

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ชื่อโครงการวิจัย

การประมาณพฤติกรรมการบดอัดและความแข็งแรงของดิน
ที่ได้จากการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ

เลขที่ 34/53

๕ BX ๐1๖8729

16 ส.ค. 2554

โดย

29 15 77 สยาม ยิ้มศิริ

เริ่มบริการ

11 ต.ค. 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน 2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการประมาณค่า California Bearing Ratio (CBR) ของตัวอย่างดินที่มีความชื้นต่างๆ และถูกบดอัดด้วยพลังงานต่างๆ โดยที่ทราบเส้นโค้งของการบดอัดหนึ่งเส้นและค่า CBR หนึ่งค่า วิธีการที่เสนอนี้เป็นการรวมกันของแนวคิดการประมาณเส้นโค้งการบดอัดที่เสนอโดย Blotz et al. (1998) และ Horpibulsuk et al. (2006) และแนวคิดการประมาณค่า CBR ที่เสนอโดย Li & Selig (1994) วิธีการนี้ได้ทดลองกับดินจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้ใช้ในการประมาณค่าของดินที่สนใจและปรากฏว่าความแม่นยำที่ได้มีค่าปานกลาง

ABSTRACT

This research studies an approach to predict the values of California Bearing Ratio (CBR) at various molding water contents and compactive efforts from a known compaction curve and a CBR test result. The procedure adapts a combination of an idea for predicting compaction curves from Blotz et al. (1998) and Horpibulsuk et al. (2006) and an idea for predicting CBR values from Li & Selig (1994). The procedure is applied to granular soils from the Eastern of Thailand. The obtained data are used to evaluate the applicability of the proposed approach and to derive the model parameters. The data of independent soil is used to verify the predicting results. The prediction shows fair agreement.

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

จากงานที่เกี่ยวกับการศึกษา correlation ระหว่าง $\gamma_{dry,max}$ และ w_{omc} กับ index properties ยังมีข้อถกเถียงกันว่า index properties ตัวใดที่จะให้ degree of correlation ที่ดีกว่ากันระหว่าง liquid limit, plastic limit, และ plasticity index และ การศึกษาส่วนใหญ่จะเป็นสำหรับ standard Proctor compaction โครงการวิจัยนี้จะได้ดำเนินการศึกษาในจุดนี้อีกครั้งและสำหรับ modified Proctor compaction เนื่องจากในปัจจุบัน โครงสร้างทางวิศวกรรมปฐพีต้องรับน้ำหนักมากขึ้นทำให้การบดอัดเป็นแบบ modified Proctor compaction มากขึ้น

ในโครงการวิจัยนี้จะมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมาจากพื้นฐานของ Pandian et al. (1997) และ Blotz et al. (1998) ซึ่งก็คือการพัฒนาแบบจำลองของ รุ่งลาวัลย์ และคณะ (2548) ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยอาศัยข้อมูลจากย่อหน้าที่แล้วด้วยว่า index properties ตัวใดที่ควรจะนำมาใช้ในการ correlation แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้จะสามารถประมาณ compaction curve ของดินที่ compactive effort ต่างๆ ได้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณ compaction curve ที่ได้นี้จะถูกนำมาพร้อมกับแนวคิดของ Li & Selig (1994) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถประมาณค่า CBR ของดินที่ compactive effort ต่างๆ และปริมาณความชื้นต่างๆ ได้ เหตุที่เลือกใช้ CBR เป็น parameter ที่ศึกษาเนื่องจาก CBR เป็น strength parameter ที่ใช้มากที่สุดในการออกแบบถนน

คำนำ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือการศึกษากฎการประมาณพฤติกรรมการบดอัดของดินและความแข็งแรงของดินที่ได้จากการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ เพื่อให้ได้ model สำหรับคาดการณ์ compaction curve ที่พลังงานต่างๆ และ CBR ที่พลังงานและความชื้นต่างๆ โครงการนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ (i) การทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมการบดอัดของดินและความแข็งแรงของดินที่ได้จากการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ และ (ii) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการคาดการณ์พฤติกรรมที่ได้ศึกษามา การทดลองในห้องปฏิบัติการจะเป็นการทดสอบ compaction และ CBR ส่วนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้สามารถมี model ที่สามารถคาดการณ์ compaction curve และ CBR ของดินที่ถูกบดอัดที่พลังงานต่างๆ ได้

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 (เลขที่ 34/53) จากมหาวิทยาลัยบูรพา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ii
คำนำ	iii
สารบัญ	iv
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1-2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1-2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1-2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การปรับปรุงดิน โดยการบดอัด	2-1
2.1.1 การบดอัด ดิน	2-1
2.1.2 วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงดิน	2-1
2.1.3 ปัจจัยพื้นฐานในกา รบดอัดดิน	2-1
2.1.4 ข้อกำหนดในกา รบดอัดดิน	2-1
2.1.5 ผลการบดอัดที่มี ต่อดิน	2-2
2.1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและ CBR ของดิน	2-3
2.2 การทดสอบดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวในห้องปฏิบัติการ	2-4
2.2.1 การบดอัด ดินในห้องทดลอง	2-4
2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและค่าความชื้นจากผลการบดอัดในห้องทดลอง	2-4
2.3 ผลกระทบของพลังงานต่อการบดอัดดิน	2-5
2.4 ซีบีอาร์ (California Bearing Ratio)	2-6
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-8
2.5.1 การทำนายกราฟการบดอัด (Prediction of compaction curve) (รู้่งลาวัลย์ ราชัน และสุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2548)	2-8
2.5.2 Re -examination of compaction characteristics of fine-grained soils (Pandian et al, 1997)	2-8
2.5.3 Resilient Modulus For Fine-Grained Subgrade Soils (Li & Selig, 1994)	2-8

2.5.4 Estima ting Optimum Water Content And Maximum Dry Density	
Weight For Compacted (Blotz et al., 1998)	2-9
2.6 อภิปรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-9
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 ดินที่ใช้ทดลอง	3-1
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	3-1
3.3 วิธีการทดลอง	3-1
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การจำแนกดินตัวอย่างที่ทำการทดลอง	4-1
4.2 การบดอัดของดินตัวอย่าง	4-2
4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d \max}$) กับ Plastic limit	4-6
4.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Plastic limit	4-7
4.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d \max}$) กับ Liquid limit	4-8
4.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Liquid limit	4-10
4.7 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า (CBR_{omc} , $CBR_{omc} \pm 3\%$) กับพลังงานที่ทำการบดอัด	4-11
4.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง (CBR_t/CBR_{omc}) กับ ($w_t - w_{omc}$)	4-15
4.9 การศึกษาการประมาณกราฟการบดอัด	4-16
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	
5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบการบดอัด	5-1
5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง CBR	5-7
5.3 การเสนอวิธีการประมาณค่า CBR	5-11
5.4 การตรวจสอบผลการคำนวณ	5-12
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	6-1
เอกสารอ้างอิง	R-1
ภาคผนวก ก	ก-1
ภาคผนวก ข	ข-1

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย

การบดอัดดินคือการทำให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วยกระบวนการทางกลซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่คุ้มค่างับค่าใช้จ่ายที่สุดเทียบกับเทคนิคการปรับปรุงดินชนิดอื่น การบดอัดดินถือเป็นกระบวนการก่อสร้างที่สำคัญสำหรับงานทางตั้งแต่อดีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินเม็ดหยาบที่ใช้เป็นวัสดุทาง โดยทั่วไปการบดอัดดินจะเพิ่มความหนาแน่นของดิน, เพิ่มกำลัง, ลดการอัดตัว, และลดความชื้นน้ำ กราฟการบดอัด (water content – dry unit weight) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะใช้เป็นพื้นฐานในการพิจารณาความเหมาะสมของดินต่อการบดอัด ค่า California Bearing Ratio (CBR) เป็นดัชนีที่แสดงถึงกำลังของดินที่ได้จากการบดอัด ทั้งคุณสมบัติเกี่ยวกับการบดอัดและ CBR มีความสำคัญในการออกแบบงานทาง, การกำหนดข้อกำหนดในการก่อสร้าง, และการควบคุมการก่อสร้าง การที่มีแหล่งดินจำนวนมากที่จะต้องทำการทดสอบเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการเป็นวัสดุเพื่อการก่อสร้างนี้ทำให้ต้องใช้เวลาและพลังงานจำนวนมากในการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะเสนอการทดสอบง่ายๆเพื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านการบดอัดเบื้องต้นของดิน Al-Khafaji (1993), Gurtug & Sridharan (2002), และ Sridharan & Nagaraj (2005) เสนอการใช้ค่า liquid limit และ plastic limit เพื่อประมาณค่า optimum water content (w_{OMC}) และ maximum dry unit weight ($\gamma_{dry,max}$) ของดินเม็ดละเอียด Korfiatis & Manikopoulos (1982) เสนอการใช้ขนาดผละของดินในการประมาณค่า $\gamma_{dry,max}$ ของดินเม็ดหยาบ Pandian et al. (1997) และ Horpibulsuk et al. (2006) เสนอวิธีการสำหรับประมาณกราฟการบดอัดของดินเม็ดละเอียด และ Blotz et al. (1998) เสนอวิธีการในการประมาณค่า w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$ ของดินเม็ดละเอียดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆ

ถึงแม้ว่าดินเม็ดละเอียดจะใช้ในการก่อสร้างงานทางแต่การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านการบดอัดของมันกลับมีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของดินเม็ดละเอียด นอกจากนี้การศึกษากการประมาณคุณสมบัติของดินอื่นๆที่ได้จากการบดอัดก็มีน้อยมาก ถ้าพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติด้านกำลังน่าจะมีเพียงงานวิจัยของ Li & Selig (1994) เท่านั้นที่เสนอวิธีการประมาณค่า resilient modulus ของดินเม็ดละเอียดที่มีความชื้นต่างๆและถูกบดอัดด้วยพลังงานต่างๆ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการในการประมาณค่า CBR ของดินที่มีความชื้นต่างๆและถูกบดอัดด้วยพลังงานต่างๆจากข้อมูลกราฟการบดอัดและค่า CBR วิธีการที่เสนอจะเป็นการรวมกันของแนวคิดในการประมาณกราฟการบดอัด โดย Blotz et al. (1998) และ Horpibulsuk et al. (2006) และแนวคิดในการประมาณค่า CBR ของ Li & Selig (1994)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ

- 1.2.1 นำเสนอแบบจำลองการทำนายกราฟการบดอัดดินที่พลังงานต่างๆซึ่งแตกต่างกันโดยใช้การทดสอบเพียงการทดสอบเดียวซึ่งจะทำให้ไม่ยุ่งยากในการทำการทดสอบหลายครั้ง
- 1.2.2 นำเสนอแบบจำลองการทำนายค่า CBR โดยการใช้ความสัมพันธ์ในการทราบค่า CBR โดยการใช้การทดสอบ CBR ครั้งเดียวซึ่งจะทำให้ไม่ยุ่งยากในการทำการทดสอบหลายครั้ง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะเป็นการดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาเป็นหลัก โดยจะนำดินที่สนใจจากสถานที่ต่างๆในภาคตะวันออกของประเทศไทยซึ่งจะเป็นดินที่มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปมาทำการทดสอบการบดอัดและ CBR เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ โดยจะทำให้ความสัมพันธ์เหล่านี้ใช้ในการทำนายค่าต่างๆได้โดยการทดสอบเพียงการทดสอบเดียว และทำการทดสอบตรวจสอบการทำนายว่าใกล้เคียงการทดสอบจริงหรือไม่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ข้อมูลที่จะได้จากโครงการวิจัยนี้เป็นประโยชน์ดังนี้

- 1.4.1 ทราบถึงความสัมพันธ์ที่จะทำการประมาณค่าต่างๆของการบดอัดดิน
- 1.4.2 ทราบถึงความสัมพันธ์ที่จะทำการประมาณค่าต่างๆของ CBR
- 1.4.3 สามารถนำความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบนี้เป็นบรรทัดฐานในการทำนายค่าการบดอัดดินและ CBR ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการหาค่าต่างๆ โดยการทดสอบเพียงครั้งเดียว

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงดินโดยการบดอัด

2.1.1 การบดอัดดิน (Compaction)

การบดอัดเป็นวิธีการปรับปรุงดินแบบธรรมชาติด้วยเครื่องมือกลเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติในการใช้งานด้านวิศวกรรมแต่ละประเภทได้อย่างเหมาะสม พลังงานจากการบดอัดมีผลทำให้เกิดการแปรสภาพขนาดผลของเม็ดดินมวลหยาบซึ่งจะมีปริมาณการแตกร้าวมากกว่าเม็ดดินละเอียดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งของเม็ดดินเป็นเกณฑ์ การบดอัดเป็นการทำให้อากาศในเม็ดดินถูกขับออกไปเนื่องจากช่องว่างของดินลดลง

2.1.2 วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงดิน

เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของดินให้ดินรับน้ำหนักได้ดีขึ้น, ทนต่อน้ำน้อย, ยอมให้น้ำซึมผ่านให้น้อยลง, และเพิ่มกำลังในการรับแรงเฉือน

2.1.3 ปัจจัยพื้นฐานในการบดอัดดิน

ก. การเลือกชนิดของดินที่นำมาใช้ในการบดอัด

- ควรจะมีขนาดผลที่ดี (Well graded)
- มีความเหนียวต่ำ (Low Plasticity)

ข. ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด

- ปริมาณน้ำที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้การบดอัดได้ความหนาแน่นสูงสุด

ค. พลังงานที่ใช้ในการบดอัด

- ต้องมีมากพอที่จะทำการบดอัดดินให้มีความหนาแน่นตามมาตรฐานกำหนด
- งานเข็นดินหรือร่องแกน จะต้องบดอัดให้แน่นไม่น้อยกว่า 98% ของ Standard Proctor Test
- งานจราจรและงานรองพื้น จะต้องบดอัดให้แน่นไม่น้อยกว่า 98% ของ Modified Proctor Test
- งานทั่วไป จะต้องบดอัดให้แน่นไม่น้อยกว่า 95% ของ Standard Proctor Test

ง. เครื่องมือหรือกรรมวิธีที่ใช้ในการบดอัด

2.1.4 ข้อกำหนดในการบดอัดดิน

สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น เช่น พวดินเหนียว จะกำหนดค่าเป็น RC (Relative Compaction) หรือ % Compaction ดังนี้

$$RC = \frac{\text{ความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการบดอัดดินในสนาม}}{\text{ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้ทดสอบจากห้องปฏิบัติการ}} \times 100\%$$

สำหรับดินที่ไม่เชื่อมแน่น เช่นทราย จะกำหนดค่าเป็น Relative Density (D_r) ดังนี้

$$D_r = \frac{\rho_{d(\text{field})} - \rho_{d(\text{min})}}{\rho_{d(\text{max})} - \rho_{d(\text{min})}} \times 100\%$$

$$\rho_{d(\text{field})} (\rho_{d(\text{max})} - \rho_{d(\text{min})})$$

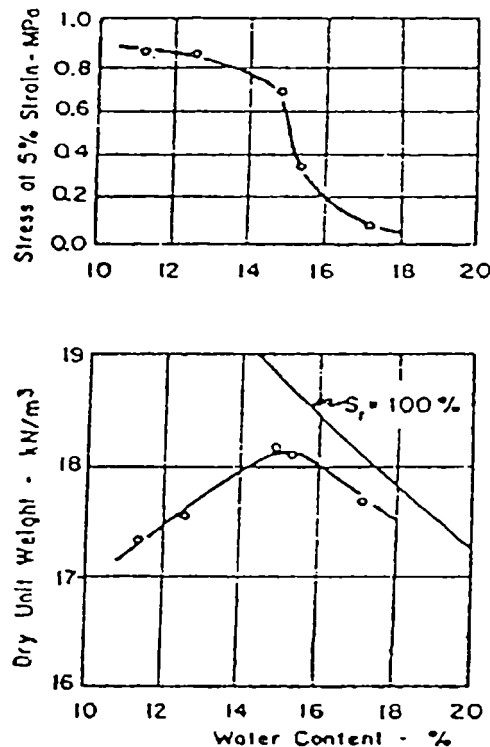
- โดยที่
- $\rho_{d(\text{field})}$ = ความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการบดอัดในสนาม
 - $\rho_{d(\text{max})}$ = ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
 - $\rho_{d(\text{min})}$ = ความหนาแน่นแห้งต่ำสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.1.5 ผลการบดอัดที่มีต่อดิน

การบดอัดเป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้ดีขึ้นวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินได้ดังต่อไปนี้

ก. ความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength)

- ดินเม็ดหยาบ (Granular Soil) การบดอัดจะทำให้ความต้านทานแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้น
- ดินเม็ดละเอียด (Fine- Grained) เช่น ดินตะกอน และดินเหนียว ผลเนื่องจากการบดอัดดินชนิดนี้จะสามารถอธิบายได้จากกราฟ ซึ่งจากกราฟนี้ตัวอย่างดินจำนวน 5 ตัวอย่างได้รับการบดอัดด้วยพลังงานที่เท่ากันโดยเปลี่ยนแปลงความชื้นขึ้นเรื่อยๆ แต่ตัวอย่างถูกนำมาทดสอบหาความแข็งแรงโดยค่าความแข็งแรงนี้วัดที่ 5% ของความเครียด จากกราฟรูปที่ 2-1 นี้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสูงสุดไม่ได้ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด และค่าความแข็งแรงจะลดลงมากโดยเริ่มตั้งแต่ที่ความชื้นเข้าใกล้จุดความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (OMC)



รูปที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของดินกับการบดอัดดิน

ข. ค่าความซึมได้ (Permeability)

- ดินเม็ดหยาบ การบดอัดดินชนิดนี้จะช่วยลดค่าความซึมได้ของดินให้น้อยลง
- ดินเม็ดละเอียด การบดอัดดินในด้านเปียก (Wet of Optimum) หรือบดอัดให้ความชื้น มากกว่าจุดที่ความชื้นเหมาะสมที่สุดจะทำให้ค่าความซึมได้ของดินน้อยกว่าการบดอัดดินในด้านแห้ง (Dry of Optimum) ที่ค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากัน

ค. การอัดตัวได้ (Compressibility)

- ดินเม็ดหยาบ การบดอัดดินจะทำให้การอัดตัวได้ของดินชนิดนี้ลดลง
- ดินเม็ดละเอียด ถ้าบดอัดดินชนิดนี้ในด้านแห้งจะทำให้การหดตัว (Shrink) น้อยลงเมื่อตากให้แห้ง และจะบวมตัว (Swell) มากเมื่อแช่ในน้ำ กว่าบดอัดดินในด้านเปียก

2.1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและ CBR ของดิน

จุดประสงค์หลักของการบดอัดดินก็คือเพื่อให้ได้กำลังของดินเพิ่มมากขึ้นในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่แข็งแรง กำลังของดินบดอัดในการก่อสร้างถนนและสนามบินจะทำการทดสอบด้วยวิธี CBR (California Bearing Ratio) ซึ่งสามารถนำค่า CBR ไปทำการออกแบบหาความหนาของถนนได้ ความสัมพันธ์ของความชื้นบดอัดของดินต่อความหนาแน่น และค่า CBR

2.2 การทดสอบดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวในห้องปฏิบัติการ

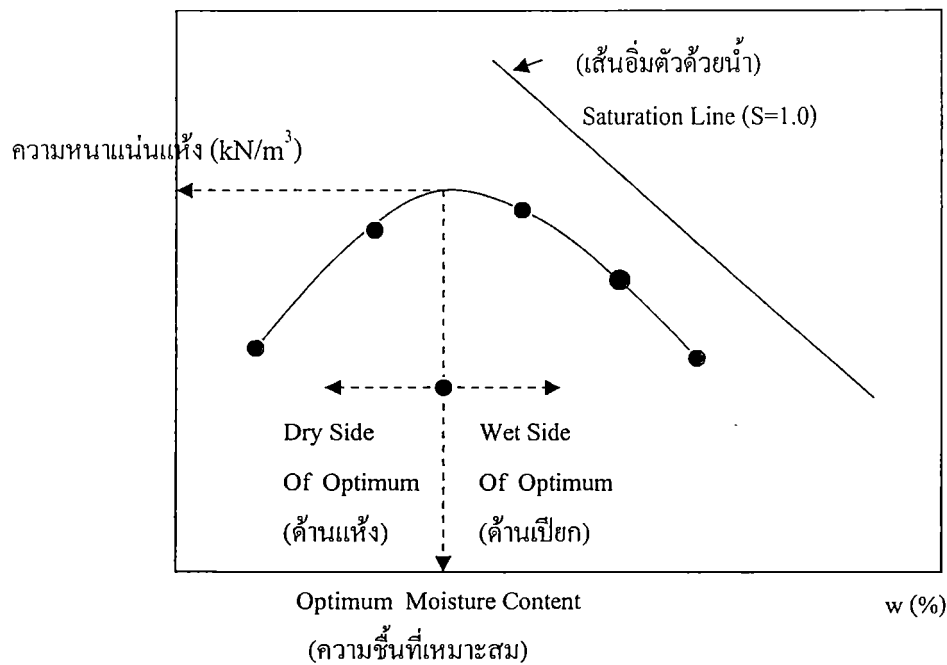
2.2.1 การบดอัดในห้องทดลอง มี 3 วิธี

- วิธีบดอัดทางพลศาสตร์ (Dynamic Compaction) โดยการใช้ก้อนเหล็กปล่อยตกบดอัดดินในแบบ
- วิธีการบดอัดแบบนวด (Kneading Compaction) ตามวิธี Harvard
- การบดอัดทางสถิตศาสตร์ (Static Compaction) การอัดตัวด้วยน้ำ

2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและค่าความชื้นจากผลการบดอัดในห้องทดลอง

จากการบดอัดในห้องทดลอง โดยทำการบดอัด 4-6 ครั้งครอบคลุมค่าความหนาแน่นสูงสุดและนำมาพล็อตกราฟการบดอัด (Compaction Curve) ค่าความชื้น (w,%) แขนงบนต่อความหนาแน่น ($\gamma_{d \max}$ ตัน/ม³) ดังรูปที่ 2-2 ซึ่งจะมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

- จุดกราฟสูงสุด คือค่าความหนาแน่นสูงสุด
- จุดตัดแกนนอน (w) ที่ค่า $\gamma_{d \max}$ คือค่าความชื้นที่เหมาะสม
- ค่าความชื้นที่สูงกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม
- ค่าความชื้นที่ต่ำกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม
- เส้นอิมตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 2-2 กราฟของการบดอัดดิน (Compaction curve)

2.3 ผลกระทบของพลังงานต่อการบดอัดดิน

การบดอัดด้วยพลังงานที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ผลของการบดอัดที่แตกต่างกันตามมาตรฐาน ASTM และ AASHTO แล้วการบดอัดจะมีวิธีดังตารางที่ 2-1 โดยพลังงานในการบดอัดคำนวณได้ดังนี้

$$= \frac{\text{น้ำหนักก้อน (ปอนด์)} \times \text{ระยะตก (ฟุต)} \times \text{จำนวนชั้น} \times \text{จำนวนครั้งบดอัดแต่ละชั้น}}{\text{ปริมาตรแบบหล่อดิน (ฟุต}^3\text{)}}$$

