7

ปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังของส่วนผสมดิน เหนียวกับปูนขาว

นายวิริยะ กีรติวิรัชการ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2525

ISBN 974-561-786-5

010513

i 17375034

REACTION AND STRENGTH DEVELOPMENT OF CLAY-LIME MIXTURES

Mr. Wiriya Keerativirachkarn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate school

Chulalongkorn University

1982

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังของส่วนผสมดิน เหนียวกับปูนขาว
โดย	นายวิริยะ กีรติวิริชการ
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วิเชียร เต็งอำนวย)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ บุนนาค)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล จิวาลักษณ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังของส่วนผสมดินเหนียวกับปูนขาว

ชื่อนิสิต นายวิริยะ กีรติวิรัชการ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2525

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเหนียวเมื่อผสมปูนขาวปริมาณต่าง ๆ โดยคำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดควบคู่กับคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังได้กำหนดขอบเขตของการใช้ปูนขาวในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียว โดยคำนึงถึงชนิดของดินเหนียวและปริมาณปูนขาว โดยเลือกดินเหนียวจาก 3 แหล่งมาทำการศึกษา โดยแยกการศึกษาออกเป็น

- ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง
- ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า Unconfined Compressive Strength เป็นดัชนีในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว และใช้ X-ray diffraction และ DTA ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านแร่พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดและขั้นตอนในการวิเคราะห์

จากผลการศึกษาตัวอย่างดินเหนียวที่เลือกมาจาก 3 แหล่งคือ ดินหนองงูเห่า ดินพานทอง และดินระนอง สามารถสรุปผลการศึกษาทางด้านแร่ได้ดังนี้คือ

- ดินหนองงูเห่าและดินพานทองประกอบด้วยแร่ดินเหนียวหลักคือ มอนท์โมริลโลไนท์ อิลไลท์และคาโอลิไนท์ปริมาณใกล้เคียงกัน
- ดินระนองประกอบด้วยแร่คาโอลิไนท์เป็นส่วนใหญ่และมีอิลไลท์อยู่เล็กน้อย

เมื่อผสมปูนขาวปริมาณต่าง ๆ เข้าไปจะทำให้คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ ของดินเหนียวเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

คุณสมบัติทางด้าน Plasticity สามารถสรุปได้ว่าดินที่มีแร่คาโอลิไนท์เป็นแร่ดินเหนียวหลัก (เช่นดินระนอง) ค่า L L. จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาว ส่วนในดินที่ประกอบด้วยมอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์เป็นแร่ดินเหนียวหลัก (เช่นดินหนองงูเห่าและดินพานทอง) ค่า L L. จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไปน้อยกว่า 2 % แต่เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้น (มากกว่า 2 %) ค่า L L. จะลดลง ส่วนค่า P L. ของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาว อย่างไรก็ดีค่า P I. ในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดจะลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น

คุณสมบัติทางด้านการบดอัด สามารถสรุปได้ว่าในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดจะมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงและปริมาณความชื้นที่พอเหมาะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น

ส่วนคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมสามารถสรุปได้ว่าในดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดจะมีค่า Unconfined Compressive Strength เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวและระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกำลังที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากการเกิดสารประกอบใหม่คือ แคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซี่ยมอลูมิเนตไฮเดรตในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสารประกอบที่เกิดใหม่นี้มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน สารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นนี้เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยา Pozzolanic ระหว่างดินเหนียวกับปูนขาว

Thesis Title Reaction and Strength Development of Clay-Lime Mixtures

Name Mr. Wiriya Keerativirachkarn

Thesis Advisor Assistant Professor Boonsom Lerdhirunwong, Dr. Ing.

Department Civil Engineering

Academic Year 1982

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the change of the property of clay mixing with lime at various contents, considering the reaction together with the changing in engineering property. Moreover the limit of lime content to improve the clay property is proposed by considering the sort of clay which is selected from 3 sources for this study. The study is divided as follows:

- the study and analysis of the basic property of the experimented materials
- the study and analysis of clay-lime mixture property

The unconfined compressive strength is used as the index in comparing the strength property of the clay-lime mixture and also. X-ray diffraction and DTA are utilized in analysing the mineral properties.

The study of clay samples selected from the 3 sources: Nong Ngoo Hao, Pantong, and Ranong results in the mineral properties as follows:

Soil samples from Nong Ngoo Hao and Pantong are composed of Montmorillonite, Illite and Kaolinite at nearly the same quantity.

