# การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ

นายอุดม หงษ์ประธานพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2533

ISBN 974-577-258-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตมหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016299

# STRENGTH DEVELOPEMENT OF PORTLAND CEMENT MIXED WITH FLY ASH AND RICE HUSK ASH

Mr. Udom Hongpatanporn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate school

Chulalongkorn University

1990

ISBN 974-557-258-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ

โดย นายอุดม หงษ์ประธานพร

ภาค วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการ ศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วิเชียร เต็งอำนวย)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ประจิต จิรัปประภา)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรนล จิวาลักษณ์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุดม หงษ์ประธานนร : การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ (STRENGTH DEVELOPEMENT OF PORTLAND CEMENT MIXED WITH FLY ASH AND RICE HUSK ASH) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ , 101 หน้า
ISBN 974-577-258-5

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึง คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย

ในการวิจัยได้ใช้ขี้เถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีอนุภาคเม็ดกลม ผิวเรียบ สีน้ำตาลเข้ม ขนาดประมาณ 7 ไมครอน ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.56 และ ค่าดัชนีความเป็นปัซโซลาน 89% ขี้เถ้าแกลบจากจังหวัดราชบุรีมีอนุภาคมีเหลี่ยมมุมสีขาวอมเทา ขนาดประมาณ 47 ไมครอน ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.04 และ ค่าดัชนีความเป็นปัซโซลาน 77%

จากการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 15, 20, 30,40% โดยน้ำหนัก, พบว่าการพัฒนากำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แต่ในอัตราส่วนการแทนที่ของขี้เถ้าที่เหมาะสมที่ 20% จะให้การพัฒนาในช่วงอายุแรกต่ำกว่า แต่ในช่วงอายุหลังจะให้การพัฒนากำลังสูงกว่าปูนซีเมนต์ล้วน จากการวิเคราะห์สารเชื่อมประสานโดย X-Ray Diffraction ให้ผลสอดคล้องกับการพัฒนากำลังรับแรงอัด คือการพัฒนาสารเชื่อมประสานในช่วงอายุแรกต่ำกว่า แต่ในช่วงอายุหลังสูงกว่าปูนซีเมนต์ล้วน เปรียบเทียบระหว่างขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบจะพบว่า ขี้เถ้าลอยให้การพัฒนากำลังดีกว่าขี้เถ้าแกลบ เนื่องจากอนุภาคละเอียดกว่า ค่า W/c จะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณขี้เถ้าที่เพิ่ม ทั้งขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ แต่ขี้เถ้าแกลบจะเพิ่มมากกว่า ค่า W/(c + ขี้เถ้า) จะลดลง 0.01 ทุก ๆ 10% ของขี้เถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้น 0.038 ทุก ๆ 10% ของขี้เถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต อุดม หงษ์ประธานนร

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2532 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UDOM HONGPATANPORN : STRENGTH DEVELOPEMENT OF PORTLAND CEMENT MIXED WITH FLY ASH AND RICE HUSK ASH. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. BOONSOM LERDHIRUNWONG, Dr. Ing. 101 PP.

The purpose of this research was to evaluate the physical and potential engineering properties of Portland cement mixed with Fly ash and Rice husk ash. It was found that the Fly ash from Mae Mao had a spherical participate shape with an average diameter of 7 microns, specific gravity of 2.36 and Pozzolanic index of 89%. It was found that the Rice Husk ash from Ratchaburi was found to have an angular particulate shape of width averaging 47 microns, Pozzolanic index of 77% and specific gravity of 2.04.

The properties of various mixtures of Portland cement with Fly ash and Rice Husk ash were analysed using ratios of 0, 10, 15, 20, 30 and 40% by weight. The optimum amount of the combined ash was found to bo 20%. At this composition the primary compressive strength was decreased from that of Portland cement alone. However it was found that the strength of the final set was greater than that of Portland cement. The components of the compound were also analysed by x-ray diffraction to ascertain the reason for the discrepancies in compressive strength. The Fly ash behaved better than the Rice Husk ash because the particles were smaller and of more uniform shape. The W/C ratio of Fly ash therefore increased comparatively less than that of Rice husk ash. However, for every 10% increment of fly ash the ratio of W/(cement + ash) was decreased 0.01 while for rice husk ash this ratio was increased 0.038 at the same condition.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2532 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนรู้สึกสำนึกในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วยรองศาสตราจารย์วิเชียร เต็งอำนวย รองศาสตราจารย์ประจิต จิรัปประภา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล จิวาลักษน์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้ความรู้ในระหว่างที่ศึกษาในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้ง คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้สั่งสอนอบรม แก่ผู้เขียนมาโดยตลอด

ในการวิจัยนี้ ผู้เขียนได้รับความอนุเคราะห์ จากกรมโยธาธิการ ซึ่งมอบวัสดุชี้เถ้าลอย นายเต็ม โสมโสรส ซึ่งมอบวัสดุชี้เถ้าแกลบ ให้

ท้ายที่สุดนี้ความดี หรือประโยชน์ทั้งหลาย อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และครู อาจารย์ที่ได้ให้การอบรมศึกษา แก่ผู้วิจัย

นายอุดม หงษ์ประธานนร

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

รายการตารางประกอบ ..... ญ

รายการภาพประกอบ ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย ..... 3

1.4 ประโยชน์การวิจัย ..... 4

2 ทฤษฎี ..... 5

2.1 ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการวิจัย ..... 5

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ..... 5

2.1.2 ขี้เถ้าลอย ..... 7

2.1.3 ขี้เถ้าแกลบ ..... 9

2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปัซโซลาน ..... 9

2.3 แนวความคิดและการวิจัยในอดีต ..... 11

3 วัสดุที่ใช้ในการวิจัยและวิธีการทดสอบ ..... 19

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ..... 19

3.2 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ..... 20

3.2.1 ส่วนประกอบทางเคมี ..... 20

3.2.2 ความละเอียด ..... 20

บทที่ หน้า

3.2.3 ความถ่วงจำเพาะ ..... 20
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย หรือปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ ..... 20
3.3.1 ความข้นเหลวปกติ ..... 21
3.3.2 ระยะเวลาก่อตัว ..... 21
3.3.3 กำลังรับแรงอัด ..... 22
3.3.4 ค่าดัชนีความเป็นปัชโซลาน เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ... 22
3.3.5 X-Ray Diffraction ..... 23
3.3.6 การถอดแบบและการบ่มแท่งทดสอบ ..... 23
4 ผลการทดสอบ ..... 24
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ..... 24
4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี ..... 24
4.1.2 ความละเอียด ..... 27
4.1.3 ความถ่วงจำเพาะ ..... 32
4.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ ..... 32
4.2.1 ความข้นเหลวปกติ ..... 32
4.2.2 ระยะเวลาก่อตัว ..... 34
4.2.3 กำลังรับแรงอัด ..... 336
4.2.4 ค่าดัชนีความเป็นปัชโซลาน เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ..... 41
4.2.5 ผล X-Ray Diffraction ..... 42
4.2.6 การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้า ..... 44
4.2.7 การเปรียบเทียบระหว่างขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ ..... 45
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ..... 63
5.1 สรุปผลการวิจัย ..... 63
5.2 ความประหยัด ..... 64

บทที่ หน้า

5.3 ข้อเสนอแนะ ..... 64
เอกสารอ้างอิง ..... 66
ภาคผนวก ก. ..... 66
ภาคผนวก ข. ..... 85
ประวัติผู้เขียน ..... 88

# รายการตารางประกอบ


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | 6 |
| 2.2 | มาตรฐาน ASTM C 618-85 สารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ | 8 |
| 2.3 | ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบในต่างประเทศ KOKUBU (1968) | 14 |
| 4.1 | ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุวิจัย | 25 |
| 4.2 | กำลังรับแรงอัดและความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย (ลูกบาศก์มอร์ต้า 50 มิลลิเมตร) | 38 |
| 4.3 | กำลังรับแรงอัดและความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ (ลูกบาศก์มอร์ต้า 50 มิลลิเมตร) | 38 |
| 4.4 | กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้า 35% โดยปริมาตร อายุ 28 วัน (ลูกบาศก์มอร์ต้า 50 มิลลิเมตร) | 41 |
| ก.1 | การวิเคราะห์ชนิดของแร่ดินเหนียวโดยวิธี X - Ray Diffraction | 77 |
| ก.2 | การแปลงมุม $\theta$ ไปเป็นระยะห่าง d ของ Inter Layer | 78 |
| ก.3 | ข้อมูล X - Ray Diffraction | 79 |
| ก.4 | X - Ray Diffraction pattern | 80 |
| ก.5 | X - Ray Diffraction pattern | 81 |
| ก.6 | X - Ray Diffraction pattern | 82 |
| ก.7 | X - Ray Diffraction pattern | 83 |
| ข.1 | องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยแม่เมาะ | 87 |

## รายการภาพประกอบ


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | กำลังและส่วนผสมอายุ 7 วัน | 16 |
| 2.2 | กำลังและส่วนผสมอายุ 28 วัน | 16 |
| 2.3 | กำลังและส่วนผสมอายุ 2 $\frac{1}{2}$ เดือน | 17 |
| 4.1 | ภาพถ่าย Electron MicrosCope ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | 24 |
| 4.2 | ภาพถ่าย Electron MicrosCope ของขี้เถ้าลอย | 30 |
| 4.3 | ภาพถ่าย Electron MicrosCope ของขี้เถ้าแกลบ | 30 |
| 4.4 | แสดงขนาดคละ หรือความละเอียดของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 33 | 31 |
| 4.5 | ปริมาณน้ำที่ต้องการ จากค่าความข้นเหลวปกติเมื่อผสมขี้เถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน | 34 |
| 4.6 | เวลาก่อตัวระยะต้น ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ | 35 |
| 4.7 | กำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย | 39 |
| 4.8 | กำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ | 40 |
| 4.9 | ผล X - Ray Diffraction ของปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ | 46 |
| 4.10 | ผล X - Ray Diffraction ของขี้เถ้าลอย | 47 |
| 4.11 | ผล X - Ray Diffraction ของขี้เถ้าแกลบ | 48 |
| 4.12 | กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 0:100 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction | 49 |
| 4.13 | กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 10:90 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction | 50 |
| 4.14 | กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 15:85 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction | 51 |
| 4.15 | กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 20:80 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction | 52 |

รูปที่ หน้า

4.16 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 30:70 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction 53

4.17 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์ 10:90 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction 54

4.18 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์ 15:85 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction 55

4.19 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์ 20:80 และ Portland Cement โดย X - Ray Diffraction 56

4.20 อัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสาน C-S-H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย 57

4.21 อัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสาน C-S-H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ 58

4.22 อิทธิพลของปริมาณขี้เถ้าลอย เมื่อผสมในปูนซีเมนต์ต่ออัตราการพัฒนา สารเชื่อมประสาน ในอายุช่วงแรกและอายุช่วงหลัง 59

4.23 อิทธิพลของปริมาณขี้เถ้าแกลบ เมื่อผสมในปูนซีเมนต์ต่ออัตราการพัฒนา สารเชื่อมประสานในอายุช่วงแรกและในอายุช่วงหลัง 60

4.24 เปรียบเทียบอัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสานของขี้เถ้าลอย และขี้เถ้าแกลบ 10% 61

4.25 เปรียบเทียบอัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสานของขี้เถ้าลอย และขี้เถ้าแกลบ 20% 62

ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสีและความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแทนที่ของอีเล็คตรอนใน shell ต่าง ๆ โดยตัวอักษรแสดงถึง shell ที่ถูกแทนที่ 70

ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสี กับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดความเร็วของอีเลคตรอนในสนามไฟฟ้า 70

ก.3 ความสัมพันธ์ของความเข้มของการแผ่รังสีเอ็กซ์ กับความยาวคลื่น 72

รูปที่ หน้า

ก.4 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ตามกฎของ Bragg 72

ก.5 Diffraction Diagram ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 84