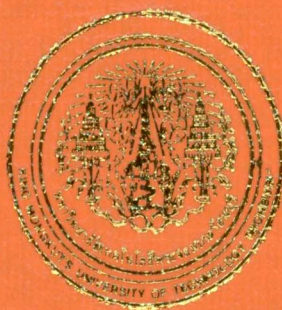


ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E42156



USE OF GROUND FLUIDIZED BED FLY ASH AND GROUND
BAGASSE ASH TO IMPROVE PROPERTIES OF RECYCLED
AGGREGATE CONCRETE

MR. RATTAPON SOMNA

A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (CIVIL ENGINEERING)
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONCKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI
2011



E42156

Use of Ground Fluidized Bed Fly Ash and Ground Bagasse Ash to Improve Properties
of Recycled Aggregate Concrete

Mr. Rattapon Somna M.Eng. (Civil Engineering)



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment
of the Requirements for
the Degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering)
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
2011

Dissertation Committee

.....
(Prof. Prinya Chindapasirt, Ph.D.)

Chairman

.....
(Prof. Chai Jaturapitakkul, Ph.D.)

Member and Advisor

.....
(Asst. Prof. Sutat Leelataviwat, Ph.D.)

Member

.....
(Asst. Prof. Thatchavee Leelawat, Ph.D.)

Member

.....
(Asst. Prof. Tawich Pulngern, Ph.D.)

Member

Dissertation Title	Use of Ground Fluidized Bed Fly Ash and Ground Bagasse Ash to Improve Properties of Recycled Aggregate Concrete
Dissertation Credits	36
Candidate	Mr. Rattapon Somna
Dissertation Advisor	Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

E42156

This dissertation was aimed to use ground fluidized bed fly ash (GFA) and ground bagasse ash (GBA) to improve properties of recycled aggregate concretes. Fly ash from Prachin Buri Province and bagasse ash from Lop Buri Province were collected and ground until the amount of particles retained on a 45- μ m sieve (sieve No. 325) was less than 1% by weight. Recycled coarse aggregate in this study was obtained from debris of 150x300 mm concrete cylinder samples after being tested for compressive strength. The samples were crushed by a swing hammer crusher and the crushed materials retained on a 4.75 mm sieve (sieve No.4) having maximum size of 19 mm were used as a recycled coarse aggregate (RCA).

Compressive strengths of conventional concrete at 28 days were designed to be 45, 35, and 30 MPa, which were corresponding to water to binder ratios of 0.45, 0.55, and 0.65, respectively. RCA was used to replace crushed limestone while GFA and GBA were used to replace Portland cement Type I at 20, 35, and 50% by weight of binder to cast recycled aggregate concrete. The slumps of fresh concrete were controlled between 50 and 100 mm by varying the amount of superplasticizer. Compressive strength, modulus of elasticity, water permeability coefficient, chloride penetration depth, chloride contents, and expansion in sulfate solutions of recycled aggregate concrete were investigated and compared to conventional concrete.

The results show that GFA and GBA could slightly improve the compressive strength of recycled aggregate concrete. The effect of the W/B ratio on the compressive strength of recycled aggregate concrete did not differ from that on conventional concrete. GFA and GBA did not affect the modulus of elasticity of recycled aggregate concrete, but the compressive strength had more effect on the modulus of elasticity. Therefore, use of GFA and GBA to partially replace cement could not improve the modulus of elasticity of recycled aggregate concrete. When compared concrete with the same compressive strength, the moduli of elasticity of recycled aggregate concrete with and without the ashes were lower than that of conventional concrete.

