การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อก

นายหฤษฎ์ ธิตินันทน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3546-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF SPENT SILICA-ALUMINA FOR MAKING CONCRETE BLOCK

Mr. Harit Thitinant

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3546-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อก
โดย	นายหฤษฎ์ ธิตินันทน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีระ เกรอต)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หฤษฎ์ ธิตินันทน์ : การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อก. (UTILIZATION OF SPENT SILICA-ALUMINA FOR MAKING CONCRETE BLOCK) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 124 หน้า. ISBN : 974-17-3546-4.

งานวิจัยเป็นศึกษาโดยนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุแทนที่ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยทำการทดลองศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการทำก้อนแข็ง ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุ เช่น องค์ประกอบ ดัชนีความเป็นปอซโซลาน การกระจายขนาดอนุภาค รวมถึงสมบัติทั่วไปของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นศึกษาโดยแปรค่าสัดส่วนวัสดุผสมเป็น 2 3 5 8 10 และ 11 เท่าโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน บ่มที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน และแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ต่อวัสดุประสาน เป็น 0.05 0.10 0.15 0.25 และ 0.35 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ของเสียในซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของวัสดุผสมและอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสาน โดยสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น คือ 1:1.2:1.8 และการบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนโดยไม่จำเป็นต้องเผาจะทำให้ได้วัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถแทนที่ซีเมนต์ได้ในปริมาณมากขึ้น โดยที่สภาวะเหมาะสมต่อการผลิตสามารถแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนได้ในสัดส่วน 0.15 เท่าของวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีสมบัติทางกายภาพที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยคอนกรีตบล็อกปูพื้นที่กล่าวข้างต้นมีราคา 2.74 บาทต่อก้อนผลิตภัณฑ์น้ำหนัก 4.40 กิโลกรัม

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2546

##4470626921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: UTILIZATION / CONCRETE BLOCK / SPENT SILICA-ALUMINA / SOLIDIFICATION

HARIT THITINANT : UTILIZATION OF SPENT SILICA-ALUMINA FOR MAKING CONCRETE BLOCK. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph. D., 124 pp. ISBN : 974-17-3546-4.

This research investigated the utilization of spent silica-alumina as partial cement replacement for production of interlocking concrete paving block. The experiments were performed to determine factors affecting solidification process. Physical characteristics and chemical properties such as chemical composition, pozzolanic index, and particle size distribution were obtained as same as the general properties of concrete specimen such as compressive strength and density. The appropriate condition for making concrete paving blocks was studied by varying fraction by weight of aggregate to binder equivalent to 2, 3, 5, 8, 10 and 11 at 7 and 28 days of curing. The varying of spent silica-alumina to binder at 0.05, 0.10, 0.15, 0.25 and 0.35 was performed at curing time of 7, 14, 21 and 28 days as a propose to study the suitable ratio of waste replacement in cement by using water-cement ratio equivalent to 0.5 for the entire experiment. The results indicated that by increasing the ratio of aggregate to binder and spent silica-alumina to binder, consequently, decreasing of fresh concrete's workability. A proper ratio of cement:sand:gravel for making concrete paving block was 1:1.2:1.8 and grinding of spent silica-alumina, which particle size smaller than 150 microns, without burning is the most suitable material due to higher substitution. The appropriate cement replacement with $SA_{100,\ UNT}$ was 0.15 of binder, at curing time of 28 days yielded physical properties acceptable by the standard of interlocking concrete paving blocks promulgated by the Ministry of Industry. The cost estimation of the aforementioned concrete paving block was 2.74 baht per 4.40 kilograms of product.

Department ....Environmental Engineering..... Student's singature Thitinant H.

