

SKRIPSI

**STUDI KARAKTERISTIK BETON *HUMAN HAIR FIBER*
(HHF) SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN**

Disusun dan diajukan oleh:

**MUHAMMAD ARDI AKIB
D011 20 1049**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

STUDI KARAKTERISTIK BETON *HUMAN HAIR FIBER* (HHF) SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD ARDI AKIB
D011 20 1049

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal, 14 Agustus 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T.
NIP 197912262005011001

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng
NIP 196207291987031001

Ketua Program Studi,



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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Muhammad Ardi Akib

NIM : D011 20 1049

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{ STUDI KARAKTERISTIK BETON *HUMAN HAIR FIBER* (HHF) SEBAGAI
SUBSTITUSI SEMEN }

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, Agustus 2024

ig Menyatakan



Muhammad Ardi Akib



ABSTRAK

MUHAMMAD ARDI AKIB. *Studi Karakteristik Beton Human Hair Fiber (HHF) Sebagai Substitusi Semen* (dibimbing oleh Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T. dan Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng)

Perkembangan penelitian saat ini, mencoba mencari inovasi beton ramah lingkungan dan berkelanjutan dengan memanfaatkan bahan-bahan limbah. Dalam penelitian ini limbah *Human Hair Fiber* (HHF) dengan panjang maksimal 20mm digunakan sebagai substitusi parsial semen dalam campuran beton dengan variasi substitusi 0%, 1%, 2%, dan 3% terhadap berat semen. HHF yang digunakan telah mengalami *treatment* dalam larutan 5% NaOH selama 1 Jam untuk meningkatkan kekuatan tarik dan meningkatkan kekasaran permukaan HHF. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh HHF pada beton terhadap nilai kekuatan tekan, modulus elastisitas, kekuatan tarik belah, kekuatan lentur, hubungan tegangan dan regangan, dan pola retak beton setelah pengujian pada umur 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan kekuatan tekan, modulus elastisitas, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur beton substitusi HHF tidak lebih tinggi jika dibandingkan beton kontrol. Namun, beton substitusi HHF memiliki tingkat penyerapan energi dan daktilitas yang lebih baik jika dibandingkan beton kontrol. Nilai optimum untuk beton substitusi HHF tercapai pada variasi 2% terhadap berat semen.

Kata Kunci: Beton, Limbah, *Human Hair*, Karakteristik, Semen, Substitusi



ABSTRACT

MUHAMMAD ARDI AKIB. *Study of Concrete Characteristics Using Human Hair Fiber (HHF) Cement Substitute* (supervised by Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T. and Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng)

Current research developments are trying to find environmentally friendly and sustainable concrete innovations by utilizing waste materials. In this research, Human Hair Fiber (HHF) waste with a maximum length of 20mm is used as a partial substitution of cement in concrete mixes with substitution variations of 0%, 1%, 2%, and 3% by weight of cement. The HHF used has been treated in a 5% NaOH solution for 1 hour to increase the tensile strength and improve the surface roughness of HHF. This study aims to determine the effect of HHF on concrete compressive strength, modulus of elasticity, split tensile strength, flexural strength, stress and strain relationship, and concrete crack pattern after testing at 28 days of age. The test results showed that the compressive strength, modulus of elasticity, split tensile strength, and flexural strength of HHF-substituted concrete were not higher than those of control concrete. However, HHF-substituted concrete has better energy absorption and ductility than control concrete. The optimum value for HHF-substituted concrete was achieved at 2% by weight of cement.

Keywords: Concrete, Waste, Human Hair, Characteristics, Cement, Substitution



DAFTAR ISI

| | |
|--|------------|
| LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI | i |
| PERNYATAAN KEASLIAN..... | ii |
| ABSTRAK | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| DAFTAR ISI..... | v |
| DAFTAR GAMBAR..... | vii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL | x |
| DAFTAR LAMPIRAN | xi |
| KATA PENGANTAR..... | xii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.5 Batasan Masalah | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Penelitian Terdahulu | 5 |
| 2.2 <i>Human Hair</i> | 8 |
| 2.2.1 Alkali Treatment | 9 |
| 2.3 Beton | 10 |
| 2.3.1 Agregat Halus..... | 10 |
| 2.3.2 Agregat Kasar..... | 11 |
| 2.3.3 Semen..... | 12 |
| 2.3.4 Air | 13 |
| 2.4 Kekuatan Tekan Beton (f_c') | 14 |
| 2.5 Kekuatan Tarik Belah (f_{ct}) | 15 |
| Pengaruh Kekuatan Tarik Belah Terhadap Kekuatan Tekan Beton..... | 16 |
| Kekuatan Lentur (f_r) | 17 |
| Modulus Elastisitas | 18 |



| | |
|---|-----------|
| 2.9 Pola Retak | 19 |
| 2.10 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) | 20 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 21 |
| 3.1 Tahapan Penelitian | 21 |
| 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian | 23 |
| 3.3 Desain dan Jumlah Benda Uji | 23 |
| 3.4 Alat dan Bahan Penelitian | 24 |
| 3.5 Pemeriksaan Karakteristik Material | 26 |
| 3.5.1 Pemeriksaan karakteristik agregat halus | 27 |
| 3.5.2 Pemeriksaan karakteristik agregat kasar | 27 |
| 3.6 <i>Treatment Human Hair</i> | 28 |
| 3.7 Pembuatan Benda Uji | 31 |
| 3.8 Pengujian Benda Uji | 34 |
| 3.8.1 Pengujian Kekuatan Tekan (f_c') | 34 |
| 3.8.2 Pengujian Kekuatan Tarik Belah (f_{ct}) | 35 |
| 3.8.3 Pengujian Kekuatan Lentur (f_r) | 36 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 38 |
| 4.1 Karakteristik Agregat | 38 |
| 4.2 Rancangan Campuran Beton | 41 |
| 4.3 Kekuatan Tekan (f_c') | 44 |
| 4.4 Kekuatan Tarik Belah (f_{ct}) | 46 |
| 4.5 Kekuatan Lentur (f_r) | 48 |
| 4.6 Modulus Elastisitas | 50 |
| 4.7 Hubungan Kekuatan Tarik Belah Terhadap Kekuatan Tekan Beton | 51 |
| 4.8 Hubungan Beban Terhadap Perpindahan | 53 |
| 4.9 Hubungan Tegangan Terhadap Regangan | 58 |
| 4.10 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) | 60 |
| 4.11 Pola Retak | 63 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 68 |
| Kesimpulan | 68 |
| Daftar Pustaka | 69 |
| DAFTAR PUSTAKA | 70 |



DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1 Struktur <i>Human Hair</i> | 8 |
| Gambar 2 Reaksi antara <i>Cystine</i> dengan Alkali (NaOH)..... | 10 |
| Gambar 3 Agregat Halus..... | 10 |
| Gambar 4 Agregat Kasar..... | 11 |
| Gambar 5 Semen | 12 |
| Gambar 6 Air..... | 13 |
| Gambar 7 Bidang Patah Terletak di Daerah Pusat..... | 18 |
| Gambar 8 Sketsa Bentuk Kehancuran Benda Uji | 20 |
| Gambar 9 Tahapan Penelitian | 22 |
| Gambar 10 (a) Desain Benda Uji Silinder, (b) Desain Benda Uji Balok..... | 23 |
| Gambar 11 Bahan-Bahan Penelitian | 26 |
| Gambar 12 Proses Pencucian <i>Human Hair</i> | 28 |
| Gambar 13 NaOH Padatan..... | 29 |
| Gambar 14 Perendaman <i>Human Hair</i> di Dalam Larutan 5% NaOH..... | 30 |
| Gambar 15 Penyortiran HHF | 30 |
| Gambar 16 Proses Pencampuran Bahan-Bahan..... | 31 |
| Gambar 17 Pengujian Slump | 32 |
| Gambar 18 Curing Benda Uji | 33 |
| Gambar 19 <i>Set-up</i> Pengujian Kekuatan Tekan | 35 |
| Gambar 20 <i>Set-up</i> Pengujian Kekuatan Tarik Belah | 36 |
| Gambar 21 <i>Set-up</i> Pengujian Kekuatan Lentur..... | 37 |
| Gambar 22 Gradasi Butiran Agregat Halus | 38 |
| Gambar 23 Hasil Analisa Kekuatan Tekan | 44 |
| Gambar 24 Hasil Analisa Kekuatan Tarik Belah..... | 46 |
| Gambar 25 Hasil Analisa Kekuatan Lentur | 48 |
| Gambar 26 Perbandingan Koefisien Berbagai Peneliti..... | 52 |
| Gambar 27 Hubungan Beban dan Perpindahan Beton H-0% | 53 |
| Gambar 28 Hubungan Beban dan Perpindahan Beton H-1% | 54 |
| Gambar 29 Hubungan Beban dan Perpindahan Beton H-2% | 55 |
| Gambar 30 Hubungan Beban dan Perpindahan Beton H-3% | 56 |



| | |
|--|----|
| Gambar 31 Rata-Rata Hubungan Beban dan Perpindahan | 57 |
| Gambar 32 Hubungan Tegangan dan Regangan Beton | 58 |
| Gambar 33 Hasil Pengujian SEM Skala 500µm Beton H-1% | 60 |
| Gambar 34 Hasil Pengujian SEM Skala 500µm Beton H-2% | 60 |
| Gambar 35 Hasil Pengujian SEM Skala 500µm Beton H-3% | 60 |
| Gambar 36 Hasil Pengujian SEM Skala 100µm Beton H-1% | 61 |
| Gambar 37 Hasil Pengujian SEM Skala 100µm Beton H-2% | 61 |
| Gambar 38 Hasil Pengujian SEM Skala 100µm Beton H-3% | 61 |
| Gambar 39 Hasil Pola Retak Beton H-0%-C-1..... | 63 |
| Gambar 40 Hasil Pola Retak Beton H-0%-C-2..... | 63 |
| Gambar 41 Hasil Pola Retak Beton H-0%-C-3..... | 63 |
| Gambar 42 Hasil Pola Retak Beton H-1%-C-1..... | 64 |
| Gambar 43 Hasil Pola Retak Beton H-1%-C-2..... | 64 |
| Gambar 44 Hasil Pola Retak Beton H-1%-C-3..... | 64 |
| Gambar 45 Hasil Pola Retak Beton H-2%-C-1..... | 65 |
| Gambar 46 Hasil Pola Retak Beton H-2%-C-2..... | 65 |
| Gambar 47 Hasil Pola Retak Beton H-2%-C-3..... | 65 |
| Gambar 48 Hasil Pola Retak Beton H-3%-C-1..... | 66 |
| Gambar 49 Hasil Pola Retak Beton H-3%-C-2..... | 66 |
| Gambar 50 Hasil Pola Retak Beton H-3%-C-3..... | 66 |



DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 1 Kandungan Unsur Kimia <i>Human Hair</i> | 9 |
| Tabel 2 Batas-Batas Gradasi Agregat Halus | 11 |
| Tabel 3 Batas-Batas Gradasi Agregat Kasar | 12 |
| Tabel 4 Faktor Koreksi Rasio Panjang (L) dengan Diameter (D) Benda Uji | 14 |
| Tabel 5 Korelasi Kekuatan Tekan Berdasarkan Diameter Benda Uji (L/D=2) | 14 |
| Tabel 6 Nilai Hubungan Kekuatan Tarik Belah Terhadap Kekuatan tekan..... | 17 |
| Tabel 7 Jumlah Benda Uji..... | 24 |
| Tabel 8 Standar Metode Pengujian Karakteristik Agregat Halus | 27 |
| Tabel 9 Standar Metode Pengujian Karakteristik Agregat Kasar | 27 |
| Tabel 10 Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus | 38 |
| Tabel 11 Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar | 40 |
| Tabel 12 Kandungan Unsur Kimia <i>Human Hair Fiber</i> | 41 |
| Tabel 13 Sifat Fisik dan Sifat Mekanik HHF..... | 41 |
| Tabel 14 Rancangan Campuran Beton..... | 43 |
| Tabel 15 Hasil Analisa Kekuatan Tekan Beton | 44 |
| Tabel 16 Hasil Analisa Kekuatan Tarik Belah Beton | 46 |
| Tabel 17 Hasil Analisa Kekuatan Lentur Beton | 48 |
| Tabel 18 Penggunaan Beton HHF untuk berbagai Tipe Konstruksi..... | 49 |
| Tabel 19 Modulus Elastisitas Beton..... | 50 |
| Tabel 20 Koefisien Kekuatan Tarik Belah Terhadap Kekuatan Tekan | 51 |
| Tabel 21 Nilai Hubungan Kekuatan Tarik Belah Terhadap Kekuatan tekan..... | 51 |



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

| Lambang/Singkatan | Arti dan Keterangan |
|-------------------|---|
| f'_c | Kekuatan tekan beton (MPa) |
| f_{ct} | Kekuatan tarik belah beton (MPa) |
| f_r | Kekuatan lentur beton (MPa) |
| P | Gaya tekan aksial (N) |
| A | Luas penampang melintang benda uji (mm ²) |
| L | Panjang Benda Uji (mm) |
| d | Diameter Benda Uji (mm) |
| ε | Regangan |
| ΔL | Perubahan Panjang (mm) |
| L_0 | Panjang Awal (mm) |
| E | Modulus Elastisitas (MPa) |
| S_1 | Tegangan pada saat regangan 0,00005 (MPa) |
| S_2 | Tegangan pada 40% tegangan runtuh (MPa) |



DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|----|
| Lampiran 1 Analisa Kekuatan Tekan & Modulus Elastisitas | 74 |
| Lampiran 2 Analisa Kekuatan Tarik Belah..... | 75 |
| Lampiran 3 Analisa Kekuatan Lentur | 76 |
| Lampiran 4 Pembacaan Beban dan Perpindahan Beton H-0% | 77 |
| Lampiran 5 Pembacaan Beban dan Perpindahan Beton H-1% | 78 |
| Lampiran 6 Pembacaan Beban dan Perpindahan Beton H-2% | 79 |
| Lampiran 7 Pembacaan Beban dan Perpindahan Beton H-3% | 80 |



KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil‘aalamin, puji syukur kehadiran Illahi Rabbi atas rahmat dan hidayah yang telah dilimpahkan-Nya, maka penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini, sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari dalam menyusun tugas akhir ini tidak terlepas dari banyaknya bantuan dan dorongan dari berbagai pihak, sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan sebagaimana mestinya. Dengan demikian, sudah selayaknya dalam kesempatan ini penulis menghaturkan ucapan terima kasih dengan segala kerendahan hati, kepada:

1. **Bapak Prof Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN.Eng.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Dr. Eng. Bambang Bakri, S.T., M.T.**, selaku Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. **Bapak Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
5. **Bapak Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng.**, selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan bimbingan.
6. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.



Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua Orang Tua tercinta, yaitu Ayahanda Muh Akib dan Ibunda Salbia, atas kasih sayang, pengorbanan serta segala dukungan selama ini baik secara moril dan materi.
2. Teman-teman Lab. Riset Gempa 2020 yaitu Nabila, Sheren, Dimas, Agung, Syahrur, Valdo, Miko, Amar, dan Marcel yang saling membantu dalam proses penyelesaian penelitian.
3. Teman-teman Asisten di Lab. Struktur dan Bahan yaitu Kak Hasan, Herli, Nurul Annisa, Fadhil, Mita, Rivaldo, dan Syawal yang turut membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Saudara-saudariku seangkatan Teknik Sipil dan Lingkungan 2020 yang terhimpun dalam keluarga besar ENTITAS 2021. Terima kasih atas segala pengalaman, cerita suka dukanya serta memberi makna pada Arti Sahabat.

Gowa, Agustus 2024

Penulis



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan di seluruh dunia. Hal ini karena beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi, bahan-bahan penyusunnya mudah didapat, tahan terhadap air dan angin, dapat dicetak dalam berbagai bentuk, ekonomis, dan memiliki biaya perawatan yang rendah (Waqas et al., 2023). Namun, beton memiliki beberapa kelemahan diantaranya beton lemah dalam memikul tegangan tarik, daktilitas yang rendah, dan memiliki retakan mikro (Bheel et al., 2020). Oleh karena itu, perkembangan penelitian beberapa tahun terakhir, mencoba mencari solusi untuk mengatasi kelemahan yang terdapat dalam beton.

Fiber Reinforced Concrete menjadi salah satu inovasi untuk mengatasi kelemahan beton. Penambahan serat ke dalam beton terbukti berhasil dalam meningkatkan sifat-sifat karakteristik beton utamanya kekuatan tarik beton, meningkatkan daktilitas, menghambat pertumbuhan retak, dan meningkatkan ketangguhan beton (Bheel et al., 2020). Serat yang umumnya ditambahkan ke dalam campuran beton berupa serat sintetis seperti serat baja, serat kaca, dan serat karbon. Namun, serat sintetis tersebut merupakan material yang relatif mahal, tidak dapat diperbarui, dan penggunaannya terbatas. Di sisi lain, serat alami memiliki sifat mekanik yang baik dan lebih ekonomis. Oleh karena itu, penggunaan serat alami pada beton merupakan sebuah alternatif yang lebih menjanjikan untuk menciptakan beton ramah lingkungan dan berkelanjutan (Balachandar et al., 2019).

Salah satu contoh serat alami yaitu *human hair*. Waqas et al. (2023) mengungkapkan bahwa kecepatan pertumbuhan *human hair* adalah 1.25cm per bulan atau 15cm dalam setahun. Hal ini menyebabkan ketersediaan *human hair* di seluruh dunia sangat berlimpah. Selain itu, banyak negara yang hanya

buang limbah *human hair* secara terbuka padahal *human hair* adalah material yang membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk dapat terurai, menimbulkan bau yang tidak sedap, dan apabila dibakar akan menghasilkan



gas-gas berbahaya seperti amonia, karbonil sulfida, dan lain-lain sehingga menyebabkan pencemaran lingkungan yang serius (Bheel et al., 2020).

Kathiresan & Meenakshisundaram (2022) mengungkapkan bahwa *human hair* memiliki kekuatan tarik yang tinggi sekitar 155MPa – 215MPa yang setara dengan kawat tembaga dengan diameter yang sama, memiliki berat yang ringan, mudah didapat, dan ekonomis. Oleh karena itu, *human hair* dapat digunakan sebagai serat dalam campuran beton.

Beton secara umum tersusun atas agregat kasar, agregat halus, air, dan semen. Semen merupakan bahan pengikat utama dalam pembuatan beton. Semen diproduksi dengan memanfaatkan sumber daya alam seperti batu kapur, tanah liat, dan gipsum. Sumber daya alam tersebut tersedia secara alami dan lambat laun akan semakin berkurang yang dapat menyebabkan kerusakan lingkungan jika eksploitasi sumber daya alam tersebut dilakukan secara terus-menerus dari hari ke hari (Manjunatha et al., 2021).

Oleh karena itu, dengan tujuan untuk mengatasi masalah pembuangan limbah *human hair*, memanfaatkan kekuatan tarik *human hair* yang tinggi, dan mengurangi penggunaan semen. Maka, *human hair* digunakan sebagai *fiber* substitusi parsial semen dalam campuran beton.

Studi penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Srivastava et al., 2023); (Waqas et al., 2023); (Manjunatha et al., 2021); (Bheel et al., 2020); Meghwar et al. (2020) terkait pemanfaatan *Human Hair Fiber* (HHF) sebagai substitusi parsial semen dalam campuran beton, melaporkan bahwa HHF cukup baik digunakan dalam mengganti sebagian semen yang memengaruhi peningkatan kekuatan tekan, kekuatan tarik, dan kekuatan lentur beton dengan variasi tertentu.

Maka berdasarkan semua hal yang telah dijelaskan di atas, dengan tujuan untuk mengeksplorasi potensi penggunaan HHF sebagai substitusi parsial semen dalam campuran beton dan untuk menyelidiki pengaruhnya terhadap sifat-sifat karakteristik beton yang dihasilkan. Maka penulis tertarik

melakukan penelitian dengan judul “**Studi Karakteristik Beton *Human Hair* Fiber (HHF) Sebagai Substitusi Semen**”.



1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas maka dapat dirumuskan masalah yakni:

1. Bagaimana pengaruh substitusi semen dengan HHF pada beton terhadap nilai kekuatan tekan, modulus elastisitas, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur beton.
2. Bagaimana pengaruh substitusi semen dengan HHF pada beton terhadap hubungan tegangan dan regangan beton.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis pengaruh substitusi semen dengan HHF pada beton terhadap nilai kekuatan tekan, modulus elastisitas, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur.
2. Menganalisis pengaruh substitusi semen dengan HHF pada beton terhadap hubungan tegangan dan regangan beton.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi sehubungan dengan pengaruh substitusi HHF pada beton terhadap perilaku mekanik beton yang ditinjau dari kekuatan tekan beton, kekuatan tarik belah beton, kekuatan lentur, dan nilai modulus elastisitas beton.
2. Sebagai referensi untuk penelitian lanjutan mengenai pengaruh substitusi semen dengan HHF pada kekuatan beton.
3. Menjadi dasar rekomendasi dalam penggunaan bahan HHF sebagai bahan substitusi semen pada beton.



1.5 Batasan Masalah

Untuk mencapai tujuan penelitian dan menghindari pembahasan diluar dari konsep penelitian, maka pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan terhadap HHF sebagai substitusi parsial semen dengan variasi 0%, 1%, 2%, dan 3% terhadap berat semen.
2. HHF yang digunakan sebagai substitusi semen memiliki panjang maksimal 20mm dan telah dirawat dengan 5% NaOH selama 1 jam.
3. HHF yang digunakan adalah limbah rambut yang berasal dari pangkas rambut di daerah sekitar Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan
4. Pengujian kekuatan tekan, modulus elastisitas, dan kekuatan tarik belah beton menggunakan sampel silinder dengan ukuran 100mm x 200mm pada umur 28 hari sebanyak 3 sampel untuk setiap variasi.
5. Pengujian kekuatan lentur beton menggunakan sampel balok dengan ukuran 400mm x 100mm x 100 mm pada umur 28 hari sebanyak 3 sampel untuk setiap variasi.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Waqas et al. (2023) dalam penelitiannya mencoba mensubstitusi semen dalam campuran beton dengan *human hair* terhadap variasi 0%, 1%, 2%, dan 3% terhadap berat semen. Dalam penelitian tersebut digunakan mix design beton 1:2:4 dan 1:1.5:3. *Human hair* yang digunakan memiliki panjang yang bervariasi antara 20mm - 60mm dengan diameter berkisar antara 80 μ m – 150 μ m. Setelah dilakukan pengujian, ditemukan bahwa kekuatan tekan beton meningkat pada semua variasi pengujian dengan peningkatan terbesar pada variasi substitusi 2% senilai 9.59% pada mix design 1:2:4 dan 8.16% pada mix design 1:1.5:3. Hal yang sama terjadi pada kekuatan tarik belah dan kekuatan lentur beton dimana peningkatan kekuatan terjadi pada semua variasi dengan peningkatan terbesar juga terjadi pada variasi substitusi 2% senilai 19.91% pada mix design 1:2:4 dan 6.56% pada mix design 1:1.5:3 untuk kekuatan tarik belah beton. Untuk kekuatan lentur beton pada mix design 1:2:4 senilai 17.81% dan pada mix design 1:1.5:3 senilai 21.10% terhadap beton kontrol.

Manjunatha et al. (2021) melakukan penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan sifat fisik dan sifat mekanik beton dengan menggunakan *human hair* sebagai fiber di dalam beton. *Human hair* digunakan sebagai substitusi parsial semen dengan variasi 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, dan 3% terhadap berat semen. Penelitian ini menggunakan *human hair* dengan panjang 12mm dan dilakukan pengujian kekuatan tekan, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur beton pada umur 7 hari, 14 hari, 28 hari, 56 hari, dan 90 hari. Hasil penelitian pada kekuatan tekan beton umur 28 hari menunjukkan kekuatan tekan beton meningkat untuk semua variasi pengujian kecuali pada variasi 3% yang mengalami penurunan kekuatan tekan. Peningkatan kekuatan tekan

tercapai pada variasi 2% sebesar 4.18% dan variasi 2.5% sebesar 3.18% dibandingkan beton kontrol. Untuk pengujian kekuatan tarik belah beton pada umur 28 hari menunjukkan tren yang sama seperti pada pengujian



kekuatan tekan beton di mana terjadi peningkatan kekuatan tarik belah untuk semua variasi kecuali pada variasi 3%. Peningkatan kekuatan tarik belah tertinggi dicapai pada variasi 2% sebesar 10.41% dan variasi 2.5% sebesar 16.38% dibandingkan beton kontrol. Sementara itu, hasil pengujian kekuatan lentur beton menunjukkan peningkatan untuk semua variasi pengujian dengan peningkatan kekuatan lentur tertinggi dicapai pada variasi 2% sebesar 12.01% dan variasi 2.5% sebesar 8.87% dibandingkan beton kontrol.

Bheel et al. (2020) melakukan penelitian menggunakan *human hair* dengan panjang 8mm – 100mm dan diameter 40 μ m – 120 μ m untuk mensubstitusi sebagian semen dalam beton. *Human hair* disubstitusi terhadap semen dengan variasi 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4% terhadap berat semen kemudian diukur karakteristiknya pada umur 7 hari, 28 hari, dan 90 hari. Hasil penelitian menunjukkan terdapat peningkatan kekuatan tekan pada variasi 1% sebesar 4.25% (7 hari), 8.54% (28 hari), dan 10.21% (90 hari) sementara variasi yang lain menunjukkan penurunan terhadap variasi 0% sebagai beton kontrol. Penurunan kekuatan tekan terbesar terjadi pada variasi 4% sebesar 21.70% (7 hari), 13.88% (28 hari), dan 10.21% (90 hari). Hasil pengujian kekuatan tarik belah menunjukkan peningkatan pada variasi 1% dan variasi 2%. Peningkatan terbesar terjadi pada variasi 2% sebesar 17.68% (7 hari), 21.86% (28 hari), dan 22.11% (90 hari) kemudian kekuatan tarik belah mengalami penurunan pada variasi 3% dan variasi 4% di mana penurunan terbesar terjadi pada variasi 4% sebesar 12.12% (7 hari), 4.30% (28 hari), dan 2.11% (90 hari). Peningkatan kekuatan tarik belah disebabkan karena kekuatan *human hair* dan ikatan yang terjadi di antara pasta semen dan *human hair* cukup kuat sehingga *human hair* dapat mencegah penyebaran retakan mikro dan pada akhirnya meningkatkan kekuatan tarik beton. Hasil Pengujian kekuatan lentur memberikan hasil peningkatan terjadi pada variasi 1%, 2%, dan 3%. Peningkatan terbesar kekuatan lentur dicapai pada variasi 2% sebesar 8.6% (7 hari), 12.81% (28 hari), dan 13.63% (90 hari). Sementara itu, kekuatan lentur mengalami penurunan pada variasi 4% sebesar 15.05% (7 hari), 9.71% (28 hari), dan 2.11% (90 hari) jika dibandingkan dengan beton kontrol.



Meghwar et al. (2020) dalam penelitiannya mencoba mensubstitusi semen dalam campuran beton dengan *human hair* dengan variasi 0%, 1%, 2%, dan 3% terhadap berat semen. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini berupa pengujian kekuatan tarik belah dan kekuatan lentur dengan panjang *human hair* yang digunakan bervariasi antara 5mm - 100mm. Setelah dilakukan pengujian, ditemukan bahwa kekuatan tarik belah beton meningkat sebesar 14.87% pada variasi 1% dan meningkat sebesar 5.13% pada variasi 2%. Sementara itu, kekuatan tarik belah beton mengalami penurunan sebesar 3.59% pada variasi 3% jika dibandingkan dengan beton kontrol. Fluktuasi tren didapatkan pada pengujian kekuatan lentur beton di mana terjadi penurunan pada variasi 1% sebesar 24.07% kemudian terjadi peningkatan pada variasi 2% sebesar 7.41% kemudian terjadi penurunan lagi pada variasi 3% sebesar 10.29% jika dibandingkan dengan beton kontrol.

Oveas & Singh (2019) dalam penelitiannya mencoba mensubstitusi parsial semen dalam campuran beton menggunakan *human hair* dengan variasi 0%, 1%, 2%, dan 3%. *Human hair* yang digunakan di dalam penelitian ini memiliki panjang 50mm - 60mm. Hasil pengujian kekuatan tekan menunjukkan peningkatan kekuatan pada variasi 1% sebesar 8.82% dan pada variasi 2% sebesar 16.86%. Namun, pada variasi 3% kekuatan tekan beton mengalami penurunan sebesar 2.20% jika dibandingkan dengan variasi 0% sebagai beton kontrol. Untuk kekuatan tarik belah beton, tren yang sama ditunjukkan di mana hasil pengujian kekuatan tarik belah mengalami peningkatan sebesar 9.49% pada variasi 1% dan meningkat sebesar 29.75% pada variasi 2% sementara pada variasi 3% mengalami penurunan sebesar 3.16% jika dibandingkan dengan beton kontrol. Hasil pengujian kekuatan lentur juga menunjukkan tren yang sama di mana peningkatan terjadi pada variasi 1% sebesar 6.02% dan pada variasi 2% peningkatan terjadi sebesar 15.66% kemudian kekuatan lentur mengalami penurunan pada variasi 3%

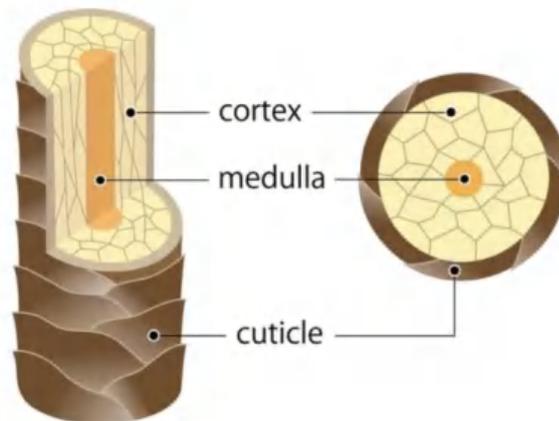
sebesar 3.16% sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi substitusi 2% *human hair* terhadap berat semen memberikan nilai optimum untuk semua jenis pengujian kekuatan mekanik beton.



2.2 Human Hair

Human hair atau rambut merupakan sistem kompleks yang terintegrasi dari beberapa komponen morfologi yang bertindak sebagai satu kesatuan. Bagian rambut yang terlihat di atas kulit disebut serat rambut dan bagian yang terletak di dalam kulit disebut folikel. *Human hair* memiliki diameter sekitar 50-100 μ m, memiliki fungsi sebagai pelindung kulit kepala dari sengatan sinar matahari, kedinginan, dan gangguan mekanis terhadap kepala (Cruz et al., 2016).

Human hair dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu kutikula, korteks, dan medulla. Kutikula merupakan lapisan sel tipis yang saling tumpang tindih di permukaan rambut dan menyumbang 10% dari total berat rambut. Korteks menyumbang sekitar 90% dari total berat rambut, terdiri dari sel-sel berbentuk gelendong yang sejajar secara aksial dan medulla mengisi ruang di tengah korteks yang dapat menerus atau terputus-putus (Murillo et al., 2024).



Gambar 1 Struktur *Human Hair*

Human hair memiliki struktur silinder yang sangat teratur, dibentuk oleh sel-sel keratin. *Human hair* memiliki karakteristik elastis, dan dapat mengalami peregangan sedang, baik dalam keadaan basah maupun kering. Saat kering, *human hair* dapat meregang 20-30% dari panjangnya dan dapat mencapai hingga 50% pada kondisi basah (Manaf et al., 2017). Secara komposisi unsur kimia *human hair* disajikan pada Tabel 1.



Tabel 1 Kandungan Unsur Kimia *Human Hair*

| Unsur | Persentase (%) |
|--------------|----------------|
| Karbon (C) | 50.65 |
| Oksigen (O) | 20.85 |
| Nitrogen (N) | 17.14 |
| Hidrogen (H) | 6.36 |
| Belerang (S) | 5.0 |

Sumber: Manaf et al., (2017)

Tabel 1 menunjukkan kandungan unsur kimia *human hair* yang sebagian besar terdiri atas unsur karbon sebanyak 50.65%. Secara kandungan senyawa kimia *human hair* terdiri atas protein keratin sebanyak 65% - 95% sedangkan senyawa yang lain yaitu air, lipid, dan pigmen (Cruz et al., 2016).

2.2.1 Alkali Treatment

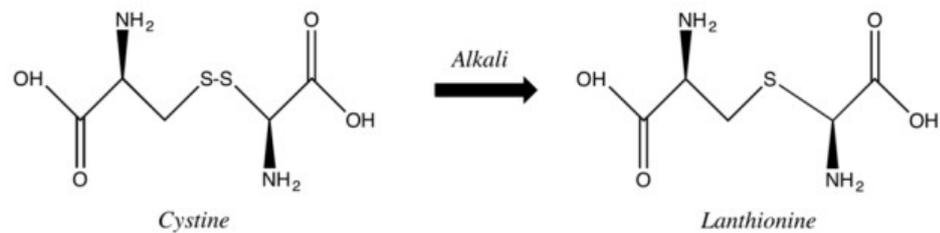
Human hair memiliki kemampuan penyerapan air yang tinggi yang mengakibatkan lemahnya ikatan antara matriks beton dengan *human hair*. Oleh karena itu, untuk mengoptimalkan ikatan antara *human hair* dengan matriks beton sebuah alternatif yang dapat digunakan adalah alkali *treatment* (Murillo et al., 2024).

Alkali *treatment* merupakan salah satu perawatan yang paling banyak digunakan dengan metode merendam serat dalam larutan alkali (NaOH) dengan konsentrasi dan waktu tertentu (Murillo et al., 2024).

Cystine merupakan protein keratin yang paling penting di dalam *human hair* yang menentukan kekerasan struktur, sifat mekanik, sifat termal, dan sifat kimiawi *human hair*. Stabilitas struktur *human hair* berasal dari berbagai interaksi antar rantai proteinnya. Interaksi ini berkisar dari ikatan kovalen, seperti ikatan disulfida, ikatan hidrogen, dan sebagainya. Ikatan disulfida adalah kunci stabilitas keratin (Cruz et al., 2016).

Reaksi antara *human hair* (*cystine*) dengan alkali (NaOH) menyebabkan pemecahan ikatan disulfida. Ion hidroksil dalam NaOH mengganggu ikatan disulfida pada *human hair* sehingga dapat terjadi penataan jembatan disulfida menghasilkan *lanthionine* (Cruz et al., 2016).





Gambar 2 Reaksi antara *Cystine* dengan Alkali (NaOH)

Proses ini dapat membantu menghilangkan minyak dan kotoran dari permukaan serat. Selain itu, alkali *treatment* meningkatkan kekasaran permukaan serat yang berakibat kepada peningkatan ikatan *human hair* dengan matriks beton (Murillo et al., 2024)

2.3 Beton

SNI 2847:2019 mendefinisikan beton sebagai campuran antara semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*).

2.3.1 Agregat Halus

SNI 03-2834-2000 mendefinisikan agregat halus sebagai pasir alam hasil desintegrasi secara alami dari batu atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5mm.



Gambar 3 Agregat Halus



Distribusi ukuran butiran agregat halus dibagi menjadi empat zona yaitu: Zona I (kasar), Zona II (sedang), Zona III (agak halus), dan Zona IV (halus). Adapun gradasi untuk setiap daerah dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Batas-Batas Gradasi Agregat Halus

| No saringan | Ukuran saringan (mm) | Presentase berat yang lolos saringan (%) | | | |
|-------------|----------------------|--|------------------|-----------------------|-----------------|
| | | Zona I (kasar) | Zona II (sedang) | Zona III (agak halus) | Zona IV (halus) |
| 3/8" | 9,6 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| No.4 | 4,8 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 95-100 |
| 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 | 5-20 | 8-30 | 12-40 | 15-50 |
| No.100 | 0,15 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-15 |

Sumber: SNI 03-2834-2000

2.3.2 Agregat Kasar

SNI 03-2834-2000 mendefinisikan agregat kasar sebagai kerikil hasil desintegrasi alami dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5mm – 40mm.



Gambar 4 Agregat Kasar



Agregat kasar harus mempunyai gradasi yang baik, artinya harus terdiri butiran yang ukuran butirnya beragam, sehingga dapat mengisi rongga-rongga yang terdapat di dalam beton. Persyaratan batas-batas susunan besar butir agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Batas-Batas Gradasi Agregat Kasar

| No saringan | Ukuran saringan (mm) | Presentase berat yang lolos saringan (%) | | |
|-------------|----------------------|--|---------------|---------------|
| | | Ukuran nominal agregat (mm) | | |
| | | maksimum 10mm | maksimum 20mm | maksimum 40mm |
| 1½'' | 38,1 | | 100 | 95-100 |
| ¾'' | 19,0 | 100 | 95-100 | 37-70 |
| 3/8'' | 9,52 | 50-85 | 30-60 | 10-40 |
| No.4 | 4,76 | 0-10 | 0-10 | 0-5 |

Sumber: SNI 03-2834-2000

2.3.3 Semen

Semen akan mengeras bila bereaksi dengan air dan membentuk pasta semen. Semen Portland yang banyak dijumpai di pasaran termasuk jenis semen hidrolik. Semen Portland diproduksi dari penghancuran klinker yang mengandung kalsium silika hidrolik, biasanya mengandung satu atau lebih bentuk kalsium sulfat sebagai hasil penggilingan tambahan. Bahan baku dalam pembuatan semen berupa CaO, SiO₂, Al₂O₃ dan bahan tambahan lainnya (Susilorini & Sambowo, 2011).



Gambar 5 Semen



Adapun jenis-jenis semen Portland menurut SNI 7656:2012 adalah:

1. Jenis I yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan 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.

2.3.4 Air

Air memiliki peranan yang sangat penting dalam campuran beton karena akan bereaksi secara kimia dengan semen. Air terbaik untuk campuran beton adalah air standar air minum yaitu air bersih, tidak mengandung minyak, garam, dan bahan-bahan lain yang dapat merusak beton atau baja tulangan. Sedangkan air dengan kualitas buruk, mengandung kotoran dan bakteri harus dihindari (Susilorini & Sambowo, 2011).



Gambar 6 Air



2.4 Kekuatan Tekan Beton (f'_c)

Kekuatan tekan beton dapat diartikan sebagai besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur apabila dibebani gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kekuatan tekan beton merupakan sifat terpenting dalam kualitas beton dibanding dengan sifat-sifat lain. Kekuatan tekan beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat, dan air.

Pengujian kekuatan tekan mengacu pada SNI 1974:2011, standar ini membatasi pengujian hanya untuk beton yang memiliki berat isi (*unit weight*) lebih besar dari 800kg/m^3 . Dalam SNI 1974:2011, diatur pula faktor koreksi rasio panjang (L) dengan diameter (D) benda uji dan faktor koreksi korelasi kekuatan tekan silinder berdasarkan diameter benda uji. Hal tersebut bermakna nilai yang diperoleh perlu dikalikan dengan faktor koreksi sesuai tabel untuk memperoleh nilai yang lebih akurat.

Faktor koreksi rasio panjang (L) dengan diameter (D) benda uji disajikan pada Tabel 4 dan Faktor koreksi korelasi kekuatan tekan silinder berdasarkan diameter benda uji disajikan pada Tabel 5.

Tabel 4 Faktor Koreksi Rasio Panjang (L) dengan Diameter (D) Benda Uji

| | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|
| L/D | 2.00 | 1.75 | 1.50 | 1.25 | 1.00 |
| Faktor | 1.00 | 0.98 | 0.96 | 0.93 | 0.87 |

Sumber: SNI 1974:2011

Tabel 5 Korelasi Kekuatan Tekan Berdasarkan Diameter Benda Uji (L/D=2)

| Tinggi (mm) | Diameter (mm) | Faktor Koreksi |
|-------------|---------------|----------------|
| 50 | 100 | 1.09 |
| 100 | 200 | 1.04 |
| 150 | 300 | 1.00 |
| 200 | 400 | 0.96 |

Sumber: SNI 1974:2011



Pengujian kekuatan tekan beton dilakukan pada benda uji berbentuk silinder dengan dimensi ukuran panjang 200mm dan diameter 100mm, sehingga L/D bernilai 2.00 dengan faktor koreksi 1.00 sedangkan faktor koreksi korelasi kekuatan tekan silinder berdasarkan diameter benda uji senilai 1.04 untuk sampel yang telah melewati tahap perawatan (curing) air selama 28 hari. Nilai kekuatan tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan 1, sebagai berikut:

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana

f'_c = kekuatan tekan beton (MPa)

P = beban (N)

A = luas penampang (mm²)

2.5 Kekuatan Tarik Belah (f_{ct})

Kekuatan tarik belah beton adalah nilai kekuatan tarik tidak langsung dari benda uji beton berbentuk silinder yang diperoleh dari hasil pembebanan benda uji tersebut yang diletakkan mendatar sejajar dengan permukaan meja penekan mesin uji.

Berdasarkan SNI 2491:2014, kekuatan tarik belah beton digunakan dalam mendesain elemen struktur beton untuk mengevaluasi ketahanan geser beton dan untuk menentukan panjang penyaluran dari tulangan. Kekuatan tarik belah pada umumnya lebih besar dari kekuatan tarik langsung dan lebih rendah dari kekuatan lentur.

Pengujian kekuatan tarik belah beton mengacu kepada SNI 2491:2014 dengan menggunakan sampel silinder berukuran 100mm x 200mm yang ditempatkan secara horizontal diatas pelat mesin percobaan kemudian diberikan beban tegak lurus terhadap sumbu longitudinalnya. Kekuatan tarik belah beton dapat dihitung sesuai dengan persamaan 2, sebagai berikut:



$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi l d} \quad (2)$$

Dimana:

f_{ct} = kekuatan tarik belah beton (MPa)

P = beban (N)

l = panjang benda uji (mm)

d = diameter benda uji (mm)

2.6 Hubungan Kekuatan Tarik Belah Terhadap Kekuatan Tekan Beton

Hasil pengujian kekuatan tekan dan kekuatan tarik belah beton dapat digunakan untuk mencari nilai hubungan kekuatan tarik belah terhadap kekuatan tekan beton. Hubungan kekuatan tekan terhadap kekuatan tarik beton bertujuan untuk mengkonversi nilai dari kekuatan tekan ke kekuatan tarik.

Persamaan umum untuk mendapatkan prediksi nilai hubungan kekuatan tarik belah terhadap kekuatan tekan beton pada umur 28 hari didapatkan dengan menggunakan Persamaan 3 berdasarkan ACI 318-14.

$$f_{ct} = k \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

Dimana:

f_{ct} = kekuatan tarik belah beton (MPa)

f'_c = kekuatan tekan beton (MPa)

k = koefisien

Berbagai nilai koefisien (k) telah diusulkan oleh berbagai peneliti. Jaber et al. (2018) menyebutkan nilai koefisien (k) untuk hubungan kekuatan tarik belah terhadap kekuatan tekan beton berkisar antara 0.50 - 0.85. Berikut nilai koefisien (k) yang diusulkan oleh peneliti lain sebagaimana ditunjukkan pada tabel 6.



Tabel 6 Nilai Hubungan Kekuatan Tarik Belah Terhadap Kekuatan tekan

| Standar Koefisien | Referensi |
|-------------------|----------------------------|
| $0.56\sqrt{f'c}$ | ACI 318-14 & SNI 2847:2019 |
| $0.46\sqrt{f'c}$ | Putra & Widjaja (2015) |
| $0.65\sqrt{f'c}$ | Jaber et al. (2018) |

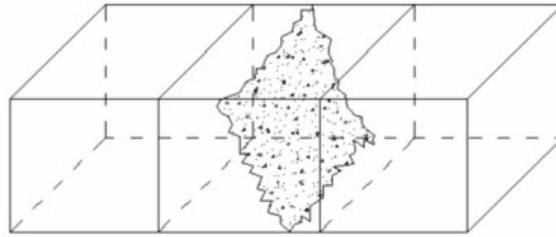
2.7 Kekuatan Lentur (f_r)

Kekuatan lentur adalah kemampuan balok beton yang diletakan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan kepadanya, sampai benda uji patah, dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas (SNI 4431:2011).

SNI 4431:2011, menjelaskan bahwa pada prinsipnya struktur beton pada bangunan sipil harus mampu menahan gaya yang bekerja seperti tekan dan lentur yang diakibatkan oleh energi dari luar seperti angin dan gempa pada bangunan gedung, tekanan air dan gempa pada bangunan air, tekanan kendaraan pada jembatan dan sebagainya. Struktur beton harus aman terhadap gaya-gaya tersebut. Untuk itu maka struktur beton harus memenuhi syarat tertentu agar bangunan tidak mengalami kegagalan, tetap stabil dan aman. Agar struktur beton aman terhadap gaya lentur yang bekerja, beton harus mempunyai kekuatan lentur tertentu sesuai dengan yang disyaratkan.

Kekuatan lentur dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran panjang 400mm, lebar 100mm, dan tinggi 100mm. Pengujian kekuatan lentur dilakukan dengan mengacu pada SNI 4431:2011 di mana apabila hasil pengujian menunjukkan bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah) sebagaimana terlihat dalam gambar 7.





Gambar 7 Bidang Patah Terletak di Daerah Pusat

Maka kekuatan lentur beton dihitung menurut persamaan 4 sebagai berikut:

$$f_r = \frac{P L}{b h^2} \quad (4)$$

Dimana:

- f_r = kekuatan lentur beton (MPa)
- P = beban (N)
- L = jarak (bentang) antara dua garis perletakan (mm)
- b = lebar tampang melintang benda uji (mm)
- h = tinggi tampang melintang benda uji (mm)

2.8 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan rasio tegangan terhadap regangan di bawah batas proporsional material. Modulus elastisitas diperoleh berdasarkan metode *secant modulus*, yaitu 40% dari tegangan puncak dari kurva tegangan-regangan. Pada penelitian ini nilai regangan diperoleh dengan menggunakan alat Compressometer dan pengolahan data dari hasil pengukuran alat LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*). Perhitungan modulus elastisitas beton dapat dihitung menggunakan rumus:

$$E_c = \frac{\text{Tegangan } (\sigma)}{\text{Regangan } (\varepsilon)} \quad (5)$$



Dimana:

E_c = modulus elastisitas (MPa)

σ = tegangan 40% dari beban maksimum (MPa)

ε = regangan longitudinal pada tegangan 40% dari beban maksimum

Berdasarkan ASTM C-469 modulus dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (6)$$

Dimana:

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

S_2 = tegangan pada saat 40% dari beban maksimum beton (MPa)

S_1 = tegangan saat regangan longitudinal mencapai 0,00005 (MPa)

ε_2 = regangan longitudinal yang dihasilkan pada saat S_2

Modulus Elastisitas beton juga dapat dihitung dengan rumus empiris menurut SNI 2847:2019, yaitu:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (7)$$

Dimana

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

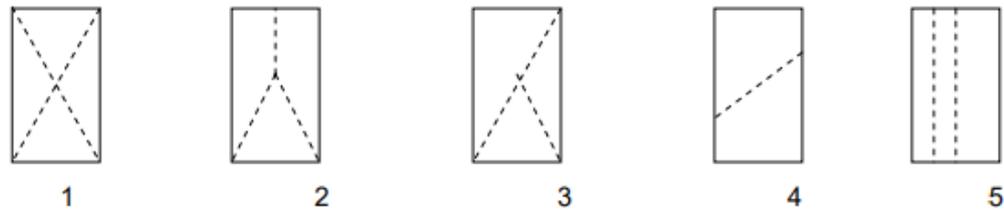
f'_c = kekuatan tekan beton (MPa)

2.9 Pola Retak

Retak merupakan jenis kerusakan yang paling sering terjadi pada struktur beton, dimana terjadi pemisahan antara massa beton yang relatif longgar dengan yang sempit. Retak pada struktur beton terjadi sebelum beton mengeras maupun setelah beton mengeras. Retak akan terjadi saat beton mulai



mengeras tapi telah dibebani, retak juga dapat terjadi apabila beton mengalami hidrasi berlebihan sehingga susut (*shrinkage*). Menurut SNI 1974:2011 ada 5 jenis pola keretakan yang dapat dilihat pada gambar dibawah:



Gambar 8 Sketsa Bentuk Kehancuran Benda Uji

Keterangan:

Gambar 1: Bentuk kehancuran kerucut

Gambar 2: Bentuk kehancuran kerucut dan belah

Gambar 3: Bentuk kehancuran kerucut dan geser

Gambar 4: Bentuk kehancuran geser

Gambar 5: Bentuk kehancuran sejajar sumbu tegak (kolumnar)

2.10 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan instrumen yang telah secara luas digunakan dalam mengobservasi material anorganik seperti logam dan komposit maupun material organik. SEM menggunakan elektron, dalam menghasilkan pencitraan.

Pengujian SEM dilakukan dengan tujuan untuk memvisualisasikan permukaan sampel material dengan resolusi tinggi. Keuntungan utama dari SEM adalah visualisasi resolusi tinggi yang memungkinkan pengamatan detail terhadap permukaan struktur dalam skala mikrometer hingga nanometer. Oleh karena itu, SEM sangat berguna dalam berbagai aplikasi seperti pada penelitian

material. Informasi yang diperoleh dari SEM dapat digunakan untukahami struktur, morfologis, distribusi ukuran partikel, dan permukaan an sampel.