ตารางที่ 2-1 วิธีบดอัดในห้องทดลอง

ข้อกำหนด ASTM	ข้อกำหนด AASHTO	ขนาดของ แบบทรง กระบอกกลวง	น้ำหนักลูกตุ้ม และระยะยกตก กระทบ	จำนวนชั้นและ จำนวนครั้งของการ บดอัดในแต่ละชั้น	ขนาด ตะแกรง ร่อน
D-698 (A)*	T-99 (A)	4-in dia, 1/30ft ³	5.5 lb @12in	3 at 25	# 4
(B)	(B)	6-in. dia, 0.075 ft ³	5.5 lb @12in	3 at 56	# 4
(C)	(C)	4-in dia, 1/30ft ³	5.5 lb @12in	3 at 25	¼ in
(D)	(D)	6-in. dia, 0.075 ft ³	5.5 lb @12in	3 at 56	¼ in
D-1557 (A) [§]	T-180 (A)	4-in dia, 1/30ft ³	10 lb @18in	5 at 25	# 4
(B)	(B)	6-in. dia, 0.075 ft ³	10 lb @18in	5 at 56	# 4
(C)	(C)	4-in dia, 1/30ft ³	10 lb @18in	5 at 25	¼ in
(D)	(D)	6-in. dia, 0.075 ft ³	10 lb @18in	5 at 56	¼ in

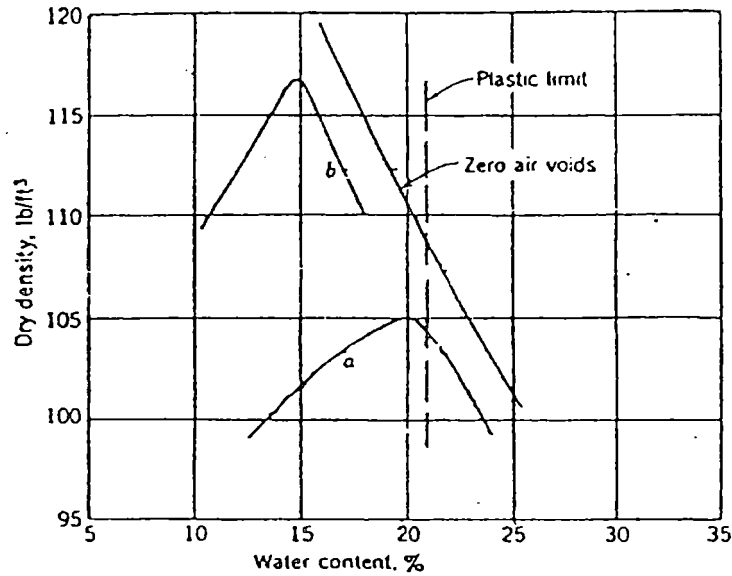
* = การบดอัดแบบ Standard Procter

§ = การบดอัดแบบ Modified Procter

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) เป็นดังนี้

$$\frac{\text{แบบสูงกว่ามาตรฐาน Modified}}{\text{แบบมาตรฐาน Standard}} = \frac{56250}{12375} = 4.5 \text{ เท่า}$$

แต่การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified) จะให้ความหนาแน่นแห้งสูงกว่าการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard) เพียงประมาณ 10% เท่านั้น ส่วนค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction) จะมีค่าสูงกว่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 การบดอัดแบบ Standard Proctor Test และ Modified Proctor Test

2.4 ซีบีอาร์ (California Bearing Ratio)

การทดสอบ CBR (California Bearing Ratio) เป็นวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินบดอัดแน่นด้วยการใช้แท่งเหล็กกด (Penetration Piston) ขนาดพื้นที่ 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างดินด้วยความเร็ว 0.05 นิ้ว/นาที่ แล้วนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ได้จากการทดลองกับวัสดุหินคลุกบดอัดแน่นบนพื้นฐานปฏิบัติการที่เหมือนกัน (ตารางที่ 2-2) โดยการคำนวณค่า CBR เป็นดังนี้

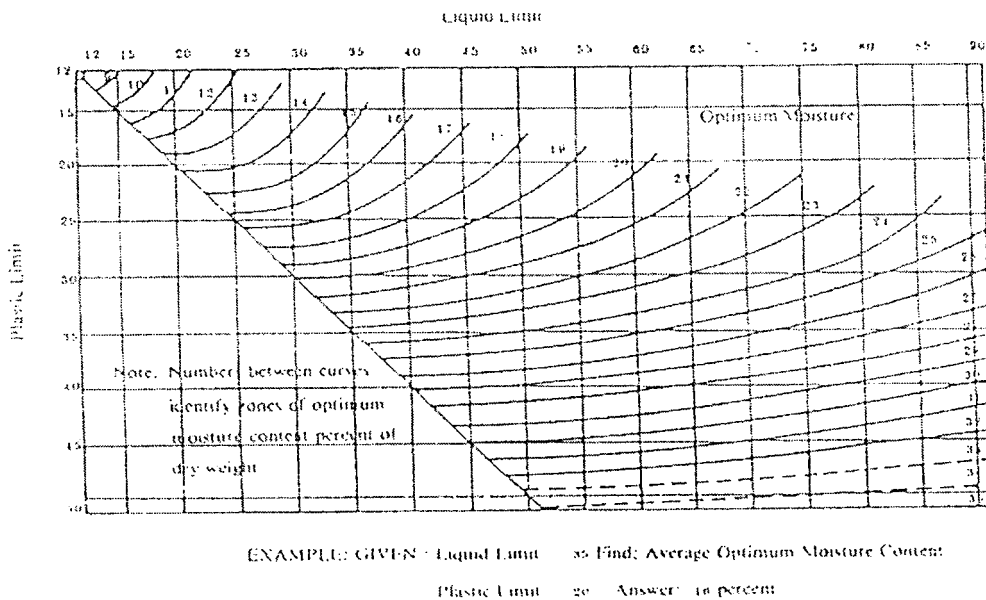
$$\text{CBR} = \frac{\text{หน่วยน้ำหนักทดสอบ}}{\text{หน่วยน้ำหนักมาตรฐาน}} \times 100\%$$

ตารางที่ 2-2 น้ำหนักมาตรฐาน จากการกดแท่งเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 นิ้วของวัสดุหินคลุก

ระยะจม (Penetration)	น้ำหนักมาตรฐาน (Standard Load)	หน่วยน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Unit Load)
2.54 มม. (0.1 นิ้ว)	1360.8 กก. (3000 ปอนด์)	70.30 กก./ซม. ³ (1000 ป/ตร.น.)
5.08 มม. (0.2 นิ้ว)	2041.2 กก. (4550 ปอนด์)	105.46 กก./ซม. ³ (1500 ป/ตร.น.)
7.62 มม. (0.3 นิ้ว)	2858.5 กก. (4700 ปอนด์)	133.59 กก./ซม. ³ (1900 ป/ตร.น.)
10.16 มม. (0.4 นิ้ว)	3129.8 กก. (6900 ปอนด์)	161.71 กก./ซม. ³ (2300 ป/ตร.น.)
12.70 มม. (0.5 นิ้ว)	3538.0 กก. (7800 ปอนด์)	182.81 กก./ซม. ³ (2600 ป/ตร.น.)

ค่าของ CBR ตามปกติจะใช้ค่าของท่อนเหล็กกลมกลี 2.54 มม. แต่ถ้าหากค่า CBR ที่มีความลึก 5.08 มม. มากกว่าที่ 2.54 มม. ก็ควรทำการทดลองใหม่ แต่ถ้าค่า CBR ออกมาเหมือนเดิมก็ใช้ค่า CBR ที่ความลึก 5.08 มม.

การทดลองหาค่า ซีบีอาร์ ของดินบดอัดแน่น สามารถปฏิบัติการได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม ด้วยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน และ โมดิไฟต์ การเตรียมตัวอย่างดินบดอัดวิธีใดก็ตามจะต้องเตรียม 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างหนึ่งจะต้องไปหาค่า ซีบีอาร์ ทันที อีกตัวอย่างหนึ่งนำไปแช่น้ำ (Soaked) ไว้ 96 ชั่วโมง เพื่อให้ดินมีสภาพอิ่มตัว เพื่อศึกษาการบวมตัวของดิน อนึ่งในระหว่างดินถูกแช่น้ำจะต้องกดทับตัวอย่างดินด้วยน้ำหนักไม่น้อยกว่า 4.5 กิโลกรัมหรือเท่ากับน้ำหนักของพื้นทางและผิวจราจร เพื่อให้การทดสอบดินคล้ายกับสภาพความเป็นจริงของถนนในเวลาเกิดน้ำท่วม หรือฝนตก ดินภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกจะมีสภาพอิ่มตัว การบวมตัวและกำลังรับน้ำหนักของดินสภาพอิ่มตัวจะเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงาน อนึ่งการทดสอบซีบีอาร์ของมวลดินมักจะทดสอบความหนาแน่นที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการปฏิบัติการบดอัดดิน จึงได้แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) และขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) ในการหาค่าประมาณของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของมวลดินที่บดอัด ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 กราฟการหาค่าปริมาณความชื้น Optimum ของการบดอัดจากค่าความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) กับขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)

ค่าซีบีอาร์ของมวลดินอัดแน่นจากการทดลอง นอกจากจะเป็นค่าบ่งบอกถึงคุณสมบัติของดินที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางดังแสดงในตารางที่ 2-3 ค่าซีบีอาร์จึงเป็นประโยชน์ต่อการนำไปออกแบบความหนาของพื้นผิวถนนอีกด้วย

ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติของดินที่เหมาะสมในการใช้งานตามค่าของ CBR

ซีบีอาร์	ระดับความเหมาะสม	การใช้งาน
0-3	ใช้ไม่ได้	วัสดุชั้นคันทาง (Subgrade)
3-7	ไม่ดี ถึง พอใช้	วัสดุชั้นคันทาง
7-20	พอใช้	วัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase)
20-50	ดี	วัสดุชั้นรองพื้นทาง
50-80	ดีมาก	วัสดุพื้นทาง
มากกว่า 80	ดีที่สุด	วัสดุพื้นทาง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การทำนายกราฟการบดอัด (Prediction of compaction curve) (รุ่งลาวัลย์ ราชัน และสุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2548)

การทำนายกราฟการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการของทั้งดินหยาบและดินละเอียดสำหรับดินชนิดหนึ่งที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานค่าใดค่าหนึ่งที่เหมาะสม ซึ่งค่าตัวแปร $m/s^{0.5}$ จะเป็นค่าที่คงที่ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งก็ตามตัวแปร $(m/s^{0.5} / m/s^{0.5})$ จะถูกนำเสนอมาเพื่อจัดผลเนื่องจากชนิดของดินที่แตกต่างกัน ที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เส้นกราฟการบดอัดของเส้นโค้งที่มีความลาดเอียงเดียวกันในทุกพลังงานบดอัด จากลักษณะดังกล่าวผู้ทำการทดสอบได้นำข้อเสนอวิธีการสร้างเส้นกราฟการบดอัดอย่างง่าย ภายใต้พลังงานการบดอัดต่างๆเพียงแค่ทำการทดสอบเดียว

2.5.2 Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soils (Pandian et al, 1997)

การปฏิบัติการนี้เป็นการทดสอบดินที่มีลักษณะเป็นดินเหนียวซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ดินใน 3 ลักษณะแล้วก็นำมาเขียนกราฟและจะได้ค่าตัวแปร w/s_r ซึ่งมาจาก water content % การอิมตัวซึ่งนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง w/s_r กับ Liquid limit โดยในทางด้านหนึ่งนั้นจะเห็นได้ว่าค่าทุกค่าอยู่ในกราฟเดียวกันแต่ในด้านเปียกจะมี กราฟไม่อยู่ในเส้นเดียวกันซึ่งจะได้ตัวแปรสำหรับด้านเปียก w/s_r^2 ซึ่งนำมาเขียนกราฟกับ Liquid limit ก็จะสามารถเห็นได้ว่าอยู่ในเส้นเดียวกันจึงทำให้เราสามารถทำนายค่าต่างๆในกราฟได้เลย และจากการทำนายแล้วจึงลองทำการทดสอบดูแล้วว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับที่ทำนายไว้ซึ่งเป็นการยืนยันว่าวิธีการนี้ใช้ได้

2.5.3 Resilient Modulus For Fine-Grained Subgrade Soils (Li & Selig, 1994)

งานวิจัยนี้เป็นการปฏิบัติการประมาณค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) จากค่า Modulus แล้วเมื่อเราทราบค่าความชื้นซึ่งเมื่อเราได้ค่าความชื้นที่เหมาะสมแล้วเราจะสามารถทำนายถึง ความหนาแน่นที่จุดต่างๆกันได้ด้วย ซึ่งจะสามารถบอกได้เลยว่าเมื่อทราบค่าใดก็ตามเพียง 1 ค่า ก็จะสามารถหาค่าทุกค่าได้โดยไม่

ต้องการทดลองวิธีการจะเริ่มจากการทำการบดอัดดินต่างๆชนิดกันและ ค่า Modulus ต่างๆแล้วนำมาเขียนกราฟโดยจะมีค่าตัวแปร R_{mi} ซึ่งนำมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง R_{mi} กับ $(w-w_{opt})$ ซึ่งค่านี้เป็นการที่จะทำให้ลดความแตกต่างระหว่างความชื้นของแต่ละค่าซึ่งผู้ทำการทดสอบได้ลอง โดยการนำมาหารกันแล้วซึ่งจะได้ค่าที่ไม่แตกต่างกันซึ่งได้ใช้ความสัมพันธ์นี้ทางด้านหนึ่งโดยในทางด้านเปียกจะมีตัวแปรใหม่คือ R_{m2} ซึ่งพอเขียนกราฟทั้ง2ด้านก็จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันจึงสามารถนำค่าที่ได้จากความสัมพันธ์มาทำหาสมการเพื่อทำนายค่าต่างๆที่จุดต่างๆได้ทั้งหมด

2.5.4 Estimating Optimum Water Content And Maximum Dry Density Weight For Compacted (Blotz et al., 1998)

งานวิจัยนี้เป็นการปฏิบัติการที่จะทำนาย Optimum Water Content และ Maximum Dry Density โดยใช้ Atterberg Limit โดยมีวิธีการว่าเมื่อทราบพลังงานการบดอัดและ Liquid Limit และ Plastic Limit แล้วก็จะสามารถที่จะหาค่าของ Optimum Water Content และ Maximum Dry Density ได้จากการหาความสัมพันธ์ต่างๆของดินตัวอย่างและงานวิจัยที่เป็นที่ยอมรับในอดีตซึ่งได้นำค่ามาตรวจสอบแล้วจึงสามารถหาความสัมพันธ์โดยมีตัวแปร $\alpha, \epsilon, \beta, \delta$ ซึ่งจะทำให้เกิดความสัมพันธ์ต่างและนำค่าที่ได้จากการทดสอบแล้วและค่าจากการทดลองในอดีตที่ได้รับความยอมรับได้เขียนกราฟระหว่าง Optimum Water Content กับ Log Compaction Energy และ Maximum Dry Density กับ Log Compaction Energy ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่ Maximum Dry Density กับ Log Compaction Energy นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากกว่าจึงนำค่าที่ได้มาสามารถทำนายค่าของ Maximum Dry Density ได้ใกล้เคียงกว่าซึ่งทำให้การทำนายและทำการตรวจสอบซึ่งก็ได้กราฟที่ใกล้เคียงกัน

2.6 อภิปรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำนายกราฟการบดอัดที่เสนอโดย รุ่งลาวัลย์ ราชัน และสุขสันต์ หอพิบูลสุข (2548) นั้นทำนายได้ในระดับของพลังงานที่ใช้ในการบดอัดที่แตกต่างกันแต่จะใช้เพียงแค่ 4 ระดับพลังงานซึ่งน่าจะน้อยเกินไปจึงทำให้กราฟที่คำนวณได้ซึ่งในงานวิจัยบอกว่าใกล้เคียงมองแล้วมีจุดแตกต่างในบางพลังงานค่อนข้างมากซึ่งทำให้โครงการวิจัยนี้ทำการทดสอบ 6 ระดับพลังงานเพื่อความละเอียดของข้อมูลที่มากกว่า และเพิ่มการทดสอบหาความสัมพันธ์กับค่าซีบีอาร์ (CBR)

งานวิจัยของ Pandian et al. (1997) ใช้ดินตัวอย่างเพียง 3 ดินตัวอย่างและนำเอาค่าที่มีการทดลองในอดีตมาใช้ซึ่งการใช้ ดินตัวอย่างเพียง 3 ตัวอย่างนี้น้อยเกินไป แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นแบบอย่างที่ดีซึ่งกราฟที่ทำนายออกมากได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริง

งานวิจัยของ Li & Selig (1994) สามารถครอบคลุมการหาค่าต่างๆได้ทุกค่าในการซึ่งเพียงเราทราบค่าใดค่าหนึ่งแต่มีข้อสงสัยต่องานวิจัย ซึ่งในกราฟของงานวิจัยนี้ใช้สัดส่วนของ Modulus กับ $w - w_{opt}$ จะทำให้ลดความแตกต่างของแต่ละจุด และได้มีการอธิบายแล้วว่าเพราะว่า $w - w_{opt}$ นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับ

การเป็นสัดส่วนของ water กับ $water_{opt}$ แต่ถ้การทดสอบที่มีค่าที่ต่างกันมากๆจะทำให้สัดส่วนกับผลต่างกัน จะมีความแตกต่างกันเห็นได้ชัดในกรณีนั้นไม่ทราบว่สมการที่ได้จากการวิจัยจะสามารถทำนายได้หรือไม่ งานวิจัยของ Blotz et al. (1998) สามารถทำนายผลการทดสอบได้ใกล้เคียงซึ่งเมื่อเราทราบค่า Atterberg Limit แล้วสามารถทราบค่าต่างๆของการบดอัดได้(Compaction)ได้ซึ่งเป็นแนวทางในการใช้ เพราะการจำแนกประเภทดินนั้น ได้ค่า Atterberg Limit จึงเป็นประโยชน์ต่อการทำการทดสอบ

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 ดินที่ใช้ทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลองเกือบทั้งหมดมาจากภาคตะวันออกเฉียง โดยมีแหล่งดังนี้

- ดินที่ข้างคณะวิศวกรรมศาสตร์
- ดินที่หาดวอนนภา
- ดินที่จังหวัดน่าน
- ดินที่ขุดจากสนามบินสุวรรณภูมิ
- ทรายจังหวัดระยอง
- ทรายหมู่ 4 ตำบลบางพระ
- ทรายรอบอ่างเก็บน้ำบางพระ
- ทรายหนองขาม
- หินคลุกโรงโม่หินชลดา
- หินคลุกโรงโม่หินหนองน้ำเขียว

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- ชุดอุปกรณ์การบดอัดดิน (Compaction Test)
- ชุดอุปกรณ์ซีบีอาร์ (California Bearing Ratio, CBR)

3.3 วิธีการทดลอง

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นแห้งของการบดอัดของทุกชนิดดิน โดยใช้พลังงานในการบดอัด 6 พลังงานดังนี้

- 2 Modified Proctor Compaction Test
- Modified Proctor Compaction Test
- 0.5 Modified Proctor Compaction Test
- 2 Standard Proctor Compaction Test
- Standard Proctor Compaction Test
- 0.5 Standard Proctor Compaction Test

โดยมีแผนการทดลองดังตารางที่ 3-1 ถึง 3-10 แล้วทำการศึกษาค่า CBR ของทุกๆความชื้นทุกชนิดดิน แล้วนำค่าที่ได้ในผลการทดลองมาศึกษาดังนี้

- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Liquid Limit
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Plastic Limit
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง กับ Liquid Limit
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นแห้งกับ Plastic Limit
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $CBR_{omc} \pm CBR_{omc}$ กับพลังงานที่ทำการบดอัด
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง (CBR_t/CBR_{omc}) กับ (w_t-w_{omc})
- เสนอแนะวิธีการประมาณค่ากราฟการบดอัดและค่า CBR

ตารางที่ 3-1 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของหินคลุกชลดคา

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
หินคลุก ชลดคา	ทำความเข้าใจ 2.5	ทำความเข้าใจ 3	ทำความเข้าใจ 3.5	ทำความเข้าใจ 3.5	ทำความเข้าใจ 4	ทำความเข้าใจ 4
	4.5	5	5.5	5.5	6	6
	6.5	7	7.5	7.5	8	8
	8.5	9	9.5	9.5	10	10
	10.5	11	11.5	1.5	12	12
	และหาค่า CBR ทุก ความชื้น	และหาค่า CBR ทุก ความชื้น	และหาค่า CBR ทุก ความชื้น	และหาค่า CBR ทุก ความชื้น	และหาค่า CBR ทุก ความชื้น	และหาค่า CBR ทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-2 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของหินคลุกหนองน้ำเขียว

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
หินคลุก หนองน้ำ เขียว	ทำความเข้าใจ 2	ทำความเข้าใจ 2.5	ทำความเข้าใจ 3	ทำความเข้าใจ 3	ทำความเข้าใจ 3.5	ทำความเข้าใจ 3.5
	4	4.5	5	5	5.5	5.5
	6	6.5	7	7	7.5	7.5
	8	8.5	9	9	9.5	9.5
	10	10.5	11	11	11.5	11.5
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-3 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของทรายระยอง

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
ทราย ระยอง	ทำความเข้าใจ 2	ทำความเข้าใจ 3	ทำความเข้าใจ 3.5	ทำความเข้าใจ 3.5	ทำความเข้าใจ 4	ทำความเข้าใจ 4
	4	5	5.5	5.5	6	6
	6	7	7.5	7.5	8	8
	8	9	9.5	9.5	10	10
	10	11	11.5	11.5	12	12
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-4 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของทรายหาควอนนภา

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
ทรายหาควอนนภา	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น
	2	3	3.5	3.5	4	4
	4	5	5.5	5.5	6	6
	6	7	7.5	7.	8	8
	8	9	9.5	9.5	10	10
	10	11	11.5	11.5	12	12
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-5 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของทรายช่องคณะวิศวกรรมศาสตร์

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
ทรายข้างคณะวิศวกรรมศาสตร์	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น
	2	3	3.5	3.5	4	4
	4	5	5.5	5.5	6	6
	6	7	7.5	7.5	8	8
	8	9	9.5	9.5	10	10
	10	11	11.5	11.5	12	12
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-6 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของดินหมู่ 4 ต.บางพระ

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
หมู่ 4 บางพระ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ
	1	1	1.5	1.5	2	2
	3	3	3.5	3.5	4	4
	5	5	5.5	5.5	6	6
	7	7	7.5	7.5	8	8
	9	9	9.5	9.5	10	10
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-7 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของดิน ต.หนองขาม

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
หนองขาม	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ
	1.5	1.5	3	3	4.5	4.5
	3.5	3.5	5	5	6.5	6.5
	5.5	5.5	7	7	8.5	8.5
	7.5	7.5	9	9	10.5	10.5
	9.5	9.5	11	11	12.5	12.5
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBR ทุกความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-8 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของรอบอ่างเก็บน้ำบางพระ

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
รอบอ่าง เก็บน้ำ บางพระ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ
	2	2.5	3	3	3.5	3.5
	4	4.5	5	5	5.5	5.5
	6	6.5	7	7	7.5	7.5
	8	8.5	9	9	9.5	9.5
	10	10.5	11	11	11.5	11.5
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-9 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของดินจังหวัดน่าน

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
ดินน่าน	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ	ทำความเข้าใจ
	5	6	7	7	7	7
	7	8	9	9	9	9
	9	10	11	11	11	11
	11	12	13	13	13	13
	13	14	15	15	15	15
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

ตารางที่ 3-10 การทดลองบดอัดเพื่อเก็บข้อมูลของสุรรมณภูมิ

ชนิด	พลังงาน 2 Modified	พลังงาน Modified	พลังงาน 0.5 Modified	พลังงาน 2 Standard	พลังงาน Standard	พลังงาน 0.5 Standard
ดินสุรรมณ ภูมิ	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น	ทำความชื้น
	5.5	6	7	7	7	8
	7.5	8	9	9	9	10
	9.5	10	11	11	11	12
	11.5	12	13	13	13	14
	13.5	14	15	15	15	16
	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น	และหาค่า CBRทุก ความชื้น

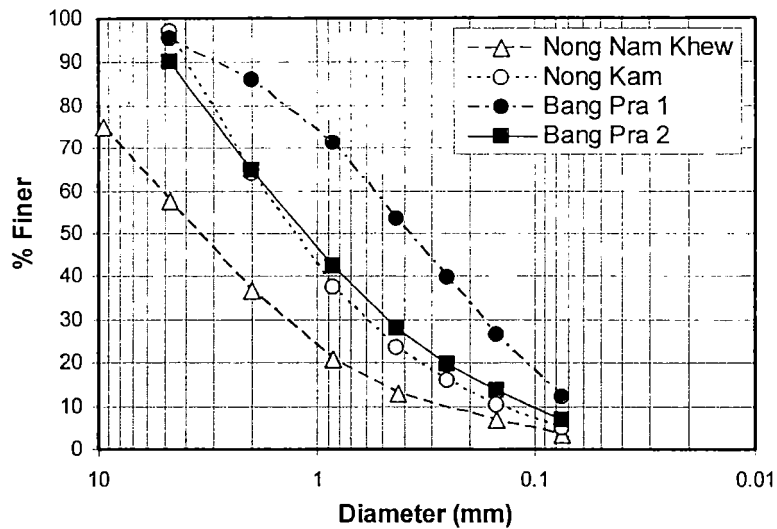
บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การจำแนกดินตัวอย่างที่ทำการทดลอง

จากการนำตัวอย่างดินทั้ง 10 ชนิด มาศึกษานั้น โดยการจำแนกดินทั้ง 10 ชนิด ตามวิธีของ USCS ซึ่งสามารถจำแนกได้ผลดังตารางที่ 4-1 จากตัวอย่างดินทั้ง 10 ชนิดนั้น จะมีดินอยู่ 4 ชนิด คือ ดินที่ข้างคณะวิศวกรรมศาสตร์ , ดินที่หาดวอนนภา , ทรายจังหวัดระยอง , และ ทรายหมู่ 4 ตำบลบางพระ ที่ไม่สามารถหา Plastic Limit (%) และ Liquid Limit (%) เนื่องจากเป็นดินทราย ส่วน ทรายรอบอ่างเก็บน้ำบางพระนั้น สามารถหาได้แต่ Liquid Limit (%) เท่านั้น ขนาดละเอียดของดินแสดงในรูปที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการจำแนกดินตัวอย่างโดยใช้ระบบ USCS

ดินตัวอย่าง	ชนิดของดิน ที่จำแนกได้	Plastic Limit (%)	Liquid Limit (%)
ดินที่ข้างคณะวิศวกรรมศาสตร์	SW	-	-
ดินที่หาดวอนนภา	SP	-	-
ดินที่จังหวัดน่าน	ML	16.95	17.65
ดินที่ขุดจากสนามบินสุวรรณภูมิ	SP-SC	16.5	17.15
ทรายจังหวัดระยอง	SP	-	-
ทรายหมู่ 4 ตำบลบางพระ	SM	-	-
ทรายรอบอ่างเก็บน้ำบางพระ	SC	-	13.80
ทรายหนองขาม	SW	12.35	13.0
หินคลุกโรงไม้หินชลดา	GP	12.23	12.30
หินคลุกโรงไม้หินหนองน้ำเขียว	GP	16.03	17.50



รูปที่ 4-1 กราฟขนาดคละของดิน

4.2 การบดอัดของดินตัวอย่าง

เนื่องการบดอัดเป็นการทดสอบพื้นฐานที่จะนำมาสู่การศึกษาต่างๆ โดยจะทำการบดอัดดินตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลซึ่งได้ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC)% และความหนาแน่นแห้ง (kN/m^3) ซึ่งดินทั้ง 10 ชนิดที่ได้ทำการจำแนกแล้วนั้นดังตารางที่ 4-1 สามารถนำมาทำการบดอัดเพื่อหาค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้ง (kN/m^3) ได้ ดังตารางที่ 4-2 ถึง 4-11

ตารางที่ 4-2 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของดินน่าน

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m^3)
2 Modified	9.8	19.87
Modified	10.6	19.78
0.5 Modified	11.3	19.28
2 Standard	11	18.98
Standard	11.4	18.8
0.5 Standard	14	18.4

ตารางที่ 4-3 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของดินสุวรรณภูมิ

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	10.2	18.43
Modified	12.3	17.75
0.5 Modified	12.2	17.63
2 Standard	13.3	17.4
Standard	13.2	16.32
0.5 Standard	14.5	15.48

ตารางที่ 4-4 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของทรายหมู่ 4

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	6.2	21.45
Modified	6.4	21.31
0.5 Modified	6.8	20.95
2 Standard	6.4	20.95
Standard	6.5	20.72
0.5 Standard	6.7	20.14

ตารางที่ 4-5 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของทรายรอบอ่าง

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	6.4	21.58
Modified	6.8	21.26
0.5 Modified	7.8	20.9
2 Standard	7.3	20.6
Standard	7.6	20.4
0.5 Standard	7	19.95

ดินเหนียว อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

ตารางที่ 4-6 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของหินหนองน้ำเขียว

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	5.8	22.95
Modified	6.2	21.95
0.5 Modified	6.8	21.36
2 Standard	7.4	21.3
Standard	7.6	21.16
0.5 Standard	9	20.8

ตารางที่ 4-7 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของหินชลดคา

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	6.5	23.5
Modified	6.3	22.32
0.5 Modified	8	22.7
2 Standard	6.5	22.38
Standard	8.5	22.13
0.5 Standard	8.2	21.36

ตารางที่ 4-8 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของทรายหนองขาม

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	6.2	20.95
Modified	6.8	20.84
0.5 Modified	7.7	20.95
2 Standard	8	20.7
Standard	8.8	20.75
0.5 Standard	8.8	20.38

624. 151363

ส 319 D

ม. 2

29 15 77

ตารางที่ 4-9 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของดินหาควอน

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	-	-
Modified	-	-
0.5 Modified	-	-
2 Standard	-	-
Standard	-	-
0.5 Standard	-	-

ตารางที่ 4-10 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของทรายระยอง

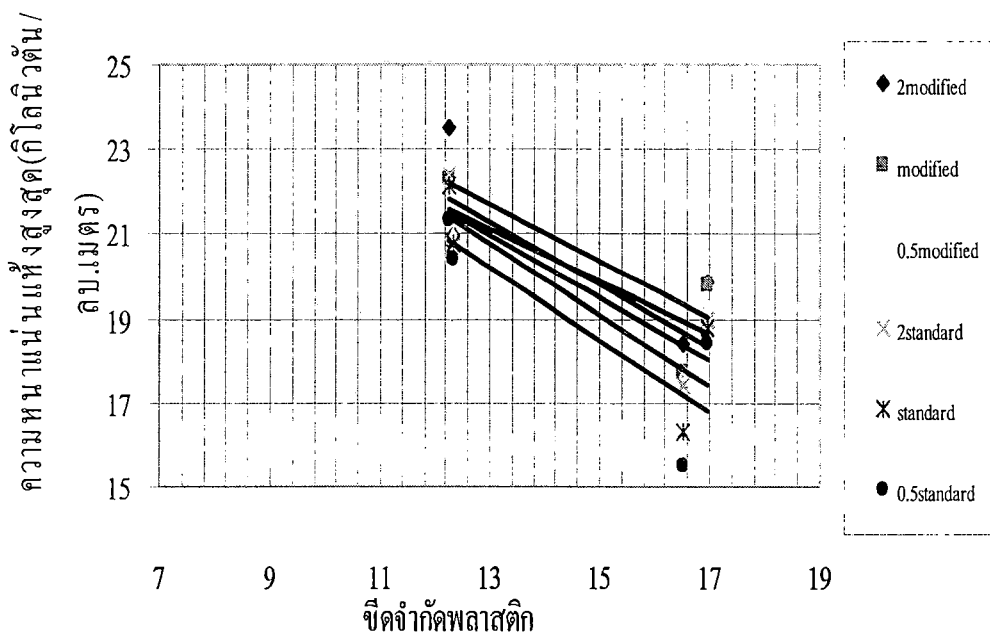
พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	-	-
Modified	-	-
0.5 Modified	-	-
2 Standard	-	-
Standard	-	-
0.5 Standard	-	-

ตารางที่ 4-11 ค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งของดินข้างคณะ

พลังงาน	ความชื้นเหมาะสม (OMC)%	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m ³)
2 Modified	-	-
Modified	-	-
0.5 Modified	-	-
2 Standard	-	-
Standard	-	-
0.5 Standard	-	-

4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d \max}$) กับ Plastic limit

จากการศึกษากราฟที่ทำการทดสอบเทียบกับงานวิจัยของ Padian et al. (1997) จะสามารถบอกได้ว่า เมื่อ Plastic Limit ของดินชนิดใดมีค่ามากจะทำความหนาแน่นแห้งสูงสุดน้อยกว่าดินที่มีค่า Plastic Limit ที่มีค่าน้อย เนื่องจากกราฟบอกแนวโน้มดังสมการ $y = -0.6812x + 30.573$ และพลังงานที่ไม่เท่ากันมีผลแต่ทุกชนิดดินในการหาความหนาแน่นแห้งซึ่งเมื่อพลังงานมากจะทำให้การบดอัดได้มากขึ้นและดินที่ทำการทดสอบที่สามารถมีแนวโน้มดังสมการข้างต้นนั้นเป็นดินที่หา Plastic Limit ได้แต่เนื่องจากหินคลุกหนองน้ำเขี้ยวที่มีค่าที่ได้มาในกราฟจะมีความแตกต่างจากดินชนิดอื่นมากจึงทำให้กราฟไม่ได้ตามแนวทฤษฎีแต่เมื่อตัดออกแนวโน้มก็เป็นตามปกติ และการบดอัดที่พลังงานสูงจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งของชนิดดินที่มี Plastic Limit ใกล้เคียงกันจะมีค่าความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกันแต่ที่พลังงานน้อยจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่ได้ห่างกันเมื่อดูจากแนวโน้มในกราฟของแต่ละพลังงานดังรูปที่ 4-1 และสามารถได้สมการของกราฟดังตารางที่ 4-12



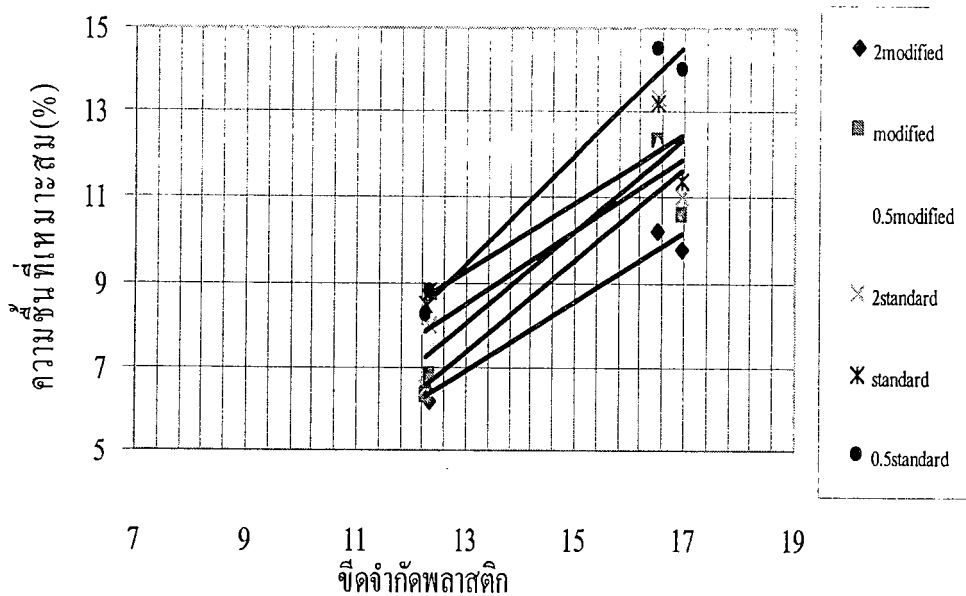
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d \max}$) กับ Plastic limit

ตารางที่ 4.12 สมการและความแปรปรวนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($Y_{d\max}$) กับ Plastic limit

พลังงาน	สมการที่ได้จากกราฟ	ค่าความแปรปรวนของกราฟ (R^2)
2 modified	$y = -0.6812x + 30.573$	0.6647
modified	$y = -0.6133x + 29.073$	0.6683
0.5modified	$y = -0.7431x + 30.924$	0.7628
2 standard	$y = -0.7392x + 30.592$	0.7749
standard	$y = -0.8473x + 31.796$	0.7406
0.5standard	$y = -0.8525x + 31.276$	0.7086

4.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Plastic limit

จากการศึกษากราฟที่ทำการศึกษาทดสอบเทียบกับงานวิจัยของ Padian et al. (1997) จะสามารถบอกได้ว่า เมื่อ Plastic Limit ของดินชนิดใดมีค่ามากจะทำความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มากกว่าดินที่มีค่า Plastic Limit เนื่องจากกราฟบอกแนวโน้มดังสมการ $y = 0.8151x - 3.6538$ และพลังงานที่ไม่เท่ากันมีผลแต่ทุกชนิดดินในการหาความชื้นเหมาะสม (OMC) ซึ่งเมื่อพลังงานมากจะทำให้ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) น้อยลงและดินที่ทำการศึกษาสามารถมีแนวโน้มดังสมการข้างต้นนั้นเป็นดินที่หา Plastic Limit ได้แต่เนื่องจากหินคลุกหนองน้ำเขี้ยวมีค่าที่ได้มาในกราฟจะมีความแตกต่างจากดินชนิดอื่นมากจึงทำให้กราฟไม่ได้ตามแนวทฤษฎีแต่เมื่อตัดออกแนวโน้มก็เป็นตามปกติ และการบดอัดที่พลังงานทุกพลังงานจะมีค่าความชื้นเหมาะสม (OMC) ของชนิดดินที่มี Plastic Limit ใกล้เคียงกันจะมีค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ใกล้เคียงกันจากแนวโน้มในกราฟของแต่ละพลังงานและมีความใกล้เคียงกันมากดูจากแนวโน้มของสมการแล้ว มีค่า R^2 ที่มากกว่าและใกล้เคียงกับ 1 ดังรูปที่ 4-2 และสามารถได้สมการของกราฟดังตารางที่ 4-13



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Plastic limit

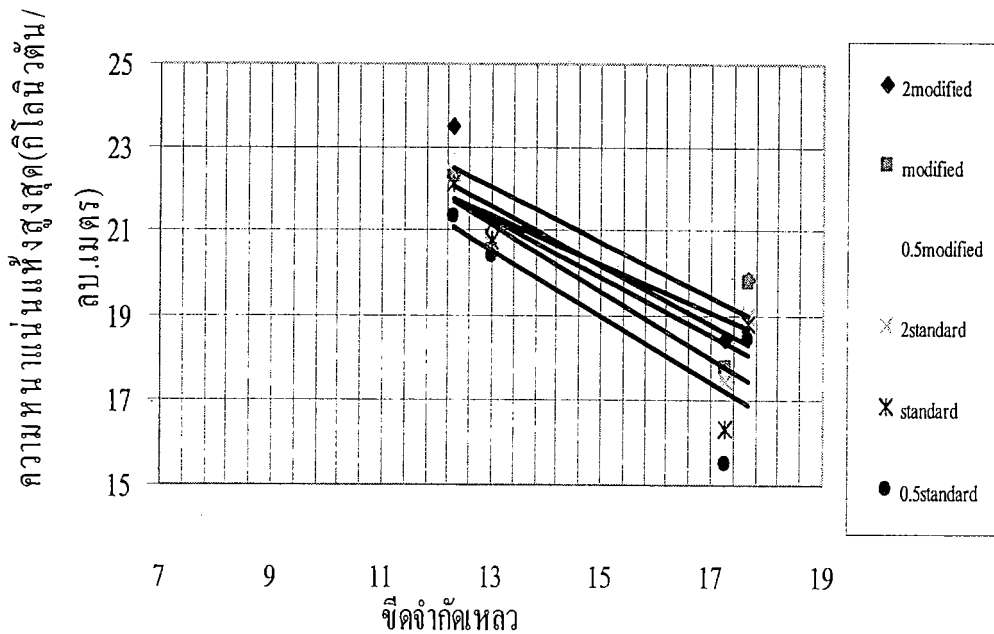
ตารางที่ 4-13 สมการและความแปรปรวนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Plastic limit

พลังงาน	สมการที่ได้จากราฟ	ค่าความแปรปรวนของกราฟ(R^2)
2 modified	$y = 0.8151x - 3.6538$	0.9726
modified	$y = 1.0832x - 6.7201$	0.903
0.5modified	$y = 0.8656x - 2.7613$	0.9418
2 standard	$y = 1.0789x - 5.9574$	0.8249
standard	$y = 0.8006x - 1.1437$	0.8419
0.5standard	$y = 1.2882x - 7.3205$	0.9791

4.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d \max}$) กับ Liquid limit

จากการศึกษากราฟที่ทำการทดสอบเทียบกับงานวิจัยของ Padian et al. (1997) จะสามารถบอกได้ว่า เมื่อ Liquid Limit ของดินชนิดใดมีค่ามากจะทำ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดน้อยกว่าดินที่มีค่า Liquid Limit น้อย เนื่องจากกราฟบอกแนวโน้มดังสมการ $y = -0.2733x + 25.756$ และพลังงานที่ไม่เท่ากันมีผลแต่ละชนิดดินในการหาความหนาแน่นแห้งซึ่งเมื่อพลังงานมากจะทำให้การบดอัดได้มากขึ้นและดินที่ทำการทดสอบที่สามารถมีแนวโน้มดังสมการข้างต้นนั้นเป็นดินที่หา Liquid Limit ได้แต่เนื่องจากหินคลุกหนองน้ำ

เจียวนั้นมีค่าที่ได้มาในกราฟจะมีความแตกต่างจากดินชนิดอื่นมากจึงทำให้กราฟไม่ได้ตามแนวทฤษฎีแต่เมื่อตัดออกแนวโน้มนักก็เป็นตามปกติ และการบดอัดที่พลังงานสูงจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งของแต่ละชนิดดินที่มี Liquid Limit มีแนวโน้มตามลำดับแต่ที่พลังงานน้อยจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่ได้ห่างกัน ในช่วงของดินที่มีค่า Liquid Limit มาก เมื่อดูจากแนวโน้มนักในกราฟของแต่ละพลังงานดังรูปที่ 4-3 และสามารถได้สมการของกราฟดังตารางที่ 4-14



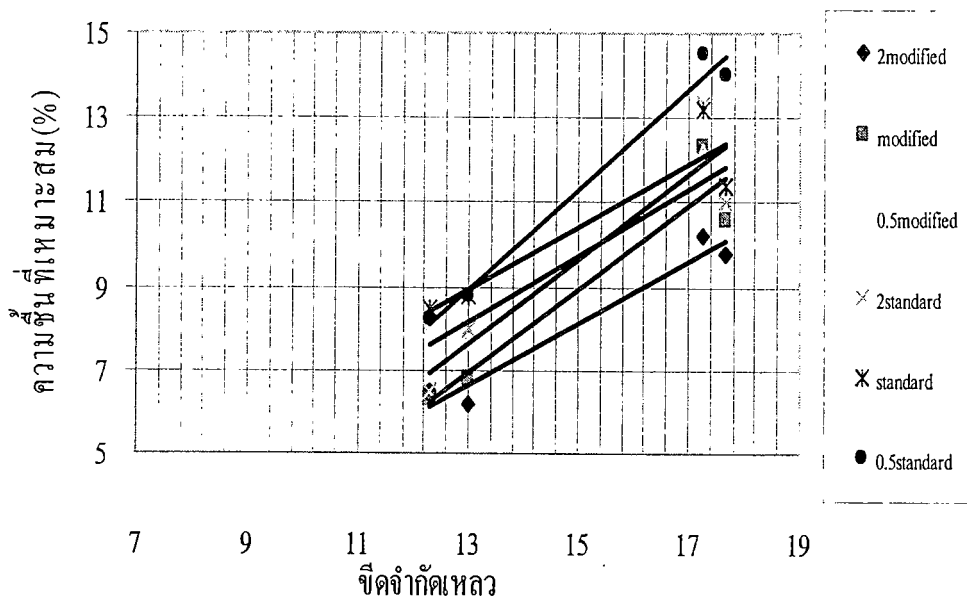
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($Y_{d \max}$) กับ Liquid limit

ตารางที่ 4-14 สมการและความแปรปรวนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($Y_{d \max}$) กับ Liquid limit

พลังงาน	สมการที่ได้จากกราฟ	ค่าความแปรปรวนของกราฟ(R^2)
2 modified	$y = -0.6605x + 30.641$	0.7466
modified	$y = -0.5977x + 29.235$	0.7311
0.5modified	$y = -0.6995x + 30.645$	0.8187
2 standard	$y = -0.6942x + 30.286$	0.8286
standard	$y = -0.7926x + 31.411$	0.7839
0.5standard	$y = -0.799x + 30.94$	0.7461

4.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Liquid limit

จากการศึกษากราฟที่ทำการทดสอบเทียบกับงานวิจัยของ Padian et al. (1997) จะสามารถบอกได้ว่า เมื่อ Liquid Limit ของดินชนิดใดมีค่ามากจะทำ ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มากกว่าดินที่มีค่า Liquid Limit น้อย เนื่องจากกราฟบอกแนวโน้มดังสมการ $y = 0.8151x - 3.6538$ และพลังงานที่ไม่เท่ากันมีผลแต่ทุกชนิดดินในการหาความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ซึ่งเมื่อพลังงานมากจะทำให้ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) น้อยลงและดินที่ทำการทดสอบสามารถมีแนวโน้มดังสมการข้างต้นนั้นเป็นดินที่หา Liquid Limit ได้แต่เนื่องจากหินคลุกหนองน้ำเขี้ยวค้นหา Liquid Limit แต่ค่าที่ได้มาในกราฟจะมีความแตกต่างจากดินชนิดอื่นมากจึงทำให้กราฟไม่ได้ตามแนวทฤษฎีแต่เมื่อตัดออกแนวโน้มก็เป็นตามปกติ และการบดอัดที่พลังงานทุกพลังงานจะมีค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ของชนิดดินที่มี Liquid Limit ใกล้เคียงกันจะมีค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ใกล้เคียงกันจากแนวโน้มในกราฟของแต่ละพลังงานดังรูปที่ 4-4 และสามารถได้สมการของกราฟดังตารางที่ 4-15



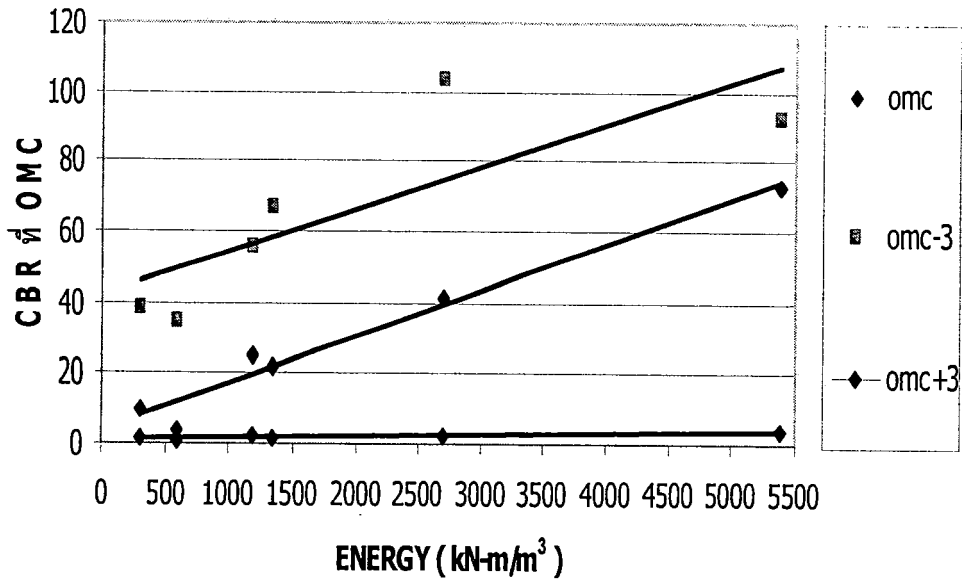
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Liquid limit

ตารางที่ 4-15 สมการและความแปรปรวนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสม (OMC) กับ Liquid limit

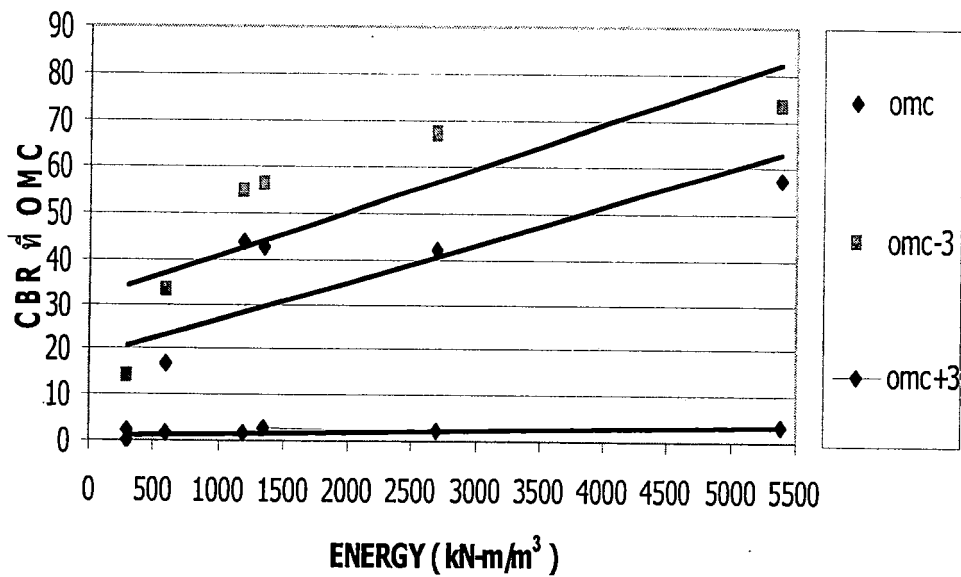
พลังงาน	สมการที่ได้จากกราฟ	ค่าความสม่ำเสมอของกราฟ(R^2)
2 modified	$y = 0.7764x - 3.6701$	0.9291
modified	$y = 1.0382x - 6.8052$	0.9008
0.5modified	$y = 0.8302x - 2.8867$	0.8995
2 standard	$y = 1.0557x - 6.4037$	0.847
standard	$y = 0.8182x - 2.2094$	0.7629
0.5standard	$y = 1.3035x - 8.7914$	0.8591

4.7 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า (CBR_{omc} , $CBR_{omc} \pm 3\%$) กับพลังงานที่ทำการบดอัด

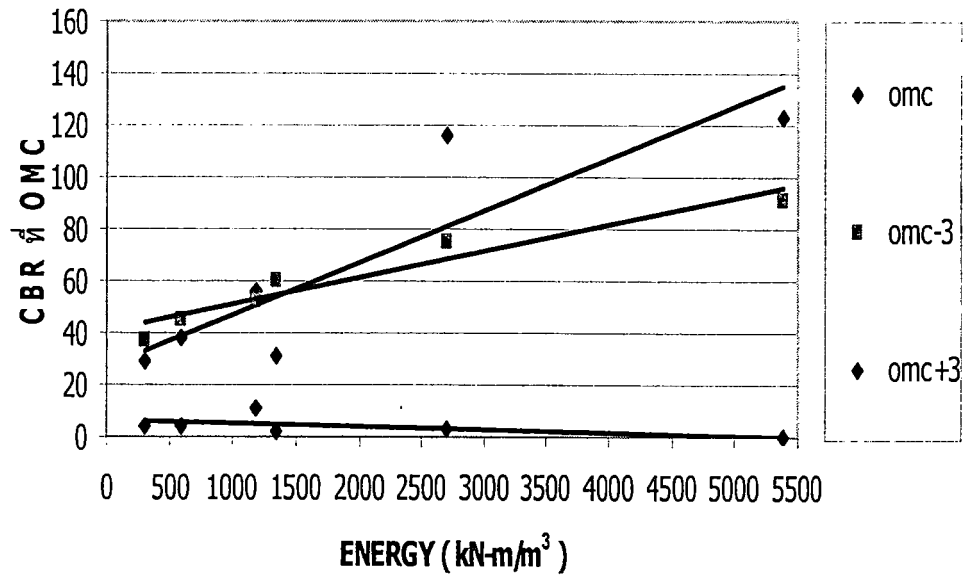
ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ส่งผลกระทบต่อค่า CBR ที่ OMC และ $OMC \pm 3\%$ จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้ จากทั้งหมดของดินที่ทำการทดสอบนั้นดินที่มีค่า OMC มี 7 ชนิด ซึ่งมี 2 ชนิดที่มีแนวโน้มลักษณะของกราฟที่ไม่คล้ายคลึงกับดินชนิดอื่น ได้แก่ ดินสุวรรณภูมิ และดินคลุกชลดคา ที่มีค่าแนวโน้มของกราฟเป็นเส้นขนานกันไปแสดงให้เห็นเมื่อความชื้นมากขึ้นค่า CBR ก็จะน้อยลงและพลังงานมากขึ้นค่า CBR ก็จะมากขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนซึ่งไม่เหมือนกันดินอื่นๆ ได้แก่ ดินน่าน ดินหมู่ 4 ดินรอบอ่างบางพระ ดินหนองขาม หินคลุกหนองน้ำเขียว ดังรูปที่ 4-5 ถึง 4-10 ซึ่งแนวโน้มของกราฟก็จะแสดงให้เห็นว่า ความชื้นเมื่อผ่าน จุดความชื้นเหมาะสม (OMC) แล้วพลังงานจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า CBR เพราะว่าการที่แสดงออกมาจะเห็นว่าเมื่อเป็นกราฟ $OMC+3\%$ นั้นมีค่า CBR ที่ไม่ต่างกันไม่ว่าจะเป็นพลังงานเท่าไรจะมีค่า CBR เท่ากันและกราฟ $OMC-3\%$ นั้นจะขนานกับกราฟ OMC ในทุกพลังงานอย่างเป็นสัดส่วนจากกราฟของดินทั้ง 5 ชนิดสามารถบอกได้ว่าค่า CBR ก่อนที่จะถึงความชื้นเหมาะสมนั้น (OMC) พลังงานมีผลต่อค่า CBR ของดินและในด้านเปียกที่มีความชื้นมากกว่าความชื้นเหมาะสม (OMC) นั้นพลังงานจะไม่มีผลต่อค่า CBR นั้นๆ



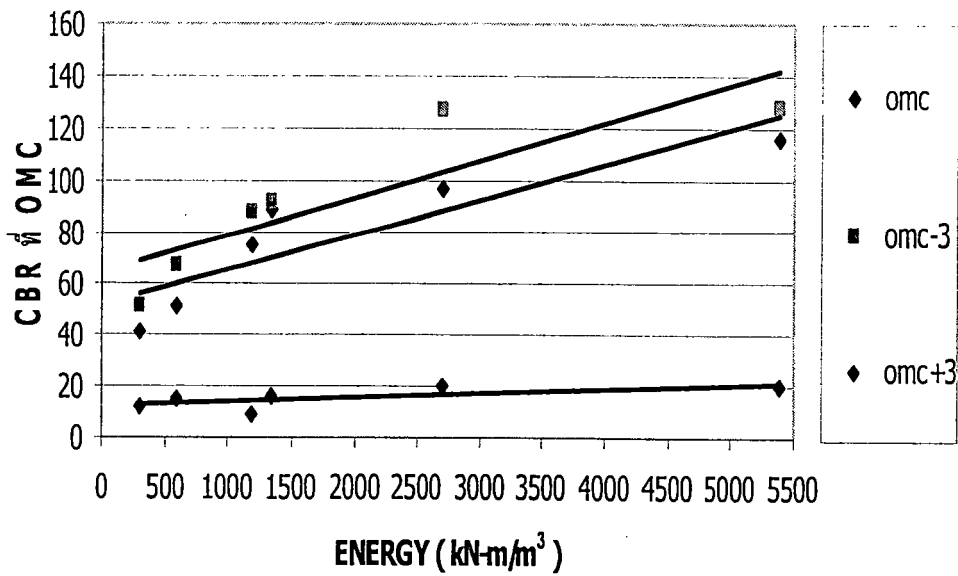
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และพลังงานการบดอัด (หนองขาม)



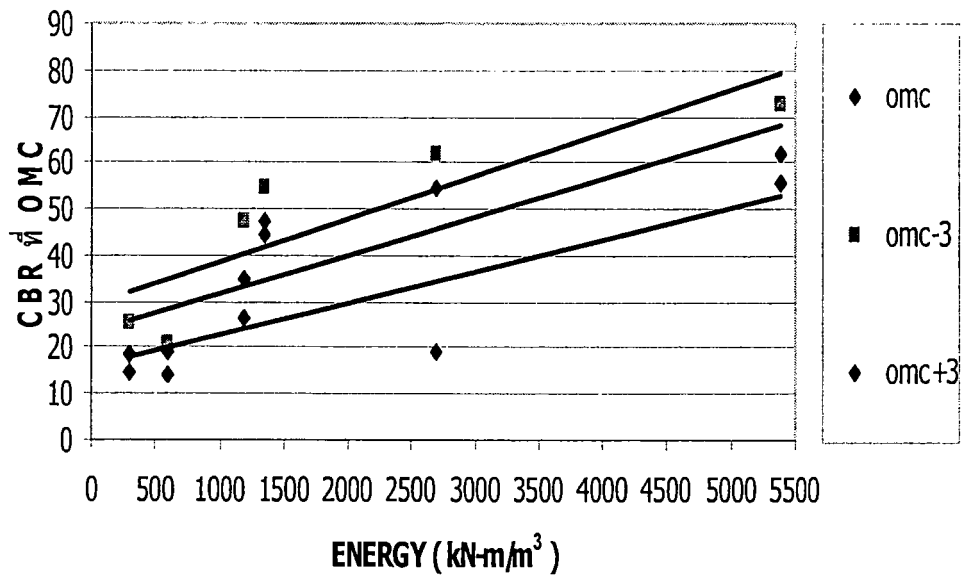
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และพลังงานการบดอัด (ดินน่าน)



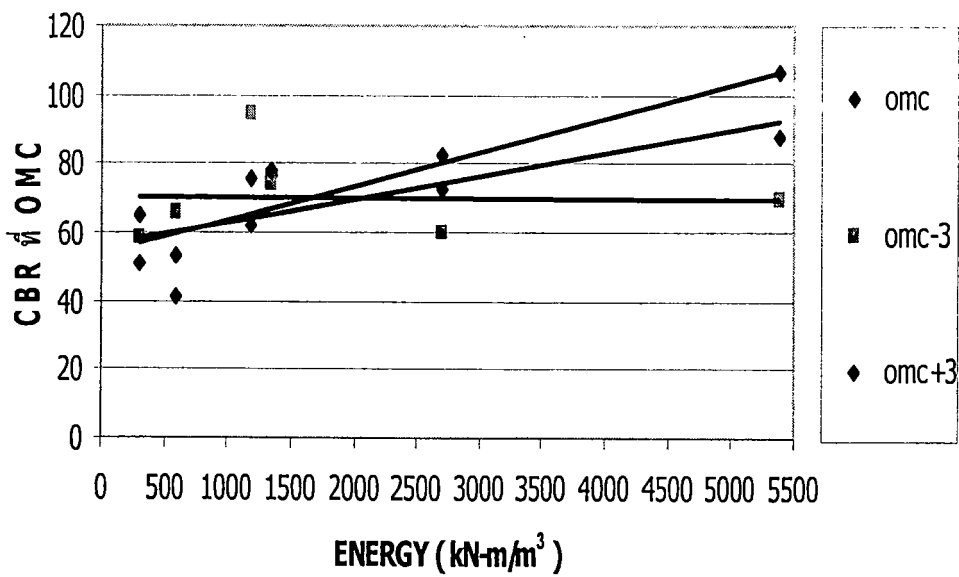
รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และพลังงานการบดอัด (รอบอ่าง)



รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และพลังงานการบดอัด (หนองน้ำเขียว)



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และพลังงานการบดอัด (สุวรรณภูมิ)



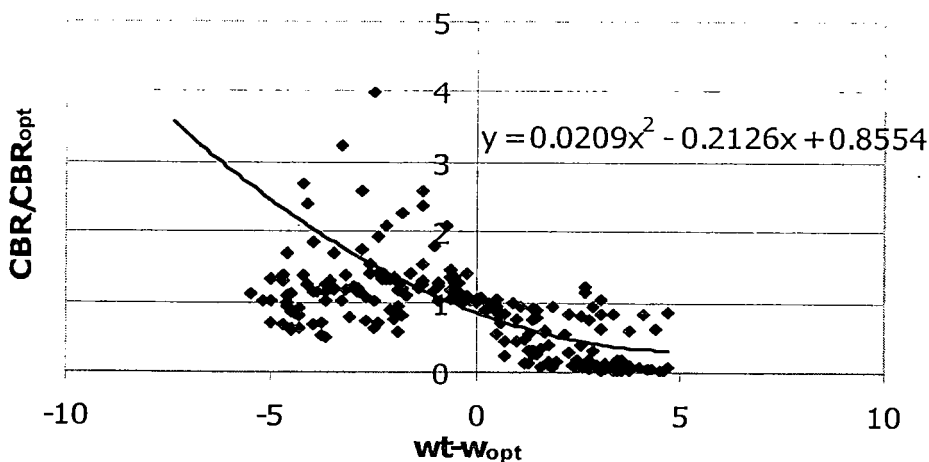
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR และพลังงานการบดอัด (ชลดา)

4.8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง (CBR/CBR_{opt}) กับ (w_t-w_{opt})

จากการศึกษาตามงานวิจัยของ Li & Selig (1994) แล้วเขียนกราฟของดินแต่ละชนิดดังรูปที่ 4-11 แล้วได้สมการดังตารางที่ 4-16 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มทางด้านหนึ่งนั้นจะได้ค่าสัดส่วนของ CBR สูงกว่าที่ความชื้นเหมาะสม (w_{opt}) และทางด้านเปียกจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับศูนย์ โดยมีเส้นแนวโน้มของทุกดินมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสามารถบอกได้ว่าเมื่อความชื้นมีน้อยกว่าค่า ความชื้นเหมาะสมนั้นจะทำให้สัดส่วนของ CBR มีค่ามากกว่าและเมื่อมีความชื้นที่เกินความเหมาะสมแล้วจะทำให้ดินนั้นมี CBR ลดลงเข้าใกล้ศูนย์ลงไปเรื่อยๆดังสมการ $y = 0.0209x^2 - 0.2126x + 0.8554$

ตารางที่ 4-16 สรุปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (w_t-w_{opt}) กับ (CBR/CBR_{opt})

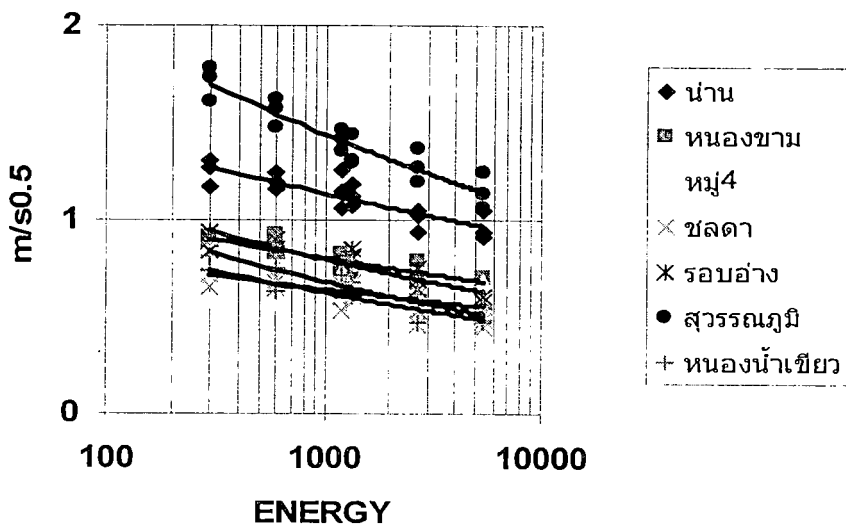
ชนิดของดิน	สมการที่ได้จากรูป
รวมทุกชนิดดิน	$y = 0.0209x^2 - 0.2126x + 0.8554$
หินคลุกชลดดา	$y = 0.9624e^{-0.0114x}$
หินคลุกหอนงน้ำเขียว	$y = 0.5968e^{-0.4997x}$
ดินน่าน	$y = 0.9624e^{-0.0114x}$
ดินสุวรรณภูมิ	$y = 0.9479e^{-0.0645x}$
ดินรอบอ่างบางพระ	$y = 0.4596e^{-0.4317x}$
ดินหมู่4บางพระ	$y = 0.3892e^{-0.3266x}$
ดินหนองขาม	$y = 0.5968e^{-0.4997x}$



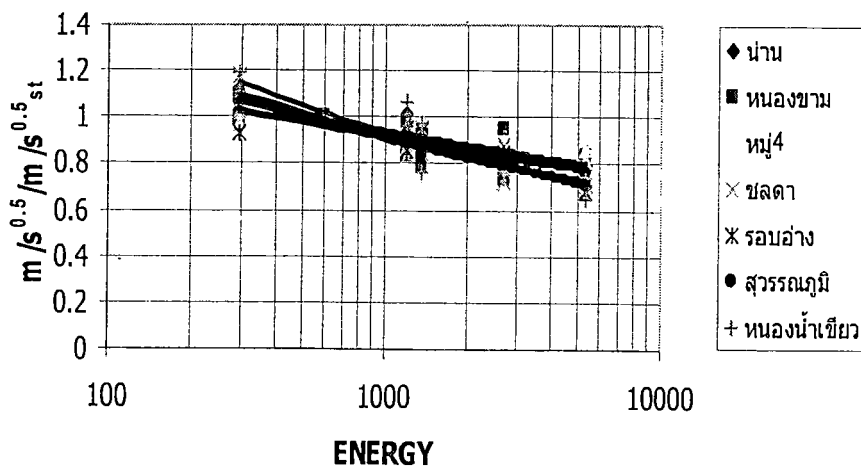
รูปที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (w_t-w_{opt}) กับ (CBR/CBR_{opt}) ของดินทุกดินตัวอย่าง

4.9 การศึกษาการประมาณกราฟการบดอัด

จากการเขียนกราฟ ระหว่าง $m/s^{0.5}$ กับ พลังงานในการวิเคราะห์ทางด้านหนึ่งได้กราฟรูปที่ 4-13 และ 4-13 จากการเขียนกราฟตามงานวิจัยดังกล่าวโดยข้อมูลที่ได้จากโครงการนี้จะได้ค่าสมการของกราฟดังตารางที่ 4-17 และ 4-18 จะสามารถเห็นได้ว่าในแต่ละดินจะมีค่าสัดส่วนของ $m/s^{0.5}$ ในความขึ้นด้านหนึ่งของแต่ละพลังงานที่ใกล้เคียงกันซึ่งแต่ละดินก็จะมีค่า $m/s^{0.5}$ แตกต่างกันออกไป จะสามารถเห็นได้ว่าในแต่ละดินจะมีค่าสัดส่วนของ $(m/s^{0.5} / m/s_{st}^{0.5})$ ในความขึ้นด้านหนึ่งของแต่ละพลังงานที่ใกล้เคียงกันทำให้กราฟที่เขียนออกมามีแนวโน้มที่เป็นเส้นเดียวกันดังรูปกราฟข้างต้น



รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $m/s^{0.5}$ กับพลังงาน



รูปที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $m/s^{0.5} / m/s_{st}^{0.5}$ กับพลังงาน

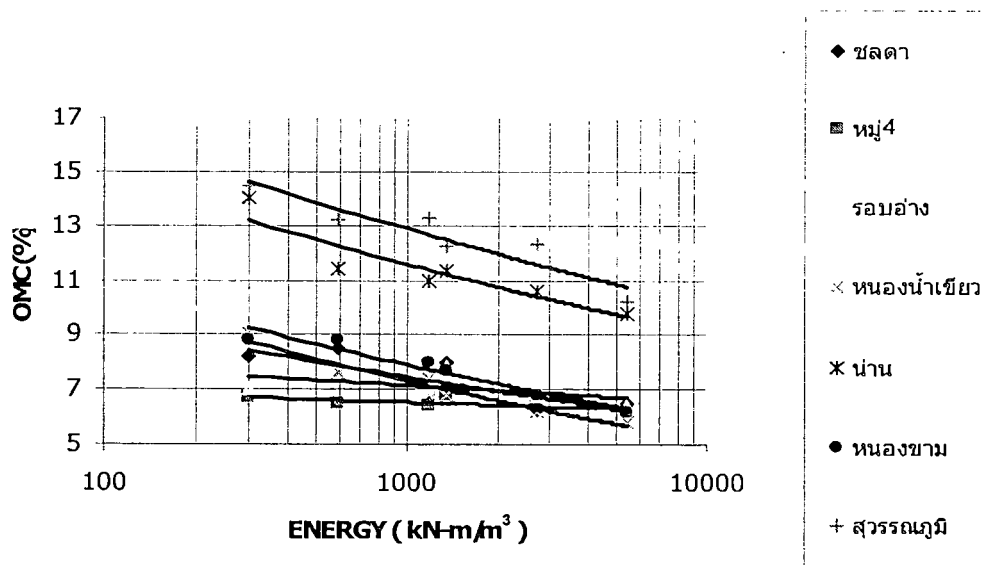
ตารางที่ 4.17 สมการที่ได้จากกราฟระหว่าง $m/s^{0.5}$ กับพลังงาน

ชนิดของดิน	สมการจากกราฟระหว่าง $m/s^{0.5}$ กับ พลังงาน	ค่าความแปรปรวนของกราฟ(R^2)
ดินนําน	$y = 2.1898x - 0.0958$	0.7312
หนองขาม	$y = 1.5774x - 0.0984$	0.7888
หมู่ 4 บางพระ	$y = 1.7544x - 0.0928$	0.5475
รอบอํางบางพระ	$y = 2.1054x - 0.1415$	0.8294
สุวรรณภูมิ	$y = 3.7156x - 0.1377$	0.8768
หินคลุกชลดา	$y = 1.7108x - 0.1472$	0.7158
หินคลุกหนองนํ้าเขียว	$y = 2.1753x - 0.169$	0.7157

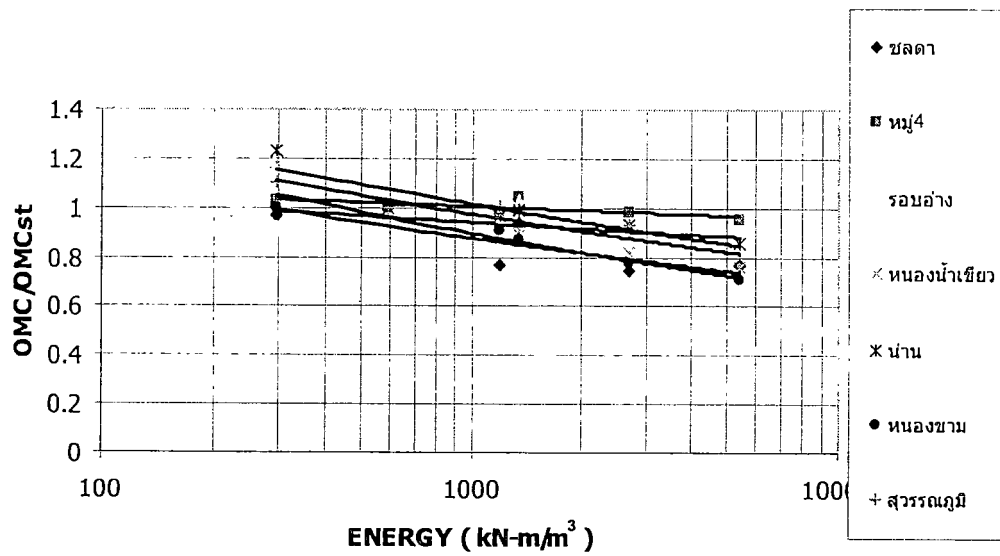
ตารางที่ 4-18 สมการที่ได้จากกราฟระหว่าง $(m/s^{0.5} / m/s_{st}^{0.5})$ กับพลังงาน

ชนิดของดิน	สมการระหว่าง $(m/s^{0.5} / m/s_{st}^{0.5})$ กับพลังงาน	ค่าความแปรปรวนของกราฟ (R^2)
รวมทุกดิน	$y = 2.2068x - 0.1264$	0.7612
ดินนําน	$y = 1.8331x - 0.0961$	0.8622
หนองขาม	$y = 1.7949x - 0.0986$	0.6243
หมู่ 4 บางพระ	$y = 1.2008x - 0.0916$	0.2078
รอบอํางบางพระ	$y = 2.5516x - 0.1476$	0.8809
สุวรรณภูมิ	$y = 2.3887x - 0.1381$	0.9393
หินคลุกชลดา	$y = 2.5516x - 0.1476$	0.8809
หินคลุกหนองนํ้าเขียว	$y = 3.0187x - 0.17$	0.8434

จากการเขียนกราฟ ที่ใช้วิเคราะห์ในด้านเปียกได้กราฟดังรูปที่ 4-14 และ 4-15 จากการเขียนกราฟตามงานวิจัยดังกล่าวโดยข้อมูลที่ได้จากโครงการนี้จะได้ค่าสมการของกราฟดังตารางที่ 4-19 และ 4-20 จะสามารถเห็นได้ว่าความชันที่แตกต่างกันแต่เมื่อหาสัดส่วนแล้วจะได้ใกล้เคียงกันในแต่ละพลังงานจะเป็นได้ดังกราฟซึ่งสามารถบอกได้ว่ากราฟในด้านเปียกนั้นจะมีการต่อกันเป็นเส้นเดียวเสมือนสมการเดียวกัน



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ OMC กับ พลังงาน



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ ($\text{OMC}/\text{OMC}_{\text{std}}$) กับ พลังงาน

ตารางที่ 4-19 สมการที่ได้จากกราฟระหว่าง OMC กับ พลังงาน

ชนิดของดิน	สมการจากกราฟระหว่าง OMC กับ พลังงาน	ค่าความแปรปรวนของกราฟ (R^2)
ดินนําน	$y = 24.116x - 0.1064$	0.8546
หนองขาม	$y = 19.585x - 0.1316$	0.935
หมู่ 4 บางพระ	$y = 7.6258x - 0.0224$	0.4765
รอบอํางบางพระ	$y = 9.3353x - 0.0386$	0.3024
สุวรรณภูมิ	$y = 26.765x - 0.1061$	0.8514
หินคลุกชลดา	$y = 15.142x - 0.1026$	0.6033
หินคลุกหนองนํ้าเขียว	$y = 20.395x - 0.1486$	0.9587

ตารางที่ 4-20 สมการที่ได้จากกราฟระหว่าง OMC/OMC_s กับ พลังงาน

ชนิดของดิน	สมการระหว่าง OMC/OMC _s กับ พลังงาน	ค่าความแปรปรวนของกราฟ (R^2)
ดินนําน	$y = 2.1155x - 0.1064$	0.8546
หนองขาม	$y = 2.2255x - 0.1316$	0.935
หมู่ 4 บางพระ	$y = 1.1732x - 0.0224$	0.4765
รอบอํางบางพระ	$y = 1.2283x - 0.0386$	0.3024
สุวรรณภูมิ	$y = 2.0277x - 0.1061$	0.8514
หินคลุกชลดา	$y = 1.7814x - 0.1026$	0.6033
หินคลุกหนองนํ้าเขียว	$y = 2.6836x - 0.1486$	0.9587

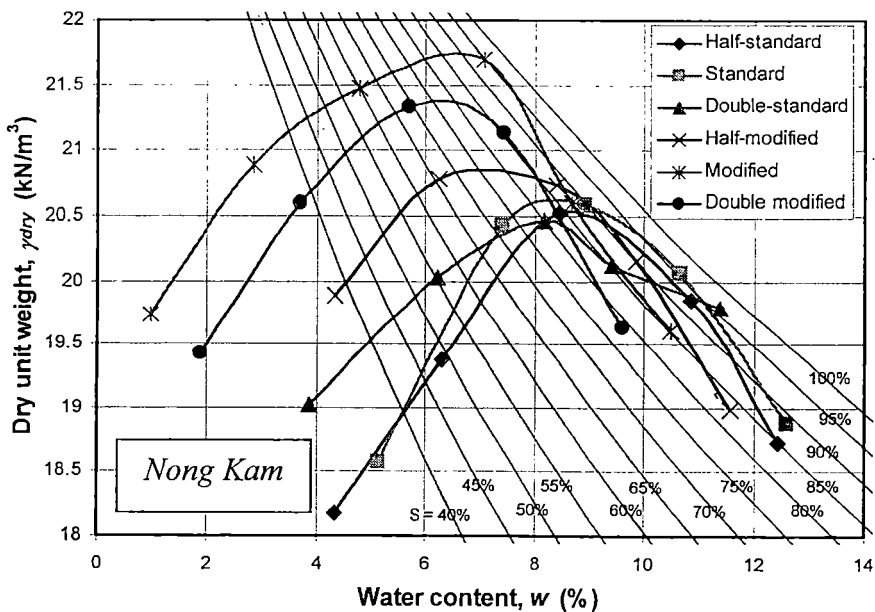
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบการบดอัด

ตัวอย่างของผลการทดสอบการบดอัดที่พลังงานต่างๆได้แสดงในรูปที่ 5-1 ค่า w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$ จากการทดสอบได้สรุปในตารางที่ 5-1 และรูปที่ 5-2 ซึ่งจะพบว่าค่า w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$ แปรผันตรงกับ logarithm ของพลังงานในการบดอัดตามที่ได้แสดงไว้โดย Blotz et al. (1998) การเปลี่ยนแปลงของ w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$ กับพลังงานในการบดอัดได้ถูก normalized ด้วยค่าของมวลที่พลังงานที่ standard compaction และแสดงผลในรูปที่ 5-3 จะพบว่าข้อมูลทั้งหมดจะมีจะรวมกันเป็นแนวโน้มเดียวและสามารถประมาณได้โดยสมการ (5-1) และ (5-2) ซึ่งเป็นลักษณะสมการที่แนะนำโดย Horpibulsuk et al. (2006) จะพบว่าค่า w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$ ของดินเม็ดหยาบจะเปลี่ยนแปลงกับพลังงานในการบดอัดน้อยกว่าของดินเม็ดละเอียด ความสัมพันธ์ดังสมการ (5-1) และ (5-2) สามารถประมาณผลการทดลองที่ได้ในการวิจัยนี้ได้อย่างดี

$$\frac{w_{OMC}}{w_{OMC}(st)} = 1.7464 - 0.1173 \ln E \quad (E \text{ is in kJ/m}^3) \quad (5-1)$$

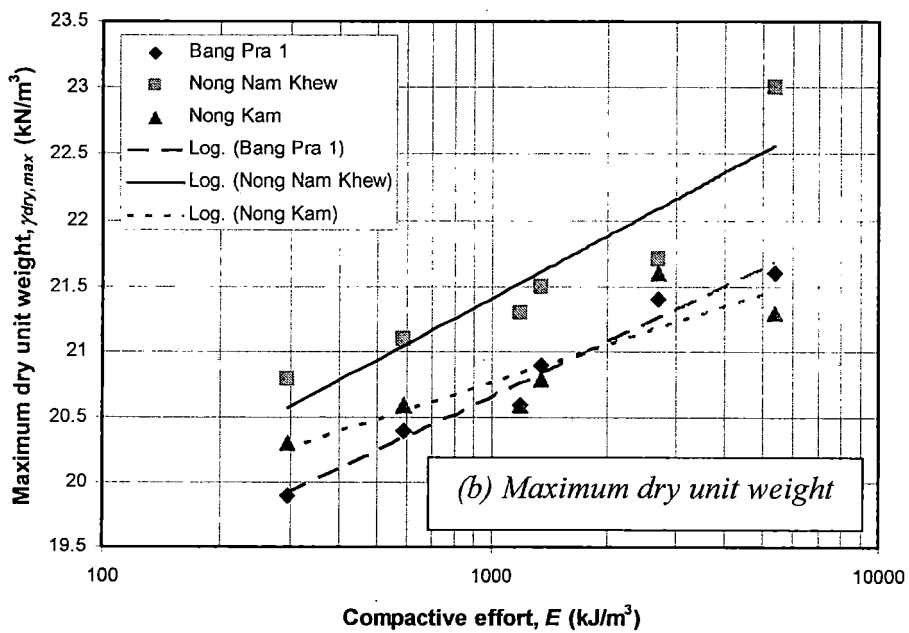
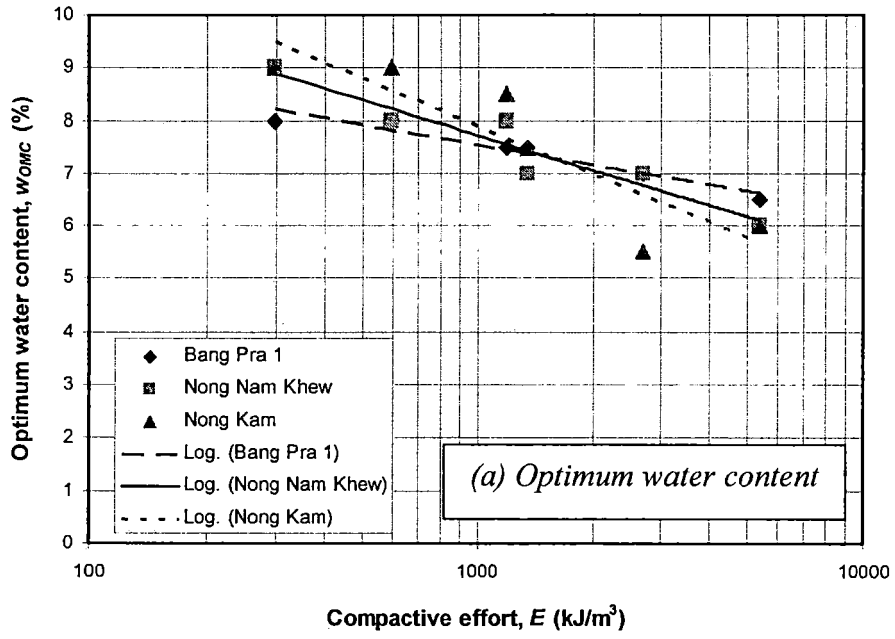
$$\frac{\gamma_{dry,max}}{\gamma_{dry,max}(st)} = 0.8323 + 0.0262 \ln E \quad (E \text{ is in kJ/m}^3) \quad (5-2)$$



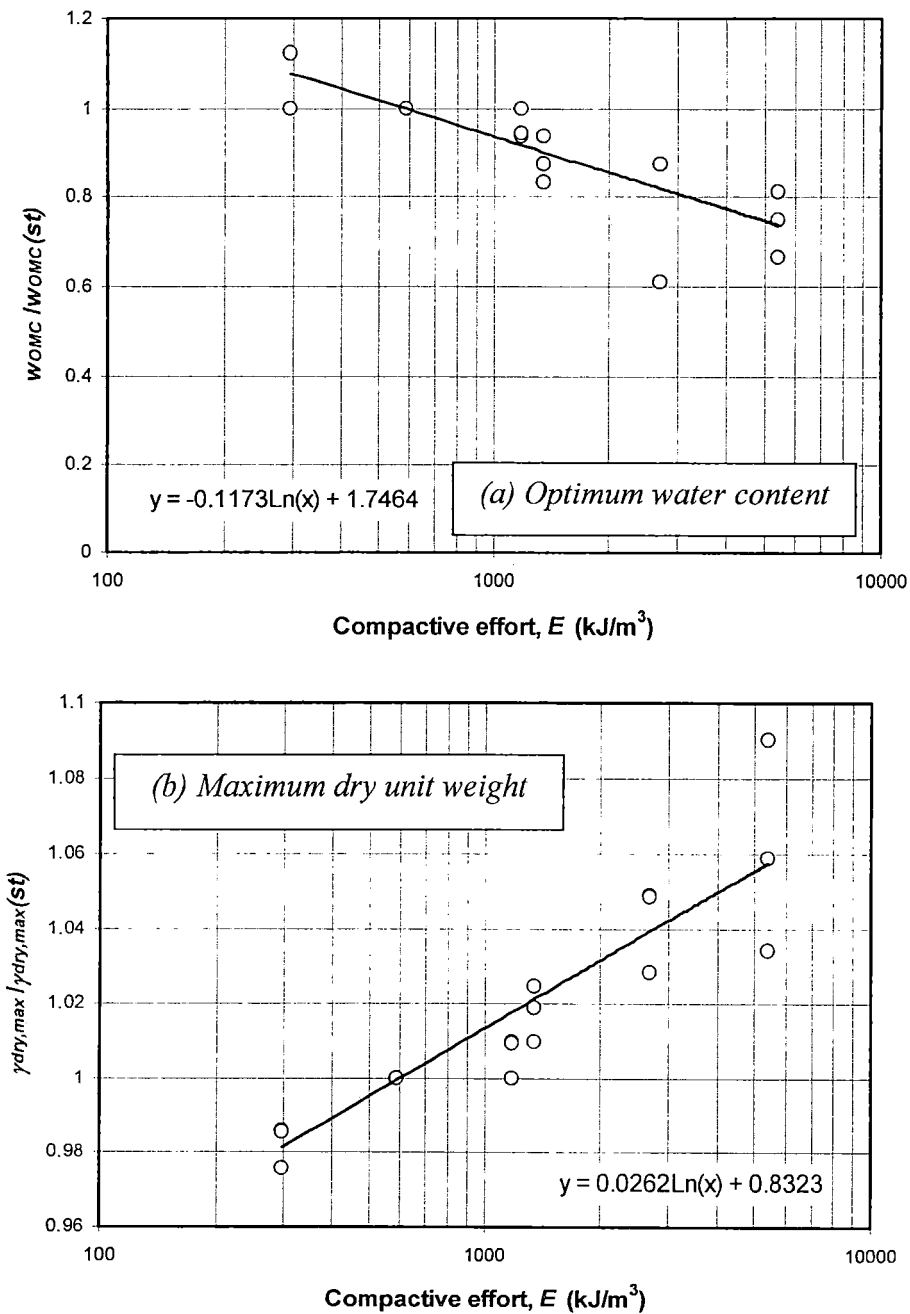
รูปที่ 5-1 ตัวอย่างของผลการทดสอบการบดอัด

ตารางที่ 5-1 ผลการทดลองของค่า w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$

Soil type	Compactive effort	w_{OMC} (%)	$\gamma_{dry,max}$ (kN/m ³)
Nong Nam Khew	Half-standard	9.0	20.8
	Standard	8.0	21.1
	Double-standard	8.0	21.3
	Half-modified	7.0	21.5
	Modified	7.0	21.7
	Double-modified	6.0	23.0
Nong Kam	Half-standard	9.0	20.3
	Standard	9.0	20.6
	Double-standard	8.5	20.6
	Half-modified	7.5	20.8
	Modified	5.5	21.6
	Double-modified	6.0	21.3
Bang Pra 1	Half-standard	8.0	19.9
	Standard	8.0	20.4
	Double-standard	7.5	20.6
	Half-modified	7.5	20.9
	Modified	7.0	21.4
	Double-modified	6.5	21.6



รูปที่ 5-2 การเปลี่ยนแปลงของค่า w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$ กับพลังงานในการบดอัด



รูปที่ 5-3 การเปลี่ยนแปลงของค่า normalized w_{OMC} และ $\gamma_{dry,max}$ กับพลังงานในการบดอัด

Horpibulsuk et al. (2006) ได้แสดงว่าสำหรับดินเม็ดละเอียดชนิดนั้นที่พลังงานการบดอัดหนึ่งๆจะมี สัดส่วน w/S^{B_d} และ w/S^{B_w} เป็นค่าคงที่สำหรับด้านเปียกและด้านแห้งของ optimum ตามลำดับและ สามารถประมาณโดยใช้สมการ (5-3) และ (5-4) (โดยที่ w คือความชื้น, S คือ degree of saturation, และ B_d และ B_w คือค่าคงที่) ตารางที่ 5-2 แสดงการใช้สมการดังกล่าวกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ ตัวอย่างของความสัมพันธ์ได้แสดงในรูปที่ 5-4 โดยพบว่าค่าคงที่ B_d และ B_w จะค่อนข้างคงที่สำหรับดินแต่ละชนิด ค่าคงที่ B_d ของดินหนองขาม, หนองน้ำเขียว, และบางพระ 1 คือ 0.73, 0.65 และ 0.73 ตามลำดับ ค่าคงที่ B_w

ของดินหนองขาม, หนองน้ำเขียว, และบางพระ 1 คือ 1.84, 1.34 และ 2.24 ตามลำดับ จะเห็นว่ากระบวนการในการประมาณกราฟการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดต่างๆสำหรับดินเม็ดละเอียดที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2006) นั้นสามารถใช้กับผลการทดลองของดินเม็ดหยาบที่ได้จากการวิจัยนี้ด้วย

$$w = A_d S^{B_d} \tag{5-3}$$

$$w = A_w S^{B_w} \tag{5-4}$$

ตารางที่ 5-2(a) การใช้วิธีการที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2006) สำหรับดินหนองน้ำเขียว

Compactive effort	Parameters				
	A _d	B _d	A _w	B _w	ODS* (%)
Half-standard	10.25	0.73	—	—	90
Standard	9.74	0.83	11.04	1.53	85
Double-standard	8.71	0.67	13.01	2.87	85
Half-modified	8.08	0.70	12.48	2.07	70
Modified	8.67	0.77	10.88	1.59	75
Double-modified	5.71	0.65	6.68	1.15	75
Average	—	0.73	—	1.84	80

* ODS = optimum degree of saturation (degree of saturation at optimum water content)

ตารางที่ 5-2(b) การใช้วิธีการที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2006) สำหรับดินหนองขาม

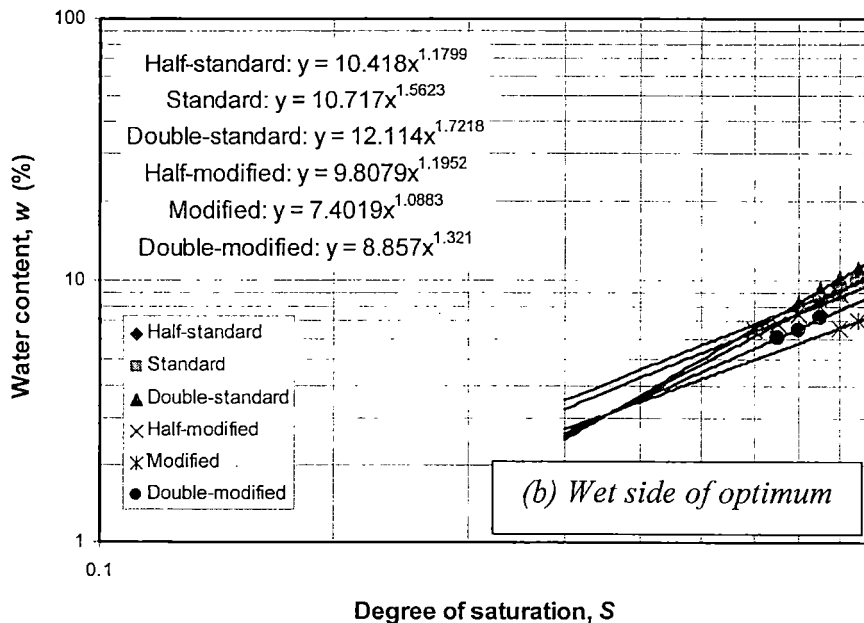
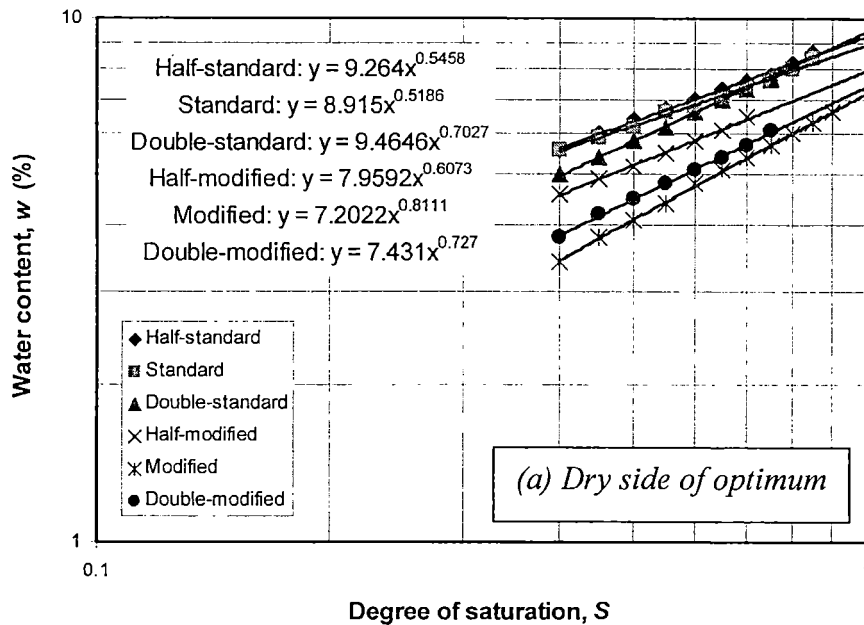
Compactive effort	Parameters				
	A _d	B _d	A _w	B _w	ODS* (%)
Half-standard	9.26	0.55	10.42	1.18	85
Standard	8.92	0.52	10.72	1.56	85
Double-standard	9.46	0.70	12.11	1.72	80
Half-modified	7.96	0.61	9.81	1.20	70
Modified	7.20	0.81	7.40	1.09	90
Double-modified	7.43	0.73	8.86	1.32	75
Average	(0.65	(1.34	81

* ODS = optimum degree of saturation (degree of saturation at optimum water content)

ตารางที่ 5-2(c) การใช้วิธีการที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2006) สำหรับดินบางพระ 1

Compactive effort	Parameters				
	A_d	B_d	A_w	B_w	ODS* (%)
Half-standard	11.68	0.98	—	—	80
Standard	9.47	0.76	12.34	1.94	80
Double-standard	8.81	0.69	15.78	2.84	75
Half-modified	8.46	0.60	—	(95
Modified	7.38	0.62	9.33	1.95	85
Double-modified	7.07	0.76	((85
Average	(0.73	(2.24	83

* ODS = optimum degree of saturation (degree of saturation at optimum water content)



รูปที่ 5-4 การใช้วิธีการที่เสนอโดย Horpibulsuk et al. (2006) สำหรับดินหนองขาม

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง CBR

ตัวอย่างผลการทดสอบ CBR ได้แสดงในรูปที่ 5-5 ผลการทดลอง CBR นี้ได้ถูกวิเคราะห์ตามวิธีที่เสนอโดย Li & Selig (1994) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ resilient modulus และค่าความแตกต่างของความชื้นจากค่า optimum water content ในการวิจัยนี้ใช้ค่า CBR แทนค่า resilient modulus และได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ใน 2 กรณีคือ (i) กรณีความหนาแน่นแห้งคงที่ และ (ii) กรณีพลังงานการบดอัดคงที่ (ดูนิยามในรูปที่ 5-6) Li & Selig (1994) แสดงว่าสมการกำลังสองจะเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามสมการกำลังสองไม่สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวิจัยนี้ ดังนั้นจึงใช้

สมการกำลังสองสำหรับด้านเปียกและด้านแห้งของ optimum แยกต่างหากจากกันเพื่อให้สมการที่ได้เป็นตัวแทนที่แม่นยำขึ้น ผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 5-7 และ 5-8 และสมการที่ได้ได้แสดงในสมการ (5-5) และ (5-6)

กรณีหน่วยน้ำหนักแห้งคงที่:

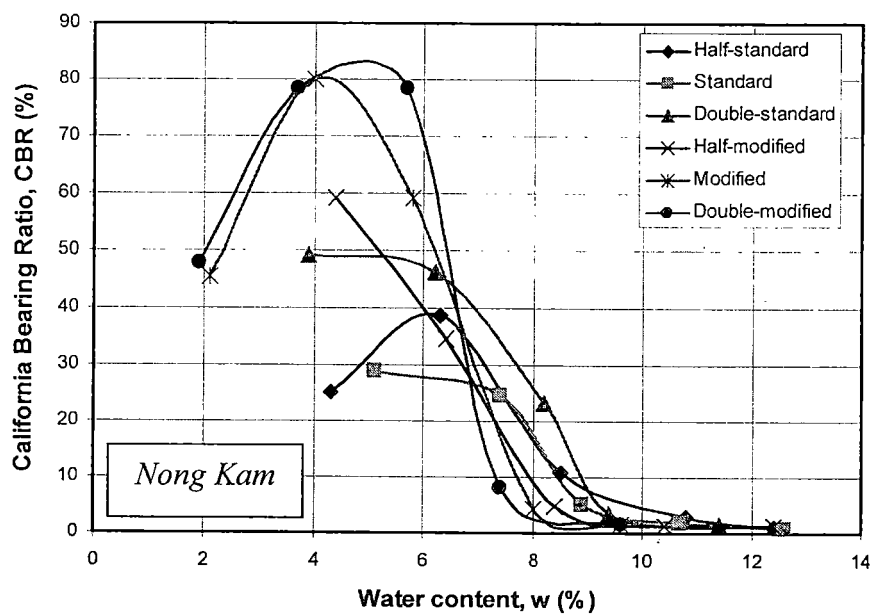
$$\text{Dry side: } \frac{CBR}{CBR_{OMC}} = e^{-0.2477(w-w_{OMC})} \quad (5-5a)$$

$$\text{Wet side: } \frac{CBR}{CBR_{OMC}} = e^{-1.0565(w-w_{OMC})} \quad (5-5b)$$

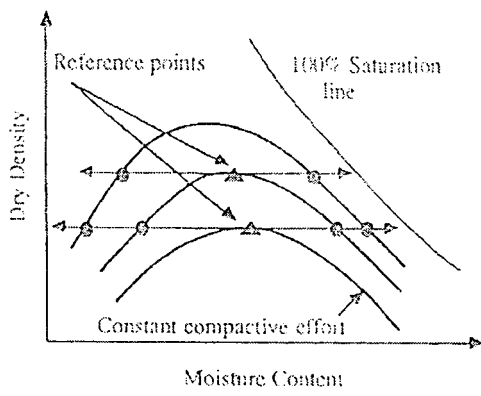
กรณีพลังงานในการบดอัดคงที่:

$$\text{Dry side: } \frac{CBR}{CBR_{OMC}} = -0.0899(w-w_{OMC})^2 - 0.547(w-w_{OMC}) + 1 \quad (5-6a)$$

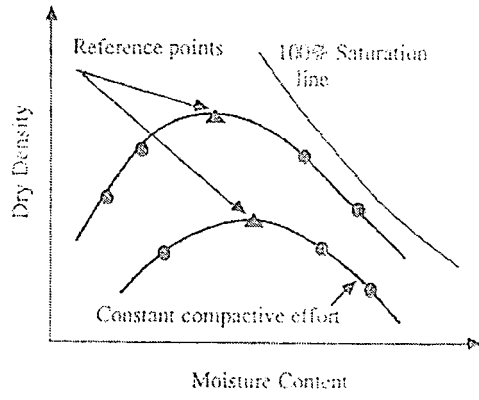
$$\text{Wet side: } \frac{CBR}{CBR_{OMC}} = e^{-0.7977(w-w_{OMC})} \quad (5-6b)$$



รูปที่ 5-5 ตัวอย่างผลการทดสอบ CBR

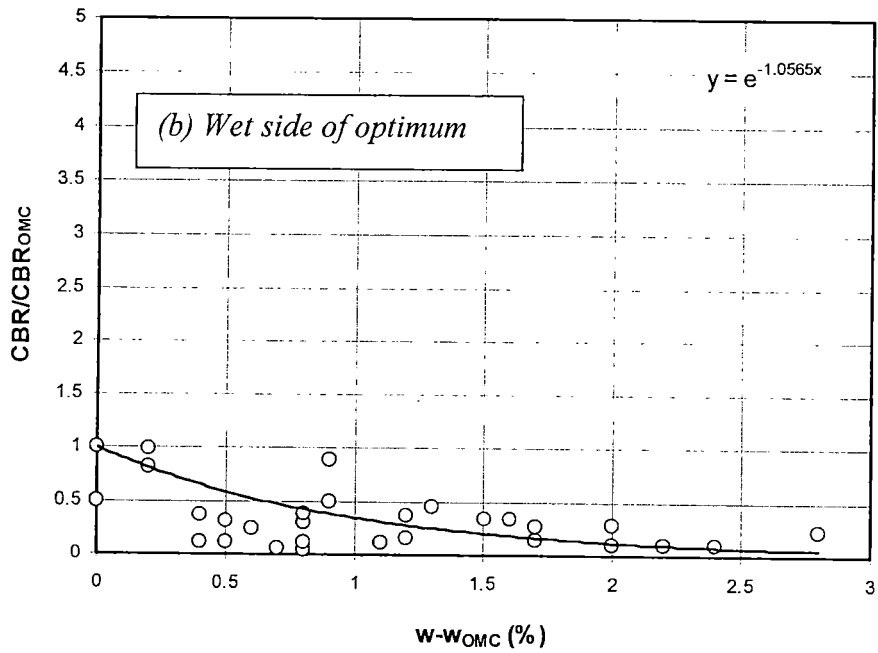
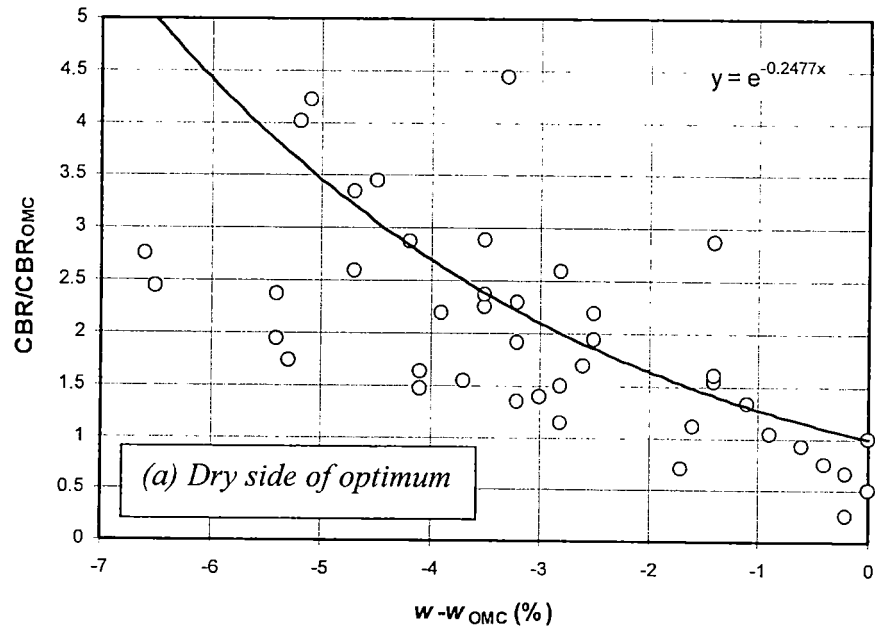


(a) Constant dry unit weight

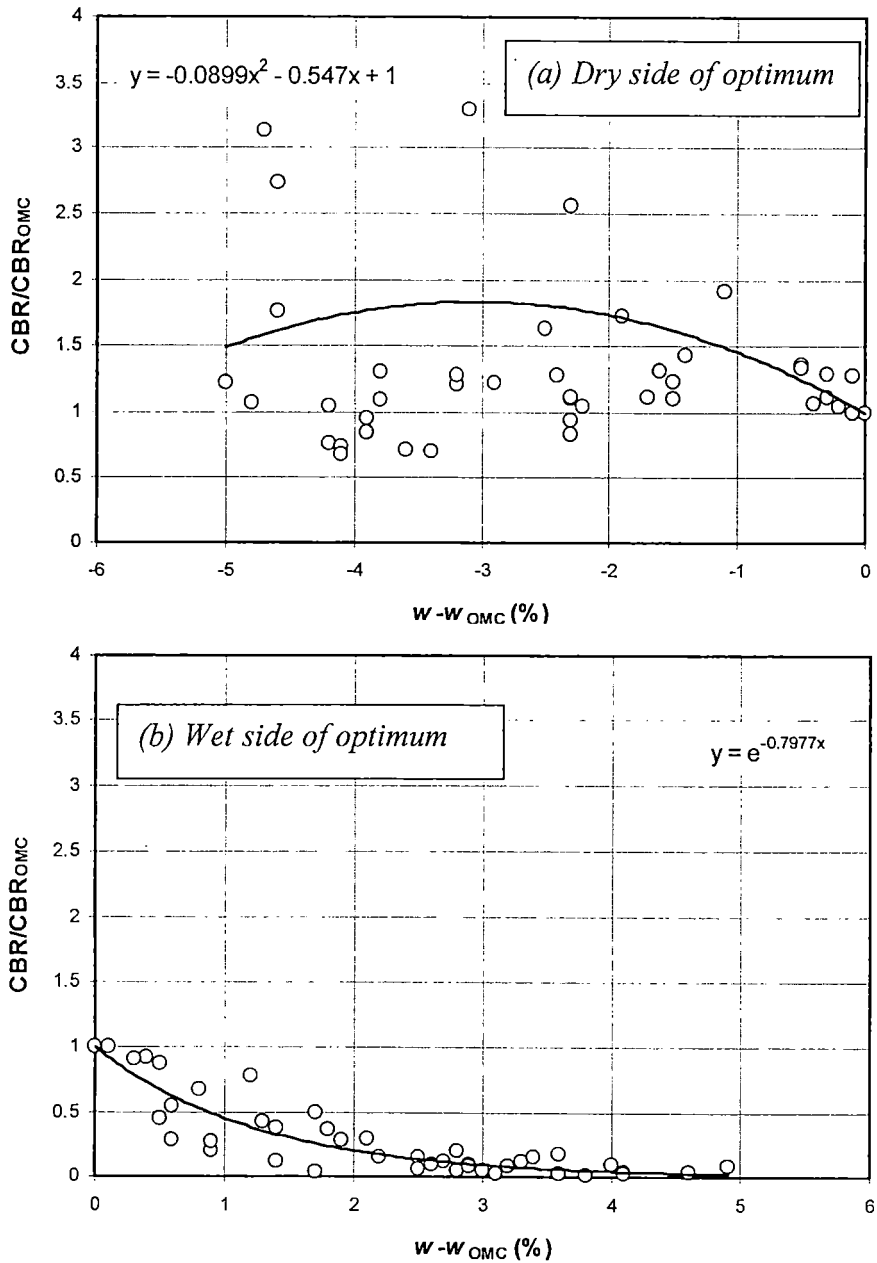


(b) Constant compactive effort

รูปที่ 5-6 นิยามของการวิเคราะห์ผลการทดสอบ CBR (Li & Selig, 1994)



รูปที่ 5-7 ผลการวิเคราะห์การทดสอบ CBR สำหรับกรณีหน่วยน้ำหนักแห้งคงที่



รูปที่ 5-8 ผลการวิเคราะห์การทดสอบ CBR สำหรับกรณีพลังงานในการบดอัดคงที่

5.3 การเสนอวิธีการประมาณค่า CBR

เมื่อมีข้อมูลของกราฟการบดอัดที่พลังงานในการบดอัดใดๆและผลการทดสอบ CBR 1 ค่า จะสามารถใช้วิธีที่เสนอดังต่อไปนี้เพื่อประมาณค่า CBR ที่ความชื้นใดๆและพลังงานในการบดอัดใดๆได้

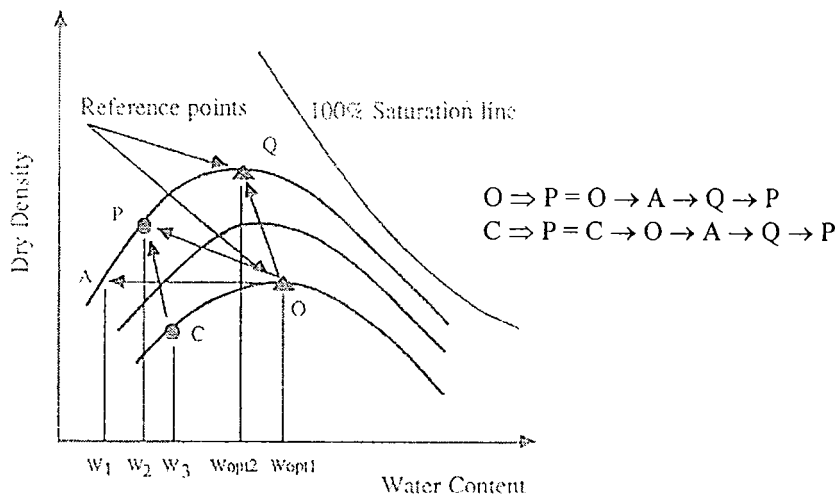
1. จากข้อมูลกราฟการบดอัดที่พลังงานใดๆจะสามารถหาค่า A_d , B_d , A_w , และ B_w และค่าคุณสมบัติของการบดอัดได้ ($\gamma_{dry,max}$, w_{OMC} and ODS) โดยใช้ power relationship ระหว่างความชื้นและค่า degree of saturation ที่ระดับ degree of saturation ต่างๆทั้งทางด้านเปียกและด้านแห้งของ optimum
2. จากข้อมูล w_{OMC} จะสามารถหาค่า $w_{OMC}(st)$ โดยใช้สมการ (5-1)

3. หาค่า w_{OMC} สำหรับพลังงานในการบดอัดที่ต้องการ โดยใช้สมการ (5-1)
4. หาค่า A_d และ A_w สำหรับพลังงานในการบดอัดที่ต้องการจากค่า w_{OMC} โดยใช้สมการ (5-7) และ (5-8) โดยมีสมมติฐานที่ว่าค่า ODS จะมีค่าเท่ากันที่ทุกพลังงานในการบดอัด

$$A_d = \frac{w_{OMC}}{ODS^{B_d}} \quad (5-7)$$

$$A_w = \frac{w_{OMC}}{ODS^{B_w}} \quad (5-8)$$

5. หาค่า w สำหรับทั้งด้านแห้งและด้านเปียกของ optimum ที่ค่า of degree of saturation ต่างๆ โดยใช้สมการ (5-3) และ (5-4) ตามลำดับ ดังนั้นจะทราบค่า γ_{dry}
6. วาดกราฟการบดอัดโดยเชื่อมจุด (γ_{dry}, w) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5
7. จากข้อมูลค่า CBR จะสามารถหาค่า CBR อื่นๆได้โดยใช้สมการ (5-5) และ/หรือ (5-6) โดยมีขั้นตอนทั่วไปดังนี้: (i) ใช้สมการ (5-5) เพื่อหาค่า CBR ที่พลังงานในการบดอัดอื่นๆ, (ii) ใช้สมการ (5-6) ในการหาค่า CBR_{OMC} , และ (iii) ใช้สมการ (5-6) เพื่อหาค่า CBR ที่ค่าความชื้นอื่นๆ ตัวอย่างของขั้นตอนการคำนวณแสดงในรูปที่ 5-9

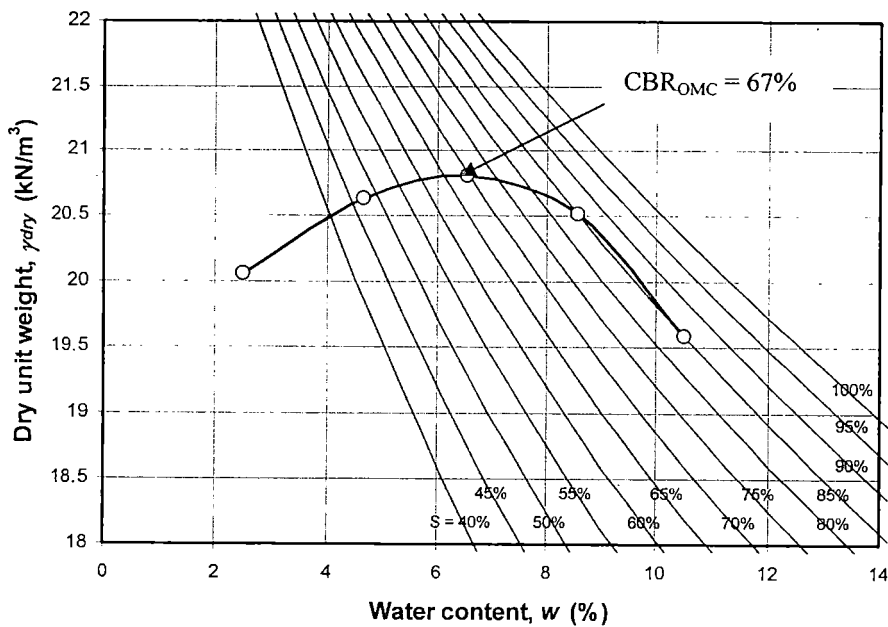


รูปที่ 5-9 ขั้นตอนในการหาค่า CBR จากสภาพใดๆที่ทราบค่า (Li & Selig, 1994)

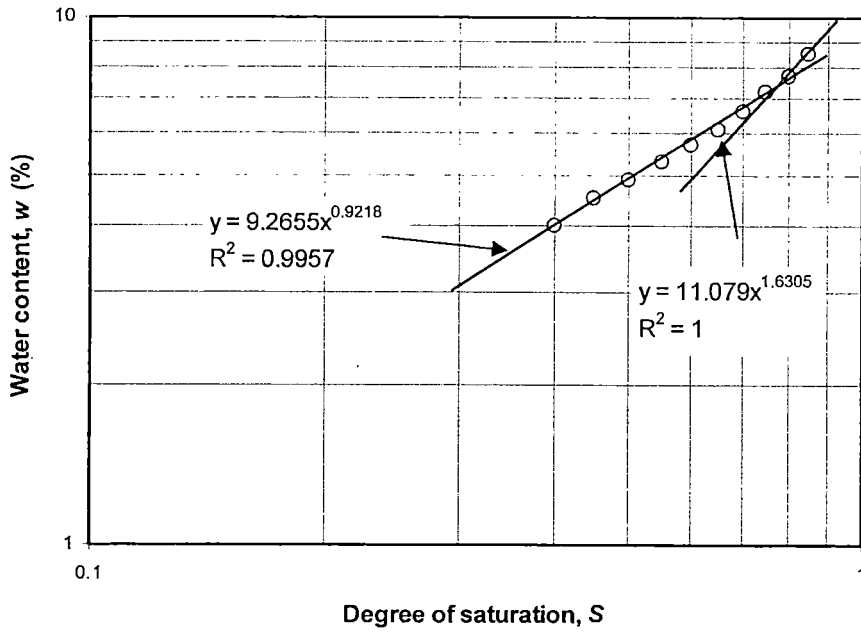
5.4 การตรวจสอบผลการคำนวณ

ขั้นตอนการประมาณค่าที่ได้เสนอจากการวิจัยนี้ได้ใช้ในการประมาณค่าของดินบางพระ 2 เพื่อตรวจสอบผลการคำนวณ ข้อมูลของดินที่มรคือกราฟการบดอัดที่พลังงาน Standard Proctor และค่า CBR ที่ w_{OMC} ดังแสดงในรูปที่ 5-10 ข้อมูลที่ให้แสดงว่าสำหรับพลังงานในการบดอัดแบบ standard Proctor นั้นดินมี $w_{OMC} = 6.5\%$, $\gamma_{dry,max} = 20.8 \text{ kN/m}^3$, และ $CBR_{OMC} = 67\%$ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นและ degree of saturation แสดงในรูปที่ 5-11 ซึ่งแสดงว่าดินนี้มีค่าคงที่ $B_d = 0.92$, $B_w = 1.63$, และ $ODS = 90\%$ รูปที่ 5-12

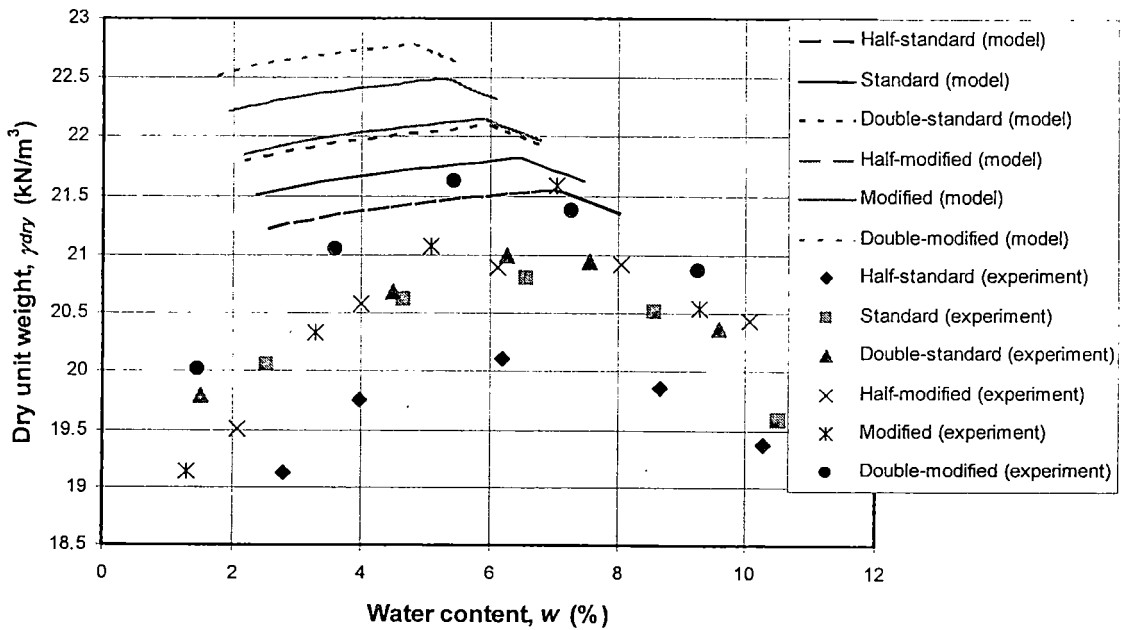
แสดงผลการประมาณกราฟการบดอัดที่พลังงานต่างๆเทียบกับผลการทดสอบจริง ผลการคำนวณแสดงว่าวิธีที่เสนอสามารถประมาณค่า w_{OMC} ที่พลังงานต่างๆได้ถูกต้องพอสมควร (โดยใช้สมการ (5-1)) แต่ประมาณค่า $\gamma_{dry,max}$ มากเกินไปประมาณ 10% สำหรับทุกพลังงาน กราฟการบดอัดที่ได้จากการประมาณนี้จะใช้ต่อไปเพื่อประมาณค่า CBR ที่ความชื้นและพลังงานต่างๆซึ่งผลการคำนวณได้แสดงในรูปที่ 5-13 ผลการคำนวณแสดงว่าวิธีการที่เสนอสามารถประมาณค่า CBR ทางด้านเปียกของ optimum ได้แม่นยำพอสมควรแต่ประมาณค่า CBR ทางด้านแห้งของ optimum ได้น้อยเกินไป เหตุผลสำหรับความไม่แม่นยำนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจาก: (i) มีข้อมูลผลการทดลองสำหรับพลังงานหนึ่งๆน้อยเกินไปทำให้สมการการประมาณที่ได้มีความแม่นยำน้อยลง, (ii) ความไม่แม่นยำในการหาค่า G_s , และ (iii) ความไม่แม่นยำจากความแปรปรวนทางสถิติของการทดสอบเองเนื่องจากทำการทดสอบแต่ละกรณีเพียงครั้งเดียว ในการวิจัยต่อไปควรพิจารณาสาเหตุความไม่แม่นยำพวกนี้และออกแบบการทดลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้น



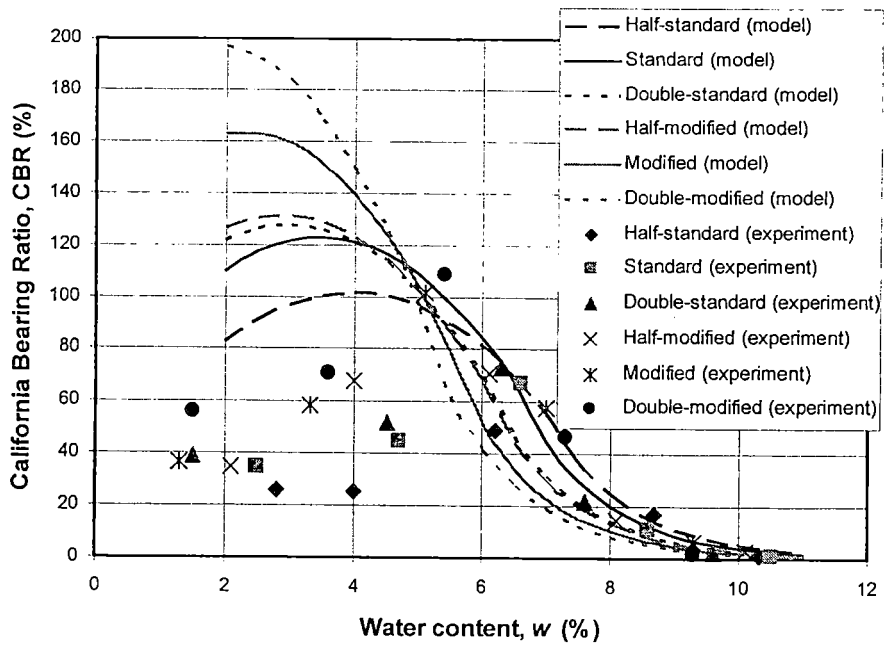
รูปที่ 5-10 ข้อมูลกราฟการบดอัดและ CBR ของดินบางพระ 2



รูปที่ 5-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและ degree of saturation ของดินบางพระ 2



รูปที่ 5-12 ผลการประมาณกราฟการบดอัด



รูปที่ 5-13 ผลการประมาณค่า CBR

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ศึกษาวิธีการประมาณค่า California Bearing Ratio (CBR) ที่ความชื้นในการบดอัดต่างๆและพลังงานในการบดอัดต่างๆจากข้อมูลกราฟการบดอัดที่ทราบสำหรับพลังงานใดๆและค่า CBR 1 ค่า กระบวนการวิเคราะห์เป็นการรวมเอาแนวคิดในการประมาณการฟการบดอัดที่เสนอ โดย Blotz et al. (1998) และ Horpibulsuk et al. (2006) และแนวคิดในการประมาณค่า CBR ที่เสนอโดย Li & Selig (1994) วิธีการนี้ได้นำมาวิเคราะห์กับดินเม็ดหยาบในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงใต้ ผลการทดลองแสดงว่าวิธีที่เสนอนี้สามารถประมาณค่า w_{OMC} ที่พลังงานต่างๆได้ดีพอสมควรแต่ประมาณค่า $\gamma_{dry,max}$ ได้มากเกินไปประมาณ 10% ที่ทุกพลังงานการบดอัด วิธีการที่เสนอนี้ประมาณค่า CBR ทางด้านเปียกของ optimum ได้ดีพอสมควรแต่ประมาณค่า CBR ทางด้านแห้งของ optimum ได้น้อยไป ในการวิจัยต่อไปควรออกแบบการทดลองให้เหมาะสมยิ่งขึ้นเพื่อพิจารณาสาเหตุความไม่แม่นยำต่างๆที่พบจากกงานวิจัยนี้

ข้อสรุปเป็นข้อๆจากผลการทดลองเป็นดังนี้

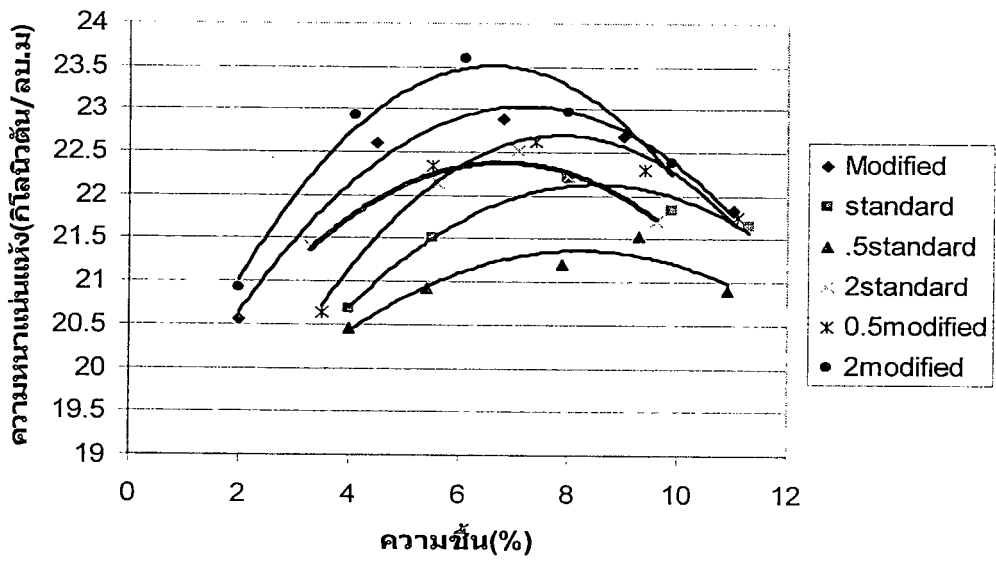
1. ในพลังงานเดียวกันดินที่มีค่า Plastic limit ใกล้เคียงกันจะทำให้ ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกัน โดยแต่ละพลังงานค่าก็จะแปรผันไปตามพลังงาน
2. ในพลังงานเดียวกันดินที่มีค่า Liquid limit ใกล้เคียงกันจะทำให้ ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกัน โดยแต่ละพลังงานค่าก็จะแปรผันไปตามพลังงาน
3. แต่ละพลังงานจะส่งผลกระทบต่อความชื้นที่เหมาะสมซึ่งเมื่อพลังงานมากขึ้นความชื้นก็จะน้อยลง
4. แต่ละพลังงานจะส่งผลกระทบต่อความชื้นที่เหมาะสมซึ่งเมื่อพลังงานมากขึ้นความหนาแน่นแห้งก็จะมากขึ้น
5. ก่อนที่จะถึงความชื้นเหมาะสม (OMC) พลังงานมีผลต่อค่า CBR ของดินแต่ในด้านเปียกที่มีความชื้นมากกว่าความชื้นเหมาะสม (OMC) นั้นพลังงานจะไม่มีผลต่อค่า CBR นั้นๆ
6. การบดอัดที่พลังงานต่างกันจะไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของเม็ดของดินที่มีขนาดเล็กหรือ ทรายหยาบที่มีความละเอียด แต่จะส่งผลกระทบต่อหินซึ่งจะมีการแตกตัวแล้วทำให้คุณสมบัติของหินนั้นเปลี่ยนไป
7. จากการทดสอบแล้ววิเคราะห์ได้ว่าสัดส่วนของความชื้น (m) กับ ความอิมตัวของน้ำ ($s^{0.5}$) ในพลังงานเดียวกันและดินชนิดเดียวกันจะได้ค่าเดียวกันหรือใกล้เคียงกันมาก เมื่อนำสัดส่วนของความชื้น (m) กับ ความอิมตัวของน้ำ ($s^{0.5}$) มาเทียบกับพลังงานอื่น โดยใช้สัดส่วนของความชื้น (m) กับ ความอิมตัวของน้ำ ($s^{0.5}$) ค่าหนึ่งเป็นมาตรฐานจะทำให้ค่าที่ได้สัดส่วนของดินทุกชนิดใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกันดังงานวิจัยของ อ.สุขสันต์ และอ.รุ่งลาวัลย์
8. อย่างไรก็ตามควรมีการทดลองเพิ่มเติมเพื่ออธิบายผลกระทบของพลังงานที่มีต่อการบดอัดและความแข็งแรงของดินเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ให้ความมั่นใจผลการทดลองมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

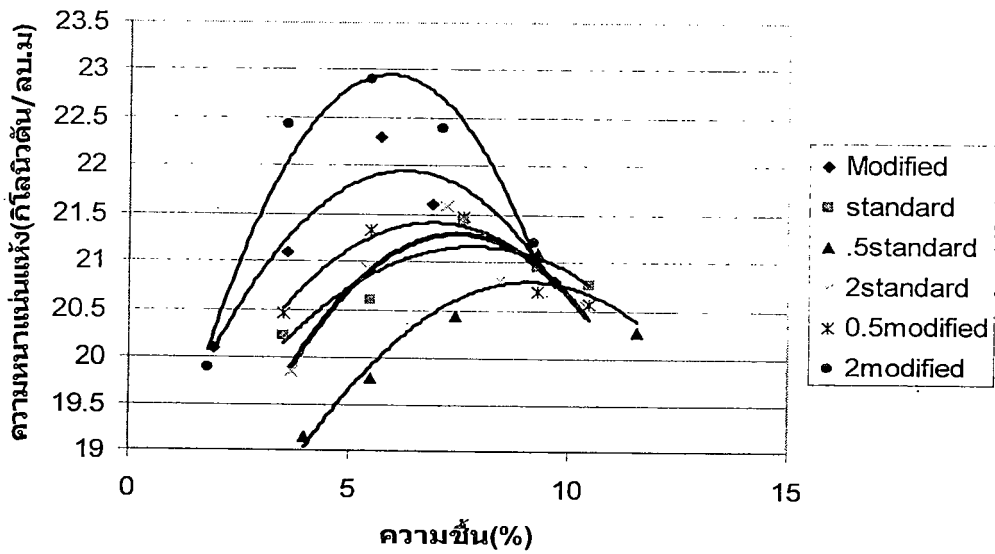
- มานะ อภิพัฒนมนตรี. วิศวกรรมปฐพีและฐานราก. พิมพ์ครั้งที่ 7. ดวงกมล. กรุงเทพฯ ; 2539”
- ชินะวัฒน์ มุกตพันธ์. ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 5. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น; 2542.
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. ปฐพีกลศาสตร์. ไลบรารี นาย. กรุงเทพฯ ; 2541”
- สันชัย อินทพิชัย และ พานิช วุฒิพฤษย์. ปฐพีกลศาสตร์ สกายบุ๊กส์ จำกัด. ปทุมธานี; 2547
- รุ่งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. “การทำนายกราฟการบดอัด” ,การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติครั้งที่10.ชลบุรี; 2548
- Al-Khafaji, A. N. (1993), “Estimation of soil compaction parameters by means of Atterberg limits”, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 26, pp. 359-368
- Blotz, L. R., Benson, C. H., and Boutwell, G. P. (1998), “Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 907-912
- Gurtug, Y. and Sridharan, A. (2002), “Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils”, *Geotechnique*, Vol. 52, No. 10, pp. 761-763
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Piyasaengthong, S. (2006), “Prediction of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test”, *Proc. of the 6th International Symposium on Soil/Ground Improvement and Geosynthetics*, Bangkok, Thailand, pp. 34-40
- Korfiatis, G. P. and Manikopoulos, C. N. (1982), “Correlation of maximum dry density and grain size”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 108, No. GT9, pp. 1171-1176
- Li, D. and Selig, E. T. (1994), “Resilient modulus for fine-grained subgrade soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 939-957
- Pandian, N. S., Nagaraj, T. S., and Manoj, M. (1997), “Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soils”, *Geotechnique*, Vol. 47, No. 2, pp. 363-366
- Sridharan, A. and Nagaraj, H. B. (2005), “Plastic limit and compaction characteristics of fine-grained soils”, *Ground Improvement*, Vol. 9, No. 1, pp. 17-22

ภาคผนวก ก

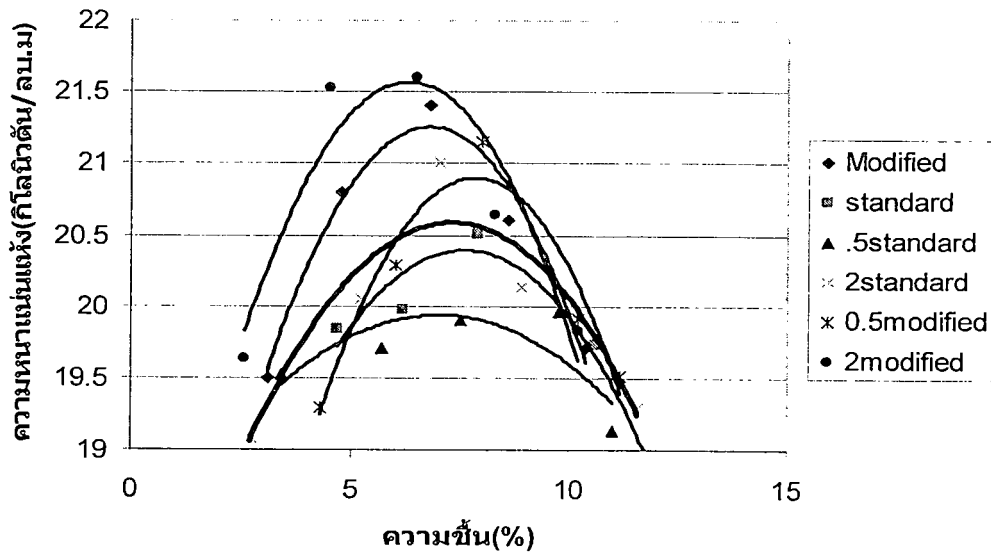
กราฟการบดอัด (Compaction) ของดินตัวอย่างที่ทำการเก็บข้อมูล



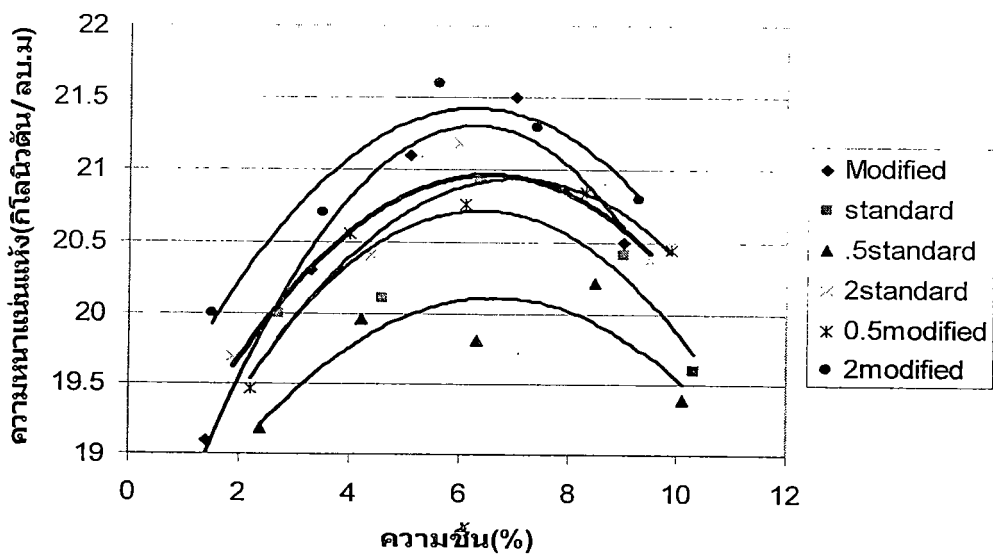
รูปที่ ก-1 กราฟการบดอัดของหินคลุกขลดดา



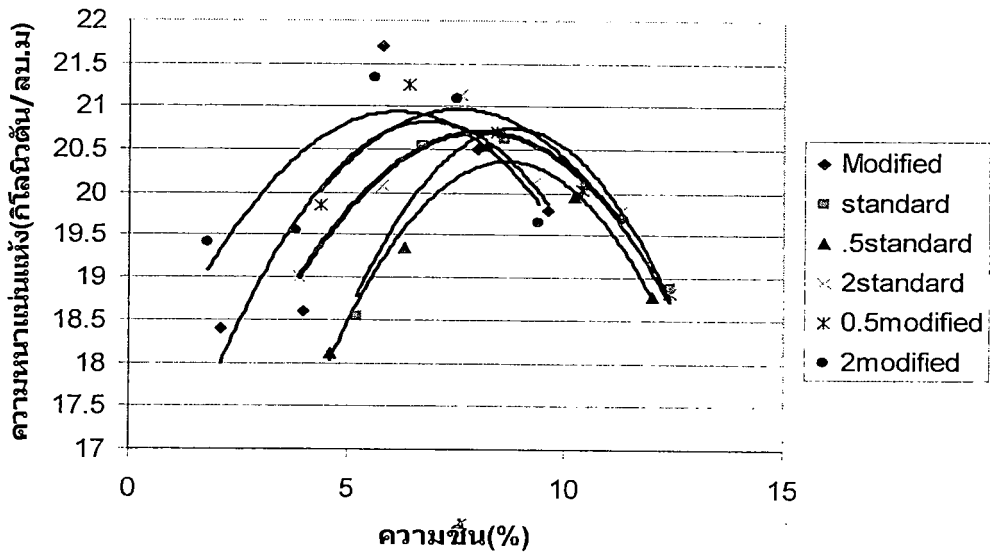
รูปที่ ก.2 กราฟการบดอัดของหินคลุกหนองน้ำเขียว



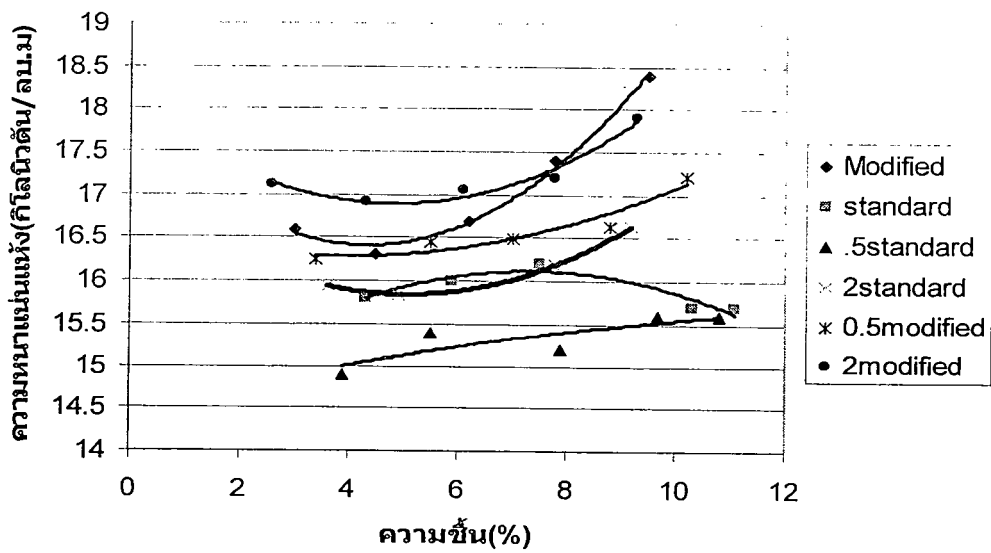
รูปที่ ก-3 กราฟการบดอัดของดินรอบอ่างเก็บน้ำบางพระ



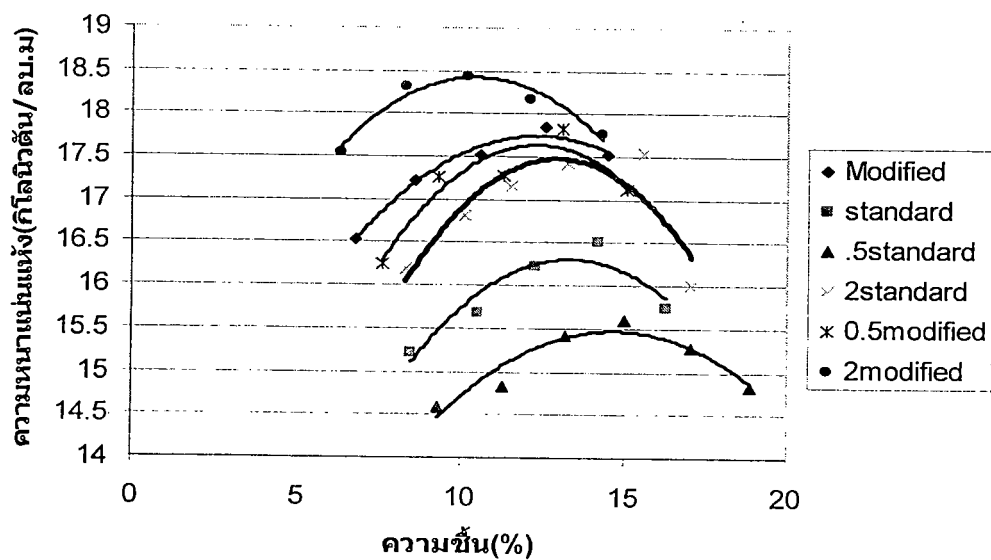
รูปที่ ก-4 กราฟการบดอัดของดินหมู่ 4 ต.บางพระ



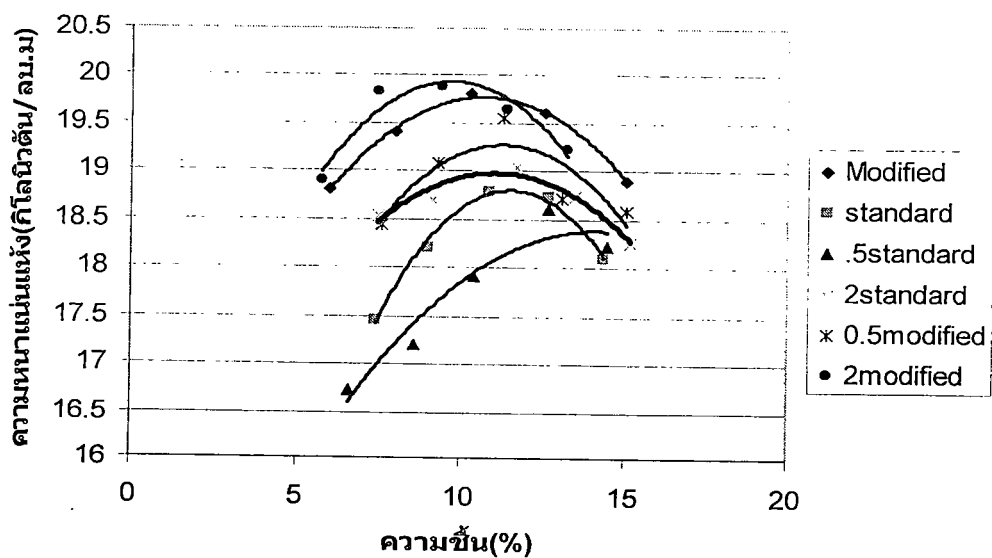
รูปที่ ก-5 กราฟการบดอัดของดิน ต.หนองขาม



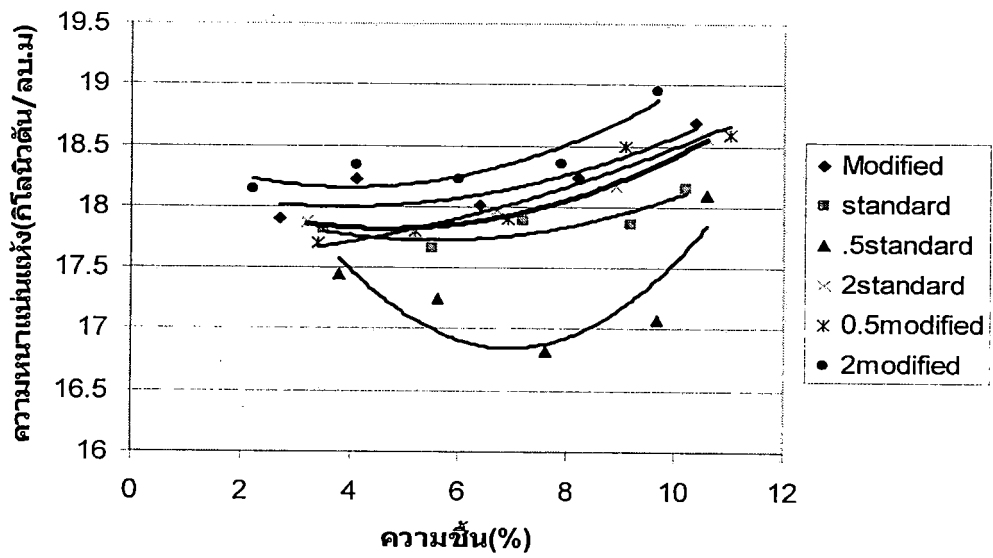
รูปที่ ก-6 กราฟการบดอัดของทรายหาดวอนนภา



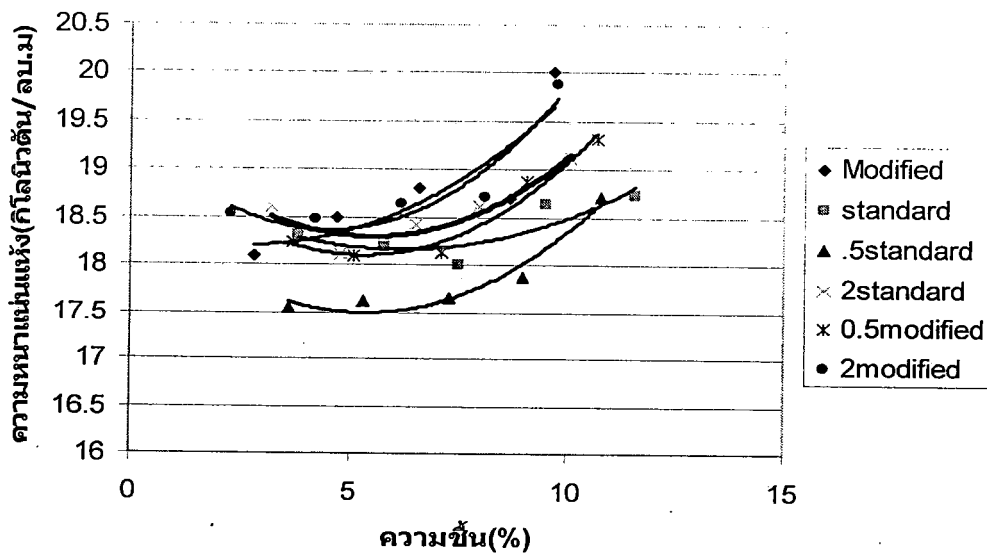
รูปที่ ก-7 กราฟการบดอัดของดินสุวรรณภูมิ



รูปที่ ก-8 กราฟการบดอัดของดินน่าน



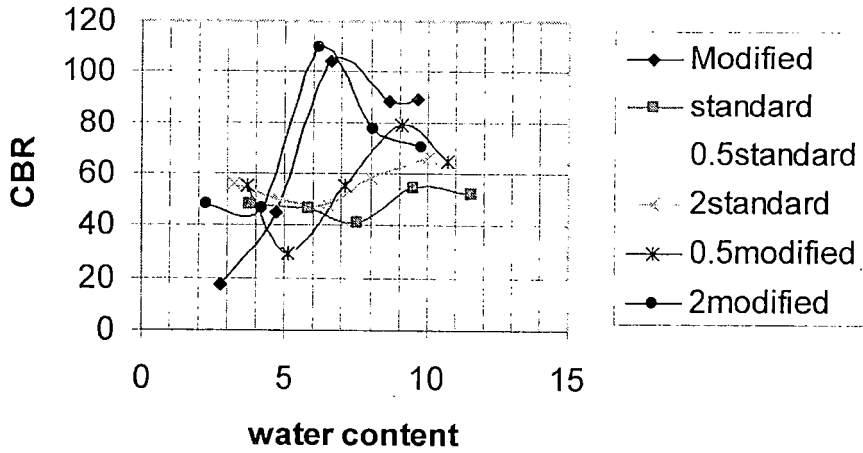
รูปที่ ก-9 กราฟการบดอัดของทรายระยอง



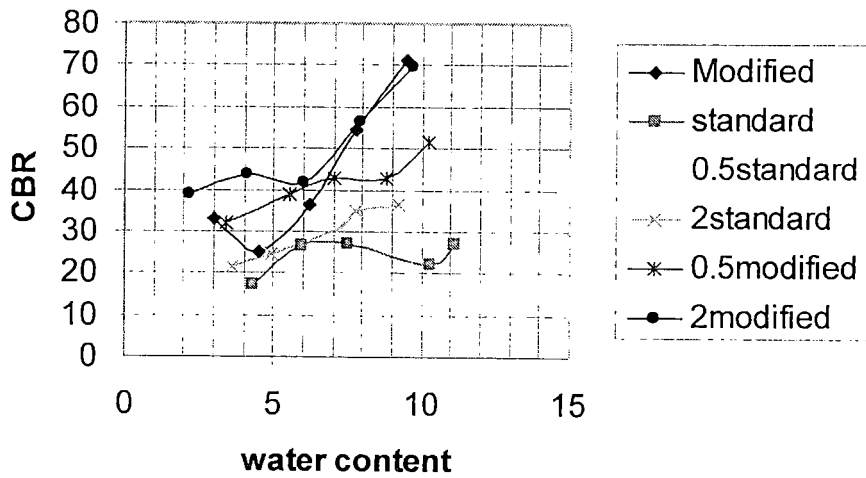
รูปที่ ก-10 กราฟการบดอัดของทรายข้างคณะ

ภาคผนวก ข

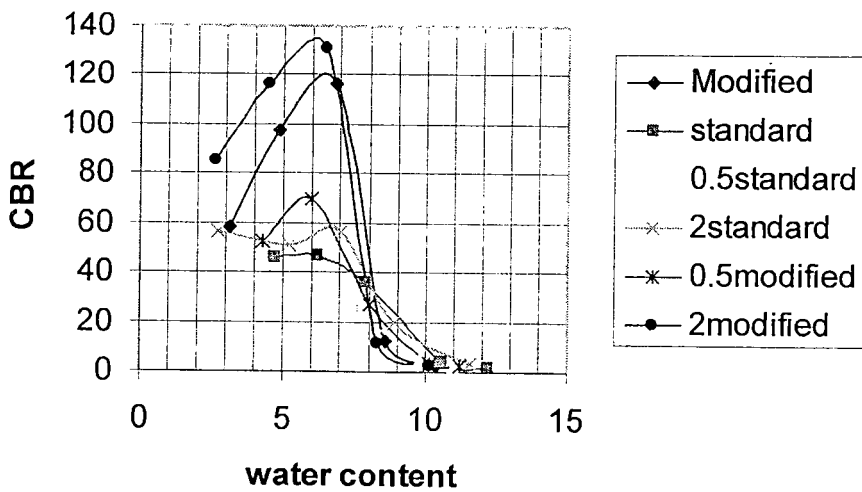
กราฟ CBR ของดินตัวอย่างที่ทำการเก็บข้อมูล



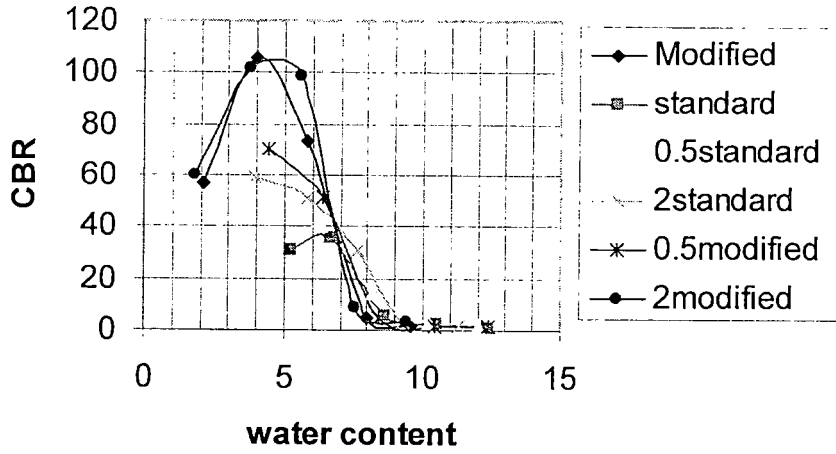
รูปที่ ข-1 กราฟ CBR ของทรายข้างคละ



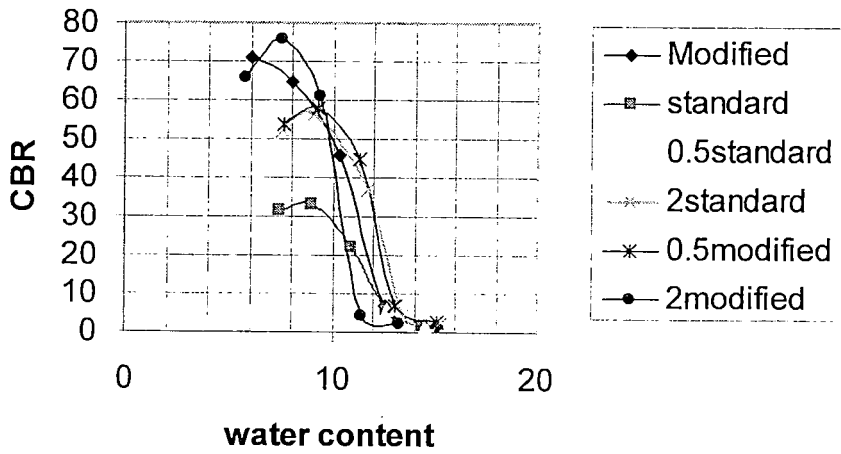
รูปที่ ข-2 กราฟ CBR ของทรายหาดวอนนภา



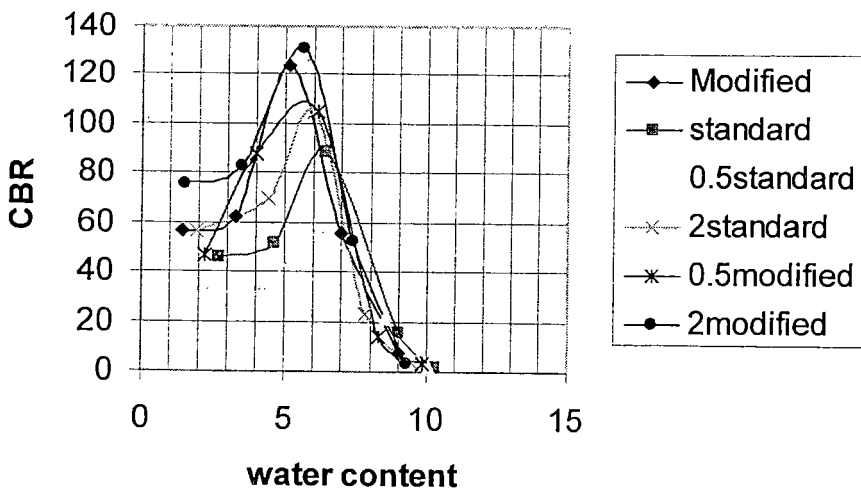
รูปที่ ข-3 กราฟ CBR ของดินรอบอ่างบางพระ



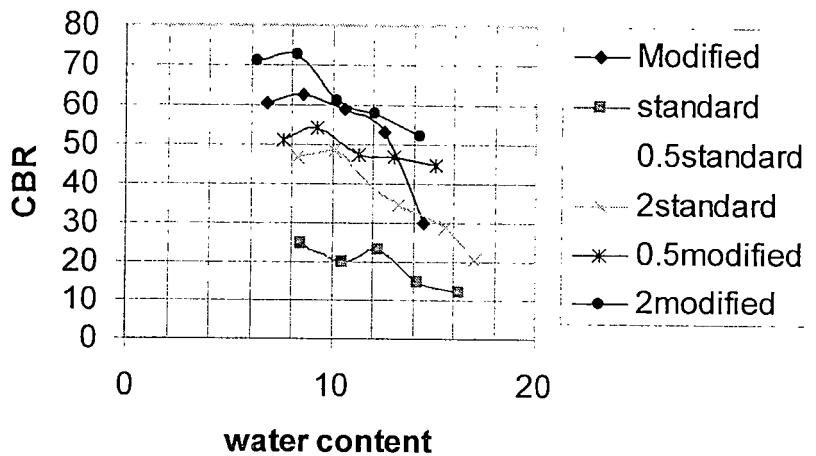
รูปที่ ข-4 กราฟ CBR ของทรายหนองขาม



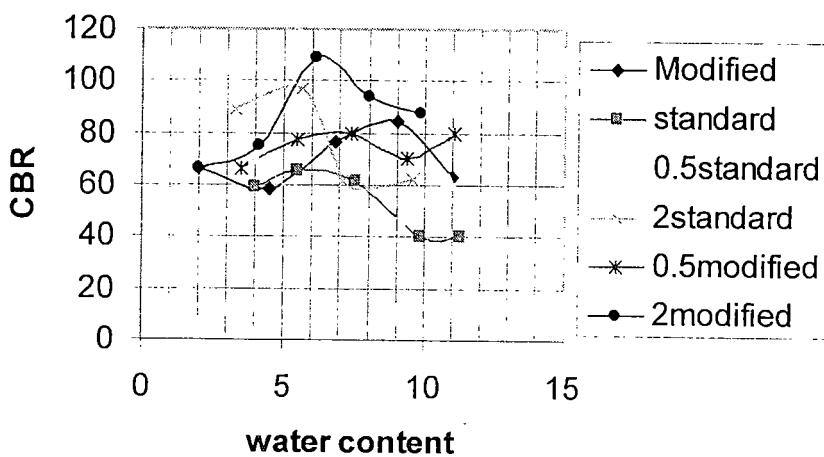
รูปที่ ข-5 กราฟ CBR ของดินน่าน



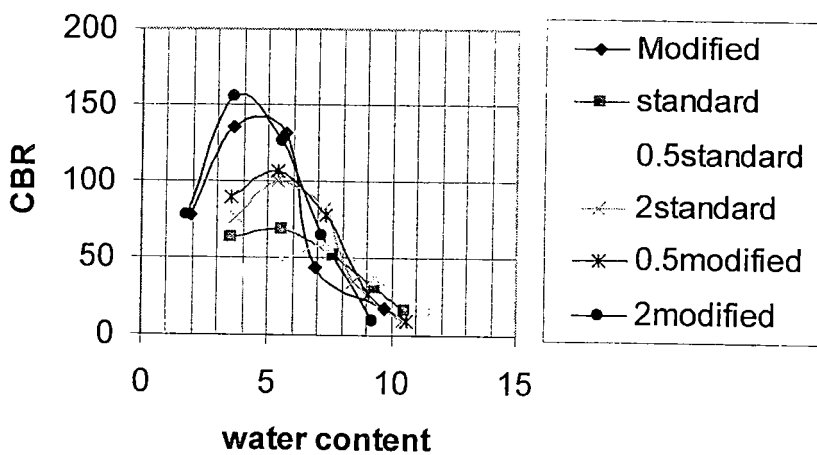
รูปที่ ข-6 กราฟ CBR ของดินหมู่ 4 ตำบลบางพระ



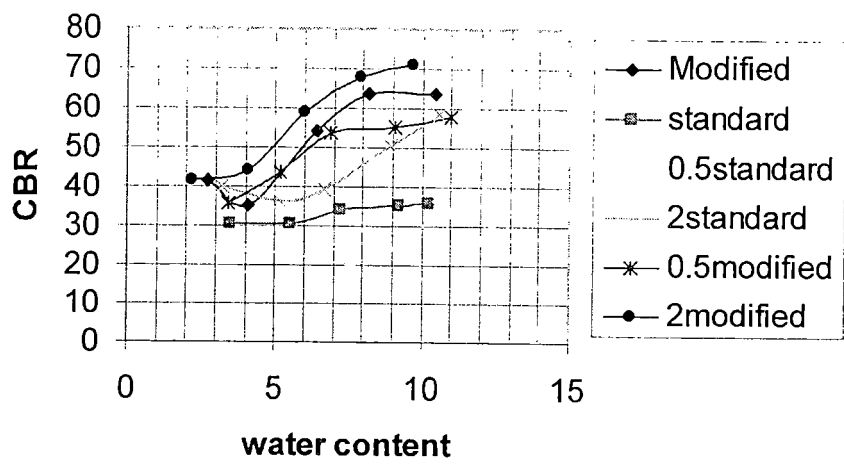
รูปที่ ข-7 กราฟ CBR ของดินสุวรรณภูมิ



รูปที่ ข-8 กราฟ CBR ของหินคลุกชลลดา



รูปที่ ข-9 กราฟ CBR ของดินหนองน้ำเขียว



รูปที่ ข-10 กราฟ CBR ของทรายระยอง