การประยุกต์ใช้ของเสียจากการผลิตกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน สำหรับผลิตภัณฑ์หมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง

นายณัฐเศรษฐ์ สมแสน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการรม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-515-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18994280

APPLICATION OF SLUDGE WASTE FROM ASBESTOS-CEMENT ROOFTILE PROCESS FOR A CONCRETE CUSHION PRODUCT

Mr. Natthaset Somsaen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1998

ISBN 974-639-515-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ของเสียจากการผลิตกระเบื้องซีเมนต์ไยหิน สำหรับผลิตภัณฑ์หมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง

โดย นายณัฐเศรษฐ์ สมแสน

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึก)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชอุ่ม มลิลา)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐเศรษฐ์ สมแสน : การประยุกต์ใช้ของเสียจากการผลิตกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน สำหรับผลิตภัณฑ์หมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง (APPLICATION OF SLUDGE WASTE FROM ASBESTOS-CEMENT ROOFTILE PROCESS FOR A CONCRETE CUSHION PRODUCT) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ; 120 หน้า, ISBN 974-639-515-7.

เนื่องจากของเสียจากการผลิตกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน (Sludge Waste) เป็นของเสียที่มีแอสเบสตอสปะปนอยู่ จำเป็นต้องกำจัดอย่างถูกวิธีเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โรงงานผลิตกระเบื้องซีเมนต์ส่วนใหญ่ปัจจุบันจะนิยมใช้วิธีการฝังกลบ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่มี Sludge Waste เป็นองค์ประกอบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงเทคนิค และเศรษฐศาสตร์ในการนำ Sludge Waste ไปใช้ในการผลิตหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง

สำหรับขั้นตอนวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วย การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างทดสอบส่วนผสมคอนกรีต โดยการใช้ Sludge Waste ทดแทนซีเมนต์, ทราย, หินเกล็ด และเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตปกติ ในช่วง 10%-50%, 15%-100%,15%-100% และ 10%-50% โดยน้ำหนัก ตามลำดับใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในการผลิตเท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 และใช้ระยะเวลาการบ่มส่วนผสมคอนกรีต 3, 7, 14 และ 28 วัน การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ กำลังอัด กำลังดัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ การคัดเลือกส่วนผสมและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตสามารถใช้ Sludge Waste และลดต้นทุนวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียได้สูงสุด จากนั้นจึงได้นำส่วนผสมที่ได้ไปทดลองผลิตเป็นหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง และทดลองใช้งานจริงเทียบกับหมอนคอนกรีตปกติที่ไม่ใช้ Sludge Waste

ผลการทดลองพบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการผลิตหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง คือ ซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด : Sludge Waste เท่ากับ 0.8 : 1 : 2 : 0.2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ทำให้ได้หมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่สามารถใช้งานในการรองรับแรงอัด 48.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แรงดัด 22.02 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 1.74 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และการดูดซึมน้ำ 17.63% และสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่ใช้อยู่ในปัจจุบันลงจาก 2.12 บาทต่อก้อน เหลือ 1.80 บาทต่อก้อน หรือลดลง 0.32 บาทต่อก้อน หากนำส่วนผสมที่คัดเลือกจากการวิจัยนี้ไปใช้ผลิตเป็นหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องจำนวน 2 ล้านก้อนต่อปี จะทำให้ลดปริมาณ Sludge Waste ที่ต้องนำไปฝังกลบได้ 400 ตันต่อปี และลดค่ากำจัดของเสียได้ 200,000 บาทต่อปี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

3970537921: MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEY WORD: ASBESTOS / SLUDGE WASTE / CONCRETE CUSHION / MECHANICAL PROPERTIES

NATTHASET SOMSAEN : APPLICATION OF SLUDGE WASTE FROM ASBESTOS-CEMENT ROOFTILE PROCESS FOR A CONCRETE CUSHION PRODUCT. THESIS ADVISOR : SOMCHAI PUAJINDANATR, Ph.D. 120 pp. ISBN 974-639-515-7.

Because of the sludge waste from asbestos-cement process mixed with asbestos fiber. Almost factory of asbestos-cement roof tile products eliminated this waste by landfill, but it created cost and impacted to environment. Therefore sludge waste was considered on its application in concrete cushion product. The objectives were to study the technical and economical feasibility in the sludge waste recycle to concrete cushion production.

The study composed of concrete specimens preparing of application concrete mixes with sludge waste by replaced cement, sand, stone, and added in the normal concrete mix between 10%-50%, 15%-100%, 15%-100% and 10%-50% by weight, respectively. These specimens used water cement ratio at 0.4, 0.5 and 0.6 by weight and curing time for 3, 7, 14 and 28 days. The mechanical properties testing of these specimens had been conducted in this research; compressive strength, bending strength, density and water absorption. The optimal condition considered from the maximum of the quantity of sludge waste and the reduction of raw materials cost and waste eliminated cost was studied.

The experimental result showed that the suitable raw materials ratio of cement : sand : stone : sludge waste was 0.8 : 1 : 2 : 0.2 respectively. Water cement ratio of 0.4 and curing time of 7 days were the optimal condition for concrete cushion production. This optimal condition produced concrete cushion which the mechanical properties were compressive strength of 48.15 kg/cm^2, bending strength of 22.02 kg/cm^2, density of 1.74 g/cm^3 and water absorption of 17.63%. This composition could reduce the raw materials cost from 2.12 baht/piece into 1.80 baht/piece. Therefore, If 2 million pieces/year of concrete cushion are produced using this condition, the quantity of sludge waste would be recycled up to 400 tons/year and the cost of eliminated waste would be reduced by 200,000 baht/year.

ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2541	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปอย่างสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รศ.สมชาย พวงเพิกศึก และ รศ.ชอุ่ม มลิลา ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก รวมทั้งขอขอบคุณบริษัท กระเบื้องกระดาษไทย จำกัด ประกอบด้วย คุณอาทิตย์ ประทุมสุวรรณ กรรมการผู้จัดการ คุณกิ่งกาญจน์ วงศ์รัตน์ วิศวกรใหญ่ส่วนเทคนิค คุณวันชัย จอนสมจิตร หัวหน้างานทดสอบวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ และพนักงานห้องปฏิบัติการหน่วยงานคุณภาพและสิ่งแวดล้อม ที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูล อุปกรณ์และวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์อันพึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกถึงพระคุณในการอบรมให้การศึกษาแก่ผู้เขียนตลอดมา

ณัฐเศรษฐ์ สมแสน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 5
1.4 ขั้นตอนของการวิจัย 6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 7

บทที่ 2 การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 หลักการเกี่ยวกับของเสียจากการผลิตกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน 8
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับคอนกรีต 12
2.3 คอนกรีตเสริมไฟเบอร์ 16
2.4 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 19

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย
3.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ 23
3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย 27
3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล 28

หน้า

3.4 การวิเคราะห์ผลด้านต้นทุนวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย..... 31
3.5 การทดสอบใช้งานจริงของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่มี Sludge Waste เป็นองค์ประกอบ 32

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย
4.1.1 การตรวจสอบขนาดคละและโมดูลัสยืดหยุ่นของทราย 35
4.1.2 การตรวจสอบขนาดคละและโมดูลัสยืดหยุ่นของหินเกล็ด 37
4.1.3 การตรวจสอบความชื้น ความหนาแน่น และคุณสมบัติทางเคมีของ Sludge Waste 39
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ
4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste 40
4.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste 52
4.2.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste 64
4.2.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในส่วนผสม 76
4.4 การวิเคราะห์ผลด้านต้นทุนวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย 91
4.5 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่มี Sludge Waste เป็นองค์ประกอบ 94

หน้า

บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลของ Sludge Waste ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล 99

5.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล 101

5.3 ผลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล 102

5.4 การคัดเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิต 104

5.5 การเปรียบเทียบผลการใช้งานของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องสูตรปกติ กับหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่มี Sludge Waste เป็นองค์ประกอบ 107

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย..... 108

6.2 ข้อเสนอแนะ 110

รายการอ้างอิง 111

ภาคผนวก ก. ความรู้เกี่ยวกับแอสเบสตอสและกระบวนการผลิตกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน 114

ภาคผนวก ข. ค่ากำลังอัดของกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน 118

ภาคผนวก ค. ข้อกำหนดค่ากำลังอัดของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง 119

ประวัติผู้เขียน 120

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ความชื้นของ Sludge Waste จากบ่อเศษของโรงงานผลิตกระเบื้องซีเมนต์ไยหิน 10
2.2 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของเศษเปียก (Sludge Waste) จากโรงงานผลิตกระเบื้องซีเมนต์ไยหิน 11
2.3 คุณสมบัติของเส้นใยไฟเบอร์ 18
3.1 การแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste 25
3.2 การแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste 25
3.3 การแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste 25
3.4 การผสมเพิ่ม Sludge Waste ในส่วนผสมคอนกรีต 26
4.1 ผลการตรวจสอบขนาดคละและโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายที่ใช้ในการวิจัย 35
4.2 ผลการตรวจสอบขนาดคละและโมดูลัสยืดหยุ่นของหินเกล็ดที่ใช้ในการวิจัย 37
4.3 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของ Sludge Waste 39
4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 41
4.5 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 44
4.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 47
4.7 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 50
4.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 53
4.9 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 56
4.10 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 59

หน้า

4.11 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 62
4.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 65
4.13 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 68
4.14 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 71
4.15 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 74
4.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 77
4.17 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 80
4.18 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 83
4.19 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 87
4.20 ส่วนผสมหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่มีค่ากำลังอัดมากกว่า 30 กก./ตร.ซม. 92
4.21 ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการนำ Sludge Waste มาทำหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง 93
4.22 ผลการทดลองใช้งานจริงของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง ในลักษณะที่ 1 95
4.23 ผลการทดลองใช้งานจริงของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง ในลักษณะที่ 2 96
5.1 ปริมาณ Sludge Waste ที่นำผลิตเป็นหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องในแต่ละส่วนผสม 104
5.2 ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องในแต่ละส่วนผสม 105
5.3 การเปรียบเทียบการใช้งานของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องในโรงงานกับการวิจัย 107

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ลักษณะของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง 2
1.2 การใช้งานของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง 3
2.1 ชื่อองค์ประกอบต่างๆ ของคอนกรีต 12
2.2 วิธีการที่เป็นไปได้ในการจัดการฝุ่นแอสเบสตอส 20
3.1 ลักษณะของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ได้หลังจากการถอดแบบหล่อ 26
3.2 การทดสอบกำลังอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ 29
3.3 เครื่อง Universal Tester 30
3.4 ลักษณะการใช้งานจริงของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง 33
4.1 ขนาดคละของทรายที่ใช้ในการวิจัย 36
4.2 ขนาดคละของหินเกล็ดที่ใช้ในการวิจัย 38
4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 42
4.4 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 45
4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 48
4.6 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 51
4.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 54
4.8 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 57
4.9 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 60

หน้า

4.10 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ทรายด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 63
4.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 66
4.12 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 69
4.13 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 72
4.14 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่หินเกล็ดด้วย Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 75
4.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 78
4.16 ผลการทดสอบกำลังดัดของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 81
4.17 ผลการทดสอบความหนาแน่นของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 84
4.18 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเพิ่ม Sludge Waste ในปริมาณต่างๆ 87
4.19 ภาพถ่ายลักษณะทั่วไปบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหักของส่วนผสมคอนกรีตที่มี Sludge Waste เป็นองค์ประกอบ กำลังขยาย 150 เท่า 89
4.20 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของส่วนผสมคอนกรีตปกติ กำลังขยาย 7,500 เท่า 89
4.21 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของคอนกรีตที่ใช้ Sludge Waste เพิ่มในส่วนผสม 10% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 7,500 เท่า 90
4.22 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของคอนกรีตที่ใช้ Sludge Waste เพิ่มในส่วนผสม 20% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 7,500 เท่า 90

หน้า

4.23 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของคอนกรีตที่ใช้ Sludge Waste เพิ่มในส่วนผสม 30% โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 7,500 เท่า 91
4.24 บริเวณที่เกิดการแตกร้าวของหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง(flat torsion) 95
4.25 สภาพหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องปกติหลังจากใช้กองกระเบื้องส่งให้ลูกค้า 98
4.26 สภาพหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องสูตรทดลองหลังจากใช้กองกระเบื้องส่งให้ลูกค้า 98

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย