TUGAS AKHIR

PENGARUH SUBSTITUSI PARSIAL AGREGAT HALUS DENGAN CANGKANG KELAPA SAWIT TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK BATA RINGAN CLC

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil

Rafi Maulana Putra
21511021

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2026

FINAL PROJECT

THE EFFECT OF PARTIAL SUBSTITUTION OF FINE AGGREGATE WITH PALM SHELLS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CLC LIGHTWEIGHT BRICKS

Submitted to the Islamic University of Indonesia, Yogyakarta
in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Bachelor of Civil Engineering

Rafi Maulana Putra
21511021

CIVIL ENGINEERING STUDY PROGRAM
UNDERGRADUATE PROGRAM
FACULTY OF ENGINEERING DESIGN INNOVATION
ISLAMIC UNIVERSITY OF INDONESIA
2026

TUGAS AKHIR

PENGARUH SUBSTITUSI PARSIAL AGREGAT HALUS DENGAN CANGKANG KELAPA SAWIT TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK BATA RINGAN CLC

Disusun oleh:

Rafi Maulana Putra

21511021

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 27 Agustus 2026

Oleh Dewan Penguji

Dosen Pembimbing :
Ir. Jafar, S.T., MURP., M.T.
NIK : 185111305
Tanggal : 01-09-2026

Penguji I :
Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK : 185111304
Tanggal : 04-09-2026.

Penguji II :
Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK : 165111301
Tanggal : 01.09.2026

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil

Dr.-Eng. Ir. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.
NIK : 14511010

Dipindai dengan CamScanner

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Program Sarjana, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 1 September 2026

Yang membuat pernyataan,



Rafi Maulana Putra

21511021

Dipindai dengan CamScanner

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan segenap rahmat, dan hidayah Nya, sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Halus dengan Cangkang Kelapa Sawit terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Bata Ringan CLC. Tugas Akhir ini disusun dan diajukan kepada Universitas Islam Indonesia untuk memenuhi persyaratan akademik dalam menyelesaikan rogram Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Program Sarjana, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan bantuan, bimbingan, dan saran dari banyak pihak. Atas bantuan dari banyak pihak membuat penulis lebih mudah dalam menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik. Maka dari itu, izinkan penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak terkait.

1. Dr.-Eng. Ir. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain dan Inovasi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
2. Bapak Ir. Jafar, S.T., MURP., M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir atas segala bimbingan, nasihat, saran, semangat, serta dukungan yang diberikan selama penyusunan Tugas Akhir.
3. Bapak Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji 1 atas segala masukan dan padangannya terhadap penelitian saya.
4. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji 2 atas segala masukan dan pandangannya terhadap penelitian saya.
5. Kedua orang tua saya, Bapak teguh Rahayu Slamet dan Ibu Sriagustini yang telah memeberikan semangat, arahan, dan kepercayaannya yang telah diberikan.
6. Kakak saya Sintya Maulidina Putri dan juga adek saya Kautsar Abdel Hakam yang tetap mendukung selama masa perkuliahan.

7. 22511034, yang telah sabar dalam menghadapi saya juga memberikan ketegasan dalam disiplin ilmu Teknik Sipil UII ini dan juga warna baru, pandangan baru dalam hidup penulis.
8. Keluarga mahasiswa Teknik Sipil UII terutama SC 2021 dan Himpunan angkatan 2021 yang telah memberikan warna selama masa perkuliahan serta pandangan baru yang berguna pada hidup penulis untuk menjadi lebih baik.

Penulisan menyadari masih banyak kekurangan pada Tugas Akhir yang telah disusun ini jauh dari kata sempurna. Untuk itu, saran dan kritikan yang telah diberikan sangat membantu dalam menyempurnakan penelitian ini kedepannya.Diharapkan penelitian ini dapat bermanfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan di negara ini. Akhir kata penulisan berharap agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 1 September 2026

Rafi Maulana Putra
21511021

Dipindai dengan CamScanner

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR i
TUGAS AKHIR iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iv
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL x
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR LAMPIRAN xiii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xv
ABSTRAK xvi
ABSTRACT xvii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Batasan Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Tinjauan Umum 6
2.2 Penelitian Terdahulu yang Relevan 6
2.3 Perbandingan Penelitian 9
2.4 Keaslian Penelitian 20
BAB III LANDASAN TEORI 21
3.1 Tinjauan Umum 21
3.2 Beton Ringan 21
3.3 Bata Ringan 22
3.4 Semen Portland 24
3.5 Agregat Halus 26
3.6 Komponen Air 28

3.7 *Foam Agent* 29
3.8 Cangkang Kelapa Sawit 30
3.9 Additive Foam Concrete 32
3.10 Pengujian Bata Ringan *Cellular Lightweight Concrete* 34
3.10.1 Pengujian Bobot Isi 34
3.10.2 Pengujian Penyerapan Air 34
3.10.3 Pengujian Kuat Tekan 35
3.10 Kerangka Teoritis Pengaruh Substitusi Cangkang Kelapa Sawit 36
BAB IV METODE PENELITIAN 37
4.1 Tinjauan Umum 37
4.2 Variabel Penelitian 37
4.3 Bahan dan Peralatan 38
4.3.1 Bahan-bahan yang Digunakan 38
4.3.2 Peralatan yang Digunakan 41
4.4 Sampel Penelitian 42
4.5 Proporsi Campuran Bata Ringan CLC 43
4.6 Pemeriksaan Material Bahan Campuran 44
4.6.1 Pemeriksaan Kadar Lumpur Pasir 45
4.6.2 Pemeriksaan Berat Volume 45
4.6.3 Pemeriksaan Berat Jenis 45
4.6.4 Analisis Saringan dan Modulus Butiran Halus 46
4.6.5 Perawatan dan Pengecekan Cangkang Kelapa Sawit 46
4.7 Pembuatan Benda Uji dan Perawatan Benda Uji 47
4.8 Pengujian Benda Uji 47
4.9 Tahap Olah Data 49
4.10 Tahap Kesimpulan dan Saran 50
4.11 Bagan Alir Penelitian 51
BAB V HASIL & PEMBAHASAN 54
5.1 Tinjauan Umum 54
5.2 Pengujian dan Perawatan Material 54
5.3 Komposisi Bata Ringan CLC 63

5.4 Proses Pembuatan Benda Uji 69
5.4.1 Persiapan Material 69
5.4.2 Proses Pencampuran 70
5.4.3 Penuangan dan pencetakan 71
5.4.4 Perawatan (*curing*) 71
5.4.5 Pemotongan Benda Uji 72
5.5 Pengujian Bata Ringan 73
5.5.1 Pengujian Bobot isi 73
5.5.2 Pengujian Penyerapan Air 78
5.5.3 Pengujian Kuat Tekan 82
5.6 Pembahasan 86
5.6.1 Mekanisme Pengaruh Substitusi CKS 87
5.6.2 Hubungan Antar Parameter 88
5.6.3 Evaluasi terhadap SNI 8640-2018 89
5.6.4 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu 90
5.6.5 Penentuan Persentase Substitusi CKS Optimal 91
BAB VI KESIMPULAN & SARAN 94
6.1 Kesimpulan 94
6.2 Saran 95
DAFTAR PUSTAKA 96
LAMPIRAN 99

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 PenelitianTerdahulu dan Sekarang 10
Tabel 3.1 Kategori Berat Bata Ringan 23
Tabel 3.2 Syarat Fisis Bata Ringan 24
Tabel 3.3 Gradasi Agregat 26
Tabel 4.1 Pengujian Benda Uji Bata Ringan CLC 42
Tabel 4.2 Proporsi Campuran Bata Ringan 44
Tabel 5. 1 Berat Volume Padat Agregat Halus 55
Tabel 5. 2 Berat Volume Padat Cangkang Kelapa Sawit 55
Tabel 5. 3 Berat Volume Gembur Agregat Halus 55
Tabel 5. 4 Berat Volume Gembur Cangkang Kelapa Sawit 56
Tabel 5. 5 Pengujian Modulus Halus Butiran Pasir 57
Tabel 5. 6 Pengujian Modulus Halus Butiran CKS 57
Tabel 5. 7 Gradasi Agregat Halus (zona) 59
Tabel 5. 8 Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Pasir 60
Tabel 5. 9 Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan CKS 61
Tabel 5. 10 Pengujian Kandungan Lumpur Pasir 62
Tabel 5. 11 Komposisi Campuran Bata Ringan CLC 69
Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Bobot isi 74
Tabel 5. 13 Rata–rata Bobot Isi Kering Oven per Variasi 75
Tabel 5. 14 Hasil Uji Normalitas Shapiro-Wilk Bobot isi 76
Tabel 5. 15 Hasil Uji Homogenitas lavene’s Test 77
Tabel 5. 16 Hasil Welch's ANOVA 77
Tabel 5. 17 Hasil Uji Lanjut Games Howell 77
Tabel 5. 18 Hasil Pengujian Penyerapan Air 78
Tabel 5. 19 Rata-rata Penyerapan Air per Variasi 80
Tabel 5. 20 Hasil Uji Normalitas Shapiro Wilk Penyerapan Air 81
Tabel 5. 21 Hasil Uji Homogenitas Levene’s Test Penyerapan Air 81
Tabel 5. 22 Hasil Welch’s ANOVA Penyerapan Air 81
Tabel 5. 23 Hasil Uji Lanjut Games Howell Penyerapan Air 82

Tabel 5. 24 Hasil Pengujian Kuat Tekan 83
Tabel 5. 25 Rata-rata Kuat Tekan per Variasi 84
Tabel 5. 26 Hasil Uji Normalitas Shapiro Wilk Kuat Tekan 85
Tabel 5. 27 Hasil Uji Kruskal Wallis Kuat Tekan 85
Tabel 5. 28 Statistik Uji Kruskal Wallis Kuat Tekan 85
Tabel 5. 29 Hasil Uji Lanjut Dunn’s Test Kuat Tekan 86
Tabel 5. 30 Ringkasan hasil Uji Seluruh Parameter 87
Tabel 5. 31 kesesuaian Setiap Variasi terhadap Persyaratan SNI 8640-2018 92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Pembentukan Pori Pada Bata Ringan AAC dan CLC 22
Gambar 3.2 Proses Pembentukan *Foam Agent* Menjadi Busa 29
Gambar 3.3 Bagian-bagian kelapa sawit 31
Gambar 4.1 Portland Composite Cement 38
Gambar 4.2 Agregat Halus 2,36 – 4,75 mm 39
Gambar 4.3 Agregat Halus 0,6 – 1,18 mm 39
Gambar 4.4 Cangkang Kelapa Sawit 40
Gambar 4.5 Foaming Agent 40
Gambar 4.6 *Additive Foam Concrete* 41
Gambar 4.7 Bagan Alir Penelitian 52
Gambar 5. 1 Grafik Butiran Agregat Halus 59
Gambar 5. 2 Grafik Butiran CKS 60
Gambar 5. 3 Pencucian Cangkang Kelapa Sawit (CKS) 63
Gambar 5. 4 Material Campuran Bata Ringan CLC 70
Gambar 5. 5 Campuran Basah Bata Ringan CLC 71
Gambar 5. 6 Pencetakan Bata Riangan CLC 71
Gambar 5. 7 Proses *Curing* Bata Ringan 72
Gambar 5. 8 Pemotongan benda Uji 73
Gambar 5. 9 Proses Pengujian Bobot Isi 73
Gambar 5. 10 Tren Bobot Isi Kering Oven Bata Ringan 76
Gambar 5. 11 Tren Penyerapan Air CLC 80
Gambar 5. 12 Pengujian Kuat Tekan 83
Gambar 5. 13 Tren Penyebaran Kuat Tekan CLC 84
Gambar 5. 14 Grafik Regresi Linear Bobot Isi dan Kuat Tekan 89

DAFTAR LAMPIRAN

Gambar L-1. 1 Timbangan dan Nampan 100
Gambar L-1. 2 Oven 100
Gambar L-1. 3 *Universal testing Machine* 101
Gambar L-1. 4 kompresor Angin 101
Gambar L-1. 5 Silinder beton 102
Gambar L-1. 6 *Mixer* 102
Gambar L-1. 7 Besi Penumbuk 103
Gambar L-1. 8 Tabung Busa 103
Gambar L-1. 9 Alat Pemotong 104
Gambar L-2. 1 CKS-0 104
Gambar L-2. 2 CKS-2 105
Gambar L-2. 3 CKS-4 105
Gambar L-2. 4 CKS-6 106
Gambar L-2. 5 CKS-8 106
Gambar L-3. 1 Kuat Tekan 107
Gambar L-3. 2 Kuat Tekan 108
Gambar L-3. 3 Kuat tekan 109
Gambar L-3. 4 Kuat Tekan 110
Gambar L-3. 5 Kuat Tekan 111
Gambar L-3. 6 Kuat Tekan 112
Gambar L-3. 7 Kuat Tekan 113
Gambar L-3. 8 Kuat Tekan 114
Gambar L-3. 9 Kuat Tekan 115
Gambar L-3. 10 Kuat Tekan 116
Gambar L-3. 11 Kuat Tekan 117
Gambar L-3. 12 Kuat Tekan 118
Gambar L-3. 13 Kuat Tekan 119
Gambar L-3. 14 Kuat Tekan 120
Gambar L-3. 15 Kuat Tekan 121

Gambar L-3. 16 Kuat Tekan 122
Gambar L-4. 1 Lembar Plagiasi 123

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

AAC	= *Autoclaved Aerated Concrete*
ADF	= *Additive Foam Concrete*
CKS	= Cangkang Kelapa Sawit
CLS	= *Cellular Lightweight Concrete*
EDS	= *Energy Dispersive Spectroscopy*
FAS	= Faktor Air Semen
ITZ	= *Interfacial Transition Zone*
OPC	= *Ordinary Portland Cement*
PC	= *Portland Cement*
PKS	= *Palm Kernell Shell*
PPC	= *Portland Pozzolan Cement*
SEM	= *Scanning Electron Microscope*
SNI	= Standar Nasional Indonesia
SSD	= *Saturated Surface Dry*
XRD	= *XRay Diffraction*

ABSTRAK

Penambangan pasir alam untuk agregat konstruksi halus berisiko merusak ekosistem sungai, sementara limbah cangkang kelapa sawit (CKS) yang melimpah di Indonesia belum dimanfaatkan secara luas. Tekstur permukaan CKS yang kasar dan berpori telah terbukti dapat berikatan dengan baik dengan matriks semen berdasarkan penelitian sebelumnya, sehingga material ini berpotensi untuk menggantikan agregat halus pada bata beton ringan seluler (CLC), meskipun sifat berporinya juga berisiko meningkatkan penyerapan air. Studi ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi sebagian agregat halus dengan CKS terhadap berat satuan, penyerapan air, dan kekuatan tekan bata ringan CLC.

Pengujian dilakukan pada lima variasi substitusi CKS, yaitu 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat pasir, dengan rasio air-semen 0,50 dan aditif plastisizer, mengacu pada SNI 8640-2018. Spesimen uji diawetkan selama 28 hari sebelum diuji berat satuan kering oven, penyerapan air, dan kekuatan tekan, kemudian data dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA Welch dan Kruskal-Wallis untuk menguji signifikansi perbedaan antar variasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa berat satuan kering oven menurun secara signifikan ($p = 0{,}002$) dari 835,64 menjadi 778,48 kg/m³ seiring peningkatan kandungan CKS, sedangkan penyerapan air meningkat secara signifikan ($p<0{,}001$) dari 20,19% menjadi 26,55%. Kekuatan tekan menurun dari 0,732 menjadi 0,616 MPa, atau penurunan sebesar 15,85%, dengan semua variasi tidak memenuhi kekuatan tekan minimum SNI 8640-2018 sebesar 2 MPa. Penurunan kinerja ini diduga disebabkan oleh akumulasi rongga akibat pertemuan pori-pori alami CKS dengan gelembung zat pembusa, serta ketidaksesuaian dosis zat pembusa dengan rasio air-semen. Variasi substitusi 6% adalah batas tertinggi yang masih memenuhi persyaratan berat satuan dan penyerapan air SNI 8640-2018, sehingga berpotensi untuk diaplikasikan untuk kebutuhan non-struktural setelah kekuatan tekannya ditingkatkan. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk memverifikasi kompatibilitas dosis zat pembusa dengan rasio air-semen, meningkatkan metode pengawetan, dan menambahkan pengikat seperti abu terbang untuk meningkatkan kekuatan tekan bata ringan CLC berbasis CKS.

Kata Kunci: Bata Ringan, *Cellular lightweight concrete*, Cangkang kelapa Sawit, Bobot isi, Penyerapan air, Kuat tekan.

ABSTRACT

Mining natural sand for construction aggregates risks damaging river ecosystems, while Indonesia's abundant palm kernel shells (PKS) waste remains underutilized. Previous research has shown that the rough, porous surface texture of PKS can bond well with a cement matrix, making this material a potential substitute for fine aggregate in cellular lightweight concrete (CLC) bricks. Although its porous nature also poses a risk of increased air absorption. This study aimed to analyze the effect of partial substitution of fine aggregate with PKS on the unit weight, air absorption, and compressive strength of CLC bricks.

Tests were conducted on five variations of PKS substitution: 0%, 2%, 4%, 6%, and 8% of the sand weight, with a water-cement ratio of 0.50 and a plasticizer additive, in accordance with SNI 8640-2018. The test specimens were soaked for 28 days before being tested for oven-dry unit weight, air absorption, and compressive strength. The data were then statistically analyzed using Welch's ANOVA and Kruskal-Wallis to test for significant differences between variations.

The results showed that the oven-dry unit weight decreased significantly ($p=0.002$) from 835.64 to 778.48 kg/m³ with increasing PKS content, while air absorption increased significantly ($p<0.001$) from 20.19% to 26.55%. The compressive strength decreased from 0.732 to 0.616 MPa, or a decrease of 15.85%, with all variations not meeting the minimum compressive strength of SNI 8640-2018 of 2 MPa. This decrease in performance is thought to be caused by the accumulation of voids due to the meeting of the natural pores of PKS with foaming agent bubbles, as well as the incompatibility of the foaming agent dosage with the air-cement ratio. The 6% substitution variation is the highest limit that still meets the unit weight and air absorption requirements of SNI 8640-2018, so it has the potential to be applied for non-structural needs after its compressive strength is increased. Further research is recommended to verify the compatibility of foaming agent dosage with water-cement ratio, improve curing method, and add binder such as fly ash to increase the compressive strength of CLC lightweight bricks based on PKS.

***Keywords**: Lightweight Brick, Cellular lightweight concrete, Palm kernel shell, Bulk density, Water absorption, Compressive strength.*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan sektor konstruksi global yang masif telah mendorong peningkatan signifikan terhadap permintaan material bangunan, sehingga menjadikan agregat halus sebagai komponen yang sangat penting dalam produksi beton dan material sejenis. Namun, ketergantungan yang tinggi pada eksploitasi sumber daya alam ini telah menimbulkan konsekuensi lingkungan yang serius. Joly & Islam (2024), menyatakan bahwa aktivitas penambangan pasir yang tidak terkontrol berkontribusi pada perubahan batimetri sungai dan meningkatkan erosi sungai, sehingga menggarisbawahi perlunya pergeseran paradigma menuju pengembangan material konstruksi yang lebih berkelanjutan.

Sejalan dengan tuntutan tersebut, inovasi material konstruksi tidak hanya harus memenuhi kebutuhan struktural yang kian modern dan efisien, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek sosial dan lingkungan. Diantara berbagai produksi konstruksi yang menggunakan agregat halus seperti beton ringan, batako, dan beton, Bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) menjadi salah satu material yang relevan untuk dikaji dalam konteks berkelanjutan. Bata ringan CLC, yang tersusun dari semen, agregat halus, air dan *foaming agent,* menawarkan keunggulan berupa bobot yang lebih ringan dan kemudahan instalasi, yang pada akhirnya mempercepat durasi konstruksi. Pratama (2020), menyatakan produktivitas tenaga kerja pada pekerjaan bata ringan lebih tinggi dibandingkan pekerjaan bata merah pada seluruh kategori tenaga kerja, dengan selisih persentase produktivitas berkisar antara 13,61% hingga 23,83%, meskipun dari segi biaya total dengan volume yang sama dinding bata ringan memiliki biaya yang lebih tinggi dibandingkan bata merah.

Meskipun demikian, kinerja bata ringan CLC sangat dipengaruhi oleh kualitas dan karakteristik agregat halus yang digunakan. Agregat halus berperan dalam pembentukan dinding pori dan mempengaruhi distribusi porositas, yang pada akhirnya berdampak pada sifat fisik dan mekanik material. Menurut Pah dkk.

(2021) ukuran dan karakteristik agregat halus berupa pasir berpengaruh signifikan terhadap struktur pori, densitas, serta kuat tekan beton ringan, sehingga sangat menentukan kinerja fisik dan mekanik bata ringan CLC.

Dalam kerangka keberlanjutan tersebut, pemanfaatan limbah perkebunan muncul sebagai alternatif material yang berpotensi dikembangkan. Salah satu limbah yang tersedia melimpah namun penyerapannya di sektor konstruksi masih minim adalah cangkang kelapa sawit (CKS), mengingat posisi Indonesia sebagai penghasil kelapa sawit terbesar di dunia. Material ini merupakan bagian keras dari buah kelapa sawit yang selama ini penggunaannya masih terbatas pada bahan bakar boiler (Anggoro dkk., 2023). Meski demikian, CKS memiliki berat jenis yang rendah sehingga tergolong ringan, di samping sifatnya yang porous atau berongga, sehingga muncul dugaan bahwa material ini dapat difungsikan sebagai bahan pengisi pada campuran beton ringan.

Substitusi CKS pada agregat halus bata ringan CLC dalam penelitian ini didasari oleh dua pertimbangan utama, yaitu pemanfaatan limbah perkebunan sawit yang selama ini terbuang (Anggoro dkk., 2023), serta upaya mengurangi ketergantungan terhadap pasir alam yang penambangannya terus berlangsung dan berdampak pada kerusakan ekosistem sungai maupun pesisir. Akan tetapi, karakteristik CKS yang berpori dan memiliki daya serap air lebih tinggi (Anggoro dkk., 2023), berpotensi menjadi kendala tersendiri, karena dapat mendorong peningkatan penyerapan air pada bata ringan CLC melebihi batas yang disyaratkan. Untuk mengantisipasi hal tersebut, penelitian ini menggunakan *additive foam concrete* yang mengandung plasticizer yang berfungsi memperbaiki kelecakan adukan sekaligus menurunkan kebutuhan air pencampuran, sehingga pasta semen yang terbentuk diharapkan lebih padat dan pembentukan pori mikro dapat ditekan (Falliano dkk., 2018). Berdasarkan pertimbangan tersebut, substitusi CKS dalam penelitian ini dibatasi pada rentang yang relatif rendah, yaitu 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%, dengan tujuan mengamati sejauh mana peningkatan penyerapan air masih dapat dikendalikan tanpa mengorbankan kinerja fisik dan mekanik bata ringan yang dihasilkan.

Studi ini berfokus pada penilaian pengaruh substitusi sebagian agregat halus dengan cangkang kelapa sawit terhadap sifat fisik, termasuk densitas dan penyerapan air,

serta sifat mekanik berupa kekuatan tekan bata ringan CLC sesuai dengan ketentuan SNI 8640-2018. Meskipun substitusi cangkang kelapa sawit pada bata ringan CLC telah dipelajari dalam penelitian sebelumnya, penelitian ini membatasi substitusi pada kisaran yang relatif rendah yaitu 0-8% dengan aditif plastisizer sebagai satu-satunya bahan tambahan, untuk mengamati pengaruh cangkang kelapa sawit secara lebih spesifik. Dengan menguji lima variasi substitusi, penelitian ini berupaya menentukan persentase substitusi cangkang kelapa sawit yang paling optimal, yaitu titik di mana pemanfaatan limbah dapat dimaksimalkan tanpa mengurangi kesesuaian bata ringan sebagai bahan konstruksi. Temuan penelitian ini diharapkan dapat melengkapi penelitian sebelumnya tentang substitusi cangkang kelapa sawit pada bata ringan CLC, sekaligus memberikan gambaran yang lebih spesifik tentang pengaruhnya terhadap kinerja fisik dan mekanik yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh substitusi parsial agregat halus menggunakan cangkang kelapa sawit terhadap sifat fisik bata ringan *cellular lightweight concrete* yang meliputi bobot isi dan penyerapan air?
2. Bagaimana pengaruh substitusi parsial agregat halus menggunakan cangkang kelapa sawit terhadap sifat mekanik bata ringan *cellular lightweight concrete* yang ditinjau dari nilai kuat tekan?
3. Pada persentase substitusi berapakah penggunaan cangkang kelapa sawit sebagai substitusi parsial agregat halus menghasilkan kinerja sifat fisik dan mekanik bata ringan *cellular lightweight concrete* yang paling optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang di tetapkan, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis perubahan bobot isi dan penyerapan air bata ringan *cellular lightweight concrete* terhadap substitusi parsial agregat halus dengan cangkang kelapa sawit.
2. Mengevaluasi pengaruh substitusi parsial agregat halus dengan cangkang kelapa sawit terhadap kuat tekan bata ringan *cellular lightweight concrete*.
3. Menentukan persentase substitusi cangkang kelapa sawit yang menghasilkan kinerja sifat fisik dan mekanik bata ringan *cellular lightweight concrete* yang paling optimal.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan pemahaman berdasarkan hasil pengujian laboratorium mengenai pengaruh substitusi parsial agregat halus dengan cangkang kelapa sawit terhadap sifat fisik dan mekanik bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC). Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi dan dasar pertimbangan dalam penelitian lanjutan maupun pengembangan material bata ringan ramah lingkungan yang memanfaatkan limbah perkebunan.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan pada penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Penelitian bata ringan dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi Universitas Islam Indonesia.
2. Bata ringan yang diteliti merupakan bata ringan *Cellular lightweight concrete* (CLC) dengan target berat kering oven sebesar 800 – 1000 kg/m^3.
3. Dimensi bata ringan mengacu pada SNI 8640:2018 tentang Spesifikasi Bata Ringan untuk Pasangan Dinding, yaitu 60 x 20 x 10 cm.
4. Variasi substitusi parsial agregat halus menggunakan cangkang kelapa sawit adalah sebesar 0%, 2%, 4%, 6% dan 8% dari total berat pasir yang digunakan untuk setiap variasi.

5. Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen portland, agregat halus berupa pasir alam, cangkang kelapa sawit, air, *foam agent*, dan bahan tambah (*additive*) untuk beton busa.
6. Pengujian sifat fisik yang dilakukan meliputi bobot isi dan penyerapan air, sedangkan pengujian sifat fisik mekanik dilakukan melalui pengujian kuat tekan.
7. Seluruh Pengujian dilakukan sesuai dengan ketentuan SNI 8640:2018.
8. Penelitian ini tidak membahas aspek mikrostruktur material secara rinci dan tidak melakukan, seperti analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD).
9. Penelitian ini tidak membahas aspek durabilitas jangka panjang, sifat termal, maupun perilaku struktural lanjutan dan bata ringan CLC.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Pengembangan bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) sebagai material dinding tidak terlepas dari upaya meningkatkan efisiensi material dan keberlanjutan konstruksi. Sifat fisik dan mekanik bata ringan CLC dipengaruhi secara signifikan oleh jenis dan karakteristik agregat halus yang digunakan. Dalam konteks tersebut, pemanfaatan material alternatif seperti cangkang kelapa sawit sebagai substitusi parsial agregat halus perlu ditinjau berdasarkan kajian pustaka yang mencakup karakteristik material, mekanisme pengaruhnya terhadap bata ringan, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan.

2.2 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Tinjauan Pustaka pada penelitian ini menggunakan 4 penelitian, yang membahas penggunaan material limbah cangkang kelapa sawit, pengaruh variasi dari agregat halus dan bahan tambah terhadap beton busa.

1. Danso & Appiah-Agyei (2021)

   Eksperimen mengenai pemanfaatan cangkang kelapa sawit (CKS) sebagai pengganti agregat kasar dalam campuran beton ringan. Material cangkang kelapa sawit memiliki berat jenis yang lebih rendah dibandingkan agregat kasar konvensional, sehingga penggunaannya berkontribusi terhadap penurunan densitas beton ringan. Namun, karakteristik cangkang kelapa sawit yang berpori dan memiliki daya serap air tinggi memengaruhi keseimbangan air dalam campuran serta berpotensi meningkatkan porositas material.

   Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penyerapan air yang lebih besar oleh cangkang kelapa sawit dapat mengurangi ketersediaan air untuk proses hidrasi semen, sehingga pembentukan gel C–S–H tidak berlangsung secara optimal dan berdampak pada penurunan kuat tekan. Selain itu, perbedaan bentuk dan tekstur permukaan cangkang kelapa sawit dibandingkan agregat alami turut mempengaruhi kualitas ikatan antara agregat dan pasta semen, khususnya pada

zona transisi antarmuka (ITZ). Meskipun demikian, dengan pengendalian komposisi campuran yang tepat, cangkang kelapa sawit tetap menunjukkan potensi sebagai material agregat alternatif untuk beton ringan non-struktural.

Penelitian mengenai ukuran variasi CKS pada beton ringan. CKS digunakan sebagai pengganti agregat kasar dengan ukuran 6, 8, 10, dan 12 mm serta campuran dari semua ukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa massa jenis (densitas) yang dihasilkan kurang dari 2000 kg/m^3 . Kuat tekan tertinggi diperoleh pada ukuran 12 mm sebesar 10,2 MPa dan kuat lentur 2,85 MPa, yang merupakan nilai terbaik di antara variasi ukuran lainnya.

2. Pah dkk. (2021)

   Penelitian ini mengkaji pengaruh perbedaan gradasi butiran agregat pasir terhadap karakteristik bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC), dengan membandingkan dua kelompok ukuran, yaitu Variasi A (gabungan fraksi 1,18–2,36 mm dan 4,75–9,50 mm) dan Variasi B (gabungan fraksi 0,60–1,18 mm dan 2,36–4,75 mm). Masing-masing kelompok diuji pada tiga proporsi berat antara fraksi halus dan kasar, yaitu 25%:75%, 50%:50%, dan 75%:25%. Kedua variasi tetap menggunakan foam agent sebagai bahan pembentuk rongga udara sesuai karakteristik dasar CLC, sehingga perbedaan di antara keduanya murni terletak pada gradasi agregat pasir yang dipakai, bukan pada ada-tidaknya penggunaan busa.

   Hasil pengujian pada perawatan umur 28 hari menunjukkan berat volume rata-rata Variasi A sebesar 1,316; 1.027; dan 1,114 gr/cm^3 untuk proporsi ketiga secara berurutan, sedangkan Variasi B menghasilkan 1,230; 1.148; dan 1,262 gr/cm^3. Pada variasi kedua, proporsi dengan berat volume tertinggi juga secara konsisten menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 1,935 MPa pada Variasi A (proporsi 25%:75%) dan 1,833 MPa pada Variasi B (proporsi 75%:25%).

   Meskipun demikian, kestabilan kekuatan antar proporsi berbeda cukup mencolok antara kedua variasi. Kuat tekan terendah pada Variasi A anjlok jauh dari nilai tertingginya, yaitu hanya 0,841 MPa, sementara Variasi B yang didominasi agregat berukuran lebih halus menunjukkan kestabilan kekuatan yang lebih baik, dengan nilai terendah 1,454 MPa yang tidak jauh berbeda dari

nilai tertingginya. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa penggunaan agregat berukuran besar dan tidak seragam pada Variasi A berpotensi menimbulkan rongga internal yang tidak merata, sehingga kinerja kuat tekannya menjadi kurang konsisten dibandingkan Variasi B.

3. Rahmanto & Jafar (2023)

   Penelitian ini bertujuan sebagai solusi atas penggunaan material alam secara berlebih yang menyebabkan keterbatasan sumber daya pasir. Studi eksperimental ini dilakukan pada bata ringan jenis Cellular Lightweight *Concrete* (CLC) dengan mengganti sebagian agregat halus menggunakan CKS sebesar 4%, 6%, 8%, dan 10% dari berat agregat halus, serta penambahan *silica fume* sebanyak 10% dari bobot semen. Bobot isi rencana ditetapkan sebesar 700 kg/m³. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kadar CKS, nilai kuat tekan dan bobot isi bata ringan cenderung menurun, sedangkan penyerapan air meningkat. Hal ini disebabkan oleh sifat dasar CKS yang berbeda dengan pasir, baik dari segi bentuk maupun tekstur permukaan, sehingga mempengaruhi sifat fisik dan mekanik bata ringan.

4. Prandika dkk. (2025)

   Investigasi mengenai karakteristik mekanis beton mutu K 200 dengan bahan campur foaming agent, superplasticizer (SikaCim), dan fly ash. Riset ini bertujuan untuk menghasilkan beton ringan yang tetap memiliki kuat tekan tinggi dengan memanfaatkan superplasticizer sebagai bahan additive yang berfungsi meningkatkan workability adukan sekaligus mengurangi kebutuhan air dalam campuran, sehingga terbentuk pasta semen yang lebih padat dengan ikatan antar partikel yang lebih kuat.

   Pengujian dilakukan pada umur 14 hari dan 21 hari menggunakan sampel berbentuk kubus berukuran 15 cm × 15 cm × 15 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton standar tanpa bahan tambah menghasilkan kuat tekan sebesar 201,76 kg/cm^2, sedangkan penambahan superplasticizer 1,5% tanpa foam mampu meningkatkan kuat tekan menjadi 298,77 kg/cm^2 atau meningkat sekitar 48% dibandingkan beton normal. Pada campuran dengan foam 15% tanpa superplasticizer, kuat tekan mengalami penurunan menjadi 164,63 kg/cm^2,

namun setelah dikombinasikan dengan superplasticizer 1,5% dan fly ash 10%, kuat tekan kembali meningkat menjadi 254,74 kg/cm^2 pada umur 14 hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan superplasticizer sebagai bahan additive terbukti mampu mengkompensasi penurunan kuat tekan yang terjadi akibat penambahan foam, sehingga beton ringan yang dihasilkan tetap memenuhi mutu yang direncanakan.

2.3 Perbandingan Penelitian

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu, yang telah diuraikan, dapat diketahui bahwa masih terdapat perbedaan fokus dan ruang lingkup antara penelitian-penelitian tersebut dengan penelitian yang dilakukan dalam studi ini. Perbedaan tersebut mencakup aspek material, dan variasi campuran. Untuk memperjelas posisi dan kebaruan penelitian ini, perbandingan antara penelitian terdahulu dan penelitian yang dilakukan disajikan dalam Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 PenelitianTerdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	**(Pah dkk., 2021)**	**(Rahmanto & Jafar, 2023)**	**(Prandika dkk., 2025)**	**(Putra, 2026)**
1	**Judul**	*Size Variation of Palm Kernel Shells as Replacement of Coarse Aggregate for Lightweight Concrete Production*	Hubungan antara penggunaan agregat berbeda ukuran butiran dan keringanan bata ringan CLC	Pengaruh penggunaan cangkang kelapa sawit dan *silica fume* sebagai bahan substitusi pada campuran bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC)	Analisis Kuat Tekan Beton Mutu K 200 Dengan Bahan Campur Foaming Agent, Superplasticizer (Sikacim), dan Fly Ash	Pengaruh substitusi parsial agregat halus dengan cangkang kelapa sawit terhadap sifat fisik dan mekanik bata ringan *CLC*
2	**Tujuan Penelitian**	Penelitian ini berorientasi untuk mempelajari karakteristik rekayasa dan mekanik beton ringan struktural yang diproduksi dengan mengganti seluruh komponen agregat kasar konvensional.	Studi ini berfokus pada identifikasi jenis massa (berat volume) dan kinerja kekuatan tekan komponen bata ringan berbasis Beton Ringan Seluler (CLC). Lebih lanjut, studi ini bertujuan untuk mempelajari bagaimana perbedaan	Penelitian dilakukan untuk menganalisis dampak dari pemanfaatan limbah cangkang kelapa sawit (CKS) sebagai pengganti sebagian agregat halus (pasir) serta penggunaan *silica fume* sebagai substitusi parsial semen terhadap	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *superplasticizer* (SikaCim) sebagai bahan additive terhadap kuat tekan beton ringan mutu K 200. Secara khusus, penelitian ini berupaya menemukan komposisi	Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan bobot isi dan penyerapan air, serta mengevaluasi pengaruh terhadap kuat tekan bata ringan cellular lightweight concrete (CLC) akibat substitusi parsial

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	**(Pah dkk., 2021)**	**(Rahmanto & Jafar, 2023)**	**(Prandika dkk., 2025)**	**(Putra, 2026)**
2	**Tujuan Penelitian**	menggunakan limbah *Palm kernell shels* (PKS) dengan fokus pada pengaruh variasi dimensi ukuran cangkang yang berbeda.	ukuran Butir agregat dalam dua variasi kelompok (Variasi A dan Variasi B) mempengaruhi kekeringan dan kualitas bata ringan CLC yang dihasilkan, sebagai dasar untuk menentukan ukuran agregat yang paling tepat..	karakteristik fisik dan mekanis pengaruh Pada pembuatan bata ringan Berjenis *cellular lightweight concrete* (CLC)	campuran optimal antara *foaming agent, superplastiizer,* dan fly ash yang mampu menghasilkan beton dengan bobot ringan namun tetap memiliki kuat tekan yang memenuhi mutu yang direncanakan. Hal ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan material beton yang lebih efisien dalam konstruksi modern, beton ringan menjadi solusi untuk mengurangi beban tanpa mengurangi kekuatan.	agregat halus dengan cangkang kelapa.

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	(Pah dkk., 2021)	(Rahmanto & Jafar, 2023)	(Prandika dkk., 2025)	(Putra, 2026)
3	**Metode Penelitian**	Penelitian ini menerapkan substitusi penuh (100%) agregat kasar dengan cangkang kelapa sawit yang telah dibersihkan dari kandungan minyak menggunakan air hangat dan dikeringkan di bawah sinar matahari. Desain campuran beton menggunakan rasio massa semen, pasir, dan PKS sebesar 1:2:3 dengan rasio air-semen tetap sebesar 0,6. Variasi partikel cangkang kelapa sawit diklasifikasikan	Percobaan laboratorium ini menguji sampel bata Beton Ringan Seluler (CLC) berbentuk balok berukuran 60 × 10 × 20 cm yang diproduksi di fasilitas PT BrikKoe Jaya Perkasa. Agregat halus yang digunakan adalah pasir Takari lokal yang diayak menjadi dua kelompok ukuran: Variasi A (diameter 1,18–2,36 mm dan 4,75–9,50 mm) dan Variasi B (diameter 0,60–1,18 mm dan 2,36–4,75 mm). Setiap kelompok.	Eksperimental dengan membuat benda uji bata ringan CLC menggunakan variasi CKS sebesar 0%,4%,6%, 8%, dan 10% dari berat agregat halus. *Silica fume* digunakan sebesar 10% dari berat semen. untuk proporsi adukan semen-pasir sebesar 1:1,5 dan rasio faktor air semen (FAS) sebesar 0,58. Perolehan busa melalui alat generator busa dengan pengenceran 1: 40 terhadap air. Pengujian	Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif berbasis data eksperimental laboratorium untuk menganalisis efektivitas performa beton. pendekatan *mix design* dikembangkan melalui metode *departement of Environment* (DoE) dengan ketetapan FAS sebesar 0,6. Benda uji dibuat dalam bentuk kubus berukuran 15 x 15 x 15 cm dengan mutu rencana K 200. Variasi campuran yang	Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pembagian 5 variasi, pembuatan 50 benda uji, substitusi parsial cangkang kelapa sawit terhadap agregat halus dengan persentase 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%, serta penggunaan bahan tambahan additive foam concrete (ADF) sebesar 1% dari bobot semen dan pengontrolan ukuran agregat halus, yaitu fraksi 0,60–1,18 mm

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	(Pah dkk., 2021)	(Rahmanto & Jafar, 2023)	(Prandika dkk., 2025)	(Putra, 2026)
3	**Metode penelitian**	menjadi lima ukuran, yaitu 6, 8, 10, 12 mm dan pencampuran dilakukan dari empat ukuran dengan porsi masing-masing 25%. Pengujian dilakukan pada 90 unit sampel yang terdiri dari 60 cetakan kubus dengan dimensi (10 x 10 x 10 cm) dan 30 unit blok beton (10 x 10 x 50 cm) yang diproduksi dan dimatangkan menggunakan metode karung goni basah. Pengujian dilakukan.	Selanjutnya dibagi menjadi tiga proporsi berat, yaitu 25%:75%, 50%:50%, dan 75%:25%. Setelah dicetak, semua spesimen diawetkan secara alami hingga mencapai umur uji 28 hari untuk mengukur kepadatan kering dan kapasitas tekannya.	Dilakukan dengan spesimen standar dengan ukuran benda uji 60 x 20 x 10 cm. Pengujian mekanis dan fisik dijalankan saat umur beton menyentuh 28 hari berdasarkan pedoman SNI 8640-2018 dengan mencakup parameter kuat tekan, bobot isi dan penyerapan air.	digunakan meliputi beton standar sebagai kontrol, *foaming agent* dengan kadar 0 %, 10%, 15%, dan 20%, serta kombinasi keduanya dengan penambahan superplasticizer 1,5% dan fly ash 10% dari berat semen. Setiap kombinasi campuran diwakili oleh ketiga sampel uji, dengan pengujian *slump,* berat isi beton segar, dan kuat tekan dilakukan pada umur 12 dan 21 hari.	sebesar 75% dan fraksi 2,36–4,75 mm sebesar 25% dari berat total pasir untuk setiap variasi.

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	(Pah dkk., 2021)	(Rahmanto & Jafar, 2023)	(Prandika dkk., 2025)	(Putra, 2026)
3	**Metode penelitian**	secara berkala pada umur beton 7, 14, 21, dan 28 hari untuk mengukur kepadatan kering, kekuatan tekan, kekuatan lentur, dan analisis mikrostruktur menggunakan bantuan alat SEM dan EDS.				
4	**Hasil dan pembahasan**	Pengukuran berat jenis menunjukan seluruh spesimen beton PKS berada dibawah batas 2000 kg/m^3. Hasil uji tekan cangkang kelapa sawit 12 mm menunjukan kinerja mekanik yang dominan	Pengujian karakteristik menunjukkan bahwa pasir takari sangat cocok untuk digunakan karena kandungan air Dan lumpurnya berada di bawah ambang batas maksimum 5%. Pada kelompok pasir yang	Hasil uji properties memperlihatkan bahwa cangkang kelapa sawit memiliki kerapatan massa yang lebih rendah dan struktur berpori alami yang berakibat pada penyerapan air yang jauh lebih tinggi	Penambahan bahan *superplasticizer* terbukti menjaga Tingkat kelecakan (*workability)* campuran beton tetap baik Meskipun kadar air dibatasi, Hal ini terlihat dari peningkatan rentang	Hasil pengujian menunjukkan bobot isi kering oven menurun signifikan (p=0,002) dari 835,64 kg/m³ pada kontrol menjadi 778,48 kg/m³ pada substitusi 8%, sementara

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	(Pah dkk., 2021)	(Rahmanto & Jafar, 2023)	(Prandika dkk., 2025)	(Putra, 2026)
4	**Hasil dan pembahasan**	Pada usia 28 hari, variasi 12 mm mencatat kekuatan tekan 10,2 MPa (sekitar 4% hingga 15,9% lebih tinggi daripada variasi ukuran lainnya) dan kekuatan lentur 2,85 MPa (sekitar 3,2% hingga 57,07% lebih tinggi daripada variasi ukuran lainnya). Hasil pemindaian mikroskopis mengkonfirmasi Pembentukan ikatan antarmuka yang kuat	lebih besar (Variasi A), kepadatan tertinggi (1,316 gr/cm^3) dan kekuatan tekan paling optimal (1,935 MPa) dicapai oleh campuran dengan proporsi agregat 25%:75%. Sementara itu, pada kelompok pasir yang lebih halus (Variasi B), kinerja terbaik ditemukan pada rasio 75%:25% dengan berat volume 1,262 gr/cm^3 dan kekuatan tekan 1,833 MPa. Berdasarkan analisis data modulus kehalusan butiran yang	(8,25%) jika disandingkan dengan pasir biasa senilai (2,84%). Dampak hasil dari parameter mekanis dan fisik yang dilakukan terjadi penurunan bata ringan seiring bertambahnya volume limbah cangkang kelapa sawit yang digunakan. Titik kuat tekan paling optimal yang terekam adala sebesar 0,663 MPa. Meskipun demikian, penambahan *silica fume* memberikan perbaikan struktur mikro	nilai kemerosotan (*slump value)* Ketika zat aditif diaplikasikan ke dalam sampel adukan. Untuk kinerja kuat tekan perawatan 14 hari hasil menunjukan bahwa penambahan Komponen busa saja cenderung menurunkan kekuatan struktural beton. Namun, perpaduan komposisi yang melibatkan material pengisi mikro seperti *fly ash* terbukti mampu mengkompensasi kekurangan tersebut. Karakteristik beton yang	penyerapan air meningkat signifikan ($p<0,001$) dari 20,19% menjadi 26,55%. Kuat tekan turut menurun dari 0,732 MPa menjadi 0,616 MPa (turun 15,85%), dengan seluruh variasi belum memenuhi kuat tekan minimum SNI 8640-2018 sebesar 2 MPa, meskipun bobot isi dan penyerapan air pada variasi hingga 6% masih memenuhi persyaratan standar tersebut.

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	**(Pah dkk., 2021)**	**(Rahmanto & Jafar, 2023)**	**(Prandika dkk., 2025)**	**(Putra, 2026)**
4	**Hasil dan pembahasan**	dan padat antara permukaan luar cangkang kelapa sawit yang bertekstur kasar dan matriks mortar semen. Uji tersebut mendeteksi akumulasi kalsium silikat yang tinggi dengan rasio Ca/Si sebesar 1,26.	paling ideal untuk menghasilkan kinerja bata ringan terbaik adalah 2,265 untuk Variasi A dan 1,730 untuk Variasi B.	dengan meningkatkan daya tekan material hingga 9,7 % melalui pengisian rongga pori-pori mikro adukan semen. Disisi lain, peningkatkan cangkang kelapa sawit secara simultan mereduksi berat volume bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC).	dinilai paling optimum dicapai pada variasi campuran *foaming agent* 15%, *superplasticizer 1,5%, dan fly ash* 10%. Spesimen optimum ini pada durasi pematangan 14 hari mencatatkan rata-rata kapasitas kuat tekan hingga mencapai 254,7 kg/cm^2 dengan nilai slump sebesar 13 dan 225,87 kg/cm^2 pada umur 21 hari, melampaui mutu rencana K 200 sebesar 200 kg/cm^2. Hal ini membuktikan bahwa superplasticizer mampu	

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekaarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	(Pah dkk., 2021)	(Rahmanto & Jafar, 2023)	(Prandika dkk., 2025)	(Putra, 2026)
4	**Hasil dan pembahasan**				mengkompensasi penurunan kuat tekan akibat foam dengan memperbaiki densitas	
5	**Kesimpulan**	Ukuran partikel cangkang inti sawit sebagai pengganti agregat kasar memainkan peran penting dalam menentukan kualitas fisik dan mekanik beton ringan. Untuk aplikasi struktural di bidang konstruksi, cangkang inti sawit dengan ukuran spesifik 12 mm	Perbedaan gradasi ukuran butiran agregat halus terbukti signifikan mempengaruhi berat volume dan kuat tekan bata ringan CLC. Variasi A (proporsi agregat lebih kasar) menghasilkan kuat tekan tertinggi namun disertai berat volume yang lebih besar dan kestabilan kekuatan yang rendah antarproporsi campuran,	Penggunaan cangkang kelapa sawit sebagai pengganti pasir secara efektif mengurangi berat jenis atau berat volume bata ringan CLC. Meskipun penambahan limbah organik ini mengurangi kekuatan tekan dan meningkatkan penyerapan air, keberadaan silika fume secara signifikan mengurangi penurunan	Penggunaan superplasticizer (SikaCim) sebagai bahan additive terbukti secara signifikan. Meningkatkan kuat tekan beton ringan mutu K 200. Komposisi optimal diperoleh pada campuran foam 15%, superplasticizer 1,5%, dan fly ash 10% dengan kuat tekan rata-rata 254,74 kg/cm^2 pada	Substitusi parsial cangkang kelapa sawit terbukti berpengaruh signifikan terhadap penurunan bobot isi dan kuat tekan, serta peningkatan penyerapan air bata ringan CLC secara monotonik seiring bertambahnya kadar substitusi. Variasi 6% menjadi batas tertinggi yang masih memenuhi

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	(Pah dkk., 2021)	(Rahmanto & Jafar, 2023)	(Prandika dkk., 2025)	(Putra, 2026)
5	Kesimpulan	direkomendasikan sebagai pilihan terbaik karena menghasilkan kinerja mekanik yang paling optimal (tekanan dan lentur).	sementara Variasi B (proporsi agregat lebih halus) menghasilkan berat volume lebih ringan dengan kuat tekan yang lebih stabil. Trade-off ini menunjukkan bahwa densitas yang lebih tinggi justru merugikan tujuan utama bata ringan, sehingga pemilihan gradasi optimal bergantung pada prioritas antara kekuatan mekanik dan keringanan material	mekanis ini. Semua spesimen campuran yang diuji dianggap memenuhi standar ambang batas kelayakan fisik (berat volume dan penyerapan air) yang dipersyaratkan oleh SNI 8640-2018.	umur 14 hari, melampaui mutu rencana yang ditetapkan. Superplasticizer berperan penting dalam memperbaiki workability adukan dan mengurangi kebutuhan air sehingga menghasilkan beton yang lebih padat meskipun mengandung foam sebagai pembentuk rongga udara. Dengan demikian, penggunaan superplasticizer sebagai bahan additive pada campuran beton ringan,	persyaratan bobot isi dan penyerapan air SNI 8640-2018, namun seluruh variasi belum memenuhi syarat kuat tekan minimum, sehingga diperlukan penyempurnaan desain campuran dan metode *curing* pada penelitian lanjutan sebelum material ini direkomendasikan untuk aplikasi struktural maupun non-struktural.

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Keterangan	Penelitian Terdahulu				Penelitian Sekarang
		(Danso & Appiah-Agyei, 2021)	(Pah dkk., 2021)	(Rahmanto & Jafar, 2023)	(Prandika dkk., 2025)	(Putra, 2026)
5	Kesimpulan				dinilai efektif dan layak diterapkan sebagai salah satu solusi peningkatan mutu beton ringan dalam konstruksi.	

2.4 Keaslian Penelitian

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu, belum ditemukan penelitian yang secara spesifik mengkombinasikan tiga pendekatan sekaligus, yaitu: (1) substitusi parsial CKS pada kadar rendah dan terkontrol (0%–8%) sebagai agregat halus dalam bata ringan CLC, (2) pengendalian gradasi agregat halus secara proporsional (75% fraksi 0,60–1,18 mm dan 25% fraksi 2,36–4,75 mm), serta (3) penggunaan bahan tambah additive foam concrete untuk menjaga stabilitas pori dan konsistensi campuran, pada target densitas kering oven 800–1.000 kg/m^3

Penelitian (Rahmanto & Jafar, 2023) yang paling dekat dengan studi ini menggunakan kadar CKS yang lebih tinggi (0%–10%) dengan tambahan silica fume, namun tidak melakukan pengendalian gradasi agregat halus secara proporsional. Sementara itu, Danso dan Appiah-Agyei (2021) menggunakan CKS sebagai pengganti agregat kasar, bukan agregat halus. Perbedaan-perbedaan inilah yang menandai kebaharuan penelitian ini.

Fokus penelitian diarahkan pada pengaruh substitusi cangkang kelapa sawit terhadap sifat fisik, meliputi densitas dan daya serap air, serta sifat mekanik berupa kuat tekan bata ringan CLC dengan rentang densitas 800–1.000 kg/m^3. Pendekatan ini diharapkan mampu melengkapi penelitian terdahulu sekaligus memberikan kontribusi terhadap pengembangan material konstruksi berkelanjutan berbasis limbah perkebunan.

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Tinjauan Umum

Sebagaimana telah diuraikan pada Bab II, kebaharuan penelitian ini terletak pada kombinasi tiga pendekatan sekaligus, yaitu substitusi parsial CKS pada kadar rendah dan terkontrol (0%–8%), pengendalian gradasi agregat halus secara proporsional, serta penggunaan *additive foam concrete* untuk menjaga stabilitas pori dan konsistensi campuran. Ketiga pendekatan tersebut melibatkan interaksi antar material penyusun yang memerlukan pemahaman teoritis yang mendalam agar pengaruhnya terhadap sifat fisik dan mekanik bata ringan CLC dapat dianalisis secara ilmiah. Oleh karena itu, bab ini menguraikan landasan teori yang mencakup karakteristik setiap material penyusun yang digunakan, mekanisme pembentukan pori pada bata ringan CLC, serta parameter pengujian yang dijadikan tolok ukur kinerja material sesuai ketentuan SNI 8640-2018.

3.2 Beton Ringan

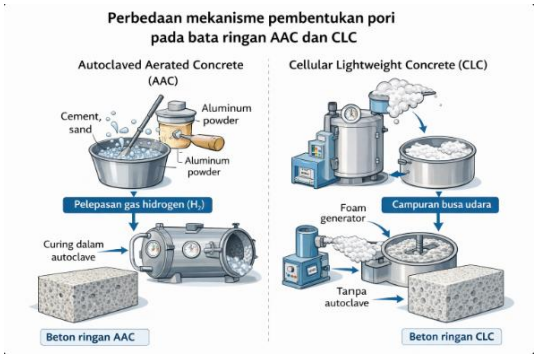
Material Beton ringan adalah jenis beton yang memiliki berat jenis lebih rendah dibandingkan dengan beton normal, biasanya dengan berat kurang dari 1840 kg/m^3 merujuk pada ketentuan SNI 3402:2008 (badan Standardisasi Nasional,2008), Salah satu karakteristik penting dari beton ringan adalah berat isi, dimana nilai batas maksimal berat isi ini dijadikan acuan dalam menentukan mutu dan karakteristik beton yang akan dihasilkan dalam suatu penelitian. Penggunaan beton ringan bertujuan untuk mengurangi beban mati struktur akibat berat sendiri beton, tanpa mengorbankan kekuatan tekan yang dibutuhkan. Hal ini memungkinkan penerapan beton ringan pada konstruksi yang memerlukan efisiensi beban tanpa mengurangi performa struktural.

Berat isi beton ringan dapat dicapai melalui pembentukan rongga udara di dalam matriks beton maupun melalui penggunaan material ringan sebagai bahan pengisi. Dalam pembentukannya, agregat konvensional dapat digantikan oleh agregat ringan alami atau buatan, seperti batu apung, selama masih memenuhi persyaratan

fisik dan mekanik yang ditetapkan dalam standar. Dari persyaratan tersebut dapat disimpulkan bahwa pemilihan material penyusun beton ringan bersifat fleksibel dan dapat dikembangkan sesuai dengan kebutuhan kinerja fisik dan mekanik material.

3.3 Bata Ringan

Bata ringan merupakan salah satu bentuk pengaplikasian dari beton ringan yang banyak digunakan sebagai bahan konstruksi dinding. Sesuai standar SNI 8640-2018, bata ringan memiliki rentang berat jenis antara 400–1.400 kg/m^3. Salah satu jenis beton ringan memiliki kesamaan pada bata ringan, adanya rongga udara yang terbentuk akibat reaksi kimia atau penggunaan bahan pembuat busa, yang menghasilkan struktur berpori di dalam material tersebut. Hanya saja Bahan dasar pembuatan bata ringan umumnya meliputi semen, agregat halus, air dan agregat kasar digantikan dengan udara di dalamnya supaya menciptakan volume. Berdasarkan metode pembuatannya, bata ringan dapat digolongkan menjadi dua jenis utama, yaitu *autoclaved aerated concrete* (AAC) dan *Cellular lightweight concrete* (CLC), sebagaimana diatur dalam SNI 8640:2018. Perbedaan mekanis pembentukan pori pada bata ringan tipe AAC dan CLC dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Pembentukan Pori Pada Bata Ringan AAC dan CLC

(sumber : sketsa dari *Gemini.com*)

Autoclaved Aerated Concrete (AAC) merupakan jenis bata ringan yang diproduksi dengan penambahan bahan kimia yang menghasilkan buih udara melalui reaksi kimia selama proses *curing* dalam mesin bejana tekan pada suhu tinggi

(*autoclaving*). Sedangkan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) adalah bata ringan yang dibuat dengan mencampurkan busa udara yang telah terbentuk (*foam generator*) ke dalam campuran bata ringan tanpa proses *autoclaving*. Perbedaan mendasar antara kedua jenis bata ringan ini terletak pada proses pengerasan dan mekanisme terbentuknya gelembung udara. Namun, sesuai dengan SNI 8640-2018, klasifikasi bobot isi kering oven tidak membedakan jenis bata ringan berdasarkan metode pembuatannya, melainkan berdasarkan kategori fungsional sebagai bata struktural atau non-struktural, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Kategori Berat Bata Ringan

	Kategori berat	**Bata struktural**		**Bata nonstruktural**	
		Terekspos lingkungan (*outdoor)*	**Tidak terekspos lingkungan (*indoor)***	**Terekspos lingkungan (*outdoor)***	**Tidak terekspos lingkungan (*indoor)***
Kelas		**IA**	**IB**	**IIA**	**IIB**
Bobot isi kering oven (Kg/m^3)	500			400 – 600	
	700		600 – 800	600 – 800	
	900	800 – 1.000	800 – 1.000	800 – 1.000	
	1.100	1.000 – 1.200	1.000 – 1.200	1.000 – 1.200	
	1.300	1.200 – 1.400	1.200 – 1.400	1.200 – 1.400	

(Sumber : SNI 8640-2018)

Berdasarkan kategori berat bata ringan dalam SNI 8640-2018, klasifikasi bata ringan ditentukan berdasarkan bobot isi kering oven dan fungsi penggunaannya, tanpa membedakan metode produksi bata ringan. Oleh karena itu, penelitian ini menekankan pada pengaruh pemilihan material terhadap bobot isi bata ringan yang dihasilkan, serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan ketentuan syarat fisis bata ringan,yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 halaman selanjutnya.

Tabel 3.2 Syarat Fisis Bata Ringan

Syarat fisis	Satuan	Bata struktural		Bata nonstruktural	
		Terekspos lingkungan (*outdoor)*	**Tidak terekspos lingkungan (*indoor)***	**Terekspos lingkungan (*outdoor)***	**Tidak terekspos lingkungan (*indoor)***
Kelas	-	IA	IB	IIA	IIB
Kuat tekan rata-rata, min	MPa	6	4	2	
Kuat tekan individu, min	MPa	5,4	3,6	1,8	
Penyerapan air, maks	% *vol*	25	-	25	-
Tebal, min	mm	98		98	73
Susut pengeringan, maks	%	0,2			

(Sumber : SNI 8640-2018)

Syarat fisis bata ringan, terutama berkaitan dengan persyaratan kuat tekan dan penyerapan air yang menjadikan dasar pengelompokan bata ringan sebagai struktural atau nonstruktural. Dalam penelitian ini, jenis bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) dipilih karena proses pembuatannya yang relatif sederhana dan fleksibel, serta relevan untuk diaplikasikan pada skala masyarakat dan industri kecil. Selain itu, karena pengelompokan dalam SNI tidak didasarkan pada metode produksi, fokus penelitian diarahkan pada karakteristik material penyusun bata ringan tipe CLC.

3.4 Semen Portland

Menurut SNI 2049-2015, semen portland dibedakan menjadi beberapa tipe yaitu:

1. Tipe I : Untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus
2. Tipe II : Untuk penggunaan yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang

3. Tipe III : Untuk penggunaan yang memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi
4. Tipe IV : Untuk penggunaan yang memerlukan kalor hidrasi rendah
5. Tipe V : Untuk penggunaan yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat

Selain kelima tipe tersebut, terdapat juga *portland pozzolan cement* (PPC) dan Semen *portland composite cement* (PCC) yang mengandung bahan mineral tambahan seperti klinker, gypsum, serta bahan pozzolan seperti *fly ash* dan *trass*. Golewski (2022), mengemukakan bahwa integrasi material pozzolan pada semen jenis PPC dan PCC akan mengonsumsi kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi utama. Reaksi sekunder ini memicu pembentukan gel kalsium Silikat Hidrat (C-S-H) tambahan yang efektif memperkuat mikrostruktur internal sekaligus mereduksi volume pori-pori kapiler pada beton. Karakteristik tersebut menjadi penting Ketika semen digunakan pada pembuatan *cellular lightweight concrete* (CLC), karena material ini mengandalkan pembentukan pori udara dari *foam agent*. Meskipun stabilitas pori udara ditentukan oleh kualitas dan kestabilan busa yang dihasilkan oleh *foam agent,* sifat pasta semen tetap berperan dalam mengontrol proses pengikatan dan pengerasan campuran.

Dalam formulasi bata ringan, efektivitas proses hidrasi sangat bergantung pada nilai faktor air semen (FAS). Penggunaan FAS yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan porositas mikrostruktur dan menurunkan kekuatan tekan, sedangkan nilai FAS yang terlalu rendah akan menghambat kemampuan kerja pasta semen dan melemahkan ikatan antarmuka dengan agregat. Terkait hal ini, (Hariawan, 2017) melakukan studi perbandingan antara penggunaan semen jenis Ordinary Portland Cement (OPC) dan Portland Composite Cement (PCC), di mana karakteristik hidrasi semen PCC terbukti mampu menghasilkan stabilitas dan tambahan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) secara konsisten pada umur kematangan 28 hari. Meskipun OPC memiliki keunggulan dalam laju pengerasan awal, ketersediaan semen jenis OPC saat ini sangat sulit diperoleh di pasar komersial umum. Oleh karena itu, peneliti memutuskan untuk menggunakan semen PCC murni yang jauh lebih melimpah, mudah diakses, dan lebih ekonomis untuk aplikasi skala nyata.

Dengan mempertimbangkan kondisi-kondisi tersebut, uji efisiensi bahan pengikat difokuskan murni pada semen PCC komersial. Sinergi antara pengendalian nilai FAS dan penggunaan semen PCC merupakan parameter penting untuk mengevaluasi pengaruh substitusi cangkang kelapa sawit terhadap parameter kekuatan tekan, kepadatan, dan kapasitas penyerapan air dari bata ringan yang dihasilkan.

3.5 Agregat Halus

Agregat halus merupakan salah satu komponen dominan dalam pembuatan beton maupun bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) yang berfungsi pengisi rongga antara butiran kasar serta membantu membentuk struktur beton secara keseluruhan. Komposisi campuran beton konvensional penggunaannya dapat mencapai 60 – 80% dari total volume campuran. Namun pada *cellular lightweight concrete* (CLC), proporsi agregat halus lebih kecil karena Sebagian volume digantikan oleh pori udara yang dibentuk melalui penambahan *foam agent*. Dalam SNI 03-6820-2002 gradasi agregat halus diatur berdasarkan nomor saringan yang lolos seperti pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Gradasi Agregat

Saringan		**Persen Lolos**	
		Maksimum	**Minimum**
No. 4	(4,76 mm)	100	-
No. 8	(2,36 mm)	99	100
No. 16	(1,18 mm)	70	100
No. 30	(0,6 mm)	40	75
No. 50	(0,3 mm)	10	35
No. 100	(0,15 mm)	2	15
No. 200	(0,075 mm)	0	0

(Sumber : SNI 03-6820-2002)

Berdasarkan tabel gradasi agregat halus yang ditunjukan pada tabel di atas merupakan gradasi agregat halus yang diizinkan karena distribusi butirannya lengkap dan berada dalam batas minimum serta maksimum yang ada pada standar, selain itu kualitas campuran tidak hanya ditentukan oleh ukuran butiran. Ada unsur perusak ikatan dari agregat halus dengan semen seperti lumpur atau bahan organik maka SNI 03-6820-2002, mengatur kembali dengan memberikan poin–poin unsur perusak yang terkandung dalam agregat halus seperti berikut.

1. Agregat halus harus murni dari kandungan zat organik,
2. Kandungan lumpur yang terkandung di dalam agregat halus maksimum 5%,
3. Terbebas dari kotoran yang dapat merusak warna agregat halus,

Ditinjau dari aspek mikrostruktur, agregat halus berperan sebagai kerangka struktural dalam matriks beton yang terhubung dengan pasta semen melalui zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone*/ITZ). Pada zona ini, produk hidrasi berupa gel kalsium silikat hidrat (C–S–H) terbentuk sebagai pengikat utama antar fase, namun zona tersebut cenderung memiliki tingkat porositas yang lebih tinggi dibandingkan bagian pasta semen di sekitarnya. Kondisi ini menjadi lebih kritis pada bata ringan CLC mengingat keberadaan pori udara dari *foam agent* yang dapat semakin melemahkan kontinuitas mikrostruktur, sehingga kualitas gradasi dan kebersihan permukaan agregat halus menjadi faktor yang tidak dapat diabaikan dalam menjamin kepadatan ikatan antar fase (Zhou dkk., 2025). Relevansi pengendalian gradasi tersebut dibuktikan secara empiris oleh Pah dkk., (2021), yang menunjukan bahwa komposisi agregat halus yang didominasi oleh 75% fraksi halus (ukuran 0,60-1,18 mm) dan dikombinasikan dengan 25% fraksi kasar (ukuran 2,36-4,75 mm) mampu menghasilkan densitas 1,262 gr/m^3 dan kuat tekan 1,833 MPa, Formulasi ini dinilai sebagai titik paling optimal dalam menyeimbangkan target reduksi bobot tanpa mengorbankan kapasitas mekanis pada bata ringan CLC. Dalam penelitian ini, sebagian agregat halus digantikan oleh cangkang kelapa sawit yang telah dihancurkan. Material ini memiliki karakter yang berbeda dibanding pasir alam, terutama pada bentuk butir yang cenderung tidak seragam, berat jenis lebih rendah, dan daya serap air yang lebih tinggi. Perbedaan ini dapat mempengaruhi perilaku campuran CLC. Berat jenis yang rendah dapat menurunkan

densitas bata ringan, sementara daya serap air yang besar berpotensi mengurangi air yang seharusnya digunakan untuk reaksi hidrasi semen dan juga berpotensi meningkatkan penyerapan air bata bata ringan.

Karena itu, pemilihan dan pengendalian agregat halus menjadi bagian penting dalam proses pembuatan CLC. gradasi, resapan air, bentuk butir, dan berat jenis harus dipertimbangkan bersamaan dengan sifat alami cangkang kelapa sawit yang digunakan sebagai pengganti parsial. Pemahaman ini menjadi dasar dalam melihat bagaimana substitusi agregat halus dengan cangkang kelapa sawit (CKS) tersebut dapat mempengaruhi densitas, penyerapan air, dan kuat tekan pada bata ringan yang diteliti.

3.6 Komponen Air

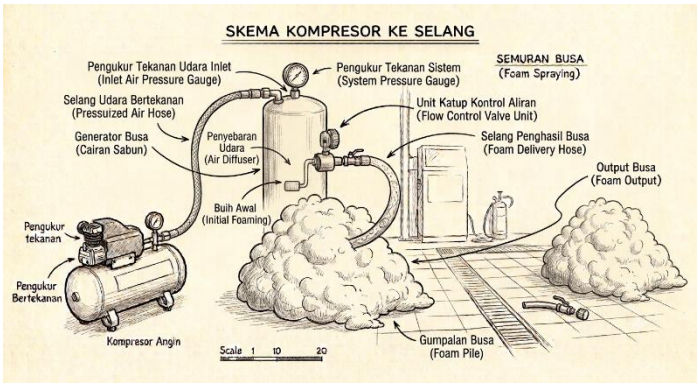
Air merupakan komponen esensial yang menentukan kualitas mekanis beton *cellular lightweight concrete* (CLC). Kontak antara air dan semen menginisiasi reaksi hidrasi yang menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H) sebagai matriks pengikat utama untuk mentransformasikan adukan dari fase plastis menjadi material padat. Proporsi air dalam campuran direpresentasikan melalui parameter Faktor Air Semen (FAS), yaitu rasio massa air terhadap semen. Berdasarkan studi eksperimental Pah dkk., (2022), yang menguji bata ringan CLC dengan variasi FAS 40%, 50%, dan 60%, diperoleh nilai kuat tekan yang bervariasi pada tiap tingkat FAS tanpa menunjukan tren peningkatan atau penurunan yang seragam. Nilai FAS 50% dipilih sebagai acuan dalam penelitian ini karena berada pada rentang tengah yang dianggap cukup representative untuk menyeimbangkan tingkat kelecakan (*workability*) dan kekuatan tekan yang dihasilkan. Sebaliknya, FAS yang terlalu tinggi menyisakan air bebas yang memicu terbentuknya pori-pori kapiler sehingga menurunkan densitas matriks. Merujuk pada temuan tersebut, penelitian ini menetapkan nilai FAS konstan sebesar 0,50 untuk seluruh variasi sampel guna menjamin keseimbangan antara *workability* dan kuat tekan beton.

Selain dari proporsi campuran, kualitas air yang digunakan juga harus memenuhi ketentuan teknis tertentu, penelitian ini mengacu pada SNI 7974:2013 yang mengatur regulasi ambang batas kontaminan kimiawi seperti kadar klorida, sulfat,

alkali, dan *total dissolved solids* (TDS) untuk mencegah degradasi struktural. Selain parameter kimiawi tersebut, tingkat keasaman (pH) air juga krusial dalam menjaga stabilitas hidrasi dan kelecakan pasta semen. Hal ini sejalan dengan penelitian Prasetya & Setiawan (2023), yang menunjukkan bahwa dari berbagai variasi kualitas air pencampur, hanya air pH netral yang mampu mendukung pencapaian kuat tekan rencana secara optimal hingga f'_c20MPa. Atas dasar ketentuan tersebut, air pencampur pada penelitian ini diambil dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT) Universitas Islam Indonesia. Mengingat sumber air tersebut digunakan secara reguler, kontinu, dan telah terstandarisasi untuk kegiatan pengujian karakteristik beton di laboratorium, kualitas dan stabilitas pH air dinilai telah memenuhi syarat teknis baku sehingga analisis kimiawi serta pengujian pH spesifik tidak dilakukan kembali.

3.7 *Foam Agent*

Secara umum *Foam agent* merupakan senyawa kimia yang mengandung surfaktan, kandungan surfaktan inilah yang memungkinkan terbentuknya gelembung-gelembung udara pada permukaan campuran, sekaligus berperan menurunkan tegangan permukaan suatu adonan basah beton (Rachman dkk., 2022). Proses pembentukan *foam agent* menjadi busa dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Proses Pembentukan *Foam Agent* Menjadi Busa

(Sumber : Sketsa dari *Gemini.com*)

Penggunaan *foam agent* mempengaruhi sifat fisik dan mekanik bata ringan, penambahan *foam agent* yang tepat dapat menurunkan berat jenis secara signifikan

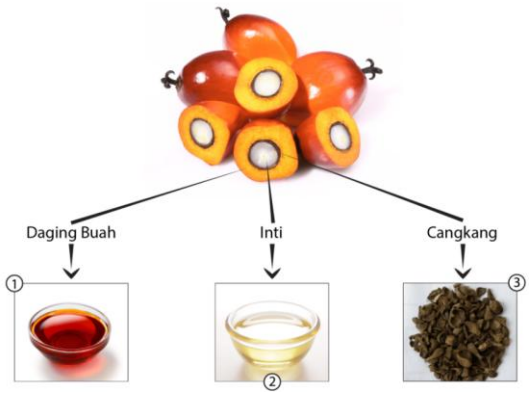
namun harus diimbangi agar tidak menurunkan kuat tekan secara berlebih. Rasio air terhadap *foam agent* menjadi faktor dalam mempertahankan kestabilan buih yang merata dan homogen di dalam campuran. Sebagaimana disinggung pada subbab air, nilai FAS 0,50 yang dipilih dalam penelitian ini bukan semata berdasarkan nilainya sendiri, melainkan juga karena interaksinya dengan Faktor Air Foam (FAF) Penelitian Pah dkk., (2022) menunjukan bahwa Faktor Air Foam (FAF) 1:40 menghasilkan kuat tekan stabil 2,235-2,038 MPa dengan densitas 1,227– 1,148 gr/cm^3 untuk setiap jenis *foam agent* pada Faktor Air Semen (FAS) 0,50. Kombinasi ini memberikan stabilitas foam yang baik dan performa mekanis konsisten untuk kedua jenis *foam agent* (putih dan hijau).

