

TUGAS AKHIR

STUDI EKSPERIMENTAL *LIGHTWEIGHT CONCRETE* DENGAN PENAMBAHAN *GLASS POWDER* SEBAGAI *FILLER* DENGAN VARIASI W/C

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana
Teknik Pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas
Sriwijaya**



**YADI YANTO
03011382025108**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2024

PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yadi Yanto
NIM : 03011382025108
Judul : Studi Eksperimental *Lightweight Concrete* dengan Penambahan
Glass Powder Sebagai *Filler* dengan Variasi W/C

Menyatakan bahwa Tugas Akhir saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/*plagiat*. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/*plagiat* dalam Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, Maret 2024



Yadi Yanto
NIM. 03011382025108

HALAMAN PENGESAHAN

**STUDI EKSPERIMENTAL *LIGHTWEIGHT CONCRETE*
DENGAN PENAMBAHAN *GLASS POWDER* SEBAGAI
FILLER DENGAN VARIASI W/C**

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik

Oleh:

YADI YANTO
03011382025108

Palembang, Maret 2024

**Diperiksa dan disetujui oleh,
Dosen Pembimbing**



Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.
NIP. 198605192019031007

**Mengetahui/Menyetujui
Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan**



Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
NIP. 197610312002122001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Tugas Akhir ini dengan judul “Studi Eksperimental *Lightweight Concrete* dengan Penambahan *Glass Powder* Sebagai *Filler* dengan Variasi *W/C*” yang disusun oleh Yadi Yanto, 03011382025108 telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 22 Maret 2024.

Palembang, 22 Maret 2024

Tim Penguji Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir

Ketua:

1. Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.
NIP. 198605192019031007



Anggota:

2. Ir. Sutanto Muliawan, M.Eng.
NIP. 195604241990031001



Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Eng. Ir. H. Joni Arliansyah, M.T.
NIP. 196706151995121002

Ketua Jurusan Teknik Sipil



Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
NIP. 197610312002122001

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yadi Yanto
NIM : 03011382025108
Judul : Studi Eksperimental *Lightweight Concrete* dengan Penambahan
Glass Powder Sebagai *Filler* dengan Variasi W/C

Memberikan izin kepada pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu tahun) tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan pembimbing sebagai penulis korespondensi (*corresponding author*).

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Palembang, Maret 2024



YADI YANTO
NIM. 03011382025108

v

Universitas Sriwijaya

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama Lengkap : Yadi Yanto
Jenis Kelamin : Laki-laki
Status : Belum menikah
Agama : Buddha
Warga Negara : Indonesia
Nomor HP : 089698586851
E-mail : yadiyanto181@gmail.com

Riwayat Pendidikan :

Nama Sekolah	Fakultas	Jurusan	Pendidikan	Masa
SD Maitreyawira Palembang	-	-	SD	2008-2014
SMP Maitreyawira Palembang	-	-	SMP	2014-2017
SMA Maitreyawira Palembang	-	MIPA	SMA	2017-2020
Universitas Sriwijaya	Teknik	Teknik Sipil	S1	2020-2024

Demikian riwayat hidup penulis yang dibuat dengan sebenarnya.

Dengan Hormat,



Yadi Yanto
NIM. 03011382025108

RINGKASAN

STUDI EKSPERIMENTAL *LIGHTWEIGHT CONCRETE* DENGAN PENAMBAHAN *GLASS POWDER* SEBAGAI *FILLER* DENGAN VARIASI W/C

Karya tulis ilmiah berupa Tugas Akhir, 22 Maret 2024

Yadi Yanto; Dibimbing oleh Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas, Sriwijaya

xx + 82 halaman, 36 tabel, 62 gambar, 4 lampiran

Lightweight concrete merupakan beton yang memiliki berat jenis lebih ringan daripada beton normal. *Foam concrete* adalah salah satu dari jenis *lightweight concrete*. *Foam concrete* dibuat melalui proses fisik atau kimiawi yang melibatkan penambahan udara atau gas ke dalam *slurry*. *Glass powder* dapat dimanfaatkan sebagai filler. Penelitian ini menggunakan variasi persentase *glass powder* 20%, 30%, dan 40% dengan ukuran *glass powder* 50 Mesh, perbandingan volume *foam* dan *slurry* yang digunakan 0,3 dan 0,7 dengan variasi w/c 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; dan 0,7. Pengujian beton segar berupa *setting time test* dan *slump flow test*, sedangkan untuk pengujian beton keras berupa pengujian kuat tekan, berat jenis, dan modulus elastisitas. *Setting time test* pada *lightweight concrete* dengan nilai variasi persentase GP 20%; w/c 0,3 dengan nilai 161 menit memiliki waktu ikat yang paling cepat dibanding variasi w/c yang lainnya. Berdasarkan nilai *slump flow*, benda uji dengan variasi persentase GP 40%; w/c 0,7 memiliki nilai *workability* tertinggi dibanding variasi lainnya. Nilai berat jenis pada benda uji variasi persentase GP 20%; w/c 0,3 hari ke-28 memiliki nilai terbesar dibandingkan variasi lainnya, yaitu sebesar 1519,5 kg/m³. Nilai kuat tekan paling optimal diperoleh pada saat benda uji dengan variasi persentase GP 20%; w/c 0,5 dengan nilai kuat tekan sebesar 3,18 MPa. Diperoleh nilai terbesar untuk modulus elastisitas pada benda uji dengan variasi persentase GP 20%; w/c 0,5 dengan nilai sebesar 8134.66682 MPa. Campuran beton yang memiliki nilai paling optimal adalah variasi beton ringan dengan kandungan 20% *glass powder* sebagai *filler* dengan variasi w/c 0,5 yang memiliki berat jenis sebesar 1398 kg/m³, kuat tekan sebesar 3,18 MPa, dan nilai modulus elastisitas sebesar 8134.66682 MPa.

Kata Kunci: *glass powder, foam concrete, lightweight concrete, water cement ratio*, kuat tekan, berat jenis, modulus elastisitas.

SUMMARY

EXPERIMENTAL STUDY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH THE ADDITION OF GLASS POWDER AS FILLER WITH VARIATIONS IN W/C

Scientific Paper in the form of Final Projects, March 22nd 2024

Yadi Yanto; Supervised by Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.

Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sriwijaya University

xx + 82 pages, 36 tables, 62 pictures, 4 attachments

Lightweight concrete is concrete that has a lighter density than normal concrete. Foam concrete is one of the types of lightweight concrete. Foam concrete is made through a physical or chemical process that involves adding air or gas to the slurry. Glass powder can be utilized as a filler. This study uses variations in the percentage of glass powder 20%, 30%, and 40% with a glass powder size of 50 Mesh, the volume ratio of foam and slurry used is 0.3 and 0.7 with a w/c variation of 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; and 0.7. Fresh concrete testing in the form of setting time test and slump flow test, while for hard concrete testing in the form of testing compressive strength, density, and modulus of elasticity. Setting time test on lightweight concrete with 20% GP percentage variation value; w/c 0.3 with a value of 161 minutes has the fastest binding time compared to other w/c variations. Based on the slump flow value, the specimen with a variation of 40% GP percentage; w/c 0.7 has the highest workability value compared to other variations. The density value of the specimen with 20% GP percentage variation; w/c 0.3 on the 28th day has the largest value compared to other variations, which is 1519.5 kg/m³. The most optimal compressive strength value is obtained when the specimen with a percentage variation of GP 20%; w/c 0.5 with a compressive strength value of 3.18 MPa. The largest value for the modulus of elasticity was obtained in the specimen with a percentage variation of GP 20%; w/c 0.5 with a value of 8134.66682 MPa. The concrete mixture that has the most optimal value is a lightweight concrete variation containing 20% glass powder as filler with a w/c variation of 0.5 which has a density of 1398 kg/m³, a compressive strength of 3.18 MPa, and an elastic modulus value of 8134.66682 MPa.

Keyword: glass powder, foam concrete, lightweight concrete, cement water ratio, compressive strength, density, modulus of elasticity.

STUDI EKSPERIMENTAL LIGHTWEIGHT CONCRETE DENGAN PENAMBAHAN GLASS POWDER SEBAGAI FILLER DENGAN VARIASI W/C

Yadi Yanto¹⁾, Arie Putra Usman²⁾

¹⁾ Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
E-mail: yadiyanto181@gmail.com

²⁾ Dosen Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
E-mail: arieputrausman@ft.unsri.ac.id

Abstrak

Lightweight concrete merupakan beton yang memiliki berat jenis lebih ringan daripada beton normal. *Foam concrete* adalah salah satu dari jenis *lightweight concrete*. *Foam concrete* dibuat melalui proses fisik atau kimiawi yang melibatkan penambahan udara atau gas ke dalam *slurry*. *Glass powder* dapat dimanfaatkan sebagai filler. Penelitian ini menggunakan variasi persentase *glass powder* 20%, 30%, dan 40% dengan ukuran *glass powder* 50 Mesh, perbandingan volume *foam* dan *slurry* yang digunakan 0,3 dan 0,7 dengan variasi *w/c* 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; dan 0,7. Pengujian beton segar berupa *setting time test* dan *slump flow test*, sedangkan untuk pengujian beton keras berupa pengujian kuat tekan, berat jenis, dan modulus elastisitas. *Setting time test* pada *lightweight concrete* dengan nilai variasi persentase GP 20%; *w/c* 0,3 dengan nilai 161 menit memiliki waktu ikat yang paling cepat dibanding variasi *w/c* yang lainnya. Berdasarkan nilai *slump flow*, benda uji dengan variasi persentase GP 40%; *w/c* 0,7 memiliki nilai *workability* tertinggi dibanding variasi lainnya. Nilai berat jenis pada benda uji variasi persentase GP 20%; *w/c* 0,3 hari ke-28 memiliki nilai terbesar dibandingkan variasi lainnya, yaitu sebesar 1519,5 kg/m³. Nilai kuat tekan paling optimal diperoleh pada saat benda uji dengan variasi persentase GP 20%; *w/c* 0,5 dengan nilai kuat tekan sebesar 3,18 MPa. Diperoleh nilai terbesar untuk modulus elastisitas pada benda uji dengan variasi persentase GP 20%; *w/c* 0,5 dengan nilai sebesar 8134.66682 MPa. Campuran beton yang memiliki nilai paling optimal adalah variasi beton ringan dengan kandungan 20% *glass powder* sebagai filler dengan variasi *w/c* 0,5 yang memiliki berat jenis sebesar 1398 kg/m³, kuat tekan sebesar 3,18 MPa, dan nilai modulus elastisitas sebesar 8134.66682 MPa.


Kata kunci: *glass powder*, *foam concrete*, *lightweight concrete*, *water cement ratio*, kuat tekan, berat jenis, modulus elastisitas.

Palembang, Maret 2024
Diperiksa dan disetujui oleh,



Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.
NIP. 198605192019031007

Mengetahui/Menyetujui
Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan,



Dr. Ir. Saloma, S.T., M.T.
NIP. 197610312002122001

EXPERIMENTAL STUDY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH THE ADDITION OF GLASS POWDER AS FILLER WITH VARIATIONS IN W/C

Yadi Yanto¹⁾, Arie Putra Usman²⁾

¹⁾ Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
E-mail: yadiyanto181@gmail.com

²⁾ Dosen Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
E-mail: arieputrausman@ft.unsri.ac.id

Abstract

Lightweight concrete is concrete that has a lighter specific gravity than normal concrete. Foam concrete is one of the types of lightweight concrete. Foam concrete is made through a physical or chemical process that involves adding air or gas to the slurry. Glass powder can be utilized as a filler. This study uses variations in the percentage of glass powder 20%, 30%, and 40% with a glass powder size of 50 Mesh, the volume ratio of foam and slurry used is 0.3 and 0.7 with a w/c variation of 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; and 0.7. Fresh concrete testing in the form of setting time test and slump flow test, while for hard concrete testing in the form of testing compressive strength, specific gravity, and modulus of elasticity. Setting time test on lightweight concrete with 20% GP percentage variation value; w/c 0.3 with a value of 161 minutes has the fastest binding time compared to other w/c variations. Based on the slump flow value, the specimen with a variation of 40% GP percentage; w/c 0.7 has the highest workability value compared to other variations. The specific gravity value of the specimen with 20% GP percentage variation; w/c 0.3 on the 28th day has the largest value compared to other variations, which is 1519.5 kg/m³. The most optimal compressive strength value is obtained when the specimen with a percentage variation of GP 20%; w/c 0.5 with a compressive strength value of 3.18 MPa. The largest value for the modulus of elasticity was obtained in the specimen with a percentage variation of GP 20%; w/c 0.5 with a value of 8134.66682 MPa. The concrete mixture that has the most optimal value is a lightweight concrete variation containing 20% glass powder as filler with a w/c variation of 0.5 which has a specific gravity of 1398 kg/m³, a compressive strength of 3.18 MPa, and an elastic modulus value of 8134.66682 MPa.

Kata kunci: glass powder, foam concrete, lightweight concrete, cement water ratio, compressive strength, density, modulus of elasticity.

Palembang, Maret 2024
Diperiksa dan disetujui oleh,



Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T.
NIP. 198605192019031007

Mengetahui/Menyetujui
Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan,



x

Univesitas Sriwijaya

KATA PENGANTAR

Segala Puji bagi Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberi penulis keadaan yang sehat wal'afiat sehingga diberikan izin untuk menyelesaikan proposal laporan tugas akhir yang berjudul "Studi Eksperimental *Lightweight Concrete* Dengan Penambahan Glass Powder Sebagai Filler Dengan Variasi W/C". Penulis ini berterima kasih dengan tulus kepada:

1. Kedua orang tua serta saudara penulis yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
2. Prof. Dr. Taufiq Marwa, SE. M.Si., selaku Rektor Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Joni Arliansyah, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik.
4. Ibu Dr. Ir. Saloma, S.T, M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Sriwijaya dan selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bantuan dan arahan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Ir. Arie Putra Usman, S.T., M.T, selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah banyak memberikan bantuan dan arahan baik dalam pelaksanaan penelitian maupun penyusunan laporan tugas akhir ini.
6. Ibu Dr. Mona Foralisa Toyfur, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik saya.
7. Rekan terbaik saya, Vera Tanzey, S.Ked., yang telah membantu sangat banyak dalam proses penyusunan laporan saya.
8. Teman-teman satu tim penulis dan teman-teman lainnya dari Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Sriwijaya yang telah membantu proses penyusunan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan pada penulisan laporan ini sehingga akan menerima segala kritikan, pendapat dan masukan.

Indralaya, Maret 2024



Yadi Yanto

DAFTAR ISI

	Halaman
COVER TUGAS AKHIR.....	ii
PERNYATAAN INTEGRITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	vi
RINGKASAN.....	vii
SUMMARY.....	viii
ABSTRAK.....	ii
ABSTRACT.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Jenis-Jenis <i>Lightweight Concrete</i>	4
2.2 Bahan Penyusun <i>Lightweight Concrete</i>	10
2.2.1 Semen.....	10
2.2.2 Agregat Halus (<i>Fine Aggregate</i>).....	13
2.2.3 Air.....	14

2.2.4	<i>Foaming Agent</i>	15
2.3	Kelebihan dan Kekurangan <i>Lightweight Concrete</i>	17
2.3.1	Kelebihan <i>Lightweight Concrete</i>	17
2.3.2	Kekurangan <i>Lightweight Concrete</i>	18
2.4	<i>Glass Powder</i>	18
2.5	Pengujian <i>Lightweight Concrete</i>	20
2.5.1	<i>Slump Flow</i>	20
2.5.2	<i>Setting Time Test</i>	21
2.5.3	Pengujian Kuat Tekan Beton	22
2.5.4	Pengujian Modulus Elastisitas	24
2.5.5	Pengujian Berat Jenis Beton	25
BAB III METODE PENELITIAN		27
3.1	Studi Literatur	27
3.2	Alur Penelitian	27
3.3	Material Penelitian	28
3.3.1	Semen	28
3.3.2	<i>Glass Powder</i>	28
3.3.3	<i>Foaming Agent</i>	29
3.3.4	Air	29
3.4	Alat Penelitian	30
3.4.1	<i>Flow Table</i>	30
3.4.2	Neraca	30
3.4.3	Alat Cetak Beton	31
3.4.4	<i>Foam Generator</i>	31
3.4.5	<i>Mixer</i>	32
3.4.6	Jangka Sorong	32
3.4.7	<i>Container</i>	33
3.4.8	Alat Uji Kuat Beton	33
3.4.9	Alat Uji Modulus Elastisitas	34
3.4.10	Alat Uji <i>Setting Time</i>	35
3.5	Tahapan Pengujian	35

3.5.1 Tahap 1	36
3.5.2 Tahap 2	36
3.5.3 Tahap 3	37
3.5.4 Tahap 4	40
3.5.5 Tahap 5	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Hasil Pengujian Beton Segar	47
4.1.1 <i>Setting Time Test</i>	47
4.1.2 <i>Slump Flow Test</i>	50
4.2 Sifat Fisik dan Mekanik	52
4.2.1 Pengujian Berat Jenis	52
4.2.2 Pengujian Kuat Tekan	55
4.2.3 Pengujian Modulus Elastisitas	58
4.2.4 Hubungan Kuat Tekan Beton dan Berat Jenis	72
4.2.5 Hubungan Modulus Elastisitas dan Kuat Tekan	74
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	77
Daftar Pustaka	78

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2. 1 Klasifikasi lightweight concrete berdasarkan kelas kekuatan	5
Tabel 2. 2 Klasifikasi lightweight concrete berdasarkan tipe struktural.....	6
Tabel 2. 3 Perbedaan no-fines concrete, aerated concrete, dan lightweight aggregate concrete	9
Tabel 2. 4 Gradasi Ideal Saringan Agregat Halus.....	13
Tabel 2. 5 Spesifikasi standar kandungan bahan kimia dalam air sebagai campuran beton.....	15
Tabel 2. 6 Nilai kuat tekan dengan penambahan glass powder	23
Tabel 2. 7 Rekapitulasi modulus elastisitas	25
Tabel 2. 8 Dry density of concrete.....	26
Tabel 2. 9 Fresh density of concrete	26
Tabel 4. 1 Pengujian setting time.....	49
Tabel 4. 2. Hasil flow table test persentase GP 20%	51
Tabel 4. 3 Hasil flow table test persentase GP 30%	51
Tabel 4. 4 Hasil flow table test persentase GP 40%	51
Tabel 4. 5 Kriteria nilai workability foam concrete.....	52
Tabel 4. 6. Hasil pengujian berat jenis persentase GP 20%.....	53
Tabel 4. 7 Hasil pengujian berat jenis persentase GP 30%.....	53
Tabel 4. 8 Hasil pengujian berat jenis persentase GP 40%.....	53
Tabel 4. 9 Hasil pengujian kuat tekan hari ke-28	55
Tabel 4. 10 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 20%; w/c 0.3	58
Tabel 4. 11 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 20%; w/c 0.4	59
Tabel 4. 12 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 20%; w/c 0.5	59
Tabel 4. 13 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 20%; w/c 0.6	60

Tabel 4. 14 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 20%; w/c 0.7	60
Tabel 4. 15 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 30%; w/c 0.3	61
Tabel 4. 16 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 30%; w/c 0.4	61
Tabel 4. 17 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 30%; w/c 0.5	62
Tabel 4. 18 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 30%; w/c 0.6	62
Tabel 4. 19 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 30%; w/c 0.7	63
Tabel 4. 20 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 40%; w/c 0.3	64
Tabel 4. 21 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 40%; w/c 0.4	64
Tabel 4. 22 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 40%; w/c 0.5	65
Tabel 4. 23 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 40%; w/c 0.6	65
Tabel 4. 24 Nilai modulus elastisitas benda uji variasi persentase GP 40%; w/c 0.7	66
Tabel 4. 25 Rekapitulasi nilai modulus elastisitas benda uji	72
Tabel 4. 26 Hasil pengujian berat jenis dan kuat tekan benda uji.....	73
Tabel 4. 27 Hubungan modulus elastisitas dan kuat tekan	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2. 1 Hubungan kelas kekuatan dan kepadatan kering yang diperlukan untuk LC	4
Gambar 2. 2 Jenis-jenis molekul pada tipe Lightweight Concrete (Jomaa'h et al., 2019)	9
Gambar 2. 3 Grafik gradasi agregat halus (ASTM C-33).....	14
Gambar 2. 4 Grafik perbandingan tegangan dan regangan lightweight concrete dan beton normal (Purwanti & Artiningsih, 2019).....	18
Gambar 2. 5 Lightweight concrete slump value (Agrawal et al., 2021)	20
Gambar 2. 6 Lightweight concrete slump flow diameter (Agrawal et al., 2021) ..	21
Gambar 2. 7 Grafik setting time semen OPC tipe 1 (Firnanda et al., 2018).....	22
Gambar 2. 8 Nilai kuat tekan beton dengan variasi glass powder halus.....	24
Gambar 2. 9 Grafik Modulus Elastisitas (Elisabeth et al., 2020)	25
Gambar 3. 1. Semen OPC (Ordinary Portland Cement).....	28
Gambar 3. 2 Glass powder	28
Gambar 3. 3 Foaming agent.....	29
Gambar 3. 4 Air bersih.....	29
Gambar 3. 5 Flow table.....	30
Gambar 3. 6 Neraca	30
Gambar 3. 7 Alat cetak beton silinder.....	31
Gambar 3. 8 Alat cetak beton mortar	31
Gambar 3. 9 Foam generator.....	32
Gambar 3. 10 Mixer	32
Gambar 3. 11 Jangka sorong.....	33
Gambar 3. 12 Container	33
Gambar 3. 13 Automatic compression testing machine	34
Gambar 3. 14 Compressive strength matest	34
Gambar 3. 15 Alat uji modulus elastisitas	35
Gambar 3. 16 Vicat apparatus.....	35
Gambar 3. 17 Pencampuran material.....	41

Gambar 3. 18 Pembuatan foam.....	41
Gambar 3. 19 Pencampuran material dan foam kedalam mixer	42
Gambar 3. 20 Slump flow test	42
Gambar 3. 21 Setting time test.....	42
Gambar 3. 22 Pencetakan benda uji silinder.....	43
Gambar 3. 23 Pencetakan benda uji mortar	43
Gambar 3. 24 Curing benda uji mortar	44
Gambar 3. 25 Pengujian berat jenis mortar.....	44
Gambar 3. 26 Pengujian berat jenis silinder	45
Gambar 3. 27 Pengujian kuat tekan mortar.....	45
Gambar 3. 28 Pemasangan alat uji modulus elastisitas pada benda uji silinder	46
Gambar 3. 29 Pengujian modulus elastisitas menggunakan alat compressive strength matest	46
Gambar 4. 1 Setting time test menggunakan vicat apparatus	47
Gambar 4. 2 Hasil setting time test persentase GP 20%.....	48
Gambar 4. 3 Hasil setting time test persentase GP 30%.....	48
Gambar 4. 4 Hasil setting time test persentase GP 40%.....	48
Gambar 4. 5 Metode slump flow test.....	50
Gambar 4.6. Berat jenis pada pengujian penambahan glass powder pada lightweight concrete dengan variasi W/C	54
Gambar 4. 7 Hasil pengujian kuat tekan beton hari ke-28 persentase GP 20%.....	56
Gambar 4. 8 Hasil pengujian kuat tekan beton hari ke-28 persentase GP 30%.....	56
Gambar 4. 9 Hasil pengujian kuat tekan beton hari ke-28 persentase GP 40%.....	57
Gambar 4. 10 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 20%; w/c 0.3	67
Gambar 4. 11 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 20%; w/c 0.4	67
Gambar 4. 12 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 20%; w/c 0.5	67
Gambar 4. 13 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 20%; w/c 0.6	68

Gambar 4. 14 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 20%; w/c 0.7	68
Gambar 4. 15 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 30%; w/c 0.3	68
Gambar 4. 16 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 30%; w/c 0.4	69
Gambar 4. 17 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 30%; w/c 0.5	69
Gambar 4. 18 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 30%; w/c 0.6	69
Gambar 4. 19 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 30%; w/c 0.7	70
Gambar 4. 20 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 40%; w/c 0.3	70
Gambar 4. 21 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 40%; w/c 0.4	70
Gambar 4. 22 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 40%; w/c 0.5	71
Gambar 4. 23 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 40%; w/c 0.6	71
Gambar 4. 24 Grafik tegangan dan regangan variasi persentase GP 40%; w/c 0.7	71

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Lampiran 1. Lembar Asistensi Laporan Tugas Akhir	83
Lampiran 2. Hasil Seminar Sidang Sarjana/Ujian Tugas Akhir	84
Lampiran 3. Surat Keterangan Selesai Tugas Akhir	85
Lampiran 4. Surat Keterangan Selesai Revisi Tugas Akhir.....	86

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur di Indonesia telah menjadi salah satu prioritas pemerintah sebagai upaya untuk meningkatkan konektivitas serta mempercepat pertumbuhan ekonomi negara. Infrastruktur yang baik dan maju sangatlah penting dalam mendukung kegiatan distribusi barang, mobilitas penduduk, dan peningkatan daya saing Indonesia di skala internasional. Infrastruktur sangat erat kaitannya dengan material konstruksi, salah satunya ialah beton.

Beton sering digunakan dikarenakan peranan beton sebagai bahan utama struktur konstruksi. Beton dapat dibuat dengan menggabungkan semen, air, agregat, dan terkadang elemen tambahan berupa bahan kimia, bahan berserat, dan bahan bangunan non-kimia dengan rasio tertentu (Safarizki et al., 2020). Produksi beton telah mengalami revolusi dengan menggunakan teknik takaran baru serta penggabungan elemen ultra-tipis yang bertujuan untuk meningkatkan teknologi dan daya tahan dalam konstruksi bangunan (Bheel & Adesina, 2021).

Salah satu hasil dari kemajuan pembangunan infrastruktur ialah dengan timbulnya penemuan-penemuan mengenai material bahan bangunan yang ramah lingkungan dan berkekuatan tinggi. Material beton sendiri terdapat berbagai jenis, seperti beton pracetak, beton mutu tinggi, beton bertulang, dan juga penemuan yang banyak dipakai sekarang yaitu beton ringan (*Lightweight Concrete*).

Lightweight Concrete digunakan dalam struktur untuk meminimalisir beban mati secara keseluruhan. Selain itu, *Lightweight Concrete* juga memiliki ketahanan api yang tinggi dan transmisi panas yang rendah jika dibandingkan dengan beton normal. *Lightweight Concrete* ini juga dapat mencegah tulangan baja dari korosi dan air asin (Banawair et al., 2019). Beton ringan menurut ACI 213R-03[4] memiliki definisi sebagai beton yang memiliki kuat tekan minimum 28 hari sebesar 2500 psi (17 MPa), dengan kepadatan kesetimbangan antara 70 dan 120 lb/ft³ (1120 dan 1920 kg/m³), dan seluruhnya terdiri dari agregat ringan atau kombinasi dari agregat ringan dan agregat dengan kepadatan normal.

Menurut data SIPSN (Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), volume sampah pada tahun 2022 mencapai 19,45 juta ton dengan sampah kaca berkontribusi sebanyak 1,96% atau 0,38 ton. Hal ini menunjukkan bahwa diperlukan pengelolaan sampah kaca untuk mengurangi limbah kaca. Pada penelitian ini, limbah kaca akan dimanfaatkan menjadi campuran pada *lightweight concrete* yang akan menambah performa beton. Kaca merupakan salah satu bahan multifungsi yang digunakan dimanapun dikarenakan karakteristiknya yang sangat baik, seperti kekuatan intrinsik yang tinggi, permeabilitas yang rendah, kelembaman kimiawi, serta transparansi optik (Lu et al., 2017). Pabrik pembuatan kaca merupakan salah satu penyumbang emisi rumah kaca yang signifikan di dunia (Redondo-Mosquera et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa diperlukan sebuah tindakan yang dapat mengurangi limbah kaca, salah satunya dengan penggunaan bubuk kaca (*Glass Powder*) yang diaplikasikan pada material konstruksi *lightweight concrete*.

Bubuk kaca (*Glass Powder*) merupakan bubuk yang sangat halus dan terbuat dari kaca tanah. Dalam banyak aplikasi industri dan kerajinan, kaca bubuk memiliki kelebihan dan tersedia dalam gelas dan industri pemasok (Neamat & Hassan, 2021). Sisa-sisa kaca yang dikumpulkan dari toko-toko dimanfaatkan. Gelas-gelas yang terkumpul dihancurkan menjadi ukuran pasir sehingga dapat digunakan sebagai pengganti sebagian pasir alami. Dengan kata lain, jika kaca berhasil digunakan sebagai agregat halus, bahan limbah ini akan menjadi sumber daya yang bermanfaat (Arivalagan & Sethuraman, 2020).

Pasir alami telah banyak digunakan sebagai agregat halus dalam pembuatan beton, namun hal ini memberikan dampak yang buruk jika digunakan pada skala yang besar. Kaca limbah daur ulang memiliki susunan fisik dan kimiawi yang sebanding dengan pasir, sehingga kaca ini dianggap sebagai pengganti yang baik (Khan et al., 2019). Hal ini merujuk pada penggunaan bubuk kaca (*Glass Powder*) yang dapat menggantikan sebagian dari penggunaan agregat halus. Hingga saat ini, belum banyak penelitian yang meninjau penambahan *glass powder* sebagai *filler* dalam *lightweight concrete* dengan variasi w/c. Oleh sebab itu, dilakukan Studi Eksperimental *Lightweight Concrete* Dengan Variasi Ratio Semen Dan Penambahan *Glass Powder* Sebagai *Filler*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang mengenai studi eksperimental *lightweight concrete* dengan variasi w/c dan penambahan glass powder sebagai filler, maka rumusan masalah yang akan dibahas adalah bagaimana analisis pengaruh penambahan *glass powder* sebagai substitusi parsial agregat halus dengan variasi w/c terhadap *lightweight concrete*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dan memahami pengaruh penambahan *glass powder* dengan variasi w/c pada *lightweight concrete* terhadap sifat fisik dan sifat mekanik *lightweight concrete*.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian *lightweight concrete* dengan variasi ukuran *glass powder* adalah sebagai berikut:

1. *Glass powder* dengan variasi ukuran 10, 30, dan 50 mesh.
2. Semen *Ordinary Portland Cement* (OPC) Tipe 1.
3. Variasi W/C 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; dan 0,7
4. *Bekisting* silinder diameter 10 cm dan tinggi 20 cm untuk menguji kuat tekan beton.
5. *Bekisting* silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk menguji modulus elastisitas.
6. Pengujian beton segar berupa *setting time test* dan *slump test*.
7. Sifat fisik dan mekanik berupa berat jenis, kuat tekan, dan modulus elastisitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N. L., & Siddique, S. (2021). *A Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete for Sustainable Construction*. *Construction Materials*, 1(1), 39–62. <https://doi.org/10.3390/constrmater1010003>
- Amziane, Sofiane. 2006. "Setting Time Determination of Cementitious Materials Based on Measurements of the Hydraulic Pressure Variations." *Cement and Concrete Research* 36 (2): 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.013>.
- ASTM C469/C469M-22. (n.d.). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. West Conshohocken, PA: www.astm.org.
- ASTM C 330/C330M-09. 2017. *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. Annual Books of ASTM Standards, USA, Association of Standard Testing Materials
- ASTM C109. (2016). *Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. West Conshohocken, PA: www.astm.org.
- ASTM C138-14. (2014). *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*, ASTM International. West Conshohocken, PA: www.astm.org
- Anggarini, U., Pratapa, S., Purnomo, V., & Sukmana, N. C. (2019). *A comparative study of the utilization of synthetic foaming agent and aluminum powder as pore-forming agents in lightweight geopolymer synthesis*. *Open Chemistry*, 17(1), 629–638. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0073>
- Arivalagan, S., & Sethuraman, V. S. (2020). *Experimental study on the mechanical properties of concrete by partial replacement of glass powder as fine aggregate: An environmental friendly approach*. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6035–6041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.722>
- Banawair, A. S., Qaid, G. M., Adil, Z. M., & Nasir, N. A. M. (2019). *The strength of lightweight aggregate in concrete - A Review*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012017>
- Bheel, N., & Adesina, A. (2021). *Influence of Binary Blend of Corn Cob Ash and Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete*. *Silicon*, 13(5), 1647–1654. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00557-4>

- Bostanci, L. (2020). *Effect of waste glass powder addition on properties of alkali-activated silica fume mortars*. *Journal of Building Engineering*, 29(December 2019), 101154. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101154>
- Elisabeth, S., Lukar, C., Pandaleke, R., & Wallah, S. (2020). Pengujian Modulus Elastisitas Pada Beton Dengan Menggunakan Tras Sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus. *Jurnal Sipil Statik*, Vol.8(No.1), 33–38.
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., & Gugliandolo, E. (2018). *Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density*. *Construction and Building Materials*, 165, 735–749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241>
- Firnanda, A., Kurniawandy, A., & Ermiyati. (2018). Kuat Tekan Beton Dan Waktu Ikat Semen Portland Komposit (Pcc). *Gastronomia Ecuatoriana y Turismo Local.*, 1(69), 5–24.
- Hashim, M., & Tantray, M. (2021). *Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete*. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00524. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00524>
- Hedjazi, S. (2020). *Compressive Strength of Lightweight Concrete*. *Compressive Strength of Concrete*, 1–18. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88057>
- Huang, H., Yuan, Y., Zhang, W., & Gao, Z. (2019). *Bond behavior between lightweight aggregate concrete and normal weight concrete based on splitting-tensile test*. *Construction and Building Materials*, 209, 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.125>
- Ibrahim, K. I. M. (2021). *Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash*. *Case Studies in Construction Materials*, 15(February), e00630. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00630>
- Jhatial, Ashfaque Ahmed, Noridah Mohamad, Muhammad Tahir Lakhari, Wan Inn Goh, Lee Wai Hong, Muhammad Tahir Lakhari, Ab-Dul Aziz, Abdul Samad, and Redzuan Abdullah. 2018. “The Mechanical Properties of Foamed Concrete with Polypropylene Fibres.” *Article in International Journal of Engineering and Technology* 7 (3): 411–13. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.7.18892>.
- Jiahao, L., Chin Lian, F., Hejazi, F., & Azline, N. (2019). *Study of properties and strength of no-fines concrete*. *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science, 357(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012009>

- Jiang, Y., Ling, T. C., Mo, K. H., & Shi, C. (2019). *A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products*. *Journal of Environmental Management*, 242(November 2018), 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>
- Jomaa'h, M. M., Kamil, B. T., & Baghabra, O. S. (2019). *Mechanical and Structural Properties of a Lightweight Concrete with Different Types of Recycling Coarse Aggregate*. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 26(1), 33–40. <https://doi.org/10.25130/tjes.26.1.05>
- Kaminsky, A., Krstic, M., Rangaraju, P., Tagnit-Hamou, A., & Thomas, M. D. A. (2020). *Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete*. *Concrete Int*, 42(11), 24–32.
- Khan, Q. S., Sheikh, M. N., McCarthy, T. J., Robati, M., & Allen, M. (2019). *Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: A sustainable solution for future construction*. *Construction and Building Materials*, 201, 369–379. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.178>
- Kurnia, R. D. I., Fonna, S., Huzni, S., Studi, P., Sipil, T., Teknik, F., Almuslim, U., Studi, P., Mesin, T., Teknik, F., & Syiah, U. (2020). *PENGARUH KANDUNGAN KIMIA AIR TERHADAP KUAT dalam jangka panjang . Hal ini terjadi karena sebagian besar akibat yang berupa ion klorida (Cl), sulfat (SO 4) dan sodium (Na). Kualitas air dengan*. 10(1), 81–88.
- Lu, J. X., Zhan, B. J., Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2017). *Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates*. *Materials and Design*, 135, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.016>
- Liu, Zhongwei, Kang Zhao, Chi Hu, and Yufei Tang. 2016. “Effect of Water-Cement Ratio on Pore Structure and Strength of Foam Concrete.” *Advances in Materials Science and Engineering* 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9520294>.
- Muralitharan, R. S., & Ramasamy, V. (2017). *Development of Lightweight concrete for structural applications*. *Journal of Structural Engineering (India)*, 44(4), 336–344.

- Neamat, S., & Hassan, M. (2021). *A Review on Using ANOVA and RSM Modelling in The Glass Powder Replacement of The Concrete Ingredients*. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(02), 72–77. <https://doi.org/10.38094/jastt202103>
- Oliveira, I. R. B. de, Sorce, A. R., Gaglieri, M. V. V., Cassanjes, F. C., & Maestrelli, S. C. (2022). *Influence of the addition of glass from long neck bottles in the properties of the reactive powder concrete*. *Research, Society and Development*, 11(13), e519111335853. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35853>
- Purwanti, H., & Artiningsih, T. P. (2019). *Palm Kernel Shell As an Alternative Aggregate on High Performance Concrete Concrete*. *Journal of Science Innovare*, 1(02), 68–75. <https://doi.org/10.33751/jsi.v1i02.1004>
- Raj, I. S., & John, E. (2019). *Evaluation of properties of aerated concrete partially replaced by cement with fly ash*. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 10(1), 223–229. <https://doi.org/10.34218/IJARET.10.1.2019.022>
- Redondo-Mosquera, J. D., Sánchez-Angarita, D., Redondo-Pérez, M., Gómez-Espitia, J. C., & Abellán-García, J. (2023). *Development of high-volume recycled glass ultra-high-performance concrete with high C3A cement*. *Case Studies in Construction Materials*, 18(February). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01906>
- Safarizki, H. A., Gunawan, L. I., & Marwahyudi. (2020). *Effectiveness of Glass Powder as a Partial Replacement of Sand in Concrete Mixtures*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1625(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012025>
- Sethy, K. (2018). *Aerated Concrete : A Revolutionary Construction Material*. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 5(988–993), 988–993.
- Srivastava, V., Gautam, S. P., & Agarwal, V. C. (2012). *Use of glass wastes as fine aggregate in Concrete*. *J. Acad. Indus. Res*, 1(6), 320. <https://www.researchgate.net/publication/278299013>
- Sun, C., Zhu, Y., Guo, J., Zhang, Y., & Sun, G. (2018). *Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete*. *Construction and Building Materials*, 186, 833–839. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.019>

- Thakur, S. S., & Pandey, K. (2021). *A Detail Discussion on Variation in Light Weight Concrete*. 8(7), 54–58.
- Thienel, K. C., Haller, T., & Beuntner, N. (2020). *Lightweight concrete-from basics to innovations*. *Materials*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/ma13051120>
- Tjaronge, Muhammad Wihardi, Abdul Rahman Djameluddin, Nocolaus Rahmayanto Lemba, and Ichsan Kalesaran. 2003. “Influence of Water To Cement Ratio (W/C) on Slump Flow and Compressive Strength of Self Compacting Concrete (SCC) Containing Portland Pozzolan Cement.” *Media Komunikasi Teknik Sipil* 14 (1): 106–11.
- Van, Lam Tang, Dien Vu Kim, Hung Ngo Xuan, Vu Dinh Tho, B. I. Bulgakov, and O. V. Alexandrova. 2020. “Modelling of the Effect of the Water-Cement Ratios on Properties Foam Concrete.” *Journal of Physics: Conference Series* 1425 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012189>.
- Wee, Tiong Huan, Saradhi Babu Daneti, and Thangayah Tamilselvan. 2011. “Effect of w/c Ratio on Air-Void System of Foamed Concrete and Their Influence on Mechanical Properties.” *Magazine of Concrete Research* 63 (8): 583–95. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.583>.
- Yang, K. H., Kim, H. Y., & Lee, H. J. (2022). *Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Various Steel Fibers*. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00538-4>