Soil from Ranong is composed mainly of Kaolinite and slightly Illite. When the clay is mixed with lime at various contents, its engineering property varies as follows:

Plasticity: The soil in which Kaolinite is its major clay-component (such as soil from Ranong), LL. increases with the lime content, as the soil in which Montmorillonite and Illite are its major clay-component (such as soil from Nong Ngoo Hao and Pantong), LL. increases slightly when the lime content is less than 2 %, but when the lime content increases (more than 2 %), LL. decreases. The PL. of all soils increases with the lime content. However, PI. in the clay-lime mixture of all the 3 sorts of soil decreases with the increasing lime content.

Compaction: In the clay-lime mixture of all the 3 sorts of clay samples, maximum dry density decreases and optimum moisture content increases with the increasing lime content.

Strength: In the clay-lime mixture of all the 3 sorts of clay samples, the unconfined compressive strength increases with the lime content and the increasing curing duration. The increased strength is caused by the occurrence of the new minerals, i.e. Calcium Silicate hydrate and Calcium aluminate hydrate, acting as the binding agent. The newly occurring minerals are formed by the Pozzolanic Reaction between clay and lime.

From this study, the behavior of clay-lime mixture especially in view of its strength development is move clarified.

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนรู้สึกสำนึกในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วยรองศาสตราจารย์ วิเชียร เด็งอำนวย รองศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ บุนนาค และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล จิวาลักษณ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้ความรู้ในระหว่างที่ศึกษาในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธารักษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ แดง อริยพงศ์ ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในด้านต่าง ๆ

ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่าง ๆ ผู้เขียนได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกองวิเคราะห์วิจัย กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตร ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องวิจัยทุก ๆ ท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณสมบัติ กิจจาลักษณ์ คุณนันทยา แสงแก้ว ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการโยธาและห้องวิจัยปฐพีกลศาสตร์ทุก ๆ ท่าน โดยเฉพาะ คุณบุญทวี ฤกษ์ไกร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ทางเคมี

ท้ายสุดนี้ ความดีหรือประโยชน์ทั้งหลายอันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และครู อาจารย์ ที่ได้ให้การอบรมศึกษาแก่ผู้วิจัย

นายวิริยะ กีรติวิรัชการ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ฌ

รายการตารางประกอบ ..... ฐ

รายการภาพประกอบ ..... ฑ

สัญญลักษณ์ ..... ถ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 วัตถุประสงค์ 1

1.2 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.3 ประโยชน์ของการวิจัย 3

2. ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีต 4

2.1 ความคิดพื้นฐาน 4

2.1.1 แร่ดินเหนียว (clay minerals) 4

2.1.2 double layer 5

2.1.3 แรงระหว่างอนุภาค 6

2.1.3.1 แรงผลัก (Repulsion force) 6

2.1.3.2 แรงดึงดูด (Attraction force) 8

2.1.4 โครงสร้างของดิน (Soil Structure) 14

2.2 ปฏิกิริยาพื้นฐานของดินเหนียวกับปูนขาว 15

2.2.1 Cation exchange 15

2.2.2 Flocculation - Agglomeration 17

2.2.3 Carbonation 17

2.2.4 ปฏิกิริยา Pozzolanic 18

บทที่ หน้า

2.3 ทบทวนผลงานในอดีต เกี่ยวกับการ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม 25

2.3.1 การ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้าน Plasticity 25

2.3.2 การ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านการบดอัด 27

2.3.3 การ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสม 28

3. ขั้นตอนและวิธีดำ เนินการวิจัย 37

3.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 37

3.1.1 ดิน เหนียว 37

3.1.2 ปูนขาว 42

3.2 การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของส่วนผสมดิน เหนียว-ปูนขาว 43

3.2.1 Plasticity test 43

3.2.2 Compaction test 45

3.2.3 Unconfined Compression test 45

3.2.4 X-ray diffraction test 47

3.2.5 pH 47

4. คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 48

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรม 48

4.2 คุณสมบัติทางด้านแร่ 48

4.2.1 ผลการศึกษาทางด้าน X-ray diffraction 49

4.2.2 ผลการศึกษาทางด้าน DTA 51

4.3 คุณสมบัติทางด้าน เคมี 51

4.4 ส่วนประกอบทาง เคมีของปูนขาว 53

4.5 สรุปคุณสมบัติของตัวอย่างดิน เหนียวทั้ง 3 ชนิด 54

5. ผลการทดลองและวิ เคราะห์ 55

5.1 คุณสมบัติทางด้าน Plasticity 55

5.1.1 ดินหนองงู เห่า 55

บทที่ หน้า

5.1.2 ดินพานทอง 57

5.1.3 ดินระนอง 59

5.1.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้าน Plasticity ของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด 61

5.2 คุณสมบัติทางด้านการบดอัด 63

5.2.1 ดินหนองงูเห่า 63

5.2.2 ดินพานทอง 65

5.2.3 ดินระนอง 67

5.2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติในการบดอัดของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด 69

5.3 คุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสม 70

5.3.1 การพัฒนากำลังของดินที่อัตราส่วนผสมปูนขาวและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ 70

5.3.1ก. ดินหนองงูเห่า 70

5.3.1ข. ดินพานทอง 77

5.3.1ค. ดินระนอง 84

5.3.2 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มกำลังในส่วนผสมของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด 90

5.3.3 ผลของอุณหภูมิในการบ่ม 93

5.3.3ก. ดินหนองงูเห่า 93

5.3.3ข. ดินพานทอง 93

5.3.3ค. ดินระนอง 94

5.3.4 ผลของปริมาณน้ำเริ่มแรกที่ใช้ผสม 98

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 102

6.1 สรุปผลการวิจัย 102

6.1.1 คุณสมบัติทางด้าน Plasticity 102

6.1.2 คุณสมบัติทางด้านการบดอัด 103

บทที่ หน้า

6.1.3 คุณสมบัติทางด้านส่วนประกอบแร่ 104
6.1.4 คุณสมบัติทางด้านการพัฒนากำลัง 104
6.2 ข้อสรุปทั่วไปซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวิจัย 105
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป 105
เอกสารอ้างอิง 106
ภาคผนวก 110
ประวัติผู้เขียน 158

รายการตารางประกอบ

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของโครงสร้างแบบระเกะระกะและโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ 14

3.1 วิธีการมาตรฐานที่ใช้หาคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินเหนียว 40

4.1 คุณสมบัติตามธรรมชาติของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด 49

4.2 การเปรียบเทียบปริมาณเบื้องต้นจากความเข้มของ peak ที่ได้จากการศึกษาโดยวิธี X-ray diffraction 50

4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด 52

4.4 คุณสมบัติทางเคมีทั่วไปของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 53

4.5 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนขาว 54

ข.1 การวิเคราะห์ชนิดของแร่ดินเหนียวโดยวิธี X-ray diffraction .. 135

ข.2 การแปลงมุม θ ไปเป็นระยะห่างของ Interlayer ตามกฎของ Bragg เมื่อสารที่ใช้ทำเป้าเป็นทองแดง (CuKα) 136

ข.3 ข้อมูล X-ray diffraction ของแร่ที่พบโดยทั่วไปในดิน 138

ง.1 ข้อมูลการทดลองคุณสมบัติด้านกำลังของส่วนผสมเมื่อใช้ปริมาณปูนขาวและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ 150

ง.2 ข้อมูลการทดลองคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมดินเหนียวกับปูนขาว 6 % ที่อุณหภูมิในการบ่มต่าง ๆ 151

ง.3 ข้อมูลการทดลองคุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสมที่ปริมาณความชื้นเริ่มแรกต่าง ๆ 152

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	Double layer (Mitchell, 1976)	7
2.2	โครงสร้างดิน (Mitchell, 1976)	7
2.3	จุดการสัมผัสของอนุภาคที่เป็นทรงกลม เมื่อมีตัวประสาน (Mitchell, 1976)	12
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างการสลายตัวของซิลิก้ากับ pH (Krauskopf, (1959)	19
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Lime-Reactivity กับ Ph ของดินตามธรรมชาติ (Thompson, 1966)	24
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Compressive Strength) ที่อุณหภูมิในการบ่ม 75 และ 120°ฟ. (23.9 และ 48.9°ซ.) กับระยะเวลาในการบ่ม (Thompson, 1965)	24
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง acid soluble alumina และ silica ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับอุณหภูมิ (Ruff และ Ho, 1966)	32
3.1	แผนภูมิการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2	แผนภูมิการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมดิน เหนียว-ปูนขาว ..	44
5.1	ผลการทดลองทางด้าน Plasticity ของดินหนองงูเห่า เมื่อผสมด้วยปูนขาวที่ปริมาณและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ	58
5.2	ผลการทดลองทางด้าน Plasticity ของดินพานทอง เมื่อผสมด้วยปูนขาวที่ปริมาณและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ	60
5.3	ผลการทดลองทางด้าน Plasticity ของดินระนอง เมื่อผสมด้วยปูนขาวที่ปริมาณและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ	62
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินหนองงูเห่า เมื่อผสมกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ	64
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินพานทอง เมื่อผสมกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ	66

รูปที่ หน้า

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินระนอง เมื่อผสมปูนขาวปริมาณต่าง ๆ 68

5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ และค่า Q_u กับ log ของระยะเวลาในการบ่มที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ของดินหนองงูเห่า 71

5.8 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 2 % ที่ระยะเวลาในกาบ่ม 1, 7, 28, 56, 84 และ 168 วัน 73

5.9 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 4 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน 74

5.10 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 14, 28, 84 และ 168 วัน 75

5.11 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 10 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 14, 28, 56, 84 และ 168 วัน 76

5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ และค่า Q_u กับ log ของระยะเวลาในการบ่มที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ของดินพานทอง 78

5.13 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองผสมปูนขาว 2 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28, 84 และ 168 วัน 80

5.14 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองผสมปูนขาว 4 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28, 56, 84 และ 168 วัน 81

5.15 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองผสมปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28, 84 และ 168 วัน 82

5.16 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองผสมปูนขาว 10 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28, 56, 84 และ 168 วัน 83

5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ และค่า Q_u กับ log ของระยะเวลาในการบ่มที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ของดินระนอง 85

รูปที่ หน้า

5.18 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 2 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 28, 56, 84 และ 168 วัน 86

5.19 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 4 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 21, 56, 84 และ 168 วัน 87

5.20 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 21, 28, 84 และ 168 วัน 88

5.21 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 10 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 21, 28, 84 และ 168 วัน 89

5.22 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มกำลังในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว ของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 91

5.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_u กับอุณหภูมิในการบ่มที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 และ 3 วัน ของกิน ก. ดินหนองงูเห่า ข. ดินพานทอง ค. ดินระนอง 95

5.24 X-ray diffraction pattern ของส่วนผสมดินหนองงูเห่ากับปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 3 วัน ซึ่งบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ .. 97

5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับปริมาณความชื้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วันและ 30 วัน ของส่วนผสมดินพานทองกับปูนขาว 6 % ... 99

5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับปริมาณความชื้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วันและ 30 วัน ของส่วนผสมดินระนองกับปูนขาว 6 % ... 101

ก.1 การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (electric potential) กับระยะทางจากผิวของประจุ (Mitchell, 1976) 113

ก.2 ความเข้มข้นของประจุในสนามความต่างศักย์ ตามสมการของ Boltzmann (Mitchell, 1976) 113

รูปที่ หน้า

ก. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ใช้ในสมการที่ 20 (Mitchell, 1976) 117

ก. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชั่นของความต่างศักย์กับฟังก์ชั่นของระยะทางของวงน้ำ double layer ที่อยู่ตามลำพัง (Mitchell, 1976) . 117

ก. 5 การกระจายของความต่างศักย์และประจุของวงน้ำ double layer ที่กระทำต่อกัน เมื่ออนุภาคมีลักษณะ เป็นแผ่น เรียบและ เรียงตัวขนานกัน โดย (a) เป็นการกระจายของความต่างศักย์ (b) เป็นการกระจายของประจุ (Mitchell, 1976) 118

ก. 6 ผลของความ เข้มข้นอี เล็คโทรไลท์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อความต่างศักย์ของวงน้ำ double layer (Mitchell, 1976) 123

ก. 7 ผลของความ เข้มข้นอี เล็คโทรไลท์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อการกระจายของอิออนในวงน้ำ double layer (Mitchell, 1976) 124

ก. 8 ผลของความ เข้มข้นอี เล็กโทรไลท์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อความต่างศักย์ที่ผิวและที่กึ่งกลางระนาบของดินที่มีลักษณะ เป็นแผ่นเรียบและ เรียงตัวขนานกัน 125

ก. 9 ผลของความ เข้มข้นอี เล็คโทรไลท์ (electrolyte concentration) ที่มีต่อความ เข้มข้นที่กึ่งกลางระนาบของดินที่มีลักษณะ เป็นแผ่นและ เรียงตัวขนานกัน (Mitchell, 1976) 126

