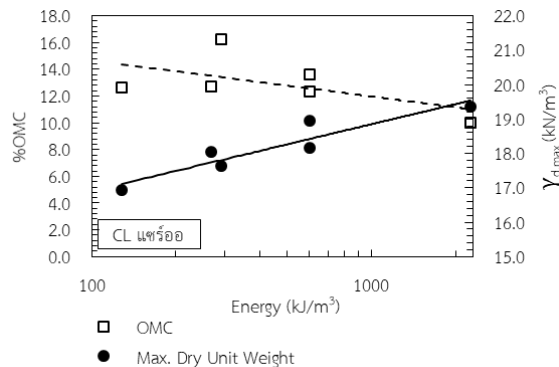
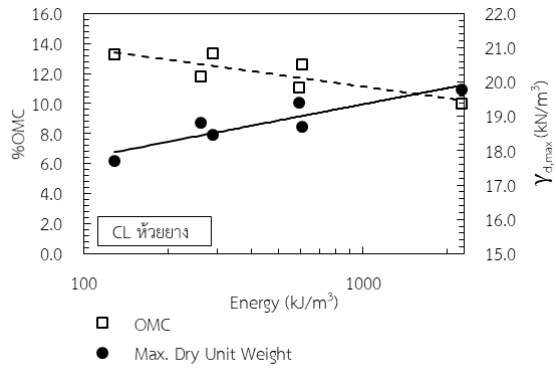
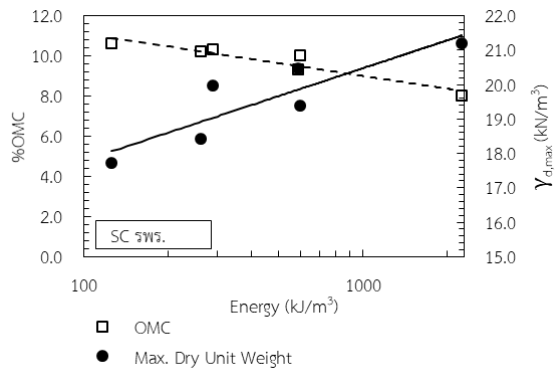
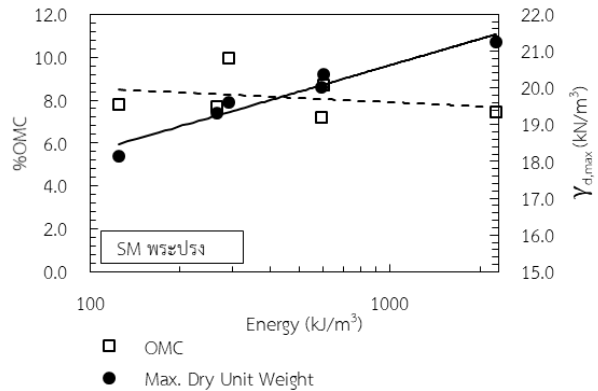


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

จากผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยเมื่อเพิ่มพลังงานในการบดอัดให้สูงขึ้นสามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดให้กับดินได้นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม โดยเมื่อเพิ่มพลังงานในการบดอัดจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลง ในลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบแปรผกผันดังรูปที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่เสนอโดย Drew [11] และ Horpibulsuk et al. [13], [14]

เมื่อทำการศึกษาคูณสมบัติดินของจังหวัดสระแก้ว พบว่าตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบเป็นดินทรายปนดินเนื้อละเอียดหรือดินเนื้อละเอียดที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ และมีกรวดปนเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี [15] ที่ระบุว่าดินเดิมเป็นดินตะกอนธารน้ำพา กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวสะสม (Qa) ตะกอนตะกัปลำน้ำ กรวด ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียวและศิลาแลง (Qt) มักใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้ โดยตัวอย่างดินจากแหล่งดินทั้ง 4 โครงการนี้เป็นดินที่มีคุณสมบัติความเป็นพลาสติกต่ำเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 9-14 ขนาดดินที่เล็กกว่า 0.075 มม. อยู่ในช่วงร้อยละ 36 - 67 ที่มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 16 - 20

kN/m³ และมีค่าซีบีอาร์ ในสถานะแช่น้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 3 - 30 โดยดิน SM และ SC มีค่าซีบีอาร์สูงกว่า CL



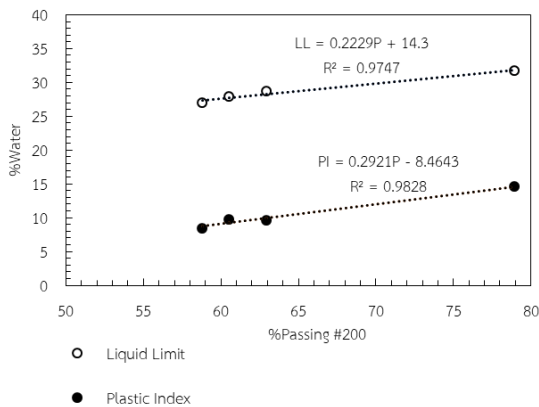
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของพลังงานกับ OMC และ $\gamma_{d,max}$

จากการวิเคราะห์ขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดินจากโครงการอ่างเก็บน้ำแชร้อและอ่างเก็บน้ำห้วยยางพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณของอนุภาคดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. มากกว่าร้อยละ 50 โดยสมการเชิงเส้นนั้นมีค่า R² เท่ากับ 0.9747 และ 0.9828 ดังสมการที่ (2) – (3) และรูปที่ 4

$$LL = 0.2229P + 14.3 \quad (2)$$

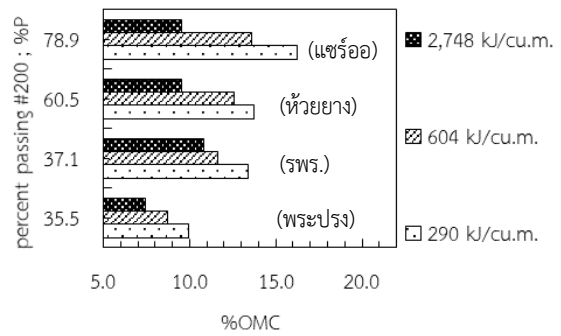
$$PI = 0.2921P - 8.4643 \quad (3)$$

เมื่อ P คือร้อยละของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.

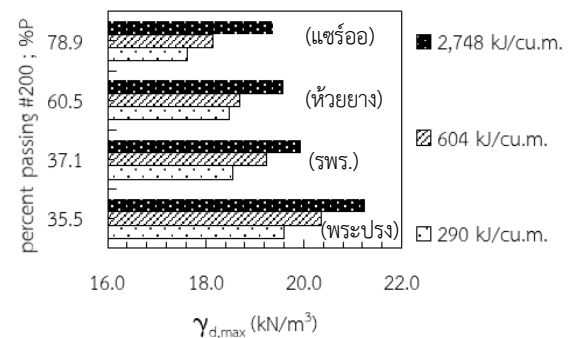


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง LL, PI และความชื้นของดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) มากกว่าร้อยละ 50

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวจะแปรผันตามแร่ของดินเหนียวและปริมาณความชื้นในมวลดิน ซึ่งสามารถใช้ขีดจำกัดเหลวเป็นตัวแทนในทางปฏิบัติได้จากรูปที่ 4 พบว่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเป็นพลาสติกมีความสัมพันธ์กับดินเนื้อละเอียดกว่าคือดินที่มีปริมาณดินเนื้อละเอียดมากกว่าร้อยละ 50 จะมีค่า OMC มาก แต่จะลดลงตามพลังงานที่เพิ่มขึ้นในการบดอัด ในทำนองเดียวกัน ดินที่มีส่วนของดินเนื้อละเอียดมากกว่ามีแนวโน้มจะมีค่า $\gamma_{d,max}$ ที่ต่ำกว่าที่พลังงานในการบดอัดเท่ากัน เมื่อเพิ่มพลังงานในการบดอัดจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าค่า $\gamma_{d,max}$ ก็จะมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยดังรูปที่ 5 และ 6

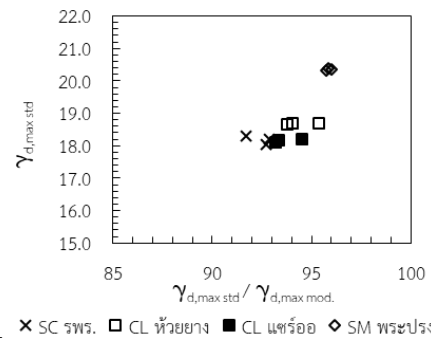


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 มม.และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%OMC)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 มม. และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$)

เมื่อทำการเปรียบเทียบ $\gamma_{d,max, std.}$ ที่บดอัดด้วยพลังงานที่ต่ำกว่ากับ $\gamma_{d,max, mod.}$ ที่บดอัดด้วยพลังงานที่สูงกว่าของดินเนื้อละเอียด พบว่ามีอัตราส่วนใกล้เคียงกันในช่วงร้อยละ 91 – 96 ดังรูปที่ 7 ดังนั้นในการก่อสร้างจึงควรพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดินให้เหมาะสมกับชนิดของดินเพื่อประสิทธิภาพของการก่อสร้างและประหยัดค่าใช้จ่าย

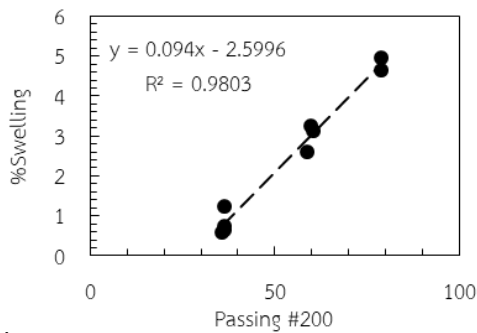


รูปที่ 7 อัตราส่วนร้อยละของ $\gamma_{d,max, std.}$ ต่อ $\gamma_{d,max, mod.}$

นอกจากคุณสมบัติด้านการอัดแน่นแล้ว คุณสมบัติด้านการบวมตัวและค่าซีบีอาร์ ในสถานะแช่น้ำก็เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการออกแบบโครงสร้าง โดยเฉพาะในกรณีการก่อสร้างถนนสิ่งที่จะต้องพิจารณาและให้ความสำคัญเพิ่มเติมคือการบวมตัวของดิน ซึ่งได้จากการทดสอบซีบีอาร์ในสถานะแช่น้ำ (Soaked CBR) เป็นการจำลองสภาพดินในกรณีการเกิดน้ำท่วมหลังฝนตกเป็นเวลานาน ๆ เมื่อดินเกิดการบวมตัว ส่งผลให้การต้านทานแรงเฉือนของดินก็จะลดลงเช่นกัน ดังนั้นค่าการบวมตัวจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบและก่อสร้างดินคั่นทาง

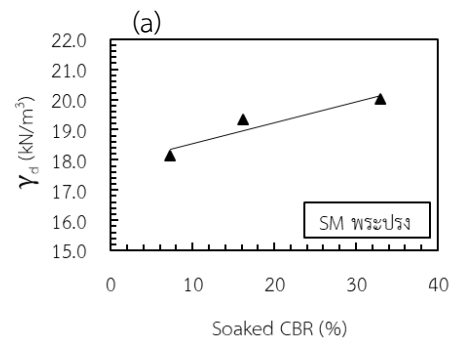
จากผลการการศึกษาพบว่าค่าการบวมตัวมีความสัมพันธ์กับความละเอียดของเนื้อดิน โดยเมื่อมีเนื้อดินละเอียดมาก ทำให้มีค่าการบวมตัวที่สูง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (4) และรูปที่ 8

$$\%Swelling = 0.094(P) - 2.5996 \quad (4)$$

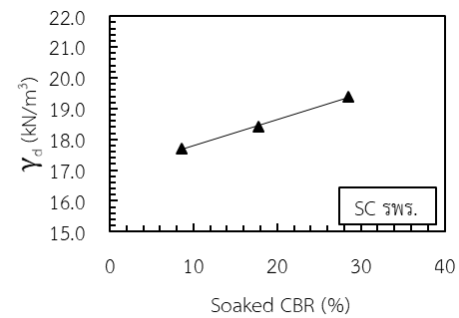


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของการบวมตัว (%Swelling) และ ปริมาณของเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 มม.

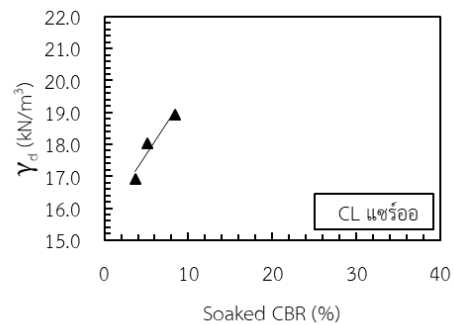
นอกจากค่าพลังงานบดอัดที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดดังได้กล่าวมาแล้ว เมื่อวิเคราะห์ดินแต่ละแหล่งยังพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าซีบีอาร์ ดังรูปที่ 9 อย่างไรก็ตาม เมื่อนำข้อมูลของดินทั้ง 4 โครงการมาวิเคราะห์รวมกันแล้วจะสังเกตพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับค่าซีบีอาร์ในช่วงที่ดินมีค่าซีบีอาร์สูง ๆ (มากกว่า 10%) ดังแสดงในรูปที่ 10



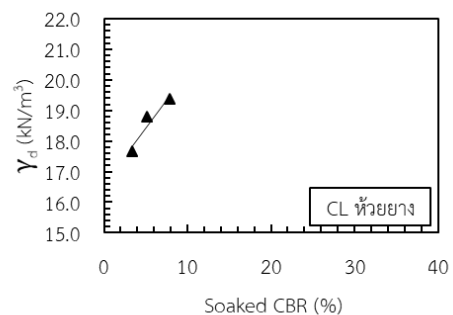
(a) ดิน SM (พระปรอง)



(b) ดิน SC (รพร.)

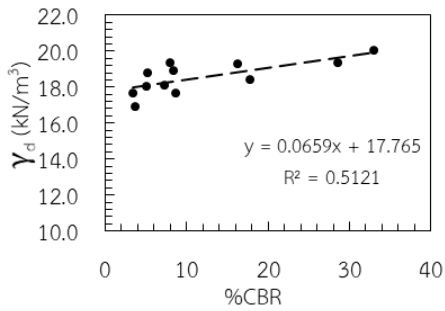


(c) ดิน CL (แซร์อ)



(d) ดิน CL (ห้วยยาง)

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่า $\gamma_{d,max}$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของค่าซีบีอาร์กับค่าความหนาแน่นแห้งของดินตัวอย่างรวมทุกโครงการ

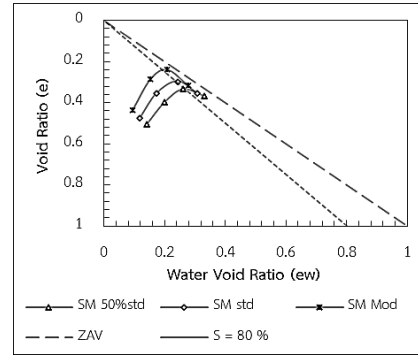
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนช่องว่างของน้ำเทียบกับอัตราส่วนช่องว่างพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นรูปโค้งคว่ำ เช่นเดียวกับโค้งของการบดอัดระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในมวลดิน โดยการบดอัดดินที่พลังงานสูงกว่าจะมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด (e_{min}) ลดลง ดังรูปที่ 11 การวิเคราะห์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการหาค่าระดับความอิ่มตัว (S) ในมวลดินบดอัด Hilf [6] ผลการวิเคราะห์พบว่า การบดอัดดินบริเวณ $Y_{d, max}$ ของดินในโครงการมีค่าระดับความอิ่มตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 80-85 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ยอมรับได้

5. สรุปผล

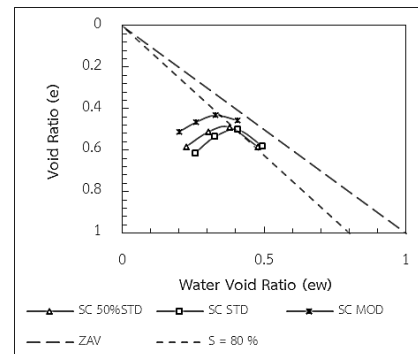
จากการศึกษาพลังงานในการบดอัดดินได้ข้อสรุปดังนี้

5.1 ดินในโครงการเป็นดินเดิมในพื้นที่ก่อสร้างที่จังหวัดสระแก้วมีลักษณะเป็นดินทรายปนดินเนื้อละเอียดหรือดินเนื้อละเอียดที่มีความเป็นพลาสติกต่ำและมีกรวดปนเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี สามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้เช่นดินถมคันทาง ทั้งนี้เส้นโค้งของการบดอัดมีลักษณะเป็นโค้งที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว สามารถคาดการณ์ได้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อเติมน้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

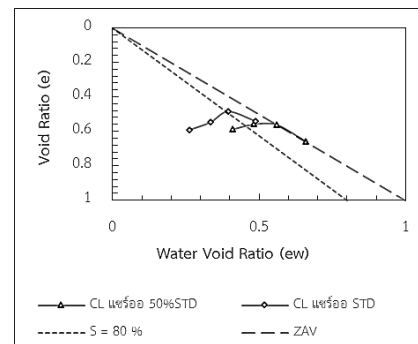
5.2 การเพิ่มพลังงานในการบดอัดสามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและกำลังรับแรงเฉือนของดินซึ่งสามารถแสดงด้วยค่าซีบีอาร์ จากการวิเคราะห์อัตราส่วนของ การบดอัดดินที่ใช้พลังงานต่างกันพบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 91-96 ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้ในการเลือกพลังงานบดอัดที่เหมาะสมกับชนิดของดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานและประหยัดค่าใช้จ่าย



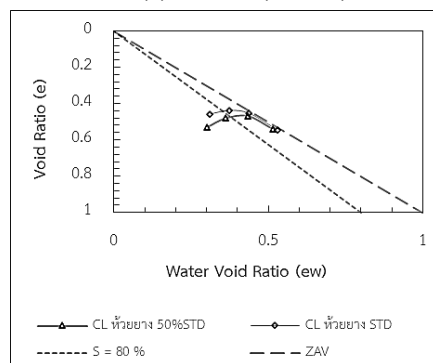
(a) ดิน SM (พระปรง)



(b) ดิน SC (รพร.)



(c) ดิน CL (แฉะร้อ)



(d) ดิน CL (ห้วยยาง)

รูปที่ 11 โค้งของอัตราส่วนช่องว่างน้ำและอัตราส่วนช่องว่างของดินที่ใช้ในโครงการ

5.3 การประมาณค่าความหนาแน่นแห้งและค่าซีบีอาร์ สามารถหาได้จากสมการเส้นตรงของค่าความหนาแน่นแห้ง ค่าร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ค่าขีดจำกัดเหลว ดัชนีความเป็นพลาสติก ค่าซีบีอาร์ และค่าการบวมตัว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการออกแบบงานก่อสร้างประเภทงานดิน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การอนุเคราะห์สนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษานี้ และขอขอบคุณบริษัทเดนิช ซอยล์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ในการอนุเคราะห์ดำเนินการทดสอบตัวอย่าง รวมทั้งนายศรีณัฐ เรืองฉาย วิศวกรอิสระ ที่ให้ความช่วยเหลืองานทดสอบคุณสมบัติดิน ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงบรรลุตามวัตถุประสงค์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pojanee Artarotpinyo, "Sakaeo : The Future After the Special Economy," 2011.
- [2] Manfred R. Hausmann, Engineering principle of ground modification, McGraw-Hill, 1990.
- [3] American Society for Testing and Materials, "ASTM D1883 Standard Test Method for Californai Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils," 2016.
- [4] P. Y. Lee and R. J. Suedkamp, "Charisteristics of Irregularly Sharpe Compaction Curve of Soils.," *Highway Research Record*, pp. 1-9, 1972.
- [5] A. A. Hammond, "Evolution of One-Point Method for Determining the Laboratory Maximum," *International conference on compaction*, vol. 1, pp. 47-50, 1980.
- [6] J. W. Hilf, "an Investigation of Pore-water Pressure in Compacted Cohesive Soils," Colorado University, Denver, 1956.
- [7] E. J. Yoder, Principles of Pavement Design, New York: Wiley, 1959.

- [8] R. Proctor, The Design and Construction of Rolled Earth Dams, 1933.
- [9] American Society for Testing and Materials, ASTM D698 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).
- [11] R. I. Drew, "Influence of compaction energy on soil engineering properties," Iowa State University, Ames, 2005.
- [12] S. Chinon, "Compaction Characteristics and CBR of Subgrade Soils," Suranaree University, Nakhonratchasima, 2013.
- [13] S. Horpibulsuk, W. Katkan and A. Apichatvullop, "An Approach for Assessment of Compaction Curves of fine Grained Soils at Various Energies Using a One Point Test," *Japan Society of Soil Mechanics*, vol. 48, no. 1, pp. 115-125, 2008.
- [14] S. Horpibulsuk, A. Suddeepong, P. Chamket and A. Chinkulkijniwat, "Compaction behavior of Fine-Grained Soils, Lateritic Soils and Crushedrocks," *Japan Society of Soil Mechanics*, vol. 53, no. 1, pp. 166-172, 2012.
- [15] Department of Mineral Resources, Zoning Classification for Geological and Mineral Resources Allocation in Sa Kaeo Province, Bangkok: ONPA Co., Ltd., 2011, pp. 13-19.