

SKRIPSI

**UJI TANPA MERUSAK, KUAT TEKAN DAN EMISI KARBON
DIOKSIDA BETON YANG MENGANDUNG SEMEN
CAMPURAN DAN ABU TERBANG**

***NON DESTRUCTIVE TEST, COMPRESSIVE STRENGTH AND
CARBON DIOXIDE EMISSIONS OF CONCRETE CONTAINING
MIXED CEMENT AND FLY ASH***

Disusun dan Diajukan Oleh:

YAZID FARRAS

D011 20 1029



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

UJI TANPA MERUSAK, KUAT TEKAN DAN EMISI KARBON DIOKSIDA BETON YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN DAN ABU TERBANG

Disusun dan diajukan oleh

YAZID FARRAS
D011 20 1029

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 6 Maret 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST, M.Eng **Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng**

NIP: 198604092019043001

NIP: 196805292002121002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng

NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Yazid Farras
NIM : D011 20 1029
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**{ UJI TANPA MERUSAK, KUAT TEKAN DAN EMISI KARBON
DIOKSIDA BETON YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN DAN
ABU TERBANG }**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, Maret 2024

Yang Menyatakan,

A 1000 Rupiah Metera Tempel stamp is shown, featuring the Garuda Pancasila emblem and the number '1000'. The stamp is partially obscured by a handwritten signature in black ink. The serial number '4068AAJX014111699' is visible at the bottom of the stamp.

Yazid Farras

ABSTRAK

YAZID FARRAS. *Uji Tanpa Merusak, Kuat Tekan dan Emisi Karbon Dioksida Beton yang Mengandung Semen Campuran dan Abu Terbang* (dibimbing oleh Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T. dan Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.T.)

Dunia konstruksi di Indonesia saat ini terus menjadi pesat perkembangannya serta signifikan. Perihal ini dibuktikan dengan banyaknya proyek-proyek bangunan konstruksi yang lagi berjalan. Pertumbuhan yang dimaksudkan pastinya akan berakibat terhadap kebutuhan warga dalam pemakaian beton yang tentunya akan berpengaruh terhadap jumlah produksi semen. Menurut data Survei Geologi Amerika Serikat, total produksi semen di seluruh dunia mencapai 4,1 miliar metrik ton pada 2022. Produksi PC sendiri menyumbang 4–8% karbon dioksida (CO₂) antropogenik saat ini emisi di seluruh dunia. Dengan produksi 1 ton semen menghasilkan 0,6 hingga 1 ton CO₂. Abu terbang batubara merupakan produk sampingan dari pembakaran bubuk batubara di pembangkit listrik tenaga Uap. Fly ash dengan sifat pozzolan memungkinkan untuk menggantikan semen pada beton. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hasil uji *resistivity*, UPV dan kuat tekan beton serta menghitung nilai emisi CO₂ yang dihasilkan beton pada usia 7 dan 28 hari. Benda uji yang digunakan adalah beton silinder ukuran 10 x 20 cm sebanyak 12 buah dengan variasi beton C, FA 15%, FA 30% dan FA 45%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa benda uji beton variasi FA 15% usia 28 hari memiliki hasil uji *resistivity*, UPV, dan kuat tekan tertinggi dibanding variasi lainnya. Selain itu, semakin besar persentasi *fly ash* yang digunakan maka semakin kecil emisi CO₂ yang dihasilkan.

Kata Kunci : Beton, Semen, *Fly Ash*, Resistivity, UPV, Kuat Tekan, Emisi CO₂

ABSTRACT

YAZID FARRAS. *Non Destructive Test, Compressive Strength and Carbon Dioxide Emissions of Concrete Containing Mixed Cement and Fly Ash* (supervised by Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T. dan Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.T.)

The world of construction in Indonesia currently continues to develop rapidly and significantly. This is proven by the many construction building projects currently underway. The intended growth will certainly have an impact on residents' needs for using concrete, which will of course affect the amount of cement production. According to United States Geological Survey data, total cement production worldwide will reach 4.1 billion metric tons in 2022. PC production alone accounts for 4–8% of current anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions worldwide. , With the production of 1 ton of cement, it produces 0.6 to 1 ton of CO₂. Coal fly ash is a by-product of burning coal powder in steam power plants. Fly ash with pozzolanic properties makes it possible to replace cement in concrete. This research was carried out to determine the results of resistivity, UPV and compressive strength tests of concrete as well as calculating the value of CO₂ emissions produced by concrete at the age of 7 and 28 days. The test objects used were 12 cylindrical concrete measuring 10 x 20 cm with variations of concrete C, FA 15%, FA 30% and FA 45%. The results of the research showed that concrete specimens of the FA 15% variation aged 28 days had the highest resistivity, UPV and compressive strength test results compared to other variations. Apart from that, the greater the percentage of fly ash used, the smaller the CO₂ emissions produced.

Keywords: Concrete, Cement, Fly Ash, Resistivity, UPV, Compressive Strength, CO₂ Emissions

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 Beton	8
2.3 Geopolimer	13
2.4 Material Penyusun Beton	13
2.5 Emisi Karbon	21
2.6 Resistivity	22
2.7 Ultrasonic puls velocity (UPV)	23
2.8 Pengujian Kuat Tekan	25
BAB III METODE PENELITIAN	30
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	30
3.2 Jenis Penelitian dan Sumber Data	30
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	30
3.4 Pemeriksaan Karakteristik Material	32
3.5 Pembuatan Benda Uji	33
3.6 Perawatan (Curing) Benda Uji	34
3.7 Pengujian Electrical Resistivity	35
3.8 Pengujian Ultrasonik Puls Velocity (UPV)	36

3.9 Pengujian Kuat Tekan	37
3.10 Embodied Carbon (Emisi CO ₂)	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Karakteristik Material	40
4.2 Rancangan Campuran	43
4.3 Pengujian <i>Resistivity</i>	43
4.4 Pengujian Ultrasonic Puls Velocity (UPV).....	45
4.5 Pengujian Kuat Tekan	47
4.6 Emisi Karbon Dioksida (Emisi CO ₂)	48
4.7 Index Antara Emisi CO ₂ Dengan <i>Resistivity</i>	50
4.8 Index Antara Emisi CO ₂ Dengan UPV	52
4.9 Index Antara Emisi CO ₂ Dengan Kuat Tekan.....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Skematik Pengujian UPV	24
Gambar 2 Material Beton.....	31
Gambar 3 Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	35
Gambar 4 Pengujian <i>Resistivity</i>	36
Gambar 5 Pengujian <i>Ultrasonic Puls Velocity</i> (UPV).....	37
Gambar 6 Pengujian Kuat Tekan	38
Gambar 7 Gradasi Agregat Halus (Pasir).....	41
Gambar 8 Gradasi Agregat Kasar (Batu Pecah)	42
Gambar 9 Hasil Pengujian <i>Resistivity</i>	44
Gambar 10 Hasil Pengujian UPV	46
Gambar 11 Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	48
Gambar 12 Data <i>Embodied Carbon Dioxyde</i>	49
Gambar 13 Index Antara Emisi CO ₂ Dengan Terhadap <i>Resistivity</i>	51
Gambar 14 Index Antara Emisi CO ₂ Terhadap UPV.....	52
Gambar 15 Index Antara Emisi CO ₂ Terhadap Kuat Tekan.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Syarat Kimia Utama Semen Portland	15
Tabel 2 Batas Gradasi Agregat Halus	17
Tabel 3 Batas Gradasi Agregat Kasar	17
Tabel 4 Syarat Kimia <i>Fly Ash</i> Sebagai Pengganti Semen.....	20
Tabel 5 Syarat Fisika <i>Fly Ash</i> Sebagai Pengganti Semen.....	20
Tabel 6 tingkat kualitas beton berdasarkan uji UPV	25
Tabel 7 Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	32
Tabel 8 Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar	32
Tabel 9 Standar Pemeriksaan Karakteristik Fly Ash	33
Tabel 10 Rancangan Campuran Beton Untuk 12 Benda Uji	33
Tabel 11 Data-Data Kandungan Karbon Dioksida	39
Tabel 12 Pengujian Karakteristik Agregat Halus	40
Tabel 13 Pengujian Karakteristik Agregat Kasar.....	41
Tabel 14 Kandungan Kimia <i>Fly Ash</i>	42
Tabel 15 Rancangan Campuran Beton.....	43
Tabel 16 Data Nilai <i>Resistivity</i> Usia 7 Hari dan 28 Hari	43
Tabel 17 Data Nilai UPV Usia 7 Hari Dan 28 Hari.....	45
Tabel 18 Data Nilai Kuat Tekan Usia 7 Hari Dan 28 Hari	47
Tabel 19 Data <i>Embodied Carbon Dioxyde</i>	49
Tabel 20 Hasil Perbandingan GHG Dengan <i>Resistivity</i>	50
Tabel 21 Hasil Perbandingan GHG dengan UPV	52
Tabel 22 Hasil Perbandingan GHG dengan Kuat Tekan	53

