

**STUDI PENGARUH PANJANG PERBAIKAN DAN  
PERKUATAN BALOK DENGAN GEOPOLIMER FLY ASH  
DAN SERAT PVA**

**MULTASAM**

**D012 20 1028**



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2022**

***STUDY OF THE EFFECT OF BEAM REPAIR AND  
REINFORCEMENT WITH FLY ASH-BASED GEOPOLYMER  
AND PVA FIBERS***

**MULTASAM  
D012 20 1028**



**CIVIL ENGINEER GRADUATE PROGRAM  
ENGINEERING FACULTY  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

**STUDI PENGARUH PANJANG PERBAIKAN DAN PERKUATAN  
BALOK DENGAN GEOPOLIMER FLY ASH DAN SERAT PVA**

Tesis

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

**M U L T A S A M**  
D012201028

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2022**

**TESIS**

**STUDI PENGARUH PANJANG PERBAIKAN DAN PERKUATAN BALOK  
DENGAN GEOPOLIMER FLY ASH DAN SERAT PVA**

**MULTASAM**

**NIM : D012201028**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

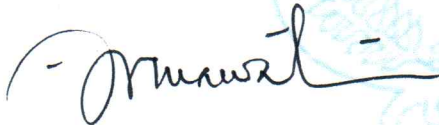
pada tanggal 16 Agustus 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



**Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.**  
NIP. 19720619 200012 2 001



**Dr. Eng. Fakhruddin, ST., M.Eng**  
NIP. 19870228 201903 1 005

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Sipil



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.**  
NIP. 19730926 200012 1 002



**Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.**  
NIP. 19720619 200012 2 001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Multasam

Nomor mahasiswa : D012201028

Program studi : Teknik Sipil

Konsentrasi : Struktur

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 22 Juli 2022

Yang menyatakan,



Multasam

## P R A K A T A

Puji dan syukur dipersembahkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan berkah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **“Studi Pengaruh Panjang Perbaikan dan Perkuatan Balok dengan Geopolimer Fly Ash Dan Serat PVA”** yang merupakan salah satu syarat diajukan untuk menyelesaikan studi S2 pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

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

Ibu Dr.Eng Rita Irmawaty, ST., M.T sebagai ketua program studi S2 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sekaligus juga sebagai pembimbing utama, dan Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, ST., M.Eng, sebagai pembimbing pendamping dalam penelitian ini, atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian ini, pelaksanaan penelitian sampai dengan penulisan tesis ini.

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada semua dosen pengajar dan staf, semua rekan – rekan mahasiswa program pascasarjana, terkhusus kepada program studi teknik sipil konsentrasi Struktur angkatan 2020, serta adik-adik Mukim Rekayasa Perkuatan, semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa menguatkan ikatan tali persaudaraan ini.

Kepada orang tua saya khususnya ibu, istri dan mertua serta kakak saya tercinta, tidak ada kata yang pantas diucapkan selain ucapkan terima kasih dan sembah sujud atas segala doa, pengorbanan, motivasi dan dorongan moril maupun materiil yang telah diberikan selama saya

menempuh pendidikan, semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan mempertemukan kita hingga di Surga-Nya.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak pernah luput dari kesalahan dan kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan penulisan karya ilmiah ini.

Akhirnya semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan karunia-Nya kepada kita dan semoga penelitian ini nantinya dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang keteknik sipil.

Makassar, Agustus 2022

MULTASAM

## ABSTRAK

**MULTASAM. Studi Pengaruh Panjang Perbaikan dan Perkuatan Balok dengan Geopolimer Fly Ash dan Serat PVA** (dibimbing oleh Dr. Eng Rita Irmawaty, ST., MT. dan Dr.Eng Fakhruddin, ST., M.Eng)

Salah satu upaya dalam mengurangi penggunaan dan produksi semen yang berdampak pada lingkungan adalah dengan penggunaan Geopolimer *fly ash*. Geopolimer adalah bentuk anorganik alumina-silika yang disintesa dari material yang banyak mengandung silika (Si) dan alumina (Al), yang salah satunya dapat menggunakan material *fly ash*. *Fly ash* sebagai salah satu buangan limbah merupakan material pengganti semen yang memiliki sifat pozzolanik. Saat ini geopolimer telah bergeser ke arah penggunaan mortar geopolimer dalam berbagai aplikasi perbaikan struktur yang disinyalir memiliki kemampuan sebagai lapisan pelindung untuk struktur beton karena memiliki kemampuan ikatan yang kuat. Sebagai pengganti OPC, geopolimer mempunyai sifat getas dengan kekuatan tarik yang rendah dan sensitif terhadap retak. Sehingga kekurangan ini mempengaruhi daya tahan jangka panjang struktur. Untuk meminimalisir kekurangan tersebut, penggunaan serat menjadi salah satu solusi. Serat PVA (*Polivynil Alcohol*) memiliki sifat yang baik untuk meningkatkan kekuatan beton. Serat ini memiliki modulus elastisitas tinggi, daya tahan, kekuatan tarik, dan kekuatan ikatan. Penelitian ini berfokus pada perilaku lentur balok beton bertulang dengan memanfaatkan Limbah *fly ash* sebagai Pengganti 100% semen dan serat PVA sebagai bahan tambah yang akan dikompositkan dengan beton konvensional. Lapisan komposit tersebut merupakan aplikasi perbaikan dan perkuatan struktur yang telah mengalami deteriorasi. Tahapan dalam penelitian ini dilakukan dengan membagi 2 (dua) variasi material yaitu material geopolimer tanpa serat PVA dan material geopolimer dengan serat PVA sebagai bahan perbandingan dengan beton konvensional. serta dengan 2 (dua) variasi panjang perbaikan dan perkuatan balok beton bertulang yaitu 1500 mm dan 2700 mm dan tebal lapisan sebesar 50 mm, yang selanjutnya akan menjadi fokus penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mortar geopolimer dengan serat lebih daktail jika dibandingkan dengan balok kontrol. Dimana terjadi peningkatan pada beban maksimum dan kekakuan pada balok perbaikan dan perkuatan struktur. Dari mode kegagalan sambungan, balok mortar geopolimer tanpa serat mengalami kegagalan debonding, sementara pada balok mortar geopolimer dengan serat, kegagalan sambungan akibat adanya delaminasi beton lama.

**Kata kunci** : Balok betong bertulang, mortar geopolimer, serat PVA



## ABSTRACT

MULTASAM. **Study of the Effect of Beam Repair and Reinforcement With Fly Ash-Based Geopolymer And Pva Fibers** (supervised by Dr. Eng Rita Irmawaty, ST., MT. dan Dr.Eng Fakhruddin, ST., M.Eng)

One of the efforts to reduce the use and production of cement that has an impact on the environment is the use of fly ash geopolymers. Geopolymer is an inorganic form of alumina-silica which is synthesized from materials that contain a lot of silica (Si) and alumina (Al), one of which can use fly ash. Fly ash as waste disposal is a cement substitute material that has pozzolanic properties. Currently, geopolymers have shifted towards the use of geopolymer mortars in various structural repair applications that are alleged to have the ability as a protective layer for concrete structures because they have strong bonding abilities. As a substitute for OPC, geopolymer has brittle properties with low tensile strength and is sensitive to cracking. Therefore, this deficiency affects the long-term durability of the structure. To minimize these shortcomings, the use of fiber is one solution. PVA (Polyvinyl Alcohol) fiber has good properties to increase the strength of concrete. These fibers have a high modulus of elasticity, durability, tensile strength, and bond strength. This study focuses on the flexural behavior of reinforced concrete beams by utilizing fly ash waste as a substitute for 100% cement and PVA fiber as an added material to be composited with conventional concrete. The composite layer is an application of repair and reinforcement of a deteriorating structure. The steps in this study were carried out by dividing 2 (two) variations of the material, namely geopolymer material without PVA fiber and geopolymer material with PVA fiber as a comparison material with conventional concrete. and with 2 (two) variations of the length of repair and reinforcement of reinforced concrete beams, namely 1500 mm and 2700 mm and a layer thickness of 50 mm, which will then be the focus of this research. The results showed that the geopolymer mortar with fiber was more ductile when compared to the control beam. Where there is an increase in the maximum load and stiffness in the beam repair and structural reinforcement. From the connection failure mode, the geopolymer mortar beam without fiber experienced debonding failure, while in the fiber geopolymer mortar beam; the joint failure was due to delamination of the old concrete.

**Keywords:** Reinforced concrete beams, geopolymer mortar, PVA fiber

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGAJUAN .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	iv
PRAKATA.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah .....	5
C. Tujuan Penelitian .....	5
D. Ruang Lingkup Penelitian .....	6
E. Manfaat Penelitian .....	6
F. Sistematika Penulisan.....	7
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>9</b>
A. Penelitian Terdahulu .....	9
1. Muhammad Lutfi M (2017) .....	9
2. Abdulrahman Albidaf (2017) .....	10
3. Asif Jalal (2021) .....	10
4. Amin Noushini (2013) .....	12
B. Tinjauan Umum .....	13

1. Pengertian Beton .....	13
2. Geopolimer .....	14
3. Beton Bertulang .....	17
4. Perbaikan dan Perkuatan Beton .....	19
C. Material Mortar Geopolimer .....	21
1. Abu Terbang ( <i>Fly Ash</i> ) .....	21
2. <i>Polivynil Alcohol (PVA)</i> .....	24
3. Alkali .....	25
4. <i>Superplasticizer</i> .....	27
5. Boraks .....	28
D. Karakteristik Beton Bertulang .....	28
1. Kuat Tekan .....	28
2. Kuat Tarik .....	31
3. Kuat Lentur .....	36
4. Modulus Elastisitas .....	37
5. Luas Tulangan Tarik Minimum .....	38
6. Kontrol Defleksi .....	38
7. Kekuatan Geser .....	40
8. Jenis Keruntuhan pada Balok .....	41
9. Pola Retak Balok Beton Bertulang .....	45
E. Perhitungan Kapasitas Momen .....	46
1. Perhitungan Momen Retak Pertama, $M_{cr}$ .....	46
2. Perhitungan Momen Leleh, $M_y$ .....	47
3. Perhitungan Momen Ultimit, $M_n$ .....	48
4. Perhitungan Lendutan .....	49

5. Uji Lentur Statik Monotonik .....	50
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>53</b>
A. Bagan Alir Penelitian .....	53
B. Waktu dan Lokasi Penelitian .....	54
C. Alat dan Bahan Penelitian .....	55
D. Variabel Penelitian .....	56
E. Pembuatan Benda Uji .....	56
1. Balok Kontrol (CB) .....	57
2. Balok Material Perbaikan dan Perkuatan Struktur .....	57
F. Prosedur Penelitian .....	58
1. Perancangan Campuran Mortar Geopolimer .....	58
2. Perancangan Campuran Balok Perkuatan .....	60
3. Pengujian Benda Uji .....	65
4. Analisis Karakteristik Mekanis Beton .....	65
5. Analisis Karakteristik Mekanis Tulangan .....	68
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>69</b>
1. Pengujian Lentur Balok .....	69
2. Hubungan Beban dan Lendutan .....	69
1. Pengaruh terhadap Material Perbaikan dan Perkuatan .....	71
2. Pengaruh terhadap Panjang Perkuatan .....	75
3. Hubungan Beban dan Regangan Beton.....	77
1. Balok GP 1500 dan GP 2700 .....	77
2. Balok GP-F 1500 dan GP-F 2700 .....	78

4. Hubungan Beban dan Regangan Beton.....	79
1. Balok GP 1500 dan GP 2700 .....	79
2. Balok GP-F 1500 dan GP-F 2700 .....	81
5. Pola Retak dan Mode Kegagalan.....	82
1. Balok Kontrol (CB) .....	83
2. Balok GP-1500 .....	83
3. Balok GP-2700 .....	85
4. Balok GP-F 1500 .....	87
5. Balok GP-F 2700 .....	89
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>92</b>
1. Kesimpulan .....	92
2. Saran .....	93
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>x</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Proses Terbentuknya Geopolimer .....	16
Gambar 2	Partikel <i>Fly Ash</i> Hasil Pengujian SEM .....	24
Gambar 3	Sifat Serat PVA yang Diambil dengan Kamera <i>Dino Lite</i> . .....	25
Gambar 4	Kegagalan Benda Uji Kuat Tekan Beton .....	30
Gambar 5	Hubungan Tegangan-Regangan Tekan Beton .....	30
Gambar 6	Grafik Tegangan-Regangan Baja Tulangan .....	33
Gambar 7	Hubungan Tegangan-Regangan Tarik Beton .....	34
Gambar 8	LVDT .....	35
Gambar 9	Alat Ukur Regangan Baja Tulangan .....	35
Gambar 10	Alat Ukur Regangan Beton .....	36
Gambar 11	Balok Dibebani Lentur Murni .....	37
Gambar 12	Distribusi Tegangan-Regangan Balok Tul. Rangkap .....	37
Gambar 13	Faktor Reduksi Kekuatan .....	38
Gambar 14	Lendutan pada Balok .....	40
Gambar 15	Pola Keruntuhan Balok Beton Bertulang .....	43
Gambar 16	Luas Transformasi pada Balok .....	47
Gambar 17	Blok Tegangan Ekuivalen <i>Whitney</i> .....	49
Gambar 18	Alat <i>Load Cell</i> dan <i>Data Logger</i> .....	51
Gambar 19	<i>Setup</i> Benda Uji .....	52
Gambar 20	Diagram Alir Pengujian .....	53
Gambar 21	Dimensi Benda Uji Balok Kontrol .....	57
Gambar 22	Dimensi Benda Uji Balok Material Perbaikan .....	58
Gambar 23	Perancangan campuran Mortar Geopolimer .....	58
Gambar 24	Material yang Digunakan .....	60
Gambar 25	Pengadukan Campuran pada <i>Mixer</i> .....	60
Gambar 26	Pabrikasi Benda Uji Balok Beton Bertulang .....	61
Gambar 27	Proses Pengecoran Mortar Geopolimer .....	62
Gambar 28	<i>Setup</i> Benda Uji .....	64