Substitusi agregat halus dengan cangkang kelapa sawit yang bersifat ringan, karena perbedaan sifat fisik agregat ini dapat mempengaruhi stabilitas busa dan distribusi pori pada bata ringan *cellular lightweight concrete*. Sifat daya serap air yang besar dari cangkang kelapa sawit berpotensi merusak pola busa sehingga mengurangi sifat mekanik bata ringan. Oleh karena itu pencampuran busa dengan mortar harus diatur sedemikian agar menghasilkan produk bata ringan dengan karakteristik fisik dan mekanik yang optimal.

3.8 Cangkang Kelapa Sawit

Dalam proses pengolahan buah kelapa sawit menjadi minyak, bagian inti buah dipisahkan dari daging buahnya, sehingga menyisakan cangkang sebagai residu padat dalam jumlah yang tidak sedikit. Berdasarkan data yang dilaporkan Anggoro dkk., (2023), volume limbah cangkang yang dihasilkan dari kegiatan produksi ini tergolong signifikan, yakni mencapai kisaran 60% dari volume minyak yang dihasilkan.mengingat sifat fisiknya yang keras namun memiliki massa jenis yang lebih rendah dari pada pasir alam, limbah ini sangat potensial untuk direkayasa kembali sebagai material. Penjelasan Bagian kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.

.



Gambar 3.3 Bagian-bagian kelapa sawit

(Sumber : *Gemini*.com)

Secara fisis, CKS dicirikan oleh struktural internal yang berpori, permukaan yang kasar, serta bobot yang ringan. Mengacu pada data eksperimental oleh Rahmanto & Jafar (2023), CKS memiliki nilai bobot isi padat sebesar 0,801 gr/cm^3 (setara dengan 801 kg/m^3). Secara teoritis, nilai kerapatan material dalam kondisi gembur (*loose bulk density*) akan jauh lebih kecil dari nilai padat tersebut, sehingga CKS secara syarat memenuhi regulasi SNI 3402:2008 yang menetapkan ambang batas maksimum berat isi kering oven gembur agregat ringan 1100 kg/m^3. Disisi lain, tekstur permukaannya yang kasar memberikan keuntungan mekanis berupa efek saling mengunci (*interlocking*) yang kuat dengan semen. Hal ini diperkuat oleh Danso & Appiah-Agyei (2021), melalui analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang menunjukan bahwa mikrotekstur CKS sangat optimal dalam mendukung daya rekat antar muka dengan mortar.

Meskipun memiliki keunggulan bobot, struktur pori internal pada CKS menyebabkan material ini memiliki daya serap air yang jauh lebih tinggi daripada pasir konvensional. Pada adukan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), tingginya absorpsi air ini berisiko menyerap volume air campuran yang dibutuhkan untuk proses hidrasi semen serta dapat mengganggu stabilitas busa. Jika laju penyerapan air dari CKS ini tidak dikendalikan, maka porositas total matriks beton akan meningkat dan memicu penurunan kapasitas kuat tekan akhir

Korelasi antara kadar substitusi CKS dan penurunan performa beton ringan telah dibuktikan oleh Oktarina & Natalina (2018), Hasil studinya menunjukkan bahwa pada bata beton pejal konvensional (bukan bata ringan berbusa). Hasil studinya menunjukkan bahwa penambahan CKS pada kadar rendah justru meningkatkan kuat tekan, masing-masing naik 9,49% dan 18,64% dari kontrol pada kadar 3% dan 6%, dengan titik tertinggi di 6%. Namun pada kadar 9%, kuat tekan kembali turun ke level kontrol, dan pada kadar 12% terjadi penurunan tajam hingga 34,58% di bawah kontrol. Meski tidak meneliti mekanisme pembentukan pori CLC secara langsung, temuan ini tetap relevan sebagai indikasi awal bahwa hubungan antara kadar CKS dan kuat tekan tidak selalu linear negatif, melainkan dapat menunjukkan pola naik-turun (non-monotonik) tergantung jenis matriks beton yang digunakan.
Mengingat kecenderungan penurunan performa pada kadar substitusi yang lebih tinggi, pengendalian porositas tetap menjadi perhatian penting dalam penelitian ini. Rekayasa ukuran butiran CKS menjadi salah satu parameter vital untuk mengontrol hal tersebut. Pengkondisian ukuran partikel CKS agar berada pada rentang gradasi agregat halus standar, yaitu antara 1–3 mm, diharapkan dapat menjaga keseragaman mikrostruktur beton CLC. Melalui penentuan persentase substitusi yang presisi, pemanfaatan CKS tidak hanya efektif dalam mereduksi bobot isi bata ringan, tetapi juga mampu meminimalisasi ketergantungan industri konstruksi terhadap eksploitasi pasir alam.

3.9 Additive Foam Concrete

Additive merupakan bahan tambahan yang digunakan dalam campuran beton untuk memodifikasi sifat beton segar maupun beton keras sesuai kebutuhan kinerja material. Pada beton ringan tipe *cellular lightweight concrete* (CLC), penggunaan *additive* memiliki peranan penting karena karakteristik beton ini sangat bergantung pada kestabilan busa, keseimbangan kadar air, serta distribusi pori udara di dalam matriks beton. Ramamurthy dkk., (2009), menegaskan bahwa parameter mutu beton busa dikendalikan secara mutlak oleh sifat material penyusun, proporsi campuran, dan kestabilan adukan pada kondisi segar. Oleh karena itu, aditif

diaplikasikan untuk meningkatkan kelecakan (*workability*) tanpa memicu kebutuhan penambahan air pengencer yang berlebih.

Lebih lanjut Kearsley & Wainwright (2001), menyatakan bahwa intervensi bahan tambahan kimiawi mampu mengondisikan struktur pori agar terdistribusi secara seragam dan stabil. Geometri pori yang homogen ini secara langsung berkontribusi pada pengurangan berat jenis sekaligus mengoptimalkan kekuatan tekan dan mengendalikan laju penyerapan air. Sebaliknya, pembentukan pori yang tidak merata akan menciptakan titik konsentrasi tegangan (zona lemah) yang mempercepat kegagalan struktural ketika beton dikenai beban aksial.

Urgensi pemanfaatan *additive* menjadi semakin signifikan pada sistem campuran beton ringan yang melibatkan material substitusi porous. Oktarina & Natalina (2018), mengidentifikasi bahwa agregat alternatif seperti cangkang inti sawit memiliki karakteristik penyerapan air yang tinggi karena porositas internalnya, sehingga berpotensi mengganggu keseimbangan air hidrasi campuran. Jika fenomena penyerapan air oleh CKS ini tidak diantisipasi, fase cair dalam semen akan terserap, memicu runtuhnya gelembung busa (agen busa), dan merusak mikrostruktur CLC.

Dalam mengantisipasi anomali tersebut, bahan tambahan jenis *superplasticizer* efektif diimplementasikan untuk mempertahankan kestabilan emulsi busa serta menjaga volume air bebas tetap berada pada koridor reaksi hidrasi. Studi empiris oleh Prandika dkk., (2025), membuktikan bahwa penambahan *superplasticizer* dengan kadar 1,5% mampu mendongkrak kapasitas kuat tekan beton secara signifikan dari 16,14 MPa (164,63 kg/cm^2) menjadi 24,98 MPa (254,74 kg/cm^2) tanpa mengubah rasio air terhadap pengencer. Fakta ini menegaskan bahwa fungsi aditif tersebut berfokus pada meminimalkan porositas destruktif dengan mengkompensasi dampak negatif penyerapan agregat pengganti. Melalui konfigurasi persentase yang tepat, aditif ini bertindak sebagai komponen pendukung untuk stabilitas mikrostruktur beton CLC, sehingga pemanfaatan limbah CKS masih dapat menghasilkan produk bata ringan yang memenuhi peraturan standar fisik dan mekanik yang berlaku.

3.10 Pengujian Bata Ringan *Cellular Lightweight Concrete*

Pengujian pada penelitian ini, akan terfokus sesuai dengan SNI 8640-2018 tentang Bata ringan untuk pasangan dinding. Pengujiannya antara bobot isi dan penyerapan air serta kuat tekan. Kemudian akan dibahas juga yang mempengaruhi nilai dari pengujian yang dilakukan, hal tersebut juga menjadi pembahasan untuk penelitian yang dilakukan.

3.10.1 Pengujian Bobot Isi

Bobot isi merupakan parameter yang menggambarkan seberapa besar massa yang terkandung dalam setiap satuan volume suatu material. Nilai ini dipengaruhi oleh komposisi penyusun material, terutama pada bata ringan, karena perubahan proporsi bahan dapat mengubah struktur pori, ukuran pori, serta cara pori-pori itu tersebar di dalam material. Semakin tinggi bobot isi, semakin besar massa yang menempati setiap volumenya. Sebaliknya, bobot isi yang rendah menunjukkan bahwa material memiliki porositas lebih tinggi. Secara prinsip, bobot isi merupakan rasio antara berat material terhadap volumenya, yang dapat dinyatakan melalui persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$\text{Bobot isi } (\rho) = \frac{W}{V} \qquad (3.1)$$

Dengan:

P = Bobot isi benda uji (kg/m^3)

W = Berat benda uji (kg)

V = Volume benda uji (m^3)

3.10.2 Pengujian Penyerapan Air

Penyerapan air adalah rasio antara jumlah air yang masuk ke dalam pori-pori suatu material dengan berat kering material tersebut, dan dinyatakan dalam bentuk persentase. Pengujian ini digunakan untuk menentukan seberapa besar air yang dapat diserap oleh beton pada kondisi sudah mengeras. Berdasarkan ketentuan dalam SNI 8640-2018 tentang spesifikasi bata ringan untuk pasangan dinding,

besaran penyerapan air tersebut dihitung menggunakan persamaan 3.2–3.5 sebagai berikut.

Bobot isi nominal (BI) $= \frac{B_A}{V} \times 10^6$ (3.2)

Bobot isi kering oven(BI_O) $= \frac{B_{Ko}}{V} \times 10^6$ (3.3)

Bobot isi jenuh air (BI_A) $= \frac{B_{SSd}}{V} \times 10^6$ (3.4)

Penyerapan air $= \frac{BI_A - BI_O}{1000} \times 100\ \%$ (3.5)

Dengan:

B_A = Berat awal (gram)

B_{Ko} = Berat kering oven (gram)

Bssd = Berat jenuh air (gram)

BI = Bobot isi nominal (kg/m^3)

BI_A = Bobot isi jenuh air (kg/m^3)

BI_O = Bobot isi kering oven (kg/m^3)

3.10.3 Pengujian Kuat Tekan

Kuat tekan menjadi salah satu parameter utama untuk mengetahui kekuatan suatu material, termasuk bata ringan. Nilai kuat tekan diperoleh melalui pengujian tekan bebas, yaitu dengan memberikan beban per satuan luas penampang benda uji secara bertahap hingga benda uji tersebut hancur. Semakin besar beban yang mampu ditahan sebelum mengalami keruntuhan, semakin baik pula mutu bata ringan yang dihasilkan. Pengujian kuat tekan pada penelitian ini dilakukan pada 28 hari dan 10 sampe uji dari 1 bata untuk setiap variasi.

Untuk mengetahui secara pasti kuat tekan bata ringan, maka dilakukan pengujian kuat tekan. Dalam SNI 8640-2018 mengenai spesifikasi bata ringan untuk pasangan dinding, perhitungan kuat tekan dapat dirumuskan dengan persamaan 3.6.

$$\text{Kuat tekan} = \frac{P}{A} \qquad (3.6)$$

Dengan:

Kuat tekan = Kuat tekan beton (MPa atau N/mm^2)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm^2)

3.10 Kerangka Teoritis Pengaruh Substitusi Cangkang Kelapa Sawit

Berdasarkan uraian pada subbab 3.4 sampai 3.9, dapat disusun perkiraan pengaruh substitusi CKS terhadap bobot isi, penyerapan air, dan kuat tekan bata ringan CLC. Penelitian ini pada dasarnya ingin mengetahui apakah CKS dapat menggantikan sebagian pasir tanpa mengorbankan kinerja bata ringan, atau bahkan menghasilkan kinerja yang setara dengan pasir konvensional.

Bobot isi diperkirakan menurun karena berat jenis CKS lebih rendah dari pasir, sehingga sejalan dengan tujuan bata ringan itu sendiri. Penyerapan air diperkirakan meningkat karena sifat CKS yang berpori, namun penggunaan FAS 0,50 dan *additive foam concrete* dimaksudkan untuk menahan kenaikan tersebut agar tetap memenuhi SNI 8640-2018.

Kuat tekan menjadi parameter yang paling penting untuk diuji karena hasilnya belum pasti. Tekstur kasar CKS mendukung ikatan mekanis dengan semen, seperti dibuktikan Danso dan Appiah Agyei (2021), sehingga berpotensi menghasilkan kuat tekan setara pasir konvensional. Namun, porositas CKS juga berisiko menurunkan kuat tekan apabila air hidrasi dan stabilitas busa tidak terkendali, sehingga FAS tetap dan *additive* digunakan untuk menekan risiko tersebut. Kerangka ini menjadi acuan untuk membandingkan hasil penelitian pada Bab V, yaitu apakah substitusi CKS mampu mempertahankan kinerja bata ringan CLC yang setara dengan pasir konvensional.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian merupakan langkah disertai tahapan sistematis, yang dilakukan dalam penelitian untuk memperoleh hasil penyelesaian yang rasional. Penelitian berpacu pada tahapan yang telah dibuat untuk mengontrol suatu hasil agar tetap sejalan dengan konsep pembahasan. Penelitian ini dilakukan secara eksperimen, di laboratorium Bahan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

4.2 Variabel Penelitian

Untuk mengetahui pengaruh penggunaan Cangkang kelapa Sawit (CKS), diperlukan evaluasi berdasarkan sejumlah parameter pengujian yang telah ditentukan. Benda uji dianalisis dari aspek, antara lain bobot isi, penyerapan air dan kuat tekan. Objek penelitian berupa bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) dengan variasi substitusi parsial agregat halus menggunakan cangkang kelapa sawit (CKS) sebesar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat pasir.

Penelitian ini juga menerapkan pengendalian gradasi agregat halus serta penggunaan bahan tambah (*additive foam concrete*) untuk menjaga konsistensi sifat fisik dan mekanik bata ringan. Variasi, pengujian dan pengendalian butiran berperan sebagai variabel penelitian, yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Variabel bebas, yaitu persentase Cangkang Kelapa Sawit yang digunakan sebagai pengganti parsial pasir dalam campuran.
2. Variabel terikat, meliputi bobot isi, penyerapan air, dan kuat tekan pada bata ringan
3. Variabel kontrol, meliputi dimensi benda uji, komposisi campuran, ukuran butiran agregat halus (2,36-4,75 mm 25% dan 0,6-1,18 mm 75%), Ukuran butiran CKS (1-3 mm) dan perawatan benda uji.

4.3 Bahan dan Peralatan

Penyiapan bahan dalam penelitian ini dilakukan dengan merujuk pada kriteria fisis yang telah dikaji dalam landasan teori. Sementara itu, seluruh peralatan yang digunakan memanfaatkan fasilitas laboratorium yang telah dinyatakan layak sesuai standar SNI. Adapun rincian alat dan bahan tersebut dijabarkan sebagai berikut.

4.3.1 Bahan-bahan yang Digunakan

Bahan yang digunakan dalam proses pelaksanaan campuran adalah sebagai berikut.

1. Semen Portland

   Pada penelitian bata ringan CLC ini adalah tipe I dengan jenis *Portland composite cement* (PCC). Dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Portland Composite Cement

2. Agregat Halus

   Pada penelitian, agregat halus yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), yang berada di Universitas Islam Indonesia, serta dilakukan pengontrolan terhadap butiran agregat halus butiran, yang sesuai dengan persentase penggunaan yaitu fraksi halus 75% dan fraksi kasar 25%. Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.2 Agregat Halus 2,36 – 4,75 mm



Gambar 4.3 Agregat Halus 0,6 – 1,18 mm

3. Bahan Air

   Penelitian ini menggunakan air yang berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), yang berada di Universitas Islam Indonesia.

4. Cangkang Kelapa Sawit

   Cangkang kelapa sawit didapatkan dari Perkebunan kelapa sawit hasil dari pengolahan Cv. Manunggal Abadi, Kalimantan Timur. Cangkang kelapa sawit yang digunakan akan dilakukan penghancuran sampai ukuran yang diinginkan 1 –3 mm untuk dapat digunakan pada pencampuran. Cangkang kelapa sawit yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Cangkang Kelapa Sawit

5. *Foam agent*

   Penelitian ini menggunakan *Foam agent* bermerek CBM yang di produksi CV. CAHAYA BETONMIX. Adapun *foam agent* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Foaming Agent

6. *Additive Foam Concrete*

   Penelitian ini menggunakan *additive foam concrete* bermerek CBM yang di produksi CV. CAHAYA BETONMIX. Penggunaannya sebanyak 1% dari berat semen didasari dari rekomendasi cara penggunaan yang tertera pada bahan tambah ini. Adapun *Additive Foam Concrete* yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 ***Additive Foam Concrete***

4.3.2 Peralatan yang Digunakan

Peralatan yang digunakan untuk menunjang penelitian dan pencampuran bahan di laboratorium adalah sebagai berikut.

1. Timbangan,
2. Satu set alat pengujian agregat halus meliputi,
   a.Piring aluminium
   b.*Piknometer*
   c.Oven
   d.Saringan agregat halus
   e.Mesin *sieve shaker*
   f.Kerucut uji pasir, untuk menentukan kondisi pasir
3. Kompresor angin, untuk menyalurkan tekanan angin ke tabung busa,
4. Tabung busa, untuk menghasilkan busa dari campuran *foam agent* dengan air,
5. *Mixer,* alat pencampur adukan semen, pasir, air, dan cangkang kelapa sawit dengan kapasitas 0,25 m^3,
6. Drum air, untuk mengontrol penggunaan air,
7. Bekisting dengan ukuran benda uji bata ringan 60 cm, 20 cm, 10 cm,
8. Penggaris, untuk mengukur benda uji,
9. Mesin gerinda potong, untuk memotong benda uji menjadi sampel uji,
10. Mesin kuat tekan.

4.4 Sampel Penelitian

Prosedur dimensi spesimen uji dalam penelitian ini mengacu pada peraturan SNI 8640-2018 mengenai spesifikasi bata ringan untuk konstruksi dinding. Spesimen uji dicetak dalam bentuk blok modular dengan dimensi nominal panjang 60 cm, lebar 20 cm, dan tebal 10 cm. Sebanyak 50 sampel diproduksi, yang didistribusikan ke dalam 5 variasi campuran dengan alokasi 10 spesimen uji untuk setiap variasi. Konfigurasi perlakuan terdiri dari variasi kontrol (0% cangkang kelapa sawit) dan variasi substitusi agregat halus dengan cangkang kelapa sawit (CKS) dengan persentase masing-masing 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat pasir. Sebagai bahan pendukung untuk stabilitas mikrostruktur, semua variasi campuran diintegrasikan dengan beton busa aditif dengan dosis konstan 1% dari total berat semen.

Pengujian karakteristik fisik dan mekanis bata ringan dilakukan setelah benda uji melewati proses (*curing*) dan mencapai umur maturitas 28 hari. Dari total 10 sampel yang tersedia pada setiap variasi campuran, alokasi pengujian didistribusikan secara proporsional demi menjamin validitas data. Sebanyak 6 sampel disiapkan untuk pengujian kapasitas kuat tekan mekanis, dimana bata ringan modular terlebih dahulu dipotong menjadi kubus dengan dimensi ukuran 10 x 10 x 10 cm. Sementara itu, 4 sampel sisanya dialokasikan menjadi ukuran 20 x 20 x 20 cm untuk memfasilitasi pengujian sifat fisik yang meliputi pengujian bobot isi (berat volume) serta laju penyerapan air. Matriks detail mengenai distribusi dan klasifikasi total benda uji disajikan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Pengujian Benda Uji Bata Ringan CLC

No	Variasi Bata Ringan CLC	Pengujian		Jumlah
		Kuat tekan	Bobot isi & Penyerapan air	
1	(Normal + ADF)	6	4	10
2	(CKS + ADF)	6	4	10
3	(CKS + ADF)	6	4	10
4	(CKS + ADF)	6	4	10
5	(CKS + ADF)	6	4	10
Total				50

Dengan :

Normal + ADF = bata ringan tanpa cangkang kelapa sawit dengan bahan tambah

CKS + ADF = Bata ringan dengan cangkang kelapa sawit dan bahan tambah

4.5 Proporsi Campuran Bata Ringan CLC

Proporsi bata ringan dilakukan untuk menentukan material penyusun agar bata ringan yang dihasilkan dapat memenuhi persyaratan teknis yang berlaku. Proporsi campuran akan berpengaruh terhadap sifat bata ringan dan pengkategorian struktural maupun non struktural terhadap penggunaannya. Sehingga perencanaan campuran menjadi tahapan yang penting sebelum proses pembuatan benda uji.

Namun ketentuan campuran bata ringan, hingga saat ini belum ada yang baku seperti campuran beton normal. Hal ini disebabkan oleh karakteristik bata ringan yang sangat dipengaruhi oleh kualitas busa yang terbentuk, Serta proses pencampuran yang menghasilkan rongga udara di dalam material. Perbedaan mekanisme pembentukan pori tersebut, menyebabkan variasi densitas bata ringan yang cukup besar meskipun menggunakan komposisi material dasar yang serupa.

Dalam perencanaan proporsi campuran bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC), mengacu pada SNI 8640-2018 pada kategori berat kering oven 900 kg/m^3 dengan nilai yang masih masuk syarat 800–1000 kg/m^3. Pendekatan perencanaan proporsi dari berat kering oven rencana untuk memastikan campuran yang dirancang tetap berada di dalam rentang bobot isi dan mutu yang dipersyaratkan.

Dosis *foam agent* pada penelitian ini ditentukan melalui pengukuran berulang terhadap berat adonan basah pada volume 1 liter, mengingat belum tersedianya ketentuan baku untuk campuran bata ringan. Setiap kali dosis diujicobakan, berat adonan ditimbang dan dibandingkan terhadap rentang ± 850-900 gram. Rentang ini digunakan sebagai acuan awal dengan mempertimbangkan bahwa berat adonan akan mengalami penyusutan akibat proses *curing,* sehingga densitas kering oven yang dihasilkan pada akhirnya diharapkan berada pada rentang target sesuai SNI 8640-2018, yaitu kategori 900 kg/m^3. Proses ini dilakukan pada variasi kontrol yaitu tanpa campuran Cangkang Kelapa Sawit (CKS), apabila hasil timbangan

belum memenuhi rentang tersebut, dosis disesuaikan dan pengukuran diulang, hingga akhirnya diperoleh satu dosis yang konsisten dan dipakai pada setiap variasi. Pendekatan ini belum mencakup pengujian kesesuaian antara dosis *foam agent* yang diperoleh dengan nilai Faktor Air Semen (FAS) 0,50 yang ditetapkan, khususnya terkait pengaruhnya terhadap kestabilan busa. Dengan demikian, kesesuaian dosis terhadap densitas rencana tidak serta merta mencerminkan kesesuaiannya terhadap capaian kuat tekan, sehingga aspek ini menjadi salah satu Batasan pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini.

Proporsi campuran bata ringan direncanakan berdasarkan volume benda uji 0,012 m^3 yaitu (10 bata ringan 60 x 20 x10 cm), dasar ini disesuaikan untuk setiap variasi substitusi CKS 0%, 2%, 4%, 6% dan 8% dari berat pasir total setiap variasi. maka nilai proporsi campuran bata ringan normal atau dengan cangkang kelapa sawit pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Proporsi Campuran Bata Ringan

No	Volume cetakan	Jumlah	Variasi Bata Ringan CLC	Semen	Pasir	FAS	CKS	FAF	ADF
	m^3	Buah							
1	0,012	10	1 (Normal + ADF)	1	1,5	0,50	0%	0,40	1%
2	0,012	10	2 (CKS + ADF)	1	1,5	0,50	2%	0,40	1%
3	0,012	10	3 (CKS + ADF)	1	1,5	0,50	4%	0,40	1%
4	0,012	10	4 (CKS + ADF)	1	1,5	0,50	6%	0,40	1%
5	0,012	10	5 (CKS + ADF)	1	1,5	0,50	8%	0,40	1%

4.6 Pemeriksaan Material Bahan Campuran

Bahan-bahan dalam penelitian ini terdiri atas material pengikat, agregat, material substitusi, serta bahan tambah. Berdasarkan batasan ruang lingkup penelitian, pengujian karakteristik fisis secara mandiri di laboratorium hanya dilakukan terhadap agregat halus (pasir) dan material substitusi (Cangkang kelapa sawit). Spesifikasi teknis serta acuan standar untuk masing-masing komponen material dijabarkan sebagai berikut.

4.6.1 Pemeriksaan Kadar Lumpur Pasir

Pengujian kadar lumpur dilakukan untuk menjamin bahwa kualitas agregat halus yang diaplikasikan memenuhi standar mutu kelayakan struktural. Berdasarkan SNI 03-6820-2002, kandungan lumpur pada pasir alami dibatasi secara ketat dengan nilai maksimum sebesar 5%. Pembatasan ini krusial karena akumulasi kuantitas lumpur yang berlebihan beresiko menyelimuti butiran agregat, sehingga mendegradasi kekuatan ikat (*bonding*) antara permukaan pasir dan matriks pasta semen. Guna mengukur persentase kandungan tersebut, prosedur pengujian di laboratorium dieksekusi dengan metode pencucian dan penyaringan yang sepenuhnya merujuk pada ketetapan SNI 03-4142-1996.

4.6.2 Pemeriksaan Berat Volume

Uji berat satuan, juga dikenal sebagai berat satuan agregat, dilakukan untuk menentukan rasio antara berat massa agregat dalam kondisi kering dan volume wadah yang ditempatinya. Karakteristik ini diukur melalui dua kondisi susunan partikel, yaitu berat volume gembur yang mewakili massa agregat dalam keadaan lepas tanpa pemadatan, dan berat volume padat yang mewakili massa agregat setelah melalui proses pemadatan mekanis. Orientasi nilai dari kedua parameter ini berfungsi sebagai dasar untuk menghitung konversi volume keberat dalam perencanaan proporsi campuran bata ringan. Seluruh rangkaian prosedur pemadatan, penimbangan, dan perhitungan kapasitas volume wadah di laboratorium dilakukan dengan mengacu pada ketentuan SNI 03-4804-1998.

4.6.3 Pemeriksaan Berat Jenis

Pengujian berat jenis ini dilakukan untuk mengidentifikasi nilai densitas relatif dari agregat halus sekaligus mengukur kapasitas penyerapan airnya. Melalui implementasi metode yang digariskan dalam SNI 03-1970-1990, pengukuran parameter berat jenis ini mencakup tiga indikator utama, yaitu berat jenis kering oven (*bulk specific gravity oven-dry*), berat jenis jenuh kering permukaan (*bulk specific gravity saturated surface dry*/SSD), dan berat jenis semu (*apparent specific gravity*). Pada tahapan fabrikasi campuran, status jenuh kering permukaan dipilih sebagai kondisi standar pengkondisian pasir di laboratorium. Langkah ini menjadi regulasi internal yang krusial guna menjamin bahwa butiran pasir berada dalam

fase jenuh yang tidak menyerap air hidrasi dari pasta semen ataupun menambah volume air bebas ke dalam adukan selama proses pencampuran mortar bata ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Konfigurasi nilai SSD yang diperoleh tersebut nantinya dijadikan sebagai basis perhitungan akurat dalam menentukan proporsi massa total agregat halus.

4.6.4 Analisis Saringan dan Modulus Butiran Halus

Pengujian analisis saringan dilakukan untuk mengetahui sebaran ukuran butiran atau gradasi dari pasir yang akan digunakan. Mengacu pada prosedur dalam SNI 03-1968-1990, pasir diayak menggunakan satu set saringan standar guna menentukan nilai modulus kehalusan butirannya. Angka modulus kehalusan ini diperoleh dengan cara menjumlahkan seluruh persentase kumulatif pasir yang tertahan disetiap ayakan, lalu dibagi seratus. Ukuran saringan yang dipakai dalam pengujian ini meliputi diameter saringan dari yang terbesar hingga terkecil, yaitu 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, dan 0,15 mm. Sebagai patokan, jika nilai modulus kehalusan yang didapatkan semakin tinggi, hal ini menandakan karakteristik butiran pasir cenderung semakin kasar.

4.6.5 Perawatan dan Pengecekan Cangkang Kelapa Sawit

Prosedur ini dilakukan untuk memastikan cangkang kelapa sawit layak digunakan sebagai bahan campuran. Karena berasal dari limbah sisa ekstraksi minyak, cangkang tersebut harus dicuci bersih dengan air hangat dan direndam selama 24 jam untuk melarutkan sisa zat minyaknya. Mengikuti metode pengkondisian material yang dilakukan oleh Danso & Appiah-Agyei (2021), proses perendaman ini diulang sebanyak 2 sampai 3 kali sampai airnya tidak lagi menunjukkan lapisan minyak di permukaan dan tidak ada cangkang yang mengapung. Sebagai indikator kebersihan, air rendaman terakhir diamati secara visual; jika air sudah tampak jernih dan bebas minyak, cangkang dinyatakan bersih. Setelah dicuci, cangkang kelapa sawit cukup dikeringkan selama 24 jam pada suhu ruang sebelum siap dicampur ke dalam adukan.

4.7 Pembuatan Benda Uji dan Perawatan Benda Uji

Langkah–langkah yang dilakukan dalam pembuatan benda uji dan perawatan benda uji adalah sebagai berikut.

1. Peralatan yang akan digunakan untuk pembuatan benda uji disiapkan terlebih dahulu dan peralatan yang membutuhkan listrik dilakukan instalasi supaya siap pakai,
2. Menyiapkan bahan untuk pencampuran yang akan digunakan dan pemeriksaan terhadap agregat halus untuk melihat apakah kondisi kering jenuh permukaan (*saturated surface dry/* SSD),
3. Menimbang bahan yang dibutuhkan sesuai dengan yang telah dilakukan dalam komposisi campuran,
4. Pengadukan bahan menggunakan *mixer* diawali dengan pasir dan semen hingga tercampur homogen, masukan air kemudian di aduk kembali hingga tercampur rata,
5. Setelah adonan basah tercampur merata, dituangkan bahan tambah *additive foam concrete* ditunggu kembali sekitar 2-3 menit setelah homogen ditambahkan busa hasil *foam generator,*
6. Setelah adukan homogen, tuangkan mortar kedalam bekisting tanpa dilakukan pemadatan,
7. Setelah 24 jam cetakan dibuka, benda uji dikeluarkan dan cetakan dibersihkan. Benda uji yang dikeluarkan di taruh di tempat yang tidak terkena matahari, pengeringan dilakukan dengan bantuan udara serta disiram secara berkala pagi, siang, dan sore.

4.8 Pengujian Benda Uji

Pada penelitian ini bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) yang akan diuji berumur 28 hari. Pengujian bata ringan akan dilakukan terhadap beberapa pengujian yaitu pengujian kuat tekan, dan bobot isi, penyerapan air. Tahapan untuk setiap pengujian adalah sebagai berikut.

1. Pengujian bobot isi dan penyerapan air

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dari bata ringan, dengan mencari bobot isi kering oven, bobot isi jenuh air, dan penyerapan air. Tahapan untuk pengujian sebagai berikut.

a. Siapkan empat benda uji utuh berumur 28 hari,
b. Siapkan peralatan untuk pengujian,
c. Buat delapan sampel uji dari empat benda uji utuh berukuran 20 x 20 x 10 cm dari setiap ujung benda uji,
d. Bersihkan sampel uji dari debu lalu timbang beratnya,
e. Keringkan sampel uji di dalam oven dengan temperatur (110 ± 5) ºC selama 24 jam sampai berat tetap. Dilakukan penimbangan berulang sebanyak 2 kali dengan jarak waktu 30 menit sampai berat sampel sama dan tidak lebih dari 0,05 gr,
f. Timbang dan catat berat sampel tetap,
g. Setelah itu masukan sampe uji kedalam air sampai seluruh permukaan terendam selama 24 jam ± 30 menit,
h. Setelah 24 jam keluarkan sampel uji dan keringkan air yang berlebih menggunakan kain lalu timbang dan catat hasil penimbangan.

2. Pengujian kuat tekan

Pengujian ini dilakukan untuk melihat kemampuan sifat mekanik bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) terhadap gaya tekan. Tahapan pengujian sebagai berikut.

a. Siapkan benda uji bata ringan yang telah berumur 28 hari,
b. Persiapkan peralatan yang akan digunakan,
c. Potong ujung setiap benda uji dengan ukuran 5 cm,
d. Buat sampel uji menjadi kubus dengan ukuran sesuai dengan ketebalan bata ringan, yaitu 10 cm,
e. Sampel uji yang sudah dipotong dengan ukuran 10 x 10 x 10 cm, direndam kedalam air selama 24 jam,
f. Setelah 24 jam sampel uji dikeluarkan lalu di keringkan dengan kain untuk menghilangkan air yang berlebih,

g. Setelah itu pengujian kuat tekan terhadap sampel dilakukan di bidang yang rata, lalu sampel di uji dengan mesin desak secara sentris (tepat di tengah),
h. Lakukan sampai sampel uji hancur dan mencatat beban maksimum yang terjadi selama pemeriksaan sampel uji,

4.9 Tahap Olah Data

Tahapan ini dilakukan setelah pengujian bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) normal ataupun dengan cangkang kelapa sawit serta bahan tambah *additive foam concrete* dilakukan. Pengolahan data terkait dengan hasil pembacaan dan perolehan nilai dari tiap-tiap pengujian yang diolah berdasarkan landasan teori. Hasil dari pengolahan data, dapat terlihat apakah bata ringan dengan substitusi parsial agregat halus dapat meningkatkan kekuatan, memiliki sifat fisik yang lebih baik dari bata ringan normal ataupun memperoleh hasil yang setara di antara keduanya.

Guna memperkuat hasil perbandingan nilai rata-rata variasi secara statistik, data ketiga parameter pengujian (bobot isi, penyerapan air, dan kuat tekan) turut diuji normalitasnya menggunakan metode *Shapiro-wilk*, yang dinilai lebih peka mendeteksi penyimpangan distribusi pada sampel berjumlah kecil dibandingkan metode lain (Ahadi & Zain, 2023). Hasil uji normalitas ini menjadi dasar penentuan Langkah selanjutnya, karena setiap kemungkinan kondisi data akan menempuh jalur pengujian yang berbeda. Secara ringkas, tahapan analisis statistik yang ditempuh adalah sebagai berikut:

1. Pengujian normalitas sebaran data pada tiap variasi dan tiap parameter terlebih dahulu diperiksa kenormalannya melalui uji *Shapiro wilk* dengan taraf signifikansi 5%, sebagai langkah awal menentukan karakteristik distribusi masing-masing kelompok data sebelum dianalisis lebih lanjut.
2. Pengujian homogenitas, ketika parameter yang seluruh kelompok datanya telah dinyatakan pada tahap sebelumnya, kesetaraan varians antar kelompok kemudian diperiksa melalui *Lavene's Test.* Pengujian ini diperlukan untuk memastikan asumsi dasar yang melandasi uji beda rata-rata parametrik terpenuhi.

3. Uji beda rata rata, dipilih berdasarkan kombinasi hasil dua uji sebelumnya:
   a. One way Anova, apabila data terdistribusi normal dan varians antar kelompok homogen.
   b. Welch ANOVA, apabila data terdistribusi normal namun varians antar kelompok tidak homogen, karena metode ini tidak mensyaratkan kesetaraan varians dalam perhitungan (Ramadhani & Syam, 2025).
   c. Kruskal Wallis, apabila terdapat kelompok data yang tidak terdistribusi normal, karena metode non parametrik ini bekerja berdasarkan peringkat dan tidak mensyaratkan bentuk distribusi tertentu (Quraisy dkk., 2021).
4. Uji lanjut *Post Hoc*,dilakukan apabila hasil uji beda rata-rata pada poin 3 menunjukkan perbedaan yang signifikan, dengan metode yang disesuaikan terhadap jalur pengujian sebelumnya.
   a. Tukey Honestly Significant Difference (Tukey HSD), digunakan mengikuti hasil One Way ANOVA pada kondisi varians homogen.
   b. Games Howell, digunakan mengikuti hasil Welch ANOVA pada kondisi varians tidak homogen (Lee & Lee, 2018).
   c. Dunn Test dengan koreksi Bonferroni, digunakan mengikuti hasil Kruskal Wallis pada jalur non parametrik.

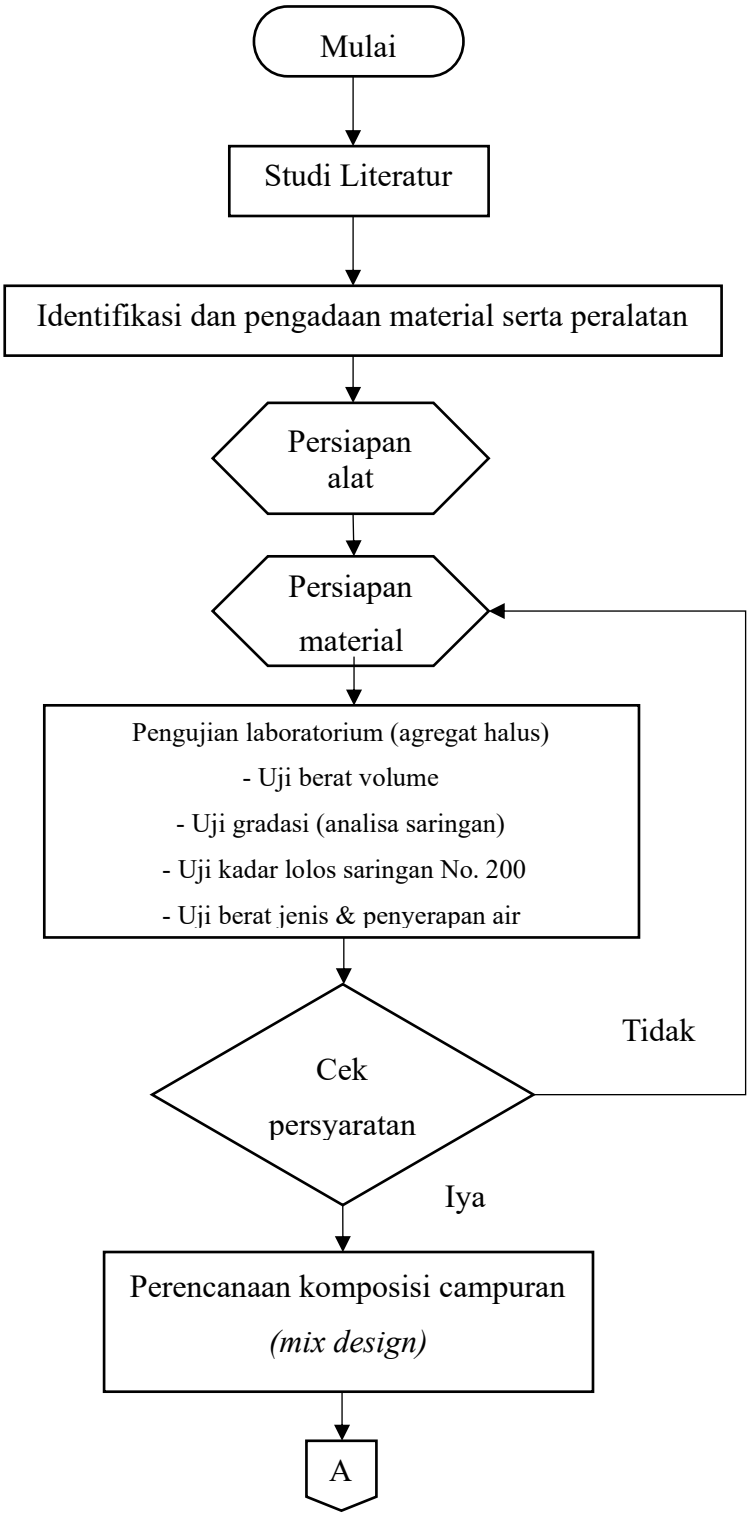
Keseluruhan tahapan pengolahan data statistik tersebut dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *IBM SPSS Statistics*.

4.10 Tahap Kesimpulan dan Saran

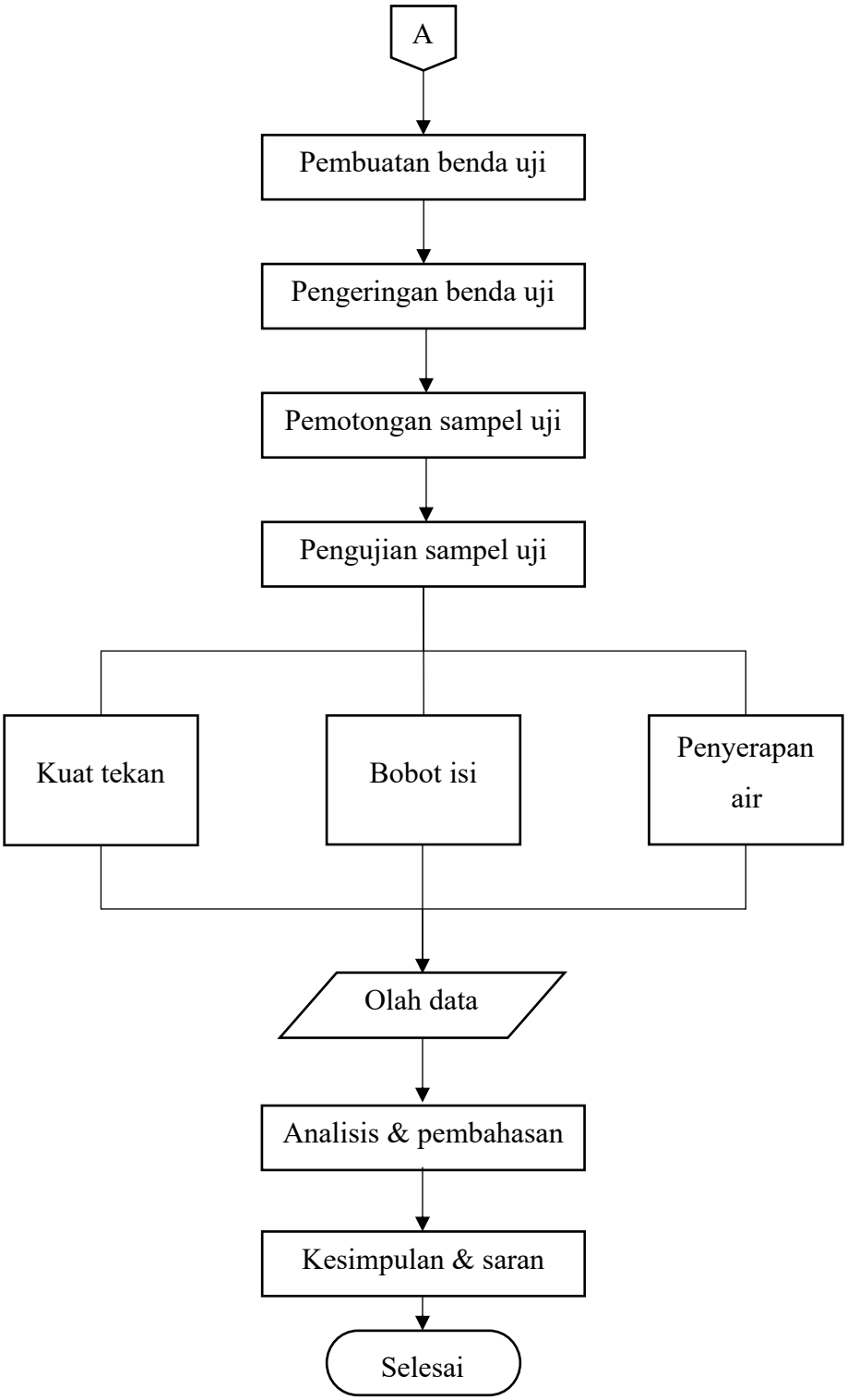
Pada tahap ini disusun kesimpulan yang mengacu pada tujuan penelitian berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan. Selain itu, pada bagian ini juga disajikan saran yang diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi penelitian selanjutnya, dengan merujuk pada temuan dan keterbatasan yang diperoleh dalam penelitian ini.

4.11 Bagan Alir Penelitian

Berdasarkan tahapan penelitian yang telah diuraikan sebelumnya, alur pelaksanaan penelitian dirangkum dalam bentuk bagan alir (*flowchart*) yang disajikan pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4.7 Bagan Alir Penelitian

BAB V
HASIL & PEMBAHASAN

5.1 Tinjauan Umum

Bab ini menyajikan hasil dan pembahasan penelitian, mulai dari pengujian karakteristik material penyusun (pasir dan cangkang kelapa sawit), perhitungan komposisi campuran, proses pembuatan hingga perawatan benda uji, sampai pengujian sifat fisik dan mekanik bata ringan *cellular lightweight concrete* (CLC) pada umur 28 hari untuk kelima variasi substitusi CKS (0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%). Hasil pengujian bobot isi, penyerapan air, dan kuat tekan dianalisis untuk melihat kecenderungan pengaruh peningkatan kadar CKS terhadap performa bata ringan, kemudian dievaluasi kesesuaiannya terhadap SNI 8640-2018 tentang Spesifikasi Bata Ringan untuk Pasangan Dinding, sebagai dasar penarikan kesimpulan pada Bab VI.

5.2 Pengujian dan Perawatan Material

Sebelum pembuatan benda uji, material penyusun bata ringan perlu dilakukan pengujian terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik dan sifat dari setiap material yang akan digunakan. Material penyusun harus sesuai dengan standar yang berlaku supaya dapat dilakukan perencanaan *mix design.*

Adapun pengujian yang dilakukan pada pasir dan cangkang kelapa sawit (CKS) dalam penelitian ini meliputi uji berat volume padat dan gembur, uji berat jenis dan penyerapan air, uji lolos saringan No.200, serta uji gradasi. Pengujian tersebut dilakukan untuk memastikan kedua material layak digunakan sebagai agregat halus dalam campuran bata ringan.

1. Uji Berat Volume Padat dan Gembur

   Pengujian berat volume padat dan gembur dilaksanakan berdasarkan SNI 03-4804-1998 tentang Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara dalam Agregat. Pengujian ini dilakukan pada pasir dan cangkang kelapa sawit (CKS) untuk mengetahui berat volume masing-masing material dalam kondisi padat

maupun gembur. Hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.1, 5.2, 5,3 dan 5,4.

Tabel 5. 1 Berat Volume Padat Agregat Halus

Keterangan	Satuan	Sampel	Sampel	Rerata
Berat Tabung (W1)	gram	10828	10828	10828
Berat Tabung + Agregat Kering Tungku (W2)	gram	19387	19332	19359,5
Berat Agregat (W3)	gram	8559	8504	8531,5
Volume Tabung (V)	cm^3	5515,61	5515,61	5515,61
Berat Volume Padat = (W3/V)	$gram/cm^3$	1,552	1,542	1,547

(Sumber: SNI 03-4804-1998)

Tabel 5. 2 Berat Volume Padat Cangkang Kelapa Sawit

Keterangan	Satuan	Sampel	Sampel	Rerata
Berat Tabung (W1)	gram	10828	10828	10829
Berat Tabung + CKS Kering Tungku (W2)	gram	14564	14762	14663
Berat Agregat (W3)	gram	3725	3933	3834
Volume Tabung (V)	cm^3	5515,61	5515,61	5515,61
Berat Volume Padat = (W3/V)	$gram/cm^3$	0,677	0,713	0,695

(Sumber: SNI 03-4804-1998)

Tabel 5. 3 Berat Volume Gembur Agregat Halus

Keterangan	Satuan	Sampel	Sampel	Rata-rata
Berat Tabung (W1)	gram	10828	10828	10828
Berat Tabung + Agregat Kering Tungku (W2)	gram	18779	18728	18753,5
Berat Agregat (W3)	gram	7951	7900	7925,5
Volume Tabung (V)	cm^3	5515,61	5515,61	5515,61
Berat Volume Gembur = (W3/V)	$gram/cm^3$	1,442	1,432	1,437

(Sumber SNI 03-4804-1998)

Tabel 5. 4 Berat Volume Gembur Cangkang Kelapa Sawit

Keterangan	Satuan	Sampel 1	Sampel 2	Rerata
Berat Tabung (W1)	gram	10828	10828	10829
Berat Tabung + CKS Kering Tungku (W2)	gram	13963	13748	13855,5
Berat Agregat (W3)	gram	3135	2920	3027,5
Volume Tabung (V)	cm^3	5515,61	5515,61	5515,616
Berat Volume Gembur = (W3/V)	$gram/cm^3$	0,568	0,529	0,549

(Sumber SNI 03-4804-1998)

Berdasarkan data di atas berat volume padat dan berat volume gembur agregat halus dapat dihitung sebagai berikut.

Perhitungan volume tabung $= \frac{1}{4} \pi \text{ x } d^2 \text{ x } t$

$= \frac{1}{4} \pi \text{ x } 15{,}3^2 \text{ x } 30$

$= 5515{,}61 \text{ cm}^3$

Perhitungan berat volume padat $= \frac{W3}{V}$

$= \frac{8531{,}5}{5515{,}61}$

$= 1{,}547 \text{ gram/cm}^3$

Perhitungan berat volume gembur $= \frac{W3}{V}$

$= \frac{7925{,}5}{5515{,}61}$

$= 1{,}437 \text{ gram/cm}^3$

Pengujian berat volume agregat halus dilakukan dalam dua kondisi, yaitu kondisi gembur (*loose)* dan kondisi padat (*compacted).* Berdasarkan hasil pengujian, nilai rata-rata berat volume pada kondisi padat diperoleh sebesar 1,547 $gram/cm^3$, sedangkan pada kondisi gembur sebesar 1,437 $gram/cm^3$. dan untuk CKS nilai berat pada kondisi padat diperoleh 0,695 $gram/cm^3$dan berat pada kondisi gembur sebesar 0,549 $gram/cm^3$.

Perbedaan ini mencerminkan karakteristik fisik kedua material yang berbeda. CKS memiliki sifat yang lebih ringan dibandingkan pasir, dan bentuk partikelnya yang tidak beraturan menyebabkan susunan butiran menjadi

kurang rapat sehingga menghasilkan lebih banyak rongga antar partikel. Kondisi tersebut berdampak pada rendahnya massa agregat persatuan volume, yang pada akhirnya menghasilkan nilai berat volume CKS lebih kecil dibandingkan pasir.

Rendahnya berat volume CKS memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap bata ringan CLC yang dihasilkan. Substitusi pasir dengan CKS berpotensi menurunkan berat keseluruhan campuran sehingga bata yang dihasilkan menjadi lebih ringan. Hal ini sejalan dengan tujuan penggunaan bata ringan CLC, yaitu mengurangi beban struktur bangunan.

2. Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus

Pengujian analisa saringan agregat halus dilakukan mengacu pada SNI 03-1968-1990 untuk mengetahui distribusi ukuran butiran dari pasir dan cangkang kelapa sawit (CKS) yang digunakan dalam campuran bata ringan CLC. Hasil pengujian selengkapnya disajikan pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6.

Tabel 5. 5 Pengujian Modulus Halus Butiran Pasir

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat Tertinggal kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
10	0	0	0	100
4,8	0	0.00	0.00	100
2,4	88	4,40	4,40	95,60
1,2	264	13,20	17,60	82.40
0,6	406	20,30	37,90	62,10
0,3	453	22,65	60,55	39,45
0,15	595	29,75	90,30	9,70
Sisa	194	9,70	100	0
Jumlah	2000	100	210,75	

Tabel 5. 6 Pengujian Modulus Halus Butiran CKS

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat Tertinggal kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
10	0	0	0	100
4,8	17,9	1,79	1,79	98,21
2,4	416,6	41,66	43,45	56,55
1,2	319	31,90	75,35	24,65
0,6	191,9	19,19	94,54	5,46
0,3	34,7	3,47	98,01	1,99
0,15	17,1	1,71	99,72	0,28

Lanjutan Tabel 5. 6 Pengujian Modulus Halus Butiran CKS

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat Tertinggal kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
Sisa	2,8	0,28	100	0
Jumlah	1000	100	412,86	

Berdasarkan data dari Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 diperoleh nilai modulus halus butir sebagai berikut.

$$\text{Modulus Halus Butir Pasir} = \frac{\text{Jumlah berat tertinggal kumulatif}}{100}$$

$$= \frac{210,75}{100}$$

$$= 2,108$$

$$\text{Modulus Halus Butir CKS} = \frac{\text{Jumlah berat tertinggal kumulatif}}{100}$$

$$= \frac{412,86}{100}$$

$$= 4,129$$

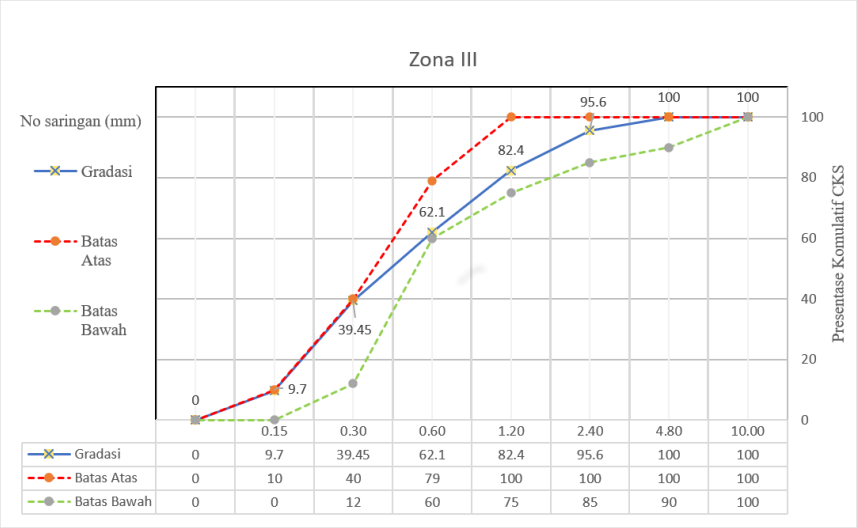
Berdasarkan hasil pengujian analisa saringan, modulus halus butir pasir SNI 7656:2012 dengan nilai 2,108 yang tidak berada dalam rentang 2,3–3,0, sedangkan modulus halus butir CKS sebesar 4,129 tidak memenuhi spesifikasi tersebut. Tingginya nilai MHB CKS disebabkan oleh karakteristik awal cangkang kelapa sawit yang memiliki ukuran butiran besar, sehingga hasil penghalusan hingga ≤ 4,75 mm menghasilkan distribusi butiran yang cenderung seragam dan didominasi ukuran 1,2–2,45 mm. Pasir termasuk dalam gradasi daerah III atau pasir agak halus, sedangkan CKS termasuk dalam gradasi seragam yang berpotensi menghasilkan rongga antar partikel lebih besar dibandingkan pasir, sehingga dapat mempengaruhi densitas dan porositas bata ringan CLC yang dihasilkan.

Tabel 5. 7 Gradasi Agregat Halus (zona)

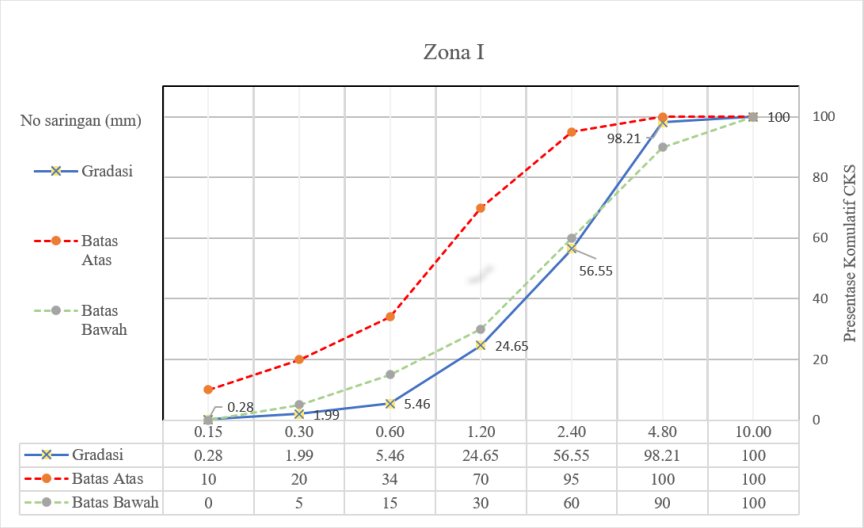
Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat Lolos Ayakan (%)			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

(Sumber: SNI 03-1968-1990)

Nilai dari gradasi butiran dalam bentuk kurva dapat dilihat pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.2 berikut



Gambar 5. 1 Grafik Butiran Agregat Halus



Gambar 5. 2 Grafik Butiran CKS

3. Pengujian Berat jenis dan Penyerapan Air

Pengujian dilakukan pada pasir dan cangkang kelapa sawit (CKS) mengacu pada SNI 03-1970-1990. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisik kedua material, khususnya nilai penyerapan air yang diperlukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan masing-masing material dalam menyerap air sehingga dapat diperkirakan pengaruhnya terhadap kualitas campuran bata ringan CLC yang dihasilkan. Hasil dari pengujian berat jenis dan penyerapan tercantum pada Tabel 5.8 dan Tabel 5.9 sebagai berikut.

Tabel 5. 8 Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Pasir

Uraian	Satuan	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat pasir kering mutlak	gram	491	492	491.50
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD)	gram	500	500	500
Berat Piknometer berisi pasir dan air	gram	1006	1004	1005
Berat piknometer berisi air	gram	686	682	685.5
Berat jenis curah		2.728	2.780	2.75
Berat jenis jenuh kering muka (SSD)		2.778	2.825	2.80
Berat jenis semu		2.871	2.911	2.89
Penyerapan air		1.83%	1.63%	1.73%

Tabel 5. 9 Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan CKS

Uraian	Satuan	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat CKS kering mutlak	gram	181	185	183
Berat CKS kondisi jenuh kering muka (SSD)	gram	200	200	200
Berat Piknometer berisi CKS dan air	gram	771	778	774,5
Berat piknometer berisi air	gram	706	706	706
Berat jenis curah		1,341	1,445	1,39
Berat jenis jenuh kering muka (SSD)		1,481	1,563	1,52
Berat jenis semu		1,560	1,6372	1,60
Penyerapan air		10,50%	8,11%	9,30%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pasir memiliki nilai berat jenis SSD sebesar 2,80 dengan penyerapan air sebesar 1,73%, sedangkan CKS memperoleh nilai berat jenis SSD sebesar 1,52 dengan penyerapan air sebesar 9,30%. Nilai berat jenis pasir yang lebih tinggi menunjukkan struktur butiran yang lebih padat dan umumnya termasuk dalam kategori agregat normal, sementara rendahnya berat jenis CKS menunjukkan karakteristik material yang lebih ringan dan berpori, yang sejalan dengan hasil pengujian berat volume sebelumnya.

Dari sisi penyerapan air, pasir menunjukkan nilai yang relatif rendah sehingga tidak menyerap air campuran secara berlebihan. Sebaliknya, CKS memiliki nilai penyerapan air yang jauh lebih tinggi akibat struktur partikelnya yang berongga dan berpori. Kondisi ini perlu diperhatikan dalam perencanaan campuran karena CKS yang tidak berada dalam kondisi SSD berpotensi menyerap air efektif dari campuran sehingga dapat mengurangi kualitas pasta semen. Oleh karena itu, kedua material digunakan dalam kondisi SSD untuk memastikan tidak terjadi penyerapan maupun pelepasan air selama proses pencampuran.

4. Pengujian Kandungan Lumpur (Uji Lolos Saringan No.200)

   Pengujian lolos saringan No.200 dilakukan pada pasir mengacu pada SNI 03-4142-1996 tentang Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan No.200. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan

lumpur atau bahan halus yang lolos saringan No.200 pada masing-masing material, karena kandungan bahan halus yang berlebihan dapat mengganggu ikatan antara agregat dan pasta semen dalam campuran bata ringan CLC. Hasil dari pengujian kandungan lumpur dapat dilihat pada Tabel 5.10 sebagai berikut.

Tabel 5. 10 Pengujian Kandungan Lumpur Pasir

Uraian	Satuan	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat Agregat Kering Oven (W1)	gram	500	500	500
Berat Agregat Kering Oven Setelah di Cuci (W2)	gram	475	477	476
Berat Yang lolos Ayakan No.200		5,00%	4,60%	4,80%

Berdasarkan hasil pengujian, kandungan umpur pada pasir diperoleh sebesar 4,80%. Nilai tersebut masih memenuhi persyaratan SNI 03-6820-2002 yang menetapkan batas maksimum kandungan bahan lolos saringan No.200 tidak melebihi 5%. Meskipun demikian nilai yang mendekati batas maksimum ini tetap perlu diperhatikan, karena semakin tinggi kandungan lumpur pada agregat halus maka ikatan antar butiran akan semakin melemah sehingga berpotensi menurunkan kemampuan agregat dalam mempertahankan ikatan dengan pasta semen pada campuran bata ringan CLC.

5. Perawatan cangkang Kelapa Sawit

   Cangkang kelapa sawit mentah umumnya masih mengandung lapisan minyak dan partikel lumpur yang menempel pada permukaannya akibat pengolahan di pabrik minyak sawit. Oti dkk., (2017) mencatat bahwa kotoran ini perlu dihilangkan melalui proses perendaman dan pencucian sebelum cangkang digunakan sebagai agregat, karena residu yang tersisa berpotensi mengurangi kinerja semen dan beton yang dihasilkan. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini melakukan pencucian berulang pada PKS hingga air rendaman terakhir tampak jernih dan bebas dari lapisan minyak, seperti yang didokumentasikan pada Gambar 5.3. Sebagai berikut



Gambar 5. 3 Pencucian Cangkang Kelapa Sawit (CKS)

Keberhasilan pengkondisian ini membuktikan bahwa perlakuan awal yang merujuk pada metode Danso dan Appiah-Agyei (2021) efektif menghilangkan zat ekstraktif yang dapat mengganggu reaksi kimia semen. Melalui tahapan pengeringan suhu ruang, diperoleh karakteristik CKS yang bersih, sehingga material siap berikatan secara optimal dalam matriks beton *Cellular Lightweight Concrete* (CLC).

5.3 Komposisi Bata Ringan CLC

Komposisi disusun berdasarkan volume benda uji 0,012 m^3, yang setara dengan 10 buah bata berukuran 60 x 20 x 10 cm untuk setiap variasi campuran. Seluruh kebutuhan material dihitung mengacu pada target densitas kering oven 900 kg/m^3 dengan perbandingan pasir dan semen 1,5 : 1 serta faktor air semen (FAS) sebesar 0,50.

1. Perhitungan Kebutuhan Material

   Perhitungan material diawali dengan menentukan total berat campuran yang dibutuhkan untuk 1 m^3 berdasarkan target densitas kering oven 900 kg/m^3, menggunakan persamaan berikut.

   $$\text{Kebutuhan semen } 1m^3 = \frac{1 \text{ bagian semen}}{2{,}5 \text{ bagian}} \text{ x bobot isi rencana}$$

   $$= \frac{1 \text{ bagian semen}}{2{,}5 \text{ bagian}} \text{ x } 900$$

$= 360 \text{ kg/m}^3$

Kebutuhan pasir 1m^3 $= \frac{1{,}5 \text{ bagian semen}}{2{,}5 \text{ bagian}}$ x bobot isi rencana

$= \frac{1{,}5 \text{ bagian semen}}{2{,}5 \text{ bagian}}$ x 900

$= 540 \text{ kg/m}^3$

Kebutuhan air 1m^3 = Nilai FAS rencana x berat semen

= 0,50 x 360

= 180 liter

Kebutuhan material per 1 m³ selanjutnya disesuaikan dengan volume benda uji yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu sebesar 0,012 m^3 untuk setiap variasi campuran yang terdiri dari 10 buah bata ringan berukuran 60 x 20 x 10 cm. Penyesuaian ini dilakukan agar kebutuhan material yang disiapkan benar-benar proporsional terhadap jumlah benda uji yang akan dibuat, sehingga tidak terjadi kelebihan atau kekurangan material selama proses.

Semen = Volume benda uji x Kebutuhan semen 1 m^3

= 0,012 x 360

= 4,32 kg

Pasir = Volume benda uji x Kebutuhan pasir 1 m^3

= 0,012 x 540

= 6,48 kg

Air = Kebutuhan semen 1 bata x FAS

= 4,32 x 0,50

= 2,16 liter

Selain semen, pasir, dan air, penelitian ini juga menggunakan dua bahan tambahan. Pertama, *foam agent* sebesar 17 ml per bata (total 170 ml untuk 10 bata per variasi). Kedua, *Additive Foam Concrete* (ADF) sebanyak 1% dari berat semen. Dosis *foam agent* yang digunakan melalui pengukuran berat adonan basah. Sementara itu, penggunaan pasir pada setiap variasi dibagi menjadi dua ukuran, yaitu 75% berukuran 0,6-1,18 mm dan 25% berukuran 2,36-4,75 mm. Dengan ketentuan ini, detail kebutuhan material serta jumlah

cangkang kelapa sawit sebagai pengganti agregat halus dapat ditsebagai berikut.

a. Perhitungan Variasi 1

Material kebutuhan variasi 1 ini tidak menggunakan cangkang kelapa sawit sebagai pengganti pasir.

CKS	= 0%
Semen	= 10 bata x Jumlah semen 1 bata
	= 10 x 4,32
	= 43,2 kg
Total pasir	= (10 bata x Jumlah pasir 1 bata) - CKS
	= (10 x 6,48) – 0
	= 64,8 kg
Pasir (0,6-1,18)	= Total pasir x 75 %
	= 64,8 x 75 %
	= 48,6
Pasir (2,36-4,75)	= Total pasir x 25 %
	= 64,8 x 25%
	= 16,2 kg
Air	= 10 bata x Jumlah air 1 bata
	= 10 x 2,16
	= 21,6 Liter
Foam Agent	= 17 ml
Additive	= 1% x Berat total semen 1 variasi
	= 1% x 43,2
	= 432 mililiter

b. Perhitungan Variasi 2

Material kebutuhan variasi 2 ini menggunakan cangkang kelapa sawit sebagai pengganti pasir.

CKS	= Persen substitusi x Jumlah pasir 10 bata
	= 2 % x 64,8 kg
	= 1,296 kg

Semen	= 10 bata x Jumlah semen 1 bata
	= 10 x 4,32
	= 43,2 kg
Total pasir	= (10 bata x Jumlah pasir 1 bata) - CKS
	= (10 x 6,48) – 1,296
	= 63,504 kg
Pasir (0,6-1,18)	= Total pasir x 75 %
	= 63,504 x 75 %
	= 47,628
Pasir (2,36-4,75)	= Total pasir x 25 %
	= 63,504 x 25%
	= 15,876 kg
Air	= 10 bata x Jumlah air 1 bata
	= 10 x 2,16
	= 21,6 Liter
Foam Agent	= 17 ml
Additive	= 1% x Berat total semen 1 variasi
	= 1% x 43,2
	= 432 mililiter

c. Perhitungan Variasi 3

Material kebutuhan variasi 3 ini menggunakan cangkang kelapa sawit sebagai pengganti pasir.

CKS	= Persen substitusi x Jumlah pasir 10 bata
	= 4 % x 64,8 kg
	= 2,592 kg
Semen	= 10 bata x Jumlah semen 1 bata
	= 10 x 4,32
	= 43,2 kg
Total pasir	= (10 bata x Jumlah pasir 1 bata) - CKS
	= (10 x 6,48) – 2,592
	= 62,208 kg

Pasir (0,6-1,18) = Total pasir x 75 %
= 62,208 x 75 %
= 46,656 kg

Pasir (2,36-4,75) = Total pasir x 25 %
= 62,208 x 25%
= 15,552 kg

Air = 10 bata x Jumlah air 1 bata
= 10 x 2,16
= 21,6 Liter

Foam Agent = 17 ml

Additive = 1% x Berat total semen 1 variasi
= 1% x 43,2
= 432 mililiter

d. Perhitungan Variasi 4

Material kebutuhan variasi 4 ini menggunakan cangkang kelapa sawit sebagai pengganti pasir.

CKS = Persen substitusi x Jumlah pasir 10 bata
= 6 % x 64,8 kg
= 3,888 kg

Semen = 10 bata x Jumlah semen 1 bata
= 10 x 4,32
= 43,2 kg

Total pasir = (10 bata x Jumlah pasir 1 bata) – CKS
= (10 x 6,48) – 3,888
= 60,912 kg

Pasir (0,6-1,18) = Total pasir x 75 %
= 60,912 x 75 %
= 45.684 kg

Pasir (2,36-4,75) = Total pasir x 25 %
= 60,912 x 25%
= 15,228 kg

Air	= 10 bata x Jumlah air 1 bata
	= 10 x 2,16
	= 21,6 Liter
Foam Agent	= 17 ml
Additive	= 1% x Berat total semen 1 variasi
	= 1% x 43,2
	= 432 mililiter

e. Perhitungan Variasi 5

Material kebutuhan variasi 5 ini menggunakan cangkang kelapa sawit sebagai pengganti pasir.

CKS	= Persen substitusi x Jumlah pasir 10 bata
	= 8 % x 64,8 kg
	= 5,184 kg
Semen	= 10 bata x Jumlah semen 1 bata
	= 10 x 4,32
	= 43,2 kg
Total pasir	= (10 bata x Jumlah pasir 1 bata) - CKS
	= (10 x 6,48) – 5,184
	= 59,616 kg
Pasir (0,6-1,18)	= Total pasir x 75 %
	= 59,616 x 75 %
	= 44,712 kg
Pasir (2,36-4,75)	= Total pasir x 25 %
	= 59,616 x 25%
	= 14,904 kg
Air	= 10 bata x Jumlah air 1 bata
	= 10 x 2,16
	= 21,6 Liter
Foam Agent	= 17 ml
Additive	= 1% x Berat total semen 1 variasi
	= 1% x 43,2

= 432 mililiter

Berdasarkan seluruh perhitungan kebutuhan material yang telah diuraikan di atas, mulai dari kebutuhan semen, pasir, air, *foam agent*, hingga *Additive Foam Concrete*, seluruh proporsi campuran untuk setiap variasi dirangkum dalam Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5. 11 Komposisi Campuran Bata Ringan CLC

No	Air	Semen	Pasir 75%	Pasir 25%	CKS	Total pasir + CKS	*Foam Agent*	*Additive*
	liter	kg	kg	kg	kg	Kg	liter	liter
1	21,6	43,2	48,6	16,2	0	64,8	0,017	0,432
2	21,6	43,2	47,62	15,87	1,296	64,8	0,017	0,432
3	21,6	43,2	46,65	15,55	2,592	64,8	0,017	0,432
4	21,6	43,2	45,68	15,22	3,888	64,8	0,017	0,432
5	21,6	43,2	44,71	14,90	5,184	64,8	0,017	0,432

Dari tabel 5.11 diperoleh komposisi untuk pembuatan bata ringan CLC dengan 5 variasi, variabel yang berubah hanya pada pasir sesuai dengan kebutuhan substitusi dengan cangkang kelapa sawit.

5.4 Proses Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dalam penelitian ini mengikuti prosedur kerja yang runtut agar menghasilkan sampel yang homogen. Tahapan pembuatan sebagai berikut:

5.4.1 Persiapan Material

Sebelum proses pencampuran dilakukan, seluruh material penyusun bata ringan CLC disiapkan terlebih dahulu sesuai dengan proporsi masing-masing variasi yang telah dihitung pada subbab 5.3. Material yang disiapkan meliputi semen, pasir dengan 75% fraksi 0,60-1,18 mm dan 25% fraksi 2,36-4,75 mm, serta cangkang kelapa sawit (CKS) ukuran 1-3 mm. Sesuai persentase variasi, air, *foam agent*, dan *Additive Foam Concrete* (ADF). Seluruh material ditimbang menggunakan timbangan digital untuk memastikan proporsi campuran sesuai dengan *mix design*

yang telah direncanakan. Dokumentasi persiapan material dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5. 4 Material Campuran Bata Ringan CLC

5.4.2 Proses Pencampuran

Proses pencampuran dilakukan menggunakan molen dengan urutan yang sistematis untuk memastikan homogenitas adonan. Pertama, pasir dimasukkan ke dalam molen terlebih dahulu, kemudian diikuti dengan semen. Setelah tercampur, air dimasukkan secara bertahap sebanyak 2 liter setiap tahapnya hingga seluruh kebutuhan air terpenuhi. Selanjutnya *Additive Foam Concrete* (ADF) ditambahkan ke dalam adonan basah tersebut dan diaduk hingga merata. Terakhir, *foam agent* dimasukkan ke dalam adonan dan seluruh campuran diaduk selama 3–5 menit hingga adonan terlihat homogen dan merata. Konsistensi adonan diamati secara visual sebelum dituang ke dalam cetakan untuk memastikan distribusi *foam* yang merata dalam matriks campuran. Dokumentasi proses pencampuran dapat dilihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Campuran Basah Bata Ringan CLC

5.4.3 Penuangan dan pencetakan

Setelah adonan homogen, campuran segera dituang ke dalam cetakan berukuran 60 x 20 x 10 cm yang telah diolesi oli sebagai pelumas agar benda uji mudah dilepas setelah mengeras. Penuangan dilakukan secara perlahan dan merata untuk menghindari terjadinya segregasi maupun hilangnya gelembung *foam* dalam adonan. Cetakan yang telah terisi kemudian didiamkan selama 24 jam hingga benda uji cukup mengeras dan dapat dilepas dari cetakan. Dokumentasi proses penuangan dan hasil cetakan dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5. 6 Pencetakan Bata Riangan CLC

5.4.4 Perawatan (*curing*)

Setelah benda uji dilepas dari cetakan, dilakukan proses perawatan atau *curing* selama 28 hari. Proses *curing* dilakukan dengan menyimpan benda uji terhindar dari paparan panas langsung serta penyiraman secara berkala pagi, siang, sore.

Masa *curing* 28 hari dipilih berdasarkan standar umum pengujian beton yang mengacu pada SNI, dimana pada usia tersebut bata ringan dianggap telah mencapai kekuatan optimalnya dan siap untuk dilakukan pengujian densitas, penyerapan air, dan kuat tekan. Hasil bata ringan CLC dari masing-masing variasi setelah masa *curing* selesai dapat dilihat pada Gambar 5.7



Gambar 5. 7 Proses *Curing* Bata Ringan

5.4.5 Pemotongan Benda Uji

Setelah periode *curing* selama 28 hari selesai, tahap selanjutnya adalah pemotongan spesimen sebagai persiapan untuk masing-masing pengujian yang akan dilaksanakan. Dimensi pemotongan disesuaikan dengan jenis pengujian yang dilakukan, yaitu 20 x 20 x 10 cm untuk pengujian bobot isi dan penyerapan air, serta 10 x 10 x 10 cm untuk pengujian kuat tekan. Penentuan ukuran spesimen tersebut mengacu pada ketentuan yang ditetapkan dalam SNI 8640-2018. Proses pemotongan benda uji dapat dilihat pada Gambar 5.8 halaman selanjutnya.



Gambar 5. 8 Pemotongan benda Uji

5.5 Pengujian Bata Ringan

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kualitas fisik dan mekanis dari bata ringan yang diproduksi. Merujuk pada standar mutu dalam SNI 8640-2018, sampel di laboratorium akan diuji melalui tiga parameter utama, yaitu kuat tekan, bobot isi, dan kapasitas penyerapan airnya. Hasil pengujian ini nantinya dipakai untuk menilai performa bata ringan dari setiap variasi campuran.

5.5.1 Pengujian Bobot isi

Bobot isi merupakan salah satu parameter fisik utama yang digunakan untuk mengevaluasi bata ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Bobot isi menggambarkan seberapa besar massa yang terkandung dalam setiap satuan volume material, yang diperoleh melalui persamaan rasio berat terhadap volume benda uji. Proses pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.9 di bawah.



Gambar 5. 9 Proses Pengujian Bobot Isi

1. Data hasil Pengujian Laboratorium

   Pengujian bobot isi dilakukan menggunakan 4 buah bata utuh untuk setiap variasi perlakukan CKS, dimana dari masing-masing bata dipotong menjadi 2 bagian sampel sehingga diperoleh data sampel pervariasi. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang telah dilakukan, diperoleh nilai bobot isi bata ringan. Rekapan nilai hasil pengujian bobot isi tersebut selengkapnya disajikan pada Tabel 5.12 berikut.

Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Bobot isi

Variasi	Sampel	Bobot isi Normal kg/m^3	Bobot isi Kering Oven kg/m^3	Bobot isi Jenuh Air kg/m^3
0%	1	891,75	841,00	1040,50
	2	871,83	823,05	1018,69
	3	880,05	832,51	1033,74
	4	891,72	841,21	1044,99
	5	877,61	834,72	1037,89
	6	878,66	836,54	1036,56
	7	884,58	832,59	1036,59
	8	897,25	843,50	1051,25
2%	1	885,12	835,36	1046,32
	2	839,96	792,60	996,97
	3	889,72	841,21	1056,85
	4	859,78	812,95	1018,98
	5	882,00	829,75	1045,25
	6	897,70	841,58	1063,52
	7	890,00	845,00	1050,75
	8	907,69	852,56	1071,28
4%	1	860,21	812,18	1032,01
	2	862,62	810,40	1032,92
	3	882,32	828,54	1054,29
	4	878,93	823,86	1049,24
	5	845,77	792,36	1007,22
	6	864,03	807,59	1024,46
	7	866,83	814,11	1028,96
	8	862,17	809,72	1026,62
6%	1	856,22	807,46	1052,99
	2	832,32	773,99	1025,00

Lanjutan Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Bobot isi

Variasi	Sampel	Bobot isi Normal kg/m^3	Bobot isi Kering Oven kg/m^3	Bobot isi Jenuh Air kg/m^3
6%	3	878,12	818,89	1069,12
	4	849,26	797,29	1030,54
	5	862,11	802,15	1035,28
	6	835,70	783,99	1019,75
	7	861,66	809,96	1048,13
	8	870,22	808,08	1052,19
8%	1	798,43	736,53	989,55
	2	843,11	779,34	1037,24
	3	815,96	753,77	1012,99
	4	808,10	747,43	1001,26
	5	876,67	811,92	1079,46
	6	873,50	810,01	1097,71
	7	869,45	807,25	1089,11
	8	840,75	781,55	1044,19

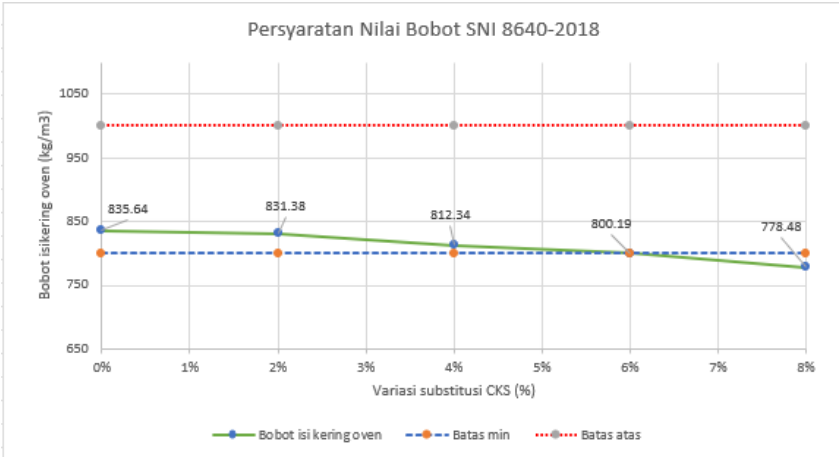
Data hasil pengujian Tabel 5.12 tersebut selanjutnya diolah untuk melihat pola perubahan bobot isi kering oven antar variasi substitusi CKS, serta dilihat apakah bobot isi kering ini masih pada syarat SNI 8640-2018 sebagaimana diuraikan pada bagian berikut

2. Rangkuman dan Tren Antar Variasi

Tabel 5. 13 Rata–rata Bobot Isi Kering Oven per Variasi

Keterangan	Bobot isi Normal kg/m^3	Bobot isi Kering Oven kg/m^3	Bobot isi Jenuh Air kg/m^3
CKS-0	884,18	835,64	1037,53
CKS-2	881,50	831,38	1043,74
CKS-4	865,36	812,34	1031,96
CKS-6	855,70	800,19	1041,63
CKS-8	840,75	778,48	1043,94

.



Gambar 5. 10 Tren Bobot Isi Kering Oven Bata Ringan

Berdasarkan gambar 5.10, bobot isi kering oven mengalami penurunan secara konsisten seiring meningkatnya persentase substitusi CKS, yaitu dari 835,64 kg/m^3 pada variasi 0% menjadi 778,48 kg/m^3 pada variasi 8% dan terlihat pada variasi 8% melebihi batas pada nilai SNI . Tren penurunan ini bersifat monoton pada seluruh variasi tanpa titik balik. Pola penurunan yang terlihat secara deskriptif tersebut selanjutnya perlu dibuktikan signifikansinya secara statistik, sehingga dilakukan serangkaian uji sebagaimana diuraikan pada bagian berikut.

3. Hasil Olah Data Statistik

   Untuk memastikan bahwa penurunan bobot isi antar variasi tersebut signifikan secara statistik, dilakukan uji normalitas Shapiro-wilk pada tiap kelompok data.

Tabel 5. 14 Hasil Uji Normalitas Shapiro-Wilk Bobot isi

Variasi	Statistik	df	Sig.	Keterangan
0%	0,964	4	0,803	Normal
2%	1,000	4	1,000	Normal
4%	0,949	4	0,710	Normal
6%	0,806	4	0,113	Normal
8%	0,902	4	0,439	Normal

Hasil uji menunjukkan bahwa seluruh kelompok data terdistribusi normal (Sig. > 0,05). Selanjutnya, dilakukan uji homogenitas varians menggunakan Levene's Test.

Tabel 5. 15 Hasil Uji Homogenitas lavene's Test

Statistik Levene	df1	df2	Sig.
8,607	4	15	<0,001

Hasil uji menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak homogen (Sig.<0,05). Oleh karena itu, uji beda rata-rata dilakukan menggunakan Welch's ANOVA, yang tidak mensyaratkan kesetaraan varians antar kelompok

Tabel 5. 16 Hasil Welch's ANOVA

Statistik Welch	df1	df2	Sig.
15,696	4	6,308	0,002

Hasil pengujian menunjukkan signifikansi sebesar 0,002 (<0,05), yang berarti terdapat perbedaan bobot isi yang signifikan di antara kelima variasi dan substitusi CKS. Untuk mengetahui pasangan variasi yang berbeda secara signifikan, dilakukan uji lanjut Games Howell.

Tabel 5. 17 Hasil Uji Lanjut Games Howell

Pasangan Variasi	Mean Difference	Sig.	Keterangan
0% – 2%	4,513	0,964	Tidak Signifikan
0% – 4%	23,545	0,077	Tidak Signifikan
0% – 6%	35,698	0,016	Signifikan
0% – 8%	57,415	0,105	Tidak Signifikan
2% – 4%	19,033	0,336	Tidak Signifikan
2% – 6%	31,185	0,074	Tidak Signifikan

Lanjutan Tabel 5. 17 Hasil Uji Lanjut Games Howell

Pasangan Variasi	Mean Difference	Sig.	Keterangan
2% – 8%	52,903	0,116	Tidak Signifikan
4% – 6%	12,153	0,505	Tidak Signifikan
4% – 8%	33,870	0,341	Tidak Signifikan
6% – 8%	21,718	0,649	Tidak Signifikan

Hasil uji lanjut menunjukkan bahwa perbedaan signifikan hanya terjadi antara variasi 0% dan 6%. (Sig = 0,016), sementara pasangan variasi lainnya tidak menunjukan perbedaan yang signifikan secara statistik.

5.5.2 Pengujian Penyerapan Air

Penyerapan air adalah rasio antara jumlah air yang masuk ke dalam pori-pori material dengan berat keringnya, dinyatakan dalam persentase. Pengujian ini penting karena tingkat penyerapan air secara langsung mencerminkan kondisi porositas bata ringan yang sudah mengeras. Pada penelitian ini pengujian dihitung menggunakan persamaan 3.2–3.5 sebagaimana telah diuraikan pada Bab 3, dan hasilnya dievaluasi berdasarkan SNI 8640-2018 tentang spesifikasi bata ringan untuk pasangan dinding. Hasil pengujian penyerapan air pada masing-masing variasi disajikan pada Tabel 5.18 berikut.

1. Data Hasil Pengujian Laboratorium

   Pengujian penyerapan air dilakukan bersamaan dengan pengujian bobot isi untuk setiap variasi, nilai spesimen uji yang kemudian dirata-ratakan menjadi 1 nilai representatif per bata. Data Hasil pengujian disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 5. 18 Hasil Pengujian Penyerapan Air

Variasi	Sampel	Penyerapan Air %
0%	1	19,95%
	2	19,56%
	3	20,12%
	4	20,38%
	5	20,32%

Lanjutan Tabel 5. 18 Hasil Pengujian Penyerapan Air

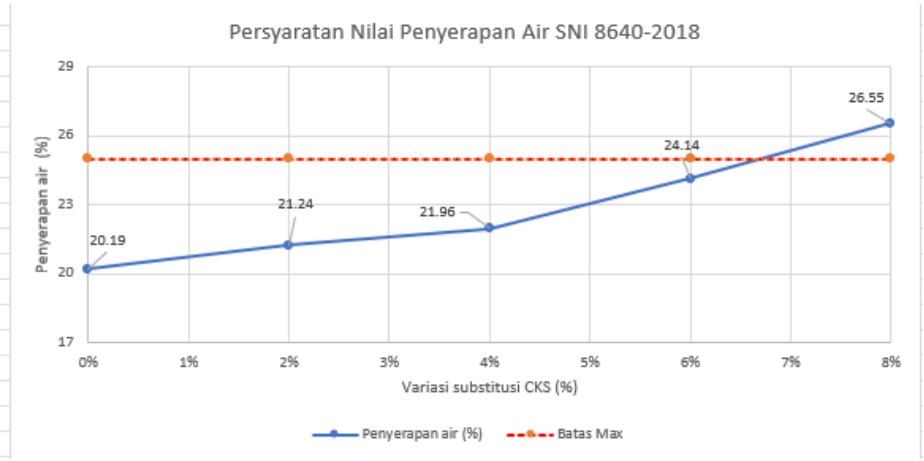
Variasi	Sampel	Penyerapan Air %
0%	6	20,00%
	7	20,40%
	8	20,78%
2%	1	21,10%
	2	20,44%
	3	21,56%
	4	20,60%
	5	21,55%
	6	22,19%
	7	20,58%
	8	21,87%
4%	1	21,98%
	2	22,25%
	3	22,58%
	4	22,54%
	5	21,49%
	6	21,69%
	7	21,49%
	8	21,69%
6%	1	24,55%
	2	25,10%
	3	25,02%
	4	23,33%
	5	23,31%
	6	23,58%
	7	23,84%
	8	24,41%
8%	1	25,30%
	2	25,79%
	3	25,92%
	4	25,38%
	5	26,75%
	6	28,77%
	7	28,19%
	8	26,26%

Data hasil pengujian Tabel 5.18 tersebut selanjutnya diolah untuk melihat pola perubahan penyerapan air antar variasi substitusi CKS, sebagaimana diuraikan pada bagian berikut.

2. Rangkuman dan Tren Antar Variasi Penyerapan Air

Tabel 5. 19 Rata-rata Penyerapan Air per Variasi

Variasi	Penyerapan Air, %
CKS-0	20,19%
CKS-2	21,24%
CKS-4	21,96%
CKS-6	24,14%
CKS-8	26,55%



Gambar 5. 11 Tren Penyerapan Air CLC

Berdasarkan gambar 5.11, penyerapan air mengalami peningkatan secara konsisten seiring meningkatnya substitusi CKS. Tren peningkatan ini bersifat monoton pada seluruh variasi tanpa titik balik. Pola peningkatan yang terlihat secara deskriptif tersebut selanjutnya perlu dibuktikan signifikansinya secara statistik, sehingga dilakukan serangkaian uji sebagaimana diuraikan pada bagian berikut.

3. Hasil Olah Data Statistik

Untuk memastikan bahwa penurunan penyerapan air antara variasi tersebut signifikan secara statistik, dilakukan uji normalitas Shapiro Wilk pada tiap kelompok data.

Tabel 5. 20 Hasil Uji Normalitas Shapiro Wilk Penyerapan Air

Variasi	Statistik	df	Sig.	Keterangan
0%	0,980	4	0,900	Normal
2%	0,918	4	0,528	Normal
4%	0,863	4	0,272	Normal
6%	0,970	4	0,843	Normal
8%	0,879	4	0,335	Normal

Hasil uji menunjukkan bahwa seluruh kelompok data terdistribusi normal (Sig. > 0,05). selanjutnya, dilakukan uji homogenitas varians menggunakan Levene's Test.

Tabel 5. 21 Hasil Uji Homogenitas Levene's Test Penyerapan Air

Statistik Levene	df1	df2	Sig.
4,456	4	15	0,014

Hasil uji menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak homogen (Sig. <0,05). oleh karena itu, uji beda rata-rata dilakukan menggunakan Welch's ANOVA, yang tidak mensyaratkan kesetaraan varians antar kelompok.

Tabel 5. 22 Hasil Welch's ANOVA Penyerapan Air

Statistik Welch	df1	df2	Sig.
44,860	4	7,322	<0,001

Hasil pengujian menunjukkan signifikansi sebesar <0,001, yang berarti terdapat perbedaan penyerapan air yang sangat signifikan di antara kelima variasi substitusi CKS. Untuk mengetahui pasangan variasi yang berbeda secara signifikan, dilakukan uji lanjut Games Howell.

Tabel 5. 23 Hasil Uji Lanjut Games Howell Penyerapan Air

Pasangan variasi	Mean Difference	Sig.	Keterangan
0% - 2%	-0,010	0,068	Tidak Signifikan
0% - 4%	-0,018	0,008	Signifikan
0% - 6%	-0,039	<0,001	Signifikan
0% - 8%	-0,063	0,004	Signifikan
2% - 4%	-0,007	0,303	Tidak Signifikan
2% - 6%	-0,029	0,002	Signifikan
2% - 8%	-0,053	0,005	Signifikan
4% - 6%	-0,022	0,008	Signifikan
4% - 8%	-0,046	0,008	Signifikan
6% - 8%	-0,024	0,069	Tidak Signifikan

Hasil uji lanjut menunjukkan bahwa perbedaan signifikan terjadi pada tujuh dari sepuluh pasangan variasi. Perbedaan yang tidak signifikan hanya ditemukan pada pasangan variasi yang berdekatan, yaitu 0% dengan 2%, 6% dengan 8% dan 6% dengan 8%. Pola ini menunjukkan bahwa kenaikan penyerapan air akibat substitusi CKS bersifat progresif dan konsisten, dengan perbedaan yang secara statistik bermakna mulai teramati pada rentang substitusi yang cukup jauh.

5.5.3 Pengujian Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan kemampuan bata ringan dalam menahan beban tekan maksimum yang diberikan hingga benda uji mengalami keruntuhan, dinyatakan dalam satuan MPa. Proses uji kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut.



Gambar 5. 12 Pengujian Kuat Tekan

1. Data Hasil Pengujian Laboratorium

Pengujian kuat tekan dilakukan pada 6 bata untuk setiap variasi, dengan masing-masing bata dipotong menjadi beberapa kubus uji berukuran 10x10x10 cm yang kemudian dirata-ratakan menjadi 1 nilai representative per bata.

Tabel 5. 24 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Variasi	Sampel	Hasil Kuat Tekan, MPa
0%	1	0,720
	2	0,764
	3	0,738
	4	0,701
	5	0,735
	6	0,737
2%	1	0,733
	2	0,717
	3	0,728
	4	0,681
	5	0,688
	6	0,632
4%	1	0,621
	2	0,626
	3	0,671
	4	0,675
	5	0,672
	6	0,668
6%	1	0,626
	2	0,671
	3	0,655
	4	0,603
	5	0,668
	6	0,609
8%	1	0,567
	2	0,594
	3	0,630

Lanjutan Tabel 5. 25 Hasil Pengujian Kuat Tekan

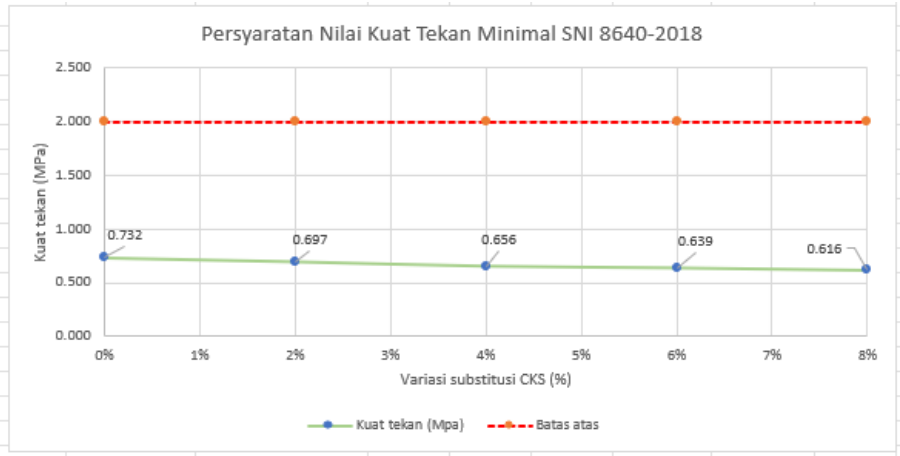
Variasi	Sampel	Hasil Kuat Tekan, MPa
8%	4	0,638
	5	0,628
	6	0,640

Data hasil pengujian Tabel 5.24 tersebut selanjutnya diolah untuk melihat pola perubahan kuat tekan antar variasi substitusi CKS, sebagaimana diuraikan pada bagian berikut.

2. Rangkuman dan Tren Antar Variasi

Tabel 5. 26 Rata-rata Kuat Tekan per Variasi

Variasi	Kuat Tekan, MPa
CKS-0	0,732
CKS-2	0,697
CKS-4	0,656
CKS-6	0,639
CKS-8	0,616



Gambar 5. 13 Tren Penyebaran Kuat Tekan CLC

Berdasarkan gambar 5.13, kuat tekan mengalami penurunan secara konsisten seiring meningkatnya persentase substitusi CKS, yaitu 0,732 MPa pada variasi 0% menjadi 0,616 MPa pada variasi 8%. Tren penurunan ini bersifat monoton pada seluruh variasi tanpa titik balik. Pola penurunan yang terlihat secara

deskriptif tersebut selanjutnya perlu dibuktikan signifikansinya secara statistik, sehingga dilakukan serangkaian uji sebagaimana pada bagian berikut.

3. Olah Data Statistik

Untuk memastikan bahwa penurunan kuat tekan antar variasi tersebut signifikan secara statistik, dilakukan uji normalitas Shapiro-Wilk pada tiap kelompok data.

Tabel 5. 27 Hasil Uji Normalitas Shapiro Wilk Kuat Tekan

Variasi	Statistik	df	Sig.	Keterangan
0%	0,973	6	0,913	Normal
2%	0,902	6	0,387	Normal
4%	0,738	6	0,015	Tidak Normal
6%	0,905	6	0,405	Normal
8%	0,881	6	0,276	Normal

Hasil uji menunjukkan bahwa terdapat satu kelompok data yang tidak terdistribusi normal, yaitu variasi 4% (Sig. = 0,015 < 0,05). Oleh karena itu, uji beda rata-rata tidak dapat menggunakan One-Way ANOVA, dan sebagai gantinya digunakan uji non parametrik Kruskal-Wallis, yang tidak mensyaratkan data berdistribusi normal.

Tabel 5. 28 Hasil Uji Kruskal Wallis Kuat Tekan

Variasi	N	Mean Rank
0%	6	26,00
2%	6	21,50
4%	6	13,58
6%	6	9,75
8%	6	6,67

Tabel 5. 29 Statistik Uji Kruskal Wallis Kuat Tekan

Kruskal Wallis H	df	Asymp. Sig.
20,221	4	<0,001

Hasil pengujian menunjukan nilai H sebesar 20,221 dengan signifikansi <0,001, yang berarti terdapat perbedaan kuat tekan yang signifikan di antara kelima variasi substitusi CKS. Nilai Mean Rank yang menurun secara konsisten dari variasi 0% hingga 8% turut mengonfirmasi pola tren monoton yang telah diuraikan sebelumnya. Untuk mengetahui pasangan variasi yang berbeda secara signifikan, dilakukan uji lanjut Dunn's Test dengan koreksi Bonferroni.

Tabel 5. 30 Hasil Uji Lanjut Dunn's Test Kuat Tekan

Pasangan variasi	Sig.	Adj. Sig. (bonferroni)	Keterangan
0% - 2%	0,376	1,000	Tidak Signifikan
0% - 4%	0,015	0,145	Tidak Signifikan
0% - 6%	0,001	0,014	Signifikan
0% - 8%	<0,001	0,001	Signifikan
2% - 4%	0,123	1,000	Tidak Signifikan
2% - 6%	0,020	0,207	Tidak Signifikan
2% - 8%	0,004	0,035	Signifikan
4% - 6%	0,431	1,000	Tidak Signifikan
4% - 8%	0,168	1,000	Tidak Signifikan
6% - 8%	0,555	1,000	Tidak Signifikan

Hasil uji lanjut menunjukan bahwa perbedaan signifikansi terjadi pada tiga pasangan variasi, yaitu 0% dengan 6%, 0% dengan 8%, dan 2% dengan 8%. Hal ini mengindikasikan bahwa penurunan kuat tekan baru menjadi signifikansi secara statistik mulai substitusi 6% ke atas dibandingkan kontrol, sementara pada substitusi 2% dan 4% penurunannya belum cukup besar untuk dianggap signifikan.

5.6 Pembahasan

Berdasarkan hasil olah data pada subbab 5.5, dapat dirangkum perbandingan tren dan hasil uji statistik ketiga parameter pada halaman selanjutnya.

Tabel 5. 31 Ringkasan hasil Uji Seluruh Parameter

Parameter	Tren	Normalitas	Homogenitas	Uji Beda	Uji Lanjut
Bobot isi Kering Oven	Monoton turun (835,64 sampai 778,48 kg/m^3)	Normal (seluruh variasi)	Tidak homogen (Sig =<0,001)	Welch's ANOVA (Sig =0,002)	Games Howell: 1/10 signifikan
Penyerapan Air	Monoton naik (20,19% -> 26,55%)	Normal (seluruh variasi)	Tidak homogen (Sig.=0,014)	Welch's ANOVA (Sig.<0,001)	Games Howell: 7/10 signifikan
Kuat Tekan	Monoton turun (0,732 -> 0,616 MPa)	CKS-4 tidak normal	-	Kruskal-Wallis (Sig.<0,001)	Dunn's Test: 3/10 signifikan

Ketiga parameter menunjukkan tren yang konsisten dan searah secara nilai mekanik, meskipun kekuatan signifikansi statistik antar variasi berbeda-beda pada tiap parameter. Penyerapan air menunjukkan perbedaan pada paling banyak pasangan variasi, sedangkan bobot isi menunjukkan perbedaan pada paling sedikit pasangan variasi.

5.6.1 Mekanisme Pengaruh Substitusi CKS

Penurunan bobot isi, peningkatan penyerapan air, dan penurunan kuat tekan yang terjadi secara bersamaan pada setiap peningkatan kadar substitusi CKS tidak dapat dipandang sebagai tiga fenomena yang berdiri sendiri, melainkan merupakan satu mekanisme yang sama, yaitu akumulasi porositas dalam matriks bata ringan.

Penurunan bobot isi terjadi karena cangkang kelapa sawit memiliki berat jenis lebih rendah dibandingkan pasir sebagai agregat halus konvensional, sehingga semakin besar proporsi substitusinya, semakin kecil massa yang mengisi setiap satuan volume benda uji. Selain itu, permukaan CKS yang kasar dan berpori turut menciptakan rongga tambahan di dalam matriks. Danso dan Appiah Agyei (2021), melalui analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) membuktikan bahwa CKS mampu berikatan dengan baik pada matriks semen akibat tekstur permukaannya yang kasar. Meskipun penelitian tersebut menggunakan CKS sebagai agregat kasar,

temuan ini tetap relevan karena kemampuan ikatan merupakan sifat intrinsik material, bukan bergantung pada fungsinya dalam campuran.

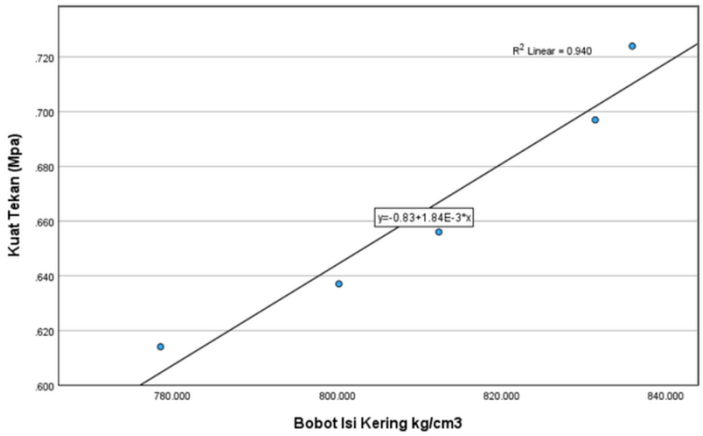
Pada bata ringan CLC, kondisi ini menjadi lebih kompleks karena terdapat dua sumber pori yang bekerja secara simultan, yaitu pori alami dari permukaan CKS dan pori dari gelembung udara foam agent. Karena distribusi gelembung udara tidak dapat dikendalikan sepenuhnya, pertemuan antara kedua sumber pori tersebut dapat menghasilkan akumulasi rongga yang tidak terisi matriks secara sempurna, sehingga massa kering per satuan volume material semakin berkurang seiring meningkatnya kadar substitusi CKS.

Rongga-rongga yang terbentuk dari akumulasi kedua sumber pori tersebut juga menjadi jalur masuknya air ke dalam bata ketika berada dalam kondisi basah. Semakin besar kadar CKS yang disubstitusikan, semakin banyak rongga yang terbentuk, sehingga semakin besar pula kemampuan bata menyerap air. Hal ini menjelaskan mengapa peningkatan penyerapan air terjadi secara konsisten dan bahkan menunjukkan perbedaan yang signifikan pada mayoritas pasangan variasi, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil uji Games-Howell pada sub subab 5.5.2.

Pada aspek kuat tekan, pori berfungsi sebagai titik lemah struktural. Semakin banyak dan semakin besar rongga udara di dalam matriks, semakin kecil luas bidang padat yang menahan beban tekan, sehingga kuat tekan menurun. Bertambahnya kadar CKS menghasilkan lebih banyak rongga di dalam matriks akibat akumulasi pori dari permukaan CKS dan gelembung udara foam agent, sehingga kontinuitas matriks yang menahan beban semakin berkurang dan kemampuan bata menahan tekanan pun menurun.

5.6.2 Hubungan Antar Parameter

Untuk memperkuat argumen mekanistik di atas, dilakukan analisis regresi linear antara bobot isi kering oven dan kuat tekan pada kelima variasi (n=5, data rata-rata per variasi) dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5. 14 Grafik Regresi Linear Bobot Isi dan Kuat Tekan (SPSS)

Hasil analisis menunjukkan hubungan linear positif yang kuat dengan koefisien determinasi $R^2 = 0{,}940$, yang berarti 94% variasi kuat tekan dapat dijelaskan oleh variasi bobot isi. Hasil ini secara kuantitatif mengonfirmasi bahwa densitas material menjadi variabel perantara utama yang menghubungkan substitusi CKS dengan penurunan kuat tekan bata ringan CLC. Hal ini juga terkonfirmasi dari data penyerapan air, di mana variasi dengan porositas tertinggi (8%) sekaligus mencatat kuat tekan terendah, sementara variasi kontrol dengan porositas terendah menghasilkan kuat tekan tertinggi.

Mengingat jumlah data yang digunakan pada analisis regresi ini tergolong kecil (n=5), hasil tersebut bersifat deskriptif untuk mendukung argumen mekanistik dan tidak dimaksudkan sebagai pengujian hipotesis inferensial yang berdiri sendiri.

5.6.3 Evaluasi terhadap SNI 8640-2018

Berdasarkan SNI 8640-2018, bobot isi kering bata ringan disyaratkan berada pada rentang 800-1000 kg/m³. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa variasi 0% hingga 6% (835,64-800,19 kg/m³) masih berada dalam rentang tersebut, sedangkan variasi 8% (778,48 kg/m³) berada di bawah batas minimum yang disyaratkan.

Pada parameter penyerapan air, SNI 8640-2018 tidak menetapkan nilai tersebut sebagai batas lulus atau tidak lulus, melainkan sebagai acuan klasifikasi penggunaan bata ringan. Bata dengan penyerapan air ≤ 25% dapat dipasang pada elemen *outdoor* maupun *indoor*, sedangkan yang melebihi angka tersebut hanya

dianjurkan untuk elemen *indoor*. Variasi 0% hingga 6% (20,19% - 24,14%) seluruhnya berada di bawah batas 25%, sehingga memenuhi klasifikasi untuk kedua jenis aplikasi. Variasi 8% (26,55%) melewati batas tersebut dan hanya layak untuk penggunaan *indoor*.

Pada parameter kuat tekan, seluruh variasi yang diteliti (0,732 MPa pada variasi 0% hingga 0,616 MPa pada variasi 8%) berada di bawah batas minimum kuat tekan kelas terendah yang disyaratkan SNI 8640-2018 (Kelas IIB, 2 MPa), sehingga belum dapat diklasifikasikan ke dalam kategori manapun. Konsistensi antara ketiga parameter ini di mana variasi 8% secara serentak menjadi satu-satunya variasi yang gagal memenuhi syarat bobot isi dan klasifikasi struktural pada penyerapan air memberikan dasar yang kuat bahwa peningkatan porositas akibat substitusi CKS pada kadar tinggi berdampak nyata terhadap kelayakan bata ringan sebagai material konstruksi.

5.6.4 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Dibandingkan dengan penelitian Rahmanto dan Jafar (2023), yang menggunakan variasi CKS serupa (4%-10%) pada bobot isi rencana 700 kg/m³, penelitian ini menghasilkan tren penurunan kuat tekan yang konsisten meskipun pada target densitas yang berbeda (900 kg/m³). Rahmanto dan Jafar (2023), juga melaporkan bahwa seluruh variasi CKS yang dikombinasikan dengan silica fume 10% belum mencapai persyaratan minimum SNI untuk kuat tekan, yang menguatkan temuan dalam penelitian ini bahwa substitusi CKS cenderung menurunkan kuat tekan bata ringan CLC.

Hal yang perlu dicermati lebih lanjut adalah bahwa nilai kuat tekan variasi kontrol (0% CKS) pun hanya mencapai 0,732 MPa, yang berada jauh dibawah persyaratan minimum kelas terendah SNI 8640-2018. Hal ini mengindikasikan bahwa rendahnya kuat tekan bukan semata-mata disebabkan oleh substitusi CKS, melainkan juga terdapat faktor pada desain campuran dasar yang perlu dievaluasi.

Terdapat dua faktor utama yang diduga berkontribusi terhadap rendahnya kuat tekan pada seluruh variasi. Pertama, kompatibilitas antara dosis foaming agent dan rasio air-semen yang ditetapkan. Falliano dkk., (2018,) melaporkan bahwa kuat tekan beton busa sangat dipengaruhi oleh kesesuaian antara rasio air-semen dan

jenis foaming agent yang digunakan. Pada penelitian ini, dosis foaming agent diperoleh melalui uji coba pencapaian densitas tanpa verifikasi kompatibilitasnya secara formal, sehingga diduga turut menghambat dispersi partikel semen secara merata. Kedua, metode *curing* kering udara tanpa pengendalian kelembaban ruangan. Falliano dkk., (2018), menemukan bahwa *curing* kering udara secara konsisten menghasilkan kuat tekan terendah dibandingkan metode *curing* lainnya. Pada penelitian ini, *curing* dilakukan secara kering udara pada kondisi iklim tropis dengan fluktuasi suhu yang lebih ekstrem, yang diduga menyebabkan air dalam matriks menguap sebelum reaksi hidrasi semen berlangsung sempurna.

Meskipun seluruh variasi belum memenuhi persyaratan kuat tekan SNI 8640-2018, pola penurunan yang konsisten terhadap peningkatan kadar CKS tetap memberikan informasi yang bermakna secara statistik mengenai arah pengaruh substitusi terhadap performa mekanik bata ringan CLC. Penelitian lanjutan disarankan melakukan verifikasi kompatibilitas dosis foaming agent terhadap rasio air-semen serta menerapkan metode *curing* yang lebih terkontrol guna memperoleh kuat tekan yang memenuhi persyaratan SNI 8640-2018.

5.6.5 Penentuan Persentase Substitusi CKS Optimal

Perlu ditegaskan bahwa hasil analisis statistik pada subbab 5.5 menunjukkan pola tren yang bersifat monoton pada ketiga parameter (bobot isi, penyerapan air, dan kuat tekan), tanpa ditemukan adanya titik balik atau nilai optimum di tengah rentang variasi yang diteliti. Oleh karena itu, penentuan persentase substitusi CKS optimal dalam penelitian ini tidak didasarkan pada pencarian titik puncak kinerja, melainkan didefinisikan sebagai persentase substitusi CKS tertinggi yang masih menghasilkan bata ringan CLC dengan sifat fisik memenuhi persyaratan SNI 8640-2018.

Tabel 5. 32 kesesuaian Setiap Variasi terhadap Persyaratan SNI 8640-2018

Variasi	Bobot Isi	Penyerapan Air	Kuat Tekan
0%	Memenuhi (835,64)	*outdoor* & *indoor* (20,19%)	Tidak Memenuhi (0,732)
2%	Memenuhi (831,38)	*outdoor* & *indoor* (21,24%)	Tidak Memenuhi (0,697)
4%	Memenuhi (812,34)	*outdoor* & *indoor* (21,96%)	Tidak Memenuhi (0,656)
6%	Memenuhi (800,19)	*outdoor* & *indoor* (24,14%)	Tidak Memenuhi (0,639)
8%	Tidak Memenuhi (778,48)	*indoor* (26,55%)	Tidak Memenuhi (0,616)

Berdasarkan Tabel 5.31, variasi 0% hingga 6% memenuhi persyaratan bobot isi dan klasifikasi penyerapan air untuk penggunaan *outdoor* maupun *indoor*, sedangkan variasi 8% tidak memenuhi persyaratan bobot isi dan hanya layak digunakan pada elemen *indoor*. Dengan demikian, variasi 6% merupakan persentase substitusi CKS tertinggi yang masih memenuhi kedua persyaratan tersebut secara bersamaan, sehingga dapat ditetapkan sebagai persentase substitusi optimal berdasarkan parameter bobot isi dan penyerapan air.

Parameter kuat tekan tidak dapat dijadikan dasar penentuan persentase optimal, karena seluruh variasi termasuk variasi kontrol (0% CKS) belum memenuhi persyaratan minimum SNI 8640-2018. Sebagaimana diuraikan pada subbab 5.2.4, kondisi ini diduga lebih dipengaruhi oleh faktor desain campuran dasar (kompatibilitas dosis foaming agent dan metode *curing*) dibandingkan oleh pengaruh substitusi CKS itu sendiri. Meskipun demikian, hasil uji lanjut Dunn's Test pada sub-bab 5.1.3 menunjukkan bahwa penurunan kuat tekan pada variasi 6% belum berbeda signifikan dibandingkan variasi 2% dan 4% (Sig. > 0,05), sehingga peningkatan substitusi hingga 6% tidak memberikan penurunan kuat tekan yang secara statistik lebih buruk dibandingkan variasi substitusi rendah lainnya.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, dapat disimpulkan bahwa variasi substitusi CKS sebesar 6% merupakan persentase substitusi optimal dalam penelitian ini, yaitu persentase substitusi tertinggi yang masih menghasilkan bata ringan CLC

dengan bobot isi dan penyerapan air yang memenuhi persyaratan SNI 8640-2018 untuk aplikasi *outdoor* maupun *outdoor*, tanpa disertai penurunan kuat tekan yang signifikan dibandingkan variasi substitusi yang lebih rendah.

BAB VI
KESIMPULAN & SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari keseluruhan penelitian yang telah dilakukan, dimulai dari tahap pengujian material agregat hingga pelaksanaan pengujian bata ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dengan substitusi parsial agregat halus menggunakan cangkang kelapa sawit (CKS), dapat ditarik beberapa Kesimpulan sebagai berikut.

1. Substitusi parsial agregat halus dengan cangkang kelapa sawit (CKS) berpengaruh terhadap penurunan bobot isi bata ringan CLC, seiring meningkatnya persentase substitusi. Nilai obot isi kering oven tertinggi diperoleh pada variasi kontrol 0% sebesar 835,64 kg/m^3, sedangkan nilai terendah terdapat pada variasi 8% sebesar 778,48 kg/m^3. Penurunan ini disebabkan oleh berat jenis CKS yang lebih rendah dibandingkan pasir alam serta akumulasi rongga yang terbentuk akibat pertemuan antara pori alami permukaan CKS dan gelembung udara foam agent. Berdasarkan SNI 8640-2018, variasi 0%, 2%, 4%, dan 6% masih memenuhi persyaratan bobot isi kering oven pada rentang 800–1.000 kg/m^3, sedangkan variasi 8% dengan nilai 778,48 kg/m^3 dinyatakan tidak memenuhi persyaratan tersebut.
2. Sifat dasar CKS yang memiliki struktur berpori dan daya serap air lebih tinggi dibandingkan pasir alam mengakibatkan nilai penyerapan air bata ringan CLC meningkat seiring bertambahnya proporsi substitusi. Nilai penyerapan air terendah diperoleh pada variasi kontrol 0% sebesar 20,19%, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada variasi 8% sebesar 26,55%. Berdasarkan SNI 8640-2018, variasi 0%, 2%, 4%, dan 6% dengan rentang nilai 20,19%–24,14% memenuhi klasifikasi penggunaan *outdoor* maupun *indoor* dengan batas penyerapan air maksimum 25%, sedangkan variasi 8% dengan nilai 26,55% hanya memenuhi klasifikasi untuk penggunaan *indoor*.
3. Persentase substitusi. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi kontrol 0% sebesar 0,732 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada variasi 8%

sebesar 0,616 MPa, atau mengalami penurunan sebesar 15,85% dari nilai kontrol. Berdasarkan evaluasi terhadap SNI 8640-2018, seluruh variasi yang diteliti belum memenuhi persyaratan kuat tekan minimum kelas terendah yaitu Kelas IIB sebesar 2 MPa. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh ketidaksesuaian kompatibilitas dosis foaming agent terhadap rasio air-semen sebesar 0,50 yang ditetapkan, serta metode *curing* yang kurang terkendali pada kondisi iklim tropis yang menyebabkan reaksi hidrasi semen tidak berlangsung secara optimal.

6.2 Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian keberlanjutan, yang merupakan hasil dari pembahasan dan pada saat proses pembuatan. Saran dapat dilihat sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan verifikasi kompatibilitas dosis foaming agent terhadap rasio air-semen menggunakan ASTM 869 agar diperoleh dispersi partikel semen yang lebih merata dan kuat tekan yang lebih optimal sesuai persyaratan SNI 8640-2018.
2. Metode *curing* sebaiknya dilakukan dengan pembungkus kedap udara atau perendaman air disertai pengendalian suhu ruangan guna memastikan reaksi hidrasi semen berlangsung secara sempurna, sehingga mengingat metode *curing* udara pada iklim tropis diduga turut berkontribusi terhadap rendahnya kuat tekan yang diperoleh.
3. Penelitian lanjutan juga disarankan mempertimbangkan peningkatan target densitas rencana dari 900 kg/ m^3 ke 1.000–1.100 kg/ m^3 sebagai Upaya meningkatkan kuat tekan tanpa mengubah proporsi CKS, guna mengidentifikasi kombinasi yang dapat memenuhi standar SNI.

DAFTAR PUSTAKA

Ahadi, G. D., & Zain, N. N. L. E. (2023). The Simulation Study of Normality Test Using Kolmogorov-Smirnov ,. *Eigen Mathematics Jurnal*, *6*(1), 12–19.

Anggoro, R. S., Bimantio, M. P., & Adisetya, E. (2023). *Pemanfaatan Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Campuran pada Pembuatan Paving Block*. *1*(September), 1984–1991.

Badan Standardisasi Nasional. (1990). *Metode pengujian analisis saringan agregat halus dan kasar* (SNI 03-1968-1990).

Badan Standardisasi Nasional. (1996). *Metode pengujian jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan nomor 200 (0,075 mm)* (SNI 03-4142-1996).

Badan Standardisasi Nasional. (1998). *Metode pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat* (SNI 03-4804-1998).

Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Spesifikasi agregat halus untuk pekerjaan adukan dan plesteran dengan bahan dasar semen* (SNI 03-6820-2002).

Badan Standardisasi Nasional. (2008). *Cara uji berat isi beton ringan struktural* (SNI 3402:2008).

Badan Standardisasi Nasional. (2013). *Spesifikasi air pencampur yang digunakan dalam produksi beton semen hidraulis* (SNI 7974:2013).

Badan Standardisasi Nasional. (2015). *Semen Portland* (SNI 2049:2015).

Badan Standardisasi Nasional. (1990). *Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus* (SNI 03-1970-1990).

Badan Standardisasi Nasional. (2018). *Spesifikasi bata ringan untuk pasangan dinding* (SNI 8640:2018).

Danso, H., & Appiah-Agyei, F. (2021). Size Variation of Palm Kernel Shells as Replacement of Coarse Aggregate for Lightweight Concrete Production. *Open Journal of Civil Engineering*, *11*(01), 153–165. https://doi.org/10.4236/ojce.2021.111010

Falliano, D., Domenico, D. De, 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

Golewski, G. L. (2022). The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites. *Sustainable Chemistry*, *3*(4), 520–534. https://doi.org/10.3390/suschem3040032

Hariawan, J. B. (2017). PENGARUH PERBEDAAN KARAKTERISTIK TYPE SEMEN ORDINARY PORTLAND CEMENT (OPC) dan PORTLAND COMPOSITE CEMENT (PCC) TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR. *Accelerating the World's Research.*, 1–10.

Joly & Islam. (2024). *The Dhaka University Journal of Earth and Environmental Sciences, Vol. 13 (1): 2024 Mst. Asfat Ara Joly and M. Shahidul Islam*. 13*(September).

Kearsley, E. P., & Wainwright, P. J. (2001). *Porosity and permeability of foamed concrete*. *31*.

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis Author (Kruskal-Wallis Test). *Journal of the American Statistical Association*, *47*(260), 583–621.

Lee, S., & Lee, D. K. (2018). Multiple Comparison Test and Its Imitations What is the proper way to apply the multiple comparison test? KJA. *Korean J Anesthesiol*, *5*, 353–360. http://ekja.xn--orgpissn2005-6419eissn2005-7563https-iv8v//doi.org/10.4097/kja.d.18.00242

Oktarina, D., & Natalina. (2018). Untuk Bata Beton Ringan. *Jurnal Rekayasa Teknologi Dan Sains*, *2*, 8–12.

Oktarina, D., & Natalina. (2018). Untuk Bata Beton Ringan. *Jurnal Rekayasa Teknologi Dan Sains*, *2*, 8–12.

Pah, J. J. S., Hadjoh, E. K. P., & Sir, T. M. W. (2021). *HUBUNGAN ANTARA PENGGUNAAN AGREGAT BERBEDA UKURAN BUTIRAN DAN KERINGANAN BATA RINGAN CLC*. *10*(2), 113–124.

Pah, J. J. S., Tulle, P. M., Bella, R. A., & Sina, D. A. T. (2022). Hubungan Faktor Air-Semen dan Fakto Air-Foam terhadap Kuat Tekan dan Berat Volume Bara Ringan CLC. *Jurnal Teknik Sipil*, *11*(2), 119–132.

Prandika, N. E., Azzahra, S. E., Kristiawan, A., & S, P. A. P. (2025). *ANALISIS KUAT TEKAN BETON MUTU K 200 DENGAN BAHAN CAMPUR FOAMING AGENT, SUPERPLASTICIZER (SIKACIM), DAN FLY ASH Nofvim Eric Prandika, Synsya Ealiah Azzahra ,*. *6*(1).

Prasetya, T. D., & Setiawan, D. (2023). *PENGARUH pH AIR TERHADAP KUALITAS MUTU BETON*. 309–317.

Pratama, D. I. (2020). *Perbandingan Produktivitas Pekerjaan Pasangan Dinding Bata Ringan Dan Bata Merah (Comparison of Productivity Between Light Weight Brick Wall and Red Brick Wall Construction)*.

Quraisy, A., & Hasni, N. (2021). Analisis Kruskal-Wallis Terhadap Kemampuan Numerik Siswa. *VARIANSI: Journal of Statistics and Its Application on Teaching and Research*, *3*(3), 156–161. https://doi.org/10.35580/variansiunm29957

Rachman, D. N., Riwayati, S., Hidayat, A., & Nitami, T. (2022). *Penggunaan Foam Agent Pada Beton Untuk Pembuatan Beton Ringan*. *11*(01), 19–24.

Rahmanto, F. A., & Jafar. (2023). *PENGARUH PENGGUNAAN CANGKANG KELAPA SAWIT DAN SILICA FUME*. *28*(2), 36–48.

Ramadhani, N., & Syam, A. M. (2025). Efektivitas program Rabu Membaca Rabu Menulis (RAME–RAME) terhadap minat baca siswa–siswi UPT SMP Negeri 27 Medan tahun 2024–2025. *Jurnal Ilmu Perpustakaan (JIPER)*, *7*(2), 256–270.

Ramamurthy, K., Nambiar., E. K. K. and Indu Sivaranjani, G. (2009). *A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete*. *31*(6), 1–24.

Zhou, J., Dong, Y., Qiu, T., Lv, J., Guo, P., & Liu, X. (2025). The Microstructure and Modification of the Interfacial Transition Zone in Lightweight Aggregate Concrete: A Review. *Buildings*, *15*(15), 1–19. https://doi.org/10.3390/buildings15152784

LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar Alat yang Digunakan



Gambar L-1. 1 Timbangan dan Nampan



Gambar L-1. 2 Oven



Gambar L-1. 3 *Universal testing Machine*



Gambar L-1. 4 kompresor Angin



Gambar L-1. 5 Silinder beton



Gambar L-1. 6 *Mixer*



Gambar L-1. 7 Besi Penumbuk



Gambar L-1. 8 Tabung Busa



Gambar L-1. 9 Alat Pemotong

Lampiran 2 Pengujian Bobot isi dan Penyerapan

Variasi 0%									
Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4	5	6	7	8
Berat awal	gram	Ba	3567	3574	3573	3584	3581	3567	3573	3589
Berat Kering oven	gram	Bko	3364	3374	3380	3381	3406	3396	3363	3374
-Panjang	mm	p	200	199	203	197	200	199	198	200
-Lebar	mm	l	200	200	200	202	202	200	200	200
-Tebal	mm	t	100	103	100	101	101	102	102	100
Volume benda uji	mm^3	v	4000000	4099400	4060000	4019194	4080400	4059600	4039200	4000000
Berat jenuh air	gram	Bssd	4162	4176	4197	4200	4235	4208	4187	4205
Bobot isi nominal	kg/m^3	$BI = \frac{Ba}{V} x\ 10^6$	891.75	871.83	880.05	891.72	877.61	878.66	884.58	897.25
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	841.00	823.05	832.51	841.21	834.72	836.54	832.59	843.50
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	832.02		836.86		835.63		838.05	
Bobot isi jenuh air	kg/m^3	$Bia = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	1040.50	1018.69	1033.74	1044.99	1037.89	1036.56	1036.59	1051.25
Penyerapan air	% vol	$\frac{Bia - Bio}{V} x\ 100\%$	19.95%	19.56%	20.12%	20.38%	20.32%	20.00%	20.40%	20.78%
Penyerapan air	% vol	$\frac{Bia - Bio}{V} x\ 100\%$	0.198		0.203		0.202		0.206	
Rerata bobot isi normal			884.18							
Rerata bobot isi kering			835.64							
Rerata bobot isi jenuh			1037.53							
Rerata penyerapan air			20.19%							

Gambar L-2. 1 CKS-0

Variasi 2%										
Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4	5	6	7	8
Berat awal	gram	Ba	3558	3547	3540	3543	3528	3519	3560	3540
Berat Kering oven	gram	Bko	3358	3347	3347	3350	3319	3299	3350	3325
-Panjang	mm	p	200	207	203	204	200	196	200	195
-Lebar	mm	l	199	200	200	200	200	200	200	200
-Tebal	mm	t	101	102	98	101	100	100	100	100
Volume benda uji	mm^3	v	4019800	4222800	3978800	4120800	4000000	3920000	4000000	3900000
Berat jenuh air	gram	Bssd	4206	4210	4205	4199	4181	4169	4203	4178
Bobot isi nominal	kg/m^3	$BI - \frac{Ba}{V} x\ 10^6$	885.12	839.96	889.72	859.78	882.00	897.70	890.00	907.69
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo - \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	835.36	792.60	841.21	812.95	829.75	841.58	845.00	852.56
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	813.98		827.08		835.67		848.78	
Bobot isi jenuh air	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	1046.32	996.97	1056.85	1018.98	1045.25	1063.52	1050.75	1071.28
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	21.10%	20.44%	21.56%	20.60%	21.55%	22.19%	20.58%	21.87%
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	0.208		0.211		0.219		0.212	
Rerata bobot isi normal			881							
Rerata bobot isi kering			831							
Rerata bobot isi jenuh			1044							
Rerata penyerapan air			21.24%							

Gambar L-2. 2 CKS-2

Variasi 4%										
Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4	5	6	7	8
Berat awal	gram	Ba	3510	3485	3494	3463	3468	3490	3502	3518
Berat Kering oven	gram	Bko	3314	3274	3281	3246	3249	3262	3289	3304
-Panjang	mm	p	202	200	198	197	201	198	200	202
-Lebar	mm	l	200	200	200	200	200	200	200	200
-Tebal	mm	t	101	101	100	100	102	102	101	101
Volume benda uji	mm^3	v	4080400	4040000	3960000	3940000	4100400	4039200	4040000	4080400
Berat jenuh air	gram	Bssd	4211	4173	4175	4134	4130	4138	4157	4189
Bobot isi nominal	kg/m^3	$BI = \frac{Ba}{V} x\ 10^6$	860.21	862.62	882.32	878.93	845.77	864.03	866.83	862.17
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	812.18	810.40	828.54	823.86	792.36	807.59	814.11	809.72
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	811.29		826.20		799.97		811.92	
Bobot isi jenuh air	kg/m^3	$Bia = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	1032.01	1032.92	1054.29	1049.24	1007.22	1024.46	1028.96	1026.62
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	21.98%	22.25%	22.58%	22.54%	21.49%	21.69%	21.49%	21.69%
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	0.221		0.226		0.216		0.216	
Rerata bobot isi normal			865							
Rerata bobot isi kering			812							
Rerata bobot isi jenuh			1032							
Rerata penyerapan air			21.96%							

Gambar L-2. 3 CKS-4

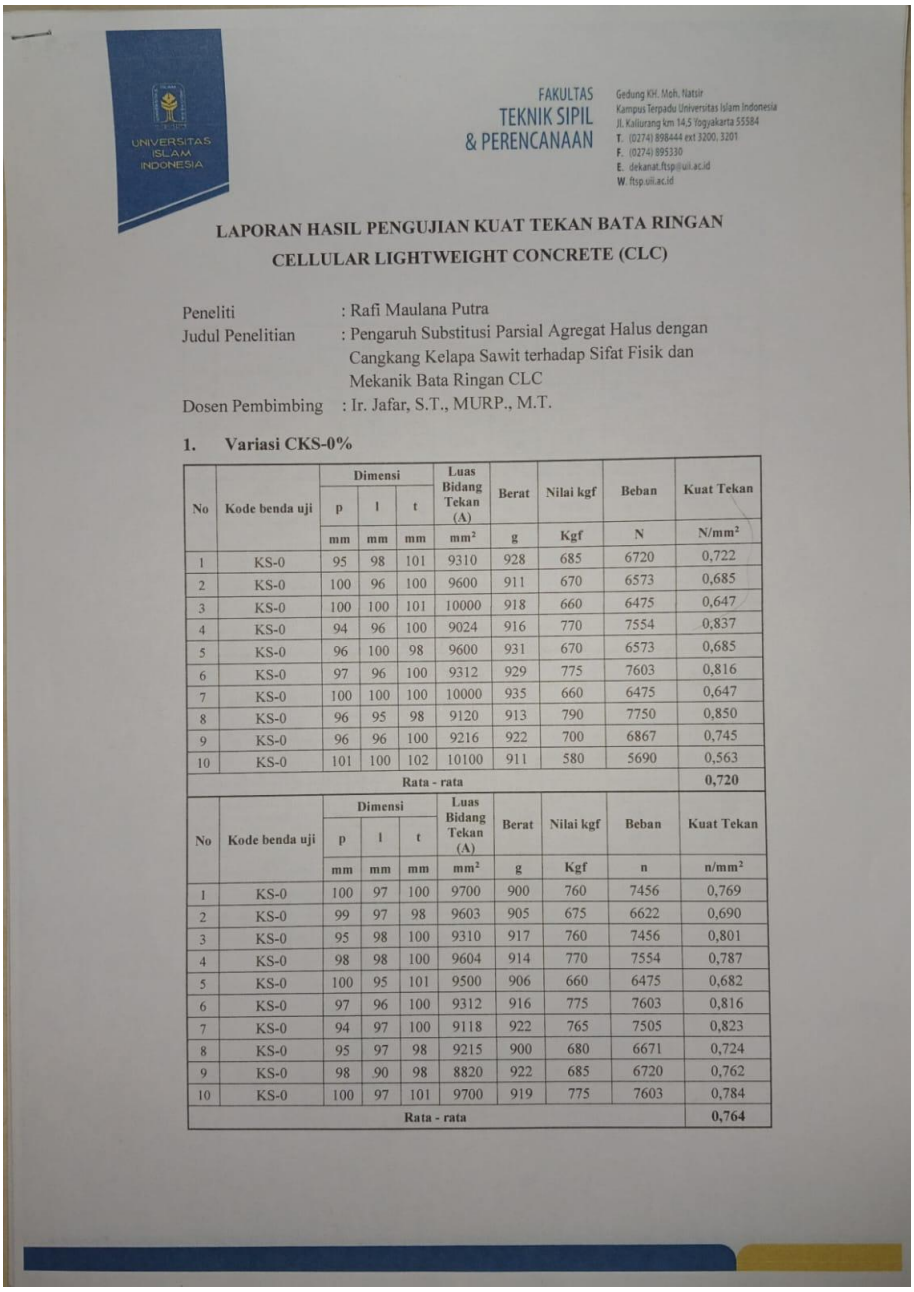
Variasi 6%										
Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4	5	6	7	8
Berat awal	gram	Ba	3442	3296	3425	3448	3465	3410	3498	3515
Berat Kering oven	gram	Bko	3246	3065	3194	3237	3224	3199	3287	3264
-Panjang	mm	p	200	200	199	203	197	200	199	198
-Lebar	mm	l	201	200	200	200	202	202	200	200
-Tebal	mm	t	100	99	98	100	101	101	102	102
Volume benda uji	mm^3	v	4020000	3960000	3900400	4060000	4019194	4080400	4059600	4039200
Berat jenuh air	kg/m^3	Bssd	4233	4059	4170	4184	4161	4161	4255	4250
Bobot isi nominal	kg/m^3	$BI = \frac{Ba}{V} x\ 10^6$	856.22	832.32	878.12	849.26	862.11	835.70	861.66	870.22
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	807.46	773.99	818.89	797.29	802.15	783.99	809.69	808.08
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	790.73		808.09		793.07		808.88	
Bobot isi jenuh air	kg/m^3	$Bia = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	1052.99	1025.00	1069.12	1030.54	1035.28	1019.75	1048.13	1052.19
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	24.55%	25.10%	25.02%	23.33%	23.31%	23.58%	23.84%	24.41%
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	0.248		0.242		0.234		0.241	
Rerata bobot isi normal			855.70							
Rerata bobot isi kering			800.19							
Rerata bobot isi jenuh			1041.63							
Rerata penyerapan air			24.14%							

Gambar L-2. 4 CKS-6

Variasi 8%										
Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4	5	6	7	8
Berat awal	g	Ba	3225	3305	3280	3330	3385	3440	3495	3550
Berat Kering oven	g	Bko	2975	3055	3030	3080	3135	3190	3245	3300
-Panjang	mm	p	198	196	199	204	197	203	199	203
-Lebar	mm	l	200	200	200	200	200	200	200	200
-Tebal	mm	t	102	100	101	101	98	97	101	104
Volume benda uji	g	v	4039200	3920000	4019800	4120800	3861200	3938200	4019800	4222400
Berat jenuh air	kg/m3	Bssd	3997	4066	4072	4126	4168	4323	4378	4409
Bobot isi nominal	kg/m^3	$BI = \frac{Ba}{V} x\ 10^6$	798.43	843.11	815.96	808.10	876.67	873.50	869.45	840.75
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	736.53	779.34	753.77	747.43	811.92	810.01	807.25	781.55
Bobot isi kering oven	kg/m^3	$BIo = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	757.93		750.60		810.97		794.40	
Bobot isi jenuh air	kg/m^3	$Bia = \frac{Bko}{V} x\ 10^6$	989.55	1037.24	1012.99	1001.26	1079.46	1097.71	1089.11	1044.19
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	25.30%	25.79%	25.92%	25.38%	26.75%	28.77%	28.19%	26.26%
Penyerapan air	% vol	$\frac{BIa - Bio}{V} x\ 100\%$	0.255		0.257		0.278		0.272	
Rerata bobot isi normal			840.75							
Rerata bobot isi kering			778.48							
Rerata bobot isi jenuh			1043.94							
Rerata penyerapan air			26.55%							

Gambar L-2. 5 CKS-8

Lampiran 3 Pengujian Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14.5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

LAPORAN HASIL PENGUJIAN KUAT TEKAN BATA RINGAN
CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE (CLC)

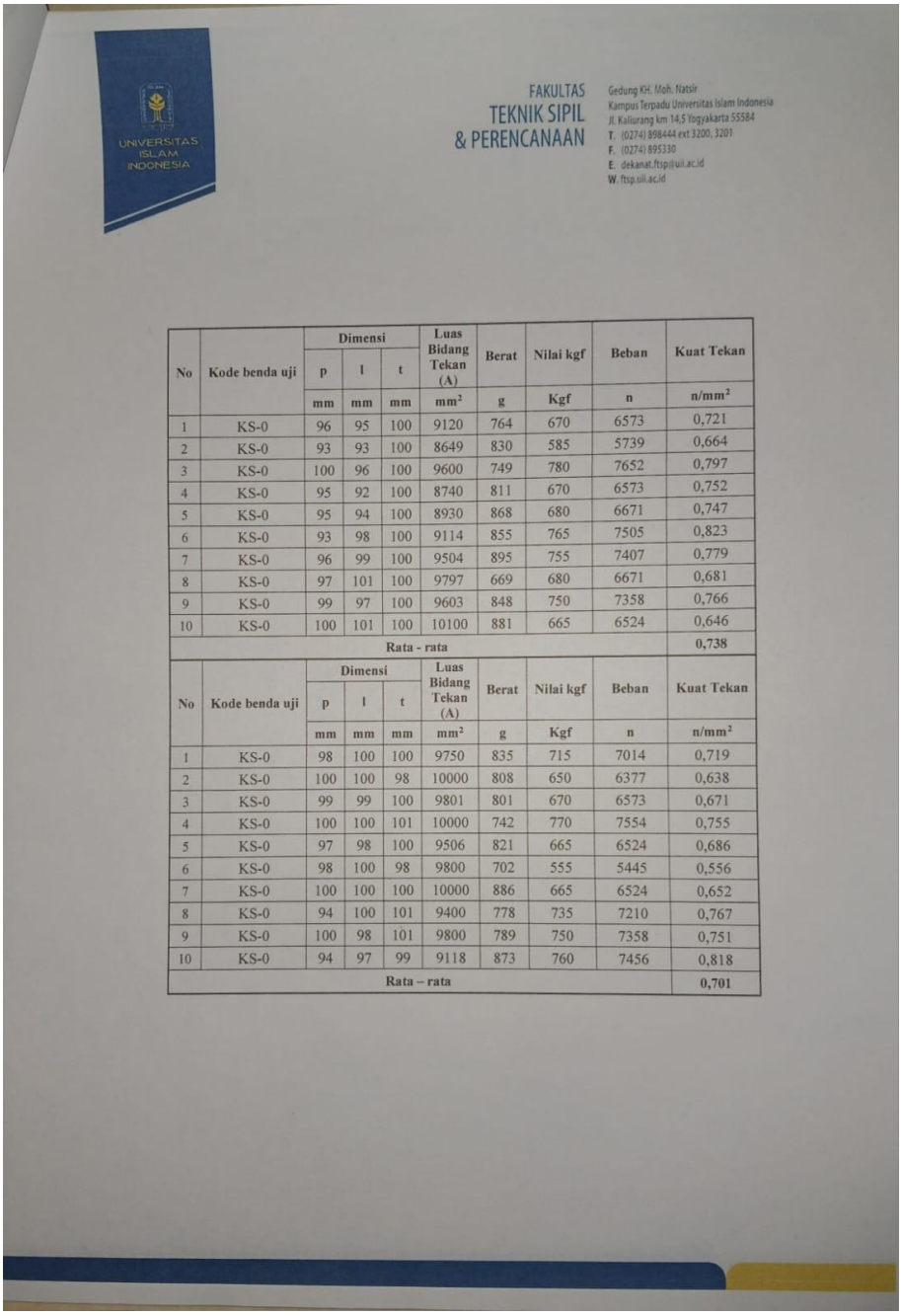
Peneliti : Rafi Maulana Putra
Judul Penelitian : Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Halus dengan Cangkang Kelapa Sawit terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Bata Ringan CLC
Dosen Pembimbing : Ir. Jafar, S.T., MURP., M.T.

1. Variasi CKS-0%

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-0	95	98	101	9310	928	685	6720	0,722
2	KS-0	100	96	100	9600	911	670	6573	0,685
3	KS-0	100	100	101	10000	918	660	6475	0,647
4	KS-0	94	96	100	9024	916	770	7554	0,837
5	KS-0	96	100	98	9600	931	670	6573	0,685
6	KS-0	97	96	100	9312	929	775	7603	0,816
7	KS-0	100	100	100	10000	935	660	6475	0,647
8	KS-0	96	95	98	9120	913	790	7750	0,850
9	KS-0	96	96	100	9216	922	700	6867	0,745
10	KS-0	101	100	102	10100	911	580	5690	0,563
Rata - rata									**0,720**

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	n	n/mm²
1	KS-0	100	97	100	9700	900	760	7456	0,769
2	KS-0	99	97	98	9603	905	675	6622	0,690
3	KS-0	95	98	100	9310	917	760	7456	0,801
4	KS-0	98	98	100	9604	914	770	7554	0,787
5	KS-0	100	95	101	9500	906	660	6475	0,682
6	KS-0	97	96	100	9312	916	775	7603	0,816
7	KS-0	94	97	100	9118	922	765	7505	0,823
8	KS-0	95	97	98	9215	900	680	6671	0,724
9	KS-0	98	90	98	8820	922	685	6720	0,762
10	KS-0	100	97	101	9700	919	775	7603	0,784
Rata - rata									**0,764**

Gambar L-3. 1 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

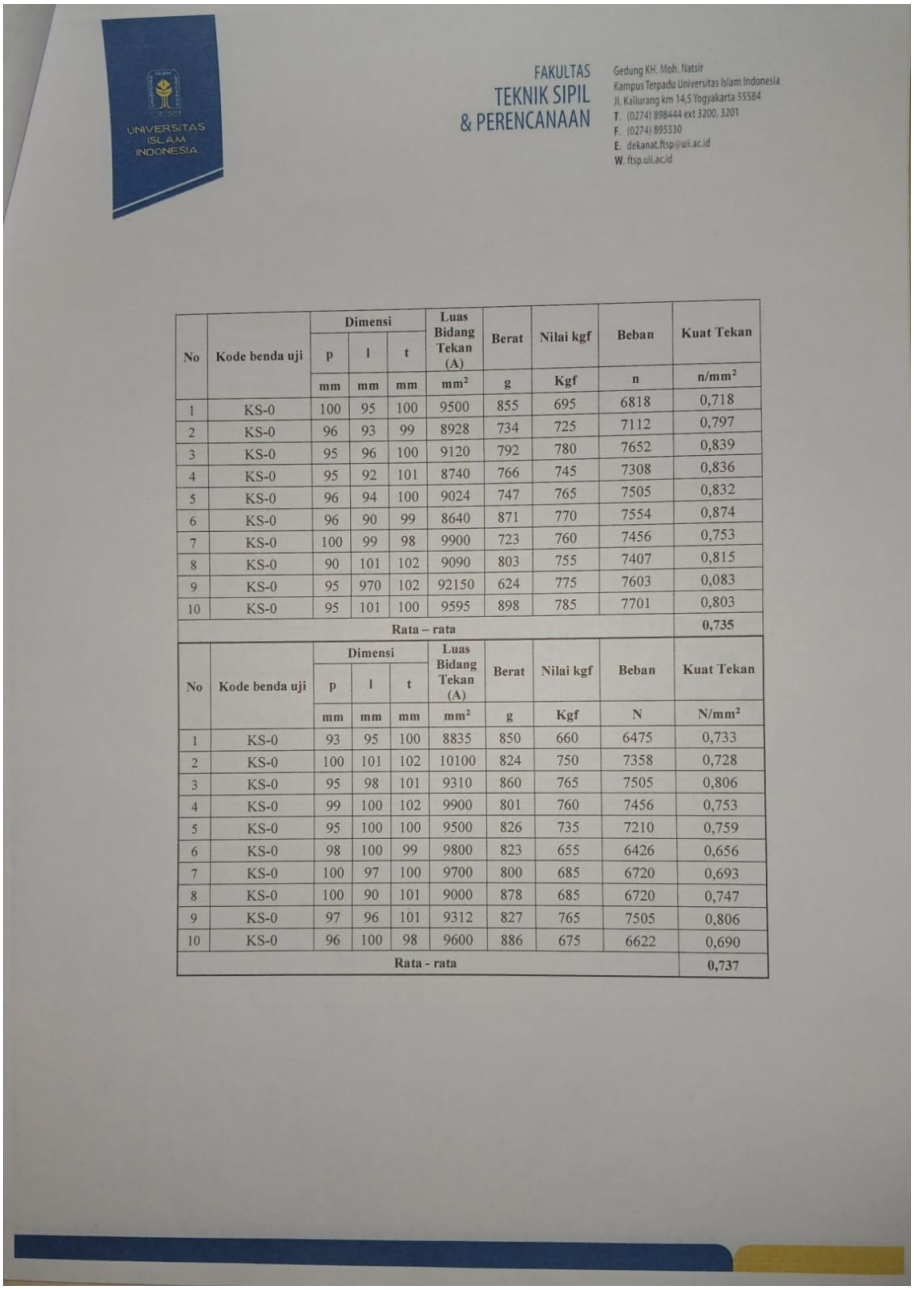
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	n	n/mm²
1	KS-0	96	95	100	9120	764	670	6573	0,721
2	KS-0	93	93	100	8649	830	585	5739	0,664
3	KS-0	100	96	100	9600	749	780	7652	0,797
4	KS-0	95	92	100	8740	811	670	6573	0,752
5	KS-0	95	94	100	8930	868	680	6671	0,747
6	KS-0	93	98	100	9114	855	765	7505	0,823
7	KS-0	96	99	100	9504	895	755	7407	0,779
8	KS-0	97	101	100	9797	669	680	6671	0,681
9	KS-0	99	97	100	9603	848	750	7358	0,766
10	KS-0	100	101	100	10100	881	665	6524	0,646
Rata - rata									0,738

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	n	n/mm²
1	KS-0	98	100	100	9750	835	715	7014	0,719
2	KS-0	100	100	98	10000	808	650	6377	0,638
3	KS-0	99	99	100	9801	801	670	6573	0,671
4	KS-0	100	100	101	10000	742	770	7554	0,755
5	KS-0	97	98	100	9506	821	665	6524	0,686
6	KS-0	98	100	98	9800	702	555	5445	0,556
7	KS-0	100	100	100	10000	886	665	6524	0,652
8	KS-0	94	100	101	9400	778	735	7210	0,767
9	KS-0	100	98	101	9800	789	750	7358	0,751
10	KS-0	94	97	99	9118	873	760	7456	0,818
Rata – rata									0,701

Gambar L-3. 2 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

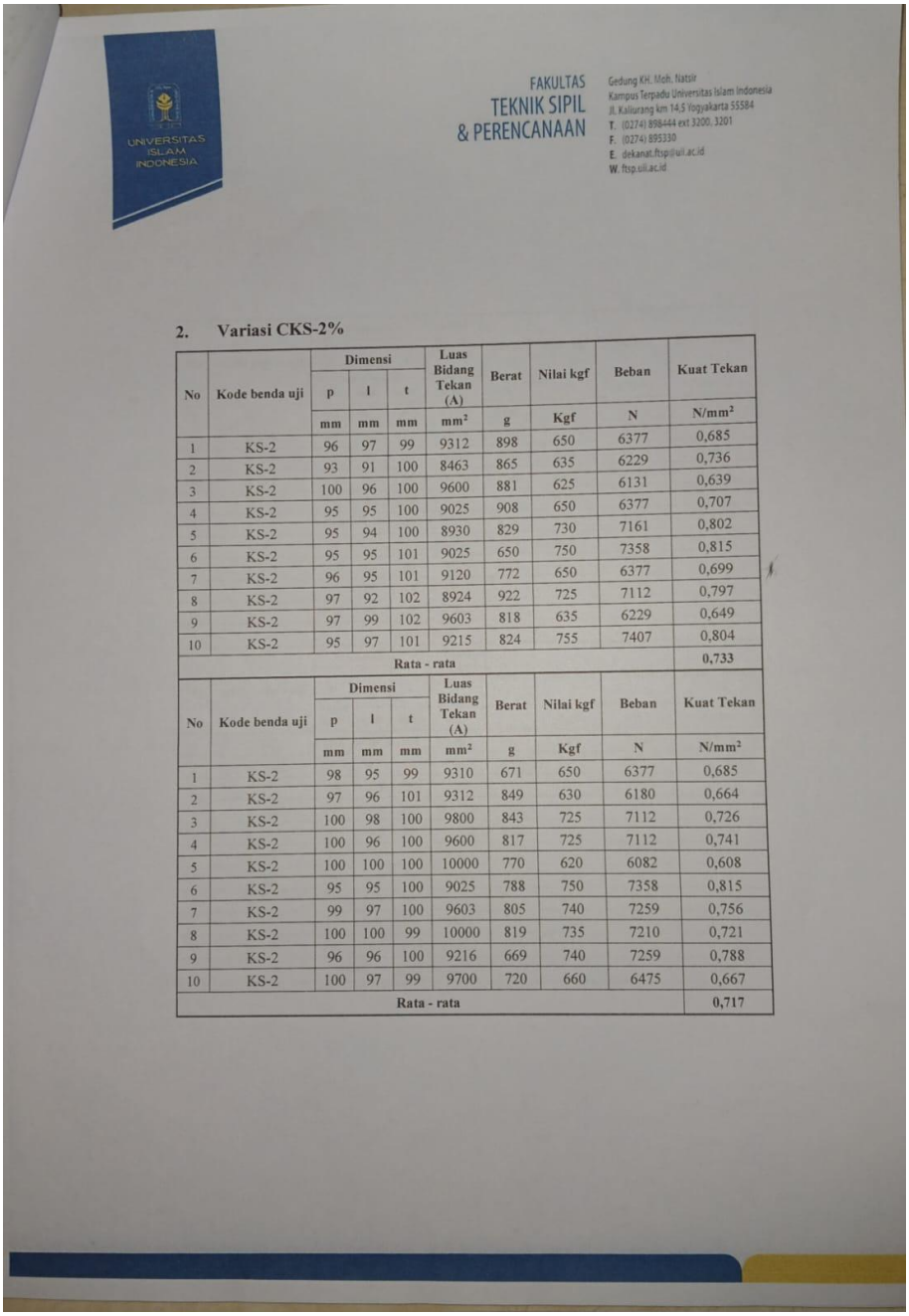
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	n	n/mm²
1	KS-0	100	95	100	9500	855	695	6818	0,718
2	KS-0	96	93	99	8928	734	725	7112	0,797
3	KS-0	95	96	100	9120	792	780	7652	0,839
4	KS-0	95	92	101	8740	766	745	7308	0,836
5	KS-0	96	94	100	9024	747	765	7505	0,832
6	KS-0	96	90	99	8640	871	770	7554	0,874
7	KS-0	100	99	98	9900	723	760	7456	0,753
8	KS-0	90	101	102	9090	803	755	7407	0,815
9	KS-0	95	970	102	92150	624	775	7603	0,083
10	KS-0	95	101	100	9595	898	785	7701	0,803
Rata – rata									0,735

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-0	93	95	100	8835	850	660	6475	0,733
2	KS-0	100	101	102	10100	824	750	7358	0,728
3	KS-0	95	98	101	9310	860	765	7505	0,806
4	KS-0	99	100	102	9900	801	760	7456	0,753
5	KS-0	95	100	100	9500	826	735	7210	0,759
6	KS-0	98	100	99	9800	823	655	6426	0,656
7	KS-0	100	97	100	9700	800	685	6720	0,693
8	KS-0	100	90	101	9000	878	685	6720	0,747
9	KS-0	97	96	101	9312	827	765	7505	0,806
10	KS-0	96	100	98	9600	886	675	6622	0,690
Rata - rata									0,737

Gambar L-3. 3 Kuat tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

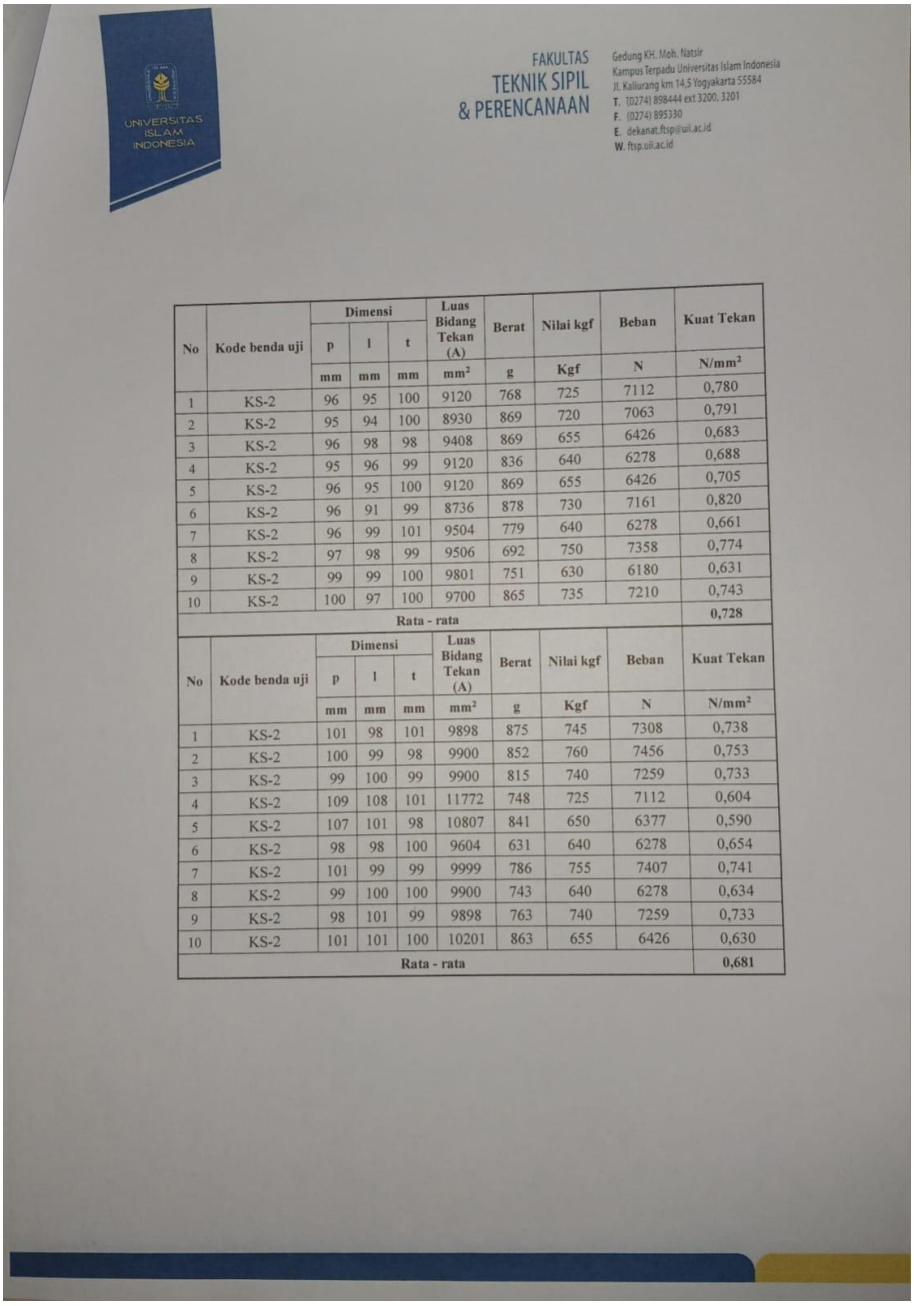
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

2. Variasi CKS-2%

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-2	96	97	99	9312	898	650	6377	0,685
2	KS-2	93	91	100	8463	865	635	6229	0,736
3	KS-2	100	96	100	9600	881	625	6131	0,639
4	KS-2	95	95	100	9025	908	650	6377	0,707
5	KS-2	95	94	100	8930	829	730	7161	0,802
6	KS-2	95	95	101	9025	650	750	7358	0,815
7	KS-2	96	95	101	9120	772	650	6377	0,699
8	KS-2	97	92	102	8924	922	725	7112	0,797
9	KS-2	97	99	102	9603	818	635	6229	0,649
10	KS-2	95	97	101	9215	824	755	7407	0,804
Rata - rata									0,733

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-2	98	95	99	9310	671	650	6377	0,685
2	KS-2	97	96	101	9312	849	630	6180	0,664
3	KS-2	100	98	100	9800	843	725	7112	0,726
4	KS-2	100	96	100	9600	817	725	7112	0,741
5	KS-2	100	100	100	10000	770	620	6082	0,608
6	KS-2	95	95	100	9025	788	750	7358	0,815
7	KS-2	99	97	100	9603	805	740	7259	0,756
8	KS-2	100	100	99	10000	819	735	7210	0,721
9	KS-2	96	96	100	9216	669	740	7259	0,788
10	KS-2	100	97	99	9700	720	660	6475	0,667
Rata - rata									0,717

Gambar L-3. 4 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

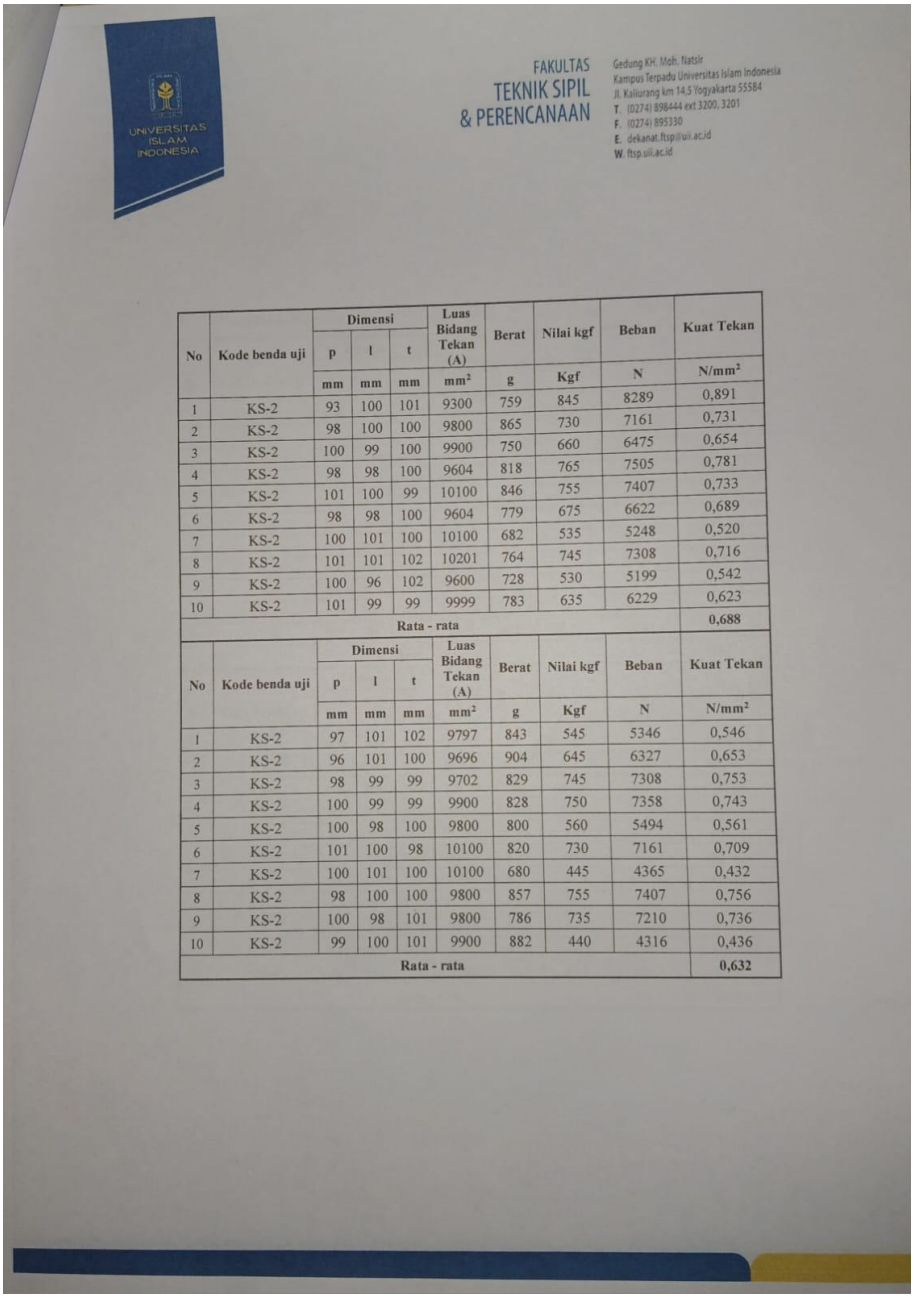
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-2	96	95	100	9120	768	725	7112	0,780
2	KS-2	95	94	100	8930	869	720	7063	0,791
3	KS-2	96	98	98	9408	869	655	6426	0,683
4	KS-2	95	96	99	9120	836	640	6278	0,688
5	KS-2	96	95	100	9120	869	655	6426	0,705
6	KS-2	96	91	99	8736	878	730	7161	0,820
7	KS-2	96	99	101	9504	779	640	6278	0,661
8	KS-2	97	98	99	9506	692	750	7358	0,774
9	KS-2	99	99	100	9801	751	630	6180	0,631
10	KS-2	100	97	100	9700	865	735	7210	0,743
Rata - rata									0,728

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-2	101	98	101	9898	875	745	7308	0,738
2	KS-2	100	99	98	9900	852	760	7456	0,753
3	KS-2	99	100	99	9900	815	740	7259	0,733
4	KS-2	109	108	101	11772	748	725	7112	0,604
5	KS-2	107	101	98	10807	841	650	6377	0,590
6	KS-2	98	98	100	9604	631	640	6278	0,654
7	KS-2	101	99	99	9999	786	755	7407	0,741
8	KS-2	99	100	100	9900	743	640	6278	0,634
9	KS-2	98	101	99	9898	763	740	7259	0,733
10	KS-2	101	101	100	10201	863	655	6426	0,630
Rata - rata									0,681

Gambar L-3. 5 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

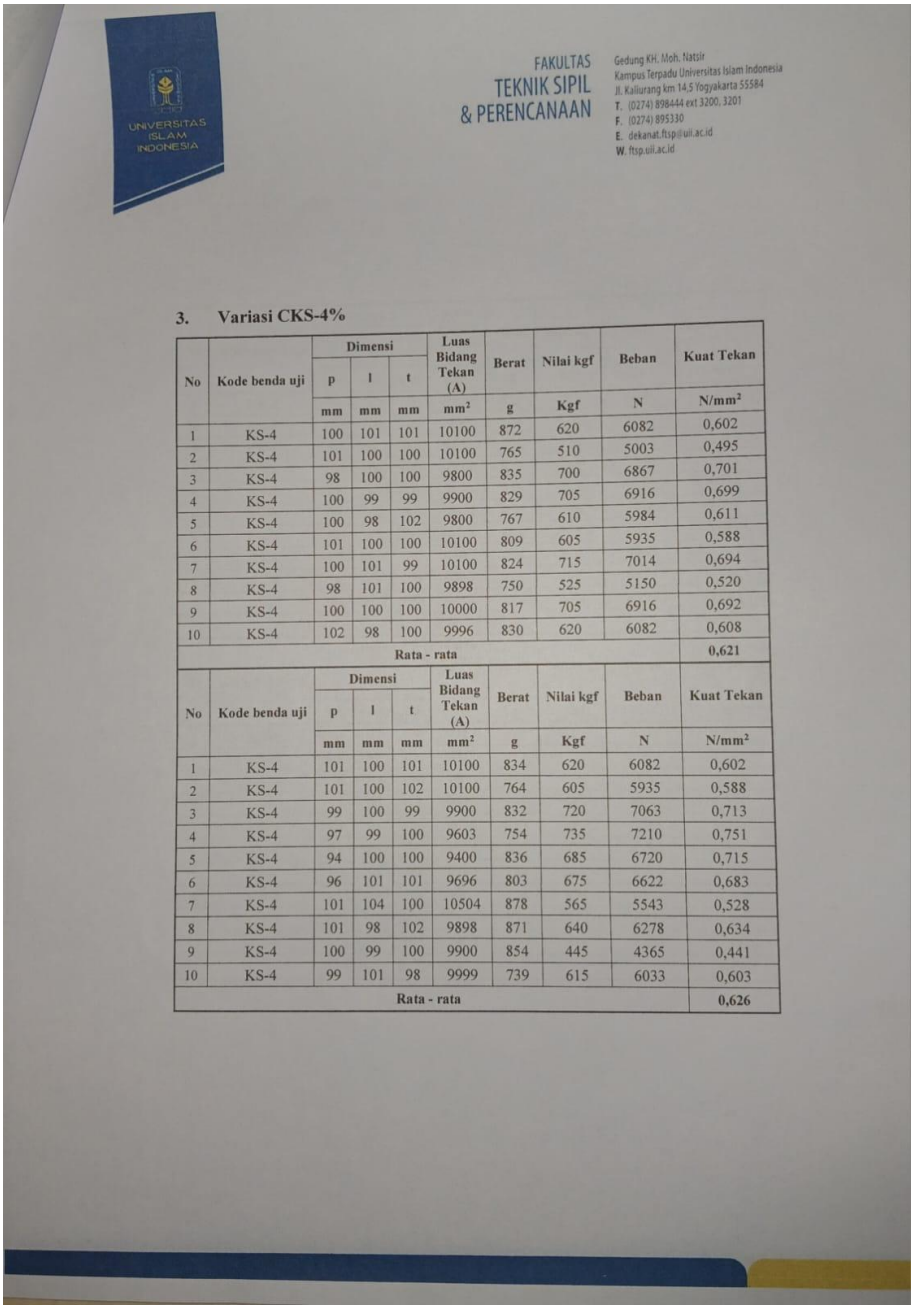
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-2	93	100	101	9300	759	845	8289	0,891
2	KS-2	98	100	100	9800	865	730	7161	0,731
3	KS-2	100	99	100	9900	750	660	6475	0,654
4	KS-2	98	98	100	9604	818	765	7505	0,781
5	KS-2	101	100	99	10100	846	755	7407	0,733
6	KS-2	98	98	100	9604	779	675	6622	0,689
7	KS-2	100	101	100	10100	682	535	5248	0,520
8	KS-2	101	101	102	10201	764	745	7308	0,716
9	KS-2	100	96	102	9600	728	530	5199	0,542
10	KS-2	101	99	99	9999	783	635	6229	0,623
Rata - rata									0,688

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-2	97	101	102	9797	843	545	5346	0,546
2	KS-2	96	101	100	9696	904	645	6327	0,653
3	KS-2	98	99	99	9702	829	745	7308	0,753
4	KS-2	100	99	99	9900	828	750	7358	0,743
5	KS-2	100	98	100	9800	800	560	5494	0,561
6	KS-2	101	100	98	10100	820	730	7161	0,709
7	KS-2	100	101	100	10100	680	445	4365	0,432
8	KS-2	98	100	100	9800	857	755	7407	0,756
9	KS-2	100	98	101	9800	786	735	7210	0,736
10	KS-2	99	100	101	9900	882	440	4316	0,436
Rata - rata									0,632

Gambar L-3. 6 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

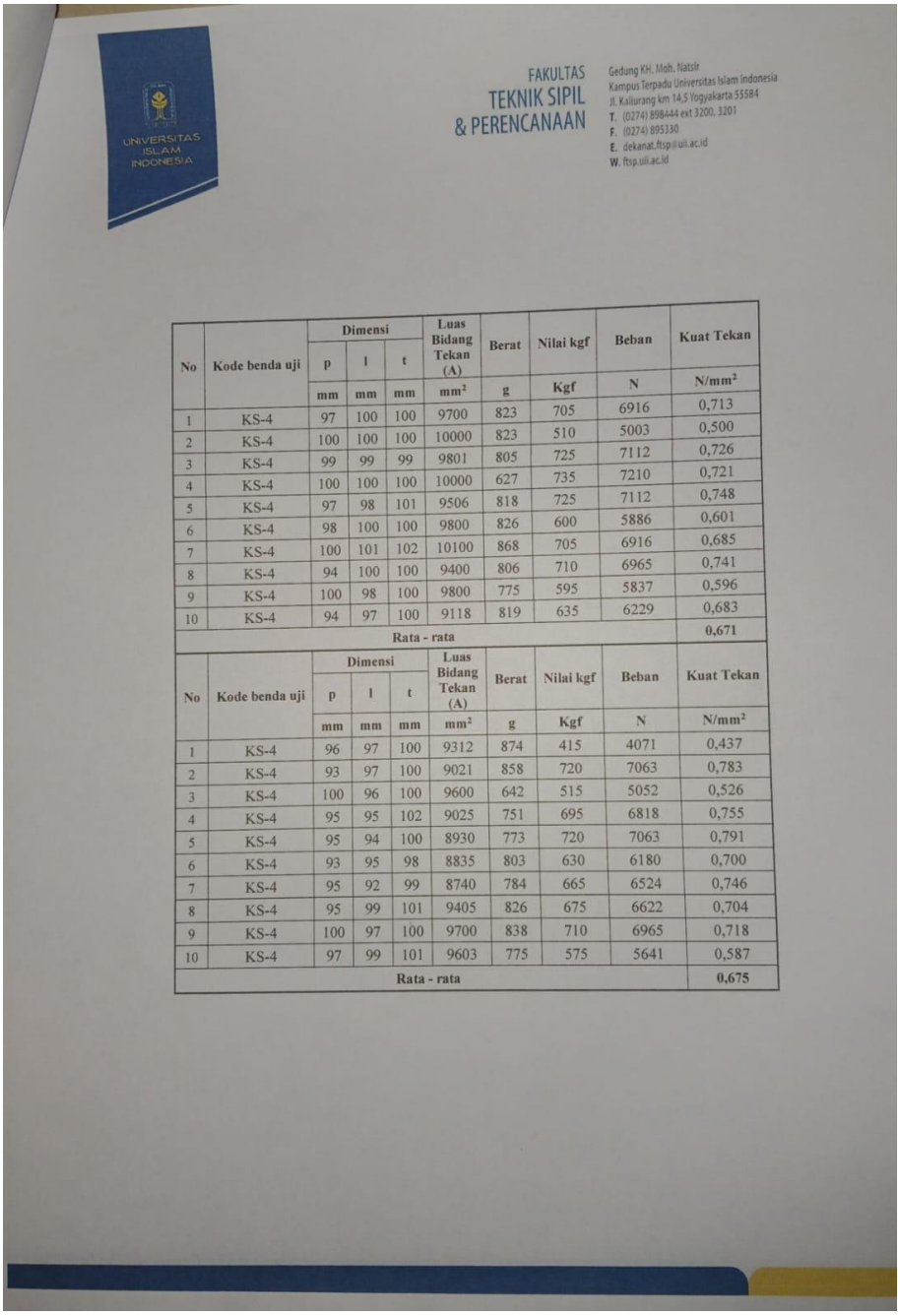
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

3. Variasi CKS-4%

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-4	100	101	101	10100	872	620	6082	0,602
2	KS-4	101	100	100	10100	765	510	5003	0,495
3	KS-4	98	100	100	9800	835	700	6867	0,701
4	KS-4	100	99	99	9900	829	705	6916	0,699
5	KS-4	100	98	102	9800	767	610	5984	0,611
6	KS-4	101	100	100	10100	809	605	5935	0,588
7	KS-4	100	101	99	10100	824	715	7014	0,694
8	KS-4	98	101	100	9898	750	525	5150	0,520
9	KS-4	100	100	100	10000	817	705	6916	0,692
10	KS-4	102	98	100	9996	830	620	6082	0,608
Rata - rata									0,621

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-4	101	100	101	10100	834	620	6082	0,602
2	KS-4	101	100	102	10100	764	605	5935	0,588
3	KS-4	99	100	99	9900	832	720	7063	0,713
4	KS-4	97	99	100	9603	754	735	7210	0,751
5	KS-4	94	100	100	9400	836	685	6720	0,715
6	KS-4	96	101	101	9696	803	675	6622	0,683
7	KS-4	101	104	100	10504	878	565	5543	0,528
8	KS-4	101	98	102	9898	871	640	6278	0,634
9	KS-4	100	99	100	9900	854	445	4365	0,441
10	KS-4	99	101	98	9999	739	615	6033	0,603
Rata - rata									0,626

Gambar L-3. 7 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

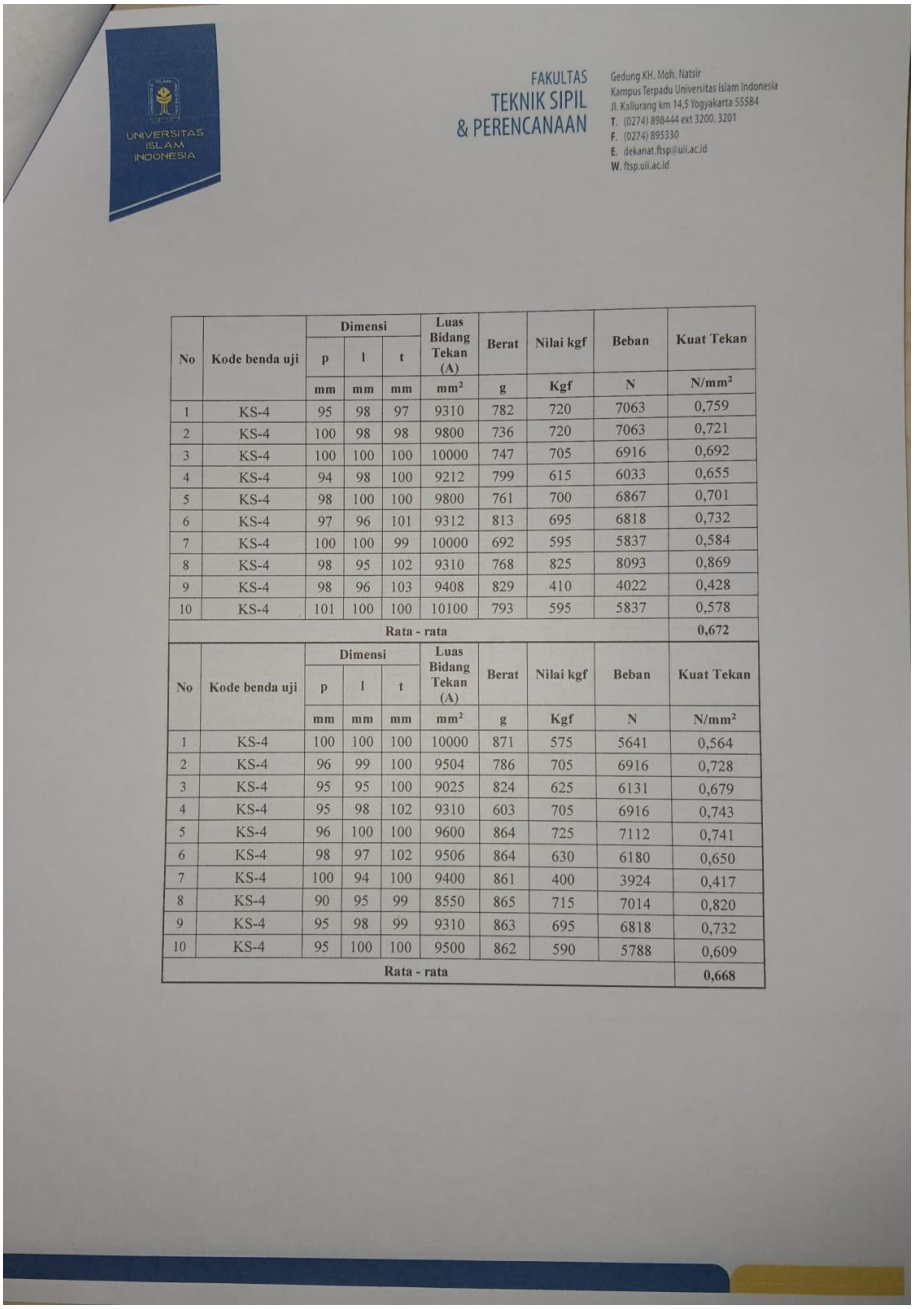
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-4	97	100	100	9700	823	705	6916	0,713
2	KS-4	100	100	100	10000	823	510	5003	0,500
3	KS-4	99	99	99	9801	805	725	7112	0,726
4	KS-4	100	100	100	10000	627	735	7210	0,721
5	KS-4	97	98	101	9506	818	725	7112	0,748
6	KS-4	98	100	100	9800	826	600	5886	0,601
7	KS-4	100	101	102	10100	868	705	6916	0,685
8	KS-4	94	100	100	9400	806	710	6965	0,741
9	KS-4	100	98	100	9800	775	595	5837	0,596
10	KS-4	94	97	100	9118	819	635	6229	0,683
Rata - rata									0,671

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-4	96	97	100	9312	874	415	4071	0,437
2	KS-4	93	97	100	9021	858	720	7063	0,783
3	KS-4	100	96	100	9600	642	515	5052	0,526
4	KS-4	95	95	102	9025	751	695	6818	0,755
5	KS-4	95	94	100	8930	773	720	7063	0,791
6	KS-4	93	95	98	8835	803	630	6180	0,700
7	KS-4	95	92	99	8740	784	665	6524	0,746
8	KS-4	95	99	101	9405	826	675	6622	0,704
9	KS-4	100	97	100	9700	838	710	6965	0,718
10	KS-4	97	99	101	9603	775	575	5641	0,587
Rata - rata									0,675

Gambar L-3. 8 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

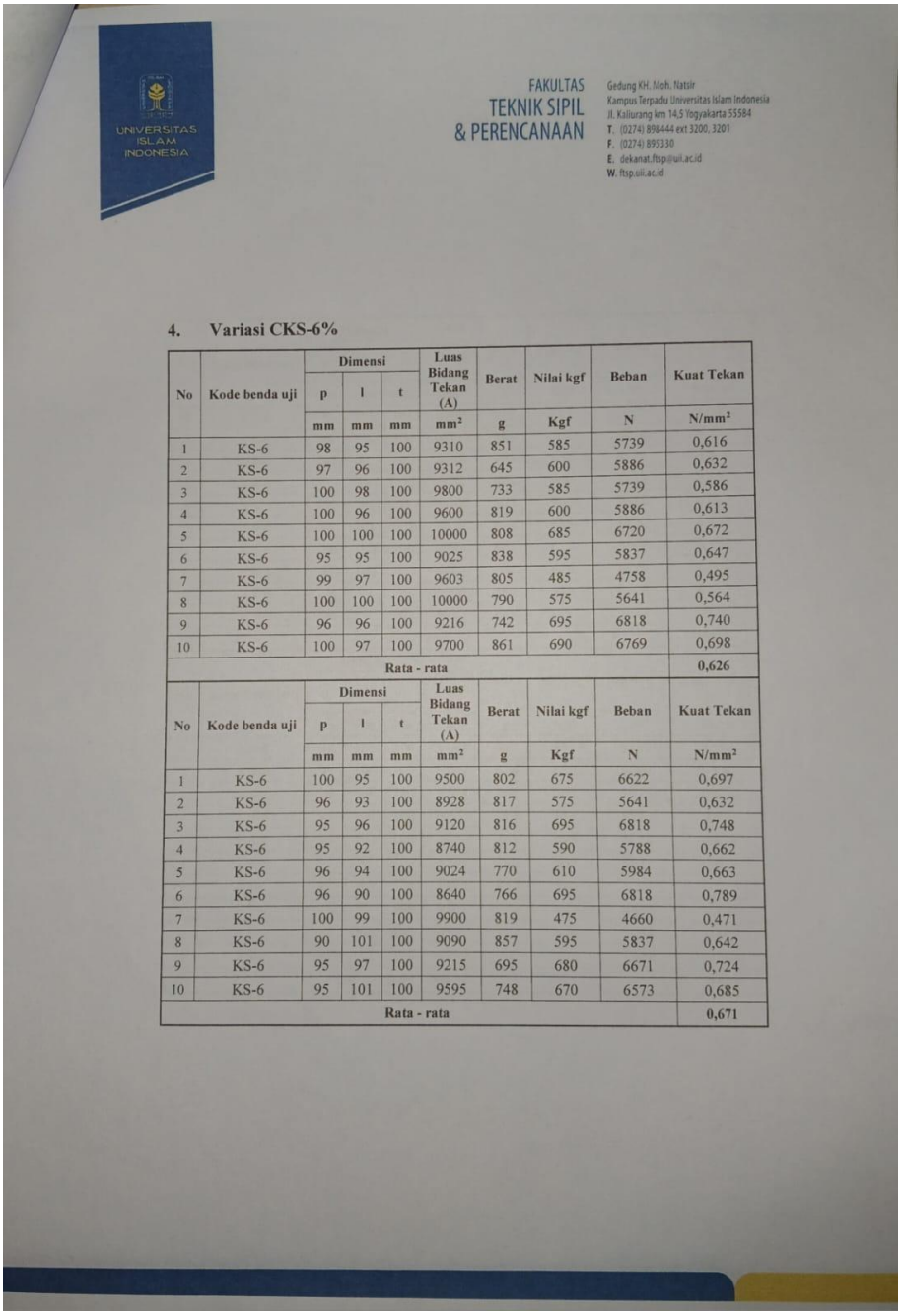
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-4	95	98	97	9310	782	720	7063	0,759
2	KS-4	100	98	98	9800	736	720	7063	0,721
3	KS-4	100	100	100	10000	747	705	6916	0,692
4	KS-4	94	98	100	9212	799	615	6033	0,655
5	KS-4	98	100	100	9800	761	700	6867	0,701
6	KS-4	97	96	101	9312	813	695	6818	0,732
7	KS-4	100	100	99	10000	692	595	5837	0,584
8	KS-4	98	95	102	9310	768	825	8093	0,869
9	KS-4	98	96	103	9408	829	410	4022	0,428
10	KS-4	101	100	100	10100	793	595	5837	0,578
Rata - rata									0,672

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-4	100	100	100	10000	871	575	5641	0,564
2	KS-4	96	99	100	9504	786	705	6916	0,728
3	KS-4	95	95	100	9025	824	625	6131	0,679
4	KS-4	95	98	102	9310	603	705	6916	0,743
5	KS-4	96	100	100	9600	864	725	7112	0,741
6	KS-4	98	97	102	9506	864	630	6180	0,650
7	KS-4	100	94	100	9400	861	400	3924	0,417
8	KS-4	90	95	99	8550	865	715	7014	0,820
9	KS-4	95	98	99	9310	863	695	6818	0,732
10	KS-4	95	100	100	9500	862	590	5788	0,609
Rata - rata									0,668

Gambar L-3. 9 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

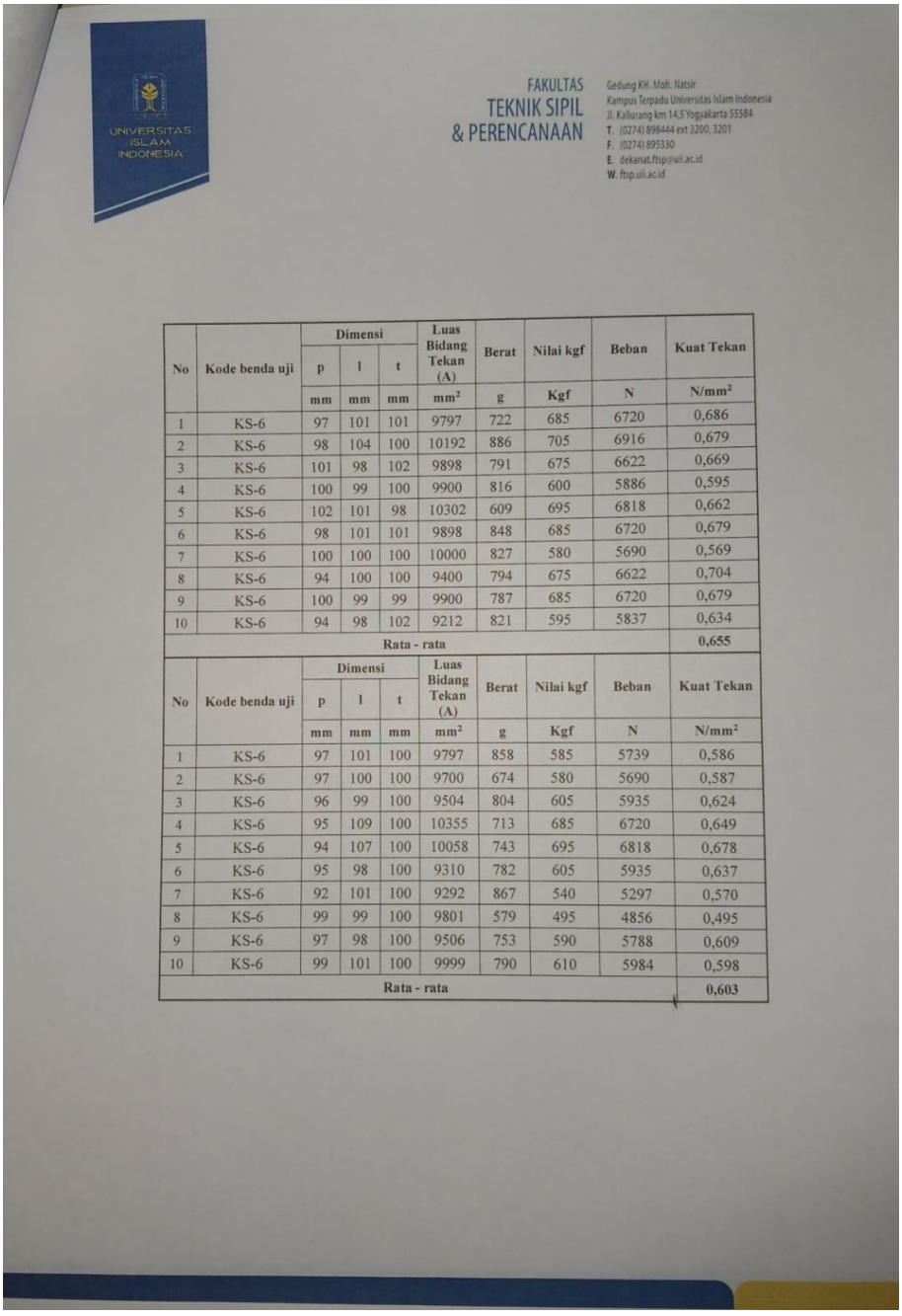
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

4. Variasi CKS-6%

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-6	98	95	100	9310	851	585	5739	0,616
2	KS-6	97	96	100	9312	645	600	5886	0,632
3	KS-6	100	98	100	9800	733	585	5739	0,586
4	KS-6	100	96	100	9600	819	600	5886	0,613
5	KS-6	100	100	100	10000	808	685	6720	0,672
6	KS-6	95	95	100	9025	838	595	5837	0,647
7	KS-6	99	97	100	9603	805	485	4758	0,495
8	KS-6	100	100	100	10000	790	575	5641	0,564
9	KS-6	96	96	100	9216	742	695	6818	0,740
10	KS-6	100	97	100	9700	861	690	6769	0,698
Rata - rata									0,626

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-6	100	95	100	9500	802	675	6622	0,697
2	KS-6	96	93	100	8928	817	575	5641	0,632
3	KS-6	95	96	100	9120	816	695	6818	0,748
4	KS-6	95	92	100	8740	812	590	5788	0,662
5	KS-6	96	94	100	9024	770	610	5984	0,663
6	KS-6	96	90	100	8640	766	695	6818	0,789
7	KS-6	100	99	100	9900	819	475	4660	0,471
8	KS-6	90	101	100	9090	857	595	5837	0,642
9	KS-6	95	97	100	9215	695	680	6671	0,724
10	KS-6	95	101	100	9595	748	670	6573	0,685
Rata - rata									0,671

Gambar L-3. 10 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

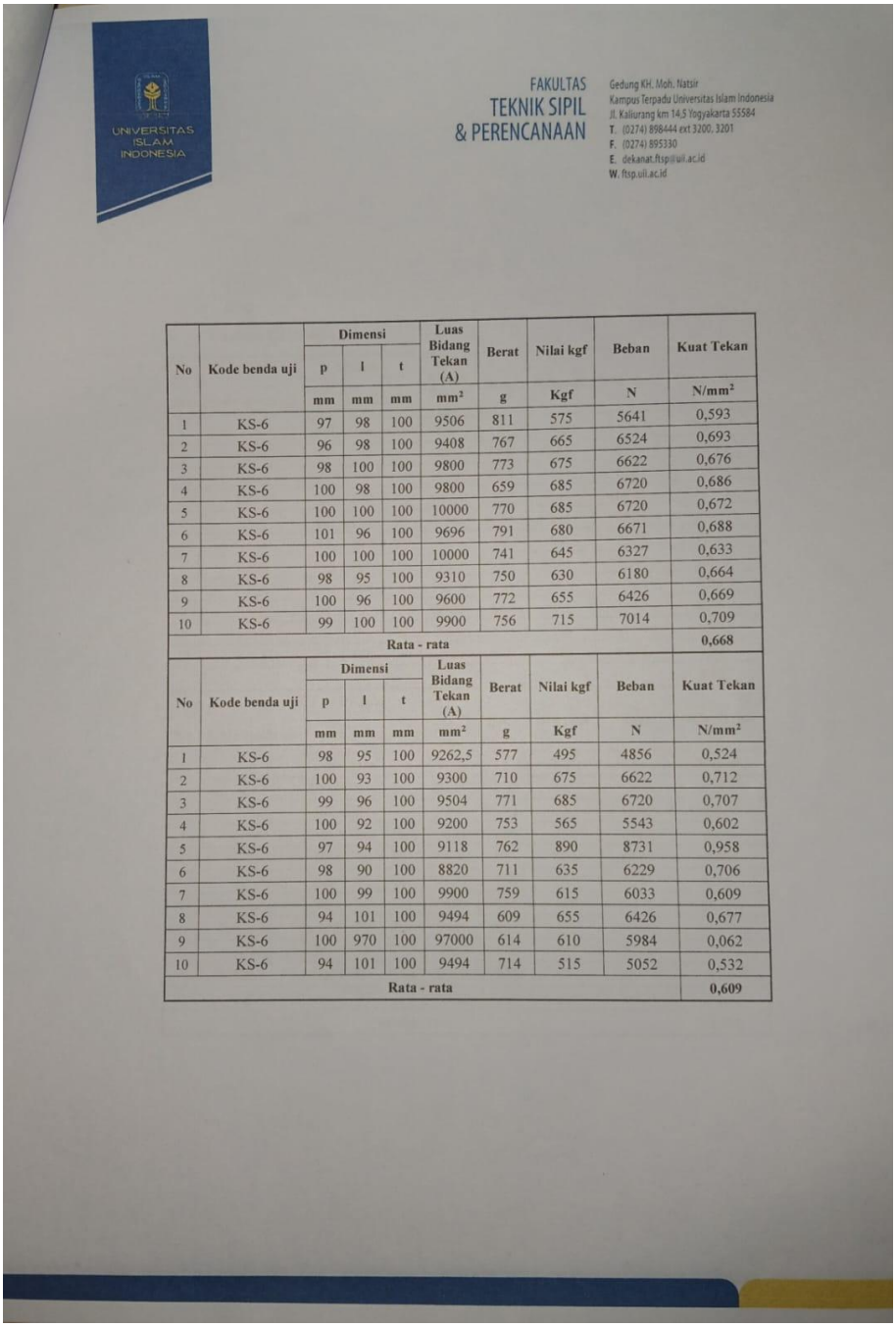
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-6	97	101	101	9797	722	685	6720	0,686
2	KS-6	98	104	100	10192	886	705	6916	0,679
3	KS-6	101	98	102	9898	791	675	6622	0,669
4	KS-6	100	99	100	9900	816	600	5886	0,595
5	KS-6	102	101	98	10302	609	695	6818	0,662
6	KS-6	98	101	101	9898	848	685	6720	0,679
7	KS-6	100	100	100	10000	827	580	5690	0,569
8	KS-6	94	100	100	9400	794	675	6622	0,704
9	KS-6	100	99	99	9900	787	685	6720	0,679
10	KS-6	94	98	102	9212	821	595	5837	0,634
Rata - rata									0,655

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-6	97	101	100	9797	858	585	5739	0,586
2	KS-6	97	100	100	9700	674	580	5690	0,587
3	KS-6	96	99	100	9504	804	605	5935	0,624
4	KS-6	95	109	100	10355	713	685	6720	0,649
5	KS-6	94	107	100	10058	743	695	6818	0,678
6	KS-6	95	98	100	9310	782	605	5935	0,637
7	KS-6	92	101	100	9292	867	540	5297	0,570
8	KS-6	99	99	100	9801	579	495	4856	0,495
9	KS-6	97	98	100	9506	753	590	5788	0,609
10	KS-6	99	101	100	9999	790	610	5984	0,598
Rata - rata									0,603

Gambar L-3. 11 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

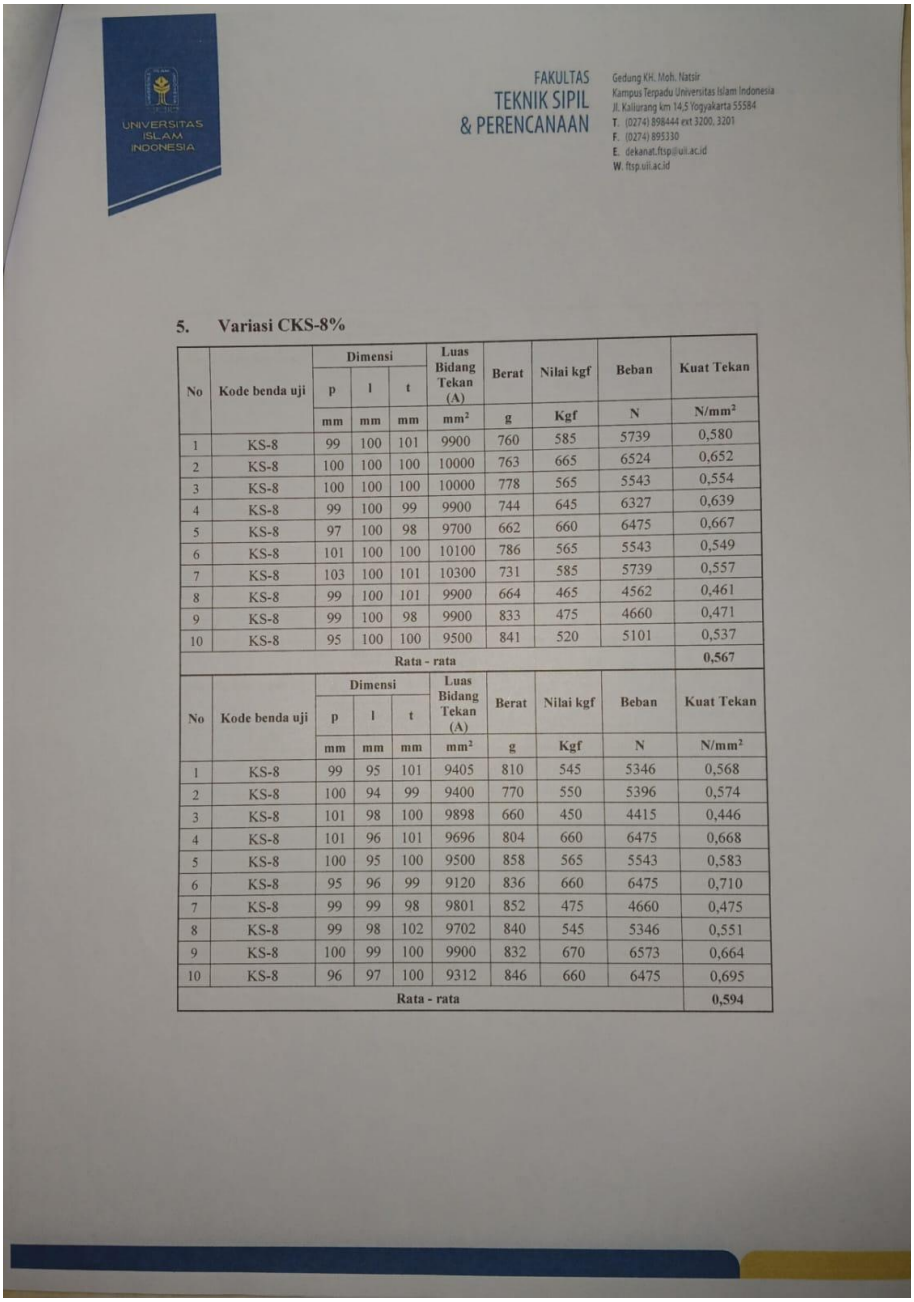
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-6	97	98	100	9506	811	575	5641	0,593
2	KS-6	96	98	100	9408	767	665	6524	0,693
3	KS-6	98	100	100	9800	773	675	6622	0,676
4	KS-6	100	98	100	9800	659	685	6720	0,686
5	KS-6	100	100	100	10000	770	685	6720	0,672
6	KS-6	101	96	100	9696	791	680	6671	0,688
7	KS-6	100	100	100	10000	741	645	6327	0,633
8	KS-6	98	95	100	9310	750	630	6180	0,664
9	KS-6	100	96	100	9600	772	655	6426	0,669
10	KS-6	99	100	100	9900	756	715	7014	0,709
Rata - rata									0,668

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-6	98	95	100	9262,5	577	495	4856	0,524
2	KS-6	100	93	100	9300	710	675	6622	0,712
3	KS-6	99	96	100	9504	771	685	6720	0,707
4	KS-6	100	92	100	9200	753	565	5543	0,602
5	KS-6	97	94	100	9118	762	890	8731	0,958
6	KS-6	98	90	100	8820	711	635	6229	0,706
7	KS-6	100	99	100	9900	759	615	6033	0,609
8	KS-6	94	101	100	9494	609	655	6426	0,677
9	KS-6	100	970	100	97000	614	610	5984	0,062
10	KS-6	94	101	100	9494	714	515	5052	0,532
Rata - rata									0,609

Gambar L-3. 12 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

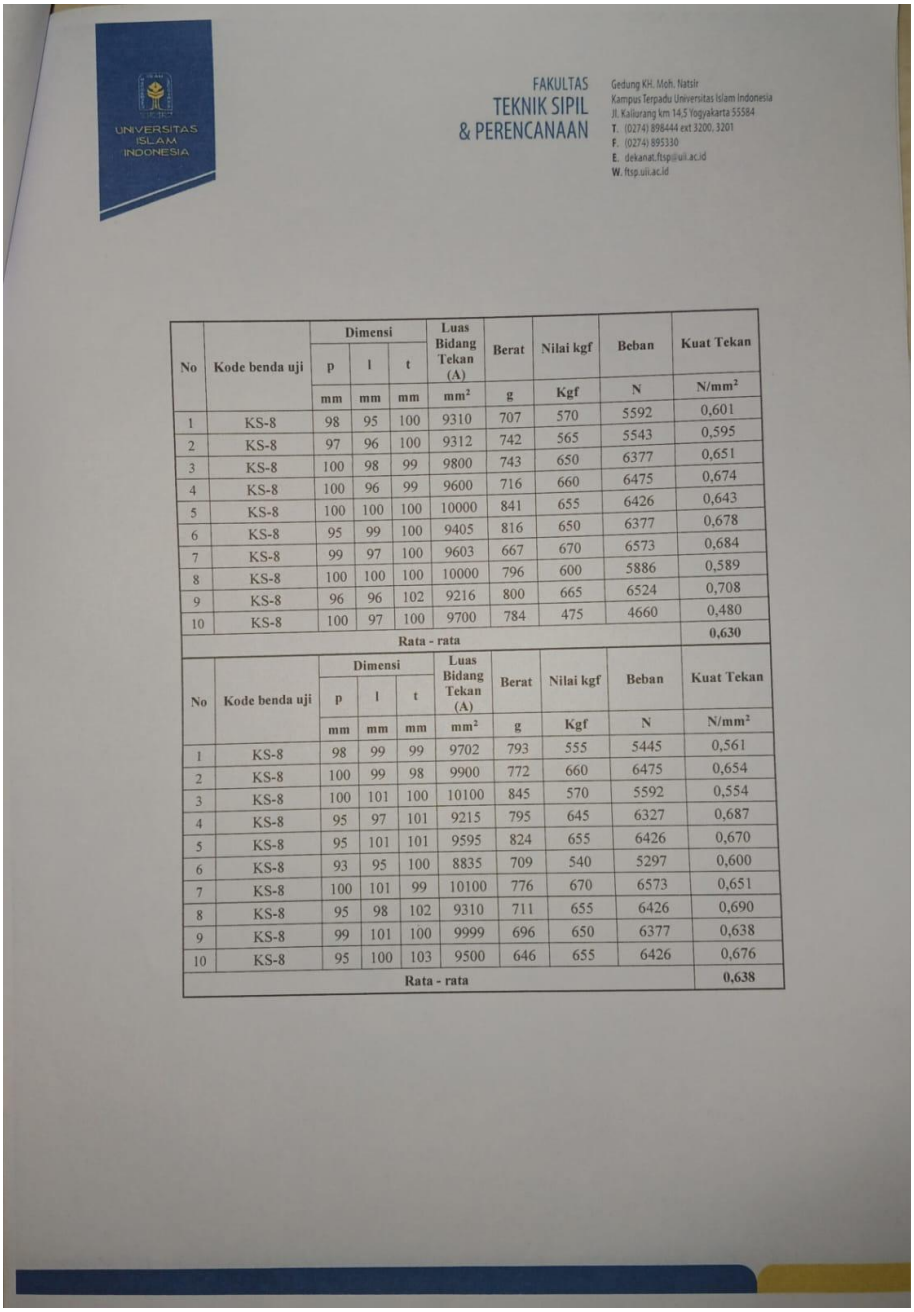
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

5. Variasi CKS-8%

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-8	99	100	101	9900	760	585	5739	0,580
2	KS-8	100	100	100	10000	763	665	6524	0,652
3	KS-8	100	100	100	10000	778	565	5543	0,554
4	KS-8	99	100	99	9900	744	645	6327	0,639
5	KS-8	97	100	98	9700	662	660	6475	0,667
6	KS-8	101	100	100	10100	786	565	5543	0,549
7	KS-8	103	100	101	10300	731	585	5739	0,557
8	KS-8	99	100	101	9900	664	465	4562	0,461
9	KS-8	99	100	98	9900	833	475	4660	0,471
10	KS-8	95	100	100	9500	841	520	5101	0,537
Rata - rata									0,567

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-8	99	95	101	9405	810	545	5346	0,568
2	KS-8	100	94	99	9400	770	550	5396	0,574
3	KS-8	101	98	100	9898	660	450	4415	0,446
4	KS-8	101	96	101	9696	804	660	6475	0,668
5	KS-8	100	95	100	9500	858	565	5543	0,583
6	KS-8	95	96	99	9120	836	660	6475	0,710
7	KS-8	99	99	98	9801	852	475	4660	0,475
8	KS-8	99	98	102	9702	840	545	5346	0,551
9	KS-8	100	99	100	9900	832	670	6573	0,664
10	KS-8	96	97	100	9312	846	660	6475	0,695
Rata - rata									0,594

Gambar L-3. 13 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

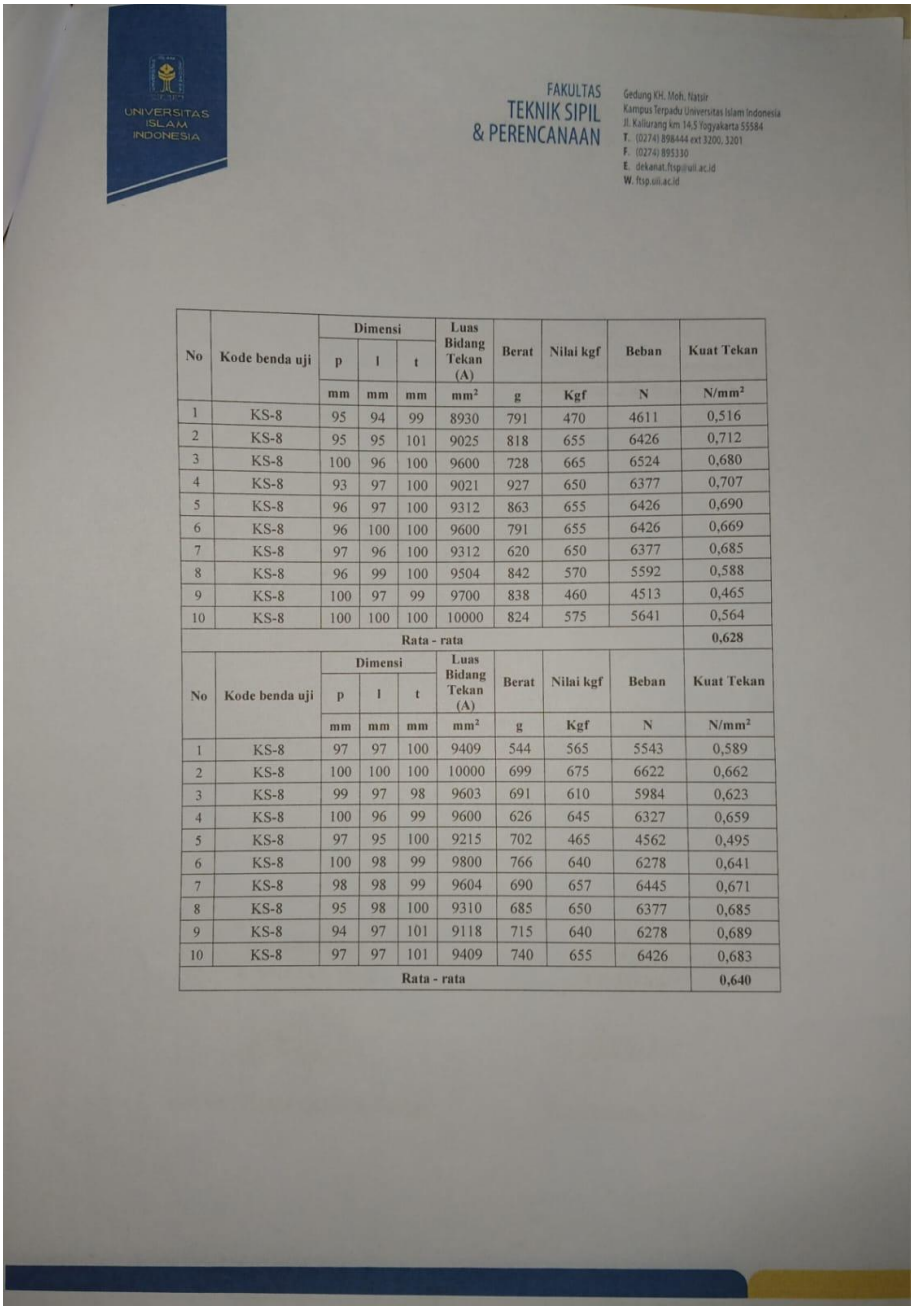
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-8	98	95	100	9310	707	570	5592	0,601
2	KS-8	97	96	100	9312	742	565	5543	0,595
3	KS-8	100	98	99	9800	743	650	6377	0,651
4	KS-8	100	96	99	9600	716	660	6475	0,674
5	KS-8	100	100	100	10000	841	655	6426	0,643
6	KS-8	95	99	100	9405	816	650	6377	0,678
7	KS-8	99	97	100	9603	667	670	6573	0,684
8	KS-8	100	100	100	10000	796	600	5886	0,589
9	KS-8	96	96	102	9216	800	665	6524	0,708
10	KS-8	100	97	100	9700	784	475	4660	0,480
Rata - rata									0,630

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-8	98	99	99	9702	793	555	5445	0,561
2	KS-8	100	99	98	9900	772	660	6475	0,654
3	KS-8	100	101	100	10100	845	570	5592	0,554
4	KS-8	95	97	101	9215	795	645	6327	0,687
5	KS-8	95	101	101	9595	824	655	6426	0,670
6	KS-8	93	95	100	8835	709	540	5297	0,600
7	KS-8	100	101	99	10100	776	670	6573	0,651
8	KS-8	95	98	102	9310	711	655	6426	0,690
9	KS-8	99	101	100	9999	696	650	6377	0,638
10	KS-8	95	100	103	9500	646	655	6426	0,676
Rata - rata									0,638

Gambar L-3. 14 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

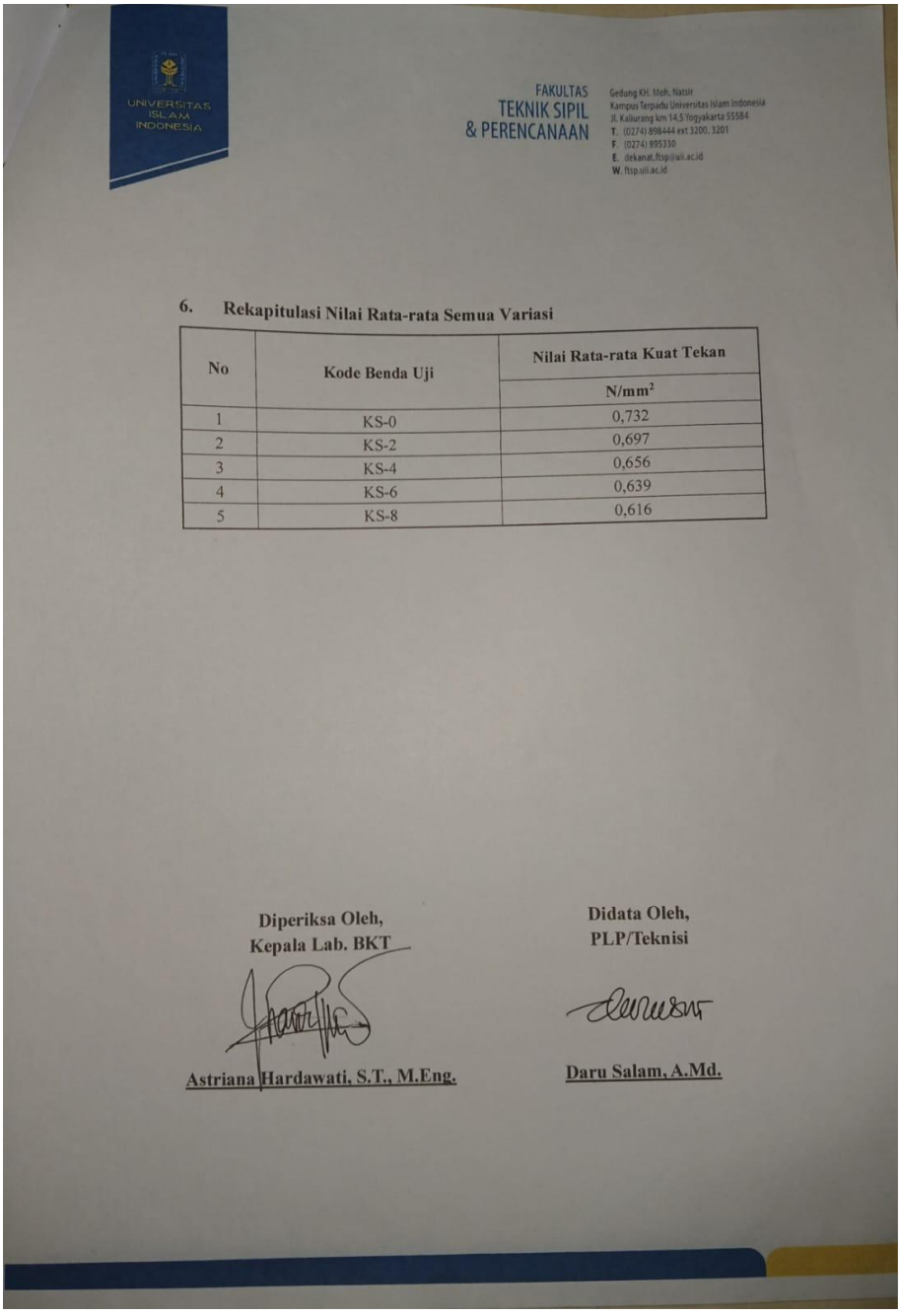
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-8	95	94	99	8930	791	470	4611	0,516
2	KS-8	95	95	101	9025	818	655	6426	0,712
3	KS-8	100	96	100	9600	728	665	6524	0,680
4	KS-8	93	97	100	9021	927	650	6377	0,707
5	KS-8	96	97	100	9312	863	655	6426	0,690
6	KS-8	96	100	100	9600	791	655	6426	0,669
7	KS-8	97	96	100	9312	620	650	6377	0,685
8	KS-8	96	99	100	9504	842	570	5592	0,588
9	KS-8	100	97	99	9700	838	460	4513	0,465
10	KS-8	100	100	100	10000	824	575	5641	0,564
Rata - rata									0,628

No	Kode benda uji	Dimensi			Luas Bidang Tekan (A)	Berat	Nilai kgf	Beban	Kuat Tekan
		p	l	t					
		mm	mm	mm	mm²	g	Kgf	N	N/mm²
1	KS-8	97	97	100	9409	544	565	5543	0,589
2	KS-8	100	100	100	10000	699	675	6622	0,662
3	KS-8	99	97	98	9603	691	610	5984	0,623
4	KS-8	100	96	99	9600	626	645	6327	0,659
5	KS-8	97	95	100	9215	702	465	4562	0,495
6	KS-8	100	98	99	9800	766	640	6278	0,641
7	KS-8	98	98	99	9604	690	657	6445	0,671
8	KS-8	95	98	100	9310	685	650	6377	0,685
9	KS-8	94	97	101	9118	715	640	6278	0,689
10	KS-8	97	97	101	9409	740	655	6426	0,683
Rata - rata									0,640

Gambar L-3. 15 Kuat Tekan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

6. **Rekapitulasi Nilai Rata-rata Semua Variasi**

No	Kode Benda Uji	Nilai Rata-rata Kuat Tekan
		N/mm²
1	KS-0	0,732
2	KS-2	0,697
3	KS-4	0,656
4	KS-6	0,639
5	KS-8	0,616

Diperiksa Oleh,
Kepala Lab. BKT

Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.

Didata Oleh,
PLP/Teknisi

Daru Salam, A.Md.

Gambar L-3. 16 Kuat Tekan

Lampiran 4 lembar Plagiasi



Direktorat Perpustakaan Universitas Islam Indonesia
Gedung Moh. Hatta
Jl. Kaliurang Km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext.2301
F. (0274) 898444 psw.2091
E. perpustakaan@uii.ac.id
W. library.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN HASIL CEK PLAGIASI
Nomor: 3007231654/Perpus./10/Dir.Perpus/VII/2026

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Assalamualaikum Wr. Wb.

Dengan ini, menerangkan bahwa:

Nama	: Rafi Maulana Putra
Nomor Mahasiswa	: 21511021
Pembimbing	: Jafar, S.T., M.T., MURP.
Fakultas / Prodi	: Teknik Desain Inovasi/ Teknik Sipil
Judul Karya Ilmiah	: Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Halus dengan Cangkang Kelapa Sawit terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Bata Ringan CLC

Karya ilmiah yang bersangkutan di atas telah melalui proses cek plagiasi menggunakan **Turnitin** dengan hasil kemiripan (*similarity*) sebesar **5 (Lima) %.**

Demikian Surat Keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 03/08/2026
Direktur

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
DIREKTORAT PERPUSTAKAAN
YOGYAKARTA

Muhammad Jamil, SIP.

Gambar L-4. 1 Lembar Plagiasi