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
$f'c$	Kuat tekan beton (MPa atau N/mm ²)
P	Gaya tekan aksial (N)
A	Luas penampang benda uji (mm ²)
ρ	Resistivitas (Ω m)
A	Luas permukaan tempat arus mengalir(m ²)
L	Jarak antar probes (m)
R	Resistansi (Ω)
V	Kecepatan rambat gelombang (m/s)
L	Jarak antar pusat permukaan transduser (m)
T	Waktu tempuh (s)
CO ₂	Karbon dioksida

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Penyiapan Material.....	59
Lampiran 2. Dokumentasi Pembuatan Benda Uji.....	60
Lampiran 3. Dokumentasi Perawatan Benda Uji	61
Lampiran 4. Dokumentasi Pengujian Benda Uji.....	62

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Segala puji atas ke hadirat Allah ﷻ yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, Salawat serta salam selalu tercurahkan kepada Muhammad ﷺ dan semoga kita semua mendapat syafa'atnya di hari akhir. Alhamdulillah, penulis ucapkan karena dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Uji Tanpa Merusak, Kuat Tekan, dan Emisi Karbon Dioksida Beton yang Mengandung Semen Campuran dan Abu Terbang” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi S1 Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, tentu ada hambatan yang harus penulis hadapi. Namun, dibalik itu ada pihak yang telah membantu dan mendukung penyusunan tugas akhir ini. Sehingga tak lupa penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak yang telah memberi bantuan serta dukungan baik berupa tenaga maupun pemikirannya. Tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge, S.T., M.T. dan bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan kontribusi waktu dan tenaga untuk membantu menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini.

Penulis tentu menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna karena mungkin saja terdapat kesalahan serta kekurangan di dalamnya. Oleh karena itu, penulis menerima kritik serta saran dari pembaca agar nantinya dapat menjadi tugas akhir yang lebih baik di masa yang akan datang.

Gowa, 22 Februari 2024

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dunia konstruksi di Indonesia saat ini terus menjadi pesat perkembangannya serta signifikan. Perihal ini dibuktikan dengan banyaknya proyek-proyek bangunan konstruksi yang lagi berjalan. Pertumbuhan yang dimaksudkan pastinya akan berakibat terhadap kebutuhan warga dalam pemakaian beton. Hal tersebut disebabkan beton ialah bahan konstruksi yang sangat kerap digunakan serta mudah dalam memproduksinya. Pembuatan beton dengan kualitas tinggi menjadi kasus utama pada pakar konstruksi. Hal ini menjadi sebab beton sudah menjadi material utama konstruksi serta diperlukannya kekuatan yang sangat besar untuk mendukung fungsinya dalam konstruksi. Untuk menciptakan beton dengan kualitas tinggi, salah satu hal yang utama yang dicoba merupakan dengan meningkatkan kualitas material pembentuknya, misalnya kekerasan agregat serta kehalusan butir semen. Terdapatnya kontradiksi kekuatan tekan beton yang diperlukan dengan ketersediaan kualitas material menimbulkan polemik tertentu didalamnya.

Menurut data Survei Geologi Amerika Serikat, total produksi semen di seluruh dunia mencapai 4,1 miliar metrik ton pada 2022. Jumlah ini turun 6,8% dibandingkan pada tahun sebelumnya yang sebesar 4,4 miliar metrik ton. Indonesia menempati posisi ketujuh dengan jumlah produksi semen sebesar 64 juta metrik ton. Meskipun demikian, industri semen terus tumbuh, didorong oleh meningkatnya permintaan pembangunan infrastruktur di negara-negara berkembang dan urbanisasi di negara-negara maju. Menurut Asosiasi Semen Dunia, produksi semen global diperkirakan akan mencapai 8,2 miliar metrik ton pada tahun 2030 (Rizaty, 2023).

Produksi PC sendiri menyumbang 4–8% karbon dioksida (CO₂) antropogenik saat ini²) emisi di seluruh dunia. Dengan produksi 1 ton semen menghasilkan 0,6 hingga 1 ton CO₂, tergantung pada pembangkit listrik tenaga. Oleh karena itu, banyak peneliti belakangan ini berfokus pada mengidentifikasi bahan pengikat konstruksi alternatif yang dapat digunakan pada beton untuk mengurangi CO₂

tapak. Penelitian utama yang dilakukan adalah pengembangan bahan pengikat teraktivasi alkali, yang secara luas dikenal sebagai “geopolimer,” yang sebagian besar dibuat dari bahan limbah industri, seperti abu terbang berkalsium rendah, dan menunjukkan potensi besar untuk menjadi alternatif pengganti beton PC. Geopolimer memiliki sifat kimia dan material yang sebanding dengan PC. (Gunasekara, 2017).

Fly ash umumnya dihasilkan dari proses produksi listrik. Abu terbang batubara, atau biasa disebut dengan coal fly ash (CFA), merupakan produk sampingan dari pembakaran bubuk batubara di pembangkit listrik tenaga uap. Tergantung pada jenis dan kualitasnya, FA terdiri dari proporsi oksida yang berbeda-beda, kebanyakan silika, alumina, dan kalsium dan dapat menunjukkan aktivitas pozzolan. Fly ash dengan sifat pozzolan memungkinkan untuk menggantikan semen dan agregat halus pada beton. Abu terbang batubara dihasilkan di pembangkit listrik tenaga batubara dan pembangkit listrik tenaga uap ketika batubara dihancurkan dan dihembuskan bersama udara ke dalam ruang bakar boiler, yang dengan cepat terbakar, menghasilkan panas dan menghasilkan residu mineral cair. Panas dikeluarkan dari radiator melalui tabung ketel untuk mendinginkan saluran gas dan memadatkan mineral cair yang dihasilkan dan kemudian dibuang sebagai abu.

Fly ash di beberapa negara dikategorikan sebagai limbah. Fly ash masih menjadi masalah di banyak negara karena ketergantungan terhadap energi batu bara. Berdasarkan data statistik, total produksi fly ash secara global adalah 1.200 MT. Di Indonesia, menurut bauran energi tahun 2020, konsumsi bahan bakar batu bara mendominasi sebesar 38%. Berdasarkan data Kementerian ESDM, batubara masih menjadi sumber energi utama khususnya untuk pembangkit listrik yang mengalami peningkatan dari tahun 2009 hingga 2019. Konsumen batubara dalam negeri untuk pembangkit listrik pada tahun 2019 tercatat sebesar 98,5 (Permatasari, 2023).

Dalam pembangunan konstruksi diperlukan biaya yang lebih efisien dalam anggarannya. Material pembangunan merupakan item dengan biaya terbesar dalam sebuah proyek salah satunya ialah beton. Dalam *World Economic Forum* (2021),

berbagai negara di dunia seperti Belanda, Swiss, Jerman, Perancis, dan Inggris sepakat untuk menggunakan beton ramah lingkungan yang dapat membantu memperbaiki kerusakan lingkungan yang telah terjadi. Penggunaan beton ramah lingkungan ini juga diiringi dengan evaluasi kekuatan tekan yang dihasilkan. Maka dari itu, perlunya rancangan campuran beton yang mengandung material daur ulang yaitu *fly ash* sebagai substitusi semen parsial yang dapat memiliki kuat tekan yang tinggi sesuai rencana yang dapat menjamin penggunaannya dalam pembangunan di berbagai konstruksi proyek. Menindaklanjuti permasalahan tersebut, diperlukan penelitian terhadap rancangan campuran beton yang tidak hanya yang ramah lingkungan demi mewujudkan tujuan ke- 11 dari *Sustainable Development Goals* tetapi jugamemiliki kuat tekan yang tinggi, dan didukung oleh pengujian non-destruktif yaitu kecepatan gelombang ultrasonik (*UPV*), dan resistivity yang baik.

Berdasarkan latar belakang tersebut penulis mengangkat judul “**UJI TANPA MERUSAK, KUAT TEKAN DAN EMISI KARBON DIOKSIDA BETON YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN DAN ABU TERBANG**”.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana nilai *resistivity* beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran?
2. Bagaimana kecepatan gelombang ultrasonik (*UPV*) beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran?
3. Bagaimana kuat tekan beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran?
4. Bagaimana nilai emisi CO₂ beton yang mengandung *fly ash* sebagai substitusi semen campuran?
5. Bagaimana indeks antara emisi CO₂ dengan resistivity, *UPV*, dan Kuat tekan?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk menganalisis nilai *resistivity* beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran;
2. Untuk menganalisis kecepatan gelombang ultrasonic (UPV) beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran;
3. Untuk menganalisis kuat tekan beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran;
4. Untuk mengukur nilai emisi CO₂ beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran;
5. Untuk mengidentifikasi indeks antara emisi CO₂ dengan *resistivity*, UPV, dan kuat tekan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah menambah pengetahuan mengenai pengaruh penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen campuran terhadap nilai emisi CO₂ yang dihasilkan.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

Untuk mencapai maksud dan tujuan dari penulisan tugas akhir ini serta menguraikan pokok bahasan diatas ditetapkan batasan-batasan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Penelitian bersifat eksperimental dan dilakukan di laboratorium yang sesuai dengan standar (ASTM dan SNI) sehingga akan didapatkan hasil pengujian-pengujian yang sesuai diharapkan;
2. *Fly ash* yang digunakan adalah limbah batubara PLTU;
3. Penelitian pembuatan beton menggunakan cetakan silinder dengan ukuran tinggi 20 cm diameter 10 cm;
4. Beton yang diproduksi dengan menggunakan jenis semen Portland Komposit (PCC).

5. Abu terbang (*fly ash*) sebagai pengganti 15%, 30%, dan 45% semen campuran pada campuran beton.
6. Pengujian resistivity, UPV, dan kuat tekan dilaksanakan pada umur 7 hari dan 28 hari dengan tipe perawatan *water curing* pada benda uji.
7. Perhitungan emisi CO₂ didasarkan pada penelitian-penelitian terdahulu.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

(Setiawan dkk, 2023) melakukan penelitian yang mengkaji mengenai emisi karbon dioksida yang terkandung dalam beton geopolimer berbasis fly ash dengan pergantian semen sebesar 100%. Dari hasil perhitungan tersebut terlihat banyaknya karbon yang terkandung dalam 1m³, beton normal sebesar 552,22 kg, sedangkan pada beton geopolimer sebesar 242,87 kg, atau lebih rendah sebesar 309,35 kg. Nilai perhitungan emisi karbon ini hanya berdasarkan nilai faktor karbon A1-A3. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan beton geopolimer mampu menurunkan emisi karbon hingga 56,02%.

(Fauziah dkk, 2023) Melakukan penelitian kajian emisi karbon *fly ash* sebagai pengganti semen pada campuran beton dengan menggunakan metode *artificial neural network*. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa dengan tingginya konsumsi semen, maka semakin meningkat pula produksi gas CO₂. Produksi semen sendiri memberikan banyak dampak terhadap lingkungan, salah satunya adalah menimbulkan efek gas rumah kaca. Gas rumah kaca terbentuk karena adanya peningkatan konsentrasi gas CO₂ dan gas-gas lainnya di atmosfer. Alaminya, jika produksi gas CO₂ pada batas yang wajar tidak menimbulkan bahaya karena CO₂ dibutuhkan untuk membantu tumbuhan hijau melakukan fotosintesis. Namun jika produksi gas CO₂ meningkat secara berlebihan melebihi kemampuan tumbuhan untuk menyerapnya justru akan membahayakan lingkungan. Salah satunya penyumbang emisi CO₂ bersumber dari proses kalsinasi pada pembuatan semen dan berkurangnya green area karena proses penambangan sumber daya alam menyebabkan berkurangnya proses penyerapan CO₂.

(Timotius dkk, 2014), melakukan identifikasi keretakan beton menggunakan metode geolistrik resistivitas. Resistivitas keretakan beton diukur menggunakan metode geolistrik resistivitas konfigurasi Schlumberger. Pengolahan data menggunakan software Res1D untuk menentukan retakan 1D pada beton dan Res2dinv untuk menentukan keretakan 2D. Pengambilan data dilakukan pada

model fisik beton dengan panjang 60 cm, lebar 10 cm dan tinggi 20 cm serta jarak antar elektroda 2 cm. Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa metode geolistrik resistivitas bisa diterapkan untuk mengidentifikasi keretakan beton pada objek dengan ketebalan yang relatif kecil, serta dapat mendeteksi dan menemukan keberadaan rongga pada beton.

(**Ghosh et al, 2018**), melakukan penelitian pengukuran *ultrasonic pulse velocity* dan kuat tekan beton pada umur 1, 7, 28, dan 90 hari. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah beton geopolimer yang disintesis pada suhu kamar dengan aktivator alkali dengan konsentrasi berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai UPV dan kuat tekan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton.

(**Liu et al, 2012**), melakukan penelitian yang menyajikan metode untuk mengoptimalkan kandungan semen dan abu terbang dalam beton berdasarkan pengujian sifat beton yang mengeras dan dampak lingkungan. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa beton dengan 0:4 w/cm dirancang untuk mengoptimalkan kandungan material semen dan kandungan abu terbang berdasarkan sifat beton dan dampak lingkungan. Pergantian kadar semen dengan fly ash Kelas C harus dibatasi hingga 50% dengan 0:4 w/cm berdasarkan kuat tekan awal dan kuat tekan 28 hari. Efek fill-out dari fly ash ditemukan pada campuran beton, yang disebabkan oleh peningkatan kandungan material semen jauh di atas persyaratan untuk memenuhi spesifikasi CDOT.

(**Case et al, 2016**), melakukan penelitian pengaruh fly ash sebagai pengganti sebagian semen pada kekuatan beton percobaan sistematis telah dilakukan untuk menyelidiki pengaruh rasio dan umur abu terbang. Kuat tekan benda uji beton dengan perbandingan penggantian 15%, 30% dan 45% serta berumur 7 dan 28 hari diukur dan dibandingkan dengan benda uji beton tanpa fly ash pada umur yang sama. Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan beton yang mengandung abu terbang meningkat lebih lambat namun lebih kuat seiring bertambahnya usia, dibandingkan beton bebas abu terbang, dan terdapat rasio penggantian abu terbang yang optimal dimana kuat tekan maksimum beton yang mengandung abu terbang dapat dicapai, dan kekuatan maksimum benda uji berumur 28 hari ke atas lebih tinggi

dibandingkan beton bebas abu terbang.

2.2 Beton

Berdasarkan SNI 2847:2019 pengertian beton adalah campuran antara semen Portland atau semen hidrolik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat. Seiring dengan penambahan umur, beton akan semakin mengeras dan akan mencapai kekuatan rencana pada usia 28 hari. Beton merupakan bahan konstruksi yang banyak digunakan pada bangunan struktur. Bisa dikatakan semua bangunan struktur dibangun menggunakan beton sebagai bahan konstruksi utama, contohnya struktur gedung, struktur bangunan air, struktur bangunan transportasi dan banyak lagi bangunan struktur lainnya.

Proses awal terbentuknya beton adalah pasta semen yaitu proses hidrasi antara air dengan semen, selanjutnya apabila ditambahkan dengan agregat halus maka menjadi mortar dan jika ditambahkan dengan agregat kasar akan menjadi beton dengan atau tidak menggunakan bahan tambah (*admixture*) (Mulyono, 2019).

Menurut Tumpu dkk (2022), Komposisi material beton didapatkan dari hasil analisis *mix design*, dicampur merata hingga homogen setelah itu dituang ke dalam pencetak. Hasil adukan beton tersebut jika didiamkan akan menjadi keras akibat reaksi kimia antara semen dengan air atau dapat dikatakan bahwa adukan beton akan bertambah keras seiring dengan waktu (umur beton). Kualitas mutu beton bergantung pada bahan dasar penyusun beton, bahan tambah, pelaksanaan pada saat dibuat dan alat-alat yang dipakai saat pembuatan adukan beton. Kualitas mutu beton bisa dikatakan baik kalau bahan yang digunakan baik, cara mengaduk yang baik (*homogen*), proses pelaksanaan yang dilakukan baik, alat-alat yang dipakai juga baik dan tingkat porositasnya kecil.

2.2.1 Kelebihan Dan Kekurangan Beton

Menurut Tjokrodimuljo (2007) beton memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan sebagai berikut.

1. Kelebihan

- a. Harga yang relatif lebih murah karena menggunakan bahan-bahan dasar yang umumnya mudah didapat
- b. Termasuk bahan yang awet, tahan aus, tahan panas, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan menjadi lebih murah
- c. Mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi sehingga jika dikombinasikan dengan baja tulangan yang mempunyai kuat tarik tinggi sehingga dapat menjadi satu kesatuan struktur yang tahan tarik dan tahan tekan, untuk itu struktur beton bertulang dapat diaplikasikan atau dipakai untuk pondasi, kolom, balok, dinding, perkerasan jalan, landasan pesawat udara, penampung air, pelabuhan, bendungan, jembatan dan sebagainya
- d. Pengerjaan (*workability*) mudah karena beton mudah untuk dicetak dalam bentuk dan ukuran sesuai keinginan. Cetakan beton dapat dipakai beberapa kali sehingga secara ekonomi menjadi lebih murah.

2. Kekurangan

- a. Bahan dasar penyusun beton agregat halus maupun agregat kasar bermacam-macam sesuai dengan lokasi pengambilannya, sehingga cara perencanaan dan cara pembuatannya bermacam-macam
- b. Beton mempunyai beberapa kelas kekuatannya sehingga harus direncanakan sesuai dengan bagian bangunan yang akan dibuat, sehingga cara perencanaan dan cara pelaksanaan bermacam-macam pula
- c. Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga getas atau rapuh dan mudah retak. Oleh karena itu perlu diberikan cara-cara untuk mengatasinya, misalnya dengan memberikan baja tulangan, serat baja dan sebagainya agar memiliki kuat tarik yang tinggi.

2.2.2 Jenis-Jenis Beton

Menurut Mulyono (2006) secara umum beton dibedakan menjadi dua

kelompok, yaitu sebagai berikut.

1. Beton Berdasarkan Kelas dan Mutu Beton

Kelas dan mutu beton dibedakan menjadi 3 kelas sebagai berikut.

a. Beton Kelas I

Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan non struktural. Untuk pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahan-bahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Mutu kelas I dinyatakan dengan B0.

b. Beton Kelas II

Beton kelas II adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Beton kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar B1, K 125, K 175, dan K

225. Pada mutu B1, pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan terhadap mutu bahan-bahan sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Pada mutu-mutu K 125 dan K 175 dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinu dari hasil-hasil pemeriksaan benda uji.

c. Beton Kelas III

Beton kelas III adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural yang lebih tinggi dari K 225. Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Disyaratkan adanya laboratorium beton dengan peralatan yang lengkap serta dilayani oleh tenaga-tenaga ahli yang dapat melakukan pengawasan mutu beton secara kontinu.

2. Beton Berdasarkan Jenisnya

a. Beton Ringan

Beton ringan merupakan beton yang dibuat dengan bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan bobot beton normal. Agregat yang digunakan untuk memproduksi beton ringan pun merupakan agregat ringan juga. Agregat yang digunakan umumnya merupakan hasil dari pembakaran shale, lempung, slates, residu slag, residu batu bara dan banyak lagi hasil pembakaran vulkanik. Berat jenis agregat ringan sekitar 1900 kg/m^3 atau berdasarkan kepentingan penggunaan strukturnya berkisar antara 1440 kg/m^3 - 1850 kg/m^3 , dengan kekuatan tekan umur 28 hari lebih besar dari 17,2 MPa.

b. Beton Normal

Beton normal adalah beton yang menggunakan agregat pasir sebagai agregat halus dan batu pecah sebagai agregat kasar sehingga mempunyai berat jenis beton antara 2200 kg/m^3 - 2400 kg/m^3 dengan kuat tekan sekitar 15 - 40 MPa.

c. Beton Berat

Beton berat adalah beton yang dihasilkan dari agregat yang memiliki berat isi lebih besar dari beton normal atau lebih dari 2400 kg/m^3 . Untuk menghasilkan beton berat digunakan agregat yang mempunyai berat jenis yang besar.

d. Beton Massa (*Mass Concrete*)

Mass Concrete atau beton massa ialah beton yang dituang dalam volume besar yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaannya besar. Biasanya dianggap beton massa jika dimensinya lebih dari 60 cm. Beton massa digunakan untuk pekerjaan beton yang besar dan masif, misalnya untuk proyek bendungan, kanal, fondasi, dan jembatan.

e. Beton Serat

Beton serat adalah beton komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan lain yang berupa serat. Bahan serat dapat berupa serat asbes, serat tumbuh-tumbuhan (rami, bambu, ijuk), serat plastik (*polypropylene*) atau potongan kawat logam.

f. Beton Non Pasir

Beton non pasir adalah suatu bentuk sederhana dan jenis beton ringan yang diperoleh menghilangkan bagian halus agregat pada pembuatannya. Rongga dalam beton mencapai 20-25 %.

g. Beton Siklop

Beton siklop sama dengan beton normal namun agregat yang digunakan memiliki ukuran yang besar. Ukurannya bisa mencapai 20 cm. Namun, proporsi agregat yang lebih besar tidak boleh lebih dari 20 %.

h. Beton Hampa (*Vacuum Concrete*)

Beton hampa adalah beton yang dibuat seperti beton biasa namun setelah tercetak padat kemudian air sisa reaksi disedot secara khusus. Dengan demikian air yang tinggal hanyalah air yang dipakai untuk bereaksi dengan semen sehingga beton yang diperoleh sangat kuat.

Menurut SNI 03-6468-2000 pembagian mutu beton terdiri dari tiga kategori:

1) Beton mutu rendah (*low strength concrete*)

Beton mutu rendah adalah beton yang memiliki kuat tekan 10-15 MPa dan biasanya digunakan sebagai lantai kerja, sedangkan untuk beton mutu rendah yang memiliki kuat tekan 16-20 MPa pada umumnya digunakan pada struktur tanpa tulangan seperti siklop, trotoar dan pasangan batu kosong yang diisi adukan, pasangan batu.

2) Beton mutu sedang (*medium strength concrete*)

Beton mutu sedang memiliki kuat tekan sekitar 21-40 MPa yang biasanya

digunakan untuk beton bertulang seperti pelat lantai jembatan, gelagar beton bertulang, diafragma, gorong-gorong beton bertulang, kerb beton pracetak, dan bangunan bawah jembatan.

3) Beton mutu tinggi (*high strength concrete*)

Beton mutu tinggi yang memiliki kuat tekan >40 MPa yang pada umumnya digunakan untuk beton prategang seperti tiang pancang, pelat beton prategang, gelagar beton prategang dan sejenisnya.

2.3 Geopolimer

Geopolimer didefinisikan sebagai bahan yang digunakan sebagai alternatif pengganti semen agar lebih ramah terhadap lingkungan, karena material yang digunakan tersusun dari bahan sintesa-bahan alam non organik melalui proses polimerisasi, dari pengertian geopolimer diatas dapat diartikan bahwa beton geopolimer adalah beton ramah lingkungan yang mengganti semen yang berfungsi sebagai pengikat dengan bahan yang ramah lingkungan. Bahan utama untuk pembentukan geopolimer yang memiliki ikatan alumino-silikat harus kaya akan silika dan aluminium. Bahan buatan seperti abu terbang merupakan material yang paling potensial sebagai bahan dasar beton geopolimer (Ikomudin *et al*, 2016).

Geopolimer, suatu pengikat anorganik, merupakan alternatif yang layak untuk semen portland. Seorang ilmuwan Perancis, Joseph Davidovits menciptakan kata geopolimer pada tahun 1991 untuk mewakili berbagai bahan yang dicirikan oleh jaringan molekul anorganik. Ini adalah pengikat yang diaktifkan alkali, dihasilkan oleh reaksi polimer cairan alkali dengan silikon dan aluminium oksida dalam bahan sumber asal geologi, seperti metakaolinit (kaolinit terkalsinasi), atau bahan produk sampingan seperti abu terbang. (Nagalia *et al*, 2016).

2.4 Material Penyusun Beton

2.4.1 Semen

Menurut Parsika (2019), Semen adalah suatu bahan perekat kimia yang

memberikan perkerasan terhadap material campuran lainnya menjadi suatu bentuk yang kaku dan dapat bertahan lama. Bahan alami seperti kapur dan tanah liat memiliki banyak keterbatasan, sementara semen dapat diproduksi dalam kondisi yang terkontrol, dikemas dan dapat dengan mudah diangkut dan disimpan di tempat yang diperlukan. Kapur dan tanah liat merupakan bahan alami yang memiliki banyak keterbatasan, oleh sebab itu semen diproduksi dengan kondisi terkontrol yang kemudian dikemas serta dapat diangkut ke tempat yang diperlukan dengan mudah.

Dalam bubuk semen, ada banyak bahan mineral dan senyawa kimia yang terkandung didalamnya. Setiap bahan kandungan tertentu dapat memengaruhi kualitas dari semennya. Secara umum semen merupakan bubuk berwarna abu-abu gelap yang terbuat dari Alkali, Magnesium Oksida, Alumina, kapur, Sulfur Trioksida, *Iron Oxide* dan Silika.

Semen dalam pengertian umum merupakan bahan yang mempunyai sifat *adhesive* dan *cohesive*, digunakan sebagai bahan pengikat (*bonding material*), yang dipakai bersama-sama dengan batu kerikil dan pasir. Semen dapat dibagi atas dua kelompok, yaitu:

1. Semen non hidraulis adalah semen yang tidak dapat mengeras dalam air atau tidak stabil dalam air. Contoh semen non hidraulis (*hydraulic binder*) adalah *lime*, dimana *lime* ini adalah perekat klasik dalam bangunan yang dibuat dengan memanaskan *limestone* pada suhu 850°C.
2. CaCO₃ dari *limestone* akan melepaskan CO₂ dan menghasilkan *burn lime* atau *quick lime* (CaO).



Produk ini bereaksi cepat dengan air yang akan menghasilkan Ca(OH)₂ di dalam butiran yang halus dan Ca(OH)₂ yang tidak dapat mengeras dalam air akan tetapi dapat mengeras apabila bereaksi dengan CO₂ dari udara membentuk CaCO₃ kembali.

3. Semen hidraulis adalah semen yang dapat mengeras dalam air yang menghasilkan padatan yang stabil dalam air. Oleh karena mempunyai sifat hidraulis, maka semen hidraulis bersifat:

- Dapat mengeras bila dicampur air
- Tidak larut dalam air
- Dapat mengeras walau didalam air

Contoh semen hidraulis adalah semen Portland, semen campur, semen khusus dan sebagainya.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia S-04-1989-F, semen merupakan bahan bangunan bukan logam, ada 5 tipe semen yang sering digunakan di Indonesia, yaitu:

1. Semen Tipe I: digunakan pada konstruksi umum, tidak perlu syarat khusus.
2. Semen Tipe II: digunakan pada konstruksi tahan
3. terhadap sulfat dan hidrasi sedang.
4. Semen Tipe III: digunakan pada konstruksi yang memiliki kuat tekan awal tinggi.
5. Semen Tipe IV: digunakan pada konstruksi yang memiliki hidrasi rendah.
6. Semen Type V: digunakan pada konstruksi yang tahan sulfat.

Tabel 1. Syarat Kimia Utama Semen Portland

No.	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum	-	20,0	-	-	-
2	Al ₂ O ₃ , maksimum	-	6,0	-	-	-
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum	-	6,0	-	6,5	-
4	MgO, maksimum	6,0	6,0	-	6,0	6,0
5	maksimum Jika C ₃ A ≤ 8,0 Jika C ₃ A > 8,0	3,0		3,5		
		3,5	3,0	4,5	2,3	2,3
6	Hilang pijar, maksimum	5,0	3,0	3,0	2,5	3,0
7	Bagian tak larut, maksimum	3,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	C ₃ S, maksimum	-	-	-	35	-
9	C ₃ S, minimum	-	-	-	40	-
10	C ₃ A, maksimum	-	8,0	15	7	5
11	C ₄ AF + 2C ₃ A atau C ₄ AF + C ₂ F, maksimum	-	-	0	-	25

Sumber: SNI 15 2049 2004

2.4.2 Agregat

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia T-15-1991-03, material agregat merupakan bahan granular seperti kerak tungku besi, kerikil dan pasir, yang digunakan bersamaan dengan media pengikat yaitu semen dan air dalam pembentukan beton.

Komposisi agregat tersebut menempati sekitar 60%-70% dari berat campuran beton, hanya sebagai pengisi, tetapi dengan melihat komposisinya yang cukup besar dalam suatu campuran, maka agregat inipun menjadi penting. Untuk itu perlu dipelajari karakteristik yang akan menentukan sifat dari mortar atau beton yang akan di bentuk nantinya. Agregat dapat berasal dari alam ataupun dari agregat buatan (*artificial aggregates*) (Mulyono, 2019).

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butiran-butiran agregat mempunyai ukuran sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butir-butirnya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori diantara butiran yang besar, sehingga pori-pori menjadi sedikit, dengan kata lain kemampuan menjadi tinggi (Tjokrodimulyo, 2007).

2.4.2.1 Agregat Halus

Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (SNI 1970:2016).

Agregat halus ini dapat diperoleh dari dalam tanah ataupun dasar sungai dan tepi laut. Oleh karena itu, pasir digolongkan menjadi 3 macam, yaitu: pasir galian; pasir sungai; dan pasir laut. Sedangkan, ukuran agregat halus (pasir) dibagi menjadi 4 zona yang diketahui dari uji gradasi ditunjukkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Batas Gradasi Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Presentase Lolos			
	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 2834 2000

Keterangan:

- Daerah agregat halus I : Pasir Kasar
 Daerah agregat halus II : Pasir Agak Kasar
 Daerah agregat halus III : Pasir Agak Halus
 Daerah agregat halus IV : Pasir Halus

2.4.2.2 Agregat Kasar

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm sampai 40 mm (SNI 1969:2016).

Untuk menghasilkan beton dengan kekompakan yang baik, diperlukan gradasi agregat yang baik, dimana ukuran maksimal agregat kasar dikelompokkan menjadi 3 golongan yang dapat diketahui melalui uji gradasi yang akan ditunjukkan pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Batas Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Saringan (mm)	Presentasi Lolos (%) Gradasi Agregat		
	40 mm	20 mm	10 mm
76	100	-	-
38	95 - 100	100	-
19	35 - 70	95 - 100	100
9,6	10 - 40	30 - 60	50 - 85
4,8	0 - 5	0 - 10	0 - 10

Sumber: SNI 03 2834 2000

2.4.3 Air

Fungsi air pada campuran beton adalah digunakan untuk reaksi kimia dalam pengikatan campuran beton sehingga terjadi proses pengerasan beton dan menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat dalam adukan beton sehingga mudah dipadatkan pada saat dituang pada media yang akan dicor. Kebutuhan air sebesar 25 % dari berat semen. Kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh air, air yang berlebih akan menyebabkan penurunan kekuatan beton dan bisa mengakibatkan terjadi *bleeding* yaitu air semen naik ke permukaan beton segar baru saja selesai dituang. Jika terjadi *Bleeding* maka dapat menyebabkan terjadi berkurangnya lekatan beton antara lapis permukaan dengan beton lapisan di bawahnya (Tumpu dkk, 2022).

Air yang dapat di minum umumnya dapat di pergunakan sebagai campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya, bila di pakai dalam campuran beton akan menyebabkan penurunan kualitas beton yang di hasilkan dan juga akan mengubah sifat-sifat beton yang di buat. Karena karakter pasta semen merupakan hasil reaksi kimia antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total berat campuran yang di tinjau, tetapi hanya perbandingan antara air dengan semen saja atau biasa di sebut faktor air semen (*water cement ratio*). Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang sedikit akan menyebabkan proses hidrasi seluruhnya tidak akan tercapai, yang pada akhirnya akan mempengaruhi kekuatan mutu beton yang tidak akan tercapai (Mulyono, 2019).

Dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut (Tjokrodimuljo, 2007):

- a. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
- b. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
- c. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
- d. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter

2.4.4 Abu Terbang

Berdasarkan SNI 2460-2014, abu terbang atau yang dikenal dengan *fly ash* adalah residu halus yang dihasilkan dari pembakaran atau pembubukan batubara dan ditransportasikan oleh aliran udara panas. *Fly ash* diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu sebagai berikut:

a. Kelas N

Buangan atau pozzolan alam terkalsinasi yang dipenuhi dengan kebutuhan yang memenuhi syarat yang dapat dipakai sesuai kelasnya, seperti beberapa tanah diatomaceous, opalinse chert dan serpihan-serpihan tuff dan debu-debu vulkanik atau pumicities, dan bahan-bahan lainnya yang mungkin masih belum terproses oleh kalsinasi; dan berbagai material yang memerlukan kalsinasi untuk memperoleh sifat-sifat yang memuaskan, misalnya beberapa jenis tanah liat dan serpihan-serpihan.

b. Kelas F

Abu batubara yang umumnya diproduksi dari pembakaran anthracite (batubara keras yang mengkilat) atau bitumen-bitumen batubara yang memenuhi syarat-syarat yang dapat dipakai untuk kelas ini seperti yang disyaratkan. Abu batubara jenis ini memiliki sifat Pozzolanic.

c. Kelas C

Abu batubara yang umumnya diproduksi dari lignite atau batubara subitumen yang memenuhi syarat yang dapat dipakai untuk kelas ini seperti yang disyaratkan. Abu batubara kelas ini, selain memiliki sifat 10 pozzolan juga memiliki beberapa sifat yang lebih menyerupai semen. Untuk beberapa abu batubara kelas C bias mengandung kapur lebih tinggi dari 10 %.

Limbah fly ash yang dihasilkan dari pembakaran batubara terdiri dari komponen SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , dan oksida logam lainnya. Komponen minor lainnya yang terdapat pada fly ash adalah Cr, Cd, Pb, dan Hg. Fly ash merupakan produk samping industri yang dikenal sebagai polutan lingkungan (Permatasari, 2023).

Persyaratan kimia fly ash sebagai pengganti semen harus memenuhi

persyaratan sesuai tabel 4

Tabel 4. Syarat Kimia *Fly Ash* Sebagai Pengganti Semen

No.	SENYAWA	KADAR%
1.	Jumlah Oksida $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ Minimum	70
2.	SO_3 maks.	5
3.	Hilang Pijar maks	6
4.	Kadar Air maks	3
5.	Total Alkali dihitung sebagai Na_2O maks	1,5

``SNI 03-2460-1991

Selain itu terdapat pula persyaratan fisika *fly ash* sebagai pengganti semen tercantum pada tabel berikut

Tabel 5. Syarat Fisika *Fly Ash* Sebagai Pengganti Semen

No.	URAIAN	PERSYARATAN
1.	Kehalusan : Jumlah yang tertinggal di atas ayakan no. 325 (0,045 mm) maks %	34
2.	Indeks keaktifan pozolan: 1) dengan menggunakan semen Portland kuat tekan pada umur 28 hari, minimum. 2) dengan menggunakan kapur padam yang aktif, kuat tekan 7 hari, minimum N/mm	75 % KT adukan pembeding. 550
3.	Kekekalan bentuk Pengembangan /penyusutan dengan autoclave, maksimum %	0,8
4.	Jumlah air yang digunakan,	105 % dari jumlah air untuk adukan pembeding
5.	Keseragaman: Berat jenis dan kehalusan dari contoh uji masing-masing tidak boleh banyak berbeda dari rata-rata 10 benda uji atau dari seluruh benda uji yang jumlahnya kurang dari 10 buah, maka untuk : 1) berat jenis, perbedaan maksimum dari rata-rata, % 2) presentasi partikel yang tertinggal pada ayakan no. 325 perbedaan dari rata-rata,	5 5
6.	Pertambahan penyusutan karena pengeringan (pada umur 28 hari maksimum, %)	0,03

7	Reaktifitas dengan alkali semen : Pengembangan mortar pada umur 14 hari, maksimum %	0,02
---	---	------

SNI 03-2460-1991

2.4.5 Admixture

Admixtre yang digunakan pada campuran beton dalam penelitian ini adalah retarder dan superplasticizer. Retarder adalah bahan kimia pembantu untuk memperlambat waktu pengikatan (*setting time*) sehingga campuran akan tetap mudah dikerjakan (*workable*) untuk waktu yang lebih lama. Sedangkan Superplasticizer (*high range water reducer admixtures*) sangat meningkatkan kelecakan campuran. Campuran dengan slump sebesar 7,5 cm akan menjadi 20 cm. Digunakan terutama untuk beton mutu tinggi, karena dapat mengurangi air sampai 30%. Pada prinsipnya mekanisme kerja dari setiap superplasticizer sama, yaitu dengan menghasilkan gaya tolak-menolak (*dispersion*) yang cukup antarpartikel semen agar tidak terjadi penggumpalan partikel semen (*flocculate*) yang dapat menyebabkan terjadinya rongga udara di dalam beton, yang akhirnya akan mengurangi kekuatan atau mutu beton tersebut (Nugraha dkk, 2007).

2.5 Emisi Karbon

Emisi karbon adalah pelepasan gas karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer. Gas CO₂ adalah salah satu gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Emisi karbon dapat terjadi secara alami, seperti dari letusan gunung berapi, tetapi sebagian besar emisi karbon saat ini disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan pertanian. Emisi karbon memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan. Hal ini menyebabkan pemanasan global, yang menyebabkan perubahan iklim, seperti kenaikan permukaan laut, cuaca ekstrem, dan hilangnya keanekaragaman hayati.

Pada proses produksi semen, karbon dioksida (CO₂) berasal dari dua sumber utama, yaitu pembakaran bahan bakar fosil dan reaksi kimia. Batu bara digunakan dalam proses pemanasan raw meal, yaitu campuran batu kapur sebagai

material utama semen beserta pasir besi dan silika, dalam kiln pada temperatur sangat tinggi dan menghasilkan terak (klinker). Dalam proses ini, batu kapur mengalami kalsinasi untuk menghasilkan kalsium oksida (CaO) yang berperan dalam proses hidrasi semen dan melepaskan karbon dioksida (CO₂) ke udara (Fauziyah dkk, 2023).

2.6 Resistivity

Menurut Timotius (2014), Prinsip metode resistivitas adalah dengan mengalirkan arus listrik melalui kontak dua elektroda arus, kemudian diukur distribusi potensial yang dihasilkan. Pengukuran Resistivitas dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti homogenitas batuan, kandungan air, porositas, permeabilitas, dan kandungan mineral. pengukur resistivitas yang menerapkan arus bolak-balik dan mengukur penurunan potensial pada permukaan berlawanan dari spesimen setelah menerapkan koreksi terhadap penurunan potensial yang disebabkan oleh spons basah. Resistivity ρ dalam Ωm ditentukan dengan menggunakan Persamaan (1)

$$\rho = A \left(\frac{R}{L} \right) \quad (1)$$

Dimana R adalah tahanan atau resistansi (Ω), A adalah luas permukaan arus mengalir (m^2), dan L adalah jarak antar probes (m).

Daya tahan beton sangat bergantung pada sifat struktur mikronya, seperti distribusi ukuran pori dan bentuk interkoneksinya (yaitu berliku-liku). Jaringan pori yang lebih halus, dengan konektivitas yang lebih sedikit, menyebabkan permeabilitas yang lebih rendah. Sebaliknya, struktur mikro berpori dengan tingkat interkoneksi yang lebih besar menghasilkan permeabilitas yang lebih tinggi dan mengurangi daya tahan secara umum. Ide utama di balik sebagian besar teknik resistivitas listrik adalah untuk mengukur sifat konduktif struktur mikro beton. Secara keseluruhan, resistivitas listrik beton dapat digambarkan sebagai kemampuan beton untuk menahan perpindahan ion yang terkena medan listrik. Dalam konteks ini, pengukuran resistivitas dapat digunakan untuk menilai ukuran dan tingkat interkoneksi pori-pori (Layssi, 2015).

2.7 Ultrasonic puls velocity (UPV)

Dalam SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang melalui Beton dimana pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dilakukan dengan merambatkan gelombang longitudinal yang dipancarkan oleh transduser elektro akustik yang berhubungan dengan salah satu permukaan beton yang diuji. Setelah melalui beton, rambat gelombang diterima dan dikonversikan menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang berjarak L dari transduser pemancar. Waktu tempuh T diukur secara elektronik. Kecepatan rambat gelombang V dihitung dengan membagi L dengan T . Kecepatan rambat gelombang, V , dari gelombang longitudinal dalam suatu massa beton berhubungan dengan sifat elastisitas dan kerapatan, sesuai dengan persamaan (2).

$$V = \frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (2)$$

Keterangan:

E adalah modulus elastisitas dinamis μ adalah rasio poisson dinamis

ρ adalah kerapatan beton

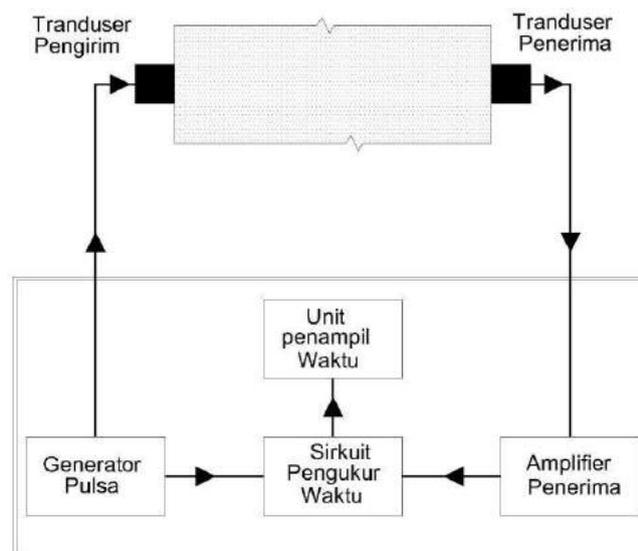
Pengujian kecepatan rambat gelombang melalui beton ini digunakan untuk menilai atau mengetahui keseragaman dan mutu relatif beton, mendeteksi adanya rongga dan retak, dan untuk mengevaluasi efektivitas perbaikan retak. Pengujian ini juga dapat digunakan untuk mengetahui adanya perubahan sifat-sifat beton dan pada pemeriksaan suatu struktur untuk memperkirakan tingkat kerusakan atau retakan pada beton. Apabila digunakan untuk mengamati perubahan-perubahan kondisi pada periode tertentu, lokasi uji harus diberi tanda pada struktur untuk memastikan pengujian dapat diulang pada posisi yang sama.

Tingkat kejenuhan beton mempengaruhi kecepatan rambat gelombang, dan faktor ini harus dipertimbangkan jika mengevaluasi hasil uji. Sebagai tambahan, kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air kurang sensitif terhadap perubahan-perubahan mutu beton relatif. Kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air dapat mencapai 5 % lebih tinggi daripada beton yang kering.

Kecepatan rambat gelombang tidak tergantung pada ukuran obyek pengujian, pantulan gelombang dari sisi benda uji tidak berpengaruh pada waktu tiba dari kecepatan rambat gelombang yang dipancarkan langsung. Dimensi terkecil dari objek pengujian harus lebih besar dari panjang gelombang getaran ultrasonik.

Ketelitian pengukuran bergantung dari kemampuan operator dalam menentukan jarak yang tepat antara transduser pengirim dan transduser penerima dan kemampuan peralatan untuk mengukur dengan tepat waktu tempuh kecepatan rambat gelombang. Kuat sinyal yang diterima dan waktu tempuh yang terukur dipengaruhi oleh penempatan pasangan transduser pada permukaan beton. Bahan perantara (coupling agent) dan tekanan yang cukup harus diaplikasikan pada transduser untuk menjamin waktu tempuh yang stabil. Kuat sinyal yang diterima juga dipengaruhi oleh jarak tempuh serta tingkat keretakan atau penurunan mutu beton yang diuji.

Peralatan untuk pengujian, ditunjukkan secara skematik pada Gambar 1, terdiri dari generator kecepatan rambat gelombang, sepasang alat transduser (pengirim dan penerima), amplifier, sirkuit pengukur waktu, unit untuk menampilkan waktu, dan kabel penghubung.



Gambar 1. Skematik Pengujian UPV

Dalam perhitungan nilai kecepatan rambat gelombang dapat dihitung menggunakan

persamaan (3) sebagai berikut.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3)$$

Keterangan:

V adalah kecepatan rambat gelombang, meter per sekon (m/s)

L adalah jarak antara pusat permukaan transduser, meter (m)

T adalah waktu tempuh, sekon (s)

Tabel 6. tingkat kualitas beton berdasarkan uji UPV

Kecepatan rambat gelombang ultrasonic (UPV) (m/s)	Kualitas Beton
> 4500	Sangat baik
3500 – 4500	Baik
3000 – 3500	Cukup Baik
2000 - 3000	Buruk
< 2000	Sangat Buruk

2.8 Pengujian Kuat Tekan

Menurut SNI 1974:1990, kuat tekan beton yaitu besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan.

Selanjutnya Mulyono (2006) mengemukakan bahwa kuat tekan beton mengidentifikasi mutu sebuah struktur di mana semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Nilai kuat benda uji dapat dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang rata dan dinyatakan dengan dibulatkan ke 1 (satu) desimal dengan satuan 0,1 MPa (SNI 1974:2011), yang dinyatakan dalam persamaan (4)

$$\text{Kuat tekan beton} = \frac{P}{A} \quad (4)$$

dengan pengertian:

Kuat tekan beton dengan benda uji silinder, dinyatakan dalam MPa atau

N/mm^2

P adalah gaya tekan aksial, dinyatakan dalam Newton (N)

A adalah luas penampang melintang benda uji, dinyatakan dalam mm^2

Beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan tekan beton. Ada empat bagian utama yang mempengaruhi mutu dari kekuatan beton, antara lain sebagai berikut:

1. Proporsi bahan-bahan penyusunnya.
2. Metode perancangan.
3. Perawatan.
4. Keadaan pada saat pengecoran dilaksanakan, yang terutama dipengaruhi oleh lingkungan setempat.

2.8.1 Peralatan Pengujian

Menurut SNI 1974 2011, mesin pengujian yang digunakan harus berupa tipe yang memiliki kapasitas yang cukup dan mampu memberikan kecepatan beban secara konstan sebesar 1,3 mm/menit. Beberapa ketentuan peralatan mesin pengujian harus meliputi hal-hal sebagai berikut.

1. Mesin harus dioperasikan dengan tenaga listrik serta harus menggunakan pembebanan yang terus menerus dan tanpa kejutan. Jika mesin hanya memiliki satu kecepatan pembebanan sesuai persyaratan pada 6.4, mesin harus dilengkapi dengan alat tambahan untuk pembebanan pada kecepatan beban yang sesuai untuk keperluan verifikasi. Alat tambahan untuk pembebanan ini dapat dioperasikan dengan tenaga listrik maupun secara manual;
2. Kehancuran silinder beton dengan kuat tekan tinggi, pada umumnya memiliki daya sebar pecahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan silinder beton dengan kuat tekan normal. Untuk keselamatan disarankan melengkapi alat uji dengan peralatan pelindung (semacam terali penutup di sekeliling benda uji);

3. Ruang yang disediakan untuk benda uji harus cukup luas memberikan tempat bagi alat kalibrasi, semacam alat kalibrasi elastis dengan kapasitas yang mencakup batasan beban yang mungkin terjadi pada mesin tekan serta sesuai dengan persyaratan. Alat kalibrasi harus ditempatkan pada posisi yang dapat dibaca. Tipe alat kalibrasi elastis yang umum tersedia dan yang umum digunakan adalah proving ring atau sel pembebanan (load cell).

2.8.2 Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam pengujian kuat tekan beton ini ialah benda uji berbentuk silinder yang dimana terdapat beberapa ketentuan dalam pemilihan benda uji, sebagai berikut.

1. Benda uji tidak diperkenankan untuk diuji jika salah satu diameternya berbedalebih dari 2% dengan diameter bagian lainnya dari benda uji yang sama. Hal ini dapat terjadi bila cetakan sekali pakai rusak atau berubah bentuk pada saat pemindahan, pada saat cetakan sekali pakai yang bersifat fleksibel berubah bentuk ketika pencetakan atau bila pengeboran inti bergeser waktu pengeboran.
2. Tidak satupun dari benda uji tekan diperkenankan berbeda dari posisi tegak lurus
3. Terhadap sumbu lebih dari 0,5' (kira-kira sama dengan 3 mm untuk setiap 300 mm). Ujung benda uji tekan yang tidak rata sebesar 0,050 mm harus dilapisi kaping, dipotong atau digosok sesuai dengan SNI 03-6369-2000, atau jika ujung-ujungnya memenuhi persyaratan, lapis neoprene dengan pengontrol baja dapat digunakan sebagai pelapis. Diameter yang digunakan untuk perhitungan luas penampang melintang dari benda uji harus ditetapkan mendekati 0,25 mm dari rata-rata 2 (dua) diameter yang diukur tegak lurus ditengah-tengah benda uji.
4. Jumlah silinder yang diukur untuk menetapkan diameter rata-rata dapat dikurangi

5. Menjadi 1 (satu) untuk 10 (sepuluh) benda uji atau 3 (tiga) benda uji per hari, pilih mana yang lebih besar, bila benda uji diketahui dibuat dari satu kelompok cetakan yang dapat digunakan kembali atau cetakan sekali pakai yang secara konsisten menghasilkan benda uji dengan diameter rata-rata dalam rentang 0,5 mm. Bila diameter rata-rata tidak di dalam rentang 0,5 mm atau bila silinder tidak dibuat dari satu kelompok cetakan, masing-masing silinder yang diuji harus diukur dan nilai ini harus digunakan dalam perhitungan kuat tekan satuan benda uji itu. Bila diameter diukur pada frekuensi yang dikurangi, luas penampang melintang yang diuji pada hari tersebut harus dihitung dari rata-rata diameter 3 (tiga) silinder atau lebih yang dianggap mewakili grup yang diuji hari tersebut.
6. Panjang harus diukur sampai mendekati $0,05 D$ (diameter penampang benda uji) bila perbandingan panjang terhadap diameter kurang dari 1,8 atau lebih dari 2,2, atau bila isi silinder ditetapkan dari dimensi yang diukur.
7. Panjang dan diameter benda uji silinder memiliki perbandingan tertentu dimana benda uji standar memiliki rasio $L/D \approx 1,8$ sampai dengan 2,2 dengan faktor koreksi = 1.

2.8.3 Kecepatan Pembebanan

Dalam SNI 1974 2011, pengujian kuat tekan beton yang dilakukan menggunakan mesin uji kuat tekan dengan melakukan pembebanan hingga benda uji hancur. Pembebanan dilakukan secara terus-menerus dan tanpa kejutan dengan memenuhi ketentuan sebagai berikut.

1. Untuk mesin penguji tipe ulir, kepala mesin tekan yang bergerak harus bergerak pada kecepatan mendekati 1,3 mm/menit, pada saat mesin bergerak tanpa beban. Untuk mesin yang digerakan secara hidrolis, beban harus diberikan pada kecepatan gerak yang sesuai dengan kecepatan pembebanan pada benda uji dalam rentang 0,15 MPa/detik sampai dengan 0,35 MPa/detik. Kecepatan gerak yang ditentukan harus dijaga minimal selama setengah pembebanan terakhir dari fase pembebanan

yang diharapkan dari siklus pengujian;

2. Selama periode $\frac{1}{2}$ (setengah) pertama dari 1 (satu) fase pembebanan yang diharapkan, pembebanan yang lebih cepat diperbolehkan;
3. Jangan membuat perubahan pada kecepatan gerak dari dasar mendatar kapanpun saat benda uji kehilangan kekakuan secara cepat sesaat sebelum hancur.