Gambar 29	Penempatan <i>Strain Gauge</i> .....	64
Gambar 30	Perbandingan Beban Maksimum Tiap Variasi Balok .....	70
Gambar 31	Hubungan Beban - Lendutan Tiap Variasi Balok .....	70
Gambar 32	Perbandingan beban terhadap lendutan untuk balok tanpa serat PVA .....	71
Gambar 33	Hubungan beban dan lendutan untuk balok dengan penambahan serat PVA .....	73
Gambar 34	Hubungan beban dan lendutan untuk balok panjang perkuatan 1500 mm .....	75
Gambar 35	Hubungan beban dan lendutan untuk balok panjang perkuatan 2700 mm .....	76
Gambar 36	Hubungan Beban – Regangan Beton tanpa penambahan serat PVA .....	77
Gambar 37	Hubungan Beban – Regangan Beton dengan penambahan serat PVA.....	78
Gambar 38	Hubungan Beban – Regangan Baja tanpa serat PVA ...	79
Gambar 39	Hubungan Beban – Regangan Baja dengan serat PVA	81
Gambar 40	Pola Retak Benda Uji .....	82
Gambar 41	Retak Awal Balok CB .....	83
Gambar 42	<i>Microcrack</i> Balok GP 1500.....	84
Gambar 43	Retak Awal Balok GP 1500 .....	84
Gambar 44	<i>Microcrack</i> Balok GP 2700 .....	85
Gambar 45	Pengukuran Lebar Retak Awal Balok GP 2700 .....	86
Gambar 46	Delaminasi Antara Beton Normal Dan Mortar Geopolimer .....	86
Gambar 47	<i>Microcrack</i> Antara Beton Normal dan Mortar Geopolimer .....	87
Gambar 48	Retak Awal Balok GP-F 1500 .....	87
Gambar 49	Pengukuran Lebar Retak Balok GP-F 1500 .....	88
Gambar 50	<i>Bridging Effect</i> Serat Pada Retak Balok GP-F 1500.....	89

Gambar 51	Retak awal balok GP-F 2700 .....	90
Gambar 52	Pengukuran Lebar Retak Balok GP-F 2700 .....	90
Gambar 53	<i>Bridging Effect</i> Serat Balok GP-F 2700 .....	91
Gambar 54	<i>Debonding</i> Antara Beton Lama dan Mortar Geopolimer	92



## DAFTAR TABEL

Tabel 1	Perbandingan Komposisi <i>Fly Ash</i> terhadap Semen .....	22
Tabel 2	Komposisi Senyawa Kimia dalam <i>Fly Ash</i> .....	22
Tabel 3	Komposisi Kimia <i>Fly Ash</i> .....	23
Tabel 4	Klasifikasi <i>Fly Ash</i> Berdasarkan ASTM C 618[1].....	23
Tabel 5	Properti Serat PVA .....	25
Tabel 6	Variasi Benda Uji .....	56
Tabel 7	<i>Mix Design</i> Beton Kontrol per M <sup>3</sup> .....	56
Tabel 8	<i>Mix Design</i> Mortar Geopolimer .....	56
Tabel 9	Standar Pengujian .....	65
Tabel 10	Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer Metode <i>Moist curing</i> .....	65
Tabel 11	Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan PVA 0,6 % metode <i>Moist curing</i> .....	65
Tabel 12	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton .....	66
Tabel 13	Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton .....	67
Tabel 14	Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton .....	67
Tabel 15	Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja .....	68
Tabel 16	Hasil Pengujian Lentur Balok .....	69

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Penggunaan semen Portland yang semakin meningkat setiap tahunnya, mengakibatkan peningkatan industri-industri semen Portland di Indonesia. Terjadinya peningkatan industri semen Portland disisi lain memberikan dampak lain terhadap lingkungan. Industri semen menjadi salah satu penyumbang emisi gas CO<sub>2</sub> di udara karena untuk memproduksi satu ton semen dihasilkan juga gas CO<sub>2</sub> kurang lebih satu ton yang dilepaskan ke lingkungan (McCaffrey, 2002). Industri beton dengan menggunakan semen Portland secara global menghasilkan 5%-8% karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang merupakan penyumbang utama emisi gas terhadap pemanasan global yaitu sebesar 65% berasal dari dua sumber yaitu penggunaan energi dan proses kalsinasi (Vijja, 2012). Sehingga dibutuhkan Langkah-langkah strategis dan solusi jangka menengah dan jangka Panjang dalam upaya meminimalisir penggunaan semen yang berlebihan sebagai material pembuatan bangunan.

Salah satu upaya yang dapat diterapkan oleh para ahli untuk mengurangi gas CO<sub>2</sub> dan pemanasan global yang disebabkan dari proses produksi semen adalah pengembangan pembuatan beton yang ramah lingkungan dengan bahan ikat anorganik seperti alumina-silika polimer yang biasanya disebut dengan *geopolymer* (Davidovits, 1999). Material ini biasanya terdapat pada bahan pembuangan industri pembangkit listrik

tenaga uap, peleburan baja, maupun dari alam, misalnya *fly ash*, *slag*, abu sekam padi, dan tanah liat yang mengandung silika dan alumina. Sehingga dapat mengurangi penggunaan semen yang berlebihan sebagai bahan baku pembuatan beton.

*Fly ash* sebagai salah satu hasil buangan limbah merupakan material pengganti semen yang penggunaannya sudah menjadi hal yang lazim di duni konstruksi (Rattanasak & Chindaprasirt, 2009). Geopolimer terbentuk dari hasil aktivasi *fly ash* oleh larutan alkali berupa Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat ( $Na_2SiO_3$ ). Komposisi campuran dari kedua alkali tersebut akan menentukan karakteristik dari beton geopolimer (Bakri & Mohammed, 2011). Penggunaan *fly ash* dengan tipe F dan C merupakan material yang kaya akan unsur silica (Yildirim, Sumer, Akyuncu, & Gurbuz, 2011).

Beton geopolimer dibuat tanpa menggunakan OPC, oleh sebab itu penggunaan beton geopolimer tidak hanya mengurangi emisi gas  $CO_2$ , namun juga memanfaatkan penggunaan material sisa seperti *fly ash* (Hardjito et al., 2004). Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bawah beton geopolimer memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton konvensional yang berasal dari semen Portland (Van Deventer, 2007). Namun, kelemahan yang dimiliki adalah beton geopolimer tersebut memiliki sifat yang getas (*brittle*). Sehingga apabila diaplikasikan pada struktur, akan menghasilkan pola kegagalan yang tiba-tiba (*Sudden Collapse*). Tipe kegagalan tersebut sangat dihindari dalam desain.

Beberapa penelitian merekomendasikan penggunaan serat pada balok geopolimer agar dapat meningkatkan kuat Tarik, kuat lentur maupun daktilitasnya (Velasco, 2004).

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Banthia dan Gupta (2007) mengemukakan bahwa penambahan serat pada beton geopolymer dapat mengurangi Panjang dan lebar retak. Maka dari itu, penambahan serat juga dapat meningkatkan kapasitas struktur dalam memikul beban karena adanya *Bridging effect* dari serat. Sebagai pengganti OPC, geopolimer mempunyai sifat getas dengan kekuatan Tarik yang rendah dan sensitif terhadap retak. Kekurangan ini tidak hanya menjadi kendala dalam desain struktural, tetapi juga mempengaruhi daya tahan jangka Panjang struktur. Serat mikro dan makro yang berbeda telah digunakan untuk mengatasi kelemahan tersebut dan memperkuat bahan geopolimer. Zhao, et al. (2007) menggunakan tenun polos *stainless steel* untuk memperkuat geopolimer dan menunjukkan bahwa serat komposit dapat meningkatkan kekuatan geopolimer. Sedangkan penelitian lain dari Sun Wu (2008) mempelajari perilaku mekanik geopolimer berbasis abu terbang yang diperkuat serat PVA (*Poly Vinyl Alcohol*) dengan meneliti kuat Tarik, dan hasil menunjukkan bahwa 1% serat memberikan hasil optimum secara signifikan dapat meningkatkan daktilitas komposit.

Saat ini, ada pergeseran ke arah penggunaan mortar geopolimer dalam berbagai aplikasi perbaikan. Hasil pengujian oleh Zhang dkk. (2010) menegaskan potensi penggunaan mortar geopolimer sebagai lapisan

pelindung untuk struktur beton lepas pantai melalui pengukuran ketahanan korosi, permeabilitas, stabilitas volume, dan kekuatan ikatan. Lapisan geopolimer ditemukan mampu meningkatkan ikatan yang kuat dengan campuran beton. Songpiriyakij dkk. (2011) meneliti potensi pasta geopolimer sebagai agen pengikat pada tulangan yang tertanam dalam campuran beton. Hasil pengamatannya menunjukkan bahwa pasta geopolimer mengembangkan kekuatan ikatan yang tinggi, yaitu 24% -81% lebih tinggi daripada lapisan epoksi komersial. Ferone, dkk. (2013) menggunakan mortar geopolimer berbasis metakaolin untuk penguatan eksternal balok beton bertulang. Mortar yang diadopsi berhasil meningkatkan beban kegagalan pada balok yang diperkuat hampir 100%.

ACI 546 (2014) menyatakan bahwa salah satu prosedur terpenting untuk memperbaiki permukaan beton adalah persiapan permukaan. Banyak peneliti, seperti Behfarina dkk. (2014), Czarnecki dan Hoła (2016), dan Santos & Julio (2011), mempelajari pengaruh kekasaran permukaan pada kekuatan ikatan. Mereka menyimpulkan bahwa kekasaran permukaan memiliki pengaruh yang signifikan pada kekuatan ikatan dan mode kegagalan antarmuka.

Dalam penelitian ini akan dikembangkan material mortar geopolimer dari campuran fly ash dan penambahan serat PVA (*Poly Vinyl Alcohol*) yang akan dikompositkan dengan beton konvensional. Lapisan komposit tersebut merupakan aplikasi perbaikan dan penguatan struktur yang telah mengalami deteriorasi. Penelitian ini akan difokuskan pada perilaku lentur

balok beton bertulang yang mengalami kerusakan atau penurunan kekuatan untuk dilakukan perbaikan dan perkuatan dengan campuran mortar geopolimer dan serat PVA yang diaplikasi pada permukaan lapisan selimut beton. Luaran dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi produk inovasi terapan untuk material perbaikan dan perkuatan struktur yang murah dan ramah lingkungan.

### **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan diatas maka dapat dirumuskan masalah yang akan diteliti, yaitu :

1. Bagaimana perilaku lentur balok dengan variasi Panjang perkuatan mortar geopolimer *fly ash* dan serat PVA?
2. Bagaimana pengaruh pola retak dan mode kegagalan balok dengan variasi Panjang perkuatan mortar geopolimer *fly ash* dan serat PVA?

### **C. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini, antara lain :

1. Untuk menganalisis perilaku lentu balok beton dengan variasi Panjang perkuatan mortar geopolimer *fly ash* dan serat PVA
2. Untuk menganalisis pengaruh pola retak dan mode kegagalan balok dengan variasi Panjang perkuatan mortar geopolimer *fly ash* dan serat PVA

#### **D. Ruang Lingkup Penelitian**

1. Mutu beton rencana adalah mutu beton normal  $f'c$  25 MPa menggunakan *ready mix*.
2. Benda uji yang digunakan sebanyak 10 buah, dengan dimensi 150 mm x 200 mm dengan panjang 3300 mm.
3. Variasi panjang perkuatan 1500 mm dan 2700 mm
4. Mortar geopolimer terdiri dari 50% binder, yaitu campuran *fly ash* dan alkali aktivator berupa NaOH,  $Na_2SiO_3$ . Serta 50% pasir halus.
5. Untuk menjaga *setting time* dan *workability* pada saat pencampuran maka ditambahkan boraks dan *Polycarboxilate Superplasticizer* sebesar 2% dari berat *fly ash*.
6. Persentase serat PVA yang digunakan sebesar 0,6 % dari volume beton.

#### **E. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penulisan ini adalah :

1. Mengaplikasikan penggunaan limbah *Fly Ash* sebagai pengganti 100% semen.
2. Menghasilkan material alternatif dalam perbaikan dan perkuatan struktur yang murah dan ramah lingkungan.

## **F. Sistematika Penulisan**

Secara garis besar sistematika penulisan yang dapat disajikan sebagai berikut :

### **BABB I PENDAHULUAN**

Bab ini menguraikan latar belakang penulisan, rumusan masalah, tujuan dan manfaat, ruang lingkup penelitian serta sistematika penulisan.

### **BAB II KAJIAN PUSTAKA**

Bab ini membahas tentang dasar-dasar teori mengenai material penyusun beton geopolimer, sifat fisik dan kimia dari *fly ash*, serat PVA, serta perilaku lentur dari beton bertulang.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Bab ini berisi gambaran umum penelitian, waktu dan lokasi penelitian, diagram alir penelitian, waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, variable penelitian dan notasi sampel serta metode analisis yang akan digunakan dalam pengolahan data.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini akan diuraikan hasil pengujian yang telah dilakukan dan disajikan dalam bentuk table-tabel dan grafik, kemudian dari hasil tersebut dilakukan analisis dan pembahasan.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**



Bab ini akan menyajikan kesimpulan pokok dari keseluruhan penelitian yang telah dilakukan dan saran yang dapat diberikan untuk memperbaiki dan melakukan pengembangan riset berkaitan dengan hasil dari penelitian pengaruh Panjang perkuatan balok dengan geopolimer *fly ash* dan serat PVA.

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### A. Penelitian Terdahulu

##### 1. Muhammad Lutfi M – Januarti Jaya Ekaputri (2017)

Dalam penelitian *The Application of PVA Fiber to Improve the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete* yang menggunakan variasi serat *Poly Vinyl Alcolgol (PVA)* sebesar 0%, 0,3%, 0,5%, dan 0,8% dikemukakan bahwa Penambahan serat PVA dalam campuran geopolimer berperan penting dalam meningkatkan kekuatan beton geopolimer, dengan komposisi maksimum sebesar 0,8% penambahan serat PVA yang mampu meningkatkan kuat tekan beton sebesar 9,95%, meningkatkan kuat tarik belah sebesar 61,69% dan kuat tarik langsung sebesar 32,78% dibandingkan dengan tanpa serat.

Penambahan serat memberikan kontribusi kuat tarik belah dan kuat tarik yang lebih tinggi. Namun demikian, kontribusinya terhadap kuat tekan lebih kecil. Itu karena sifat serat PVA hanya untuk menahan beban tarik dan lentur. Disarankan untuk menambahkan 0,5% serat PVA dalam beton geopolimer untuk memperbaiki sifat mekanik beton geopolimer. Sedangkan dengan penambahan serat PVA 0,8% mampu meningkatkan kekuatan beton geopolimer, tetapi tidak disarankan. Itu disebabkan oleh kemampuan *workability* yang sangat rendah jika ditambahkan banyak serat.

## **2. Abdulrahman Albidaf, dkk (2017)**

Dalam penelitian *Bond Strength between Concrete Substrate and Metakaolin Geopolymer Repair Mortars at Ambient and Elevated Temperatures* dijelaskan bahwa Mortar geopolimer biasa dan diperkuat PVA yang ditempatkan pada suhu sekitar menunjukkan perbaikan yang sangat baik dan potensi retrofit dalam hal kekuatan ikatan dan tekannya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mortar geopolimer merupakan alternatif yang menjanjikan dari mortar perbaikan yang mengandung semen.

Ada penurunan yang signifikan pada kekuatan ikatan antara material perbaikan geopolimer dan substrat beton pada suhu 200°C. Namun, penyertaan serat PVA dalam campuran mortar geopolimer mampu meningkatkan kuat tarik beton pada suhu sekitar serta pada suhu tinggi 200°C. Temuan penelitian ini memberikan panduan untuk aplikasi praktis penggunaan mortar geopolimer sebagai bahan perbaikan dalam situasi paparan jangka panjang terhadap suhu tinggi.

## **3. Asif Jalal, dkk. (2021)**

Dalam jurnal *Mechanical and Post-Cracking Characteristic of Fiber Reinforced Concrete Containing Copper-Coated Steel and PVA Fibers in 100% Cement and Fly Ash Concrete* ini menyelidiki efek polivinil alkohol (PVA) dan baja berlapis tembaga (CCS) terhadap sifat mekanik dan perilaku pasca retak beton bertulang serat (FRC). Dalam mendesain campuran beton kinerja tinggi, bahan pengganti semen merupakan bahan

penting. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja pasca retak serat PVA dan CCS pada campuran 100% semen dan beton dengan campuran 80% semen dan 20% *fly ash*. Isi serat ditetapkan sebagai fraksi volumetrik 0,3 %. Serat CSS membutuhkan superplasticizer 15% lebih banyak untuk mencapai penurunan beton segar yang diinginkan daripada serat PVA. Secara bersamaan, serat CCS menunjukkan kekuatan tekan 10% lebih tinggi daripada beton yang terbuat dari serat PVA. Kedua serat menunjukkan efek yang sama dalam mengembangkan kekuatan tarik dan kekuatan lentur. Serat PVA menunjukkan nilai modulus garis potong sebesar 47 Gpa, dan serat CCS menghasilkan 37 Gpa dalam pada campuran beton control.

Dalam perilaku pasca-retak, serat CCS menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada serat PVA. Alasan mendasar untuk memperkuat beton dengan serat pendek yang berorientasi acak adalah untuk meningkatkan daya dukung beban dan kemampuan penyerapan energi setelah terjadinya retakan pertama. Serat PVA dan CCS meningkatkan ketangguhan retak awal lebih dari 40% dibandingkan dengan beton kontrol (100% semen) serta mampu meningkatkan kekuatan lentur menjadi 1,8 dan 3,6 kali lipat dari beton kontrol. Serat juga meningkatkan indeks kekerasan dan faktor reduksi kekuatan, indeks ini menunjukkan kinerja beton di wilayah plastis. Serat juga meningkatkan daktilitas beton sebesar 22–91%, yang dapat membantu menghindari keruntuhan struktural dalam kondisi pembebanan yang tidak normal.

Dalam membandingkan kedua beton tersebut, beton *fly ash* menunjukkan kuat tekan sekitar 10% lebih tinggi pada 56 hari, serta kekuatan tarik dan lentur sekitar 6% lebih tinggi. Korelasi yang valid (dalam kisaran yang ditentukan, seperti yang dibahas dalam ASTM C1018) antara kekuatan tekan dan kekuatan lentur yang diperoleh.

#### **4. Amin Noushini, dkk. (2013)**

Dalam jurnal penelitian *Flexural Toughness and Ductility Characteristics of Poly Vinyl Alcohol Fibre Reinforced Concrete (PVA-FRC)* yang memvariasikan panjang serat PVA sebesar 6 mm dan 12 mm dengan penambahan 0,125%, 0,25% dan 0,5% dari berat beton. Selain itu, digunakan pula *fly ash* sebagai substitusi semen sebesar 30%. Dalam menguji sifat mekanik beton bertulang serat PVA ini dilakukan uji tekan uniaxial, uji tarik belah, uji kuat lentur statis 4 titik serta daktilitas beton serat. Dimana didapatkan bahwa campuran serat 0,5% dengan panjang 12 mm meningkatkan pengaruh daktilitas beton serat sebesar 30%, meskipun memiliki nilai kuat tekan yang rendah. Ini disebabkan oleh efek penghubung serat yang berkontribusi sebagai penguat intrinsik. Dalam balok PVA FRC, ketika beton mengalami retak, diperlukan lebih banyak energi untuk memaksa serat agar retak melalui retakan tersebut. Akibatnya, daya dukung beban menjadi lebih tinggi, terutama diluar beban puncak.

## B. Tinjauan Umum

### 1. Pengertian Beton

Beton merupakan material yang banyak digunakan dalam pembangunan pada dunia konstruksi dan terus meningkat dari tahun ke tahun khususnya di Indonesia. Hal ini disebabkan material pembuatan beton tersebut mudah untuk diperoleh seperti kerikil, pasir, dan semen. Selain mudah diperoleh dalam segi material, beton juga memiliki kuat tekan yang cukup tinggi, namun memiliki kuat Tarik yang rendah. Beton segar dapat dengan mudah diangkut maupun dicetak, dan tahan terhadap pengaruh temperatur tinggi (Pane, 2015). Pada umumnya beton mengandung rongga udara sekitar 1% - 2%. Pasta semen (semen dan air) 25% - 40%, dan agregat (agregat halus dan agregat kasar) sekitar 60%-75%. Bahan penyusun beton salah satunya yaitu semen yang berfungsi sebagai perekat antar material. Sebelum ditemukannya semen sebagai bahan perekat antar material beton, kapur merupakan bahan material konstruksi tradisional di Mesir Kuno yang berfungsi sebagai perekat pada mortar (Rochamanto, 2019). Semen baru ditemukan oleh Joseph Aspidin pada awal abad ke 19 yang digunakan sampai sekarang dalam pembuatan beton (Alkhaly dkk, 2015).

ACI (*American Concrete Institute*) memberikan definisi untuk beton serat, sebagai suatu konstruksi yang tersusun dari bahan semen, agregat halus dan kasar serta sejumlah kecil serat. Menurut Tjokrodimuljo (1996), beton serat ialah bahan komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan

lain yang berupa serat. Serat dalam beton ini berguna untuk mencegah adanya retak-retak sehingga menjadikan beton serat lebih daktil daripada beton biasa. Beberapa sifat beton yang dapat diperbaiki dengan penambahan serat, diantaranya adalah meningkatkan daktilitas, ketahanan, kuat Tarik dan lentur, ketahanan terhadap kelelahan, ketahanan terhadap pengaruh susutan, ketahanan terhadap abrasi, ketahanan terhadap pecahan atau fragmentasi, ketahanan terhadap pengelupasan.

Beton geopolimer merupakan beton yang tidak menggunakan 100% semen, dimana bahan baku utamanya adalah geopolymer yang terjadi akibat adanya proses reaksi polimerisasi. Dalam beton geopolimer, silicon dan aluminium yang ada pada material asal bereaksi dengan alkali activator dan membentuk geopolimer gel. Geopolimer gel ini kemudian mengikat agregat-agregat serta material lainnya dalam campuran yang tidak bereaksi untuk membentuk beton geopolimer (Wallah, S.E., 2014). Sifat-sifat beton geopolimer antara lain mempunyai durabilitas tinggi terhadap serangan sulfat dan porositas yang rendah. Sifat tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu material yang digunakan, perbandingan alkali, activator, proses pencampuran, dan proses *curing* (Lairenz, dkk, 2019).

## **2. Geopolimer**

Geopolimer merupakan bahan atau material yang berupa anorganik yang disintesa melalui proses polimerisasi. Terminologi geopolimer pertama kali digunakan oleh Profesor Davidovits pada tahun 1978, untuk menjelaskan tentang mineral polimer yang dihasilkan melalui *geochemistry*.

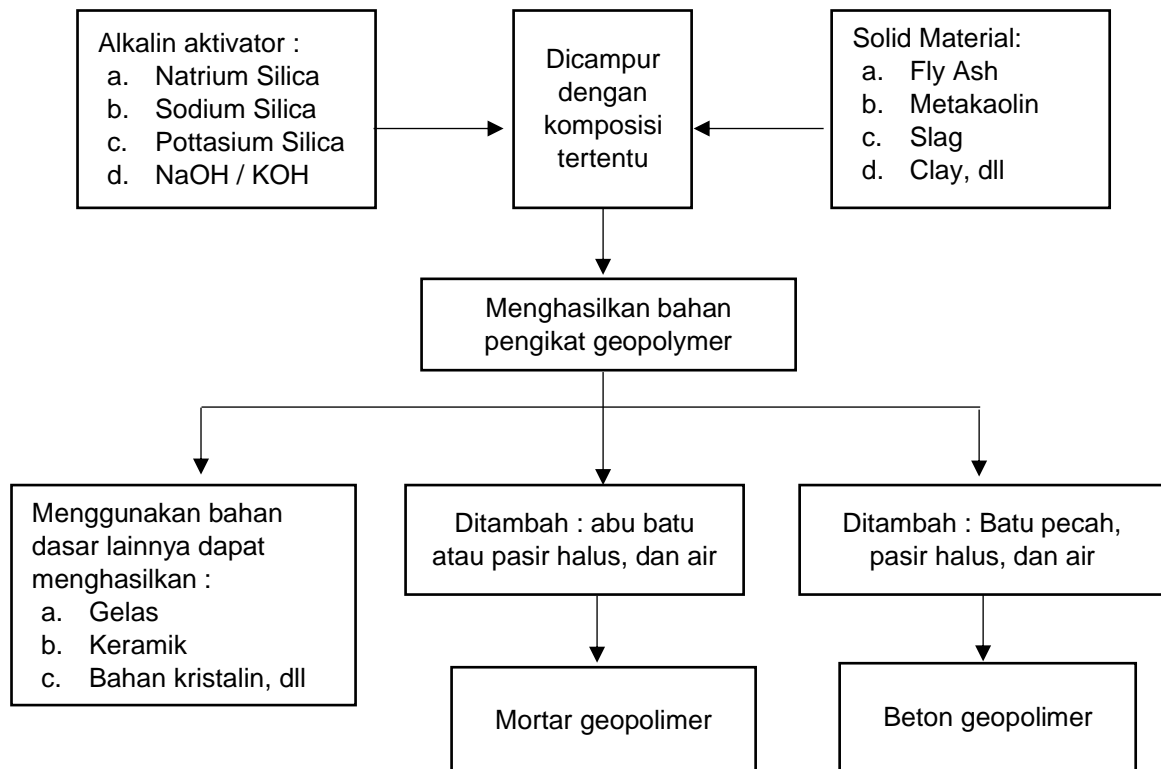
Geopolimer adalah bentuk anorganik alumina-silika yang disintesa dari material yang banyak mengandung silika (Si) dan alumina (Al) yang berasal dari alam atau dari material hasil sampingan industri (Manuahe, R et al., 2014). Secara umum geopolimer bisa disintesis oleh alkali aktivator jika bereaksi dengan material yang kaya akan kandungan  $\text{SiO}_3$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Geopolimer pada awalnya lebih dikenal berdasarkan reaksi kimia, sebagai *Alkaline-activated binders*, dengan beberapa terminologi yang sesuai dengan penggunaan material ini seperti *Low temperature inorganic polymer glasses*, *alkali-bonded ceramic*, *chemically bounded ceramic*, atau *alkali-activated ash* (Sumajouw, D.M.J. dan Dapas, S.O., 2012). Selama proses sintesa, atom silika dan alumina menyatu dan membentuk blok yang secara kimia memiliki struktur yang mirip batuan alam (Manuahe, R et al., 2014).

Ada persamaan antara material geopolimer dan semen, yaitu kedua zat memiliki sifat tahan air setelah mengeras, dan hal tersebut merupakan sifat dari bahan pengikat. Hal tersebut menunjukkan bahwa material geopolimer dapat dipergunakan sebagai bahan pengganti semen. Saat ini, material dasar geopolimer mulai dikembangkan dari produk sampingan seperti *silica fume*, *fly ash*, *rice-husk ash*, *slag*, dan lainnya. Beberapa factor yang dipertimbangkan dalam pemilihan material diantaranya adalah biaya, asal, kebutuhan spesifik dari pemakaian akhir, serta aspek terhadap lingkungan (Davidovits, 1994).



Gambar 1 mengilustrasikan proses terbentuknya geopolimer untuk berbagai aplikasi.



**Gambar 1.** Proses terbentuknya Geopolimer  
Sumber: Sumajouw, D.M.J., and Dapas, S.O., (2013)

Umumnya beberapa tahapan pembuatan geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan larutan NaOH dan larutan Sodium Silikat sebagai *alkali activator*, kemudian *fly ash* dan pasir ditambahkan larutan *alkali activator* (Hardjito, 2005).

Junaid et al. (2015) mencoba 3 metode pencampuran geopolimer berbahan dasar *fly ash* tipe F. Metode pertama dengan mencampurkan *fly ash* dan pasir dalam keadaan kering kemudian ditambahkan dengan larutan alkali aktivator dan air lalu diaduk selama 3-5 menit. Metode kedua dengan mencampurkan *fly ash* dengan larutan NaOH terlebih dahulu selama 3

menit selanjutnya ditambahkan agregat dalam keadaan SSD dicampurkan dengan *fly ash* dalam keadaan kering kemudian ditambahkan larutan Sodium Silikat dan diaduk selama 3 menit, terakhir ditambahkan larutan NaOH beserta air dan diaduk selama 2 menit. Hasil menunjukkan bahwa ketiga metode pencampuran ini tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan geopolimer.

Rattanasak dan Chindaprasirt (2009) membuat geopolimer berbahan dasar *fly ash* tipe C dengan dua cara berbeda. Cara pertama dengan mencampurkan secara bersamaan *fly ash*, pasir, larutan NaOH, dan larutan sodium silikat kemudian diaduk selama 1 menit. Cara *kedua fly ash* dilarutkan dengan larutan NaOH terlebih dahulu selama 10 menit dan dibiarkan untuk mengalami *leaching of ions*, berikutnya ditambahkan larutan Sodium Silikat selama 1 menit dan kemudian ditambahkan pasir dan diaduk selama 1 menit. Urutan pencampuran ini ternyata berpengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer, dimana pencampuran yang terpisah menghasilkan beton geopolimer yang sedikit lebih baik dari pencampuran biasa.

### **3. Beton Bertulang**

Dalam mayoritas perkembangan industri konstruksi, beton dan baja tulangan merupakan campuran yang amat sangat bermanfaat dalam komponen konstruksi. Menurut (Emmanuel.et.al, 2012) beton bertulang adalah kombinasi 2 bahan yang berbeda tetapi saling melengkapi. Beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi dan tahan terhadap api, tetapi memiliki

kuat Tarik yang amat kecil dengan kuat geser yang standar. Di sisi lain, besi beton memiliki kuat tarik properti yang besar, tetapi tidak tahan terhadap api karena baja tulangan dapat kehilangan kekuatannya pada temperatur tinggi.

Koefisien termal dari besi beton  $\pm 0,0000065/m/^{\circ}F$  dan apabila menyatu dengan beton menjadi  $0,000004 - 0,000007/m/^{\circ}F$  atau  $\pm 0,0000055 /m/^{\circ}F$  (McCormac & H.Brown, 2014). Beton bertulang juga sangat baik terhadap kuat geser dan kuat tekan. Dengan demikian, kombinasi dari kedua material tersebut memberikan kuat tarik dan kuat tekan yang baik, serta durabilitas, kuat geser dan ketahanan terhadap api yang besar.

Beton dan baja tulangan mengikat satu sama lain dengan sangat baik tanpa terdapat kemungkinan *Slippage* diantara 2 material tersebut. Ikatan yang erat (*Bonding*) antara 2 material tersebut disebabkan oleh kuatnya gaya adhesi dari masing-masing material terutama pada tulangan yang memiliki bentuk sirip pada sepanjang permukaannya. Tulangan baja terekspos korosi, tetapi material beton dapat memberi selaput pasif untuk memproteksi permukaan baja tulangan (McCormac, 2015).

Beton bertulang dianggap sebagai material struktur yang baik pada situasi dimana terdapat air, dan rata-rata intensitas ketahanan terhadap api yang baik apabila selimut betonnya besar maka beton bertulang hanya akan mengalami kerusakan di permukaan. Beton bertulang dalam kondisi yang baik, dapat digunakan dalam waktu layan yang lama tanpa kehilangan

kekuatan *Load-Carrying Capacity*. Ini dikarenakan kekuatan beton bertulang tidak mengalami reduksi seiring bertambahnya waktu melainkan bertambah akibat dari proses *Solidification* yang lama dari pasta semen (McCormac & H.Brown, 2014)

#### **4. Perbaikan dan Perkuatan Beton**

Pada umumnya, istilah *repairing* diterapkan pada bangunan yang sudah rusak, bertujuan untuk mengembalikan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan beban rencana seperti semula setelah terjadinya penurunan perkuatan. Sedangkan *strengthening* adalah suatu Tindakan modifikasi struktur, yang mungkin belum mengalami kerusakan, dengan tujuan untuk menaikkan kekuatan atau kemampuan bangunan dalam memikul beban-beban yang lebih besar akibat perubahan fungsi bangunan dan stabilitas.

Perkuatan struktur menurut Triwiyono (2004) dilakukan untuk bangunan yang riskan terhadap beban baru yang akan harus didukung, sehingga perlu meningkatkan kemampuan bangunan tersebut atau menambahkan elemen struktur baru yang tidak tersedia atau tidak ada pada saat struktur di bangun. Perbaikan atau perkuatan struktur atau elemen struktur diperlukan apabila terjadi degradasi bahan yang berakibat tidak terpenuhi lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat Teknik, antara lain kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffness*), stabilitas (*stability*), dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan (*durability*).

Kerusakan yang terjadi sebagai akibat dari korosi tulangan adalah pengelupasan selimut beton. Perbaikan terhadap kerusakan jenis ini dapat dilakukan dengan metode penambalan (Jumaat et al, 2006). Penambalan bertujuan untuk mengembalikan ukuran penampang, melindungi tulangan dari bahaya korosi berlebih serta secara parsial dapat memulihkan kekuatan elemen. Material yang digunakan untuk pekerjaan penambalan harus memiliki persyaratan kompatibilitas dengan beton yang akan diperbaiki (Patnaik, 2006). *European Standard ENV 1504-9* (1997) telah mengatur berbagai persyaratan teknis mengenai material perbaikan ini. Persyaratan material perbaikan juga termuat di dalam *Technical Guideline No. 03733* yang dikeluarkan oleh *International Concrete Repair Institute* (1996). Persyaratan tersebut mencakup kompatibilitas dalam sifat mekanik, dimensi dan durabilitas. Secara teoritis kompatibilitas mekanik, dimensi dan durabilitas dapat dicapai dengan memilih material perbaikan yang mempunyai kekuatan, sifat perubahan bentuk dan durabilitas yang serupa dengan beton konvensional.

Namun harus disadari pula, bahwa ada faktor-faktor alami yang membuat material perbaikan berpotensi tidak menyatu dengan betonnya. Pada saat material perbaikan diaplikasikan sebagai penambal kerusakan pada beton, maka material baru tersebut dapat mengalami susut dengan laju yang tinggi, sementara betonnya yang sudah berumur tua hampir tidak lagi mengalami susut. Perbedaan susut yang terjadi antara dua material yang dipadukan ini dapat menimbulkan beberapa persoalan antara lain

timbulnya retak ataupun terjadinya delaminasi dimana material perbaikan akan terlepas dari beton induknya (Baluch et al., 2002; Park et al., 2009; Turcry et al., 2006).

### **C. Material Mortar Geopolimer**

#### **1. Abu Terbang (Fly Ash)**

Salah satu material yang banyak digunakan sebagai material dasar geopolimer adalah abu terbang (*fly ash*). *Fly ash* merupakan material yang berasal dari sisa pembakaran batu bara yang tidak terpakai. Ketersediaan abu terbang yang melimpah saat ini, serta kondisinya sebagai material limbah membuat abu terbang menjadi salah satu material dasar pilihan untuk geopolimer. Disamping penggunaannya yang praktis (tanpa proses kalsinasi), pemanfaatannya juga sangat menguntungkan bagi lingkungan.

Material ini tidak mempunyai kemampuan mengikat seperti semen tetapi mempunyai sifat pozzolanik. Apabila *fly ash* diberi air, maka oksida silika yang terkandung didalamnya akan bereaksi secara kimiawi dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen. Dengan demikian akan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat.

Komposisi dari *fly ash* Sebagian besar terdiri dari Silikat Oksida ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminium Oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), besi oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dan kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ), sedangkan magnesium, pottasium, sodium, titanium dan sulfur juga ada tetapi dalam jumlah yang lebih sedikit.

**Tabel. 1** Perbandingan komposisi fly ash terhadap semen

<b>Unsur</b>	<b>Semen <i>Portland</i></b>	<b><i>Fly Ash</i></b>
SiO <sub>2</sub>	20	50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5	10,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	28
CaO	65	3
MgO	0,1	2
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,7
K <sub>2</sub> O	0,7	2,5

Sumber : Nugraha Paul dan Antoni, "Teknologi Beton: Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi", LPPM Universitas Kristen Petra, Penerbit Andi, Surabaya, 2007.

**Tabel. 2** Komposisi senyawa kimia dalam *fly ash* yang digunakan pada penelitian Kosnatha dan Utomo (2007).

<b>Oksida</b>	<b><i>Fly Ash Tipe C (%)</i></b>	<b><i>Fly Ash Tipe F (%)</i></b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	46,39	54,00
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20,08	29,12
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	13,32	9,81
<b>CaO</b>	13,07	1,33
<b>SO<sub>3</sub></b>	2,16	0,65
<b>MgO</b>	1,09	0,81
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,15	0,04
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,01	-
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,17	<0,01
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,77	0,96
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,64	1,35
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,03	0,16

a. Sifat Fisika *Fly Ash*

*Fly ash* memiliki karakteristik yang hampir sama dengan semen, seperti diperlihatkan pada tabel 1. Sifat fisika dari fly ash menurut *ACI Manual of*

*Concrete Practice, 1993* yaitu : *specific gravity* 2,2 – 2,8 dan ukuran butiran  $1\ \mu\text{m} - 1\text{mm}$  (lolos ayakan 200 mesh =  $40 - 47\ \mu\text{m}$ ). sedangkan unsur *fly ash* yang berbeda terhadap semen adalah komposisi CaO. Pada semen konvensional kadar CaO sekitar 50% atau lebih, sedangkan pada *fly ash* hanya sekitar 1-2% saja. Daya rekat semen sangat dipengaruhi oleh kadar CaO, hal ini menyebabkan semen dapat cepat mengeras jika dicampur air (Pengaruh angka hidrolitas). Oleh karena itu, untuk merubah *fly ash* agar memiliki karakteristik mendekati seperti semen, maka digunakan bahan tambahan berupa kapur ( $\text{CaCO}_3$ )

*b. Sifat Kimia Fly Ash*

Komposisi kimia dari *fly ash* terdiri dari karbon yang belum terbakar, *mullite*, *quartz*, dan *hematite*. Kandungan tersebut tergantung dari asal batu bara serta desain dari pembangkit listrik dari masing-masing PLTU (Temuujin dkk, 2009).

Adapun komposisi dari *fly ash* yang diperoleh dari hasil pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) yang dilakukan di laboratorium Sucofindo, Makassar yang hasilnya ditunjukkan pada tabel 3. Pada tabel 4 menunjukkan klasifikasi *Fly Ash* berdasarkan ASTM C618.

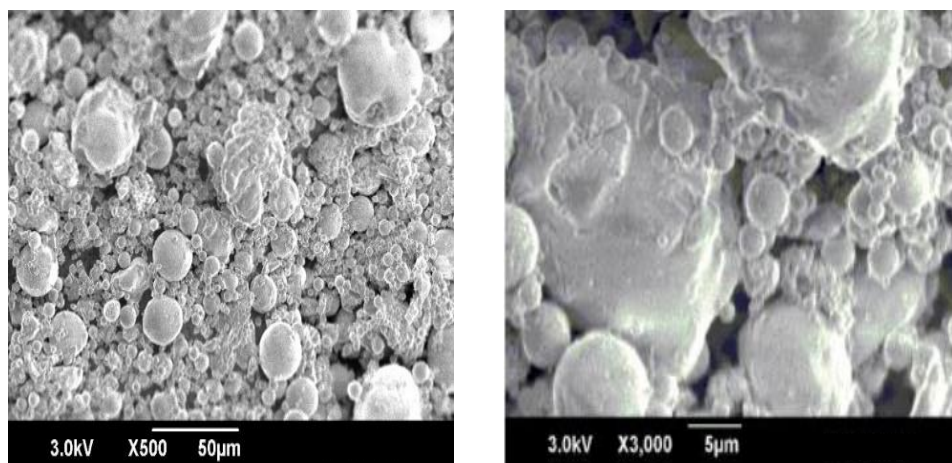
**Tabel 3.** Komposisi Senyawa Kimia *fly ash* (persen terhadap berat)

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>
<b>37.04</b>	11.41	11.62	19.24	0.57	0.72	4.53	0.51	1.37



**Tabel 4.** Klasifikasi *Fly Ash* berdasarkan ASTM C 618 [1]

Komposisi Senyawa	Tipe		
	N	F	C
Jumlah SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (min,%)	70,0	70,0	50,0
SO <sub>3</sub> (min,%)	4,0	5,0	5,0
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (min,%)	1,5	1,5	1,5
Kadar Kelembaban (ma,%)	3,0	3,0	3,0

**Gambar 2.** Partikel *Fly Ash* hasil pengujian SEM

Gambar 2 menunjukkan hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) sampel *Fly Ash*. Pada gambar tersebut diperlihatkan bentuk butiran yang tidak beraturan yang dapat menyebabkan permasalahan pada saat pencampuran yaitu campuran akan cepat mengeras. Sehingga, dalam penelitian ini ditambahkan borax untuk meningkatkan *setting time*.

## 2. *Polivynil Alcohol (PVA)*

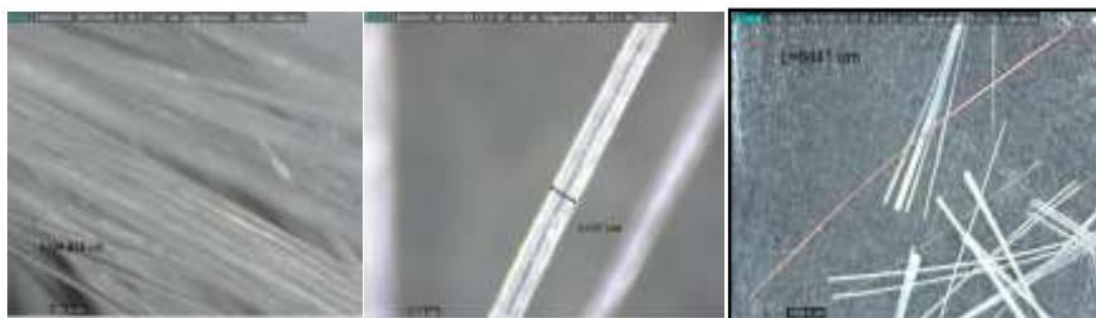
Serat merupakan bahan tambah yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat beton (Tjokrodimuljo, 1996). Serat polimer sintetis atau biasa disebut serat sintetis adalah serat yang dibuat oleh manusia dari hasil riset dan pengembangan dalam industri petrokimia dan tekstil (Balaguru

dan Shah, 1992). Serat PVA memiliki sifat yang baik untuk meningkatkan kekuatan beton. Serat ini memiliki modulus elastisitas tinggi, daya tahan, kekuatan tarik, dan kekuatan ikatan. Properti ini dibutuhkan untuk meningkatkan keuletan beton. Sifat fisik serat PVA adalah Diameter 38  $\mu\text{m}$ , dengan panjang delapan mm, dan kepadatan 1,3 gram /  $\text{cm}^3$ . Modulus elastisitas serat PVA berada dalam kisaran dari 25 - 40 GPa, lebih tinggi dari serat alami. Perpanjangan serat PVA adalah 6-10%, dan Kekuatan tarik serat PVA berkisar antara 880 - 1600 Mpa (Lutfi et al, 2017)

**Tabel 5.** Properti Serat PVA

Spesifikasi	
Diameter (micrometer)	38
Panjang (mm)	8
Kuat tarik (MPa)	1600
Kuat lentur (MPa)	40000
Titik leleh ( $^{\circ}\text{C}$ )	225
Penyerapan	< 1% <i>by mass</i>
Berat jenis ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.3

Sumber : <https://nycon.com/>



**Gambar 3.** Sifat serat PVA yang diambil dengan kamera *Dino Lite*

### 3. Alkali

Larutan alkali yang digunakan nantinya adalah pencampuran antara larutan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dengan larutan natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ).

Dengan adanya penambahan natrium silikat dan natrium hidroksida, dapat membuat beton menjadi basa, karena mengingat keduanya akan digunakan sebagai alkali activator (Djuwantoro dkk, 2004).

Natrium silikat berfungsi dalam mempercepat reaksi polimerisasi. Senyawa ini merupakan senyawa yang paling murah dan mudah didapatkan dibanding kan dengan senyawa logam hidroksida lainnya. Natrium silikat (NaOH) adalah senyawa yang biasa digunakan sebagai aktivator dalam sintesis geopolimer. Senyawa tersebut digunakan untuk mengaktivasi abu terbang yang digunakan sebagai prekursor geopolimer. Penamabahan silikat menjadi salah satu cara penanganan sifat korosif NaOH (Provis et al., 2009). Molaritas NaOH yang biasa digunakan pada beberapa penelitian berkisar 6 M -15 M. Pada prinsipnya, semakin tinggi molaritas NaOH, maka kekuatan mekanisnya akan semakin baik. Namun hal tersebut bergantung dari material dasar yang digunakan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa material *fly ash* memiliki kekuatan mekanik yang baik seiring meningkatnya molaritas NaOH yang digunakan (Adam dkk, 2009).

Sodium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}$ ) atau yang lebih dikenal dengan istilah water-glass merupakan salah satu senyawa turunan silika yang cukup melimpah di Indonesia. Keberadaa natrium silikat pada larutan activator berfungsi dalam meningkatkan jumlah silika pada campuran geopolimer. Reaksi geopolimerisasi akan semakin cepat dengan meningkatnya kandungan silika reaktif / soluble pada campuran (Palomo dkk, 1999). Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}$ ) berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang

terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan *polimer* yang kuat.

#### **4. Superplasticizer**

Superplasticizer merupakan bahan tambah kimia (Chemical *admixture*) yang memiliki pengaruh dalam peningkatan workabilitas beton dan mengurangi penggunaan air sehingga mampu meningkatkan kekuatan beton (Murdock dan Brook, 1991). *Admixture* merupakan bahan tambah selain semen, agregat dan air yang digunakan dalam campuran beton, sebelum atau selama pengadukan beton untuk mengubah sifat beton sesuai dengan keinginan perencana. Superplasticizer juga sangat berpengaruh besar dalam meningkatkan workabilitas, karena superplasticizer merupakan sarana untuk menghasilkan beton yang mengalir tanpa terjadi pemisahan (*segregasi/bleeding*) yang umumnya terjadi pada beton dengan jumlah air yang besar sehingga berguna untuk pencetakan beton di tempat-tempat yang sulit, seperti tempat pada penulangan yang rapat. Jenis-jenis superplasticizer yang biasa digunakan antara lain *superplasticizer naphthalene*, *superplasticizer polycarboxylate* dan superplasticizer sodium glukonat.

*Superplasticizer polycarboxylate* (PCE) merupakan superplasticizer yang paling efektif digunakan karena memiliki kemampuan untuk mengurangi kadar air sampai 40% dan bisa digunakan untuk beton dengan mutu tinggi, perbandingan air dan semen yang didapat adalah 0,2. PCE

memiliki nilai slump yang baik dan tidak menyebabkan keterlambatan pada beton biasa untuk mendapatkan kekuatan yang ingin dicapai.

### **5. Boraks**

Boraks merupakan senyawa yang umumnya digunakan sebagai salah satu activator, maupun senyawa tambahan dalam pembuatan beton geopolimer. Perbandingan dari campuran boraks terhadap alkali aktivator lainnya, mampu memberikan pengaruh terhadap kekuatan beton geopolimer yang dihasilkan. Boraks juga dapat digunakan dalam upaya untuk memperlambat proses *setting time* pada sebuah beton geopolimer (Mackenzie et al., 2005).

## **D. Karakteristik Beton Bertulang**

### **1. Kuat Tekan**

Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, maka akan semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Dalam pembuatannya, Perancangan beton harus memenuhi kaidah-kaidah dan kriteria perancangan standar yang berlaku, seperti yang tertuang didalam standar ASTM, ACI, JIS, ataupun SNI. Hal tersebut dimaksudkan dalam upaya menghasilkan beton yang dapat memenuhi kinerja utamanya yaitu kuat tekan sesuai rencana dan mudah untuk dikerjakan serta ekonomis dalam pembiayaannya. Adapun Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kekuatan tekan beton tersebut antara lain, proporsi bahan-bahan penyusunnya, metode perancangan, perawatan dan keadaan pada saat

pengecoran dilaksanakan yang terutama dipengaruhi oleh lingkungan setempat. Kekuatan tekan beton dapat dinotasikan sebagai berikut :

$f'c$  = Kekuatan tekan beton yang disyaratkan (MPa)

$f_c$  = Kekuatan tarik dari hasil uji benda uji silinder beton (MPa)

$f'cr$  = Kekuatan beton rata-rata yang dibutuhkan, sebagai dasar pemilihan pada perencanaan campuran beton (MPa)

$S$  = Standar deviasi (MPa)

$f'cm$  = Kuat tekan karakteristik beton (MPa)

Nilai kuat tekan beton yang diperoleh dari rumus (1) dapat dilihat sebagai berikut :

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

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n-1} \quad (2)$$

$$f'cm = f'cr - 1,645 \times S \quad (3)$$

dimana :

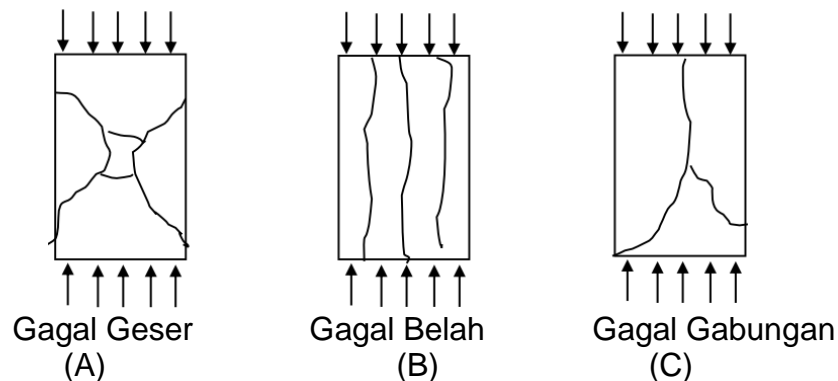
$f'c$  = kuat tekan beton (N/mm<sup>2</sup>)

$P$  = beban maksimum (N)

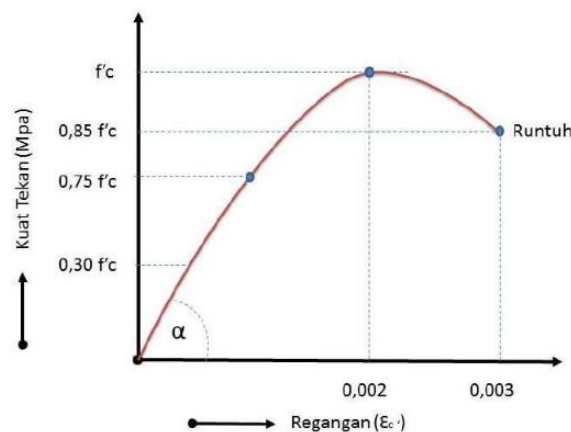
$A$  = luas penampang benda uji (mm<sup>2</sup>)

Penentuan kuat tekan beton dapat diperoleh melalui pengujian kuat tekan yang dilakukan di laboratorium. Pada umumnya benda uji yang sering dipakai berupa benda uji berbentuk silinder dan benda uji berbentuk kubus. Untuk menentukan kuat tekan beton acuan standar yang dipakai adalah (ASTM, 2014) "*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen*" (Setiawan, 2013).

Kegagalan suatu benda uji dalam uji tekan biasanya dapat terjadi dalam 3 kemungkinan. Yang pertama disebabkan karena beban aksial tekan, benda uji gagal dalam kondisi geser seperti pada contoh gambar 4(A), tahanan yang muncul merupakan kohesi dan friksi internal yang terdapat di dalam benda uji. Kemungkinan kedua, kegagalan terjadi pada benda uji ditandai dengan pecahnya benda uji menjadi potongan-potongan berbentuk kolom-kolom dikatakan beton membelah seperti contoh gambar 4(B). Kegagalan ini terjadi akibat dari kuat tekan yang tinggi. Kegagalan ketiga merupakan gabungan dari kegagalan pertama dan kedua, antara kondisi geser dan belah seperti pada contoh gambar 4(C) (Setiawan, 2013).



**Gambar 4.** Kegagalan benda uji kuat tekan beton (Setiawan, 2016)



**Gambar 5.** Hubungan tegangan-regangan tekan beton (Asroni, 2010)

Pada saat kondisi pembebanan telah mencapai  $0,3 f'c - 0,4 f'c$ , maka perilaku tegangan – regangan pada dasarnya masih bersifat linear. Namun, pada saat beban tekan telah melebihi  $0,3 f'c - 0,4 f'c$ , maka retak-retak lekatan akan mulai terbentuk, sehingga perilaku linear akan berubah menjadi nonlinear.

- 1) Tegangan maksimum dapat terjadi saat beban tekan telah mencapai regangan sebesar 0,002 yaitu sekitar  $0,7 f'c - 0,9 f'c$ , dan retak-retak lekatan terbentuk pola retak yang kontinu. Pada kondisi ini hubungan tegangan-regangan beton semakin menyimpang dari kondisi linear.
- 2) Pada saat beton akan mengalami runtuh, dimana kuat tekan beton telah mencapai puncak maka tegangan beton turun menjadi  $0,85 f'c$ , sedangkan regangan tekan akan tetap naik sampai dengan batas retak yaitu  $\epsilon_{cu}=0,003$ , sebagaimana yang diatur dalam peraturan SNI 03-2847-2002 pasal 12.2.3.

Alat yang digunakan untuk pengujian kuat tekan adalah *Universal Testing Machine* dengan mengacu pada standar ASTM C39M-21 (*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*). Pengujian kekuatan tekan merupakan pengujian tekan uniaksial jenis statis monotonik, yaitu pembebanan bertambah relatif konstan dengan kecepatan rata-rata pembebanan (rate of loading).

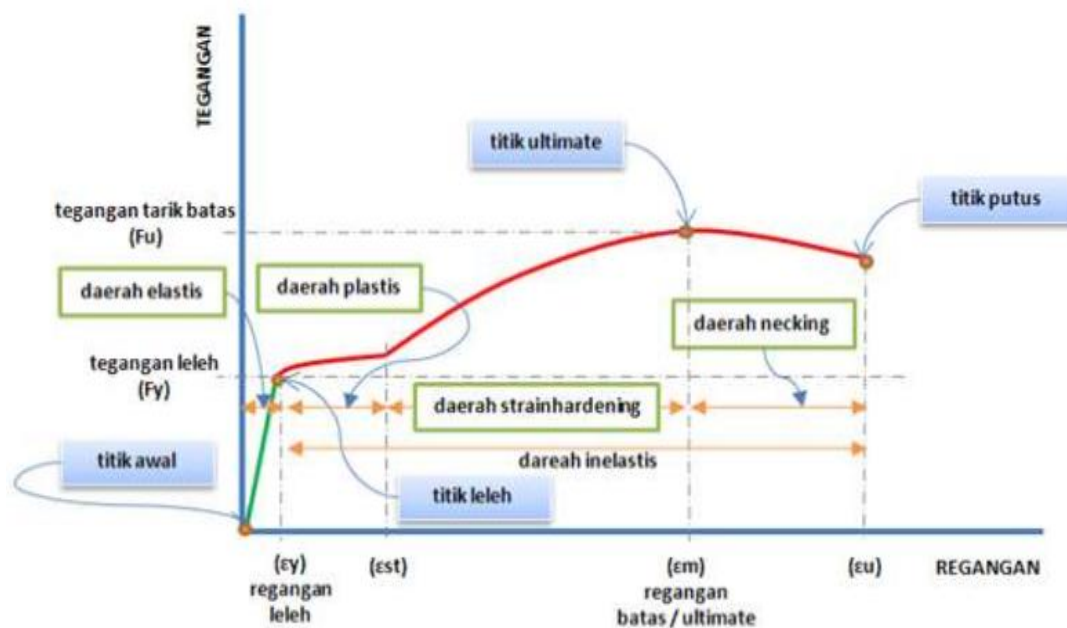
## **2. Kuat Tarik**

Kuat Tarik beton dapat bervariasi, dari 8 % sampai dengan 15% terhadap kuat tekannya. Faktor utama yang menyebabkan nilai kuat tarik



dari beton menjadi sangat kecil dikarenakan agregat – agregat yang mudah rapuh. Agregat – agregat yang mudah rapuh tidak memiliki pengaruh besar terhadap *Compressive Strength* dari beton dikarenakan retak pada beton dapat ditutup ketika terjadi transfer beban tekan ke beton. Tetapi untuk kasus tarik tidak dapat ditoleransi. Ketika beton telah mengalami retak maka beton sudah kehilangan kekuatan tarik. Metode untuk menghitung kondisi ketika beton telah kehilangan tarik yaitu *Modulus of Rupture* (McCormac, 2015).

Dikarenakan nilai kuat tarik beton yang sangat kecil, maka digunakan material pengganti untuk membantu menguatkan balok beton yaitu dengan pemberian besi beton pada balok beton. Besi beton memiliki ketahanan kuat tarik yang tinggi yaitu 100 kali kekuatan tarik beton. Kekuatan tarik dari besi beton ini yang membuat 2 material yang berbeda dapat bekerja bersamaan untuk membentuk struktur beton bertulang yang kuat. Kuat tarik pada besi beton diuji dengan menggunakan alat *Universal Tensile Test Machine* yang berdasarkan SNI 2052-2017 (Badan Standarisasi Nasional, 2014).

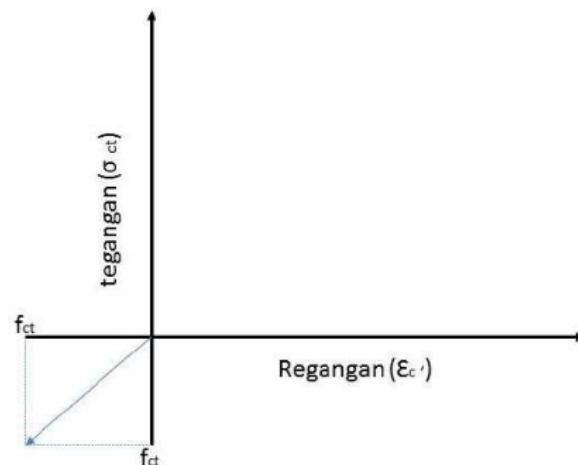


**Gambar 6.** Grafik Tegangan-Regangan Baja Tulangan

Kurva tegangan-regangan pada gambar 6 mewakili baja mutu biasa, dimana kondisi leleh terlihat jelas sebagai segmen yang berbentuk horizontal pada kurva. Untuk semua jenis baja, modulus elastisitas ( $E$ ) sebesar 200.000 MPa (29000 psi), dan tangent modulus kondisi *Strain-Hardening*, ( $E_{sh}$ ) berkisar 1/30 kali kondisi elastisnya, yaitu sebesar 6700 MPa (970 psi). Kondisi leleh dibatasi sampai pada tegangan leleh ( $F_y$ ). Jika dilanjutkan maka kondisinya menjadi konstan, dan hanya akan terjadi penambahan regangan sampai dengan mulai terjadinya *strain-hardening*. Jika beban diteruskan maka tegangannya akan meningkat sampai nilai maksimum, dan disebut kuat tarik atau kuat batas *Ultimate* ( $F_u$ ) (Dewobroto, 2016).

Perilaku beton pada saat diberikan pembebanan secara aksial Tarik, agak berbeda dengan perilaku beton saat diberikan beban tekan.

Hubungan tegangan regangan Tarik beton pada umumnya bersifat linear sampai dengan terjadinya retak yang biasanya langsung diikuti oleh keruntuhan beton, seperti pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Hubungan tegangan regangan Tarik beton ( Asroni, 2010)

Kekuatan Tarik beton akan lebih sulit diukur jika dibandingkan dengan kuat tekannya, karena masalah penjepitan (*gripping*) pada mesin. Terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan untuk menguji kuat Tarik beton, dan yang paling sering digunakan adalah tes pembelahan silinder. Selain itu, dapat juga digunakan rupture ( $f_r$ ) (Nawy, Edward G, 1998).

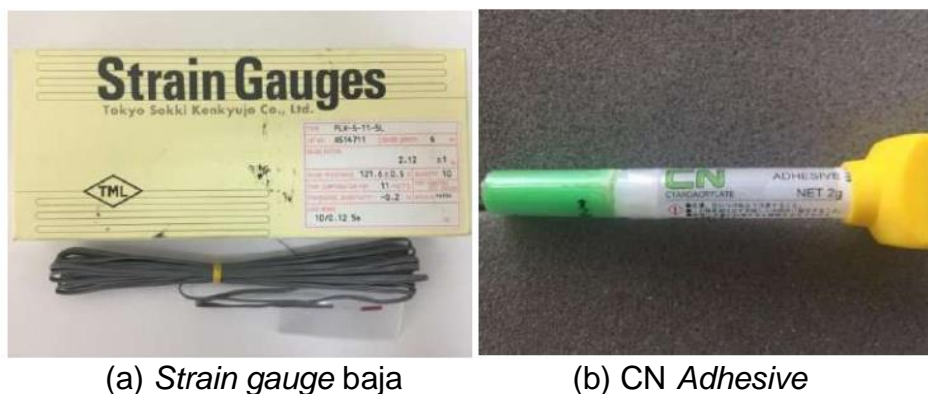
Untuk mengetahui ukuran besar dan arah lendutan yang terjadi pada balok uji selama proses pembebanan, maka digunakan alat LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), yang dapat dilihat pada Gambar 8 dibawah ini.



**Gambar 8.** LVDT

a. Alat ukur regangan baja tulangan

Alat ukur regangan baja tulangan longitudinal atas dan bawah dipasang alat *strain gauge* tipe FLA-2-11 (*gauge factor*  $2,12 \pm 1\%$ ), yang ditempatkan pada tengah bentang (momen maksimum). Pada tulangan transversal dan diagonal juga dipasang *strain gauge* tipe FLA-2-11 (*gauge factor*  $2,12 \pm 1\%$ ) yang dapat dilihat seperti pada gambar 9 dibawah ini.



(a) *Strain gauge* baja

(b) CN Adhesive

**Gambar 9.** Alat ukur regangan baja tulangan (*strain gauge*) baja dan CN Adhesive

b. Alat ukur regangan beton

Alat ukur regangan beton adalah *strain gauge* tipe PFL-60-11 (*gauge factor*  $2,09 \pm 1\%$ ), yang dilekatkan pada permukaan beton sesuai posisi-posisi yang direncanakan yang dapat dilihat seperti pada Gambar 10.



(a) Strain gauge beton

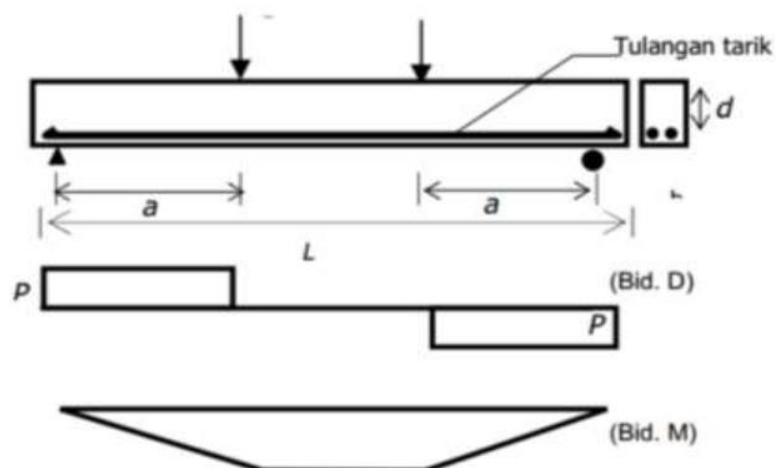
(b) CN Adhesive

**Gambar 10.** Alat ukur regangan beton (*strain gauge*) dan CN-E adhesive.

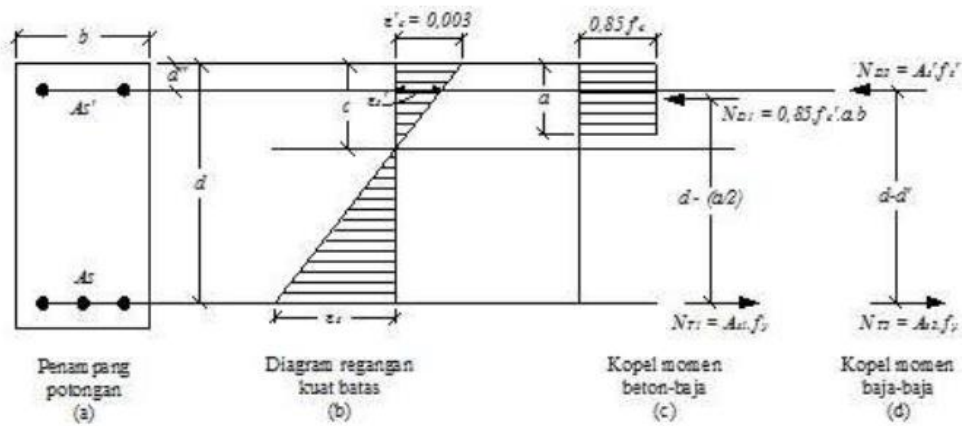
### 3. Kuat Lentur

#### a. Lentur Murni

Struktur balok beton bertulang dengan tumpuan sederhana (*Simple beam*) yang dibebani secara simetris dengan dua buah gaya ( $P$ ) sejauh jarak ( $a$ ) dari tumpuan, maka akan terjadi keadaan lentur murni, yaitu dimana momen konstan sebesar  $P \cdot a$  di daerah antara kedua beban  $P$ . Untuk mendapatkan uji lentur struktur balok dapat dilakukan dengan membuat perbandingan antara bentang geser dan tinggi efektif balok ( $a/d > 3$ ), serta mendesain agar keruntuhan yang akan terjadi adalah keruntuhan Tarik (*tension failure*) (Hutahaean, 2019).

**Gambar 11.** Balok dibebani Lentur Murni (Hutahaean, 2019).

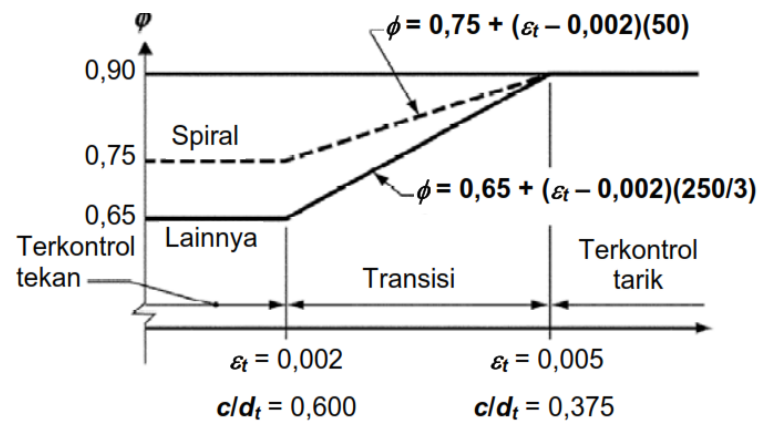
Kondisi tegangan regangan penampang beton yang mengalami lentur pada balok tulangan rangka dapat dilihat seperti pada gambar 12 di bawah ini.



**Gambar 12.** Distrusi tegangan- regangan balok tulangan rangkap

#### 4. Modulus Elastisitas

Berdasarkan aturan SNI 2847:2019 pasal 8.5, modulus elastisitas ( $E_c$ ) normal diizinkan diambil sebesar  $4700\sqrt{f'_c}$  untuk beton, sedangkan untuk tulangan modulus elastisitas ( $E_s$ ) nonprategang sebesar 200.000 MPa. Faktor reduksi tulangan baja dapat dilihat seperti Gambar 13 dibawah.



**Gambar 13.** Faktor reduksi kekuatan

a. Faktor reduksi kekuatan ( $\phi$ )

Gambar 13 diperlihatkan faktor reduksi kekuatan ( $\phi$ ) pada penampang dimana regangan tarik netto dalam baja, tarik terjauh pada kekuatan nominal ( $\epsilon_t$ ) berada pada antara Batasan-batasan untuk penampang terkendali tekan dan terkendali Tarik, ( $\phi$ ) dapat secara linier ditingkatkan dari nilai untuk penampang terkendali tekan menjadi 0,90 seiring dengan peningkatan  $\epsilon_t$  dari nilai batasan regangan terkendali tekan menjadi 0,005.

Pengujian nilai modulus elastisitas dilakukan dengan alat *Combined Compressometer Extensometer* dengan mengikuti standar ASTM C469-94 (*Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*).

## 5. Luas Tulangan Tarik Minimum

$$A_{S_{minimum}} = \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \geq 1,4 \frac{b_w d}{f_y} \quad (4)$$

## 6. Kontrol Defleksi

Komponen struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi defleksi atau deformasi apapun yang dapat memperlemah kekuatan ataupun mengurangi kemampuan layan struktur pada kondisi beban kerja. Besarnya lendutan seketikan berdasarkan dengan SNI 2847:2019 pasal 6.6.3.2 dan pasal 24.2. dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_e = \frac{(M_{cr})}{M_a} I_g + \left[ \frac{M_{cr}^3}{M_a} \right] I_{cr} \leq I_g \quad (5)$$

dan :

$$M_{cr} = f_r \frac{I_g}{Y_t} \quad (6)$$

Dimana :

Momen Inersia retak  $I_{cr}$  :

$$I_{cr} = \frac{bc^3}{3} + n \cdot A_s (d - c)^2 \quad (7)$$

Nilai C dihitung dengan :

$$\frac{bc^2}{2} + n A_s c - n \cdot A_s d = 0 \quad (8)$$

$I_e$  = Momen Inersia Efektif penampang balok

$I_g$  = Momen Inersia Bruto penampang balok

$I_{cr}$  = Momen Inersia Retak penampang balok

$M_{cr}$  = Momen Retak penampang balok

$M_a$  = Momen maksimum rencana

$b$  = Lebar Penampang balok

$d$  = Tinggi Efektif Penampang balok

$d'$  = Tebal selimut beton

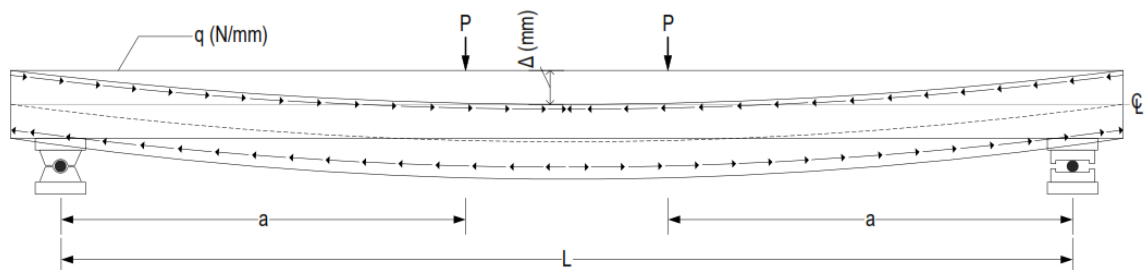
$c$  = Jarak dari permukaan tekan penampang balok

$A_s$  = Luas tulangan memanjang Tarik baja

$A_s'$  = Luas Tulangan Memanjang Tekan

$N$  = rasio modulus =  $E_s/E_c$

$F_r$  = modulus hancur beton



**Gambar 14.** Lendutan pada balok



Gambar 14, menunjukkan balok mengalami lendutan dengan perhitungan lendutan sesaat dilakukan sesuai bentuk kombinasi beban pada balok beton bertulang dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{E_c I} \text{ dan } \Delta = \frac{1}{24} \frac{P.a}{E_c I} (3L^2 - 4a^2) \quad (9)$$

- $\Delta$  = Besar Lendutan yang terjadi
- $q$  = Beban Merata
- $P$  = Beban Terpusat
- $L$  = Panjang Bentang Balok
- $I$  = momen inersia penampang
- $E_c$  = modulus elastis beton

## 7. Kekuatan geser

Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 9, desain penampang yang dikenai geser harus didasarkan pada :

$$\phi V_n > V_u \quad (10)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (11)$$

dengan

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c} b_w d \quad (12)$$

Desain tulangan geser vertikal dihitung :

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (13)$$

Batas spasi untuk tulangan geser diberikan :

$$s = \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm} , \text{ jika } V_s \leq V_{c1} = 0,33\sqrt{f'_c} b_w d \quad (14)$$

$$s = \frac{d}{4} \leq 300 \text{ mm} , \text{ jika } V_{c1} \leq V_s \leq V_{c2} = 0,66\sqrt{f'_c} b_w d \quad (15)$$

Dimana :

$V_s$	= Kuat Geser beton
$V_u$	= Kuat Geser Tulangan geser
$V_c$	= gaya geser oleh beban terfaktor
$B_w$	= Lebar Penampang balok
$D$	= Tinggi efektif penampang balok
$\phi$	= Faktor reduksi = 0.85
$n$	= Jumlah tulangan geser
$\lambda$	= Faktor pengali diambil 0.85
$A_v$	= Luas tulangan geser
$S$	= Jarak antara sengkang
$f'_c$	= Kuat Tekan beton
$f_y$	= Kuat Tarik baja

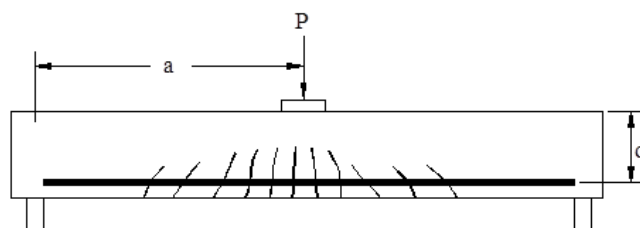
## 8. Jenis Keruntuhan pada Balok

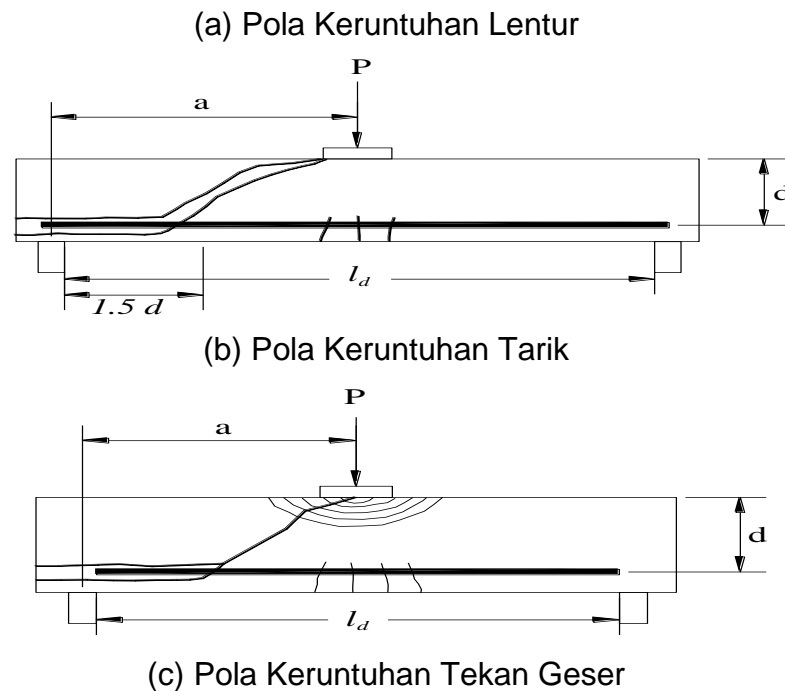
Jenis keruntuhan pada balok beton bertulang sangat tergantung pada kelangsingan balok tersebut. Kelangsingan balok dinyatakan dengan rasio  $a/d$  untuk beban terpusat, dimana  $a$  adalah Panjang bentang geser (*shear span*) dan  $d$  adalah tinggi efektif penampang. Bentang geser ditentukan berdasarkan jarak antara titik pembebanan sebuah beban terpusat terhadap tumpuan. Menurut Nawri (1998), keruntuhan balok beton bertulang terjadi disebabkan karena salah satu dari tiga macam keruntuhan berikut ini :

- a. Keruntuhan lentur (*flexural failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok beton bertulang yang memiliki rasio bentang geser dengan tinggi efektif penampang ( $a/d$ ) lebih besar dari 5,5 seperti yang terlihat pada gambar 15(a) dibawah. Pada balok beton bertulang yang di desain

*under-reinforced*, keruntuhan balok yang terjadi setelah tulangan Tarik mengalami leleh.

- b. Keruntuhan Tarik diagonal (*Diagonal tension failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok beton bertulang yang memiliki rasio bentang geser dengan tinggi efektif penampang ( $a/d$ ) antara 2,5 – 5,5 seperti yang terlihat pada gambar 15(b). Retak miring yang muncul setelah terjadinya retakan lentur dan hilangnya lekatan tulangan dengan beton, hal ini terjadi akibat tegangan utama (*principle stress*) dalam balok sebagai kuat Tarik diagonal lebih kecil dari tegangan utama yang terjadi akibat beban. Keruntuhan terjadi pada retak miring secara tiba-tiba tanpa peringatan. Keruntuhan berkarakteristik getas dan lendutan yang relative kecil.
- c. Keruntuhan geser tekan (*shear compression failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok yang memiliki rasiob bentang geser dengan tinggi efektif penampang ( $a/d$ ) antara 1,0 – 2,5 seperti yang terlihat pada gambar 15(c). retak miring yang muncul setelah terjadinya retak lentur dan terjadinya kehilangan lekatan tulangan memanjang dengan beton. Kemiringan retak ini lebih curam dibandingkan dengan retak diagonal Tarik. Keruntuhan balok yang terjadi pada retak miring diikuti dengan hancurnya beton pada sisi tekan.





**Gambar 15.** Pola keruntuhan balok beton bertulang (Nawi 1998).

Menurut McCormac (2015), jenis keruntuhan yang terjadi pada balok lentur tergantung pada sifat-sifat penampang balok dan dibedakan menjadi 3 jenis sebagai berikut :

- a. Keruntuhan tekan (*Brittle failure*), keadaan dimana beton telah hancur sebelum baja tulangan leleh. Hal ini berarti regangan tekan beton sudah melampaui regangan batas 0,003 tetapi regangan Tarik baja tulangan belum mencapai leleh ( $\epsilon_s < \epsilon_y$ ). Penampang seperti keruntuhan tersebut disebut dengan penampang *over reinforced*. Pada balok yang mengalami keruntuhan tekan atau keruntuhan getas, pada saat beton mulai hancur, baja tulangannya masih kuat (belum leleh), sehingga lendutan pada balok relatif tetap (tidak bertambah). Tetapi, jika diatas

balok ditambah beban yang besar, maka baja tulangan akan meleleh sehingga dapat terjadi keruntuhan secara mendadak tanpa ada peringatan lendutan membesar pada balok. Keadaan demikian sangat berbahaya sehingga sistem perencanaan beton bertulang yang dapat mengakibatkan terjadinya *over-reinforced* pada struktur tidak diperbolehkan.

- b. Keruntuhan seimbang (*balance*), keadaan dimana beton dan baja telah mengalami leleh secara bersamaan. Hal ini berarti regangan tekan beton mencapai regangan batas 0,004 dan regangan Tarik baja tulangan mencapai leleh pada saat yang sama ( $\epsilon_s = \epsilon_y$ ). Pada keadaan ini, kekuatan beton dan baja tulangan dapat dimanfaatkan sepenuhnya, sehingga penggunaan material beton dan baja tersebut menjadi lebih hemat. Sistem perencanaan beton bertulang yang demikian ini merupakan sistem perencanaan yang ideal, tetapi sulit dicapai karena dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain, ketidaktepatan mutu baja realisasi dan mutu baja rencana, ketidaktepatan mutu beton dalam pelaksanaan pembuatan campuran dengan mutu beton rencana, maupun kurang teliti pada perencanaan hitungan akibat adanya pembulatan.
- c. Keruntuhan Tarik (*ductile failure*), keadaan dimana baja tulangan sudah leleh sebelum beton hancur. Hal ini berarti regangan Tarik baja tulangan sudah mencapai titik leleh tetapi regangan tekan beton belum mencapai regangan batas 0,003 ( $\epsilon_s > \epsilon_y$ ). Penampang dengan

keruntuhan tersebut, disebut penampang *Under-Reinforced*. Pada balok yang mengalami keruntuhan Tarik atau keruntuhan daktail, pada saat baja tulangan mulai mengalami leleh betonnya masih kuat (belum hancur), sehingga dapat terjadi lendutan pada balok. Jika diatas balok ditambah beban yang besar, maka lendutan balok semakin besar dan akhirnya dapat terjadi keruntuhan. Keadaan ini dapat memberikan peringatan tentang lendutan yang membesar sebelum terjadi runtuh, sehingga sistem perencanaan beton bertulang yang *under-reinforced* ini lebih aman dan diperbolehkan.

## 9. Pola Retak Balok Beton Bertulang

Pola retak pada balok beton bertulang dapat digunakan untuk membaca jenis keruntuhan dari balok beton bertulang. Pola retak yang tegak lurus dengan tulangan utama disebut *Tranverse Cracks* sedangkan pola retak yang sejajar dengan tulangan utama disebut *Longitudinal Cracks* (Uddin & Shaikh, 2018). Pada balok yang mempunyai tulangan memanjang, diperlukan penulangan secara transversal atau biasa disebut dengan tulangan geser untuk mencegah terjadinya pembentukan retak miring. Menurut (Wight & MacGregor, 2012) terdapat 3 jenis keretakan pada balok beton bertulang, yaitu:

1. Retak lentur (*flecural crack*)

Retakan ini terjadi pada posisi hampir tegak lurus dengan daerah yang memiliki momen lentur yang besar.

2. Retak geser lentur (*flexural shear crack*)

Terjadi pada bagian balik yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Bisa dikatakan bahwa retak geser lentur adalah perambatan diagonal dari retak lentur yang terjadi sebelumnya.

### 3. Retak Tarik diagonal (*web shear crack*)

Retak Tarik diagonal terjadi pada garis netral, dimana hal ini terjadi pada saat gaya geser maksimum dan tungan aksial yang terjadi kecil. Besaran pola retak merupakan parameter yang dapat mempengaruhi laju penetrasi korosi ion *Chloride* ( $\text{Cl}^-$ ). Penetrasi ion klorida kedalam balok beton bertulang menjadi semakin mudah apabila lebar retak beton terus meningkat (Emmanuel.et.al, 2012).

## E. Perhitungan Kapasitas Momen

### 1. Perhitungan momen retak pertama, $M_{cr}$

Pada kondisi retak pertama, momen retak  $M_{cr}$  terjadi pada saat serat tarik penampang balok mencapai modulus keruntuhan. Dalam kondisi retak awal, momen retak terjadi pada serat tarik penampang balok mencapai kapasitas tarik beton. Kuat tarik beton dipresentasikan sebagai modulus keruntuhan ( $f_r$ ) yang dihitung dengan persamaan (23) dan momen retak awal dihitung berdasarkan persamaan (24).

Besarnya modulus keruntuhan dihitung dengan persamaan:

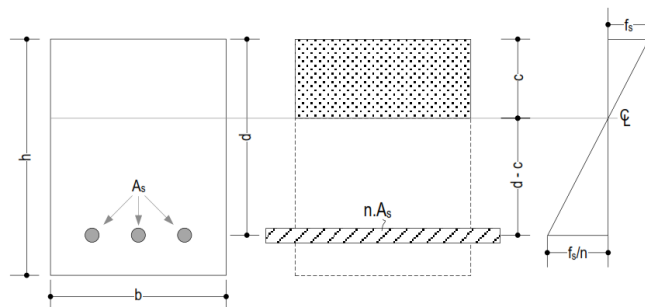
$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (16)$$

Momen retak awal selanjutnya dihitung menggunakan persamaan:

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_g}{h} \quad (17)$$

## 2. Perhitungan momen leleh, $M_y$

Pada Gambar 12. momen saat leleh terjadi ketika tulangan Tarik mengalami leleh. Pada kondisi ini seluruh tegangan tarik dipikul oleh tulangan terpasang di sisi tarik. Tulangan Tarik dapat diasumsikan sebagai pengganti suatu luas beton yang ekuivalen ( $nA_s$ ) atau luas transformasi. Penampang transformasi dihitung dengan metode balok homogen yang elastis. Nilai  $n$  adalah perbandingan modulus elastisitas  $E_s/E_c$ . Nilai  $c$  merupakan jarak tekan penampang ke sumbu netral yang dihitung dengan metode kuadrat.



**Gambar 16.** Luas transformasi pada balok

Nilai  $c$  dihitung dengan persamaan kuadrat sempurna sebagai berikut :

$$\frac{bc^2}{2} + n A_s c - n A_s d = 0 \quad (18)$$

Setelah letak sumbu netral  $c$  ditentukan, momen inersia dari penampang transformasi  $I_t$  dan momen leleh dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_t = \frac{bc^3}{3} n.A_s (d - c)^2 \quad (19)$$

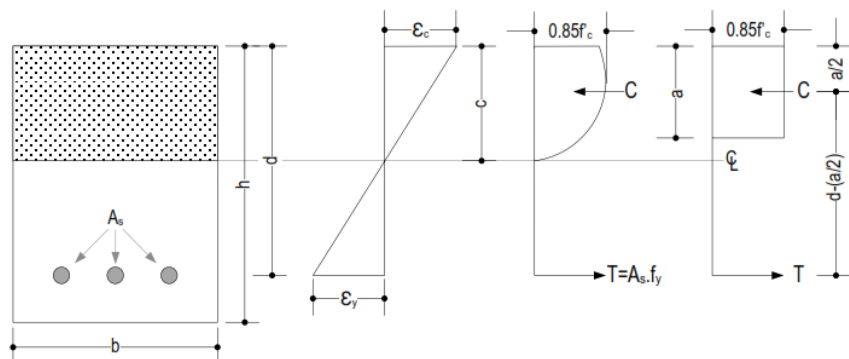


Momen leleh dengan persamaan :

$$M_y = \frac{f_s l_t}{n.c} \quad (20)$$

### 3. Perhitungan momen ultimit, $M_n$

Momen saat beban ultimit terjadi ketika beton mencapai tegangan maksimum sebesar  $0,85f'_c$  dan regangan pada saat ultimit mencapai 0.003. Perhitungan momen ultimit ( $M_n$ ) dilakukan dengan pendekatan teori blok tegangan segiempat ekuivalen yang diusulkan oleh *Whitney*, seperti pada Gambar 17. Dengan asumsi tegangan tekan merata sebesar  $0,85f'_c$  terdistribusi merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang suatu garis lurus sejajar sumbu netral sejauh  $a = \beta_1 \times c$  dari serat beton yang mengalami regangan tekan ( $\epsilon_c$ ) maksimum.



**Gambar 17.** Blok tegangan ekuivalen *Whitney*

Dengan menggunakan semua asumsi tersebut, maka dapat dihitung gaya tekan  $C$  dan gaya Tarik ( $T$ ) sebagai persamaan keseimbangan sebagai berikut :

$$C = T$$

$$0,85f'_c b \cdot a = A_s \cdot f_y \quad (21)$$

Dimana :

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c \cdot b} \quad (22)$$

Momen ultimit atau kekuatan nominal  $M_n$  diperoleh :

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \text{ atau } M_n = A_s \cdot f_y \cdot j_d \quad (23)$$

Dimana :

$A_s$  = Luas tulangan tarik

Dengan  $j_d$  adalah lengan momen, yaitu jarak antara gaya Tarik (T) dan gaya tekan (C) yang membentuk kopel adalah :

$$j_d = d - \frac{a}{2} \quad (24)$$

Jadi momen ultimit,  $M_n$  adalah :

$$M_n = 0,85 f'_c a \cdot b \left( d - \frac{a}{2} \right) \text{ atau } M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (25)$$

#### 4. Perhitungan Lendutan

Perhitungan lendutan balok uji mengacu pada pedoman disain dari ACI 440 dimana penampang yang diperhitungkan adalah penampang efektif. Lendutan elemen beton bertulang akibat dua buah beban terpusat yang efektif bekerja dapat dihitung dengan persamaan (26) sebagai berikut:

$$\delta_{\max} = \frac{PL}{24E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \quad (26)$$

#### 5. Uji lentur statik monotonik

Perilaku lentur benda uji hasil analisis didapatkan dengan mengadakan pengujian lentur balok secara monotonik. Balok beton

bertulang diuji dengan empat titik pembebanan. Balok ditumpu dengan dua buah perletakan sederhana (sendi-rol) dengan jarak tumpuan 3000 mm. Dua pembagi beban tak langsung dengan jarak 600 mm dari profil baja. Rasio gentang geser ( $a/d$ ) adalah 5,6 mengindikasikan balok berada pada zona keruntuhan lentur. Pembebanan diberikan secara monotonic hingga hancur.

a. Alat uji pembebanan

Balok uji yang dibebani diletakkan pada *loading frame*. Diatas balok uji di tengah-tengah bentang diletakkan seperangkat alat pembebanan balok, yaitu :

- a) *Actuator*, untuk memberikan beban pada balok dengan kapasitas 1500 kN.
- b) *Load cell*, kapasitas 200 kN untuk mengetahui besar beban yang diberikan actuator, yang dapat dilihat seperti pada gambar 18(a).
- c) *Data Logger* THS-1100, digunakan untuk merekam secara serentak dan otomatis data yang diukur oleh *strain gauge*, LVDT, dan *load cell* seperti yang ditampilkan pada gambar 18(b)



(a) *Load cell*

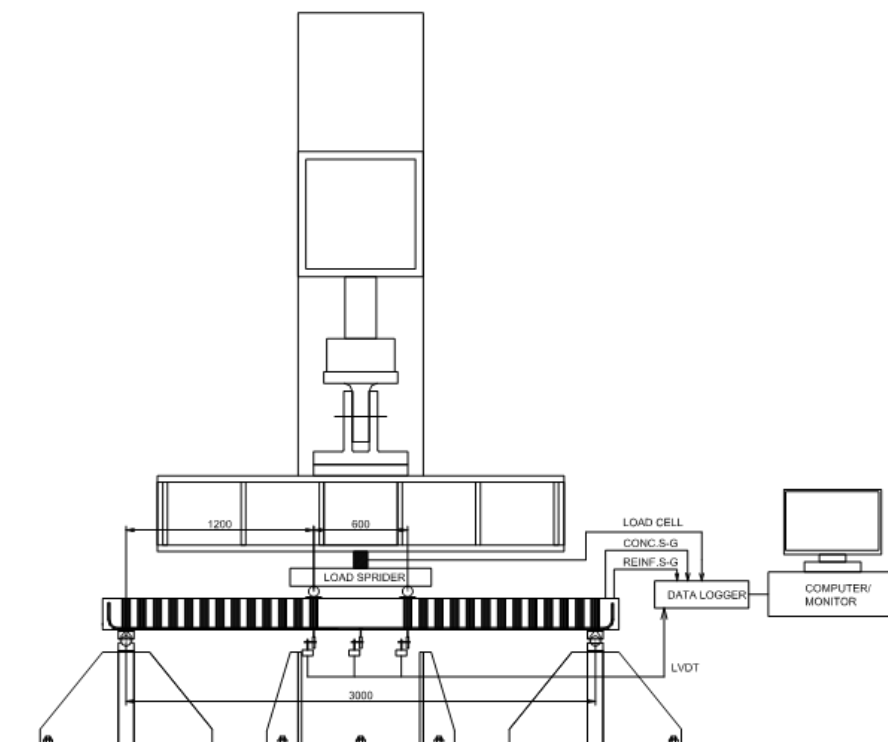


(b) *Data logger*

**Gambar 18.** Alat *Load cell* dan *Data logger*

b. *Setup* Benda Uji

Gambar 19 (a) dan (b) menunjukkan *setup* pengujian balok lentur. Benda uji dibebani lentur dengan pembebanan dua titik secara monotonic menggunakan alat uji static berkapasitas 1500 KN. Pembebanan menggunakan kontrol lendutan dengan kecepatan pembebanan 0.2 mm/detik. Instrumentasi yang digunakan adalah *strain gauge* untuk mengukur regangan pada beton dan baja, *Linear variable Displacement Transducer (LVDT)* untuk mengukur lendutan pada benda uji, *Load Cell* berkapasitas 200 KN untuk membaca beban yang terjadi, serta *data logger* untuk menyimpan semua data-data yang diukur oleh instrumen.



**Gambar 19.** *Setup* benda uji

*Strain gauge* beton dipasang pada 3 lokasi, yaitu satu di sisi atas beton (CG-1), dan dua di sisi samping beton (CG-2 dan CG-3). *Strain gauge* pada sisi atas digunakan untuk mengukur regangan pada sisi tekan beton, sementara *strain gauge* ditempatkan pada sisi samping digunakan untuk mengetahui distribusi regangan beton di sepanjang tinggi balok.