To reduce the water permeability coefficient, use of GFA and GBA to replace cement in recycled aggregate concrete was more effective than the reduction of the W/B ratio of the concrete. Compressive strength also had a greater effect on the water permeability of recycled aggregate concrete without GFA and GBA than that of recycled aggregate concrete with both ashes, especially when the compressive strengths of the recycled aggregate concretes were less than 45 MPa. Moreover, the chloride penetration depth, the total and free chloride contents, and the expansion due to sulfate attacks of recycled

E 42156

aggregate concrete decreased when GFA and GBA were used to partially replace Portland cement. The chloride penetration resistance and the expansion resistance of recycled aggregate concrete were strongest when the replacement of GFA or GBA was increased up to 50% by weight of binder. However, the surface damages of the recycled aggregate concrete due to sulfate attacks occurred when high volume of GFA and GBA (35% and 50% by weight of binder) were used. In summary, to improve the compressive strength, water permeability, chloride resistance, and expansion of recycled aggregate concrete, the suitable replacement of Portland cement by GFA and GBA was suggested to be 20% by weight of binder.

Keywords : Bagasse Ash / Compressive Strength / Durability / Fly Ash /
Recycled Aggregate

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เถาถ่านหินบดละเอียดที่เผาด้วยระบบฟลูอิดไดซ์เบด และเถาซาน อ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจาก การย่อยเศษคอนกรีต
หน่วยกิต	36
ผู้เขียน	นายรัฐพล สมนา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

E_42156

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถาถ่านหินบดละเอียดที่ได้จากการเผาถ่านหินด้วยระบบฟลูอิดไดซ์เบด และเถาซานอ้อยบดละเอียดเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยนำเถาถ่านหินจากจังหวัดปราจีนบุรีและเถาซานอ้อยจากจังหวัดลพบุรีมาบดละเอียดจนมีวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตได้จากการนำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 300 มิลลิเมตร ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดมาย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีต จากนั้นร่อนเอามวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานที่มีช่องเปิดขนาด 4.75 มิลลิเมตร และมีขนาดโตสุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร มาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต

ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 45, 35 และ 30 เมกะปาสกาล ซึ่งตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ ทำการหล่อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยและใช้เถาถ่านหินบดละเอียด และเถาซานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 50 ถึง 100 มิลลิเมตร โดยปรับปริมาณของสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีต ทดสอบค่ากำลังอัด, โมดูลัสยืดหยุ่น, สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต, ความลึกจากการแทรกซึมของคลอไรด์, ปริมาณคลอไรด์

E 42156

ทั้งหมดและคลอไรด์อิสระ และการขยายตัวของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟต

ผลทดสอบพบว่าเถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเช่นเดียวกันกับคอนกรีตควบคุม เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในขณะที่กำลังอัดมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่า ดังนั้นการใช้เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่สามารถปรับปรุงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากันพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

การใช้เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถลดการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้มากกว่าการใช้วิธีการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีผลกระทบต่อ การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ผสมเถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดมากกว่ากรณีของคอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดในส่วนผสม โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่า 45 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ความถี่จากการแทรกซึมคลอไรด์และการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตลดลงเมื่อใช้เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดในส่วนผสม และลดลงอย่างมากที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามการใช้เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับสารละลายซัลเฟตพบว่าผิวของคอนกรีตมีความเสียหายอย่างมาก ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เถาถ่านหินบดละเอียดและเถาซานฮวยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทั้งด้านกำลังอัด ความทนทาน ความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

คำสำคัญ : กำลังอัด / ความทนทาน / เถาซานฮวย / เถาถ่านหิน / มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to take this opportunity to thank my advisor, Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul for his guidance, encouragement, and helpful suggestions. I am also grateful to the chairman of the committee, Prof. Dr. Prinya Chindaprasirt, and the committee members, Asst. Prof. Dr. Sutat Leelataviwat, Asst. Prof. Dr. Thatchavee Leelawat, and Asst. Prof. Dr. Tawich Pulngern for their constructive evaluation of this dissertation.

I would like to thank the Commission on Higher Education, Thailand for supporting grant under the program Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the joint Ph.D. Program Thai Doctoral degree for this research. In addition, I gratefully acknowledge the financial supports from Rajamangala University of Technology Isan and the Thailand Research Fund (TRF) under TRF Senior Research Scholar Grant No. RTA5080020 and RTA5380002.

Finally, I would like to thank Asst. Prof. Dr. Wichian Chalee, Mr. Tieng Cheewaket, Mr. Pokpong Rattanachu, Mr. Supat Khamkhai and all members of the Concrete Laboratory. Moreover, I would like to thank the entire staffs of the Civil Engineering Department, Engineering Faculty, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) for their friendship, kindness and generous cooperation during my staying at KMUTT.

CONTENTS

	PAGE
ENGLISH ABSTRACT	ii
THAI ABSTRACT	iv
ACKNOWLEDGEMENTS	vi
CONTENTS	vii
LIST OF TABLES	ix
LIST OF FIGURES	xii
 CHAPTER	
1. INTRODUCTION	1
1.1 Statement of Problems	1
1.2 Objectives	2
1.3 Scope of Study	2
1.4 Dissertation Outlines	3
 2. LITERATURE REVIEW	 4
2.1 Fluidized Bed Fly Ash	4
2.2 Bagasse Ash	5
2.3 Recycled Aggregate	6
2.4 Recycled Aggregate Concrete	8
 3. MATERIALS AND EXPERIMENTAL PROGRAM	 13
3.1 Equipments	13
3.2 Materials	13
3.3 Experimental Program	14
 4. RESULTS AND DISSCUSSIONS	 22
4.1 Physical Properties of Cementitious Materials	22
4.2 Chemical Compositions	24
4.3 Properties of Aggregates	25
4.4 Fresh Concrete	26
4.5 Compressive Strength	27
4.6 Modulus of Elasticity	31
4.7 Water Permeability	33
4.8 Chloride Resistance	37
4.9 Expansion of Concrete due to Sulfate Attack	43
 5. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS	 50
5.1 Conclusions	50
5.2 Suggestions	51
 REFERENCES	 52
 APPENDIX	 61
A. Properties of Ground Fly Ash and Ground Bagasse Ash	61
B. Properties of Aggregates	63
C. Compressive Strength and Modulus of Elasticity	68

D. Water Permeability	81
E. Chloride Penetration Depth	131
F. Total and Free Chloride Contents	135
G. Expansion	165
CURRICURUM VITAE	174

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
3.1 Concrete mix proportions	16
4.1 Physical properties of materials	24
4.2 Chemical compositions of Portland cement type I, ground fluidized bed fly ash, and ground bagasse ash	24
4.3 Properties of aggregates	25
4.4 Compressive strength of concretes	28
4.5 Water permeability of concretes	33
4.6 Chloride penetration depths of concretes	37
4.7 Expansion of concretes immersed in 5% MgSO_4 solution	44
4.8 Expansion of concretes immersed in 5% Na_2SO_4 solution	45
A.1 Specific gravity of ground fluidized bed fly ash	62
A.2 Specific gravity of ground bagasse ash	62
B.1 Specific gravity and absorption of river sand	64
B.2 Specific gravity and absorption of crushed limestone	64
B.3 Specific gravity and absorption of recycled aggregate	64
B.4 Sieve analysis of river sand	65
B.5 Sieve analysis of crushed limestone	65
B.6 Sieve analysis of recycled aggregate	65
B.7 Unit weight and void of river sand	66
B.8 Unit weight and void of crushed limestone	66
B.9 Unit weight and void of recycled aggregate	67
B.10 Abrasion loss of crushed limestone	67
B.11 Abrasion loss of recycled coarse aggregate	67
B.12 Material finer than 75 micron of recycled coarse aggregate	67
C.1 Compressive strength and modulus of elasticity of 45CON concrete	69
C.2 Compressive strength and modulus of elasticity of 45RC concrete	69
C.3 Compressive strength and modulus of elasticity of 45RCF20 concrete	70
C.4 Compressive strength and modulus of elasticity of 45RCF35 concrete	70
C.5 Compressive strength and modulus of elasticity of 45RCF50 concrete	71
C.6 Compressive strength and modulus of elasticity of 45RCB20 concrete	71
C.7 Compressive strength and modulus of elasticity of 45RCB35 concrete	72
C.8 Compressive strength and modulus of elasticity of 45RCB50 concrete	72
C.9 Compressive strength and modulus of elasticity of 55CON concrete	73
C.10 Compressive strength and modulus of elasticity of 55RC concrete	73
C.11 Compressive strength and modulus of elasticity of 55RCF20 concrete	74
C.12 Compressive strength and modulus of elasticity of 55RCF35 concrete	74
C.13 Compressive strength and modulus of elasticity of 55RCF50 concrete	75
C.14 Compressive strength and modulus of elasticity of 55RCB20 concrete	75
C.15 Compressive strength and modulus of elasticity of 55RCB35 concrete	76
C.16 Compressive strength and modulus of elasticity of 55RCB50 concrete	76
C.17 Compressive strength and modulus of elasticity of 65CON concrete	77
C.18 Compressive strength and modulus of elasticity of 65RC concrete	77
C.19 Compressive strength and modulus of elasticity of 65RCF20 concrete	78
C.20 Compressive strength and modulus of elasticity of 65RCF35 concrete	78
C.21 Compressive strength and modulus of elasticity of 65RCF50 concrete	79
C.22 Compressive strength and modulus of elasticity of 65RCB20 concrete	79

C.23	Compressive strength and modulus of elasticity of 65RCB35 concrete	80
C.24	Compressive strength and modulus of elasticity of 65RCB50 concrete	80
D.1	Water permeability at 28 days of 45CON concrete	83
D.2	Water permeability at 90 days of 45CON concrete	84
D.3	Water permeability at 28 days of 45RC concrete	85
D.4	Water permeability at 90 days of 45RC concrete	86
D.5	Water permeability at 28 days of 45RCF20 concrete	87
D.6	Water permeability at 90 days of 45RCF20 concrete	88
D.7	Water permeability at 28 days of 45RCF35 concrete	89
D.8	Water permeability at 90 days of 45RCF35 concrete	90
D.9	Water permeability at 28 days of 45RCF50 concrete	91
D.10	Water permeability at 90 days of 45RCF50 concrete	92
D.11	Water permeability at 28 days of 45RCB20 concrete	93
D.12	Water permeability at 90 days of 45RCB20 concrete	94
D.13	Water permeability at 28 days of 45RCB35 concrete	95
D.14	Water permeability at 90 days of 45RCB35 concrete	96
D.15	Water permeability at 28 days of 45RCB50 concrete	97
D.16	Water permeability at 90 days of 45RCB50 concrete	98
D.17	Water permeability at 28 days of 55CON concrete	99
D.18	Water permeability at 90 days of 55CON concrete	100
D.19	Water permeability at 28 days of 55RC concrete	101
D.20	Water permeability at 90 days of 55RC concrete	102
D.21	Water permeability at 28 days of 55RCF20 concrete	103
D.22	Water permeability at 90 days of 55RCF20 concrete	104
D.23	Water permeability at 28 days of 55RCF35 concrete	105
D.24	Water permeability at 90 days of 55RCF35 concrete	106
D.25	Water permeability at 28 days of 55RCF50 concrete	107
D.26	Water permeability at 90 days of 55RCF50 concrete	108
D.27	Water permeability at 28 days of 55RCB20 concrete	109
D.28	Water permeability at 90 days of 55RCB20 concrete	110
D.29	Water permeability at 28 days of 55RCB35 concrete	111
D.30	Water permeability at 90 days of 55RCB35 concrete	112
D.31	Water permeability at 28 days of 55RCB50 concrete	113
D.32	Water permeability at 90 days of 55RCB50 concrete	114
D.33	Water permeability at 28 days of 65CON concrete	115
D.34	Water permeability at 90 days of 65CON concrete	116
D.35	Water permeability at 28 days of 65RC concrete	117
D.36	Water permeability at 90 days of 65RC concrete	118
D.37	Water permeability at 28 days of 65RCF20 concrete	119
D.38	Water permeability at 90 days of 65RCF20 concrete	120
D.39	Water permeability at 28 days of 65RCF35 concrete	121
D.40	Water permeability at 90 days of 65RCF35 concrete	122
D.41	Water permeability at 28 days of 65RCF50 concrete	123
D.42	Water permeability at 90 days of 65RCF50 concrete	124
D.43	Water permeability at 28 days of 65RCB20 concrete	125
D.44	Water permeability at 90 days of 65RCB20 concrete	126
D.45	Water permeability at 28 days of 65RCB35 concrete	127
D.46	Water permeability at 90 days of 65RCB35 concrete	128
D.47	Water permeability at 28 days of 65RCB50 concrete	129

D.48	Water permeability at 90 days of 65RCB50 concrete	130
E.1	Chloride penetration depths of concretes with W/B ratio of 0.45	132
E.2	Chloride penetration depths of concretes with W/B ratio of 0.55	133
E.3	Chloride penetration depths of concretes with W/B ratio of 0.65	134
F.1	Total chloride content of concrete with W/B ratio of 0.45 immersed in 3% NaCl solution	137
F.2	Total chloride content of concrete with W/B ratio of 0.55 immersed in 3% NaCl solution	141
F.3	Total chloride content of concrete with W/B ratio of 0.65 immersed in 3% NaCl solution	146
F.4	Free chloride content of concrete with W/B ratio of 0.45 immersed in 3% NaCl solution	151
F.5	Free chloride content of concrete with W/B ratio of 0.55 immersed in 3% NaCl solution	155
F.6	Free chloride content of concrete with W/B ratio of 0.65 immersed in 3% NaCl solution	160
G.1	Expansion of 65CON concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	166
G.2	Expansion of 65RC concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	166
G.3	Expansion of 65RCF20 concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	167
G.4	Expansion of 65RCF35 concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	167
G.5	Expansion of 65RCF50 concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	168
G.6	Expansion of 65RCB20 concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	168
G.7	Expansion of 65RCB35 concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	169
G.8	Expansion of 65RCB50 concrete immersed in 5% MgSO ₄ solution	169
G.9	Expansion of 65CON concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	170
G.10	Expansion of 65RC concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	170
G.11	Expansion of 65RCF20 concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	171
G.12	Expansion of 65RCF35 concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	171
G.13	Expansion of 65RCF50 concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	172
G.14	Expansion of 65RCB20 concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	172
G.15	Expansion of 65RCB35 concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	173
G.16	Expansion of 65RCB50 concrete immersed in 5% Na ₂ SO ₄ solution	173

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE	
3.1	Experimental program	15
3.2	Modulus of elasticity testing set-up	17
3.3	Permeability housing cell	18
3.4	Concrete samples for chloride penetration depth test	20
3.5	Sample preparation for investigating chloride content	21
4.1	Particle morphology of Portland cement type I	22
4.2	Particle morphologies of original and ground fluidized bed fly ashes	23
4.3	Particle morphologies of original and ground bagasse ashes	23
4.4	Particle size distributions of materials	23
4.5	Coarse aggregates	25
4.6	Gradation of aggregates	26
4.7	Relationship between superplasticizer used to maintain the slump of fresh concrete between 50-100 mm and replacement of GFA or GBA	26
4.8	Percentage compressive strengths at 28, 60, and 90 days of recycled aggregate concretes containing GFA compared to conventional concretes	29
4.9	Percentage compressive strengths at 28, 60, and 90 days of recycled aggregate concretes containing GBA compared to conventional concretes	30
4.10	Modulus of elasticity of conventional concretes and recycled aggregate concretes with and without GFA and GBA	32
4.11	Relationship between water permeability coefficient and replacement of GFA or GBA in concretes with W/B ratios of 0.45, 0.55, and 0.65 at 28 days	34
4.12	Relationship between water permeability coefficient and replacement of GFA or GBA in concretes with W/B ratios of 0.45, 0.55, and 0.65 at 90 days	35
4.13	Relationship between compressive strength and water permeability coefficient of recycled aggregate concrete	36
4.14	Chloride penetration depths of concretes after immersed in 3% NaCl solution for 6 months	38
4.15	Chloride penetration depths of concretes after immersed in 3% NaCl solution for 12 months	38
4.16	Chloride penetration depths of concretes after immersed in 3% NaCl solution for 18 months	38
4.17	Total chloride contents at each distance from surface of concretes with W/B ratio of 0.45 immersed in 3% NaCl solution for 12 and 18 months	40
4.18	Total chloride contents at each distance from surface of concretes with W/B ratio of 0.55 immersed in 3% NaCl solution for 12 and 18 months	40
4.19	Total chloride contents at each distance from surface of concretes with W/B ratio of 0.65 immersed in 3% NaCl solution for 12 and 18 months	41
4.20	Free chloride contents at each distance from surface of concretes with W/B ratio of 0.45 immersed in 3% NaCl solution for 12 and 18 months	42
4.21	Free chloride contents at each distance from surface of concretes with W/B ratio of 0.55 immersed in 3% NaCl solution for 12 and 18 months	42

4.22	Free chloride contents at each distance from surface of concretes with W/B ratio of 0.65 immersed in 3% NaCl solution for 12 and 18 months	42
4.23	Relationship between expansion and immersed time in 5% MgSO ₄ solution of recycled aggregate concretes with and without GFA	46
4.24	Relationship between expansion and immersed time in 5% MgSO ₄ solution of recycled aggregate concretes with and without GBA	46
4.25	Relationship between expansion and immersed time in 5% Na ₂ SO ₄ solution of recycled aggregate concretes with and without GFA	47
4.26	Relationship between expansion and immersed time in 5% Na ₂ SO ₄ solution of recycled aggregate concretes with and without GBA	47
4.27	Concrete samples after immersing in 5% MgSO ₄ and in 5% Na ₂ SO ₄ solutions for 24 months	48
4.28	The damage of 65RCB50 concrete immersed in 5% MgSO ₄ and 5% Na ₂ SO ₄ solutions for 24 months	49
D.1	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45CON at 28 days	83
D.2	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45CON at 90 days	84
D.3	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RC at 28 days	85
D.4	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RC at 90 days	86
D.5	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCF20 at 28 days	87
D.6	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCF20 at 90 days	88
D.7	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCF35 at 28 days	89
D.8	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCF35 at 90 days	90
D.9	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCF50 at 28 days	91
D.10	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCF50 at 90 days	92
D.11	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCB20 at 28 days	93
D.12	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCB20 at 90 days	94
D.13	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCB35 at 28 days	95
D.14	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCB35 at 90 days	96
D.15	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCB50 at 28 days	97
D.16	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 45RCB50 at 90 days	98
D.17	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55CON at 28 days	99
D.18	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55CON at 90 days	100

D.19	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RC at 28 days	101
D.20	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RC at 90 days	102
D.21	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCF20 at 28 days	103
D.22	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCF20 at 90 days	104
D.23	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCF35 at 28 days	105
D.24	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCF35 at 90 days	106
D.25	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCF50 at 28 days	107
D.26	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCF50 at 90 days	108
D.27	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCB20 at 28 days	109
D.28	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCB20 at 90 days	110
D.29	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCB35 at 28 days	111
D.30	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCB35 at 90 days	112
D.31	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCB50 at 28 days	113
D.32	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 55RCB50 at 90 days	114
D.33	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65CON at 28 days	115
D.34	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65CON at 90 days	116
D.35	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RC at 28 days	117
D.36	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RC at 90 days	118
D.37	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCF20 at 28 days	119
D.38	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCF20 at 90 days	120
D.39	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCF35 at 28 days	121
D.40	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCF35 at 90 days	122
D.41	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCF50 at 28 days	123
D.42	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCF50 at 90 days	124
D.43	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCB20 at 28 days	125

D.44	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCB20 at 90 days	126
D.45	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCB35 at 28 days	127
D.46	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCB35 at 90 days	128
D.47	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCB50 at 28 days	129
D.48	Relationship between cumulative volume of passing water and cumulative time of 65RCB50 at 90 days	130