ก.10 ผลของ cation valence ที่มีต่อความ เข้มข้นของประจุบวกในวงน้ำ double layer (Mitchell, 1976) 127

ข. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความ เข้มข้นของการแผ่รังสีและความยาวคลื่นของรังสี เอ็กซ์ ที่ เกิดขึ้น เนื่องจากการแทนที่ของอี เล็กตรอนใน Shell ต่าง ๆ โดยตัวอักษรแสดงถึง Shell ที่ถูกแทนที่ 129

ข. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความ เข้มของการแผ่รังสีกับความยาวคลื่นของรังสี เอ็กซ์ ที่ เกิดขึ้น เนื่องจากการลดความ เร็วของอี เล็กตรอนในสนามไฟฟ้า 129

รูปที่ หน้า

ข. 3 ความสัมพันธ์รวมของความเข้มของการแผ่รังสีเอ็กซ์กับความยาวคลื่น 131

ข. 4 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ตามกฎของ Bragg 131

ค. 1 ลักษณะของกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ DTA และ TGA 141

ค. 2 ผังการทำงานของเครื่อง Thermoanalyzer 141

ค. 3 ลักษณะ thermogram ของแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ โดยความชื้นสัมพัทธ์เริ่มแรกของสารตัวอย่างเท่ากับ 50 % (Mitchell, 1976) . 143

ง. 1 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าเมื่อเตรียมตัวอย่างดินแบบต่าง ๆ 146

ง. 2 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองเมื่อเตรียมตัวอย่างดินแบบต่าง ๆ 154

ง. 3 X-ray diffraction pattern ของดินระนองเมื่อเตรียมตัวอย่างดินแบบต่าง ๆ 155

ง. 4 Thermogram ของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด 156

ง. 5 Thermogram ของแร่ดินเหนียวบริสุทธิ์ที่ได้มาจากการทดลอง ... 157

สัญญลักษณ์

^{o}ซ. = องศาเซลเซียส

^{o}ฟ. องศาฟาเรนไฮซ์

A^{o} = อังสตรอม (Angstrom) = $1x10^{-10}$ ม.

A = อลูมิน่า (Al_2O_3)

A = ค่าคงที่ Van der Waals = 10^{-10}-10^{-14} เอิกซ์

A_i = พื้นที่ผิวของเม็ด (grain) ที่ i

C_o = ความเข้มข้นที่ระยะไกลมากจากผิวของอนุภาค

C = แคลเซี่ยมอ๊อกไซด์ (CaO)

d = ระยะทางครึ่งหนึ่งระหว่างอนุภาคที่ขนานกัน

d = ระยะห่างระหว่างอนุภาค

D = dielectric constant

e = อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio)

e = หน่วยประจุ $16.0x10^{-20}$ คูลอมบ์ หรือ $4.8x10^{-10}$ esu

E = พลังงานศักย์

F = แรงดึงดูด

F = ค่าคงที่ Faraday

H = H_2O

k = mean coordination number ของเม็ด (grain) หนึ่ง ๆ

k = ค่าคงที่ Boltzmann = $1.38x10^{-16}$ เอิกซ์/^{o}เคลวิน

k = rate constant

ℓ = rate constant

n_i = ความเข้มข้นของอิออนชนิด i

n = จำนวนของเม็ด (grain) ที่อยู่บนระนาบรอยแตกในอุดมคติ (ideal breakage plane) ซึ่งตั้งฉากกับ σ_T

OMC = ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะ (optimum moisture content)

p = กำลังยึดเหนี่ยว (bond strength)

Q_u = Unconfined Compressive Strength

R = gas constant

S = ซิลิก้า (SiO_2)

T = อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

V_i = ionic valence

V = ความต่างศักย์ (potential)

V_A = พลังงานในการดึงดูดกันระหว่างโมเลกุล 2 โมเลกุล

μ = dipole moment

δ = ความหนาของอนุภาคโดยวัดที่ระนาบเดียวกันกับ d

ψ = ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า

ρ = ความหนาแน่นของประจุ

τ = ความหนาแน่นของประจุที่ผิวของอนุภาค

$\gamma_{d\ max}$ = ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

σ_c = กำลังดึงของตัวประสาน

σ_i = กำลังดึงของการยึดเกาะกันที่ผิวของการเกาะกันระหว่างตัวประสานในอนุภาคดิน

σ_s = กำลังดึงของทรงกลม

σ_T = กำลังดึง