Field of study ..Environmental Engineering..... Advisor's signature Chawakitchar-P

Academic year ....2003.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ที่กรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไข และสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับข้อคิดเห็น และคำเสนอแนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อนุเคราะห์วัสดุและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความเอื้อเฟื้อทั้งอุปกรณ์ สถานที่ และอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำวิจัย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ทบวงมหาวิทยาลัย มูลนิธิชิน โสภณพนิช และมูลนิธิกระจกอาซาฮี ที่มอบทุนอุดหนุนบางส่วนในงานวิจัยครั้งนี้

ความดีของวิทยานิพนธ์ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ให้ ความรัก การสนับสนุน ทั้งด้านกำลังทรัพย์ คำปรึกษา และกำลังใจ โดยเฉพาะคุณฐาเนตร ท้าวธงไชย ขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือ กำลังใจ และสิ่งดีๆ ที่มีให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ที่สุด

ท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน โดยเฉพาะ อาร์ม โอ๊ต เอก เอ้ อ้อ วอร์ วรรธ โป้ง เมธ เจ และ พุฒ ที่คอยช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษาและดำเนินงานวิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฐ

สัญลักษณ์และคำย่อ ..... ณ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 วัตถุประสงค์ 1

1.2 ขอบเขตการวิจัย 2

บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร 3

2.1 คอนกรีต 3

2.1.1 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4

2.1.2 วัสดุปอซโซลานและคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน 6

2.1.3 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น 8

2.1.4 น้ำ 9

2.1.5 วัสดุผสม 10

2.1.6 ความสามารถทำงานได้ 12

2.2 คอนกรีตบล็อก 13

2.2.1 คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง 14

2.2.2 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น 14

2.2.3 เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น 16

2.3 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 18

2.3.1 สารแอนทราควิโนน 20

2.4 การกำจัดโดยการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง 20

2.4.1 คำจำกัดความและวัตถุประสงค์การทำเสถียร 20

2.4.2 คำจำกัดความและวัตถุประสงค์การทำก้อนแข็ง 20

2.4.3 วิธีการทำก้อนแข็ง 21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.4 กลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง 21
2.4.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำก้อนแข็ง 23
2.5 ความสามารถในการถูกชะละลาย 24
2.6 วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต 24
2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ 25
2.6.2 ลักษณะทางกายภาพ 25
2.6.3 ลักษณะการทำงาน 26
2.6.4 ประโยชน์และการใช้งาน 27
2.7 การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28
บทที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย 36
3.1 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย 36
3.1.1 วัตถุดิบ 36
3.1.2 สารเคมี 36
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ 38
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง 41
3.2.1 ตัวแปรอิสระ 41
3.2.2 ตัวแปรตาม 41
3.2.3 ตัวแปรควบคุม 41
3.3 การดำเนินการวิจัย 41
3.3.1 การทดลองที่ 1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย 41
3.3.2 การทดลองที่ 2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย 42
3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 43
3.3.4 การทดลองที่ 4 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น 44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 45
4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย 45
4.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย 48
4.2.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 การทดสอบหาค่าดัชนีกำลังของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 49

4.2.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและวัสดุผสม 50

4.2.4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ 54

4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกโดยใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 56

4.3.1 อัตราส่วนวัสดุผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อก 56

4.3.2 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อก 60

4.3.3 ความสามารถในการลดการชะละลายของคอนกรีตบล็อก 70

4.4 ประมาณค่าใช้จ่ายคอนกรีตบล็อกผลิตโดยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 73

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 76

บทที่ 6 ข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม 78

รายการอ้างอิง 79

บรรณานุกรม 83

ภาคผนวก 84

ภาคผนวก ก. วิธีการทดลองโดยละเอียด 85

ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดลอง 96

ภาคผนวก ค. ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคและ XRF 117

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 124

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต	3
2.2 ออกไซด์ของธาตุหลักในปูนเม็ดซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4
2.3 กำลังของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำ	10
2.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ	11
2.5 อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ	12
2.6 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น	16
2.7 ส่วนประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	19
2.8 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	19
2.9 รายละเอียดและข้อดีข้อเสียของวิธีการทำก้อนแข็ง	22
2.10 รายละเอียดกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง	23
2.11 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ PFA GGBS และไมโครซิลิกา	25
2.12 ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของซีเมนต์ PFA GGBS และไมโครซิลิกา	26
3.1 การแปรค่าซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดเพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น	43
3.2 การศึกษาอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานและระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น	44
4.1 ปริมาณความชื้นและการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเตรียมที่ระยะเวลาการเผาต่างๆ	47
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	49
4.3 ผลการทดสอบค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุต่างๆ	50
4.4 ขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและเถ้าลอยลิกไนต์	51
4.5 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและวัสดุผสม	55
4.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตอายุ 7 และ 28 วัน ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆ	58
4.7 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม	61
4.8 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.9 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 66

4.10 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 69

4.11 ค่าใช้จ่ายของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ 74

ข.1.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบหาค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของวัสดุปอซโซลานเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อายุ 28 และ 60 วัน.. 97

ข.1.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตอายุ 7 และ 28 วัน ที่การแปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่างๆ 98

ข.1.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่สัดส่วนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด เป็น 1 : 1.2 : 1.8 99

ข.1.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม. 100

ข.1.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 101

ข.1.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน 102

ข.1.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 103

ข.1.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ กันภายใต้สภาวะที่เหมาะสม 104

ข.2.1 ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบหาค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของวัสดุปอซโซลานเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อายุ 28 และ 60 วัน 105

ข.2.2 ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตอายุ 7 และ 28 วัน ที่การแปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่างๆ 106

ข.2.3 ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่สัดส่วนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด เป็น 1 : 1.2 : 1.8 107

ข.2.4 ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม ... 108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.2.5 ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิม และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 110

ข.2.6 ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาค เล็กกว่า 150 ไมครอน 112

ข.2.7 ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาค เล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 114

ข.2.8 ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ กันภายใต้สภาวะที่เหมาะสม 116

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ผลกระทบเนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยอัตราส่วน 1 : 2 : 4 : 0.6 และบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส 6

2.2 คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวงมาตรฐาน แบบและขนาดต่างๆ 15

2.3 ลักษณะและขนาดของบล็อกประสานปูพื้นแต่ละชนิด 17

2.4 สูตรโครงสร้างของสารแอนทราควิโนน 20

3.1 วัสดุประสาน (ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) และวัสดุผสม (ทรายและหินเกล็ด)... 37

3.2 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเตรียมที่สถานะต่างๆ 37

3.3 แบบหล่อคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย 39

3.4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด 40

3.5 เครื่องเขย่าแบบหมุนตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 40

4.1 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ 46

4.2 การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 47

4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ 52

4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ 53

4.5 ส่วนผสมของวัสดุผสมที่ใช้ในการวิจัย 54

4.6 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ดที่อัตราส่วนต่างๆ 58

4.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ที่แปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่างๆ 59

4.8 ความหนาแน่นของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ที่แปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่างๆ 59

4.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 62

4.10 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 62

4.11 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนต่างๆ 63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 64

4.13 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 65

4.14 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 66

4.15 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 67

4.16 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนต่างๆ 68

4.17 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 69

4.18 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ 70

4.19 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่สภาวะเหมาะสมในแต่ละสถานะของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 71

4.20 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ 72

4.21 สีของน้ำชะละลายซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ 73

ค.1 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม 118

ค.2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 119

ค.3 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน 120

ค.4 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ค.5 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ 122

ค.6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy 123

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และคำย่อ

AAR	=	Alkali Aggregate Reaction
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
B	=	วัสดุประสาน (Binder)
C	=	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Cement)
C_3A	=	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$)
C_4AF	=	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)
C_2S	=	ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$)
C_3S	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$)
C-S-H	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ ซีเมนต์เจล
$D_{10\%}$	=	ขนาดอนุภาคที่ระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ 10
$D_{50\%}$	=	ขนาดอนุภาคที่ระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ 50
$D_{90\%}$	=	ขนาดอนุภาคที่ระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ 90
G	=	หินเกล็ด
GGBS	=	Ground Granulated Blast Furnace Slag
L.O.I.	=	การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition)
MS	=	Microsilica
PFA	=	Pulvarized Fuel Ash
S	=	ทราย
SA	=	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว
$SA_{ORG.\ UNT}$	=	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม
$SA_{ORG.\ TRT}$	=	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
$SA_{100.\ UNT}$	=	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน
$SA_{100.\ TRT}$	=	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
W	=	น้ำ
XRD	=	X-ray Diffraction Spectrometry
XRF	=	X-ray Fluorescence Spectroscopy

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย