การลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นโดยใช้สารเคมี

นายนพดล กมลสินธุ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-03-0899-6
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REDUCTION OF SURFACE DISINTEGRATION OF COMPACTED LATERITE PAVEMENT BY CHEMICAL ADDITIVES

Mr. Noppadon Kamolsin

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0899-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นโดยใช้สารเคมี
โดย	นายนพดล กมลสินธุ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธนะเจริญกิจ)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

……กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นพดล กมลสินธุ์ : การลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นโดยใช้สารเคมี. (REDUCTION OF SURFACE DISINTEGRATION OF COMPACTED LATERITE PAVEMENT BY CHEMICAL ADDITIVES) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 60 หน้า. ISBN 974-03-0899-6.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพของ สารเคมีในการลดอัตราร้อยละ ของการหลุดร่อน ของพื้นผิว ดินลูกรังบดอัดแน่น สารเคมี ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยคือ น้ำ, โซเดียมคลอไรด์, แคลเซียมคลอไรด์, โพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชัน แผนการทดสอบ ประกอบไปด้วย (1) การทดสอบเบื้องต้นของพื้นผิวทาง อาทิเช่น การทดสอบการบดอัด, การทดสอบการรับน้ำหนัก และการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน (2) การทดสอบการรักษาปริมาณความชื้น (3) การทดสอบการหลุดร่อนของพื้นผิวดิน โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ตามข้อที่สอง และที่สาม เป็นเครื่องมือที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย

ผลการทดสอบแสดงโดย นำเอากรณีที่ไม่ได้ใช้สารเคมีกับผิวดิน เป็นผลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ โดยพบว่าสารเคมีที่ใช้ทุกชนิด มีผลให้ดินมีความสามารถในการรักษาความชื้นเพิ่มขึ้น และมีผลในการลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินอันเนื่องมาจากการวิ่งผ่านของล้อรถ โดยมีผลต่างกันเพียงเล็กน้อยในแต่ละสารเคมีที่ใช้

โดยการใช้โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ อาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะสารทั้งสองสามารถละลายน้ำได้ อาจเจือปนลงสู่แหล่งน้ำข้างเคียงถ้ามีการใช้งานในปริมาณมากพอ, โดยการใช้น้ำ ไม่สามารถตอบสนองความต้องการทางด้านวิศวกรรม เพราะมีค่าประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อนที่ต่ำ และยังต้องมีการราดอยู่บ่อยๆ, โดยการใช้โพลิเมอร์อิมัลชัน จะมีราคาค่าวัสดุที่แพงมาก ดังนั้นการเลือกใช้ แอสฟัลต์อิมัลชัน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม ในการใช้ลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดิน เพราะ การใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน มีประสิทธิภาพที่สูงในการลดการหลุดร่อน, ค่าวัสดุต่ำ และในการใช้งาน ก็ไม่สามารถละลายได้โดยน้ำ ซึ่งอาจทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม น้อยมาก

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2544

4370345421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: REDUCTION / SURFACE DISINTEGRATION / COMPACTED LATERITE PAVEMENT

NOPPADON KAMOLSIN: THESIS TITLE. REDUCTION OF SURFACE DISINTEGRATION OF COMPACTED LATERITE PAVEMENT BY CHEMICAL ADDITIVES. THESIS ADVISOR:ASST.PROF.DR.SUPOT TEACHAVORASINSKUN, 60 pp. ISBN 974-03-0899-6.

The objective of this research is to study the efficiency of chemical additives as to reduce percentage of surface disintegration of compacted laterite pavement. The additives used in the study are water, sodium chloride, calcium chloride, polymer emulsion and asphalt emulsion. The test program composes of (1) the basic engineering testing for pavement; e.g. compaction, CBR and other physical properties determination test, (2) the moisture holding capacity test and (3) the surface disintegration test, respectively. The equipment for the second and third tests is specially manufactured by the study.

Test results are presented by adopting the case when none of the application being the controlled result. It is found that all additives used in the study can effectively increase the moisture holding capacity of the mixture and effectively decrease the amount of soil disintegrated during wheel passing. There are slight different in the absolute degree of effectiveness among additives.

The application of sodium chloride and calcium chloride may have an environmental impact, because both substances are dissolvable. They may contaminate the nearly water resource if considerable amount is employed. The application of water alone is unreasonable by engineering aspect, because its low efficiency in reducing surface disintegration and it requires frequent spraying. The polymer emulsion is a very expensive material. Therefore asphalt emulsion is the most suitable to use to reduce surface disintegration. Because the asphalt emulsion has a highest efficiency, low material cost. Furthermore, it is not dissolvable by water which may have less impact to the environment.

Department Civil Engineering Student's signature .....

Field of study Civil Engineering Advisor's signature .....

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ ต้องขอแสดงความขอบคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล ในฐานะ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และให้คำปรึกษา ในปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นอย่างมากมาย ในการปฏิบัติงาน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ข้อคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

บิดา-มารดา และครอบครัว สำหรับ แรงกาย แรงใจ และทุนทรัพย์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ ผู้จัดทำขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

นพดล กมลสินธุ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูป..... ฏ
บทที่
1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
2.1 การใช้ดินลูกรังมาบดอัด เป็นพื้นผิวที่ใช้ในงานวิศวกรรม..... 4
2.1.1 การบดอัดดิน..... 4
2.1.2 ผลของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน..... 6
2.1.3 ผลของสัดส่วนดินเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดที่มีต่อคุณสมบัติของดิน หลังการบดอัด..... 7
2.1.4 พฤติกรรมของดิน-น้ำ..... 7
2.2 พฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักจากการใช้งาน..... 9
2.3 ลักษณะความเสียหายของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นหลังการใช้งาน..... 10
2.4 วิธีการลดการหลุดร่อนจากพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ..... 11
2.4.1 การควบคุมปริมาณของการใช้งาน..... 11
2.4.2 การใช้วัสดุปูผิวทาง..... 11
2.4.3 การปรับสภาพพื้นผิวดิน..... 11
2.4.3.1 การปรับสภาพพื้นผิวดินโดยวิธีการราดน้ำ..... 12
2.4.3.2 การปรับสภาพพื้นผิวดินโดยวิธีการการราดสารเคมี..... 12
2.5 กลไกในการช่วยลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดิน ของสารเคมีแต่ละชนิด..... 12
2.5.1 สารจำพวกเกลือ..... 12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1.1 แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)…….. 13

2.5.1.2 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)……..… 15

2.5.2 โพลิเมอร์อิมัลชัน (Polymer emulsion)…… 16

2.5.3 แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt emulsion)……. 17

2.5.4 สารอื่นๆ…….. 18

3 วิธีดำเนินการวิจัย……..... 19

3.1 การศึกษาวิจัย…….. 19

3.2 ชนิดของสารเคมีที่เลือกใช้ในการทดสอบ…….. 19

3.2.1 สารจำพวกเกลือ…… 19

3.2.2 สารโพลิเมอร์อิมัลชัน…….. 20

3.3.3 สารแอสฟัลต์อิมัลชัน……... 21

3.3 ดินที่ใช้ในการทดสอบ…… 22

3.3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ…….. 22

3.4 การศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเคมีที่มีผลต่อประสิทธิภาพในด้านต่างๆ…… 24

3.4.1 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมสารเคมี……..... 25

3.4.1.1 การทดสอบการบดอัด……..…….. 25

3.1.4.2 การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR)…..……. 26

3.4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี 26

3.4.3 การศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง……. 28

3.5 การศึกษาต้นทุนต้นในการดำเนินงานราดสารเคมีที่ผิวดิน……. 31

4 ผลการวิจัย และสรุปผลการทดลอง…… 33

4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมสารเคมี... 33

4.1.1 การทดสอบการบดอัด…… 33

4.1.2 การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR)…… 36

4.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี…… 40

4.3 ผลการศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง…… 45

4.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการลดการหลุดร่อน โดยใช้สารเคมีราดที่พื้นผิวดิน……. 50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ..... 52
5.1 สรุปผลการศึกษา..... 52
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 53
รายการอ้างอิง..... 55
ภาคผนวก..... 57
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 วิธีการลดการหลุดร่อนจากพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ..... 10
3.1 ลักษณะสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)..... 20
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของ Primal AC-261..... 21
3.3 ลักษณะสมบัติของสาร CSS-1..... 22
3.4 ลักษณะสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ..... 23
3.5 แผนการทดสอบการบดอัดดิน..... 25
3.6 แผนการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก (California Bearing Ratio)..... 26
3.7 แผนการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี..... 28
3.8 แผนการทดสอบ การศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง..... 30
3.6 แผนการศึกษาการหาต้นทุน..... 32
4.1 ผลการทดสอบการบดอัดส่วนผสม ดินกับสารเคมี..... 35
4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) สภาพแช่น้ำของส่วนผสม ดินกับสารเคมี..... 36
4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินตามระยะเวลาภายหลังการราดสารเคมี..... 40
4.4 สัดส่วนของปริมาณความชื้นของดิน ที่เหลืออยู่ภายหลังการราดสารเคมี..... 40
4.5 ปริมาณดินที่หลุดร่อนสะสมจากผิวทางขณะทำการทดสอบ..... 45
4.6 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณดินที่หลุดร่อนจากผิวทางภายหลังการราดสารเคมี..... 46
4.7 การเปรียบเทียบการประเมินค่าใช้จ่ายในการลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ของแต่ละสารเคมี..... 50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป **หน้า**

2.1 ผลที่ได้จากการบดอัดดิน (Das, 1994)..... 5

2.2 ผลกระทบ ของสารเคมีที่นำมาปรับสภาพดินต่อคุณสมบัติการบดอัดดิน (Ingles, 1972)..... 6

2.3 ผลของความชื้นขณะบดอัดที่มีผลต่อโครงสร้างดิน..... 6

2.4 ลักษณะทางกายภาพดินเม็ดหยาบและละเอียด ในดิน (Yoder, 1959)..... 7

2.5 (ก) Hydrogen bonding, (ข) Attraction by osmosis (Mitchell, 1993)..... 8

2.6 ลักษณะของน้ำที่อยู่ในมวลดิน (Hewes, 1966)..... 8

2.7 Prandtl's System for a c-ϕ Soil (Jumikis, 1962)..... 9

2.8 แสดงการราดแคลเซียมคลอไรด์ ลงบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง (Bruge, 1950)..... 14

2.9 กราฟการทดสอบการบดอัดดิน ของดินเหนียวปนกรวด โดยมีและไม่มี $CaCl_2$ ในดิน (Courtesy Pacific Chemical Industries Pty.Ltd.,1983.)..... 14

2.10 ความชื้นที่สูญเสียไป จากพื้นผิวดินเหนียวปนทราย (Burggraf, 1933)..... 15

2.11 แสดงการราด แอสฟัลต์ ลงบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง (Bruge, 1950)..... 18

3.1 ดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ..... 23

3.2 การกระจายขนาดคละของเม็ดดินที่นำมาใช้ในการวิจัย..... 24

3.3 การติดตั้งและจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี..... 27

3.4 ส่วนประกอบของเครื่องมือ ทดสอบการหลุดร่อน ภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง..... 30

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการหลุดร่อน ภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง..... 31

4.1 Compaction curves ของดินลูกรังผสม โซเดียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมน้ำ... 34

4.2 Compaction curves ของดินลูกรังผสม แคลเซียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมน้ำ.. 34

4.3 Compaction curves ของดินลูกรังผสม โพลิเมอร์ เปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมน้ำ..... 35

4.4 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมของดินกับสารเคมี..... 36

4.5 ความสัมพันธ์ ของหน่วยแรงและการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรังผสมน้ำ..... 37

4.6 ความสัมพันธ์ ของหน่วยแรงและการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรังผสมโซเดียมคลอไรด์..... 37

4.7 ความสัมพันธ์ ของหน่วยแรงและการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคลอไรด์..... 38

4.8 ความสัมพันธ์ ของหน่วยแรงและการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรังผสมโพลิเมอร์..... 38

4.9 ค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) แบบแช่น้ำเปรียบเทียบส่วนผสมของดินกับสารเคมีชนิดต่างๆ... 39

สารบัญรูป

รูป **หน้า**

4.10 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลาหลังการราดสารโซเดียมคลอไรด์..... 41
4.11 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลาหลังการราดสารแคลเซียมคลอไรด์..... 42
4.12 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลาหลังการราดสารโพลิเมอร์..... 42
4.13 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลาหลังการราดสารแอสฟัลต์อิมัลชัน..... 43
4.14 สัดส่วนของปริมาณความชื้นของดินที่คงเหลืออยู่ภายหลังการราดสารเคมี 21 วัน..... 45
4.15 ประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อนของสารเคมีแต่ละชนิด (%)..... 43
4.16 ปริมาณดินแห้งที่หลุดร่อนสะสม (กรัม) ตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบ..... 47
4.17 ขั้นตอนการทดสอบในการราดผิวหน้าดินด้วยสารแอสฟัลต์อิมัลชัน..... 49
5.1 การทดสอบการหลุดร่อนโดยใช้ยางพาราผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน..... 54

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น เป็นพื้นผิวที่นำมาใช้งานในทางวิศวกรรม ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพื้นผิวที่มีราคาถูก วัสดุหาได้ง่าย และการก่อสร้างไม่ยุ่งยากนัก การใช้งานพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ของประเทศไทยในอดีต อาจใช้เป็นถนนสายหลัก แต่ในปัจจุบันประเทศได้มีการพัฒนาไปมาก ทางสายหลักของประเทศ ก็พัฒนาเปลี่ยนแปลงพื้นผิวทาง เป็นวัสดุที่ดีขึ้น ทนทานมากขึ้น และพื้นผิวเรียบ ใช้งานได้สะดวกขึ้น เช่น คอนกรีตเสริมเหล็ก หรือ แอสฟัลต์ติกคอนกรีต การใช้งานพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ในปัจจุบันจึงเหลือการใช้งานอยู่ในงานที่เป็นงานชั่วคราว, พื้นผิวที่มีการใช้งานไม่มากนัก เช่น ถนนในหมู่บ้าน, ถนนส่วนบุคคลในไร่-สวน, ถนนในโรงงาน, ลานจอดรถ, บริเวณสถานที่ก่อสร้างชั่วคราวหรือเป็นทางหลวงชนบท (มาตรฐานกรมทางหลวง เป็นทางชั้น 5 จะต้องมีปริมาณการจราจรน้อยกว่า 300 คัน/วัน ใน 7 ปี และมากกว่า 300 คัน/วัน ใน 15 ปี) การลงทุนสูงๆ เพื่อทำให้พื้นผิวในงานดังกล่าว มีความคงทนถาวร จึงยังไม่ใช่สิ่งที่จำเป็น ในปัจจุบันคาดว่ามีถนนที่เป็นพื้นผิวดินลูกรังบดอัด อีกประมาณกว่า 20,000 กิโลเมตรทั่วประเทศไทย

อย่างไรก็ตาม การใช้งานพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น แม้จะมีจุดประสงค์เพื่อรองรับการใช้งานที่ไม่หนักมาก และการใช้งานในระยะสั้น อาจจะ 1-2 ปีเป็นการชั่วคราว ถนนดินลูกรังหรือพื้นผิวดินลูกรังดังกล่าว ก็สามารถเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องมาจาก ผลของการจราจร, การใช้งานและสภาพอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาพอากาศในประเทศไทย คือ มีฝนตกหนัก ซึ่งสามารถชะหน้าดิน หรือทำให้น้ำท่วมที่ผิวดินได้ เป็นผลให้ความชื้นในดินสูงเกินไป รวมทั้งการมีแดดออกในวันส่วนใหญ่ ทำให้ผิวหน้าดินสูญเสียความชื้นได้ง่าย ทั้งปัจจัยจากธรรมชาติ และจากการใช้งาน ทำให้พื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น มีอายุการใช้งานที่สั้นลง เนื่องจาก เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดิน, ความสามารถในการรับน้ำหนักที่ลดลง, และเกิดการหลุดร่อนของพื้นผิวดิน จนเป็นหลุมเป็นบ่อ และพื้นผิวเกิดการสึกกร่อน ทำให้ต้องมีการบำรุงรักษากันเป็นประจำทุกปี

การเสื่อมสภาพ และการหลุดร่อน ของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น เป็นผลให้การใช้งานพื้นผิวดังกล่าว ไม่สะดวก ยานพาหนะที่มาวิ่งบนพื้นผิวทางมีอายุการใช้งานที่สั้นลง การเดินทางต้องใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไม่สามารถทำความเร็วได้ดังเดิม และจากเม็ดดินที่หลุดร่อนออกมา ในส่วนที่มีขนาดเล็กที่สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้ จะกลายเป็นฝุ่นละออง ฟุ้งกระจายเนื่องมาจากการจราจร ทำให้บดบังการมองเห็นในขณะขับขี่ยานพาหนะ รวมทั้งสร้างความเดือด

ร้อนรำคาญแก่ผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณพื้นผิวดินดังกล่าว จากคราบฝุ่นที่ติดตาม เสื้อผ้า, อาคารบ้านเรือน และปัญหาสุขภาพที่จะตามมา

ในการศึกษาวิจัยนี้ ใช้วิธีการลดการเสื่อมสภาพ และลดการหลุดร่อน ของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ที่สามารถทำได้ง่าย, รวดเร็ว และใช้งบประมาณที่ไม่สูงมาก เช่นการปรับสภาพพื้นผิว โดยราดสารเคมีลงไปที่ผิวดิน สารเคมีที่สามารถนำมาใช้ในการลดการหลุดร่อนได้มีอยู่หลายชนิด โดยมีคุณสมบัติ และผลกระทบแตกต่างกันออกไป ตามกลไกที่กระทำกับเม็ดดิน, ปริมาณของสารเคมี และคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารนั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในด้านต่างๆคือ การลดการหลุดร่อน, การควบคุมความชื้น และการรับแรงเฉือน ของพื้นดินลูกรังบดอัดแน่น เปรียบเทียบระหว่าง พื้นดินลูกรังบดอัดแน่น ที่ยังไม่ได้ปรับสภาพ กับพื้นดินลูกรังบดอัดแน่นที่มีการปรับสภาพ โดยการราดหรือผสมด้วยสารเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสม ของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพดินลูกรังบดอัดแน่น เพื่อให้เกิดผลทางด้านความคงทน และลดการหลุดร่อน

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการลดการหลุดร่อนบนพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ จะทำการศึกษาผลกระทบ ของการใช้สารเคมี ที่มีต่อพื้นผิวที่ทำมาจาก ดินลูกรังในประเทศไทย โดยจะนำดินลูกรัง มาบดอัดแน่นด้วยความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งหามาจากการทดสอบการบดอัด ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 1557: Modified Proctor Compaction โดยในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1.3.1 ทำการทดสอบหา ประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อน ของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ในห้องปฏิบัติการ โดยการใช้สารเคมีราดที่ผิวดิน เปรียบเทียบกับการไม่ใช้สารเคมี ด้วยเครื่องมือที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นมาในการทดสอบ โดยจำลองสภาพการใช้งานจริง และวัดปริมาณการหลุดร่อนตามระยะเวลา

1.3.2 ทำการทดสอบหา ความสามารถในการควบคุมความชื้น ของสารเคมีแต่ละชนิดที่ราดลงที่ผิวหน้าดินลูกรังบดอัดแน่น ในห้องปฏิบัติการ ด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดย

จำลองสภาวะแวดล้อมขึ้นมา ให้คล้ายสภาพจริง แต่สามารถควบคุมได้ และวัดปริมาณความชื้นที่คงเหลืออยู่ตามระยะเวลา

1.3.3 ทำการทดสอบหา ผลกระทบของการใช้สารเคมี ในการลดการหลุดร่อน ต่อกำลังรับน้ำหนักของดิน โดยการทดสอบ CBR ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 1833

1.3.4 ทำการหาต้นทุนในการใช้สารเคมีแต่ละชนิด ที่ใช้ในการทดสอบการลดการหลุดร่อน โดยศึกษาจากต้นทุนที่เกิดขึ้น ในการปฏิบัติงานจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาวิจัยตามขั้นตอนและวิธีการทดสอบ ผลที่ได้จากการทดสอบจะนำเสนอเป็นกราฟ เปรียบเทียบ ระหว่างประสิทธิภาพในด้านต่างๆ กับ ชนิดของสารเคมีและน้ำ แจกแจงตามความเข้มข้นและปริมาณที่ใช้ นำมาพิจารณาว่าสารใดมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการลดการหลุดร่อนบนพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นหรือบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง โดยเฉพาะการนำมาใช้ในประเทศไทยจะพิจารณาถึงความยากง่ายในการสรรหาสารเคมีดังกล่าวรวมถึงราคาที่จำหน่ายอยู่ในประเทศ และคาดหวังผลที่ได้จากการพิจารณาความเหมาะสมของแต่ละสารเคมี ดังนี้

1.4.1 เป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการกำหนดมาตรฐานของการปรับสภาพผิวดินลูกรังบดอัด เพื่อประโยชน์ในด้านการลดการหลุดร่อนของผิวดิน ที่จะเกิดขึ้นขณะการใช้งานพื้นผิวดินดังกล่าว

1.4.2 พื้นผิวดินลูกรังดังกล่าว อาจหมายถึง ถนน, ไหล่ทางของถนน, สนามกีฬา ลานจอดรถ, สถานที่ก่อสร้างชั่วคราว เราสามารถนำชนิดของสารเคมี และปริมาณที่เหมาะสม มาใช้ได้ในหลายสถานที่ โดยใช้ต้นทุนที่ไม่มากแต่มีประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อน การรักษาความชื้นซึ่งนำมาซึ่งการเกิดฝุ่น และการรับน้ำหนักที่ดี

1.4.3 ลดความถี่ในการบูรณะและซ่อมแซมโดยในพื้นผิวดินที่ปรับสภาพแล้วจะมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นทำให้มีการบูรณะและซ่อมแซมน้อยลง โดยในการบูรณะและซ่อมแซมแต่ละครั้งก็ทำการปรับเกลี่ยผิวดิน บดอัด และราดสารเคมีใหม่

1.4.4 เป็นแนวทางให้มีการนำสารเคมีที่มีการผลิตในประเทศมาใช้ในรูปแบบอื่นๆ เช่นการนำ โพลิเมอร์ มาใช้ในการลดการหลุดร่อนของผิว จึงเป็นแนวทางพัฒนาสารเคมีให้มีราคาต่ำลง

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การใช้ดินลูกรังมาบดอัด เป็นพื้นผิวที่ใช้ในงานวิศวกรรม

ดินที่ใช้ในการวิจัยเป็นดินลูกรัง (Laterite) คือดินที่ ผุสลายอยู่กับที่ผสานกันด้วยความชื้น และจะมีขนาดเม็ดดินคละกันไปทุกขนาด เมื่อนำมาใช้ในงานวิศวกรรมจะนำมาบดอัดให้แน่น เพื่อการรับน้ำหนักที่ดีขึ้น โดยมีลักษณะเป็นพื้นผิวแบบหยุ่นตัว (Flexible Pavement) และเมื่อมีการใช้งานพื้นผิวดิน ในรูปแบบต่างๆ เช่น ถนน, ไหล่ทาง, ลานขนถ่ายวัสดุฯ จะทำให้ผิวดินเกิดการเสียรูป, การหลุดร่อนและเกิดฝุ่นละอองขึ้น รวมทั้งดินสูญเสียความชื้นไปเนื่องจากสภาพอากาศ

2.1.1 การบดอัดดิน

ในการนำดินลูกรังมาก่อสร้างถนนหรือพื้นผิวต่างๆ ดินลูกรังที่นำมาใช้จะอยู่ในสภาพหลวม ในการก่อสร้างต้องทำการบดอัดเพื่อเพิ่มหน่วยน้ำหนัก การบดอัดดินมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่ม กำลังรับน้ำหนักของดิน ลดการทรุดตัวการเคลื่อนตัว และลดการซึมผ่านของน้ำ

การบดอัดดินสามารถทำให้ดินแน่นขึ้นได้ด้วยการไล่อากาศออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยพลังงานกล โดยความแน่นวัดออกมาในรูปของ หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight) ในการบดอัดดินจะใช้น้ำเติมเข้าไปในดินแล้วทำการบดอัด น้ำจะเป็นตัวช่วยในการบดอัดดิน เป็นสารหล่อลื่นให้เม็ดดินเคลื่อนตัวไปสู่ช่องว่างแทนที่ช่องว่างอากาศ หน่วยน้ำหนักแห้งของดินหลังการบดอัดจะเพิ่มขึ้น ตามความชื้นของดินที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่2.1 ดินที่ไม่มีความชื้น (moisture content w = 0) ค่าความหนาแน่นเปียก (γ) เท่ากับค่าความหนาแน่นแห้ง (γ_d)

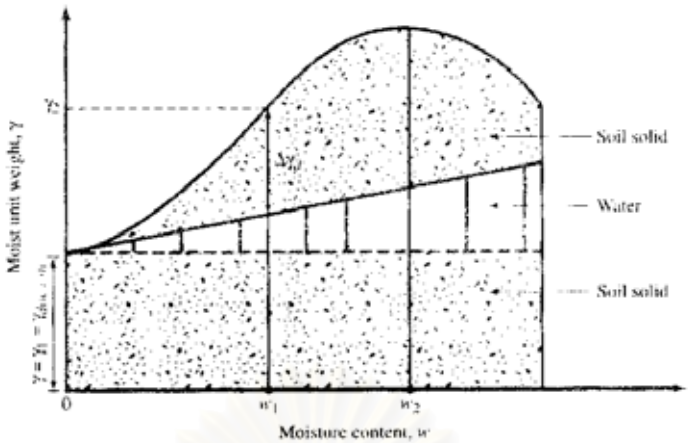
$$\gamma = \gamma_{d\,(w=0)} = \gamma_1$$

เมื่อความชื้นในการบดอัดเพิ่มขึ้น และพลังงานที่ใช้ในการบดอัดยังคงใช้เท่าเดิม หน่วยน้ำหนักแห้ง ของดินหลังการบดอัด จะเพิ่มขึ้นตาม เช่น จาก รูปที่2.1 ความชื้นในการบดอัด $w = w_1$, ค่าความหนาแน่นเปียก (γ) เท่ากับ

$$\gamma = \gamma_2$$

ส่วนค่าความหนาแน่นแห้ง หาได้จาก

$$\gamma_{d\,(w=w1)} = \gamma_{d\,(w=0)} + \Delta\gamma_d \quad \text{โดยที่} \quad \gamma_d = \gamma/(1+w)$$



รูปที่2.1 ผลที่ได้จากการบดอัดดิน (Das, 1994)

จนกระทั่ง ความชื้นของดิน $w = w_2$ การเพิ่มความชื้นให้มากกว่านี้ จะมีแนวโน้มไปลดค่าความหนาแน่นแห้งของดินหลังการบดอัด เพราะว่าน้ำที่เพิ่มเข้าไปจะเข้าไปแทนที่เม็ดดิน ทำให้เม็ดดินอยู่ห่างกันมากขึ้นดินจึงมีความแน่นลดลง

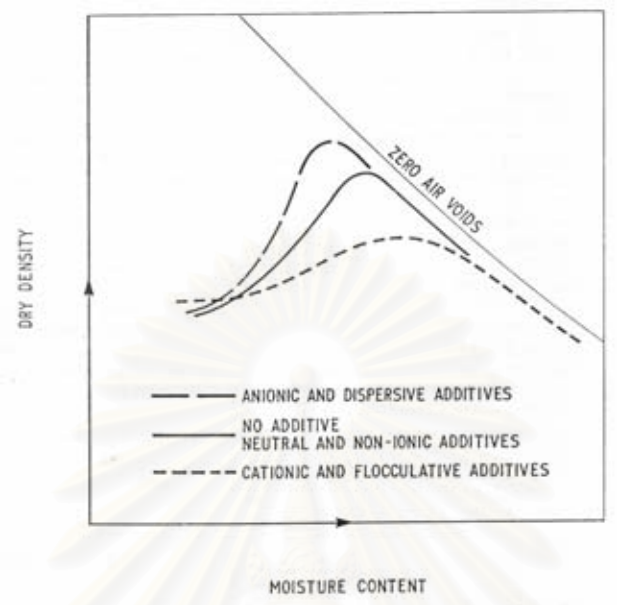
ในการปฏิบัติการในห้องทดสอบ จะทำการทดสอบการบดอัด เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งเป็นความชื้นที่จุดดังกล่าว โดยในการก่อสร้างถนนหรือพื้นผิวที่ใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆ พลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน จะเป็นการใช้พลังงานที่สูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor)

ในการปรับปรุงดิน เพื่อให้ดินที่บดอัดมีคุณสมบัติต่างๆตามที่ต้องการ โดยการนำสารเคมีที่เป็นสารละลาย มาผสมกับดินแล้วทำการบดอัด ก็จะให้ผลของความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่าความหนาแน่นแห้ง กับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่เป็นลักษณะเดียวกัน กับการใช้น้ำ แต่จะมีผลกระทบต่อการบดอัดดินที่แตกต่างออกไปตามคุณสมบัติของสารเคมีชนิดนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือผลกระทบทางเคมี เนื่องจากสารเคมีแต่ละชนิดจะมีประจุที่แตกต่างกันคือ แคตไอออนนิค, นอนไอออนนิค และแอนไอออนนิค หรือสารเคมีที่ทำให้ดินมีแนวโน้มในการเปลี่ยนโครงสร้าง หลังการผสมกับสารเคมี เป็น Disperse หรือ Flocculate ได้ง่ายหรือยากกว่ากัน

โดยจะมีผลต่อ ค่าความหนาแน่นแห้ง กับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือผลกระทบของ สารเคมีจำพวกแคตไอออนนิค, นอนไอออนนิค, แอนไอออนนิค และผลของสารเคมีที่มีต่อโครงสร้างดิน ต่อคุณสมบัติการบดอัดดิน โดยการใช้พลังงานในการบดอัดดินที่เท่ากัน

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าสารที่ทำให้ดินมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบขึ้น (Disperse) คือสารที่ให้ประจุลบ (Anionic) เพราะเป็นประจุเดียวกันกับผิวหน้าดินจึงทำให้ดินเรียงตัวขนานกันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินลดลง จึงสามารถบดอัดดินให้แน่นได้ง่ายขึ้น และ

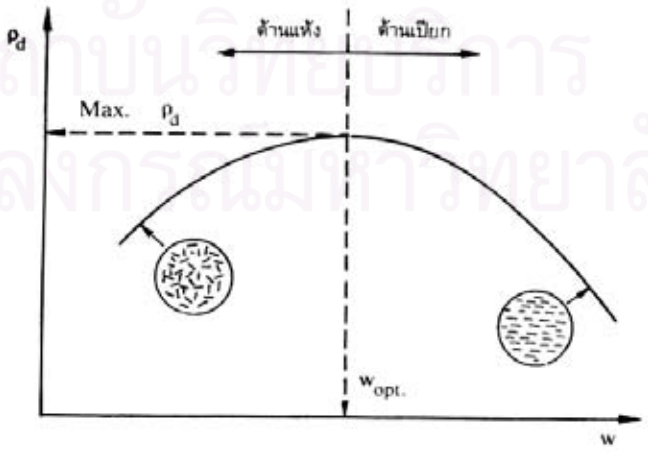
ใช้ปริมาณความชื้นที่น้อยลง ส่วนในทางกลับกันโครงสร้างดินแบบระเกะระกะ (Flocculate) การบดอัดทำได้ยากกว่าและต้องใช้ความชื้นที่มากกว่ามาช่วยให้การบดอัดแน่นขึ้น



รูปที่ 2.2 ผลกระทบ ของสารเคมีที่นำมาปรับสภาพดินต่อคุณสมบัติการบดอัดดิน (Ingles, 1972)

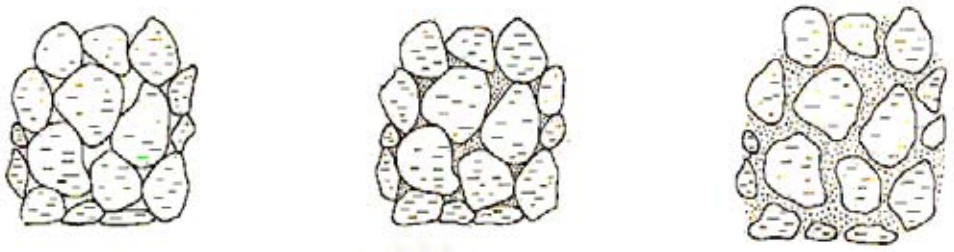
2.1.2 ผลของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน

ดินที่บดอัดในด้านแห้งของความชื้นที่เหมาะสม โครงสร้างดินจะเรียงตัวแบบระเกะระกะ (Flocculated structure) ส่วนดินที่บดอัดในด้านเปียกของความชื้นที่เหมาะสม โครงสร้างของดินมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Dispersed structure) ดังรูปที่2.3



รูปที่ 2.3 ผลของความชื้นขณะบดอัดที่มีผลต่อโครงสร้างดิน

2.1.3 ผลของสัดส่วนดินเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดที่มีต่อคุณสมบัติของดินหลังการบดอัด

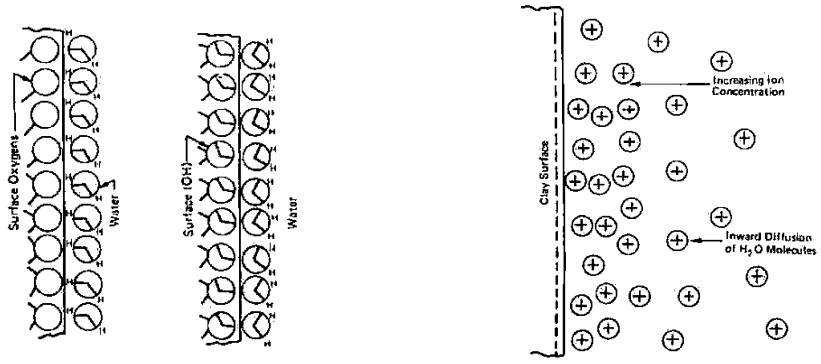


(ก) ไม่มีดินเม็ดละเอียด	(ข) มีดินเม็ดละเอียดเต็มช่องว่าง	(ค) มีดินเม็ดละเอียดมากเกินไป
ดินเม็ดหยาบสัมผัสกัน	ดินเม็ดหยาบสัมผัสกัน ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น	พื้นที่สัมผัส ของดินเม็ดหยาบลดลง ความหนาแน่นลดลง
น้ำซึมผ่านง่าย	ความสามารถในการซึมได้ต่ำ	ความสามารถในการซึมได้ต่ำ
เสถียรภาพสูงในสภาพ Confinement และต่ำ ในสภาพ Unconfinement	เสถียรภาพค่อนข้างสูงทั้งในสภาพ Confinement และUnconfinement	เสถียรภาพต่ำ
ไม่มีผลกระทบ จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน	ไม่ค่อยดีนัก จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน	มีผลกระทบอย่างมาก จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน
บดอัดยาก	บดอัดยากปานกลาง	บดอัดง่าย

รูปที่ 2.4 ลักษณะทางกายภาพดินเม็ดหยาบและละเอียด ในดิน (Yoder, 1959)

2.1.4 พฤติกรรมของดิน-น้ำ

เมื่อพื้นผิวดินลูกรังถูกบดอัด ที่ความชื้นที่เหมาะสมจนแน่นดีแล้ว ในดินจะมีช่องว่างอากาศน้อยลง และในอนุภาคดินโดยเฉพาะในดินเม็ดละเอียด จะมีฟิล์มน้ำเกาะอยู่เป็นส่วนใหญ่ โดยน้ำเหล่านี้จะดึงดูดเม็ดดินให้ติดกัน โดยที่ผิวของอนุภาคดิน มักประกอบด้วยชั้นของ O_2 หรือ OH ซึ่งจะก่อให้เกิด Hydrogen bond ได้ง่าย กล่าวคือถ้าผิวของอนุภาคดินเป็น O_2 ก็จะไปยึดกับมุมที่เป็นประจุบวกของโมเลกุลน้ำ และในทางกลับกับถ้าผิวของอนุภาคดินเป็น OH ก็จะไปยึดกับมุมที่เป็นประจุลบของโมเลกุลน้ำดังรูปที่ 2.5 (ก)

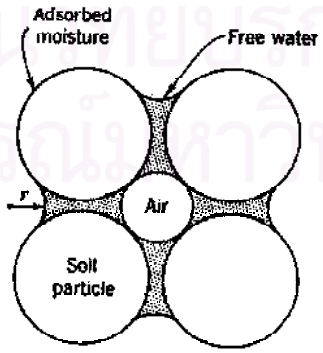


(ก) (ข)

รูป 2.5 (ก) Hydrogen bonding, (ข) Attraction by osmosis (Mitchell, 1993)

และจาก รูปที่ 2.5 (ข) เนื่องจากความเข้มข้นของประจุบวกจะมีมากที่ผิว ของอนุภาคดินและจะลดลงตามระยะที่ห่างออกมา ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงมีแนวโน้มที่จะ diffuse เข้าสู่ผิวอนุภาคดิน

โดยทั่วไปผิวของอนุภาคดินและแร่ จะมีประจุไฟฟ้าลบ (Anion) กระจายอยู่ โดยน้ำที่เกาะอยู่ที่เม็ดดินจะหันด้านที่เป็นประจุบวกมาเกาะติด โดยน้ำที่กระจายอยู่รอบอนุภาคดินประกอบไปด้วย Adsorbed water คือน้ำที่เกาะตามผิวของอนุภาคดินและจะถูกดูดโดยตรงด้วยแรงที่สูงมาก, Double layer water (ในดินเม็ดละเอียด) จะถูกดูดภายใต้สนามไฟฟ้ารอบอนุภาคดินซึ่งขึ้นกับระยะทางที่ห่างจากผิวเม็ดดิน ส่วน Free water ซึ่งเป็นน้ำส่วนที่เคลื่อนย้ายตัวได้ง่าย ดังรูปที่ 2.6 โดยในการบดอัดดิน ถ้าเติมน้ำมากเกินความเหมาะสม น้ำส่วนเกินจะกลายเป็น Free water ทำให้ดินมีความหนาแน่นที่น้อยลง และถ้าดินสูญเสียน้ำมากเกินไป ก็เท่ากับเป็นการลดแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน เม็ดดินจึงมีแนวโน้มที่จะแยกตัวได้ง่ายขึ้น

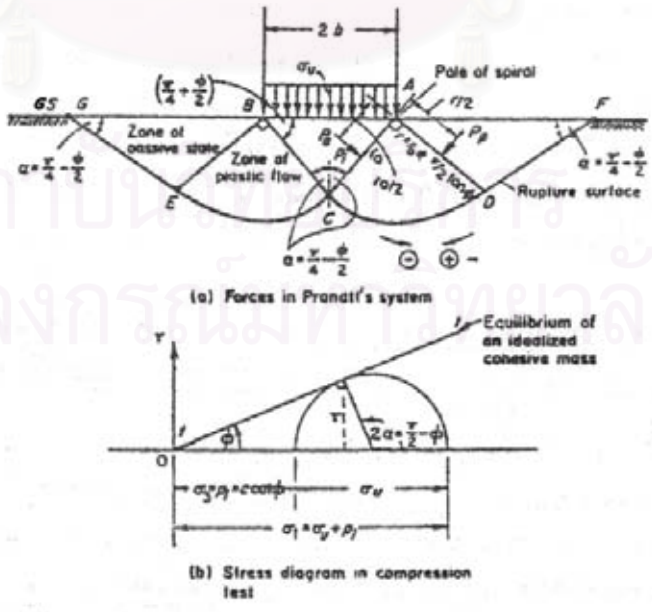


รูปที่ 2.6 ลักษณะของน้ำที่อยู่ในมวลดิน (Hewes, 1966)

2.2 พฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักจากการใช้งาน

ในการรับน้ำหนักของพื้นทาง จะต้องมีการบดอัดวัสดุที่นำมาทำพื้นผิวทางให้ได้ความแน่น โดยทั่วไปวัสดุที่เป็น Non-plastic จะมีคุณภาพที่ดีกว่าวัสดุที่มี Plasticity (ดินลูกรัง) แนวความคิดอันนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อวัสดุที่เป็น Non-plastic อยู่ในสภาพ Confinement ซึ่งไม่มีการขยับตัวด้านข้าง ในกรณีของพื้นทาง น้ำหนักที่ถ่ายลงผ่านชั้นพื้นทางจะมีพฤติกรรมเป็นลักษณะของ Shallow Foundation Problems ดังแสดงใน รูปที่2.7 จะพบว่าเมื่อมีน้ำหนักกดทับลงบนผิวทางจะเกิดแรงอัดในชั้นบนสุดของผิวทาง และในทำนองเดียวกันจะเกิดแรงดึงในชั้นที่อยู่ต่ำลงไป ผลของแรงปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการแอ่นตัว หรือการยุบตัวในแนวดิ่ง และการขยับตัวทางด้านข้าง พฤติกรรมของการขยับตัวในสองทิศทางดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยร่องล้อ และดินที่ไม่สามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ก็จะเกิดการแยกตัวขึ้นมา

จะเห็นได้ว่าชั้นทางไม่ว่าจะเป็นผิวทาง หรือพื้นทางนอกจากจะรับแรงอัดแล้วยังจะต้องรับแรงดึง ดังนั้นในสภาวะแห้ง การใช้ดินลูกรัง ซึ่งมีความเป็นเหลี่ยมมุมของเม็ดวัสดุ และมี Plasticity อยู่บ้าง มาเป็นพื้นผิวทางจะสามารถต้าน tensile strain ได้บ้าง ถ้าปริมาณความชื้นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ดินลูกรังที่มีค่า PI สูง สูญเสียความสามารถในการรับ tensile strain และมีแนวโน้มที่จะขยับตัวในสองทิศทางมากขึ้นรวมทั้งค่า CBR (ASTM D 1557) ก็จะลดต่ำลงมาก ดังนั้นหากจะนำดินลูกรังมาทำพื้นผิวทาง ต้องพยายามป้องกันไม่ให้มีความชื้นสูงเกินไป โดยทั่วไปความชื้นในพื้นทางควรจะต่ำกว่าค่าขีดจำกัดพลาสติกของดินลูกรัง แนวทางป้องกันไม่ให้ความชื้นในผิวทางสูงเกินไปเช่น การยกระดับพื้นผิวให้สูงกว่าระดับน้ำ



รูปที่2.7 Prandtl's System for a c-ϕ Soil (Jumikis, 1962)

นอกจากน้ำหนักที่กดทับแล้วยังมีแรงเสียดทานที่เกิดจากการใช้งานพื้นผิว เช่นการหมุนของล้อรถ เป็นสิ่งที่ทำให้เม็ดดินเกิดการแยกตัว เนื่องจากเม็ดดินที่บดอัดแน่นที่เชื่อมประสานกันได้ด้วยความชื้น และดินมี Plasticity อยู่บ้างจึงมีแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างเม็ดดิน รวมทั้งความเป็นเหลี่ยมเป็นมุมของเม็ดดินที่ขัดตัวกันแน่น ไม่อาจจะทนต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น เม็ดดินจึงมีการแยกตัวหลุดร่อนออกมา

2.3 ลักษณะความเสียหายของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นหลังการใช้งาน

การหลุดร่อน (Disintegration) เป็นลักษณะที่ผิวดินหรือผิวทางแตกร้าว และหลุดกระจายออกเป็นบริเวณ การหลุดร่อนมีอยู่ 2 ลักษณะคือ (รายงานฉบับที่ วว.37 กองวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง, 2521)

Pot holes - มีรูปร่างเป็นหลุมขนาดต่างๆ จากสาเหตุที่ผิวทางมีความแข็งแรงไม่พอ

Raveling - เป็นลักษณะการแยกตัวของวัสดุผิวทาง โดยที่การแยกตัวจะเกิดจากผิวทางลงถึงชั้นล่าง หรือจากขอบพื้นผิวทางเข้ามา โดยทั่วไปมวลดินขนาดเล็กจะหลุดออกไปก่อน หลังจากนั้นมวลดินขนาดโตกว่าจะหลุดออกเพิ่มขึ้น และถูกบดทับจนมีขนาดเล็กลงในกรณีที่ยังไม่เคลื่อนตัวออกไปจากบริเวณ จนในไม่ช้าจะเห็นถึงการกัดกร่อนของพื้นผิวดิน

การหลุดร่อนที่เกิดขึ้น อาจเกิดขึ้นได้ง่ายและในระยะเวลาที่รวดเร็วกว่าปกติ เนื่องมาจากการบดอัดดินไม่แน่นพอ, ดินที่นำมาบดอัดมีวัสดุสกปรกเจือปน หรือมีการใช้งานพื้นผิวดินมากกว่าปกติ

ตารางที่ 2.1 วิธีการลดการหลุดร่อนจากพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ

วิธีการควบคุม	การปฏิบัติ
การควบคุมปริมาณการใช้งาน	- ควบคุมระยะเวลาในการใช้งาน - ควบคุมปริมาณและชนิดของยานยนต์ - จำกัดความเร็วของยานยนต์ ฯ
การใช้วัสดุปูผิวทาง	- ใช้วัสดุปูผิวทาง เช่น ยางมะตอย คอนกรีตเสริมเหล็ก - ใช้วัสดุทำพื้นผิวที่มีสัดส่วนปริมาณซิลท์ต่ำ เช่นหินคลุก
การปรับสภาพพื้นผิวดิน	- ราดน้ำ - ราดด้วยสารเคมียึดเกาะฝุ่นละออง

2.4 วิธีการลดการหลุดร่อนจากพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ

วิธีการลดการหลุดร่อนจากพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นมีอยู่หลายวิธี โดยสามารถแบ่งวิธีการควบคุมออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การควบคุมปริมาณของการใช้งาน, การใช้วัสดุปูผิวทาง และการปรับสภาพพื้นผิวดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.4.1 การควบคุมปริมาณของการใช้งาน

กล่าวถึงการใช้งานหลักๆ คือการใช้งานบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง วิธีนี้เป็นการควบคุมปริมาณของยานยนต์ที่จะแล่นผ่านถนน เพื่อช่วยลดการหลุดร่อนและลดอัตราการปล่อยฝุ่นละอองจากถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง หรือจำกัดความเร็วของยานยนต์ที่จะแล่นผ่านถนน โดยวิธีนี้นำไปประยุกต์ใช้กับงานสาธารณะอาจจะทำได้ยากลำบาก แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ได้อย่างรวดเร็วกับถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง หรือพื้นที่เป็นลานโล่งในโรงงานอุตสาหกรรม หรือในที่ดินส่วนบุคคล ซึ่งสามารถควบคุมชนิด, ปริมาณ, จำกัดความเร็วของยานยนต์ หรือลักษณะการใช้งานต่างๆ ที่เป็นกิจกรรมที่จะมาทำให้ผิวดินสึกหรอและเกิดฝุ่นละอองบนพื้นผิวดิน

2.4.2 การใช้วัสดุปูผิวทาง

วิธีนี้เป็นการควบคุมปัญหาได้ในระยะยาว โดยปูทับพื้นผิวด้วยวัสดุผิวทาง เช่น ยางมะตอย, คอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีนี้เหมาะสมต่อเมื่อถนนมีปริมาณของการจราจรหนาแน่น ต้องรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น, ถนนที่ใช้เป็นทางหลวงแผ่นดิน, ที่จอดรถที่มีรถมาจอดมากๆและมีความสำคัญ, ลานขนถ่ายวัสดุที่ต้องการให้เกิดการหลุดร่อนน้อยที่สุด, สนามกีฬาเช่นสนามเทนนิส ฯ สำหรับข้อเสียของวิธีนี้ คือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการลงทุนสูง

การใช้วัสดุปูพื้นผิวชนิดอื่นๆ เช่น การเลือกใช้วัสดุทำพื้นผิวที่มีสัดส่วน ของปริมาณซิลท์ต่ำ ได้แก่ กรวดหรือหินเกล็ด วิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนน้อยกว่าการปูพื้นผิวด้วยยางมะตอยหรือคนกรีตเสริมเหล็ก แต่อาจต้องได้รับการซ่อมแซมบำรุงรักษาเป็นครั้งคราว

2.4.3 การปรับสภาพพื้นผิวดิน

วิธีนี้เป็นการควบคุมโดยการปรับสภาพพื้นผิวดินโดยวิธีการราดน้ำ หรือการราดสารเคมี ยึดเกาะเม็ดดินช่วยลดการหลุดร่อน ข้อดีของวิธีนี้ คือ เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนไม่มาก เมื่อ

เทียบกับวิธีอื่นๆ แต่เป็นการควบคุมปัญหาแบบชั่วคราว ดังนั้น ต้องมีการปฏิบัติซ้ำเป็นครั้งคราวตามความเหมาะสม

2.4.3.1 การปรับสภาพพื้นผิวดินโดยวิธีการราดน้ำ

วิธีนี้เป็นการเพิ่มปริมาณความชื้นให้กับพื้นผิวดิน ช่วยทำให้อนุภาคดินเกาะรวมตัวกัน มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นมากขึ้น จึงเป็นการช่วยลดการหลุดร่อนและลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองจากพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นได้ เนื่องจากประสิทธิภาพของวิธีนี้จะแปรตามปริมาณความชื้นของดินบนผิวดินดังนั้น การฉีดน้ำซ้ำบ่อยๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อรักษาปริมาณความชื้นของดินบนผิวดินให้คงอยู่

2.4.3.2 การปรับสภาพพื้นผิวดินโดยวิธีการการราดสารเคมี

วิธีนี้เป็นการลดการหลุดร่อนจากพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น โดยใช้สารเคมีเพื่อทำให้เกิด การยึดเกาะกันของอนุภาคบนพื้นผิวดิน เม็ดดินมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ดินบดอัดตัวกันแน่นขึ้น และทำให้พื้นผิวดินมีเสถียรภาพมากขึ้น ช่วยรักษาปริมาณความชื้นของดินบนผิวดินให้คงอยู่ยาวนานขึ้น ช่วยลดหรือป้องกันการเกิดหลุม ร่องรอยโหว่ หรือรอยร้าวของผิวดิน วิธีนี้ยังจำเป็นต้องมีการราดสารเคมีซ้ำ เช่นเดียวกับวิธีการราดน้ำ แต่สามารถทิ้งช่วงเวลาในการฉีดซ้ำได้เป็นเวลาหลายๆ เดือน

2.5 กลไกในการช่วยลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดิน ของสารเคมีแต่ละชนิด

2.5.1 สารจำพวกเกลือ

สารจำพวกเกลือ ได้แก่ แมกนีเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ หรือ โซเดียมคลอไรด์ สารเหล่านี้มีลักษณะสมบัติที่สำคัญ คือ ดึงน้ำจากบรรยากาศ และรักษาความชื้น ทำให้อนุภาคของดินยึดเกาะกันและเกิดการหลุดร่อนได้น้อยลงด้วยปฏิกิริยาทางเคมี แต่สารเหล่านี้ละลายน้ำได้ดี และเมื่อฝนตกจะไหลออกไปจากผิวดิน รวมทั้งไหลซึมไปใต้ดินได้ง่าย เนื่องจากการใช้สารจำพวกเกลือนี้ มีแนวโน้มในการเพิ่มค่าความซึมได้ของดิน (Metcalf, J.B., 1958) สารละลายประเภทเกลือเมื่อละลายในชั้นวงน้ำ (Double layer) ของดินจะแตกตัวให้ประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยามากกว่า 1 ปฏิกิริยา เช่น แลกเปลี่ยนประจุกับประจุในดิน เพิ่มความเข้มข้นประจุ ทำให้เกิดการลดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค

2.5.1.1 แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

นอกจากที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล หรือน้ำแร่จากธรรมชาติแคลเซียมคลอไรด์ ไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แหล่งที่มาของแคลเซียมคลอไรด์ที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะได้มาจากผลพลอยได้ของอุตสาหกรรม แอมโมเนีย หรือ แอมโมเนียมคาร์บอเนต, คาร์บอนไดออกไซด์ จากหินอ่อน, โปแตสเซียมคลอเรต และโซเดียมคาร์บอเนต โดยแคลเซียมคลอไรด์ เป็นสารที่มีคุณสมบัติสำคัญ 2 ประการคือ Deliquescence และ Hygroscopicity

Deliquescence คือความสามารถของวัตถุที่สามารถดูดความชื้นจากบรรยากาศได้แล้วละลายกลายเป็นของเหลว Hygroscopicity คือความสามารถในการดูด และรักษาความชื้น ได้โดยไม่จำเป็นต้องกลายเป็นของเหลว ด้วยคุณสมบัติทั้งสองทำให้ แคลเซียมคลอไรด์ มีประโยชน์ในการบรรเทาการเกิดฝุ่น และการหลุดร่อนจากพื้นผิวดินได้ โดยดินที่เหมาะสมคือดินที่มีขนาดคละกันดี และมี Plasticity (Hewes, 1966)

ในสภาวะอากาศแห้ง ผิวดินที่มี แคลเซียมคลอไรด์ จะมีความชื้นที่สูงกว่าผิวดินปกติ เนื่องจาก อันดับแรก เพราะแรงดันจากไอของการระเหยของน้ำที่สูงกว่าจาก สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เกิดขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าน้ำที่ไม่มี แคลเซียมคลอไรด์ อันดับที่สอง เพราะแคลเซียมคลอไรด์ มีคุณสมบัติ Deliquescence จึงสามารถดึงความชื้นจากอากาศในตอนกลางคืนมาแทนที่ ความชื้นที่สูญเสียไปจากจากผิวดินในตอนกลางวันได้ โดยจะได้มากหรือน้อยขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศด้วย

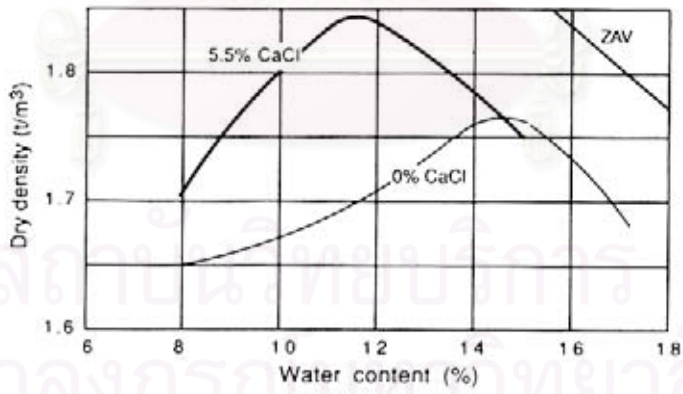
แคลเซียมคลอไรด์ สามารถที่จะลดการหลุดร่อน และบรรเทาฝุ่นที่เกิดจากผิวดินได้ ก็เพราะสามารถรักษาความชื้นที่ทำหน้าที่ยึดเม็ดดินให้ติดกัน ไว้ได้ และยังมีผลกระทบทาง เคมี-ฟิสิกส์ บนส่วนที่เป็นเม็ดละเอียดของดินอยู่อีกหลายประการ เช่นจากเดิมดินที่มีโซเดียมไอออน (Na^+) ที่เข้าไปแลกเปลี่ยนประจุกับดินโดยรวมตัวกันอยู่รอบๆประจุลบที่ผิวหน้าอนุภาคดินเหนียวและดินเม็ดละเอียด โดนแทนที่โดย แคลเซียมไอออน (Ca^{++}) ทำให้ความหนาของชั้นวงน้ำรอบๆอนุภาคดินลดลง ดินรวมทั้งเม็ดฝุ่นเกาะตัวกันมากขึ้น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาค (R) เป็นตัวช่วยในการบดอัดดิน เพิ่มค่า CBR (California Bearing Ratio) แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้จะเห็นได้เด่นชัดควรจะเกิดจากการผสมสารแคลเซียมคลอไรด์กับดิน แล้วทำการบดอัด, (Thornburn and Mura,1969)

แคลเซียมคลอไรด์ ได้รับการแสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะลดการหลุดร่อน และบรรเทาฝุ่น ได้โดยหนังสือ Highway Construction ของ Byrne ในปี 1907 โดยใช้ แคลเซียมคลอไรด์ ประมาณ 2 lb./sq. yd/year (1.09 kg. /m^2) โดยใส่ 1 lb. แรก ในฤดูร้อน และใส่อีก 2 ครั้ง ครั้งละ ½ lb. ในฤดูต่อมา การใส่ แคลเซียมคลอไรด์ ลงบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทางแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยการจะให้ได้ผลดีที่สุดในการใช้ แคลเซียมคลอไรด์ เพื่อลดการหลุดร่อนของผิวดินควรราด แคลเซียม

คลอไรด์ ลงบนพื้นผิวดินหลังจากฤดูการที่ฝนตกหนักผ่านพ้นไปแล้ว มิเช่นนั้นน้ำฝนสามารถที่จะชะล้าง แคลเซียมคลอไรด์ ออกไปจากดินได้

รูปที่ 2.8 แสดงการราดแคลเซียมคลอไรด์ ลงบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง (Bruge, 1950)

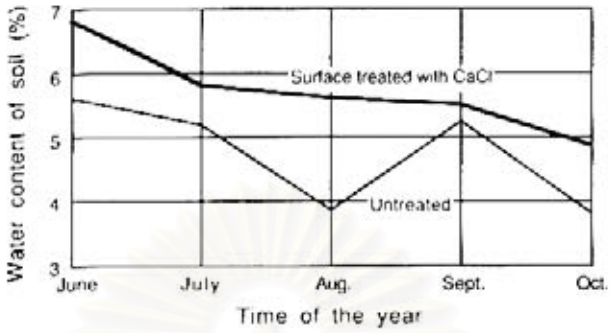
รูปที่ 2.9 แสดงผลการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test) ของดินเหนียวปนกรวด (Gravelly clay) ที่ผสมและไม่ผสม แคลเซียมคลอไรด์ ในตัวอย่างดิน โดยแคลเซียมคลอไรด์เข้ามาช่วยในการบดอัด, มีคุณลักษณะในการเพิ่มแรงตึงผิวของความชื้นในดิน และหรือเพิ่ม ความหนาแน่นของน้ำในช่องว่างดิน



รูปที่ 2.9 กราฟการทดสอบการบดอัดดิน ของดินเหนียวปนกรวด โดยมีและไม่มี $CaCl_2$ ในดิน (Courtesy Pacific Chemical Industries Pty.Ltd, 1983.)

รูปที่2.10 แสดงผลการศึกษาหาความชื้นที่สูญเสียไปจากพื้นผิวดินเหนียวปนทรายตามระยะเวลา ระหว่างผิวหน้าดินปกติ กับที่มีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ จะเห็นได้ว่าดินที่มีการเติม

แคลเซียมคลอไรด์ จะมีการสูญเสียความชื้นน้อยลง และความชื้นที่ผิวดินจะแปรผันไม่มากนักตามระยะเวลา



รูปที่ 2.10 ความชื้นที่สูญเสียไป จากพื้นผิวดินเหนียวปนทราย (Burggraf, 1933)

2.5.1.2 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

การใช้ โซเดียมคลอไรด์ (Common Salt) เพื่อการปรับปรุงดิน และช่วยในการบดอัดดินมีใช้กันมานานและใช้กันมากใน ประเทศออสเตรเลีย ถึงแม้จะไม่มีความคงทนนัก แต่ก็เป็นสิ่งที่หาได้ง่ายจากธรรมชาติ โซเดียมคลอไรด์มีผลในการใช้กับดินทุกประเภท แต่จะมีผลน้อยกับดินที่มีปริมาณเกลือปนอยู่มาก และดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง

โซเดียมคลอไรด์ มีหน้าที่ในการใช้ปรับปรุงผิวหน้าดินเหมือน แคลเซียมคลอไรด์ คือควบคุมความชื้นที่อยู่ในดิน และดึงความชื้นจากบรรยากาศได้ แต่ โซเดียมคลอไรด์ยังมีอีกคุณสมบัติที่แตกต่างคือ คุณสมบัติในการเกิดผลึก (Crystalline Properties) โดยในสภาพอากาศที่แห้งพื้นผิวดินที่มีสาร โซเดียมคลอไรด์อยู่ จะแข็งขึ้น เนื่องจากผลึกที่ก่อตัวขึ้น (Hewes, 1966)

ผลดีของการปรับปรุงดินและการลดการหลุดร่อน โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ มีผลดีที่เห็นได้ชัดคือ เป็นตัวช่วยในการบดอัดดิน ส่งผลให้ดินมีความหนาแน่นสูงขึ้น การซึมผ่านได้ มีค่าลดลง การบวมตัวในดินลดลงได้ รวมทั้งป้องกันการเกิดฝุ่นละออง แต่ข้อด้อยในการใช้โซเดียมคลอไรด์ ในการปรับปรุงดินและการลดการหลุดร่อน คือ สามารถถูกละลายได้ โดยจะถูกชะล้างได้อย่างรวดเร็วในภายหลัง จากน้ำฝน อย่างไรก็ตามโซเดียมคลอไรด์ ก็มีราคาถูกและหาได้ง่าย ในบางครั้งอาจจะมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวใหม่ โดยการราดน้ำเกลือเพิ่มเติมที่ผิวดิน ก็สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว

โซเดียมคลอไรด์ คือสารในการปรับปรุงดินที่ หาได้ง่าย มีราคาถูก มีผลอย่างมากกับดินที่มีค่า ขีดจำกัดเหลวสูง (High liquid limit) เช่นดินที่มีแร่ Montmorillonite อยู่มากๆ และดินชนิดนี้ก็จะถูกน้ำชะล้างเกลือออกไปได้น้อยที่สุด

2.5.2 โพลิเมอร์อิมัลชัน (Polymer emulsion)

โพลิเมอร์ส่วนใหญ่ สามารถนำมาใช้ในการปรับสภาพดินเพื่อลดการหลุดร่อนได้ โดย เป็นสารเคมีที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันในลักษณะที่เป็น Long chained จึงสามารถจับอนุภาคดินให้เกิดการยึดเกาะกันได้จำนวนมาก โดยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีน้อย เพราะเมื่อแห้งแล้ว จะไม่ละลายน้ำ อีกทั้งยังเป็นสารกันน้ำ และไม่เคลื่อนย้ายไปสู่ที่อื่นๆ แต่เป็นไปไม่ได้ที่จะแสดงรายชื่อของโพลิเมอร์ทั้งหมดออกมาเพราะมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่จะกล่าวถึงโพลิเมอร์ชนิดหลักๆ ที่มีการใช้งานและมีการทำตลาดอยู่

โพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับสถาพดิน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ แคตไอออนนิค (Cationic), นอนไอออนนิค (Non-ionic) และแอนไอออนนิค (Anionic)

แคตไอออนนิคโพลิเมอร์ (Cationic polymers) จะเป็นโพลิเมอร์ที่มีประจุบวก สามารถ ยึดเหนี่ยวกับประจุลบ ของแร่ดินเหนียว และทรายซิลิก้าละเอียดที่ผิวดินได้ดี ทำให้ดินที่ผสมกับโพลิเมอร์มีแนวโน้มที่จะมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculates structures) มากขึ้น มีผลให้ต้านทานแรงเฉือนได้เพิ่มขึ้น และเพิ่มแรงต้านในการบดอัดดินทำให้ความหนาแน่นแห้งหลังการบดอัดต่ำลงจากเดิมที่ไม่ได้ผสมโพลิเมอร์ แต่ก็ชดเชยได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินที่แข็งแรงขึ้น สามารถนำไปใช้กับดินเหนียวอ่อน เช่นการใช้ตามสวน, สนามภายในบ้าน ตัวอย่างของแคตไอออนนิคโพลิเมอร์ (Cationic polymers) ที่ผ่านการทดสอบการใช้ในงานปรับสภาพดิน เช่น Polyacrylamides (PAA)

นอนไอออนนิคโพลิเมอร์ (Non-ionic polymers) เป็นโพลิเมอร์ที่มีประจุเป็นกลาง มีผลให้ Hydroxyl bonds ที่แข็งแรงก่อตัวขึ้นระหว่าง กลุ่มของ –OH บนห่วงโซ่โพลิเมอร์และที่ผิวหน้า ออกซิเจนของแร่ดินเหนียว

แอนไอออนนิคโพลิเมอร์ (Anionic polymers) เป็นโพลิเมอร์ที่มีประจุลบเหมือนกันกับผิวของอนุภาคดินเหนียว เมื่อนำมาใช้ในการปรับสภาพดิน จะมีผลในการลดกำลังรับแรงเฉือนของดิน แต่เพิ่มความสามารถในการบดอัดตัวของดิน โพลิเมอร์ชนิดนี้จึงเรียกได้ว่าเป็นตัวช่วยในการบดอัดดินให้ดินบดอัดตัวได้ง่ายขึ้นตัวอย่างของแอนไอออนนิคโพลิเมอร์ (Anionic polymers) เช่น Sulphonates, Lignosulphonates

กลไกในการทำให้อนุภาคดินเกิดการรวมตัว หรือยึดเกาะกันของสารเคมียึดเกาะเม็ดดิน พบว่า จากการศึกษาของ Lambe (Lambe, 1953 อ้างถึงใน อาคม, 2535) ได้ทำการศึกษาปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยสารเคมีประเภทโพลิเมอร์ อธิบายได้ว่า สารประเภทโพลิเมอร์ประกอบด้วยโมเลกุลที่เชื่อมกันมีลักษณะคล้ายโซ่ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของอนุภาคสารเคมีอินทรีย์ที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) การนำสารโพลิเมอร์ไปใช้ผสมกับดินจะเกิดปฏิกิริยา 1 หรือ 2 ขั้นตอน กล่าวคือ เมื่อเติมโมโนเมอร์ลงไป พร้อมกับ

ระบบช่วยทำปฏิกิริยา (Catalyst system) ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน รวมตัวกันระหว่างดิน และโมโนเมอร์ หรือโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นตอนที่สำคัญ หลังจากนั้นโพลิเมอร์ที่ประกอบตัวกันแล้ว (Preformed polymer) ในรูปของแข็ง สารละลาย หรืออิมัลชัน (Emulsion) จะทำปฏิกิริยากับดิน

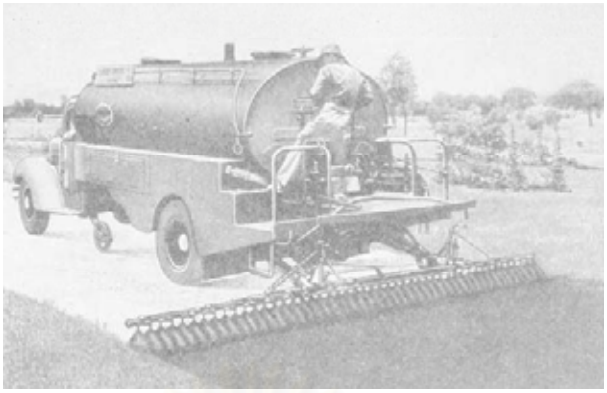
โพลิเมอร์ในทุกๆประเภทจะมีความสามารถในการยึดจับเม็ดดินได้ดีเมื่อนำไปใช้ปรับสภาพผิวดินเพราะเมื่อแห้งแล้วก็จะจับตัวกัน วัสดุโพลิเมอร์สามารถยึดเกาะกับอนุภาคดินข้างเคียงได้ เนื่องจากส่วนปลายของโมเลกุลโพลิเมอร์ ซึ่งติดกันเป็นโซ่ยาว ติดพันกับอนุภาคดิน รวมทั้งป้องกันการสูญเสียความชื้นในดิน

2.5.3 แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt emulsion)

การเติมแอสฟัลต์อิมัลชันลงไปในดิน อาจจะเป็นการผสมแล้วบดอัด หรือฉีดพ่นลงไปที่ผิวดินที่ทำการบดอัดไว้แล้ว หลังจากเวลาผ่านไปน้ำจะระเหยออกไปจากแอสฟัลต์อิมัลชันคงเหลือไว้แต่ ประจุจากอิมัลซิไฟเออร์ และยางแอสฟัลต์ ซึ่งจะเริ่มกลายสภาพเป็นสารกึ่งของแข็งเป็นก้อนหนาหนืด โดยเม็ดดินที่มีแอสฟัลต์มาเกาะอยู่ จะแยกตัวจากกันได้ยากขึ้น เม็ดดินจะยึดติดกันได้ด้วยอนุภาคของแอสฟัลต์ที่คงอยู่ระหว่างเม็ดดิน ในระหว่างเม็ดดินบางเม็ดที่ไม่มีแอสฟัลต์มาเกาะและแทรกตัวอยู่ก็อาจจะแยกตัวจากกันได้อย่างช้าๆ ตามความชื้นที่ออกไปหลังการบดอัด เพราะลักษณะของแอสฟัลต์จะเป็นสารกึ่งของแข็ง และจะมีการก่อตัวขึ้นของฟิล์มที่ต่อเนื่องกันไปรอบๆอนุภาคดินอย่างช้าๆ แต่ก็ไม่ต่อเนื่องกันไปทั้งหมด โดยจะยังคงมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินอยู่

ฟิล์มที่เคลือบเม็ดดิน และแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินนี้ เป็นการเพิ่มค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน และเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงให้แก่ดิน พร้อมทั้งลดการสูญเสียน้ำจากผิวหน้าดินได้ เพราะคุณสมบัติอีกประการของแอสฟัลต์คือ เป็นสารกันน้ำ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวแอสฟัลต์อิมัลชันจึงสามารถการหลุดร่อนของผิวหน้าดินได้ โดยที่แอสฟัลต์อิมัลชันจะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับดิน กำลังรับแรงเฉือน และแรงดึงระหว่างเม็ดดินที่เพิ่มขึ้นมาจากฟิล์มของแอสฟัลต์ ที่มาแทรกตัวและยึดเกาะอยู่ระหว่างเม็ดดินเท่านั้น (Benson, J. R. and Becker, C. J., 1942) โดยที่วิธีการราด แอสฟัลต์ลงบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการราดแอสฟัลต์ ลงบนถนนที่ไม่ได้ปูผิวทาง (Bruge, 1950)

2.5.4 สารอื่นๆ

เช่น ยางพารา หรือของเสียเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร ประกอบด้วยสารเหลือใช้จากการเกษตร เช่น เซลลูโลสไฟเบอร์ น้ำกากส่าที่เหลือจากการหมักสุรา หรือน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้ว (Waste oil) ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ โดยมีคุณสมบัติที่สามารถช่วยลดการหลุดร่อนได้เช่นกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์ คือ การสรรหาชนิดของสารเคมีและปริมาณที่เหมาะสมในการใช้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันการหลุดร่อนของผิวดิน โดยจะศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเคมีที่มีผลต่อประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ได้แก่ ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมสารเคมี ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดิน และผลกระทบต่อการหลุดร่อนของดินจากผิวทางจำลองของดินที่ราดสารเคมี รวมทั้งศึกษาต้นทุนในการลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น

3.2 ชนิดของสารเคมีที่เลือกใช้ในการทดสอบ

สารเคมีที่ช่วยลดการหลุดร่อน และลดฝุ่นละอองจากผิวดินนั้น มีอยู่หลายชนิด แต่จากการทดลองในต่างประเทศ พบว่า ที่มีประสิทธิภาพดี อายุใช้งานนานพอสมควร นั้น มีอยู่ 2 กลุ่ม คือ 1) สารโพลิเมอร์ 2) แอสฟัลต์ซีเมนต์ และที่น่าพิจารณาใช้ในประเทศไทย คือ สารจำพวกเกลือ เพราะมีราคาถูกและหาได้ง่าย ดังนั้น ในขั้นตอนการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการจึงเลือกชนิดของสารเคมีที่ช่วยลดการหลุดร่อน และการรักษาความชื้นในดิน ในแต่ละกลุ่มรวม 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

ชนิดที่ 1 สารจำพวกเกลือ
ชนิดที่ 2 สารโพลิเมอร์อิมัลชัน
ชนิดที่ 3 สารแอสฟัลต์อิมัลชัน

โดยสารแต่ละชนิดมีรายละเอียดของ คุณสมบัติ และข้อกำหนดดังนี้

3.2.1 สารจำพวกเกลือ

เลือกใช้ แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ราคาถูก, หาได้ง่าย และมีการนำมาใช้ในการปรับสถาพดินในอดีต มาเป็นเวลานาน

แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เป็นของแข็งสีขาวเกิดเป็นไฮเดรตได้หลายแบบ เป็นผลพลอยได้จากขบวนการผลิตซอลเวย์ (Slovay process) ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้เรียกว่า brine ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับความเย็น เนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์ดูดน้ำได้ดี และสารละลายมีจุดเยือกแข็งต่ำ จึงเอาไปใช้กำจัดฝุ่นบนถนนและในเหมือง ตลอดจนน้ำที่เกิดจากหิมะละลาย นอกจากนั้นยังใช้เป็น อิเล็กโทรไลต์ในการผลิตแคลเซียมด้วย

โซเดียมคลอไรด์ (Common salt, salt, NaCl) เป็นของแข็งสีขาว เตรียมได้จากปฏิกิริยาสะเทินระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วระเหยน้ำออก ในธรรมชาติเกิดอยู่ในน้ำทะเล และเป็นของแข็งที่เรียกว่าเกลือหิน เมื่อละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน การละลายเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ ในทางอุตสาหกรรม ใช้ในการเตรียมโซเดียมคาร์บอเนต (โดยใช้กระบวนการซอลเวย์) ใช้เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ในการแยกสารละลาย NaCl ในน้ำด้วยไฟฟ้า) และใช้ทำสบู่ โซเดียมคลอไรด์ ละลายได้น้อยมากในแอลกอฮอล์

ลักษณะสมบัติของ แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

	$CaCl_2$	NaCl
Molecular weight	111	58.44
Melting point, ^oC	772	804
Boiling point, ^oC	1600	1413

3.2.2 สารโพลิเมอร์อิมัลชัน

เลือกใช้โพลิเมอร์ที่ผลิตได้ในประเทศไทย และมีราคาต่ำ โพลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการยึดเกาะฝุ่นละออง ส่วนใหญ่จะเป็นโคโพลิเมอร์ (Copolymer) ของ อะคริลิค ซึ่งมีบริษัทตัวแทนจำหน่าย โพลิเมอร์อิมัลชันในประเทศไทยคือบริษัท Connell bros. (THAILAND), LTD. ได้แนะนำ Primal AC-261 ซึ่งเป็น อะคริลิก อิมัลชัน 100% มีราคาต่ำที่สุดในท้องตลาด คือ กิโลกรัมละ 50 บาท (ก.ค. 2544) ซึ่งมีคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้คือ มีความคงทนในการใช้งานภายนอก เช่นใช้ในงาน Coating, แข็งตัวเร็ว, ป้องกันฝุ่นฟุ้งกระจายได้ดี คุณสมบัติทางกายภาพของ Primal AC-261 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของ Primal AC-261

Appearance	Milky emulsion
Ionic charge	Anionic
Solids, by mass, %	50.0
Solid, by volume, %	47.2
Density @25°C, kg/liter	1.08
Glass transition temperature (Tg), measured by DSC, °C (onset)	17
Minimum film formation temperature (measured), °C	18
pH	9.6
Viscosity, Brookfield RVT, cps	250

3.3.3 สารแอสฟัลต์อิมัลชัน

เลือก CSS-1 มาใช้ในการวิจัย ซึ่งบริษัท เอสโซ่ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) เป็นผู้ผลิตและจำหน่าย และมีห้างหุ้นส่วนจำกัด เอส.พี.สยามเอ็นจิเนียริ่งเป็นผู้แทนจำหน่ายผลิตภัณฑ์ยางแอสฟัลต์ ดังกล่าว ซึ่งมีราคาจำหน่ายประมาณตันละ 9,000 บาท โดยมีข้อมูลรายละเอียดของสารดังต่อไปนี้

CSS-1 คือ อิมัลชันของแอสฟัลต์ที่มีประจุบวกอยู่รอบอนุภาคของแอสฟัลต์ และแข็งตัวช้า (Cationic Slow-Setting Bitumen Emulsion) ส่วนผสมหลักของแอสฟัลต์อิมัลชัน คือ แอสฟัลต์, น้ำ และสารก่อเกิดอิมัลชัน CSS-1 มีความสามารถในการยึดเกาะกับพื้นได้ดีแข็งตัวช้า นิยมใช้กับงานก่อสร้างผิวทางประเภท Prime cost และ Tack coat การใช้ CSS-1 เพื่อจุดประสงค์ ดังต่อไปนี้

1) ป้องกันน้ำซึมลงสู่พื้นดินที่ได้ทำการบดอัด
2) เคลือบและยึดประสานผิวหน้าของพื้นดินที่ได้ทำการบดอัด

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว CSS-1 จึงช่วยลดฝุ่นละอองบนพื้นผิวดินได้ดี การใช้งานควรเจือจาง CSS-1 ด้วยน้ำในอัตราส่วน 1:1 หรือมากกว่า ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสาร CSS-1 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลักษณะสมบัติของสาร CSS-1*

ประจุของอนุภาคแอสฟัลต์	บวก
ความหนืดเซย์โบลต์ฟูรอล ที่ 25°C (วินาที)	20-100
การแยกชั้นหลังจากเวลา 5 วัน (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน)	5
เสถียรภาพต่อการเก็บภายใน 24 ชั่วโมง (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน)	1
ปริมาณที่ค้างบนแร่ง 80 ไมโครเมตร (20 เมตร) (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน)	0.10
การผสมกับซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน)	2

*ทดสอบตาม ASTM D244 โดย บริษัท เอสโซ่ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)

3.3 ดินที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นดินลูกรัง นำมาจากแหล่งดินลูกรัง อ.เลาขวัญ จ.กาญจนบุรี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อให้แน่ใจว่าจะมีตัวอย่างดินจากแหล่งเดียวกันเพียงพอต่อการวิจัย ปริมาณตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบจะใช้ประมาณ 3 ลูกบาศก์เมตร

3.3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นดินลูกรังที่ นำมาจากแหล่งดินลูกรัง อ.เลาขวัญ จ.กาญจนบุรี มีสีน้ำตาลแดง ความชื้นตามธรรมชาติประมาณ 3-6 เปอร์เซ็นต์ มีรากไม้ปนมาเล็กน้อย และจากการทดสอบสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ การกระจายขนาดคละของเม็ดดิน สมบัติด้านพลาสติก และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ผลการทดสอบสมบัติของดิน ดังตารางที่ 3.4

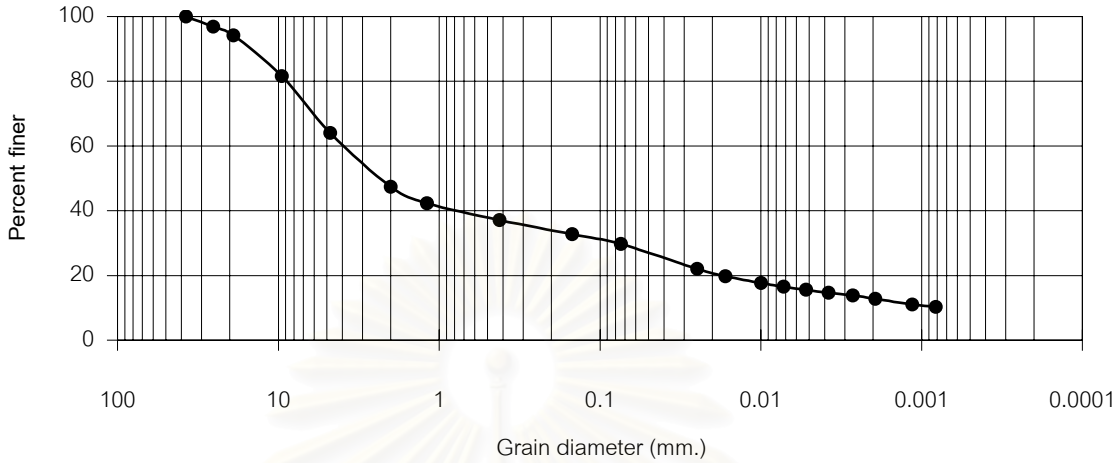
รูปที่ 3.1 ดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 3.4 ลักษณะสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ			
1.การกระจายขนาดคละของเม็ดดิน	ASTM D 422	Sieve analysis		Hydrometer analysis	
		Sieve size	%finer	Particle size	%finer
		1 ½"	100.00	0.02482	22.08
		1 "	96.87	0.01656	19.70
		¾"	94.17	0.00996	17.66
		⅜"	81.65	0.00719	16.58
		# 4	64.07	0.00523	15.63
		# 10	47.39	0.00378	14.67
		# 16	42.33	0.00268	13.79
		# 40	37.07	0.00194	12.77
		# 100	32.71	0.00114	11.04
		# 200	29.70	0.00082	10.33
2. สมบัติด้านพลาสติก	ASTM D 4318	Liquid Limit		34.74 %	
		Plastic Limit		21.27 %	
		Plasticity Index		13.47 %	
3 ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	ASTM D 854	2.716			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของเม็ดดิน สามารถนำมาแสดงผลเป็นรูปแบบการกระจายตัวได้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกระจายขนาดคละของเม็ดดินที่นำมาใช้ในการวิจัย

ด้วยคุณสมบัติของดิน สามารถจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน AASHTO Classification และ Unified Classification ได้ดังนี้

AASHTO Classification จำแนกได้เป็น A-2-6 (1), Silty or clayey gravel and sand, General subgrade rating: Excellent to good

Unified Classification จำแนกได้เป็น SC, Clayey sand with gravel

3.4 การศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเคมีที่มีผลต่อประสิทธิภาพในด้านต่างๆ

การศึกษาในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณสารเคมีที่มีผลต่อประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ได้แก่ ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน ผสมสารเคมี ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดิน และผลกระทบต่อการหลุดร่อนของดินจากผิวทางจำลองของดินที่ราดสารเคมี โดยตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบได้จากดินที่เตรียมตามหัวข้อ 3.3

3.4.1 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมสารเคมี

ในการศึกษาส่วนนี้ จะเป็นการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนัก ของส่วนผสมดินกับสารเคมีชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีอยู่ 2 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่ การหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยการบดอัด (Compaction) โดยวิธี Modified Proctor (ASTM D 1557) และการหาค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR, ASTM D 1833) โดยทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน คือการทดสอบหาค่า CBR นั้นจะทดสอบในภาวะที่ดินตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ทั้งนี้ ค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบจะทำให้ทราบถึงค่ากำลังรับน้ำหนักของส่วนผสมดินกับสารเคมีชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบได้ว่าสารเคมีชนิดต่างๆที่ใช้เป็นส่วนผสมในการศึกษาครั้งนี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนัก ของดินมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการเลือกใช้วัสดุ การออกแบบความหนาของผิวดิน และความคงทนของผิวดิน เป็นต้น

3.4.1.1 การทดสอบการบดอัด

ในการศึกษาส่วนนี้ใช้ดินลูกรัง ตามหัวข้อที่ 3.3 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{4}$″ และทำการทดสอบการบดอัด โดยมาตรฐาน ASTM D 1557: Modified Proctor Compaction โดยแผนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แผนการทดสอบการบดอัดดิน

สารเคมี	ความเข้มข้นที่ผสมกับน้ำ (Weight by volume)	หมายเหตุ
น้ำ	-	ใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ
โซเดียมคลอไรด์	10% 20% 30%	โซเดียมคลอไรด์ 100 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc. โซเดียมคลอไรด์ 200 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc. โซเดียมคลอไรด์ 300 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
แคลเซียมคลอไรด์	20% 30%	แคลเซียมคลอไรด์ 200 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc. แคลเซียมคลอไรด์ 300 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
โพลิเมอร์อิมัลชัน	12.5% 25%	โพลิเมอร์ 125 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc. โพลิเมอร์ 250 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.

3.1.4.2 การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR)

ในการศึกษาส่วนนี้ใช้ดินลูกรัง ตามหัวข้อที่ 3.3 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{4}$″ มาผสมกับน้ำ หรือสารเคมี ตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดสอบ ตามหัวข้อ 3.1.4.1 การทดสอบการบดอัด และทำการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก โดยมาตรฐาน ASTM D 1833: CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory – Compacted Soils โดยแผนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แผนการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก (California Bearing Ratio)

สารเคมี	ความเข้มข้นที่ผสมกับน้ำ (Weight by volume)	หมายเหตุ
น้ำ	-	ใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ
โซเดียมคลอไรด์	10%	โซเดียมคลอไรด์ 100 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
	20%	โซเดียมคลอไรด์ 200 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
	30%	โซเดียมคลอไรด์ 300 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
แคลเซียมคลอไรด์	20%	แคลเซียมคลอไรด์ 200 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
	30%	แคลเซียมคลอไรด์ 300 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
โพลิเมอร์อิมัลชัน	12.5%	โพลิเมอร์ 125 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.
	25%	โพลิเมอร์ 250 g. ต่อปริมาตรรวม 1000 cc.

3.4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี

เนื่องจากความสามารถในการป้องกันการสูญเสียความชื้นของดิน เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการหลุดร่อน และการเกิดฝุ่น ดังนั้น ในการศึกษาส่วนนี้ จึงอธิบายถึงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดิน ซึ่งจะแสดงถึงความสามารถในการป้องกันการสูญเสียความชื้นของเม็ดดิน ภายหลังการราดผิวหน้าดิน ด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ ภายใต้สภาพสภาวะและระยะเวลาที่ควบคุมให้เหมือนกัน

ในการศึกษาส่วนนี้ ใช้ดินลูกรัง ตามหัวข้อที่ 3.3 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{4}$″ มาผสมกับน้ำ ตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดสอบ ตามหัวข้อ 3.1.4.1 การทดสอบการบดอัด และทำการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี ตามวิธีการดังต่อไปนี้

- นำดินลูกรังตัวอย่าง ไปบดอัดลงในกระบะรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.5 x 0.5 x 0.2 $ม^3$ ให้มีความหนาของชั้นดินประมาณ 10 เซนติเมตร ควบคุมให้ได้ความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัดในแต่ละการทดสอบประมาณ 2 ตัน/ลบ.ม.

- เตรียมสารเคมีชนิดต่างๆ ตามอัตราส่วนผสม และอัตราการราดที่กำหนดไว้ตาม ตารางที่ 3.7 มาราดลงบนผิวหน้าของตัวอย่างดิน ที่บดอัดในกระบะ

- ภายหลังการราดสารเคมีแต่ละชนิด เสร็จสิ้นแล้ว จะติดตั้งโคมไฟขนาด 500 วัตต์ ให้อยู่สูงเหนือกระบะแต่ละใบ ประมาณ 50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3

- เปิดไฟฉายกระบะทุกใบ วันละ 5 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ 21 วัน โดยควบคุมให้เหมือนกันทุกกระบะ เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการระเหยของความชื้นในเม็ดดิน ใช้แทนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากอาจเกิดฝนตกหรือแดดออกไม่สม่ำเสมอกัน ระหว่างที่ทำการทดลอง

การศึกษาหาค่า ปริมาณความชื้นของดินที่เปลี่ยนแปลงไป ตามระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ จะศึกษาโดยการเจาะเก็บตัวอย่างดินในแต่ละกระบะตลอดความลึก เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณความชื้นที่คงอยู่ในดิน ภายหลังการราดสารเคมีชนิดต่างๆ ผ่านไป 0, 1, 3, 7, 14 และ 21 วัน ตามลำดับ โดยแผนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.7

รูปที่ 3.3 การติดตั้งและจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี

ตารางที่ 3.7 แผนการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี

สารเคมี	ความเข้มข้นที่ผสมกับน้ำ (Weight by volume)	อัตราการราด (ลิตร/ตร.ม.)	ปริมาณสารเคมีที่ผิวดิน (กก. /ตร.ม)
น้ำ	-	2.5	-
โซเดียมคลอไรด์	10%	2.5	0.25
	20%	2.5	0.5
	20%	5	1
	30%	2.5	0.75
แคลเซียมคลอไรด์	20%	2.5	0.5
	20%	5	1
	30%	2.5	0.75
โพลิเมอร์อิมัลชัน	12.5%	2.5	0.3125
	25%	2.5	0.625
	25%	5	1.25
แอสฟัลต์อิมัลชัน	12.5%	2.5	0.3125
	25%	2.5	0.625
	25%	5	1.25

3.4.3 การศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง

ในการศึกษาส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อนของผิวดินลูกรังบดอัดแน่นที่ฉีดพ่นด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ ในสภาพจำลองการใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการ โดยปัจจัยที่จะทำการศึกษาในการทดสอบนี้ ได้แก่ ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้รับ ซึ่งตัวแปรที่ใช้บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของสารเคมีแต่ละชนิดในการศึกษานี้ คือปริมาณดินที่หลุดร่อน จากผิวทางจำลองที่ฉีดพ่นด้วยสารเคมี

ในการศึกษาส่วนนี้ ใช้ดินลูกรัง ตามหัวข้อที่ 3.3 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{4}''$ มาผสมกับน้ำ ตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดสอบ ตามหัวข้อ 3.1.4.1 การทดสอบการบดอัด และทำการทดสอบ การศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง ตามวิธีการดังต่อไปนี้

- นำตัวอย่างดินลูกรัง ไปบดอัดลงในแบบจำลองทดสอบสภาพการใช้งานจริงของผิวทางในห้องปฏิบัติการ ซึ่ง มีลักษณะเป็นรูปวงแหวนมีรัศมีวงนอก 57 เซนติเมตร และรัศมีวงใน 27 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

- บดอัดให้มีความหนาของชิ้นดิน ประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมให้ได้ความหนาแน่นแห้งของดินที่บดอัดในแต่ละการทดลองประมาณ 2 ตัน /ลบ.ม.

- หลังจากนั้นจึงเตรียมสารเคมีชนิดต่างๆ ตามอัตราส่วนผสม และอัตราการราดที่กำหนดไว้ ตามตารางที่ 3.8 มาราดลงบนผิวหน้าของผิวทางจำลอง

- ภายหลังการราดสารเคมีแต่ละชนิดเสร็จสิ้นแล้ว จะติดตั้งโคมไฟขนาด 500 วัตต์จำนวน 2 ตัว ให้อยู่สูงเหนือผิวทางจำลองประมาณ 50 เซนติเมตร

- เปิดไฟฉายไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวหน้าของผิวทางที่ราดด้วยสารเคมีแห้งพอสำหรับใช้ทดสอบต่อไป โดยใช้นิ้วกดลงบนผิวหน้าที่ราดสาร สังเกตว่าไม่มีการยุบตัวของผิวหน้าหรือมีส่วนของผิวหน้าติดขึ้นมากับนิ้ว

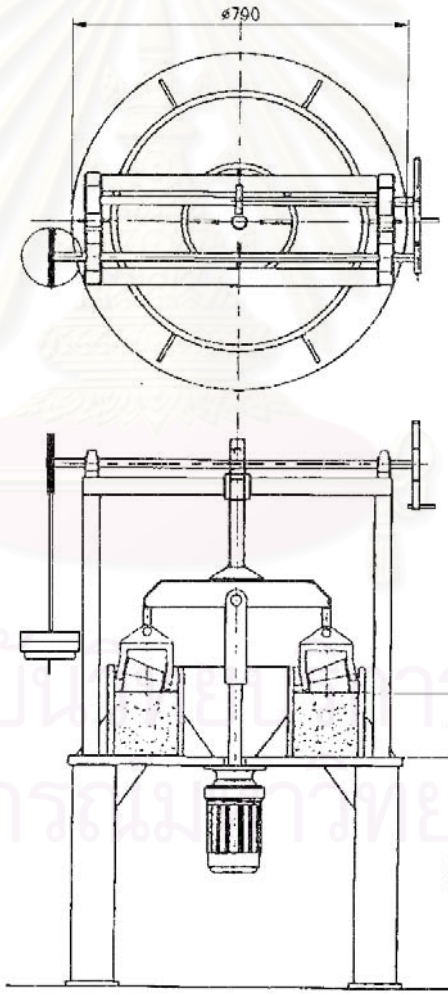
- หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบ โดยเดินเครื่องให้ล้อรถจำลองที่มีแรงกดทับประมาณ 100 กก. (ล้อละ50 กก.) วิ่งหมุนวนด้วยอัตรา 24 รอบต่อนาที บนผิวทางจำลอง

การศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริงในการทดสอบนี้ จะศึกษาโดยการเก็บดิน ที่หลุดร่อนจากผิวทางจำลองภายหลังการเดินเครื่องผ่านไป 30, 60, 120, 180, 240 และ 300 นาที ตามลำดับ แล้วนำดินที่เก็บได้ไปอบให้แห้ง เพื่อนำไปชั่งหาน้ำหนักแห้งของปริมาณดินที่หลุดร่อนออกมาจากพื้นผิวดินทั้งหมด โดยแผนการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.8

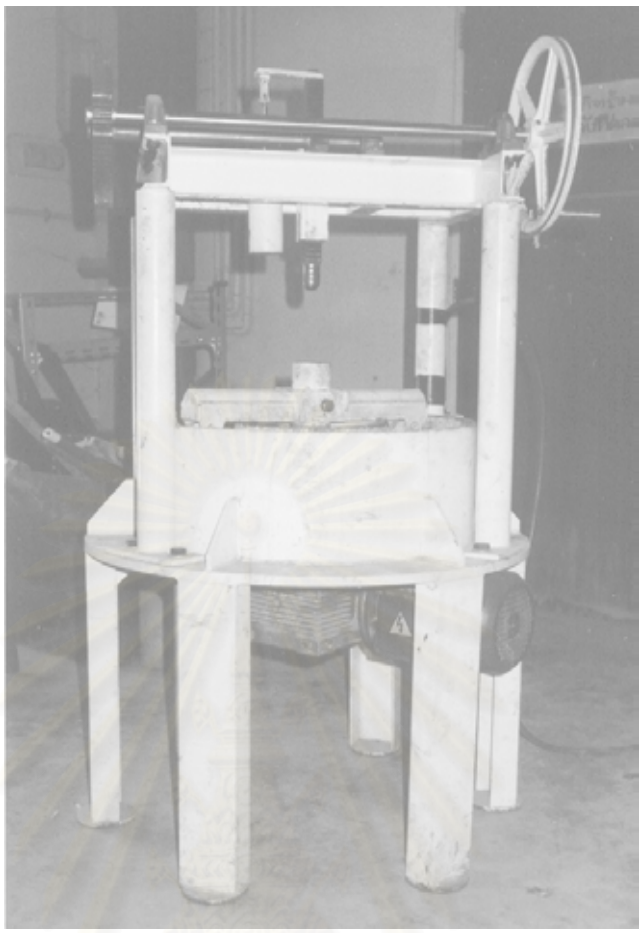
เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมานี้ ใช้หลักการเช่นเดียวกับการเกิดการหลุดร่อน บนพื้นผิวถนน โดยมีล้อจำลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 7 เซนติเมตร จำนวน 2 ล้อวางอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ยึดติดกันด้วยเพลา ลักษณะการวิ่งจะเป็นการหมุนวน เป็นวงกลม ที่ความเร็วสม่ำเสมอขับเคลื่อนด้วย มอเตอร์ไฟฟ้า และมีน้ำหนักที่กดลงล้อ ด้วยแรงที่คงที่ โดยใช้น้ำหนักถ่วงกดผ่านแกนเหล็กลงที่กึ่งกลางเพลา ซึ่งน้ำหนักถ่วง และชุดแกนล้อสามารถถอดออกได้ เพื่อความสะดวกในการเก็บตัวอย่างขณะทำการทดสอบ รูปเครื่องมือโดยรวมแสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.8 แผนการทดสอบ การศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง

สารเคมี	ความเข้มข้นที่ผสมกับน้ำ (Weight by volume)	อัตราการราด (ลิตร/ตร.ม.)	ปริมาณสารเคมีที่ผิวดิน (กก./ตร.ม)
น้ำ	-	2.5	-
โซเดียมคลอไรด์	20%	2.5	0.5
แคลเซียมคลอไรด์	20%	2.5	0.5
โพลิเมอร์อิมัลชัน	25%	2.5	0.625
แอสฟัลต์อิมัลชัน	25%	2.5	0.625



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของเครื่องมือ ทดสอบการหลุดร่อน ภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง



รูปที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการหลุดร่อน ภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง

3.5 การศึกษาต้นทุนต้นในการดำเนินงานราดสารเคมีที่ผิวดิน

ในการศึกษาส่วนนี้เป็นการหาต้นทุนโดยประมาณในการราดสารเคมีที่ผิวดิน เพื่อลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น โดยใช้การเครื่องจักรกลช่วยในการราดสารเคมี ซึ่งจะเป็นลักษณะในการทำงานจริง ในการศึกษาจะทำการศึกษาโดย แยกหาราคาของสารเคมีที่ใช้และค่าปฏิบัติงาน ก่อนนำมารวมกันเป็นต้นทุนโดยรวม ซึ่ง ชนิดของสารเคมี, อัตราความเข้มข้นและอัตราการราด ของสารเคมี ที่จะทำการศึกษาหาต้นทุน ได้ศึกษาสอดคล้องกับแผนการทดสอบการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริงเพื่อที่จะได้นำผลทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน โดยแผนการศึกษาการหาต้นทุนแสดงไว้ ตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แผนการศึกษาการหาต้นทุน

สารเคมี	ความเข้มข้นที่ผสมกับน้ำ (Weight by volume)	อัตราการราด (ลิตร/ตร.ม.)	ปริมาณสารเคมีที่ผิวดิน (กก./ตร.ม)
น้ำ	-	2.5	-
โซเดียมคลอไรด์	20%	2.5	0.5
แคลเซียมคลอไรด์	20%	2.5	0.5
โพลิเมอร์อิมัลชัน	25%	2.5	0.625
แอสฟัลต์อิมัลชัน	25%	2.5	0.625

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิจัย และสรุปผลการทดลอง

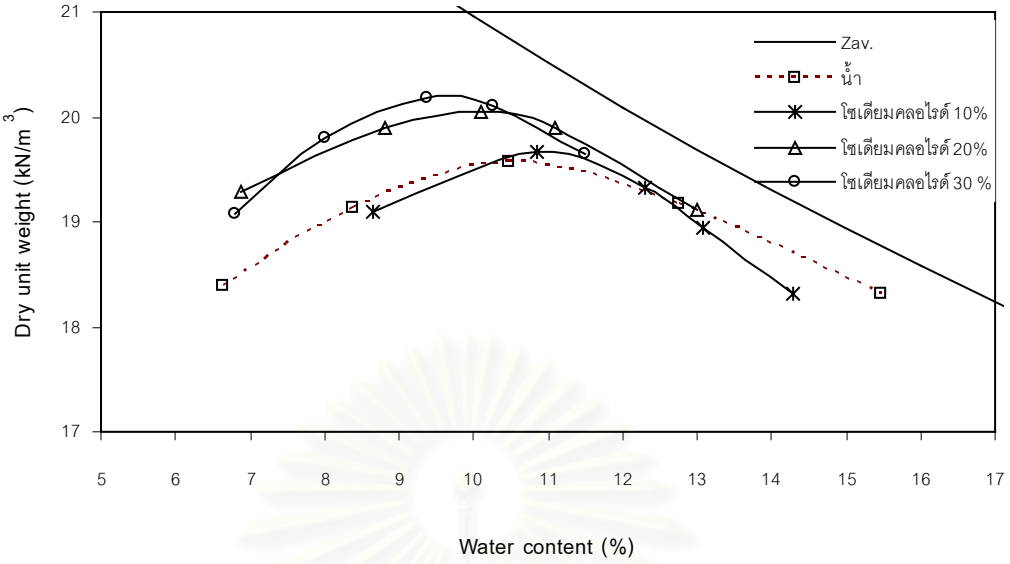
4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมสารเคมี

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินผสมสารเคมี มีขั้นตอนในการทดสอบ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นที่ 1 การทดสอบการบดอัด และขั้นที่ 2 การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) โดยผลการทดสอบมีดังนี้

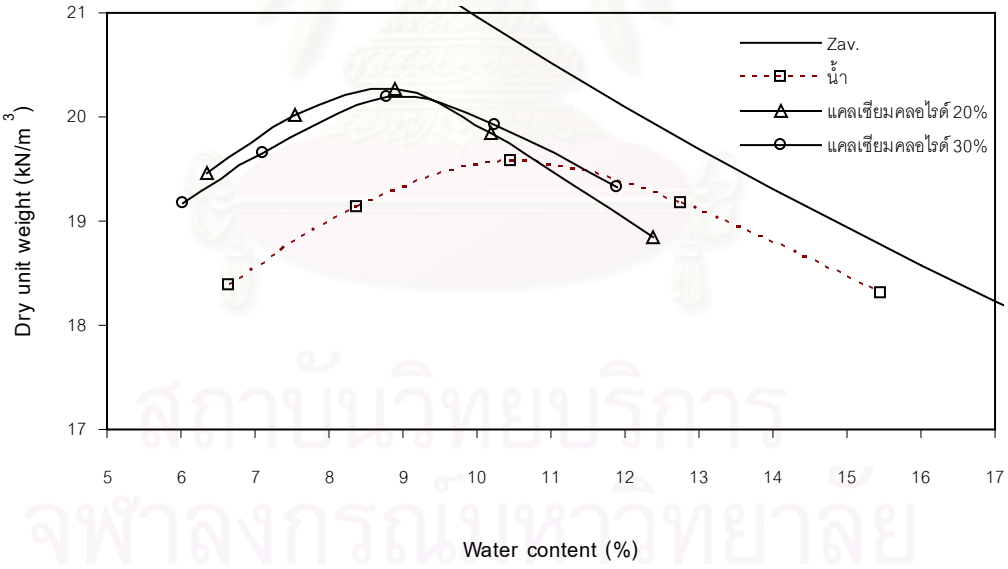
4.1.1 การทดสอบการบดอัด

โดยการหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากผลกระทบของสารเคมี เพื่อนำผลไปใช้ในการทดสอบในหัวข้อที่ 4.1.2 การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) ต่อไป รูปที่ 4.1-4.3 แสดง Compaction curves ของดินลูกรังผสม โซเดียมคลอไรด์, แคลเซียมคลอไรด์ และโพลิเมอร์ ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับการผสมด้วยน้ำ

จากรูปจะเห็นได้ว่าในการใช้น้ำเปล่า ผสมกับดินลูกรังแล้วทำการทดสอบการบดอัด ดินลูกรังตัวอย่างมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดประมาณ 19.6 กิโลนิวตัน/ลบ.ม. ที่ความชื้น 10.6% เมื่อเปรียบเทียบกับการผสมกับสารเคมี การใช้ โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ จะทำให้ดินลูกรังมีความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น และทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีเนื่องมาจาก โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ เป็นสารที่ช่วยในการบดอัดดิน ทำให้ชั้นวงน้ำ (Double Layer) มีความหนาลดลง และลดแรงผลักระหว่างอนุภาค (R) ทำให้เม็ดดิน โดยเฉพาะดินเม็ดละเอียดขยับเข้าใกล้กันมากขึ้น ส่วนโพลิเมอร์อิมัลชัน ซึ่งโพลิเมอร์อิมัลชันที่ใช้ในการวิจัยมีชื่อทางการค้าว่า Primal AC –261 เป็น anionic polymer ซึ่งเมื่อผสมกับดินจะทำให้ดินมีแนวโน้มที่จะมีโครงสร้างเป็นระเบียบ (Disperse) เพิ่มขึ้น จึงเป็นสารที่ช่วยในการบดอัดดิน ให้แน่นได้ง่ายขึ้น แต่เนื่องจากการผสมสารเคมีกับดิน ใช้ปริมาณความเข้มข้นไม่มากนัก จึงช่วยทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งหลังการบดอัดเพิ่มขึ้นไม่มากนัก โดยความหนาแน่นแห้งสูงสุดของแต่ละสารเคมีที่ผสมลงไปในดินแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4

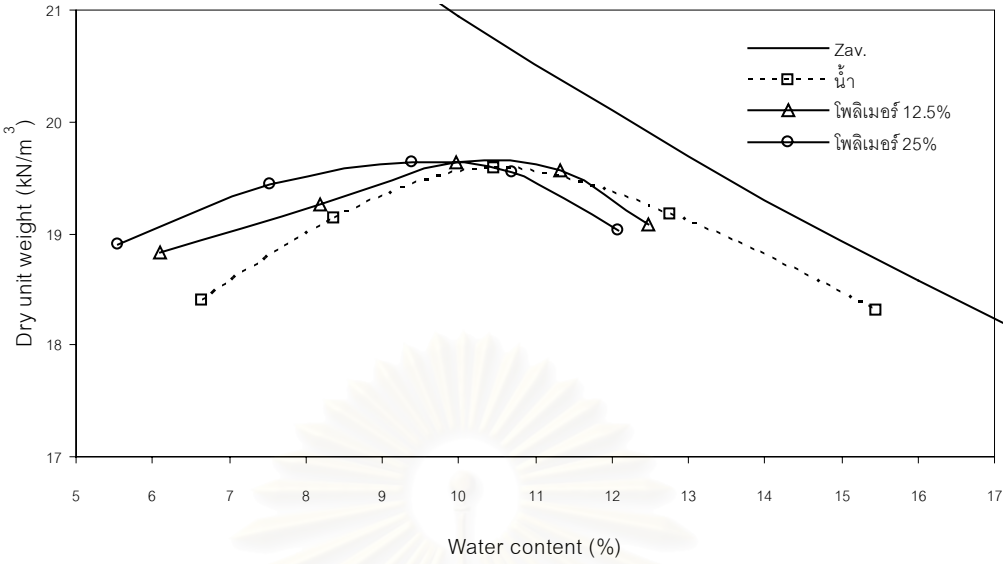


รูปที่ 4.1 Compaction curves ของดินลูกรังผสมโซเดียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมน้ำ



รูปที่ 4.2 Compaction curves ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

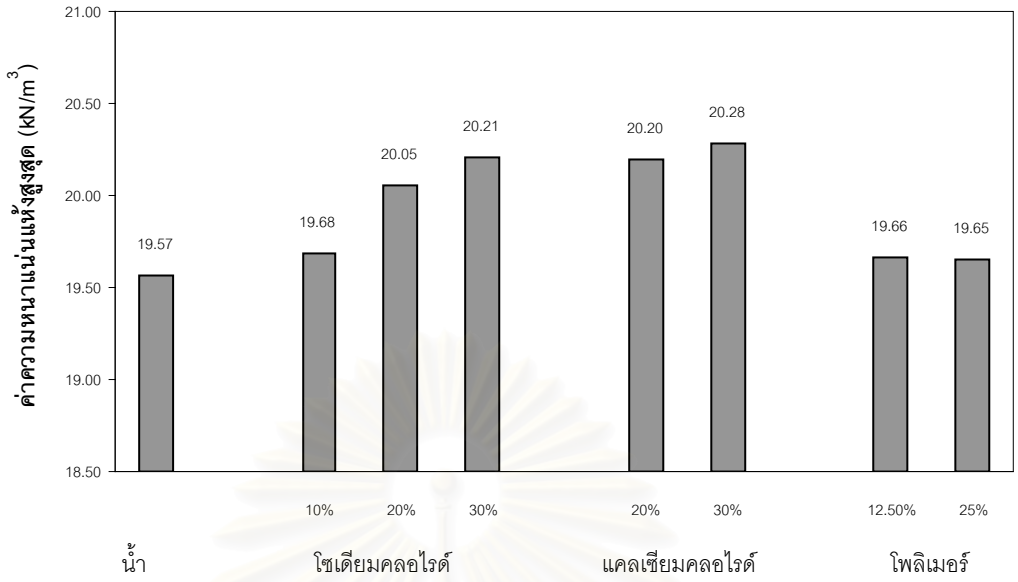


รูปที่ 4.3 Compaction curves ของดินลูกรังผสมโพลิเมอร์อิมัลชัน เปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมน้ำ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัดส่วนผสม ดินกับสารเคมี

ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด กิโลนิวตัน / ลบ.ม.	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม %
น้ำ	19.57	10.6
โซเดียมคลอไรด์ 10%	19.68	10.9
โซเดียมคลอไรด์ 20%	20.05	10.2
โซเดียมคลอไรด์ 30%	20.21	9.7
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	20.20	9.0
แคลเซียมคลอไรด์ 30%	20.28	8.8
โพลิเมอร์ 12.5%	19.66	10.5
โพลิเมอร์ 25%	19.65	9.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมของดินกับสารเคมี

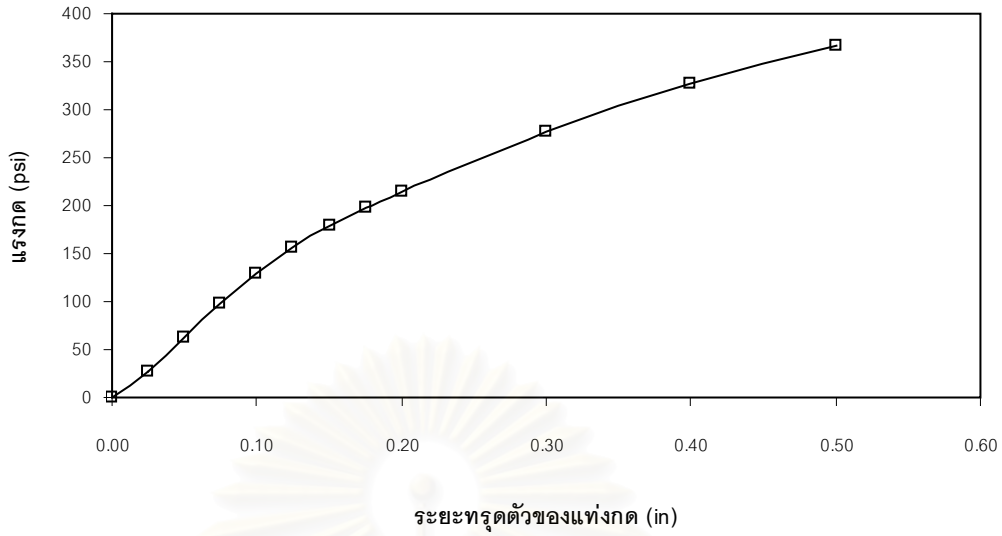
4.1.2 การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR)

โดยผสมดินกับสารเคมี ตามความชื้นที่เหมาะสม ที่ได้มาจากการทดสอบการบดอัด แล้วทำการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) แบบแช่น้ำ (Soak) ผลการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักแสดงดังตารางที่ 4.2

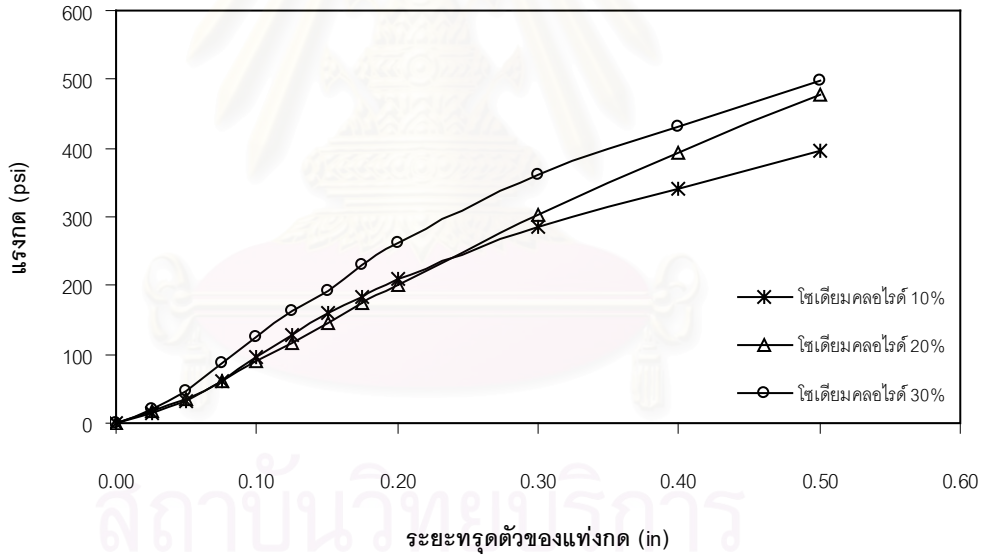
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) สภาพแช่น้ำของส่วนผสม ดินกับสารเคมี

ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m^3)		การค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) สภาพแช่น้ำ	การพองตัว
	ก่อนแช่น้ำ	หลังแช่น้ำ	ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ 0.2 นิ้ว (%)	(%)
น้ำ	19.58	19.27	15.0	1.38
โซเดียมคลอไรด์ 10%	19.88	19.30	16.3	1.91
โซเดียมคลอไรด์ 20%	19.80	19.46	15.7	1.89
โซเดียมคลอไรด์ 30%	20.05	19.64	19.3	1.88
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	19.93	19.65	16.7	1.84
แคลเซียมคลอไรด์ 30%	20.04	19.44	18.3	1.93
โพลิเมอร์ 12.5%	19.02	18.71	15.5	1.23
โพลิเมอร์ 25%	19.45	18.95	19.0	1.30

รูปที่ 4.5-4.12 แสดงความสัมพันธ์ ของหน่วยแรงและการทรุดตัวของแท่งกด (Penetration) ของตัวอย่างดินต่างๆ

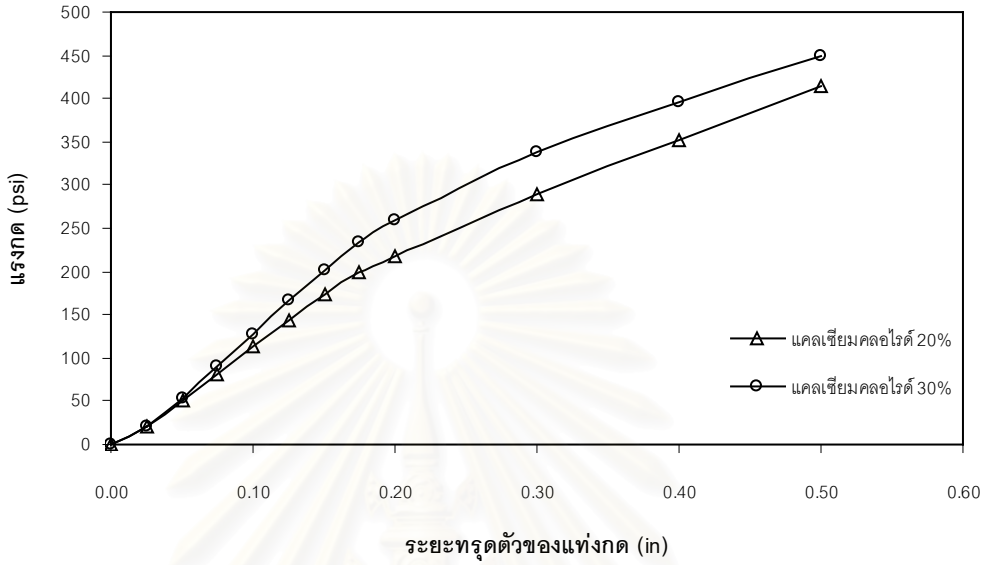


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรัง ผสมน้ำ

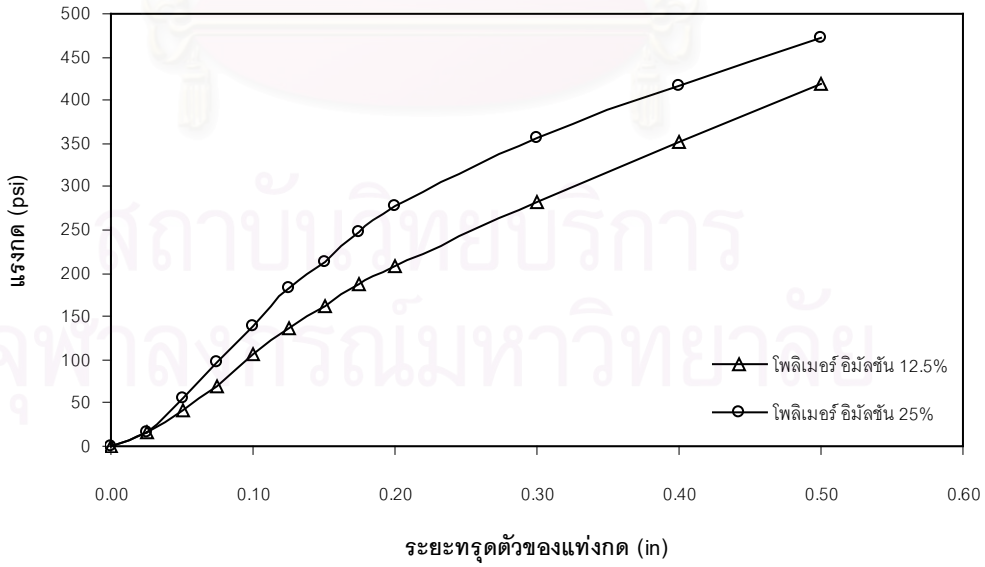


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรัง ผสมโซเดียมคลอไรด์

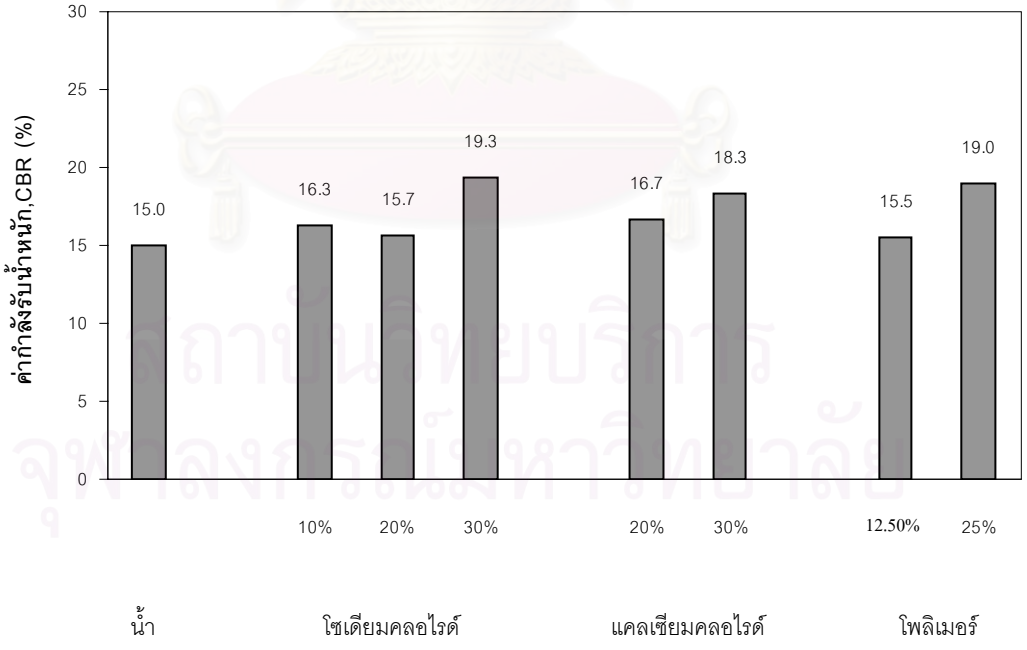


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรัง ผสมแคลเซียมคลอไรด์



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และการทรุดตัวของแท่งกด ของดินลูกรัง ผสมโพลิเมอร์

จากรูปและผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าในการใช้น้ำเปล่าผสมกับดินลูกรังแล้วทำการทดสอบการรับน้ำหนัก (CBR) แบบแช่น้ำ ดินลูกรังตัวอย่างมีค่า CBR อยู่ที่ประมาณ 15% เมื่อเปรียบเทียบกับการผสมกับสารเคมี การใช้โซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับน้ำหนักของดินซึ่ง เนื่องจากการเพิ่มของ Ion valence และ Electrolyte concentration ในดินจากประจุของสารทั้งสองมีส่วนทำให้ดินมีแนวโน้มที่จะมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculate) และดินที่บดอัดแน่นขึ้นเนื่องจากชั้นวงน้ำ (Double Layer) มีความหนาลดลง จึงทำให้ดินลูกรังตัวอย่างที่ทดสอบ สามารถรับแรงเฉือนได้ดีขึ้น ส่วนโพลิเมอร์ ตาม ทฤษฎีแล้วเมื่อผสมลงไปในดินจะทำให้ดินมีโครงสร้างเป็นระเบียบ (Disperse) เพิ่มขึ้น จึงทำให้รับแรงเฉือนได้น้อยลงหลังการผสมในทันที แต่การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) ซึ่งทำการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) หลังจากผ่านไป 4วัน เมื่อนำตัวอย่างดินมาทดสอบรับแรงกด โพลิเมอร์ที่ผสมอยู่ในดินจะแข็งตัว เพราะฉะนั้นค่ากำลังรับน้ำหนักจึงไม่เป็นไปตามทฤษฎี ที่กล่าวถึงเฉพาะผลที่เกิดจากประจุลบของโพลิเมอร์ โพลิเมอร์ที่แข็งตัวจะเกี่ยวเนื่องกันเป็นโครงสร้างที่ช่วยทำให้ดินแข็งแรงขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าโพลิเมอร์สามารถช่วยให้ดินรับแรงเฉือนได้ดีขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) แบบแช่น้ำ ของดินลูกรังผสมสารเคมีชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) แบบแช่น้ำเปรียบเทียบส่วนผสมของดินกับสารเคมีชนิดต่างๆ

4.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้า ด้วยสารเคมี

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี แสดงดังตารางที่ 4.3 ถึง 4.4 และรูปที่ 4.10 ถึง 4.13

ตารางที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินตามระยะเวลาภายหลังการราดสารเคมี

ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	อัตราการราด ลิตร/ตร.ม.	ค่าปริมาณความชื้นของดิน (%) หลังการราดสารเคมีผ่านไป (วัน)					
		0	1	3	7	14	21
ไม่ราดสารเคมี	-	11.09	9.16	6.69	4.74	3.39	3.29
น้ำ	2.5	11.66	9.22	6.96	5.07	3.65	3.38
โซเดียมคลอไรด์ 10%	2.5	13.03	10.90	7.97	6.34	5.87	4.16
โซเดียมคลอไรด์ 20%	2.5	10.87	9.97	8.09	6.16	5.98	4.33
โซเดียมคลอไรด์ 20%	5.0	10.53	9.86	9.17	7.81	7.42	6.16
โซเดียมคลอไรด์ 30%	2.5	13.10	11.49	9.03	7.83	6.96	5.03
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	2.5	12.49	10.71	9.11	6.69	5.03	5.12
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	5.0	13.02	11.58	9.82	7.64	6.36	6.27
แคลเซียมคลอไรด์ 30%	2.5	11.67	9.85	8.00	6.43	5.12	5.06
โพลิเมอร์ 12.5%	2.5	11.44	9.04	7.15	5.54	4.71	4.06
โพลิเมอร์ 25%	2.5	12.32	10.19	7.30	5.89	5.04	4.34
โพลิเมอร์ 25%	5.0	12.55	10.31	7.88	6.53	5.78	5.30
แอสฟัลต์ อิมัลชัน 12.5%	2.5	13.32	11.28	9.39	6.90	4.71	4.40
แอสฟัลต์ อิมัลชัน 25%	2.5	11.59	9.93	8.44	6.21	4.71	4.34
แอสฟัลต์ อิมัลชัน 25%	5.0	13.27	11.60	9.14	7.42	5.84	5.49

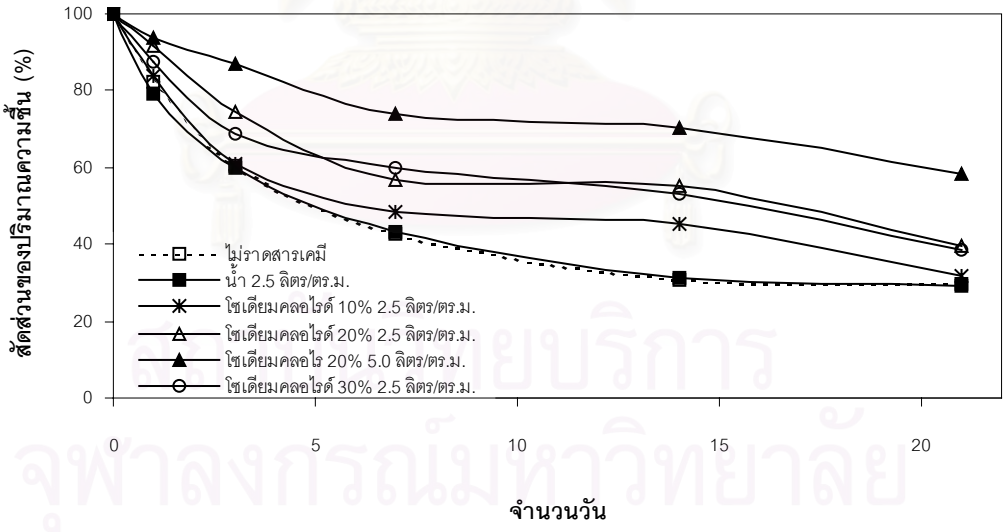
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนของปริมาณความชื้นของดิน ที่เหลืออยู่ภายหลังการราดสารเคมี

ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	อัตราการราด ลิตร/ตร.ม.	สัดส่วนของปริมาณความชื้นของดิน (%)* หลังการราดสารเคมีผ่านไป (วัน)					
		0	1	3	7	14	21
ไม่ราดสารเคมี	-	100	82.53	60.30	42.75	30.55	29.65
น้ำ	2.5	100	79.13	59.73	43.49	31.34	28.95
โซเดียมคลอไรด์ 10%	2.5	100	83.64	61.17	48.67	45.06	31.91
โซเดียมคลอไรด์ 20%	2.5	100	91.77	74.41	56.65	55.05	39.82
โซเดียมคลอไรด์ 20%	5.0	100	93.63	87.12	74.19	70.46	58.50
โซเดียมคลอไรด์ 30%	2.5	100	87.68	68.92	59.79	53.13	38.40

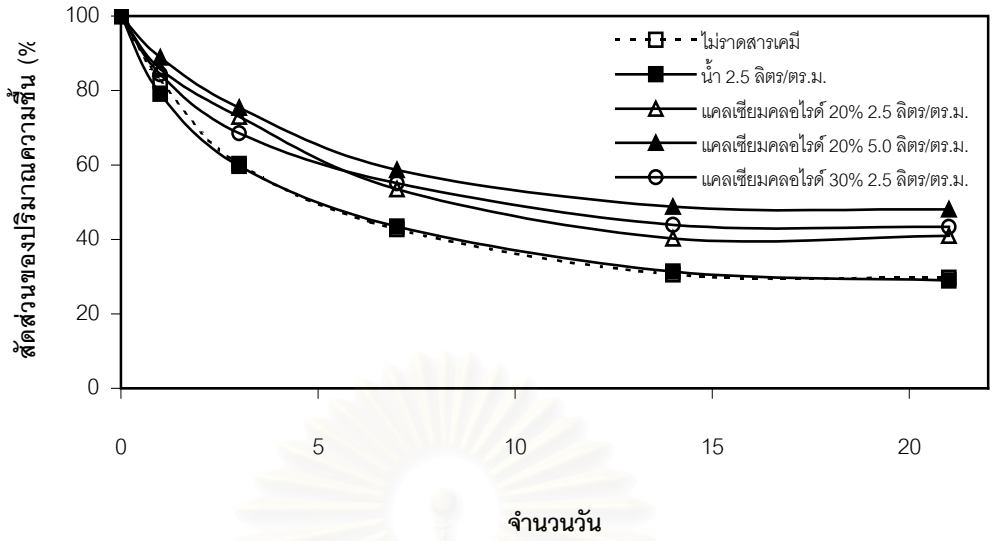
ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	อัตราการราด ลิตร/ตร.ม.	สัดส่วนของปริมาณความชื้นของดิน (%)* หลังการราดสารเคมีผ่านไป (วัน)					
		0	1	3	7	14	21
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	2.5	100	85.77	72.96	53.54	40.30	41.01
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	5.0	100	88.89	75.42	58.64	48.81	48.12
แคลเซียมคลอไรด์ 30%	2.5	100	84.35	68.52	55.07	43.87	43.39
โพลิเมอร์ 12.5%	2.5	100	79.06	62.51	48.42	41.20	35.47
โพลิเมอร์ 25%	2.5	100	82.69	59.27	47.79	40.88	35.25
โพลิเมอร์ 25%	5.0	100	82.18	62.84	52.06	46.07	42.25
แอสฟัลต์ อิมัลชัน 12.5%	2.5	100	84.65	70.50	51.76	35.33	33.03
แอสฟัลต์ อิมัลชัน 25%	2.5	100	85.66	72.78	53.60	40.66	37.45
แอสฟัลต์ อิมัลชัน 25%	5.0	100	87.40	68.92	55.93	43.99	41.38

หมายเหตุ

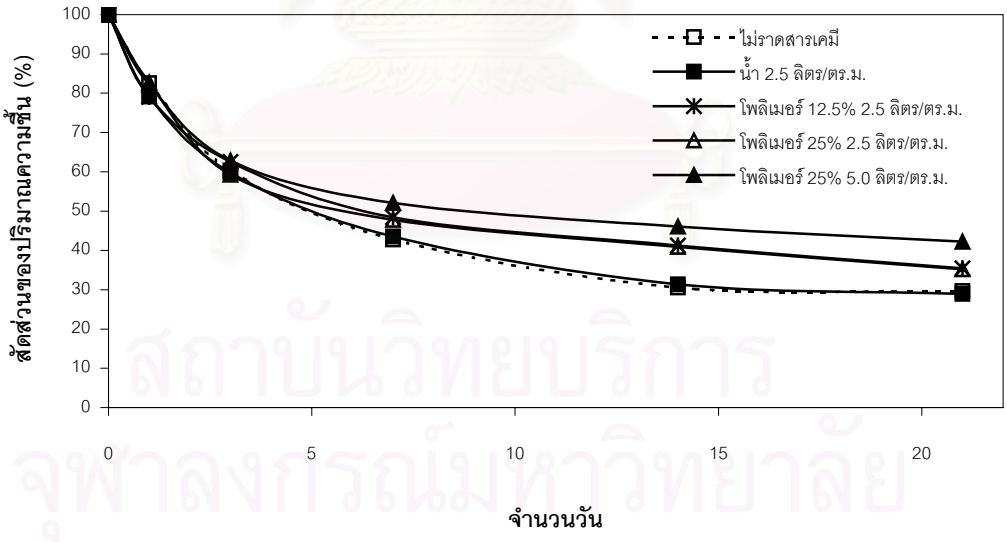
* สัดส่วนปริมาณความชื้นของดินที่คงเหลืออยู่ (%) = $\frac{\text{ปริมาณความชื้นของดินที่วันใดๆ}}{\text{ปริมาณความชื้นของดินวันที่ 0}} \times 100\%$



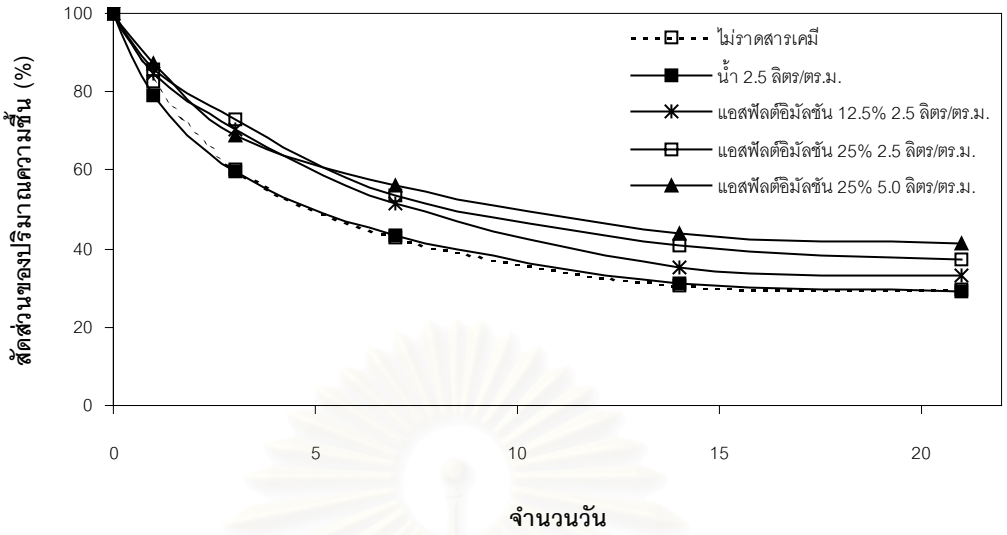
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลา หลังการราดสารโซเดียมคลอไรด์



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลา หลังการราดสารแคลเซียมคลอไรด์



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลา หลังการราดสารโพลิเมอร์



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณความชื้นของผิวดิน ที่ยังคงเหลืออยู่ ตามระยะเวลา หลังการราดสารแอสฟัลต์อิมัลชัน

จากผลการทดสอง ดังตารางที่ 4.3 ถึง 4.4 และรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 จะเห็นได้ว่าการราดน้ำเปล่า 2.5 ลิตร/ตร.ม. ไม่มีผลต่อการช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นของผิวดินลูกรัง และในระยะยาว ความชื้นที่คงเหลืออยู่ในผิวดินจะไม่แต่ต่างจากการไม่ราดน้ำ ซึ่งมีความชื้นที่ผิวดินประมาณ 3.29% ที่ 21 วันของการทดสอบ

โซเดียมคลอไรด์ และ แคลเซียมคลอไรด์

การใช้สาร สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10% ที่อัตราการราด 2.5 ลิตร/ตร.ม. คิดเป็นปริมาณสารที่ใช้ต่อพื้นที่เท่ากับ 0.25 กิโลกรัม/ตร.ม. สามารถรักษาความชื้นไว้ที่ผิวดินได้มากขึ้นจากการไม่ราดสารเคมีพอสมควร หลังจากเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมี เป็น 20% และ30% ที่อัตราการราดเท่าเดิม ซึ่งคิดเป็นปริมาณสารที่ใช้ต่อพื้นที่เท่ากับ 0.5 และ0.75 กิโลกรัม/ตร.ม. การรักษาความชื้นก็จะดีขึ้นตามปริมาณสารเคมีที่เพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่มากกว่าที่ความเข้มข้น 10% อย่างเด่นชัดนัก แต่การเพิ่มอัตราการราด ของสารที่ความเข้มข้น 20% จาก 2.5 ลิตร/ตร.ม. เป็น 5.0 ลิตร/ตร.ม. คิดเป็นปริมาณสารที่ใช้ต่อพื้นที่เท่ากับ 1 กิโลกรัม/ตร.ม. มีผลต่อการช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นจากผิวดินได้ดีขึ้นมาก

การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 20% และ 30% ที่อัตราการราด 2.5 ลิตร/ตร.ม. คิดเป็นปริมาณสารที่ใช้ต่อพื้นที่เท่ากับ 0.5 และ0.75 กิโลกรัม/ตร.ม. สามารถรักษาความชื้นไว้ที่ผิวดินได้ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ก็ยังรักษาความชื้นได้ดีกว่าผิวดินที่ไม่ราดสารเคมีอยู่มาก และรักษาความชื้นได้มากกว่า การใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในปริมาณที่เท่ากันอยู่เล็ก

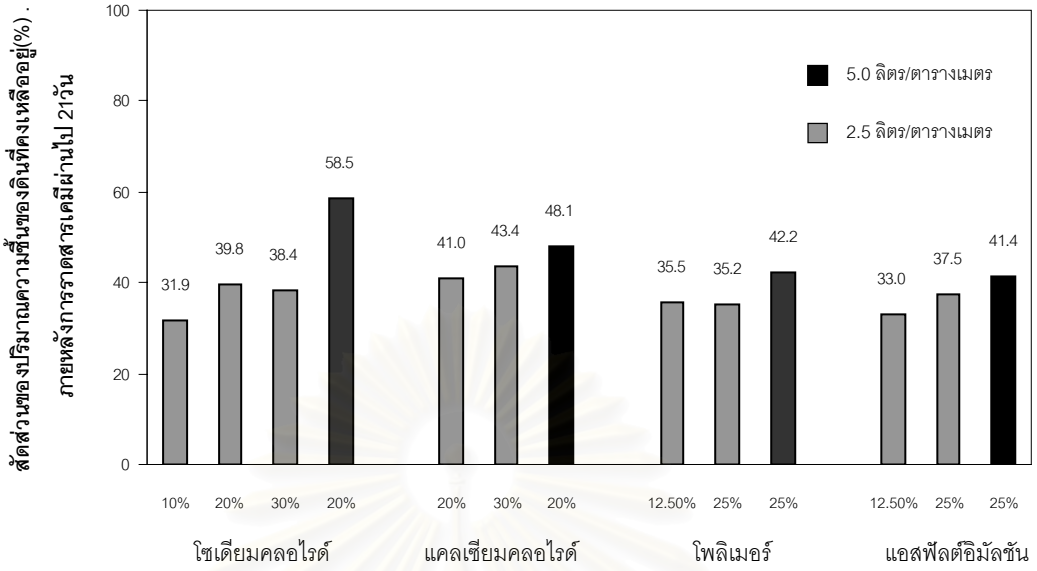
น้อย แต่การเพิ่มอัตราการราดสารแคลเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 20% จาก 2.5 ลิตร/ตร.ม. เป็น 5.0 ลิตร/ตร.ม. คิดเป็นปริมาณสารที่ใช้ต่อพื้นที่เท่ากับ 1 กิโลกรัม/ตร.ม. มีผลต่อการช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นจากผิวดินได้ดีขึ้นมากในลักษณะเดียวกันกับ การใช้สารโซเดียมคลอไรด์

จึงสรุปได้ว่าการใช้สารจำพวกเกลือ ทั้งโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ แม้การใช้ที่ปริมาณเล็กน้อยถึงปานกลาง ที่ประมาณ 0.25-0.75 กิโลกรัม/ตร.ม. ก็สามารถช่วยลดการสูญเสียความชื้นจากผิวหน้าดินได้ แตกต่างจากการราดน้ำเปล่าอยู่มาก แต่ถ้าจะให้เห็นผลที่ชัดเจนที่สุด คือการใช้สารที่ปริมาณ 1 กิโลกรัม/ตร.ม. จะให้ผลของการรักษาความชื้นที่ดีขึ้นแตกต่าง จากการใช้ที่ 0.25-0.75 กิโลกรัม/ตร.ม.อยู่มากพอสมควร ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 และจากการพิจารณารูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า สารแคลเซียมคลอไรด์ เริ่มรักษาความชื้นให้คงที่ได้ ภายหลังจากเริ่มทดสอบประมาณ 14 วัน หลังจากนั้นไปความชื้นที่อยู่ในดินเริ่มจะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากคุณสมบัติ ในการรักษาความชื้น และดูดความชื้นจากบรรยากาศมาทดแทนความชื้นที่สูญเสียไปได้ ส่วนสารโซเดียมคลอไรด์ แม้จะรักษาความชื้นได้ดี แต่คุณสมบัติในการดูดความชื้นจากบรรยากาศทำได้ไม่ดีเท่ากับ สารแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความชื้นถึงแม้จะมีอยู่สูงใน วันที่ 14 ของการทดสอบ แต่ก็มีแนวโน้ม ที่จะลดลงไปได้อีก ในวันต่อๆไป

โพลิเมอร์อิมัลชัน และ แอสฟัลต์อิมัลชัน

การใช้สาร โพลิเมอร์อิมัลชัน และ แอสฟัลต์อิมัลชัน รักษาความชื้นได้ด้วยการปกคลุมพื้นผิวกั้นความชื้นที่จะระเหยออกไป และให้ผลในการรักษาความชื้นที่คล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยที่ สารแอสฟัลต์อิมัลชัน จะให้ผลที่ดีกว่าเล็กน้อย เนื่องจากว่า แอสฟัลต์อิมัลชันเมื่อก่อตัวขึ้นเป็นเนื้อยางแล้ว จะเป็นยางหนืด ที่สามารถยืดหยุ่นตัวไปตามการหดตัวและแตกร้าว ของผิวหน้าดินเนื่องจากถูกแสงไฟได้บ้าง ช่องว่างที่เกิดขึ้นจึงอาจน้อยกว่า การใช้สารโพลิเมอร์อิมัลชัน ที่เมื่อก่อตัวแล้วจะกลายเป็นของแข็ง ยืดหยุ่นตัวได้น้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบก็ถือว่าต่างกันน้อยมาก

การใช้สารโพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชัน ความเข้มข้น 12.5% และ 25% ที่อัตราการราด 2.5 ลิตร/ตร.ม. และ ความเข้มข้น 25% ที่อัตราการราด 5.0 ลิตร/ตร.ม. คิดเป็นปริมาณสารที่ใช้ต่อพื้นที่ประมาณ 0.3, 0.6 และ 1.2 กิโลกรัม/ตร.ม.ตามลำดับ สามารถรักษาความชื้นได้น้อยกว่าการใช้สารจำพวกเกลือ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันอยู่บ้าง เพราะว่า สารดังกล่าวไม่สามารถดูดความชื้นจากบรรยากาศ มาทดแทนความชื้นที่สูญเสียไปได้บ้างเหมือนสารจำพวกเกลือ แต่ก็ถือว่ายังรักษาความชื้นได้ดีกว่าการไม่ราดสารเคมีอยู่มาก โดยความสามารถในการรักษาความชื้น แปรผันไปตามปริมาณสารเคมีที่ใช้อย่างเป็นสัดส่วน โดยการเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณความชื้นที่คงเหลืออยู่เทียบจากเริ่มต้นของสารเคมี ทั้ง 4 ชนิด ของการทดสอบที่ 21วัน ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 สัดส่วนของปริมาณความชื้นของดินที่คงเหลืออยู่ภายหลังการราดสารเคมี 21 วัน

4.3 ผลการศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริง

ผลการทดสอบการศึกษาการหลุดร่อนภายใต้สภาวะจำลองการใช้งานจริงภายหลังการราดผิวหน้าด้วยสารเคมี แสดงดังตารางที่ 4.5, 4.6 และ รูปที่ 4.15, 4.16

โดยขั้นตอนการทดสอบและลักษณะของพื้นผิวดินขณะทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยตัวอย่างเป็นการราดด้วยสารแอสฟัลต์อิมัลชันความเข้มข้น 25% อัตราการราด 2.5 ลิตร/ตร.ม.

ตารางที่ 4.5 ปริมาณดินที่หลุดร่อนสะสมจากผิวทางขณะทำการทดสอบ

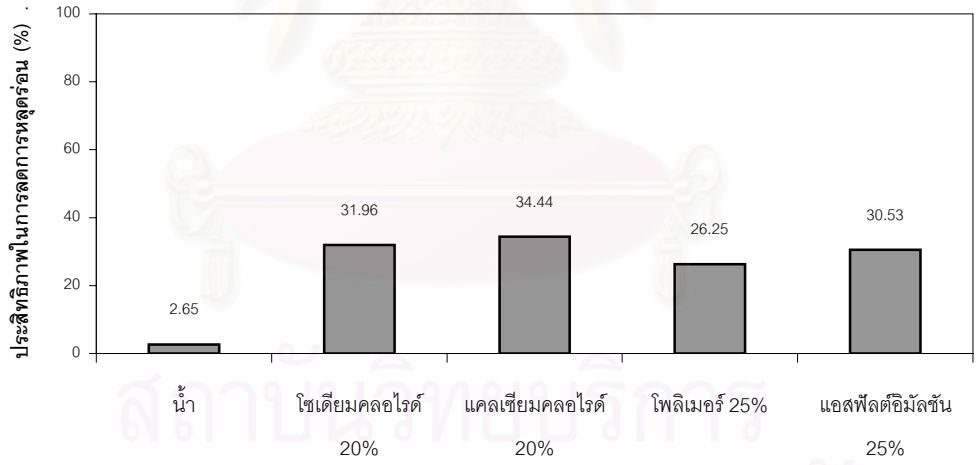
ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	อัตราการราด	ปริมาณดินที่หลุดร่อนสะสม (กรัม) หลังการราดสารเคมีผ่านไป (นาที)					
	ลิตร/ตร.ม.	30	60	120	180	240	300
ไม่ราดสารเคมี	-	1415.9	2857.9	5048.0	6024.1	6678.4	7162.7
น้ำ	2.5	1359.8	2742.1	4842.3	5837.5	6475.8	6973.0
โซเดียมคลอไรด์ 20%	2.5	1224.7	2524.6	3649.2	4187.1	4528.7	4873.8
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	2.5	1213.6	2443.5	3283.8	3819.8	4255.0	4695.8
โพลิเมอร์อิมัลชัน25%	2.5	810.6	1962.9	3317.7	4295.4	4876.8	5282.5
แอสฟัลต์อิมัลชัน 25%	2.5	718.7	1869.7	3178.3	4055.1	4594.5	4976.0

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการลดปริมาณดินที่หลุดร่อนจากผิวทางภายหลังการราดสารเคมี

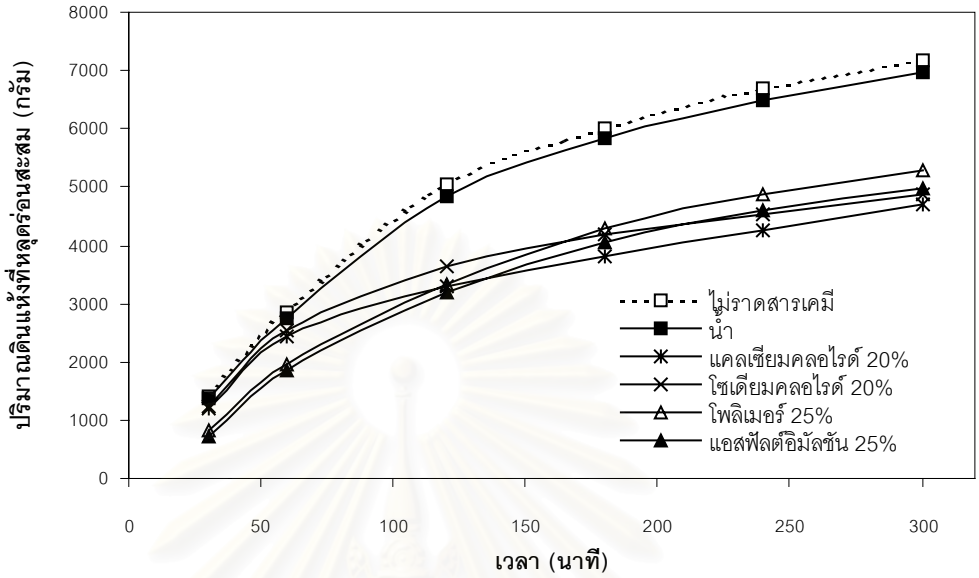
ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	อัตราการราด ลิตร/ตร.ม.	ประสิทธิภาพในการลดปริมาณดินที่หลุดร่อน (%)* ที่การทดสอบ ณ เวลา 300 นาที
ไม่ราดสารเคมี	-	-
น้ำ	2.5	2.65
โซเดียมคลอไรด์ 20%	2.5	31.96
แคลเซียมคลอไรด์ 20%	2.5	34.44
โพลิเมอร์ 25%	2.5	26.25
แอสฟัลต์ อิมัลชัน 25%	2.5	30.53

หมายเหตุ

$$* \text{ประสิทธิภาพ (\%)} = \left[1 - \frac{\text{ปริมาณดินที่หลุดร่อนสะสมจากผิวทางที่ราดสารเคมีของการทดสอบ ณ เวลา 300 นาที}}{\text{ปริมาณดินที่หลุดร่อนสะสมจากผิวทางที่ไม่ราดสารเคมีของการทดสอบ ณ เวลา 300 นาที}} \right] \times 100\%$$



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อนของสารเคมีแต่ละชนิด (%)



รูปที่ 4.16 ปริมาณดินแห้งที่หลุดร่อนสะสม (กรัม) ตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบ

จากตารางที่ 4.5, 4.6 และรูปที่ 4.15, 5.16 จะเห็นได้ว่า การราดน้ำเปล่าที่อัตราการราด 2.5 ลิตรต่อตารางเมตร ไม่มีผลช่วยลดการหลุดร่อนของพื้นผิวเท่าใดนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผิวหน้าที่ไม่ราดสารเคมี โดยมีประสิทธิภาพของการลดการหลุดร่อน เทียบกับผิวดินที่ไม่ราดสารเคมีเท่ากับ 2.65% ณ เวลาการทดสอบ 300 นาที

จากการทดสอบพบว่า การราดสารโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ ที่อัตราความเข้มข้น 20% ที่อัตราการราด 2.5 ลิตร/ตร.ม. คิดเป็นปริมาณสาร 0.5 กิโลกรัม/ตร.ม. ให้ประสิทธิภาพในการช่วยลดการหลุดร่อนแตกต่างกันเล็กน้อย โดยโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการช่วยลดการหลุดร่อนเท่ากับ 31.96% และ 34.44% ตามลำดับ ณ เวลาทดสอบ 300 นาที เมื่อเทียบกับการไม่ราดสารเคมีที่ผิวหน้าดิน

จากทดสอบพบว่าการราด สารโพลิเมอร์อิมัลชัน และสารแอสฟัลต์อิมัลชัน ที่อัตราความเข้มข้น 25% ที่อัตราการราด 2.5 ลิตรต่อตารางเมตร คิดเป็นปริมาณสาร 0.625 กิโลกรัม/ตร.ม. ให้ประสิทธิภาพในการช่วยลดการหลุดร่อนแตกต่างกัน โดยโพลิเมอร์และแอสฟัลต์อิมัลชันให้ประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อน 26.25% และ 30.53% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการที่ไม่ราดสารเคมีที่ผิวหน้าดิน ณ เวลาทดสอบ 300 นาที

จากผลของประสิทธิภาพที่ได้ แคลเซียมคลอไรด์ ถือว่าลดการหลุดร่อนได้ดีที่สุด เนื่องจากว่าสามารถรักษาความชื้นในดินได้ดี ดินจึงเกาะตัวกันได้ดี เป็นลักษณะที่คล้ายกันกับ

โซเดียมคลอไรด์ ส่วน โพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชันมีพฤติกรรมที่โดดเด่นในการไปเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้แก่เม็ดดิน โดยการไปแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดินขณะยังเป็นของเหลว แล้วยึดเกาะเม็ดดินไว้ขณะก่อตัว โดยที่โพลิเมอร์อิมัลชัน จะก่อตัวเป็นของแข็ง ส่วนแอสฟัลต์อิมัลชัน จะก่อตัวเป็นสารกึ่งของแข็ง สารทั้งสองจะซึมลงไปที่ผิวหน้าดินได้น้อยกว่าสารละลายจำพวกเกลือซึ่งสังเกตได้จากการทดสอบ จึงมีผลที่ดีในช่วงแรกๆ เท่านั้น โดยในช่วง 120 นาทีแรกของการทดสอบพื้นผิวดินมีการหลุดร่อนน้อยกว่าการใช้สารจำพวกเกลือ ที่ใช้กลไกในการลดการหลุดร่อนโดยการรักษาความชื้นให้แก่ผิวดิน แต่เมื่อการทดสอบผ่านไป สารโพลิเมอร์อิมัลชัน และสารแอสฟัลต์อิมัลชัน เริ่มหลุดตามเม็ดดินที่หลุดร่อนออกมาจากผิวหน้าดิน การลดการหลุดร่อนก็ทำได้ไม่ดีเท่าสารโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ที่ใช้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยสังเกตได้จากการหลุดร่อนสะสม ดังรูปที่ 4.16

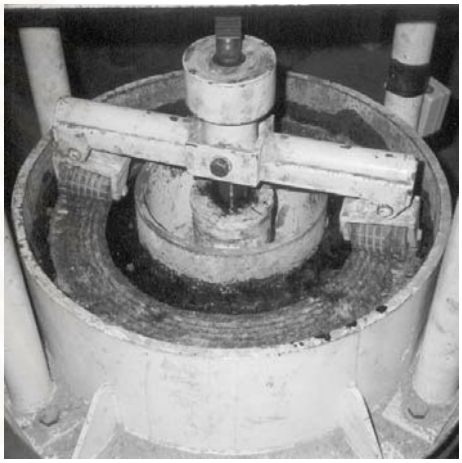
สาเหตุ ที่ การใช้สารโพลิเมอร์อิมัลชัน ให้ประสิทธิภาพที่ไม่สูง เทียบเท่าสารอื่นๆ เนื่องมาจาก ซึมลงไปในดินได้ไม่ลึกนัก และเมื่อก่อตัวจะกลายเป็นของแข็ง พอดินมีการรับน้ำหนักและการหมุนของล้อจำลอง ดินก็จะมีการเคลื่อนตัวทั้งในแนวดิ่ง และทางด้านข้าง รวมทั้งการถูกเสียดสี โพลิเมอร์ที่แข็งตัวไม่มีความยืดหยุ่นพอ จึงสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้บ้างในบริเวณที่มีการรวมตัวของโพลิเมอร์มากๆ ซึ่งต่างจากลักษณะของการใช้ สารแอสฟัลต์ที่ยังเหนียวหนืดขณะใช้งาน และถึงแม้ว่าจะมีพฤติกรรมที่ดี ในการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเหมือนกัน แต่ประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อนที่ได้ก็ต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

(จ)

(ฉ)

รูปที่ 4.17 ขั้นตอนการทดสอบในการราดผิวหน้าดินด้วยสารแอสฟัลต์อิมัลชัน (ก) ผสมดินกับน้ำตามความชื้นที่เหมาะสม (ข) บดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นประมาณ 2 ตัน/ลบ.ม. (ค) ราดผิวหน้าด้วยสารแอสฟัลต์อิมัลชัน (ง) เมื่อผิวหน้าแห้งดีแล้วเริ่มทำการทดสอบ (จ) ผิวหน้าดินเมื่อทำการทดสอบผ่านไป 5 นาที (ฉ) ผิวหน้าดินเมื่อทำการทดสอบผ่านไป 1 ชั่วโมง

4.4 การประเมินค่าใช้จ่ายในการลดการหลุดร่อน โดยใช้สารเคมีราดที่พื้นผิวดิน

การปฏิบัติงานจริงในการราดสารเคมีที่พื้นผิวดิน โดยพื้นผิวดินนั้นอาจจะเป็นถนน, ไหล่ทาง, ลานจอดรถ ฯลฯ จะต้องมีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานอยู่หลายประการ แยกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ

1) ค่าสารเคมี (Material Cost)

2) ค่าปฏิบัติงานในภาคสนาม (Application Cost) ซึ่งรวมถึงค่าเครื่องจักร, ค่าควบคุมเครื่องจักร และค่าแรง

รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของการราดสารโซเดียมคลอไรด์ สารแคลเซียมคลอไรด์ สารโพลิเมอร์อิมัลชัน สารแอสฟัลต์อิมัลชัน และการราดน้ำแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบการประเมินค่าใช้จ่ายในการลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ของแต่ละสารเคมี

	น้ำ	โซเดียมคลอไรด์	แคลเซียมคลอไรด์	โพลิเมอร์อิมัลชัน	แอสฟัลต์อิมัลชัน
ค่าสารเคมี					
ความเข้มข้นที่ผสมกับน้ำ (%)	-	20	20	25	25
อัตราการราดที่ผิวดิน (ลิตร/ตร.ม)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม (กิโลกรัม/ตร.ม)	2.5	2.305	2.259	1.914	1.875
ปริมาณสารเคมี (กิโลกรัม/ตร.ม)	-	0.5	0.5	0.625	0.625
ราคาสารเคมี (บาท/กิโลกรัม)	-	6	12	50	9
ราคาสารเคมีที่ใช้ราดดิน (บาท/ตร.ม)*	**-**	**3**	**6**	**31.250**	**5.625**
ค่าปฏิบัติงานในภาคสนาม					
ค่ารถบรรทุก (บาท/ชม.)	460	460	460	448	448
ค่ารถพ่นยาง 6,000 ลิตร (บาท/ชม.)	-	-	-	363	363
รวมค่าเครื่องจักร (บาท/กม.)**	1,840	1,840	1,840	3,244	3,244
รวมค่าเครื่องจักร (บาท/ตร.ม.)	0.307	0.307	0.307.	0.541	0.541
ค่าแรงงาน (บาท/ตร.ม)***	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
รวมค่าปฏิบัติงานในภาคสนาม (บาท/ตร.ม.)	**0.367**	**0.367**	**0.367**	**0.601**	**0.601**
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท/ตร.ม.)	**0.367**	**3.367**	**6.367**	**31.851**	**6.226**
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท/กิโลเมตร)**	**2,202**	**20,202**	**38,202**	**191,106**	**37,356**

* ไม่คิดราคาน้ำเปล่าที่นำมาผสม

** คิดจากถนน ผิวการจราจรกว้าง 6 เมตร, คิดเวลาปฏิบัติงาน 4 ชั่วโมงต่อการปฏิบัติงาน 1 กิโลเมตร

*** จากหลักเกณฑ์การประเมินค่าจ้างแรงงานกรมการเร่งรัดพัฒนาชนบท

จากผลการประเมินค่าใช้จ่ายของการราดสารเคมี ตามความเข้มข้น และอัตราการราดที่ได้ศึกษา ตามตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการราดสารเคมี มาจากราคาของสารเคมี โดยค่าปฏิบัติงาน ซึ่งหมายถึงค่า เครื่องจักร และค่าแรงนั้น มีค่าใช้จ่ายโดยประมาณไม่เกิน 13% ของค่าสารเคมีที่ใช้ ยกเว้นการใช้น้ำเปล่า เนื่องจากไม่คิดราคาค่าน้ำเปล่า

โดยค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าสารเคมี โดยมากจะอยู่ที่ 3-6 บาท/ตร.ม. ยกเว้นการใช้โพลิเมอร์ ที่ยังมีค่าใช้จ่ายของราคาสารเคมีสูงมาก คือ ที่ความเข้มข้น 25% อัตราการราด 2.5 ลิตร/ตร.ม. คิดเป็นปริมาณสาร 0.625 กิโลกรัม/ตร.ม. มีค่าสารเคมีเท่ากับ 31.25 บาท/ตร.ม.

ค่าแรงในการปฏิบัติงาน จะเท่ากันทุกสารเคมี เพราะสารเคมีแต่ละชนิดไม่ได้ทำให้การใช้แรงงาน เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.06 บาท/ตร.ม.

ค่าเครื่องจักรที่ใช้จะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มแรก สารโพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชัน เมื่อละลายน้ำ จะยังมีความหนืดอยู่บ้าง จะใช้เครื่องสูบ และฉีดพ่น แบบธรรมดาไม่ได้ จำต้องมีเครื่องฉีดพ่นโดยเฉพาะ นอกเหนือจากราคาค่ารถบรรทุกเปล่าแล้ว อีกกลุ่ม คือ น้ำ, โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องพ่นพิเศษ โดยใช้เพียงรถบรรทุกน้ำซึ่งมีเครื่องสูบน้ำ และฉีด ในตัว

พิจารณาค่าใช้จ่ายรวม การใช้ แอสฟัลต์อิมัลชัน, โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ มีค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกัน ประมาณ 2-4 หมื่น บาท/กิโลเมตร ส่วนการใช้ โพลิเมอร์อิมัลชัน มีค่าใช้จ่ายที่สูงเกินไป ไม่เหมาะแก่การลงทุนเมื่อเทียบกับการใช้สารเคมีชนิดอื่น โดยมีค่าใช้จ่ายประมาณ 200,000 บาท/กิโลเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพในการลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นโดยใช้สารเคมี ซึ่งทำการทดสอบทางกลโดยใช้ล้อจำลองวิ่งบนผิวหน้าดิน และมีน้ำหนักกดทับ, ศึกษาผลกระทบของการรับน้ำหนัก (CBR) และการรักษาความชื้นของผิวดินเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากผิวหน้าดินบดอัดที่ยังมีความชื้นอยู่เพียงพอ จะเกิดการหลุดร่อน ฟุ้งกระจายของฝุ่นได้น้อยกว่าผิวหน้าที่มีความชื้นอยู่น้อย ซึ่งจากการศึกษาการรักษาความชื้นของผิวดิน ได้ดูผลในระยะยาวว่าสารเคมีใดมีส่วนช่วยในการรักษาความชื้นได้มากน้อยเพียงใด รวมทั้งมีการศึกษาประเมินค่าใช้จ่ายของการดำเนินงาน การลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่นโดยผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. ดินลูกรังที่นำมาทดสอบสามารถนำมาใช้ทำชั้นรองพื้นทางได้ รวมทั้งนำมาเป็นพื้นผิวของถนนที่ไม่ได้ปูผิวทางได้ โดยมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (วิธี Modified Proctor) เท่ากับ 19.57 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้น 10.6% และมีค่ากำลังรับน้ำหนัก (CBR) เท่ากับ 15% และเมื่อนำมาผสมกับสารเคมี ก็ไม่มีสารเคมีใดที่ใช้ในงานวิจัย ทำให้ดินมีกำลังรับน้ำหนัก (CBR) ที่ด้อยลงไปกว่าเดิม

2. สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้น สามารถรักษาความชื้นไว้ที่ผิวดินได้ดีกว่า สารเคมีที่มีลักษณะเป็นฟิล์มปกคลุมที่ผิวดิน และที่เม็ดดิน โดยในการทดสอบการรักษาความชื้นที่ผิวหน้าดินโดยการราดสารเคมี สารเคมีแต่ละชนิดสามารถรักษาความชื้นไว้ในดินได้ดีโดยความชื้นที่ผิวดินจะเริ่มคงที่ ที่ 14 วันหลังการทดสอบ และสารที่รักษาความชื้นได้ดีที่สุดในงานวิจัย คือ สารจำพวกเกลือทั้งโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากสามารถดูดความชื้นได้ ส่วนโพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชัน มีลักษณะเป็นฟิล์มปกคลุมที่ผิวดินไว้ และจะซึมลงไปในชั้นดินได้บ้าง

3. ในการทดสอบการหลุดร่อน ของผิวหน้าดินลูกรังบดอัดแน่น การราดน้ำช่วยลดการหลุดร่อนในช่วงแรกของการทดสอบได้เล็กน้อย ในระยะยาวไม่มีผลของการหลุดร่อนที่แตกต่างจากการไม่ราดสารเคมีที่ผิวหน้าดิน รวมทั้งไม่ช่วยในการรักษาความชื้นอีกด้วย การราด สารโพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชัน จะมีลักษณะเป็นฟิล์มปกคลุมที่ผิวหน้าดิน มีการซึมลงไปที่ใต้ผิวหน้าดินได้บางพอสมควรแต่ก็ไม่เท่า สารจำพวกเกลือ ซึ่งเมื่อทำการทดสอบการหลุดร่อน สารโพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชัน สามารถช่วยลดการหลุดร่อนได้ดีมากในช่วงแรก หลังจากมีการสึกหรอ ลึกลงไปในชั้นดิน สารโพลิเมอร์ และแอสฟัลต์อิมัลชันก็ยังช่วยลดการหลุดร่อนได้ดี

พอสมควร แต่ก็มีการหลุดร่อนสะสมเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้สารจำพวกเกลือ ส่วนการใช้สารจำพวกเกลือ ทั้งโซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ช่วยลดการหลุดร่อนได้ดีมาก แม้ในช่วงแรกของการทดสอบ (120 นาทีแรก) จะมีการหลุดร่อนสะสมมากกว่าการใช้สารโพลิเมอร์ และแอสฟัลต์อิมัลชัน อยู่เล็กน้อยก็ตาม

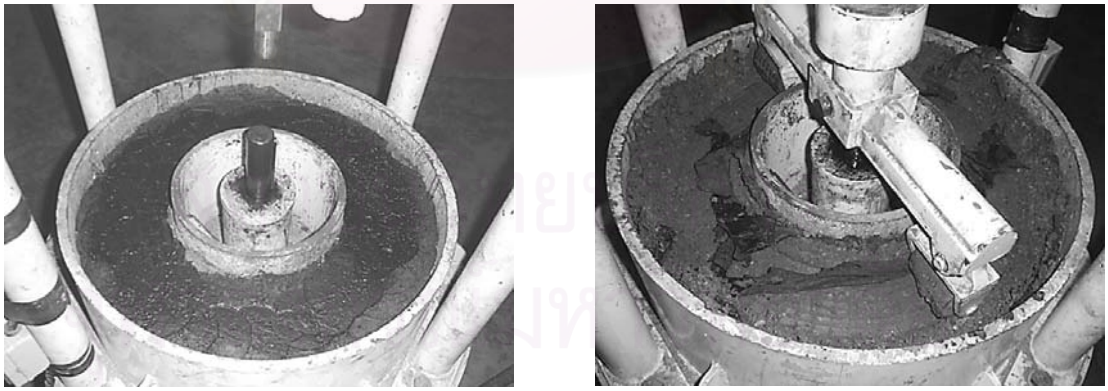
4. การใช้น้ำเปล่า ไม่สามารถตอบสนองความต้องการทางวิศวกรรม จึงไม่เหมาะในการตัดสินใจเลือกมาใช้งานแม้จะมีต้นทุนที่ต่ำมากก็ตาม

5. ถ้าไม่มีการคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมการเลือกใช้ โซเดียมคลอไรด์ เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด คือมีต้นทุนที่ต่ำ และให้ประสิทธิภาพที่น่าพอใจทั้งในการลดการหลุดร่อน, การรักษาความชื้น, และไม่ทำให้กำลังรับน้ำหนักของดิน (CBR) ลดน้อยลง แต่การใช้งานในปัจจุบัน ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ เพราะในงานการลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นงานสาธารณะ มีผลกระทบกับคนจำนวนมาก โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ สามารถละลายน้ำ (โดยเฉพาะจากน้ำฝน) และไหลซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดิน คู คลอง และไร่นา ของประชาชนได้ ซึ่งอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ปริมาณคลอไรด์ของน้ำในดินได้ในภายหลัง ดังนั้นเห็นควรว่าการใช้สารแอสฟัลต์อิมัลชั่นเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งคลอบคลุมความต้องการในทุกด้าน ทั้งการลงทุนก็ใกล้เคียงกับการใช้ สารแคลเซียมคลอไรด์ ประสิทธิภาพก็สูงใกล้เคียงทั้ง สารโซเดียมคลอไรด์ และสารแคลเซียมคลอไรด์ โดยการใช้สารแอสฟัลต์อิมัลชัน เข้มข้น 25% อัตราการราด 2.5 ลิตร/ม^2 จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 38,000 บาท/กม. สามารถการหลุดร่อนได้ประมาณ 30% รวมทั้งเมื่อแข็งตัวแล้วจะไม่ละลายน้ำ ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม และในการปฏิบัติงานก็มีเครื่องจักร และผู้ชำนาญงานพร้อมปฏิบัติงานได้อยู่มาก การราดสารแอสฟัลต์อิมัลชัน อาจทำไปพร้อมกับการซ่อมบำรุงประจำปี ซึ่งส่วนใหญ่จะทำหลังผ่านฤดูฝนไปแล้ว ส่วนการใช้สารโพลิเมอร์ ยังไม่เหมาะสมในปัจจุบัน เนื่องจากมีราคาสารเคมีที่สูงมาก และประสิทธิภาพที่ได้ ก็ยังไม่ถือว่าดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการลดการหลุดร่อนของพื้นผิวดินลูกรังบดอัดแน่น ในทางปฏิบัติแล้วส่วนใหญ่จะเป็นโครงการที่มีขนาดใหญ่เช่น ถนน, ไหล่ทาง หรือลานกว้างๆ ซึ่งจะต้องมีการใช้เงินลงทุนอยู่พอสมควร ดังนั้นการลดราคาค่าสารเคมีได้จะเป็นสิ่งที่ดีมาก เพราะจากการศึกษาค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการดำเนินงานจะอยู่ที่ค่าสารเคมี เช่นในบริเวณที่เป็นพื้นที่ใกล้ทะเล หรือถนนในที่ที่ทำนาเกลือ การนำโซเดียมคลอไรด์ มาใช้ก็ไม่น่าส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเท่าใดนัก ทั้งยังเป็นสารที่ราคาถูกมากและให้ประสิทธิภาพที่ดี หรืออาจจะเลือกใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งมีราคาสูงขึ้นอีกนิดหน่อยก็แล้วแต่ความเหมาะสมของสถานที่ที่ปฏิบัติงาน

การเลือกใช้สารที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบในประเทศก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะทั้งแอสฟัลต์อิมัลชัน และโพลิเมอร์อิมัลชันที่ใช้ในงานวิจัยผลิตจากวัตถุดิบที่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ จึงไม่เป็นผลดีต่อประเทศไทยของเราถ้าต้องมีการนำมาใช้ในปริมาณมากๆ การหันมาใช้วัตถุดิบที่ผลิตได้ในประเทศ เช่นยางพารา จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในอนาคต เพราะเมื่อทำให้เกิดการใช้งานที่มากขึ้นก็จะเป็นผลดีต่อผู้ผลิตวัตถุดิบซึ่งเป็นคนไทย ในการใช้งานอาจนำมาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากยางพาราถ้าอยู่โดยลำพัง อาจบูดเน่าได้ง่าย จากการศึกษาเพิ่มเติมการใช้ยางพารามาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ในสัดส่วนน้ำหนักที่เท่ากันแล้วนำมาผสมกับน้ำให้มี ความเข้มข้น 25 % ราดที่ผิวดินลูกรังบดอัดแน่น แล้วทดสอบการหลุดร่อน ส่วนผสมดังกล่าวจะมีการก่อตัวที่เร็วขึ้นกว่าการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันมาผสมน้ำเพียงอย่างเดียว และจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มเคลือบอยู่ที่ผิวหน้าดินโดยไม่ซึมลงไปยึดเกาะผิวหน้าดิน ทำให้เมื่อทดสอบการหลุดร่อนแผ่นยางจึงหลุดออกมาอย่างรวดเร็ว แต่ไม่มีปัญหาเรื่องการบูดเน่าของยางพารา เพราะฉะนั้นในการใช้ยางพารามาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันควรจะศึกษาการใช้โดยให้มีการใช้ปริมาณยางที่น้อยลงอาจจะใช้เพียง 5-10% ของแอสฟัลต์อิมัลชัน ทั้งยางพารายังมีราคาสูงกว่าแอสฟัลต์อิมัลชันกว่าเท่าตัว โดยในปัจจุบันยางพารามีราคาอยู่ที่ ประมาณกิโลกรัมละ 22 บาท ส่วนแอสฟัลต์อิมัลชันมีราคาอยู่ที่ ประมาณกิโลกรัมละ 9 บาท การใช้ยางพารามากเกินไปจึงอาจไม่เป็นผลดีทั้งทางด้านการยึดเกาะผิวหน้าดินและค่าใช้จ่าย โดยภาพการทดสอบการหลุดร่อนโดยใช้ยางพาราผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ในน้ำหนักที่เท่ากัน (50%) ผสมกับน้ำที่ความเข้มข้น 25 % แสดงดังรูปที่ 5.1



(ก) (ข)

รูปที่ 5.1 การทดสอบการหลุดร่อนโดยใช้ยางพาราผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ในน้ำหนักที่เท่ากันผสมน้ำที่ความเข้มข้น 25% (ก) ยางพาราผสมกับแอสฟัลต์ เคลือบอยู่ที่ผิวหน้าดินก่อนทำการทดสอบ (ข) หลังทำการทดสอบผ่านไป 5 นาที

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, และ วุฒิชัย วัยวุฒิเกียรติ. 2528. กลสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทย ศึกษาเน้นหนักการใช้ประโยชน์ในงานทางหลวง. **รายงานฉบับที่ วว. 96 กองวิเคราะห์วิจัย.** กรมทางหลวง

นิตย์ จิตตสาตรา. 2521. การศึกษาสภาพถนนสำหรับงานบำรุง. **รายงานฉบับที่ วว. 37 กองวิเคราะห์วิจัย.** กรมทางหลวง

ลัดดา มีศุข. 2533. **พจนานุกรมศัพท์เคมี.** เจเนอรัลบุ๊คส์ เซนเตอร์. กรุงเทพฯ. หน้า 71,354

วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, นิตยา มหาผล, และ ธีระ เกรอต. 2536. **มลภาวะอากาศ**. กรุงเทพ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เสนาะ ติเยาว์. 2515. **เศรษฐศาสตร์การบริหาร.** คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. หน้า 122-123

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing Material. **Annual Book of ASTM Standards**. 04,08 (1996)

Bruge, A.G., and Clarkeson, J. 1950. **Highway Design and Construction.** 3rd Edition. (n.p.): 387, 391-397.

Das, B.M. 1994. **Principles of Geotechnical Engineering**. 3rd Edition. Massachusetts: PWS, 67-99.

Hausmann, M.R. 1990. **Engineering Principles of Ground Modification.** McGrow-Hill.

Hewes, L.I., and Oglesby, C.H. 1966. **Highway Engineering.** Tokyo: Modern Asia edition, Charles E.Tuttle Company.

Ingles, O.G., and Metcalf, J.B. 1972. **Soil Stabilization Principles and practice.** Melbourne: Butterworths Pty.

Lambe, T.W. 1953. The Effect of Polymers on Soil Properties. **Proc. Third Intern. Conf. On Soil Mech. And Foundation Eng**, Switzerland. อ้างถึงใน อาคม เตชะธัญญกุล, 2535. **การปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยสารเคมี RRP.** วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Lambe, T.W., and Whitman, R.V. 1979. **Soil Mechanic SI version**. New York: Willey.

Michaels, A.S., and Puzinaskas, V. 1956. Chemical Additives as aids to Asphalt Stabilization of Fine-Grained Soils. **Highway Research board.** bull, 129.

Mitchell, J.K., 1993. **Fundamentals of Soil Behavior**, 2nd Edition, New York: Wiley, (n.p.): 56-57.

Liu, C., and Evett, J.B. 2000. **Soil Properties Testing, Measurement and Evaluation**. 4th Edition. New Jersey: Prentice Hall.

Wright, P.H. 1996. **Highway Engineering**. New York: Wiley, (n.p.): 410-440.

Yoder, E.J. 1959. **Principles of Pavement Design.** New York: John Wiley & Sons. (n.p.): 284-309.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคิดค่าปฏิบัติงาน ในการราดสารเคมีที่ผิวดิน

ค่าปฏิบัติงาน ประกอบไปด้วยค่าเครื่องจักรกล และค่าแรงงาน โดยค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าเครื่องจักรกล แสดงดังตารางที่ 1 และในส่วนของค่าแรง คิดจากค่าแรงงาน ในปัจจุบันในเขตต่างจังหวัด วันละ 130 บาท จากหลักเกณฑ์การคำนวณราคา กรมการเร่งรัดพัฒนาชนบท คิดเป็นค่าแรงในการราดสารเคมี เท่ากับ 0.06 บาท/ตร.ม.

1) แสดงการคำนวณ ราคาค่าปฏิบัติงานในการราด สารโพลิเมอร์อิมัลชัน และแอสฟัลต์อิมัลชัน (งานจ้างเหมา)

ค่าแรงงาน		0.06 บาท/ตร.ม.
ค่าเครื่องจักรกล		
รถบรรทุกกระบะ (Flatbed truck) 6 ล้อ 6 ตัน		448.31 บาท/ชม.
ชุดพ่นยาง (Bituminous distributor) 6,000 ลิตร		363.27 บาท/ชม.
	รวมค่าเครื่องจักรกล	811.58 บาท/ชม.
คิดการปฏิบัติงาน 4 ชม./กม.	เป็นค่าใช้จ่าย	3,246.32 บาท/กม.
คิดให้ถนนมีผิวการจราจรกว้าง 6 ม.	เป็นค่าใช้จ่าย	0.541 บาท/ตร.ม.
รวมค่าปฏิบัติงาน (ค่าแรง+ค่าเครื่องจักรกล)		0.601 บาท/ตร.ม.

2) แสดงการคำนวณ ราคาค่าปฏิบัติงานในการราด สารโซเดียมคลอไรด์, แคลเซียมคลอไรด์ และการราดน้ำ (งานจ้างเหมา)

ค่าแรงงาน		0.06 บาท/ตร.ม.
ค่าเครื่องจักรกล		
รถบรรทุกน้ำ-น้ำมัน (Water-fuel truck) 6 ล้อ		459.84 บาท/ชม.
คิดการปฏิบัติงาน 4 ชม./กม.	เป็นค่าใช้จ่าย	1,839.36 บาท/กม.
คิดให้ถนนมีผิวการจราจรกว้าง 6 ม.	เป็นค่าใช้จ่าย	0.307 บาท/ตร.ม.
รวมค่าปฏิบัติงาน (ค่าแรง+ค่าเครื่องจักรกล)		0.367 บาท/ตร.ม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 มาตรฐานค่าใช้จ่ายเครื่องจักรกล

มาตรฐานค่าใช้จ่ายเครื่องจักรกล

ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง ดีเซล ลิตรละ 12.00-12.29 บาท เฉลี่ยลิตรละ 12.50 บาท เบนซิน ลิตรละ 13.00-13.39 บาท เฉลี่ยลิตรละ 13.50 บาท

ที่มา:เอกสารวิชาการมาตรฐานค่าใช้จ่ายเครื่องจักรกล (ฉบับปรับปรุง ตุลาคม 2543) กรมการเร่งรัดพัฒนาชนบท

ลำดับที่	ชนิดของเครื่องจักร	ขนาดแรงม้า (แรงม้า)	อายุเครื่องจักรกล (ปี)	ราคาเครื่องจักรกล (บาท)	เครื่องจักรกลหรือรุ่นที่เทียบเท่า	ค่าครอบครอง		ค่าใช้จ่ายปฏิบัติงาน							รวมค่าใช้จ่าย	
						1	2	3	4		5	6	7		จัดทำเอง	จ้างเหมา
						ค่าลงทุน (บาท/ชม.)	ค่าเสื่อม (บาท/ชม.)	ค่าซ่อมแซม (บาท/ชม.)	ค่าเชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)	ค่าเชื้อเพลิง (บาท/ชม.)	ค่าบำรุงรักษา (บาท/ชม.)	ค่ายาง (บาท/ชม.)	ค่า พนักงาน ขับ (บาท/ชม.)	(Repair Factor)	3+4+5+6 (บาท/ชม.)	1+2+3+4+5+6+7 (บาท/ชม.)
11	รถบรรทุกน้ำ-น้ำมัน (Water-fuel truck)															
	รถ 6 ล้อ	140-160	12	701,141	TXD55, JCR, TK, FM	19.98	23.37	78.15	18.20	227.50	46.20	24.64	40	2.68	376.49	459.84
	รถ 10 ล้อ	180-220	12	1,260,477	ISUZU HINO NISSAN	35.92	42.02	140.50	23.40	292.50	59.40	28.49	40	2.68	520.89	638.83
12	รถบรรทุกกระบะ (Flatbed truck)															
	6 ตัน 6 ล้อ	140-160	12	653,873	ISUZU HINO FUSO	18.64	21.80	72.89	18.20	227.50	46.20	21.28	40	2.68	367.87	448.31
	4 ตัน 6 ล้อ	100-120	12	512,069	ISUZU MITSUBISHI	14.59	17.07	57.08	13.00	162.50	33.00	18.52	40	2.68	271.10	342.76
	3 ตัน 6 ล้อ	90-100	12	354,509	ISUZU MITSUBISHI	10.10	11.82	39.52	11.70	146.25	29.70	15.40	40	2.68	230.87	292.79
	2 ตัน 2 ล้อ, 4 ล้อ	80-90	12	322,997	ISUZU MITSUBISHI	9.21	10.77	36.00	10.40	130.00	26.40	15.40	40	2.68	207.80	267.78
25	ชุดพ่นยาง (Bituminous distributor).															
	6,000 ลิตร	50-60	10	1,693,767		48.78	67.75	158.59	6.50	81.25	6.90	0.00	0	1.87	246.74	363.27
26	ชุดพ่นยาง (Bituminous distributor).															
	4,000 ลิตร	30-40	10	1,496,817		43.11	59.87	140.15	3.90	48.75	4.14	0.00	0	1.87	193.04	296.02

หมายเหตุ เลือกลำดับที่ เฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการวิจัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพดล กมลสินธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ. 2518 ณ จังหวัด ลำปาง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2541 เข้ารับราชการ สังกัดกรมการเร่งรัดพัฒนาชนบท ตำแหน่งวิศวกรโยธา3 กองก่อสร้างทางและโครงสร้าง เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2542 และลาราชการเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2543 เพื่อทำการศึกษาต่อ ในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย