

SKRIPSI

**PERILAKU TEKAN BETON YANG TERBUAT DARI *FLY ASH*
DAN SEMEN CAMPURAN**

**COMPRESSIVE BEHAVIOR OF CONCRETE MADE FROM
FLY ASH AND MIXED CEMENT**

Disusun dan diajukan oleh:

M. JABAL NUR

D011 20 1011



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL FAKULTAS

TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**PERILAKU TEKAN BETON YANG TERBUAT DARI *FLY ASH*
DAN SEMEN CAMPURAN**

Disusun dan diajukan oleh

M. JABAL NUR
D011 20 1011

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,



Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng.
NIP. 198604092019043001

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng
NIP. 196805292002121002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : M. Jabal Nur
NIM : D011 20 1011
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{ PERILAKU TEKAN BETON YANG TERBUAT DARI *FLY ASH* DAN SEMEN CAMPURAN }

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 resiko.

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,



M. Jabal Nur

ABSTRAK

M. JABAL NUR. *Perilaku Tekan Beton yang Terbuat dari Fly Ash dan semen campuran* (dibimbing oleh H. M. Wihardi Tjaronge dan Akbar Caronge).

Beton merupakan salah satu bahan bangunan yang banyak dipakai di Indonesia dalam pembangunan gedung, jembatan, dermaga, dan lain-lain. Pemanfaatan limbah hasil pembakaran batu bara, yaitu abu batu (*fly ash*) PLTU menjadi salah satu solusi dalam mengatasi masalah tersebut. Jumlah limbah ini cukup besar karena PT PLN masih mengandalkan sebagian besar sumber energi dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan pada tahun 2018, proyeksi kebutuhan batubara hingga 2027 sebesar 162 juta ton. Prediksi potensi *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) yang dihasilkan sebesar 16,2 juta ton, dengan asumsi 10% dari pemakaian batubara. Pemanfaatan *fly ash* sendiri akan sangat membantu dalam menyelamatkan lingkungan dari berbagai macam masalah, seperti pencemaran udara, penurunan kualitas ekosistem, dan juga perairan. Dalam penelitian ini terdapat 3 sampel beton dari tiap variasi, dimana variasi tersebut yaitu beton normal, dan beton substitusi semen campuran dengan komposisi 15%FA, 30%FA, dan 45%FA. Tujuan dilakukan penelitian ini adalah untuk mengetahui mengidentifikasi perilaku kuat tekan beton yang terbuat dari *fly ash* dan semen campuran. Penelitian ini dilakukan pengujian perilaku mekanik berupa pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas. Perawatan beton dilakukan dengan cara beton direndam dalam bak curing. Pengujian kuat tekan yang dilaksanakan pada umur 7 dan 28 hari. Dari hasil pengujian didapatkan nilai kuat tekan beton tertinggi terdapat pada penggunaa 15%FA pada umur 28 hari dengan nilai kuat tekan beton rata-rata 18,4 N/mm².

Kata Kunci: *Fly Ash*, Kuat Tekan, Modulus elastisitas, Beton.

ABSTRACT

M. JABAL NUR. Compressive Behavior of Concrete Made from Fly Ash and mixed cement (supervised by H. M. Wihardi Tjaronge and Akbar Caronge).

Concrete is a building material that is widely used in Indonesia in the construction of buildings, bridges, docks, etc. Utilizing waste from burning coal, namely fly ash from PLTUs, is one solution to overcome this problem. This amount of waste is quite large because PT PLN still relies mostly on energy sources from coal-fired power plants. Based on data from the Directorate General of Electricity in 2018, the projected need for coal until 2027 is 162 million tons. The predicted potential for fly ash and bottom ash (FABA) produced is 16.2 million tons, assuming 10% of coal consumption. The use of fly ash itself will really help in saving the environment from various problems, such as air pollution, decreasing the quality of ecosystems and also waters. In this study there were 3 concrete samples from each variation, where these variations were normal concrete, and mixed cement substitute concrete with compositions of 15% FA, 30% FA, and 45% FA. The aim of this research is to identify the compressive strength behavior of concrete made from fly ash and mixed cement. This research carried out mechanical behavior testing in the form of compressive strength and elastic modulus tests. Concrete treatment is carried out by immersing the concrete in a curing bath. Compressive strength tests were carried out at 7 and 28 days. From the test results, it was found that the highest concrete compressive strength value was found when using 15% FA at 28 days with an average concrete compressive strength value of 18.4 N/mm².

Keywords: Fly Ash, Compressive Strength, Modulus of Elasticity, Concrete.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH Error! Bookmark not defined.	
ABSTRAK	iii
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.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
BAB II.....	4
TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Beton.....	4
2.2 Penelitian Terdahulu	5
2.3 Bahan Penyusun Beton	7
2.4 Sifat-Sifat Mekanis Beton.....	17
BAB III.....	23
3.1 Lokasi Penelitian	23
3.2 Metode Penelitian dan Sumber Data	23
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	23
3.4 Pemeriksaan Karakteristik Material.....	25
3.5 Pembuatan Benda Uji	25
3.6 Metode Pemeriksaan <i>Slump Test</i>	26
3.7 Perawatan (<i>curing</i>) Benda Uji.....	26
3.8 Pengujian Benda Uji	27

BAB IV	30
4.1 Karakteristik Material	30
4.2 Rancangan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>).....	32
4.3 Nilai <i>Slump</i>	33
4.4 Kuat Tekan	33
4.5 Regangan Puncak.....	35
4.6 Hubungan Tegangan Regangan.....	36
4.7 Modulus Elastisitas	41
4.8 Toughness	41
4.9 Pola Keruntuhan Beton Silinder	43
BAB V.....	46
KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1 Kesimpulan.....	46
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
Lampiran Dokumentasi.....	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Grafik hubungan tegangan regangan.....	19
Gambar 2 Area toughness di bawah kurva tegangan regangan.....	20
Gambar 3 Menunjukkan bentuk kehancuran benda uji	21
Gambar 4 Material beton	24
Gambar 5 Curing air benda uji	27
Gambar 6 Pengujian modulus elastisitas	29
Gambar 7 Hasil analisa kuat tekan pada beton umur 7 hari dan 28 hari	34
Gambar 8 Hasil analisa regangan puncak pada beton umur 7 dan 28 hari	35
Gambar 9 Hubungan tegangan regangan pada beton normal umur 7 hari.....	36
Gambar 10 Hubungan tegangan regangan pada beton 15%FA umur 7 hari.....	37
Gambar 11 Hubungan tegangan regangan pada beton 30%FA umur 7 hari.....	37
Gambar 12 Hubungan tegangan regangan pada beton 45%FA umur 7 hari.....	38
Gambar 13 Hubungan tegangan regangan pada beton C umur 28 hari	39
Gambar 14 Hubungan tegangan regangan pada beton 15%FA umur 7 hari.....	39
Gambar 15 Hubungan tegangan regangan pada beton 30%FA umur 28 hari.....	40
Gambar 16 Hubungan tegangan regangan pada beton 45%FA umur 28 hari.....	40
Gambar 17 Hasil analisa toughness benda uji umur 7 hari	42
Gambar 18 Hasil analisa toughness benda uji umur 28 hari	42
Gambar 19 Hasil pola keruntuhan sampel beton normal C umur 7 hari (a); umur 28 hari (b)	43
Gambar 20 Hasil pola keruntuhan sampel beton 15%FA umur 7 hari (a); umur 28 hari (b)	44
Gambar 21 Hasil pola keruntuhan sampel beton 30%FA umur 7 hari (a); umur 28 hari (b)	44
Gambar 22 Hasil pola keruntuhan sampel beton 45%FA umur 7 hari (a); umur 28 hari (b).....	45

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Komposisi kimia <i>fly ash</i> (SNI 2460, 2014)	11
Tabel 2	Batas-batas gradasi agregat halus.....	16
Tabel 3	Pemeriksaan karakteristik agregat kasar.....	25
Tabel 4	Pemeriksaan karakteristik agregat halus.....	25
Tabel 5	Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus.....	30
Tabel 6	Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar.....	31
Tabel 7	Karakteristik <i>fly ash</i>	32
Tabel 8	Rancangan campuran beton.....	32
Tabel 9	Hasil pengujian <i>slump</i>	33
Tabel 10	Hasil pengujian kuat tekan beton umur 7 hari	33
Tabel 11	Hasil pengujian kuat tekan beton umur 28 hari	34
Tabel 12	Hasil analisis nilai modulus elastisitas beton umur 7 hari.....	41
Tabel 13	Hasil analisis nilai modulus elastisitas beton umur 28 hari.....	41

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)
f	Tegangan
ε	Regangan
ΔL	Perubahan panjang (mm)
L0	Panjang awal (mm)
E	Modulus elastisitas (N/mm ²)
S2	Tegangan pada 40% tegangan runtuh (N/mm ²)
S1	Tegangan pada saat regangan 0,000050 (N/mm ²)
Wc	Berat volume beton (Kg/m ³)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Persiapan Material	50
Lampiran 2. Dokumentasi Pembuatan Benda Uji	50
Lampiran 3. Dokumentasi Perawatan Benda Uji	51
Lampiran 4. Dokumentasi Pengujian Benda Uji	51

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “PERILAKU TEKAN BETON YANG TERBUAT DARI *FLY ASH* DAN SEMEN CAMPURAN” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng. dan Dr. Eng. Bambang Bakri, ST, MT., selaku ketua dan sekretaris Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., MT., selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng., selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada kami.
5. Bapak Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng., selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
6. Kak Hasan, ST., selaku Laboran Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan selama pelaksanaan penelitian di laboratorium.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

8. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda Jamaluddin dan ibunda Jumahari atas doa, kasih sayangnya, dan segala dukungan selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Rekan-rekan di Laboratorium Riset Eco Material, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Entitas 2021 yang selalu siap untuk direpotkan dalam berbagai hal terlebih dalam penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini. Akhirnya semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayahnya-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Maret 2024
Yang Menyatakan

M. Jabal Nur

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi di Indonesia umumnya dipenuhi dari bahan bakar fosil, batu bara, dan sumber energi baru terbarukan (EBT). Pemerintah telah menerbitkan Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 yang menetapkan rencana umum energi nasional yang akan dilaksanakan pada tahun 2017 hingga 2025. Berdasarkan hal tersebut, pemerintah berencana memproduksi listrik sebesar 135,5 GW, dimana 30% energi listrik berasal dari pembakaran batu bara. Sektor pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu konsumen batu bara terbesar di Indonesia.

Tingginya penggunaan batu bara untuk pembangkit listrik PLTU menyebabkan limbah abu terbang (*flay ash*) menjadi sangat banyak. Pemanfaatan abu terbang di Indonesia baru mencapai 0-0,96% karena hanya beberapa PLTU yang mendapatkan izin dalam pemanfaatannya. Abu terbang yang dihasilkan PLTU menumpuk di tempat penyimpanan yang tanpa mengikuti kriteria penyimpanan limbah B3. Abu terbang yang tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan dampak negatif atau berbahaya bagi lingkungan dan masyarakat di sekitar PLTU. Tumpukan abu terbang yang tidak terlindungi matahari, hujan, dan angin memungkinkan abu terbang menyebar ke media lingkungan dan mengganggu kesehatan masyarakat yang berada di sekitar PLTU.

Abu terbang (*fly ash*) adalah limbah industri yang dihasilkan dari pembakaran batubara dan terdiri dari partikel yang halus. *Fly ash* merupakan material yang memiliki ukuran butiran yang halus, berwarna keabu-abuan, dan mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan unsur tambahan lain. Pemanfaatan batu bara sebagai sumber energi akan menghasilkan abu, khususnya *flay ash* dan *bottom ash*. Kandungan *flay ash* menyumbang 84% dari total abu batubara. Produksi abu terbang batubara global diperkirakan mencapai 500 juta ton per tahun dan jumlah ini diperkirakan akan terus bertambah. Hanya 15% dari produksi abu terbang yang digunakan. Abu

terbang (*fly ash*) dihasilkan dari pembakaran batubara di PLTU yang tersusun oleh komponen organik dan inorganik berukuran halus.

Abu terbang memiliki silika dalam jumlah yang banyak dan memiliki sifat pozzolan serta memiliki kemiripan dengan unsur silika 3 pada semen. Karena unsur-unsur silika pada *fly ash* adalah sama dengan semen portland biasa, maka abu terbang dapat digunakan sebagai bahan pembuatan beton. Pemilihan bahan-bahan dalam pembuatan beton sangat penting untuk mendapatkan mutu beton yang direncanakan sesuai dengan kegunaan beton itu sendiri dan tentunya dengan biaya se-ekonomis mungkin.

Berdasarkan uraian diatas, kami melakukan penelitian dengan menggunakan abu terbang (*fly ash*) sebagai substitusi semen campuran pada beton dengan variasi 15%, 30%, dan 45% terhadap berat semen campuran yang digunakan. Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui perilaku kuat tekan beton dengan penambahan *fly ash*.

Berdasarkan latar belakang tersebut penulis mengangkat judul **“PERILAKU TEKAN BETON YANG TERBUAT DARI FLY ASH DAN SEMEN CAMPURAN”**.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perilaku tekan beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran?
2. Bagaimana hasil modulus elastisitas beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran?
3. Bagaimana hasil toughness pada beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perilaku tekan beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran;
2. Mengidentifikasi modulus elastisitas beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran;

3. Mengidentifikasi toughness pada beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah menambah pengetahuan mengenai perilaku tekan beton yang terbuat dari *fly ash* sebagai substitusi semen campuran dengan menggunakan variasi 15%FA, 30%FA, dan 45%FA.

1.5 Batasan Masalah

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 (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 kuat tekan dilaksanakan pada umur 7 hari dan 28 hari pada kondisi curing air.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

2.1.1 Pengertian Beton

Berdasarkan SNI 2847:2013 definisi beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidrolis yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat. Seiring bertambahnya usia beton, beton mengeras dan mencapai kekuatan rencana ($f'c$) setelah umur 28 hari. Beton mempunyai kuat tekan yang baik, oleh karena itu beton banyak digunakan dalam pemilihan jenis konstruksi khususnya struktur bangunan, jembatan, dan jalan.

Bahan dasar beton merupakan faktor yang sangat menunjang mutu beton. Pada dasarnya beton terdiri dari agregat, semen hidrolis, air, dan dapat mengandung bahan berbasah dasar semen lainnya dan/atau bahan tambahan kimia lainnya. Beton dapat mengandung banyak rongga beku atau rongga yang dibuat dengan sengaja karena penambahan bahan tambahan. Bahan tambahan kimia yang sering digunakan untuk mempercepat, memperlambat, meningkatkan kemampuan kerja, mengurangi air pencampuran, meningkatkan kekuatan atau mengubah sifat-sifat lain dari beton yang dihasilkan. pengujian karakteristik agregat halus (pasir), dimana hasil dari pemeriksaan agregat halus yang tidak memenuhi standar yaitu pemeriksaan modulus kehalusan dan penyerapan air. Sehingga agregat halus harus dicuci sebelum digunakan.

Untuk mencapai mutu beton yang diinginkan maka harus diperhitungkan perencanaan, jenis, mutu dan kuantitas bahan beton dalam proporsi atau perbandingan tertentu. Mutu beton yang terbuat dari campuran komponen utama beton meliputi kekuatan dan ketahanan. Sifat-sifat tersebut sangat ditentukan oleh sifat komponen, cara pencampuran, cara kerja penuangan campuran beton ke dalam cetakan beton, cara pemadatan dan cara pemeliharaan selama proses pemadatan. Rancang campuran beton yang terbaik yaitu: kuat tekan tinggi, mudah pengerjaannya dan murah.

Dalam hal ini beton memiliki kelebihan dan kekurangan dalam bahan struktur bangunan.

Kelebihan beton sebagai suatu bahan struktur bangunan adalah sebagai berikut :

1. Beton mampu menahan gaya tekan dengan baik dan tahan terhadap korosi dan pembusukan yang disebabkan oleh kondisi lingkungan.
2. Bahan- bahan penyusun beton mudah didapat.
3. Perawatan beton dapat dilakukan dengan mudah.
4. Beton dapat dengan mudah dicetak sesuai keinginan.
5. Dalam pelaksanaan beton dapat disemprotkan pada permukaan beton lama yang terdapat retakan.
6. Beton tahan terhadap aus dan tahan bakar, sehingga perawatan relatif lebih murah.

Adapun kekurangan beton sebagai suatu bahan struktur bangunan adalah sebagai berikut:

1. Beton lemah terhadap gaya tarik, sehingga dapat menyebabkan retakan pada beton.
2. Bentuk beton dapat menyusut dan mengembang, jika terjadi perubahan suhu.
3. Pelaksanaan beton harus dilakukan dengan teliti agar mendapatkan beton kedap air secara sempurna.
4. Beton tidak kedap terhadap air (permeabilitas beton relatif tinggi), mudah terdesintegrasi oleh sulfat yang dikandung oleh tanah (Murdock, 1991).

Beton struktural dalam konstruksi dapat digunakan untuk banyak hal. Dalam teknik sipil, struktur beton digunakan untuk membangun pondasi, kolom, balok, pelat atau panel kelongsong. Dalam teknik sipil, bidang hidrologi, beton digunakan pada struktur air seperti bendungan, bendungan, kanal, dan drainase perkotaan. Beton juga digunakan dalam konstruksi tanah dan air di bidang transportasi sehubungan dengan perkerasan kaku, saluran samping, kanal dan transportasi lainnya.

2.2 Penelitian Terdahulu

(*Jain et al., 2022*) Melakukan penelitian untuk mengkaji dampak bubuk

granit (GP) sebagai pengganti agregat halus alami (hingga 60%) pada sifat kuat tekan dan daya tahan beton self-compacting campuran *fly ash* ramah lingkungan (SCC). Hasil menunjukkan bahwa GP hingga 50% sebagai alternatif agregat halus dapat dimasukkan secara positif dalam produksi SCC campuran *fly ash* yang ramah lingkungan untuk peningkatan sifat daya tahan yang disebutkan di atas (dengan sedikit tindakan pencegahan yang lebih tinggi terhadap pengeringan).

(**Abdulrahman et al., 2022**) Melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengkaji peran rasio alkaline-activator to binder (AA/B), sifat pengerasan, dan kinerja ikatan beton geopolimer fly ash. Variabel utama benda uji tarik adalah kuat tekan (f_c) dan rasio diameter penutup beton terhadap batang (Cc/bd) . Hasilnya menunjukkan bahwa kuat tarik tekan dan belah (f_{ct}) meningkat seiring dengan penurunan rasio AA/B. Sebuah model untuk memprediksi secara akurat kekuatan tarik belah dari kekuatan tekan diusulkan berdasarkan hasil eksperimen. Secara signifikan, penelitian ini menunjukkan bahwa beton geopolimer fly ash memiliki kekuatan rekat yang tinggi dan dipengaruhi oleh kuat tekan dan rasio Cc/bd .

(**McCarthy, Yakub and Csetenyi, 2022**) Melakukan penelitian mengenai proses kimia (serangan sulfat dan reaksi agregat alkali (AAR)) dan fisik (pengikisan dan abrasi beku-cair (garam) yang menyebabkan kerusakan beton diselidiki. Hasilnya menunjukkan perbedaan yang kecil antara beton fly ash untuk serangan sulfat dan AAR, dimana diperoleh ekspansi yang kecil. Meskipun pengaruh abu terbang spesifik tidak dapat diidentifikasi, beton yang mengandung udara memberikan kinerja kerak beku-cair yang dapat diterima (rasio air/semen 0,45), sedangkan abrasi umumnya mengikuti kekuatan beton. Efek serupa ditemukan pada penelitian sebelumnya. Perubahan teknologi dan penyimpanan basah dapat mempengaruhi karakteristik fly ash, namun umumnya mengikuti perilaku khas untuk sifat beton yang diperiksa dan menunjukkan kesesuaian untuk digunakan.

(**Klemczak et al., 2023**) Melakukan penelitian untuk menilai efektivitas penggantian semen Portland Biasa (OPC) dalam jumlah besar dengan nonklinker pengikat dalam hal perilaku penyusutan. *Fly ash* (FA) atau granulated blast furnace slag (GBFS) digunakan sebagai penggantian sebagian OPC sebesar 60%

volume pasta pada beton self-compacting (SCC). Hasilnya menunjukkan bahwa diterapkan bahan semen tambahan dalam jumlah besar pada beton yang dapat memadat sendiri (SCC) secara signifikan mengurangi regangan penyusutan dibandingkan dengan SCC yang hanya terbuat dari OPC. Secara bersamaan, pengganti fly ash ditemukan sebagai paling efektif dalam mengurangi penyusutan bebas pada beton yang memadat sendiri. Perkembangan penyusutan terdapat juga menunjukkan peran penting dan tingkat penyusutan yang sangat awal, yang menentukan nilai strain 28 hari.

(Dash, Kar and Kar, 2018) Melakukan penelitian untuk menyelidiki kemungkinan pengembangan beton tembus air yang berkelanjutan melalui pemanfaatan abu terbang sebagai pengganti sebagian semen. Temuan eksperimental menunjukkan bahwa sifat mekanik beton tembus air ditingkatkan dengan 20% fly ash. Setelah 28 hari pemeraman, penambahan fly-ash dengan proporsi yang lebih banyak mengakibatkan kuat tekan menurun. Pengamatan penting lainnya adalah penurunan porositas (yaitu, permeabilitas tinggi) akibat meningkatnya dosis abu terbang.

(Nagalia *et al.*, 2016) melakukan penelitian untuk mengkaji peranan alkali hidroksida dan konsentrasinya terhadap struktur mikro dan kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar fly ash. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat mikrostruktur partikel abu terbang dan kandungan kalsium berpengaruh nyata terhadap *setting time* dan kuat tekan beton geopolimer, serta struktur beton geopolimer. Polimerisasi awal beton geopolimer bergantung pada konsentrasi larutan natrium hidroksida (NaOH). Penggunaan NaOH secara eksklusif menunjukkan kuat tekan tertinggi jika dibandingkan dengan kombinasi alkali hidroksida lainnya.

2.3 Bahan Penyusun Beton

2.3.1 Semen Portland

Semen portland adalah bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Menurut ASTM C-150, 1985, semen portland didefinisikan sebagai semen hidrolik yang dihasilkan dengan menggiling klinker yang terdiri dari kalsium silikat hidrolik, yang umumnya mengandung satu lebih

bentuk kalsium sulfat sebagai bahan tambahan yang digiling bersama-sama dengan bahan utamanya. Semen merupakan bahan ikat yang penting dan banyak digunakan dalam pembangunan fisik di sektor konstruksi sipil. Jika ditambah air, semen akan menjadi pasta semen, jika ditambah agregat halus pasta semen akan menjadi mortar yang jika digabungkan dengan agregat kasar akan menjadi campuran beton segar yang setelah mengeras akan menjadi beton keras (*concrete*). Fungsi utama semen adalah mengikat butir-butir agregat hingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara di antara butir-butir agregat. Walaupun komposisi semen dalam beton hanya sekitar 10%, namun karena fungsinya sebagai bahan pengikat maka peranan semen menjadi penting. Semen portland dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan aluminium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu. Bahan utama pembentuk semen portland adalah kapur (CaO), silika (SiO_3), alumina (Al_2O_3), sedikit magnesia (MgO), terkadang sedikit alkali. Untuk mengontrol komposisinya, terkadang ditambahkan oksida besi sedangkan gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ditambahkan untuk mengatur waktu ikat semen.

Semen Portland adalah bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) nomor 15-2049-2004, semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak (clinker) portland terutama yang terdiri dari kalsium silikat ($x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) yang bersifat hidrolis dan digiling bersama – sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat ($\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Hidrolis berarti sangat senang bereaksi dengan air, senyawa yang bersifat hidrolis akan bereaksi dengan air secara cepat. Semen portland bersifat hidrolis karena di dalamnya terkandung kalsium silikat ($x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) dan kalsium sulfat ($\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) yang bersifat hidrolis dan sangat cepat bereaksi dengan air. Reaksi semen dengan air berlangsung secara *irreversible*, artinya hanya dapat terjadi satu kali dan tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula.

Berdasarkan SNI 15-2049-2004, terdapat beberapa jenis dan penggunaan semen, yaitu :

1. Jenis I yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang diisyaratkan pada jenis-jenis lain.
2. Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
3. Jenis III semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
4. Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.
5. Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Semen tipe I digunakan untuk bangunan-bangunan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus. Contohnya, ketika pemilik rumah atau tukang batu yang sedang mengerjakan proyek atau merenovasi rumah, pada saat membeli semen di toko bangunan, mereka hanya menyebut semen, tanpa menyebut jenis semen apa yang seharusnya digunakan yang cocok dengan lingkungan pemukiman mereka berada, antara lain : bangunan, perumahan, gedung-gedung bertingkat, jembatan, landasan pacu, dan jalan raya.

Semen tipe II yang memiliki kadar C3A tidak lebih dari 8% digunakan untuk konstruksi bangunan dan beton yang terus-menerus berhubungan dengan air kotor atau air tanah atau untuk pondasi yang tertanam di dalam tanah yang mengandung air agresif (garam-garam sulfat) dan saluran air buangan atau bangunan yang berhubungan langsung dengan rawa, semen ini cocok digunakan untuk daerah yang memiliki cuaca dengan suhu yang cukup tinggi serta pada struktur drainase. Semen portland tipe II ini disarankan untuk dipakai pada bangunan seperti bendungan, dermaga dan landasan berat yang ditandai adanya kolom-kolom dan dimana proses hidrasi rendah juga merupakan pertimbangan utama.

Semen tipe III, memiliki kadar C3A serta C3S yang tinggi dan butirannya digiling sangat halus, sehingga cepat mengalami proses hidrasi. Semen jenis ini dipergunakan pada daerah yang bertemperatur rendah, terutama pada daerah yang mempunyai musim dingin (winter season). Kegunaan pembuatan jalan beton,

landasan lapangan udara, bangunan, tingkat tinggi, bangunan dalam air yang tidak memerlukan ketahanan terhadap sulfat.

Semen tipe IV mempunyai panas hidrasi yang rendah, kadar C3S nya dibatasi maksimum sekitar 35% dan kadar C3A nya maksimum 5%. Semen tipe ini digunakan untuk keperluan konstruksi yang memerlukan jumlah dan kenaikan panas harus diminimalkan. Oleh karena itu semen jenis ini akan memperoleh tingkat kuat beton dengan lebih lambat ketimbang portland tipe I. Tipe semen seperti ini digunakan untuk struktur beton masif seperti dam gravitasi besar yang mana kenaikan temperatur akibat panas yang dihasilkan selama proses curing merupakan faktor kritis. Cocok digunakan untuk daerah yang bersuhu panas.

Semen tipe V yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat. Cocok digunakan untuk pembuatan beton pada daerah yang tanah dan airnya mempunyai kandungan garam sulfat tinggi. Sangat cocok untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan, dan pembangkit tenaga nuklir. Dan untuk memenuhi kebutuhan di wilayah dengan kadar asam sulfat tinggi seperti air laut, serta kawasan tambang. Jenis bangunan yang membutuhkan jenis ini diantaranya bendungan, pelabuhan konstruksi dalam air, hingga pembangkit tenaga nuklir.

2.3.2 Abu Terbang (*Fly Ash*)

Berdasarkan SNI 03-6414-2002, abu terbang adalah limbah hasil pembakaran bau bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar dan bersifat pozolanik. (Martinus, 2015) mengatakan bahwa, *fly ash* merupakan sisa-sisa pembakaran batubara yang dialirkan dari ruang pembakaran melalui semburan asap yang berbentuk partikel halus dan merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan bahan mineral karena proses pembakaran batubara pada unit pembangkit uap (*boiler*) sehingga terbentuk dua jenis abu yaitu abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar.

(Hardjito, 2001) mengatakan bahwa abu terbang tidak memiliki kemampuan mengikat seperti semen, tetapi dengan kehadiran air dan ukuran pertikelnya yang halus, oksida silika yang dikandung oleh abu terbang akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat. Adanya kalsium hidroksida dalam beton

selama ini diketahui sebagai sumber perusak beton sebelum waktunya, khususnya bila beton berada di lingkungan yang agresif. Karenanya, penambahan atau penggantian sejumlah semen dengan abu terbang berpotensi menambah keawetan beton tersebut. Selama ini abu terbang tidak dimanfaatkan dan dibuang begitu saja, sehingga memiliki potensi mencemari lingkungan disekitarnya. Klasifikasi fly ash terbagi menjadi 3 menurut SNI 2640-2014, yaitu sebagai berikut :

1. Kelas N, pozzolan alam mentah atau telah dikalsinasi memenuhi persyaratan yang berlaku untuk kelas N, misalnya beberapa tanah diatomae (hasil lapukan); batu rijang opalan dan serpih; tufa dan abu vulkanik atau batu apung, dikalsinasi untuk menghasilkan sifat-sifat yang diinginkan, misalnya lempung dan serpih.
2. Kelas F, abu terbang dari batu bara yang memenuhi persyaratan yang berlaku untuk kelas F. Abu terbang kelas F mempunyai sifat pozzolanik. Abu terbang kelas F biasanya dihasilkan dari pembakaran antrasit atau batubara bituminous, tetapi dapat juga dihasilkan dari batubara subbituminous dan lignite.
3. Kelas C, abu terbang dari batubara memenuhi persyaratan yang berlaku untuk kelas C, abu terbang kelas C memiliki sifat pozzolanik dan sementisius. Abu terbang kelas C biasanya dihasilkan dari pembakaran lignite atau batubara subbituminous, dan dapat juga dihasilkan dari antrasit atau batubara bituminous. Abu terbang kelas C mengandung kadar kalsium total yang dinyatakan sebagai kalsium oksida (CaO), lebih tinggi dari 10%.

Komposisi kimia pada *fly ash* juga diatur dalam SNI 2460-2014 dimana *fly ash* dan pozzolan alam harus memenuhi persyaratan komposisi kimia yang tercantum pada Tabel 1 di bawah ini :

Tabel 1. Komposisi kimia *fly ash* (SNI 2460, 2014)

Uraian	Kelas		
	N	F	C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , min, %	70	70	50
SO ₃ , maks, %	4	5	5
Kadar Air, maks, %	3	3	3
Hilang Pijar, maks, %	10	6	6

2.3.3 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. Retarder berguna dalam beton pada cuaca panas, ketika waktu pengerasan normal dipersingkat karena suhu yang lebih tinggi, dan dalam mencegah pembentukan sambungan dingin. Secara umum, bahan ini memperpanjang waktu pengangkutan, penempatan, dan pemadatan beton. Keterlambatan pengerasan yang disebabkan oleh retarder dapat dimanfaatkan untuk memperoleh penyelesaian arsitektural dari agregat terbuka; retarder diaplikasikan pada permukaan bagian dalam bekisting sehingga pengerasan semen yang berdekatan dapat tertunda. 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).

2.3.4 Air

Air merupakan komponen penting yang diperlukan untuk pembuatan beton. Mengingat beton merupakan material komposit dimana air memiliki peran utama agar terjadi proses kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah saat proses pengerjaan atau biasa dikenal dengan *workabilitas* beton. Selain itu air merupakan bahan utama selain dari agregat yang digunakan untuk membuat beton. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton. Air yang mengandung senyawa- senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan- bahan kimia lain, bila dipakai untuk campuran beton akan sangat menurunkan kekuatannya dan juga dapat mengubah sifat-sifat dari semen serta mengganggu reaksi hidrasi antara air dan semen. Air

berfungsi sebagai bahan pengikat (bahan penghidrasi semen) dan bahan pelumas antara butir - butir agregat supaya mempermudah proses pencampuran agregat dengan binder serta mempermudah pelaksanaan pengecoran beton (workability) (Veliyati 2010). Air berfungsi untuk melakukan reaksi hidrolis dengan semen sehingga dapat membentuk pasta. Jumlah air harus diperhitungkan agar dapat mencukupi kebutuhan untuk melaksanakan reaksi hidrolis dengan semen dan diserap oleh pori-pori agregat.

Persyaratan air sebagai bahan bangunan harus memenuhi syarat sebagai berikut :

1. Air harus bersih;
2. Tidak mengandung lumpur, minyak, dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual;
3. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram/liter;
4. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter. Kandungan klorida (Cl), tidak lebih dari 500 p.p.m dan senyawa sulfat tidak lebih dari 1000 p.p.m sebagai SO₃;
5. Bila dibandingkan dengan kekuatan tekan adukan dan beton yang menggunakan air suling, maka penurunan kekuatan adukan dan beton yang memakai air yang diperiksa tidak lebih dari 10% ;
6. Semua air yang mutunya merugikan harus dianalisa secara kimia dan dievaluasi mutunya menurut pemakaiannya;
7. Khusus untuk beton pratekan, kecuali syarat-syarat tersebut diatas air tidak boleh mengandung klorida lebih dari 50 p.p.m

Menurut SNI 03-2847-2002 air yang digunakan dalam pembuatan beton adalah :

1. Air yang digunakan pada campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan-bahan merusak yang mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tulangan.
2. Air pencampur yang digunakan pada beton prategang atau pada beton yang di dalamnya tertanam logam aluminium, termasuk air bebas yang terkandung dalam agregat, tidak boleh mengandung ion klorida dalam

jumlah yang membahayakan.

3. Air yang tidak dapat diminum tidak boleh digunakan pada beton, kecuali ketentuan berikut terpenuhi :
 - 1) Pemilihan proporsi campuran beton harus didasarkan pada campuran beton yang menggunakan air dari sumber yang sama.
 - 2) Hasil pengujian pada umur 7 dan 28 hari pada kubus uji mortar yang dibuat dari adukan dengan air yang tidak dapat diminum harus mempunyai kekuatan sekurang-kurangnya sama dengan 90% dari kekuatan benda uji yang dibuat dengan air yang dapat diminum. Perbandingan uji kekuatan tersebut harus dilakukan pada adukan serupa, terkecuali pada air pencampur, yang dibuat dan diuji sesuai dengan “Metode uji kuat tekan untuk mortar semen hidrolis (Menggunakan spesimen kubus dengan ukuran sisi 50 mm)” (ASTM C 109).

2.3.5 Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat mengisi sebanyak 70% dari volume mortar atau beton. Agregat mempunyai pengaruh terhadap sifat-sifat beton, oleh karena itu pemilihan agregat sangat penting dalam pembuatan mortar atau beton (Tjokrodinuljo, 1996). Secara umum agregat penyusun beton ada dua macam yaitu agregat kasar dan agregat halus. Agregat halus biasanya dalam bentuk alami berupa pasir, sedang agregat kasar yang alami berupa kerikil. Sebagai bahan pengisi pada beton, agregat mempunyai peran penting bagi sifat beton keras dan sifat beton segar. Perubahan gradasi, ukuran butir maksimum, berat jenis dan kadar air adalah sifat agregat yang dapat mempengaruhi sifat beton. Oleh karena itu, pemilihan agregat dengan tepat akan menghasilkan kualitas beton yang baik. Selain itu, karakteristik agregat sangat berpengaruh pada mutu campuran beton, salah satu karakteristik agregat dapat dilihat pada gradasi agregat tersebut. Gradasi agregat adalah distribusi ukuran butiran agregat. Dapat juga disebut pengelompokan agregat dengan ukuran yang berbeda sebagai persentase dari total agregat atau persentase kumulatif butiran yang lebih kecil atau lebih besar dari masing-masing seri saringan. Gradasi agregat akan mempengaruhi luas permukaan agregat yang sekaligus akan mempengaruhi jumlah pasta/air yang

lebih sedikit karena luas permukaan lebih kecil. Apabila ditinjau dari volume pori (ruang kosong) antara agregat, maka butir yang bervariasi akan mengakibatkan volume pori lebih kecil dengan kata lain kemampuan menjadi tinggi. Hal ini berbeda dengan ukuran agregat yang seragam, yaitu mempunyai volume ruang kosong yang lebih besar. Dalam pembuatan beton, yang paling banyak digunakan adalah agregat normal dengan gradasi yang harus memenuhi syarat standar. Namun untuk beberapa keperluan yang khusus sering digunakan agregat ringan maupun agregat berat. Praktek di lapangan menurut Tjokrodinuljo (1996) pada umumnya agregat dapat digolongkan menjadi 3 kelompok, yaitu :

1. Batu (besar butiran > 40 mm);
2. Kerikil (besar butiran antara 5 mm – 40 mm);
3. Pasir (besar butiran antara 0.15 mm – 5 mm).

2.3.5.1 Agregat Kasar

Menurut SNI 03-2847-2002 agregat kasar adalah hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm. Agregat kasar tidak boleh mengandung bahan-bahan organik dan mampu memiliki ikatan yang baik. Agregat kasar tak dipecahkan merupakan agregat alami berupa batu kerikil alami yang banyak ditemukan di daerah pegunungan, endapan aliran sungai dan juga pesisir pantai. Bentuk agregat kasar ini dipengaruhi oleh proses geologi batuan. Agregat kasar dipecahkan artinya agregat yang diperoleh dengan cara menggunakan mesin pemecah batu (*stone crusher*) melalui hasil residu terak tanur tinggi, pecahan beton, *extended shale*, *expanded slag*, lain sebagainya.

Agregat kasar yang digunakan pada campuran beton harus mempunyai gradasi yang baik, artinya harus terdiri dari butiran yang beragam besarnya, sehingga dapat mengisi rongga-rongga akibat ukuran yang besar, sehingga akan mengurangi penggunaan semen. Kadar lumpur atau bagian yang lebih kecil dari 75 mikron (saringan no. 200), tidak boleh melebihi 1% (terhadap berat kering). Apabila kadar lumpur melebihi 1% maka agregat harus dicuci. Kekerasan butiran agregat kasar jika diperiksa dengan mesin Los Angeles dimana tingkat kehilangan berat lebih kecil dari 50%. Mutu agregat kasar menurut ASTM C 33-02 (2002) disyaratkan sebagai berikut :

1. Tidak reaktif terhadap alkali jika dipakai untuk beton basah dengan lembab atau berhubungan dengan bahan reaktif terhadap alkali semen, dimana penggunaan semen mengandung natrium oksida kurang dari 0.6%;
2. Susunan gradasi memenuhi syarat;
3. Kadar bahan atau partikel yang berpengaruh buruk pada beton;
4. Sifat fisika (kekerasan butir agregat yang diuji dengan *Los Angeles Abrasion*).

2.3.5.2 Agregat Halus

Menurut SNI 03-2847-2002 agregat halus merupakan pasir alam sebagai hasil disintegrasi 'alami' batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5,0 mm. Agregat material mempunyai fungsi sebagai bahan isi dalam adukan beton. Karakteristik agregat sangat mempengaruhi kualitas dari beton itu sendiri. Agregat ditujukan untuk memberikan bentuk pada beton, dan memberikan kekerasan atau kekuatan terhadap beton.

Agregat halus harus memenuhi persyaratan karakteristik seperti pemeriksaan kadar lumpur, kadar air, kadar organik, dan berat jenis dari agregat halus agar beton dapat mencapai kekuatan yang diinginkan. SNI 03 – 2834 – 1992 Mengklasifikasikan distribusi ukuran butiran agregat halus menjadi empat daerah atau zone yaitu : zona I (kasar), zona II (agak kasar), zona III (agak halus) dan zona IV (halus), batas-batas gradasi dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2. Batas-batas gradasi agregat halus

No saringan	Ukuran saringan (mm)	Presentase Berat yang lolos saringan (%)			
		Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
3/8"	9,6	100	100	100	100
No.4	4,8	90-100	90-100	90-100	90-100
No.8	2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
No.16	1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
No.30	0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
No.50	0,3	0-20	8-30	12-40	15-50
No.100	0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Agregat halus harus memenuhi persyaratan berikut :

1. Agregat halus harus Terdiri dari butir-butir tajam dan keras dengan indeks

kekerasan ≤ 2.2 ;

2. Butir-butir agregat halus harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan;
3. Sifat kekal, apabila diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut:
 - a) Jika dipakai Natrium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 12%.
 - b) Jika dipakai Magnesium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 10%.
4. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering). Yang diartikan dengan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0,060 mm. Apabila lumpur melampaui 5%, maka agregat harus dicuci.
5. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organis terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams- Herder. Untuk itu bila direndam dalam larutan 3% NaOH, cairan di atas endapan tidak boleh lebih gelap dari warna larutan pembanding. Agregat halus yang tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95% dari kekuatan adukan agregat yang sama, tetapi dicuci dalam larutan 3% NaOH yang kemudian dicuci hingga bersih dengan air, pada umur yang sama.
6. Pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan yang diakui.

2.4 Sifat-Sifat Mekanis Beton

2.4.1 Kuat Tekan

Menurut SNI 03-1974-1990 kuat tekan beton ($f'c$) adalah besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan maksimum adalah nilai beban yang terjadi pada saat sampel beton setiap variasi alternatif mendapat tegangan maksimum.

Menurut (Edward G. Nawy, 2009) kuat tekan beton banyak dipengaruhi oleh beberapa faktor, parameter - parameter yang paling penting mempengaruhi kekuatan beton antara lain :

1. Kualitas semen;
2. Proporsi semen terhadap campuran ialah Faktor Air Semen (FAS);
3. Kekuatan agregat adalah nilai abrasi dari agregat kasar dan luas permukaan agregat;
4. Interaksi antara pasta semen dengan agregat berupa rasio agregat-semen.

Menurut SNI 1974-2011 nilai kuat tekan benda uji dengan membagi nilai maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang rata yang ditentukan sebagai mana yang diuraikan pada pasal 5 dan nyatakan hasilnya dengan dibulatkan ke 1 (satu) desimal dengan satuan 0.1 Mpa.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

- $f'c$ = Kuat tekan beton (Mpa atau N/mm²)
- P = Gaya tekan aksial (N)
- A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

2.4.2 Perilaku Tegangan Regangan Beton

Tegangan (f) merupakan besarnya gaya yang bekerja pada setiap satuan luas penampang yang dirumuskan :

$$f = P/A \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

- f = Tegangan (N/ mm²)
- P = Gaya tekan aksial (N)
- A = Luas penampang (mm²)

Regangan merupakan pertambahan panjang suatu benda terhadap panjang mula-mula yang disebabkan oleh adanya gaya luar yang mempengaruhi benda, dimana dinyatakan dalam persamaan :

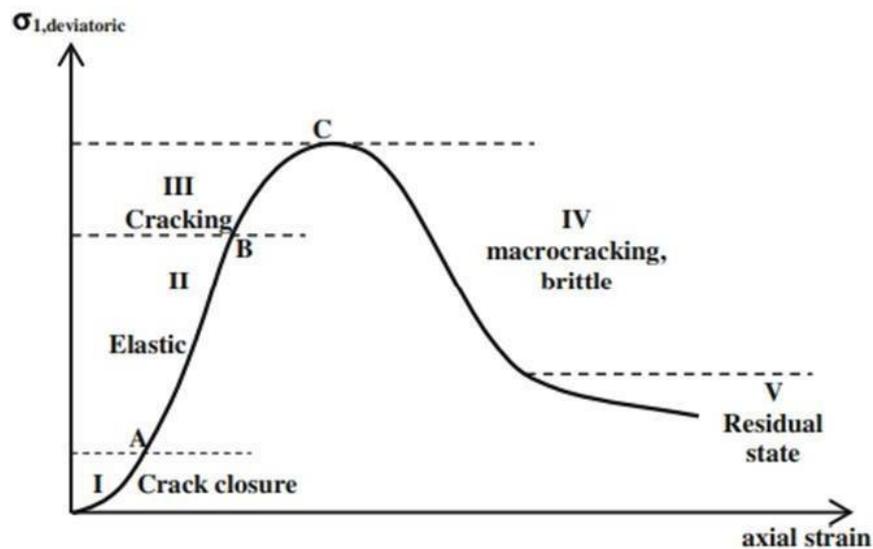
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

- ϵ = Tegangan
- ΔL = perubahan panjang (mm)

L_0 = Panjang awal (mm)

Adapun hubungan tegangan dan regangan dibuat dalam bentuk grafik dimana setiap nilai tegangan dan regangan yang terjadi dipetakan kedalamnya dalam bentuk titik-titik, maka titik-titik tersebut terletak dalam suatu garis seperti pada gambar 1.

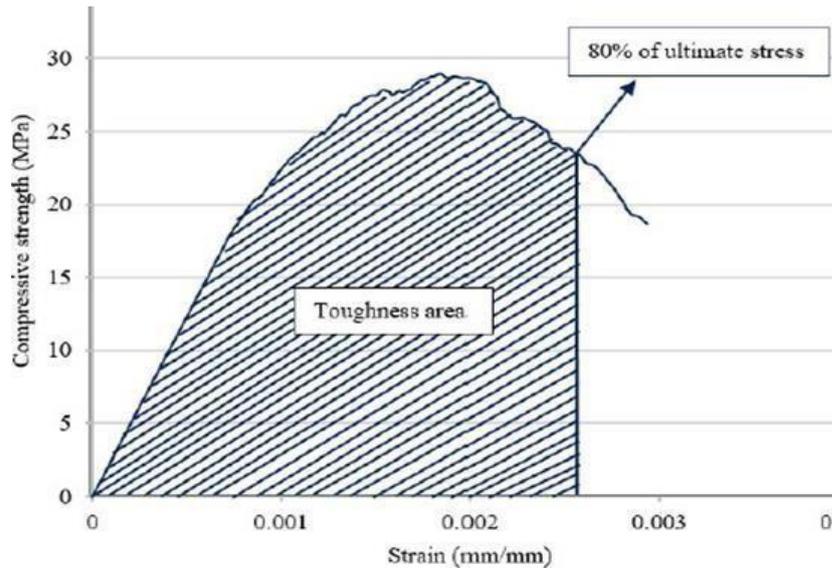


Gambar 1. Grafik hubungan tegangan regangan

Gambar 1 menggambarkan ilustrasi grafik hubungan tegangan regangan yang terbagi menjadi beberapa kondisi kurva, daerah I kondisi kurva sedikit cekung ke atas menandakan celah terbuka, retakan, pori-pori, dan cacat lainnya mulai menutup; ini adalah bukti pertama nonlinier di kurva. Daerah II kurva dalam kondisi elastis, menunjukkan karakteristik bagian yang hampir linier sebagai indikasi perilaku elastis linier. Daerah III kondisi dimana kurva sedikit cekung ke bawah menunjukkan daerah kurva berada di sekitar tingkat tegangan di atas 50% dari maksimum dan menutupi kurva hingga keadaan kegagalan puncak atau titik luluh. Titik c merupakan titik tegangan maksimum ini ditandai sebagai titik c pada Gambar. Daerah IV menunjukkan keadaan puncak kegagalan berada pada titik luluh dimana kemiringan kurva menurun sampai nol. Daerah V menunjukkan kondisi kurva menurun pasca-kegagalan, material kehilangan kemampuannya untuk menahan atau mempertahankan beban dengan meningkatnya deformasi atau regangan (Levent Tutluoglu, Ibrahim Ferid, dkk 2014).

2.4.3 Toughness

Nilai toughness benda uji beton dihitung sebagai area di bawah kurva tegangan-regangan sampai dengan regangan ultimi t seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 . Menentukan area tertentu di bawah kurva tegangan-regangan sebesar 80% untuk tegangan ultimit di area pasca-puncak yang diberikan (Emad A.H. Alwesabi, dkk, 2022).



Gambar 2. Area toughness di bawah kurva tegangan regangan

2.4.4 Modulus Elastisitas

Sifat elastisitas suatu bahan sangat erat hubungannya dengan kekakuan suatu bahan dalam menerima beban. Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tekanan yang diberikan dengan perubahan bentuk persatuan panjang, semakin besar modulus elastisitas maka semakin kecil lendutan yang terjadi. Modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh modulus elastisitas agregat dan perbandingan volume dari agregat di dalam beton.

Nilai modulus elastisitas beton dapat dihasilkan pada pengujian di laboratorium menggunakan alat compressometer yang dipasang pada benda uji beton silinder . hasil pengujian dapat dihitung dengan menggunakan rumus menurut (ASTM C 469 – 02) :

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0,000050)} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan :

- E = Modulus elastisitas (N/mm^2)
 S_2 = Tegangan pada 40% tegangan runtuh (N/mm^2)
 S_1 = Tegangan pada saat regangan 0,000050 (N/mm^2)
 ϵ_2 = Regangan pada saat S_2

Modulus Elastisitas beton juga dapat dihitung dengan rumus empiris menurut (SNI 2847-2013), yaitu :

2.4.3.1 Beton Normal

$$E = 4700\sqrt{f'c} \dots\dots\dots (5)$$

2. Beton ($W_c = 1440 - 2560 \text{ Kg/m}^3$)

$$E = W_c^{1,5} \times 0,043\sqrt{f'c} \dots\dots\dots (6)$$

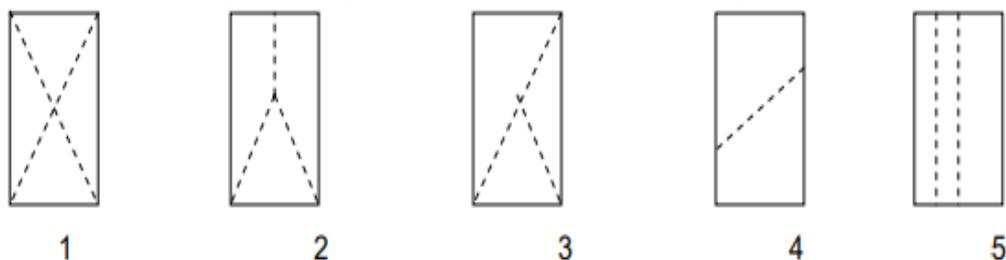
Keterangan :

- E = Modulus elastisitas (N/mm^2)
 $f'c$ = Kuat tekan beton (N/mm^2)
 W_c = Berat volume beton (Kg/m^3)

2.5 Pola Retak

Beton merupakan salah satu bahan yang paling umum digunakan dalam konstruksi. Dalam penerapannya dilapangan, kemungkinan kegagalan tidak bisa dikesampingkan. Salah satu kegagalan yang terjadi antara lain keretakan pada beton. Retak pada struktur beton merupakan suatu keadaan dimana terbentuknya retakan atau pemisahan struktur, tanpa terjadinya keruntuhan. Pada kondisi di lapangan, variasi pola retak berbeda satu dengan yang lainnya. Hal tersebut dikarenakan perbedaan tegangan tarik yang ditimbulkan oleh beban, momen dan geser. Menurut SNI 1974:2011 pola keretakan beton ada 5 jenis yaitu, kehancuran kerucut, kehancuran kerucut dan belah, kehancuran kerucut geser, kehancuran geser dan kehancuran sejajar sumbu tegak (kolumnar).

Gambar 3 Sketsa gambar tipe/ bentuk kehancuran benda uji



Gambar 3. Menunjukkan bentuk kehancuran benda uji

Menurut SNI 1974:2011 dengan keterangan gambar sebagai berikut :

- a. Gambar 1 : Bentuk kehancuran kerucut
- b. Gambar 2 : Bentuk kehancuran kerucut dan belah
- c. Gambar 3 : Bentuk kehancuran kerucut dan geser
- d. Gambar 4 : Bentuk kehancuran geser
- e. Gambar 5 : Bentuk kehancuran sejajar sumbu tegak (kolumnar)