

TUGAS AKHIR

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG
DIPERKUAT DENGAN MORTAR GEOPOLIMER DAN
SERAT PVA**

***FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS STRENGTHENED WITH GEOPOLYMER MORTAR
AND PVA FIBERS***

**ANDREW OKTAVIYANTO GOSAL
D011 17 1315**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN MORTAR GEOPOLIMER DAN SERAT PVA

Disusun dan diajukan oleh:

ANDREW OKTAVIYANTO GOSAL

D011 17 1315

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 23 Juli 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP. 197206192000122001

Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng
NIP. 198702282019031005

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardj Tiaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andrew Oktaviyanto Gosal
NIM : D011 17 1315
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat Dengan Mortar Geopolimer Dan Serat PVA

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

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi/Tesis/Disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 22 Juli 2021

Yang membuat pernyataan,



Andrew Oktaviyanto Gosal

NIM : D011 17 1315

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN MORTAR GEOPOLIMER DAN SERAT PVA**” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

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

1. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.**, 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. **Ibu Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
5. **Bapak Dr. Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
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 yang tercinta, yaitu ayahanda **Andreas** dan ibunda **Lenny** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan selama ini, baik spritual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.

2. **Dira, Naen, Dayat, Kak Nandar, Kak Furqan** selaku partner dalam penelitian ini, yang selalu membantu dan memberikan semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Perkuatan Struktur**, yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Saudara-saudari **PLASTIS 2018**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2017** yang senantiasa memberikan warna yang begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

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

Akhirnya semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, April 2021

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
ABSTRAK	x
ABSTRACT	xi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penelitian	5
E. Batasan Masalah	5
F. Sistematika Penulisan	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	8
A. Penelitian Terdahulu	8
B. Kekuatan Lentur Balok Beton Bertulang	12
C. Retak Pada Balok Beton Bertulang	17
D. Kegagalan Pada Balok Beton Bertulang	20
E. Mortar	22
F. Mortar Geopolimer	27
G. Material Penyusun Mortar Geopolimer	30
H. Serat PVA	35
BAB 3. METODE PENELITIAN	37
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	37
B. Bagan Alir Penelitian	38
C. Alat dan Bahan Penelitian	39
D. Benda Uji	45

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	56
A. Kuat tekan Mortar Geopolimer	56
B. Karakteristik Mekanis Beton	63
C. Karakteristik Mekanis Tulangan.....	65
D. Pengujian Lentur Balok	66
D.1. Hubungan Beban-Lendutan.....	67
D.2. Beban Maksimum	70
D.3. Hubungan Beban-Regangan Beton	71
D.4. Hubungan Beban-Regangan Baja	71
D.5. Distribusi Regangan Beton dan Tulangan	73
E. Pola Retak dan Mode Kegagalan	76
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	83
A. Kesimpulan	83
B. Saran	84
DAFTAR PUSTAKA.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Proses perbaikan mortar geopolimer pada balok	8
Gambar 2. Pengujian lentur dan pola retak pada balok	9
Gambar 3. Pengujian balok perkuatan TRGM	10
Gambar 4. Pengujian lentur balok beton geopolimer CFRP <i>bar</i>	11
Gambar 5. Perilaku lentur balok sebelum retak	13
Gambar 6. Perilaku lentur balok setelah retak	14
Gambar 7. Perilaku lentur balok pada beban ultimit.....	15
Gambar 8. Blok tegangan ekuivalen	16
Gambar 9. Jenis retakan pada beton	18
Gambar 10. Diagram keruntuhan balok	21
Gambar 11. Ikatan polimerisasi pada geopolimer <i>fly ash</i>	28
Gambar 12. Diagram alir pengujian kuat tekan mortar geopolimer	38
Gambar 13. Diagram alir pengujian lentur balok	39
Gambar 14. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM)	40
Gambar 15. Dimensi benda uji.....	41
Gambar 16. LVDT.....	42
Gambar 17. <i>Strain gauge</i> baja dan CN <i>Adhesive</i>	42
Gambar 18. <i>Strain gauge</i> beton dan CN-E <i>Adhesive</i>	43
Gambar 19. Alat <i>Load cell</i> dan <i>Data logger</i>	44
Gambar 20. Komposisi mortar geopolimer.....	45
Gambar 21. Partikel <i>fly ash</i> hasil pengujian SEM	47
Gambar 22. NYCON-PVA RECS 15	48
Gambar 23. Material yang digunakan	49
Gambar 24. Pengadukan campuran pada <i>mixer</i>	50
Gambar 25. Benda uji kubus.	51
Gambar 26. Dimensi benda uji balok	52
Gambar 27. Pabrikasi benda uji balok beton bertulang	53
Gambar 28. Proses pengecoran mortar geopolimer	54
Gambar 29. <i>Setup</i> benda uji	55

Gambar 30. Lokasi pemasangan <i>strain gauge</i> beton.....	56
Gambar 31. Penimbangan benda uji	57
Gambar 32. Pengujian kuat tekan.....	57
Gambar 33. Pengaruh metode <i>curing</i> terhadap kuat tekan.....	60
Gambar 34. Pengaruh PVA fiber terhadap kuat tekan	62
Gambar 35. Pengujian karakteristik mekanis beton	64
Gambar 36. Hubungan beban-lendutan.....	68
Gambar 37. Beban maksimum	71
Gambar 38. Hubungan beban-regangan beton.....	72
Gambar 39. Hubungan beban regangan baja	73
Gambar 40. Distribusi regangan beton dan tulangan balok CB.....	74
Gambar 41. Distribusi regangan beton dan tulangan balok GP	75
Gambar 42. Distribusi regangan beton dan tulangan balok GP-F	76
Gambar 43. Pola retak benda uji	77
Gambar 44. Retak awal balok CB.....	78
Gambar 45. Retak awal balok GP.....	79
Gambar 46. <i>Microcrack</i> pada sambungan	79
Gambar 47. Pengukuran lebar retak balok GP	80
Gambar 48. Delaminasi antara beton normal dan mortar geopolimer	80
Gambar 49. Retak awal balok GP-F	81
Gambar 50. Pengukuran lebar retak balok GP-F	82
Gambar 51. <i>Bridging effect</i> serat pada retak.....	82
Gambar 51. <i>Debonding</i> antara beton normal dan mortar geopolimer	83

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Lebar retak maksimum yang diizinkan	20
Tabel 2. Persyaratan Spesifikasi Proporsi Mortar	26
Tabel 3. Persyaratan Spesifikasi Sifat Mortar	27
Tabel 4. Karakter Fisik PVA.....	36
Tabel 5. Komposisi kimia <i>fly ash</i>	46
Tabel 6. Klasifikasi <i>fly ash</i>	46
Tabel 7. Properti dari PVA fiber	48
Tabel 8. Komposisi campuran mortar geopolimer	49
Tabel 9. Variasi benda uji mortar geopolimer	50
Tabel 10. Variasi benda uji balok	51
Tabel 11. Mix desain beton normal	52
Tabel 12. Hasil pengujian PVA 0% pada umur 3, 7 dan 28 hari	58
Tabel 13. Hasil pengujian PVA 0.6% pada umur 3, 7 dan 28 hari	58
Tabel 14. Hasil pengujian kuat tekan beton	65
Tabel 15. Hasil pengujian kuat tarik belah beton.....	65
Tabel 16. Hasil pengujian kuat lentur beton	65
Tabel 17. Hasil pengujian kuat tarik baja	66
Tabel 18. Rekapitulasi hasil pengujian.....	69

ABSTRAK

Kerusakan pada balok beton bertulang seperti retak, lubang, dan *spalling* dapat menyebabkan kerusakan struktur secara keseluruhan. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan material perbaikan struktur pada balok. Salah satunya adalah dengan teknologi mortar. Umumnya mortar menggunakan semen sebagai pengikat dalam campurannya. Akan tetapi, efek industri semen menuai kritik karena menghasilkan gas CO₂ yang dapat merusak atmosfer. Oleh karena itu, dibutuhkan inovasi material sebagai pengganti semen. *Fly ash* sebagai material ramah lingkungan dapat menjadi solusi untuk meminimalisir penggunaan semen. Adapun kekurangan dari *fly ash* yaitu bersifat getas sehingga perlu penambahan serat untuk meningkatkan daktilitas dan kapasitas struktur. Serat yang digunakan adalah serat *Poly-Vinyl Alcohol* (PVA) karena memiliki kuat tarik yang tinggi sehingga dapat menghambat laju perkembangan retak yang terjadi pada balok.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lentur serta pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan serat PVA. Perilaku lentur didiskusikan berdasarkan perilaku beban-lendutan, beban-regangan beton, beban-regangan baja, serta distribusi regangan beton dan tulangan.

Tahapan penelitian terbagi atas dua yaitu pengujian kuat tekan mortar geopolimer dan pengujian lentur balok. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer menggunakan sampel kubus 50x50x50 mm, diuji pada umur 3, 7, dan 28 hari dengan metode *curing* udara dan *curing* lembab. Mortar geopolimer dibuat dengan bahan dasar *fly ash* serta aktivator berupa Natrium Hidroksida dan Natrium Silikat. Sementara itu, pengujian lentur balok menggunakan sampel balok 150x200 mm dengan panjang 3300 mm sebanyak 6 buah yang terdiri dari balok kontrol, balok dengan perkuatan mortar geopolimer, serta balok dengan perkuatan mortar geopolimer dan serat PVA masing-masing sebanyak 2 buah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek penambahan serat PVA pada mortar geopolimer dapat meningkatkan beban maksimum dan kekakuan pada balok. Dari mode kegagalan sambungan, balok dengan perkuatan mortar geopolimer tanpa serat mengalami kegagalan delaminasi sedangkan balok dengan perkuatan mortar geopolimer dan serat mengalami kegagalan *debonding*.

Kata kunci: balok beton, mortar geopolimer, serat PVA

ABSTRACT

Damage to reinforced concrete beams such as cracks, holes, and spalling can cause damage to the overall structure. This can be overcome by using structural repair materials on the beam. One of them is with mortar technology. Generally, mortar uses cement as a binder in the mixture. However, the effect of the cement industry has been criticized because it produces CO₂ gas which can damage the atmosphere. Therefore, material innovation is needed as a substitute for cement. Fly ash as an environmentally friendly material can be a solution to minimize the use of cement. The disadvantage of fly ash is brittle so it is necessary to add fiber to increase the ductility and capacity of the structure. The fiber used is Poly-Vinyl Alcohol (PVA) fibers because it has a high tensile strength so that it can inhibit the rate of crack development that occurs in the beam.

This study aims to analyze the flexural behavior and crack patterns and failure modes of reinforced concrete beams strengthened with geopolymer mortar and PVA fibers. The flexural behavior is discussed based on the load-deflection behavior, the load-strain of concrete, the load-strain of steel, and the strain distribution of concrete and steel.

The research stages are divided into two, namely testing the compressive strength of geopolymer mortar and testing the flexural beam. The compressive strength test of geopolymer mortar used a 50x50x50 mm cube sample, tested at 3, 7, and 28 days of age using air curing and moist curing methods. Geopolymer mortar is made with fly ash as the base material and the activator is Sodium Hydroxide and Sodium Silicate. Meanwhile, the beam flexural test used a sample of beams of 150x200 mm with a length of 3300 mm as many as 6 pieces consisting of control beams, beams strengthened with geopolymer mortar, and beams strengthened with geopolymer mortar and PVA fibers each as many as 2 pieces.

The results showed that the effect of adding PVA fibers to the geopolymer mortar could increase the maximum load and stiffness of the beam. From the connection failure mode, beams strengthened with geopolymer mortar without fiber experienced delamination failure while beams strengthened with geopolymer mortar and fibers experienced debonding failure.

Keywords: concrete beams, geopolymer mortar, PVA fibers

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pembangunan konstruksi di Indonesia berkembang sangat pesat seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk. Pada umumnya sebagian besar sarana dan prasarana (infrastruktur) yang ada menggunakan konstruksi beton. Sejauh ini beton dikenal sebagai material bangunan paling populer. Beton tersusun dari komposisi utama agregat (kasar dan halus), air dan semen Portland atau yang biasa kita sebut dengan beton konvensional. Konsumsi dunia untuk beton sekitar 8,8 juta ton setiap tahun dan kebutuhan material ini akan meningkat dari tahun ke tahun sejalan dengan meningkatnya kebutuhan sarana dan prasarana dasar manusia.

Beton bertulang merupakan material yang digunakan pada sebagian besar konstruksi bangunan, baik besar maupun kecil, misalnya gedung, bendungan, jembatan dan masih banyak lagi. Beton bertulang terdiri dari campuran beton yang dikombinasikan dengan tulangan baja, dimana beton berfungsi menahan gaya tekan yang diakibatkan oleh beban yang diberikan sedangkan tulangan baja berfungsi untuk menahan gaya tarik yang tidak dimiliki oleh beton. Balok sebagai salah satu komponen struktur yang sering menggunakan beton bertulang sebagai material penyusunnya, terkadang dalam membuat desainnya masih sering kali terjadi kesalahan, sehingga hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada balok seperti retak, lubang,

spalling, dan sebagainya yang akhirnya menyebabkan kerusakan struktur secara keseluruhan.

Salah satu bentuk kemajuan teknologi bahan bangunan yang merupakan metode perbaikan dan perkuatan struktur adalah teknologi mortar. Mortar adalah campuran yang terdiri dari beberapa material yakni agregat halus (pasir), bahan perekat (*binder*) dan air yang berfungsi sebagai matriks pengikat bagian penyusun suatu konstruksi baik yang bersifat struktural maupun non struktural. Pelaksanaan di lapangan masih cenderung tidak berubah, masyarakat masih menggunakan semen sebagai bahan pengikat utama meskipun penggunaan semen pada konstruksi akhir-akhir ini menuai kritik karena efek industri semen yang menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂) yang dikenal emisi gas rumah kaca. Pada tahun 2016, produksi semen dunia menghasilkan sekitar 2,2 miliar ton CO₂ yang setara dengan kontribusi sekitar 8% terhadap emisi gas CO₂ dunia (Rodgers, L., 2018).

Untuk itu, diperlukan bahan alternatif pengganti semen pada penyusunan mortar. Pengurangan penggunaan semen dipikirkan oleh para pakar teknologi beton untuk mulai melakukan riset pembuatan beton dengan memanfaatkan ikatan geopolimer. Geopolimer didefinisikan sebagai material yang dihasilkan dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan kerangka polimer SiO₄ dan AlO₄ yang terikat secara tetrahedral (Davidovits, 2013). Salah satu geopolimer yaitu

terbuat dari bahan utama limbah industri *fly ash* yang kaya dengan unsur Alumina (Al) dan Silika (Si).

Abu terbang atau yang dikenal dengan istilah *fly ash* menjadi solusi dalam meminimalkan penggunaan semen karena merupakan material ramah lingkungan, memiliki kadar silika yang tinggi, dan bersifat *pozzolonic*. *Fly ash* merupakan salah satu limbah yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). *The Daily Records Jakarta*, Indonesia saat ini berada di urutan ke lima terbesar dunia sebagai penghasil batu bara dengan perkiraan produksi 386 juta ton setiap tahun. Provinsi Sulawesi Selatan sendiri memiliki beberapa PLTU dengan bahan bakar batu bara, yakni PLTU Punagaya dan PLTU Bosowa di Jeneponto serta PLTU Barru. PLTU setiap tahunnya menghasilkan banyak limbah *fly ash* sehingga menimbulkan masalah mengenai cara memanfaatkan limbah tersebut agar tidak mencemari lingkungan dan dapat digunakan khususnya di dunia konstruksi.

Fly ash sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang dikandung oleh abu terbang akan bereaksi secara kimia dengan cairan alkali dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat seperti semen. Adapun kekurangan dari *fly ash* yaitu bersifat getas sehingga perlu penambahan serat untuk meningkatkan daktilitas dan kapasitas struktur dalam memikul beban.

Beberapa jenis serat yang mampu memperbaiki sifat-sifat beton antara lain: baja (*steel*), plastik (*polypropylene*), kaca (*glass*) dan karbon (*carbon*), yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangannya tergantung tujuan pemakaian. Selain jenis-jenis serat di atas, ada juga serat alam misalnya serabut kelapa dan serabut nanas yang juga dapat digunakan dalam campuran beton. Adapun serat yang digunakan pada penelitian ini adalah serat buatan yaitu serat PVA (*Poly-Vinyl Alcohol*) dimana serat ini memiliki kuat tarik yang tinggi sehingga dapat mengurangi panjang dan lebar retak serta menghambat laju perkembangan retak yang terjadi pada balok.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka penting dilakukan penelitian yang bersifat eksperimental yaitu **“PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN MORTAR GEOPOLIMER DAN SERAT PVA”**.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan serat PVA.
2. Bagaimana pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan serat PVA.

C. Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan serat PVA.
2. Menganalisis pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan serat PVA.

D. Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini diharapkan memberi sejumlah manfaat sebagai berikut:

1. *Fly ash* merupakan limbah *by product* yang terus mengalami peningkatan kuantitas untuk memenuhi kebutuhan industri. Disaat yang sama, penggunaan semen berdampak pada kerusakan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberi solusi dalam upaya pencegahan kerusakan lingkungan dan khususnya industri beton agar menjadi acuan dalam perencanaan beton ramah lingkungan berbasis *fly ash*.
2. Menjadi bahan referensi bagi peneliti selanjutnya dalam mengembangkan beton ramah lingkungan (*Green Concrete*) berbasis *fly ash*.

E. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Percobaan dilakukan terhadap benda uji Balok Beton Bertulang yang diperkuat dengan Mortar Geopolimer dan penambahan serat PVA.
2. Mortar geopolimer diproduksi dengan mencampurkan *fly ash*, pasir, NaOH, Na₂SiO₃, *superplasticizer*, dan boraks.
3. Fly Ash kelas C sebagai pengganti semen berasal dari PLTU Bosowa, Jeneponto, Sulawesi Selatan, Indonesia, dan serat PVA dengan tipe NYCON-PVA RECS 15 dan panjang 8 mm.
4. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer berdasarkan penambahan serat PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari.
5. Benda uji diberi beban lentur dengan beban dua titik secara monotonik menggunakan alat uji statik dengan kapasitas 1500 kN.
6. Pembebanan hingga benda uji mengalami keretakan pada beban maksimum.

F. Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah tulisan ini, sistematika penulisan yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga produk yang dihasilkan lebih sistematis. Sistematika penulisan penelitian ini dapat diurutkan yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini, Pokok-Pokok bahasan dalam BAB ini adalah latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini, diuraikan secara sistematis tentang teori, pemikiran, dan hasil penelitian terdahulu yang memiliki hubungan dengan penelitian ini. Bab ini memberikan kerangka dasar mengenai konsep dan teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini yang dituangkan dalam bentuk bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, data penelitian berupa jenis dan sumber data serta analisis yang digunakan dalam mengolah data yang didapatkan dari lapangan maupun dari laboratorium.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian diantaranya adalah hasil pengujian karakteristik mortar geopolimer dan pengujian lentur balok.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Sulaem Musaddiq Laskar dan Sudip Talukdar (2019) melakukan penelitian tentang perilaku terhadap kerusakan balok beton bertulang yang menggunakan material perbaikan mortar geopolimer berbasis *ultra-fine slag*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geopolimer berbasis *ultra-fine slag* memiliki potensi yang tinggi untuk digunakan secara efektif sebagai material perbaikan struktural beton bertulang. Balok perbaikan dapat mencapai atau bahkan melebihi beban yang dicapai oleh balok kontrol. Perilaku daktilitas balok perbaikan juga lebih baik dibandingkan balok kontrol. Indikasi yang jelas telah didapatkan bahwa perbaikan pada balok beton bertulang dengan kerusakan parsial memiliki perilaku yang lebih baik dibandingkan perbaikan pada balok beton bertulang dengan kerusakan total. Gambar 1 menunjukkan proses perbaikan mortar geopolimer berbasis *ultra-fine slag* pada balok beton bertulang.



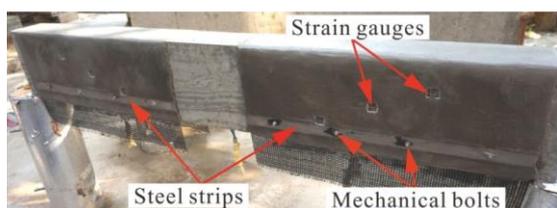
Gambar 1. Proses perbaikan mortar geopolimer pada balok

M. Kalaivani dkk (2020) melakukan penelitian tentang evaluasi perilaku balok beton geopolimer berbasis *fly ash/slag* dengan penambahan kapur. Penelitian ini mengevaluasi perilaku struktural balok beton geopolimer dengan penambahan kapur. *Fly ash* dan GGBS (*Ground Granulated Blast Slag*) ditambahkan dalam bentuk bubuk dengan rasio masing-masing 60% dan 40%. Total benda uji sebanyak enam buah balok diuji dibawah kondisi pembebanan statik dua titik. Balok di-*curing* pada suhu ruang dalam kondisi ambien. Dari enam buah balok, tiga diantaranya adalah balok beton geopolimer dengan konsentrasi molaritas 8 M, 10 M, dan 12 M, serta tiga balok lainnya dengan penambahan kapur sebanyak 5% dari berat material aluminosilikat. Perilaku beban lendutan dan parameter lentur seperti kekakuan, daktilitas, dan kapasitas penyerapan energi akan dipelajari dan dibandingkan dengan benda uji beton geopolimer konvensional. Gambar 2 menunjukkan pengujian lentur dan pola retak pada balok beton geopolimer berbasis *fly ash/slag* dengan penambahan kapur.

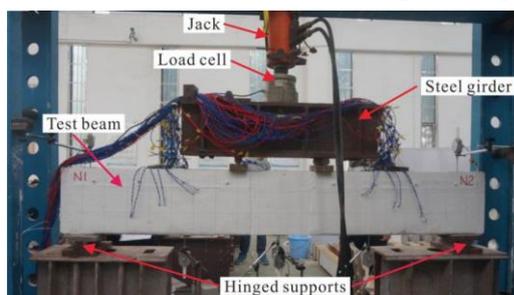


Gambar 2. Pengujian lentur dan pola retak pada balok

Hai Yan Zhang dkk (2019) melakukan penelitian tentang perilaku mekanik perkuatan geser balok beton dengan mortar geopolimer perkuatan tekstil (*textile reinforced geopolymer mortar/TRGM*). Penelitian ini memperlihatkan hasil pengujian beban statik pada sepuluh balok beton bertulang, yang terdiri atas delapan balok perkuatan geser dengan mortar geopolimer perkuatan tekstil, satu balok perkuatan geser dengan tekstil dan resin *epoxy*, dan satu balok tanpa perkuatan. Data dari hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas geser pada satu dan dua lapisan dari perkuatan TRGM dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan masing-masing 47% dan 106%. Selain itu, kapasitas geser dapat meningkat 15-21% ketika angkur strip baja digabungkan. TRGM sangat dipercaya sebagai solusi dalam retrofit dan perkuatan beton bertulang, karena sangat tahan terhadap api, tahan terhadap korosi, dan tahan cuaca yang baik. Gambar 3a menunjukkan balok perkuatan TRGM dengan angkur strip baja dan Gambar 3b menunjukkan *setup* pengujian lentur balok.



Gambar 3a. Balok perkuatan TRGM dengan angkur strip baja



Gambar 3b. *Setup* pengujian lentur balok

Hemn Qader Ahmad (2019) melakukan penelitian tentang kekuatan lentur dan kegagalan balok beton geopolimer dengan CFRP (*carbon-fibre reinforced polymer*) bars. Beton geopolimer dengan CFRP *bar* dapat memberikan sistem konstruksi yang baik dengan keberlanjutan tinggi, daya tahan tinggi, dan kekuatan yang sesuai. Penelitian ini memperoleh kekuatan lentur dan perilaku balok beton geopolimer dan beton normal yang diperkuat dengan CFRP *bar*. Dua belas balok yang terdiri dari sembilan balok beton geopolimer dan tiga balok beton normal dicor dan diuji dengan menggunakan uji lentur empat titik pada bentang efektif 2000 mm. Rasio tulangan, kuat tekan dan jenis beton diambil sebagai variabel. Penelitian ini menyajikan beban retak awal, beban ultimit, perilaku beban lendutan, kurva beban-regangan, lebar retak, jumlah retak dan mode kegagalan. Hasil penelitian menunjukkan pada balok beton geopolimer terjadi penurunan lendutan dan peningkatan beban retak pertama dengan peningkatan kuat tekan, peningkatan lendutan dan nilai beban ultimit yang hampir sama. Balok beton geopolimer juga menghasilkan nilai lebar retak yang lebih rendah dibandingkan dengan balok beton normal. Gambar 4 menunjukkan pengujian lentur balok beton geopolimer dengan CFRP *bar*.



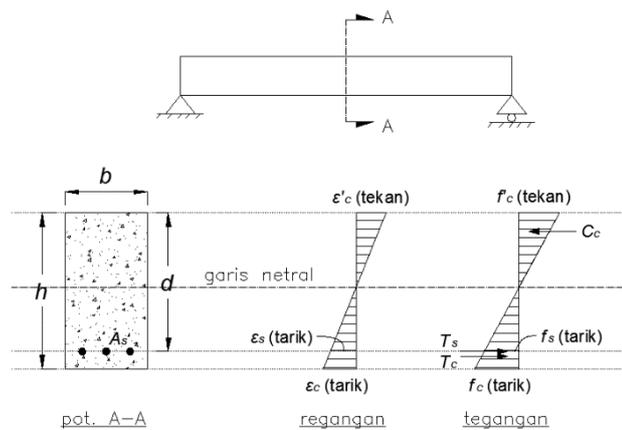
Gambar 4. Pengujian lentur balok beton geopolimer

B. Kekuatan Lentur Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang akan melentur pada saat beban bekerja. Lentur pada balok terjadi akibat regangan deformasi yang disebabkan oleh beban eksternal. Pada saat beban ditingkatkan, balok tersebut menahan regangan dan defleksi tambahan yang mengakibatkan retak-retak lentur sepanjang bentang dari balok tersebut. Penambahan yang terus-menerus terhadap tingkat beban mengakibatkan kegagalan elemen struktural ketika beban eksternal mencapai kapasitas elemen tersebut.

Tegangan lentur pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar. Apabila beban bertambah maka pada balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur di sepanjang bentang balok. Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya terjadi keruntuhan elemen struktur. Taraf pembebanan yang demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan pada lentur. (Nawy, 2008)

Untuk lebih memahami kondisi tegangan dan regangan beton pada saat dibebani maka akan diuraikan secara lebih terperinci mengenai hal tersebut. Nilai tegangan pada daerah tekan beton bersifat *linear* atau kira-kira sebanding dengan regangannya hanya sampai pada tingkat pembebanan tertentu pada kondisi $0,45f_c$. Pada tingkat pembebanan ini, apabila beban ditambah terus-menerus maka keadaan sebanding akan lenyap dan diagram tegangan tekan pada penampang balok beton bertulang akan berbentuk seperti kurva tegangan-regangan beton.

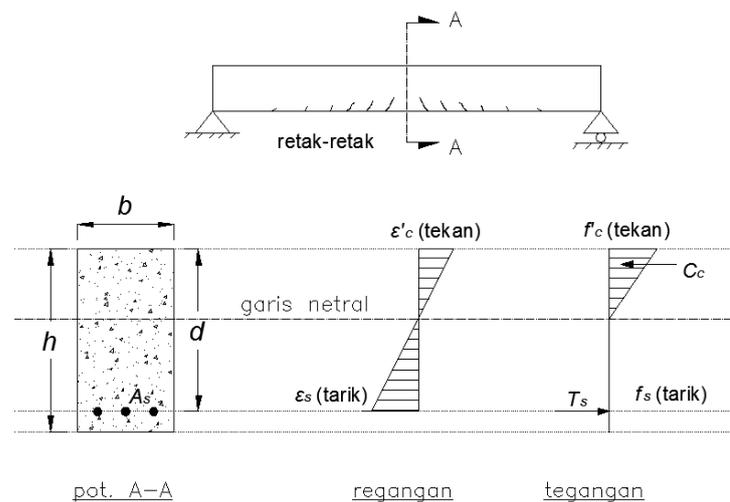


Gambar 5. Perilaku lentur balok sebelum retak

Pada kondisi pembebanan sebelum terjadinya retak pada beton, beton dan baja tulangan secara bersama-sama bekerja dalam menahan gaya tarik yang bekerja sementara beton pada sisi tekan hanya menahan gaya tekan saja. Untuk lebih jelasnya dapat diuraikan seperti pada Gambar 5. Distribusi tegangan pada kondisi ini masih bersifat linear, bernilai nol pada garis netral dan sebanding dengan nilai regangan yang terjadi. Hal ini hanya dijumpai apabila tegangan maksimum yang timbul pada sisi tarik masih cukup rendah di mana nilainya masih berada di bawah nilai modulus keruntuhan (*rupture modulus*).

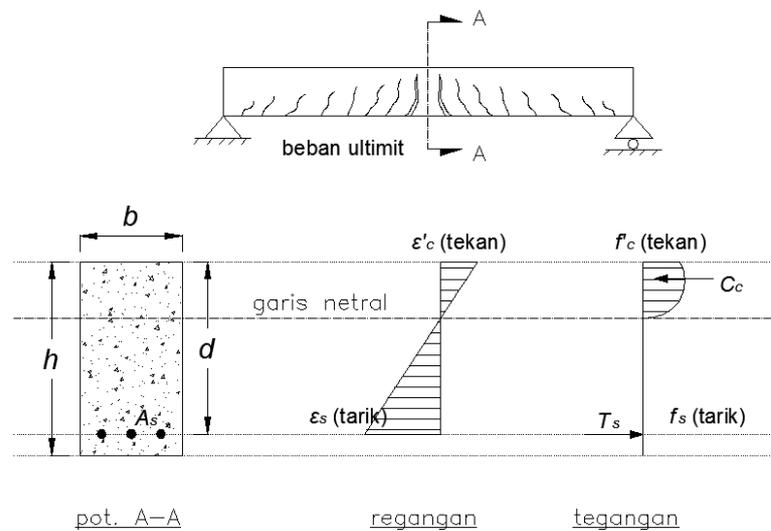
Pada kondisi pembebanan setelah retak dimana nilai pembebanan yang diberikan telah melebihi nilai pembebanan sebelum terjadinya retak pada beton, nilai kuat tarik beton telah dilampaui sehingga beton mulai mengalami retak rambut seperti tampak pada Gambar 3. Pada kondisi ini beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak yang disebabkan karena kondisi lebar retak yang menyebabkan terputusnya aliran distribusi tegangan sepanjang sisi tarik beton.

Akibatnya maka distribusi tegangan tarik pada daerah beton yang retak akan terhenti dan kemudian selanjutnya diambil alih sepenuhnya oleh baja tulangan. Tulangan akan mulai meregang dan apabila nilai beban semakin ditingkatkan maka tulangan akan mencapai kondisi lelehnya. Distribusi tegangan tarik pada tulangan ini terjadi hingga kondisi $0.5f'_c$. Pada keadaan ini nilai tegangan beton tekan masih dianggap bernilai sebanding dengan nilai regangannya dimana model tegangan yang terjadi masih berbentuk blok segitiga seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Perilaku lentur balok setelah retak

Apabila nilai beban diberikan lebih besar lagi maka nilai regangan serta tegangan tekan akan meningkat dan cenderung untuk tidak sebanding lagi antara keduanya, di mana tegangan tekan pada beton akan mulai membentuk kurva *nonlinear*.



Gambar 7. Perilaku lentur balok pada beban ultimit

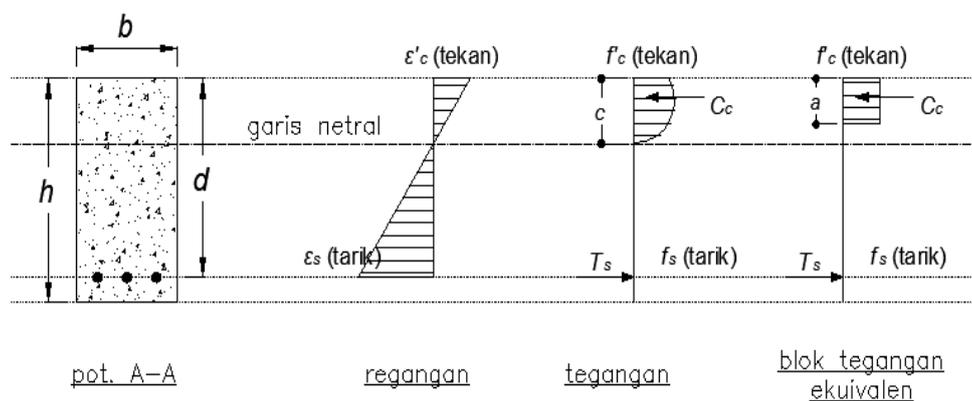
Kurva tegangan di atas garis netral penampang balok atau pada daerah tekan balok akan berbentuk sama dengan kurva tegangan-regangan beton seperti yang terlihat pada Gambar 7. Bentuk distribusi tegangan ini berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral.

Pada Gambar 7 dapat dilihat model distribusi tegangan dan regangan yang timbul pada kondisi pembebanan mendekati pembebanan ultimit. Bentuk distribusi tegangan aktual yang melengkung ini tentunya menimbulkan kesulitan tersendiri dalam menghitung volume blok tegangan tekan.

Model persegi Whitney yang diusulkan tahun 1937 mengusulkan agar digunakan blok tegangan segiempat ekuivalen yang dapat digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa harus kehilangan ketelitiannya. Blok tegangan ekuivalen ini mempunyai tinggi a dan tegangan tekan rata-rata

sebesar $0.85f'_c$. Nilai ini diperoleh berdasarkan hasil percobaan pada beton yang berumur lebih dari 28 hari.

Dengan menggunakan semua asumsi di atas maka perhitungan volume blok tegangan tekan dapat lebih mudah dilakukan dengan hanya menggunakan rumus volume balok sederhana. Bentuk blok tegangan ekuivalen ini dapat dilihat pada Gambar 8. Apabila kapasitas batas kekuatan beton pada daerah tekan telah terlampaui maka balok akan mengalami kehancuran. Sampai dengan tahap ini tampak bahwa tercapainya kapasitas ultimit merupakan proses yang tidak dapat berulang karena beton telah melewati kondisi elastisnya.



Gambar 8. Blok tegangan ekuivalen

Komponen struktur balok yang telah retak disertai dengan kondisi baja tulangan yang telah meleleh tentunya ditandai dengan nilai lendutan yang besar. Lendutan besar yang terjadi pada balok tidak akan kembali ke kondisinya yang semula dipengaruhi oleh kondisi baja tulangan yang telah meleleh. Berdasarkan penjelasan-penjelasan yang telah diuraikan sebelumnya maka dalam memperhitungkan kapasitas momen ultimit suatu

komponen struktur, kuat tarik beton biasanya diabaikan (tidak diperhitungkan). Seluruh gaya tarik yang terjadi hanya dilimpahkan pada baja tulangan di daerah tarik.

Dengan demikian maka bentuk penampang beton pada daerah tarik tidaklah mempengaruhi kekuatan lentur. Tinggi penampang yang menentukan adalah tinggi efektif d , yaitu jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik. Nilai regangan beton tekan maksimum pada serat tekan terluar ditetapkan sebesar 0.003. Penetapan nilai tersebut didasarkan atas hasil-hasil pengujian yang menunjukkan bahwa umumnya regangan beton hancur berada di antara nilai 0.003 dan 0.004.

C. Retak Pada Balok Beton Bertulang

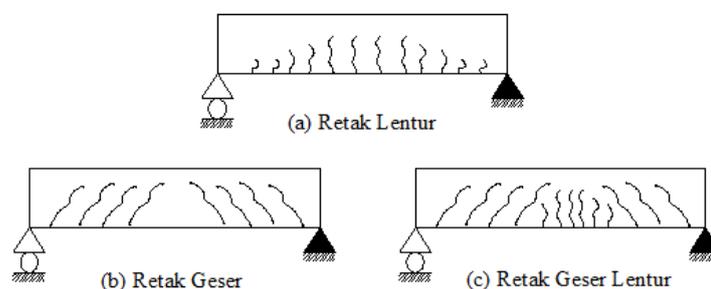
Retak terjadi pada umumnya menunjukkan bahwa lebar celah retak sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada batang tulangan baja tarik dan beton pada ketebalan tertentu yang menyelimuti batang baja tersebut. Meskipun retak tidak dapat dicegah, namun ukurannya dapat dibatasi dengan cara menyebar atau mendistribusikan tulangan.

Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, (Gilbert, 1990):

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok (lihat Gambar 9(a)). Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya. Jika balok memiliki

web yang sangat tinggi, jarak retak akan sangat dekat, dengan sebagian retak terjadi bersamaan sampai di atas tulangan, dan sebagian lagi tidak sampai ke tulangan. Retak ini akan lebih lebar di pertengahan balok daripada di bagian dasarnya.

2. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*), yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang di mana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil (lihat Gambar 9(b)). Retak miring dapat disebabkan karena gaya geser yang dapat terjadi pada bagian web balok beton bertulang baik sebagai retak bebas atau perpanjangan dari retak lentur. Retak geser web kadang-kadang dapat terjadi pada web-web penampang prategang, terutama dapat terjadi pada penampang dengan flens yang besar dan web yang tipis.
3. Retak geser-lentur (*flexural shear crack*), terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi kerekatan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dan retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya (lihat Gambar 9(c)).



Gambar 9. Jenis retakan pada beton

Apabila struktur dibebani dengan suatu beban yang menimbulkan momen lentur masih lebih kecil dari momen retak maka tegangan yang

timbul masih lebih kecil dari *modulus of rupture* beton $f_r = 0,70 \sqrt{f_c}$. Apabila beban ditambah sehingga tegangan tarik mencapai f_r , maka retak kecil akan terjadi. Apabila tegangan tarik sudah lebih besar dari f_r , maka penampang akan retak.

Ada tiga kasus yang dipertimbangkan dalam masalah retak yaitu:

a) Ketika tegangan tarik $f_t < f_r$, maka penampang dipertimbangkan untuk tidak terjadi retak. Untuk kasus ini $I_g = \frac{1}{12} b \cdot h^3$.

b) Ketika tegangan tarik $f_t = f_r$, maka retak mulai timbul. Momen yang timbul disebut momen retak dan dihitung sebagai berikut:

$$M_{cr} = f_r \frac{I_g}{c}, \text{ dimana } c = \frac{h}{2}$$

c) Apabila momen yang bekerja sudah lebih besar dari momen retak, maka retak penampang sudah meluas. Untuk perhitungan digunakan momen inersia retak (I_{cr}), transformasi balok beton yang tertekan, transformasi dan tulangan n.As.

Beton bertulang akan mengalami retak yang disebabkan oleh kekuatan tarik beton yang cukup rendah. Retak tidak dapat dicegah dan dihindari namun dapat dibatasi ukurannya dengan menyebar atau mendistribusikan tulangan pada beton. Nilai lebar retak maksimum yang dapat diterima sangat bervariasi yaitu dari sekitar 0,004 sampai 0,016 dan nilai ini sangat tergantung pada lokasi terjadinya retak, jenis struktur, tekstur permukaan beton, iluminasi, dan faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi terjadinya retak pada balok beton bertulang.

Komite ACI 224, dalam laporannya tentang retak memperlihatkan sejumlah perkiraan lebar retak maksimum yang dapat diizinkan untuk batang beton bertulang dalam berbagai situasi dan kondisi yang terjadi seperti pada beton bertulang yang bersentuhan dengan udara kering, udara lembab, tanah, larutan bahan kimia, air laut, dan percikan air laut serta digunakan pada struktur penahan air. Tabel 1 (Jack C. Mc Cormac, 2004) memperlihatkan lebar retak maksimum yang dapat diizinkan berdasarkan lebar retak yang ditentukan oleh Komite ACI 224 dalam berbagai situasi dan kondisi yang ada diantaranya udara kering, udara lembab, air laut maupun percikan air laut dan lain-lain.

Tabel 1. Lebar retak maksimum yang diizinkan

Batang yang bersentuhan dengan	Lebar retak yang diizinkan
Udara kering	0.016 inch (0.4064 mm)
Udara lembab, tanah	0.012 inch (0.3048 mm)
Larutan bahan kimia	0.007 inch (0.1778 mm)
Air laut dan percikan air laut	0.006 inch (0.1524 mm)
Struktur penahan air	0.004 inch (0.1016 mm)

D. Kegagalan Pada Balok Beton Bertulang

Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang. Ada tiga kemungkinan yang biasa terjadi penyebab kegagalan balok beton bertulang (Nawy, Edward G., 2010):

1) Kondisi *Balanced Reinforced*

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan.

Kondisi regangan: $\varepsilon_c = 0.003$ dan $\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s}$

Pada kondisi ini berlaku: $\rho = \rho_{balance}$ dan $\varepsilon_s = \varepsilon_c$

2) Kondisi *Over-Reinforced*

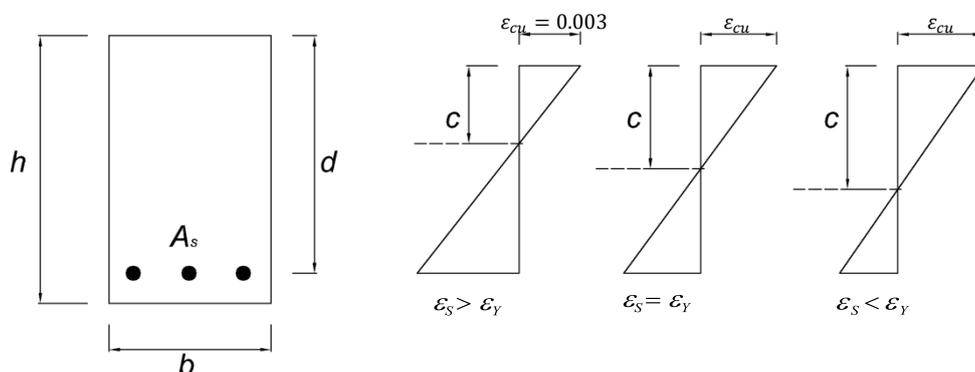
Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan *balanced*. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum baja meleleh.

Pada kondisi ini berlaku: $\rho > \rho_{balance}$ dan $\varepsilon_s < \varepsilon_c$

3) Kondisi *Under-Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi *balanced*. Keruntuhan ditandai dengan lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya. Pada kondisi ini berlaku: $\rho < 75\% \rho_{balance}$ dan $\varepsilon_s > \varepsilon_c$

Dalam perencanaan elemen struktur, suatu elemen struktur harus direncanakan berada pada kondisi *under-reinforced*.



Gambar 10. Diagram keruntuhan balok

E. Mortar

Menurut SNI 03-6825-2002 mortar didefinisikan sebagai campuran material yang terdiri dari agregat halus (pasir), bahan perekat (tanah liat, kapur, semen Portland), dan air dengan komposisi tertentu. Mortar yang baik harus mempunyai sifat seperti murah, tahan lama (awet), mudah dikerjakan (diaduk, diangkut, dipasang dan diratakan), melekat baik dengan pasangan batu, cepat kering dan mengeras, tahan terhadap rembesan air, serta tidak timbul retak-retak setelah dipasang (Tjokrodimuljo, 1996).

Menurut ASTM C270, tujuan utama dari mortar dalam pasangan adalah untuk mengikat unit-unit pasangan menjadi satu kesatuan agar bekerja sebagai elemen integral yang memiliki karakteristik kinerja fungsional yang diinginkan. Kekuatan mortar tergantung pada kohesi pasta semen terhadap partikel agregat halusnya. Mortar mempunyai nilai penyusutan yang relatif kecil.

Mortar ditinjau dari bahan pembentuknya dapat dibedakan menjadi empat tipe, yaitu: mortar lumpur (*mud mortar*), mortar kapur, mortar semen, dan mortar khusus. Selanjutnya tipe-tipe mortar tersebut diuraikan sebagai berikut (Tjokrodimuljo, 1996 dalam Veliyati, 2010):

- a. Mortar lumpur adalah mortar dibuat dari campuran pasir, tanah liat/lumpur dan air. Pasir, tanah liat dan air tersebut dicampur sampai rata dan mempunyai konsistensi yang cukup baik. Jumlah pasir harus diberikan secara tepat untuk memperoleh adukan yang baik. Terlalu sedikit pasir menghasilkan mortar yang retak-retak setelah mengeras

sebagai akibat besarnya susutan pengeringan dan juga dapat menyebabkan adukan kurang dapat melekat. Mortar ini biasa dipakai sebagai bahan tembok atau bahan tungku api.

- b. Mortar kapur, dibuat dari campuran pasir, kapur dan air. Kapur dan pasir mula-mula dicampur dalam keadaan kering, kemudian ditambahkan air. Air ditambahkan secukupnya agar diperoleh adukan yang cukup baik (mempunyai konsistensi baik). Selama proses pengerasan kapur mengalami susutan, sehingga jumlah pasir dipakai dua kali atau tiga kali volume kapur. Mortar ini biasanya digunakan untuk pembuatan tembok bata.
- c. Mortar semen, dibuat dari campuran pasir, semen portland, dan air dalam perbandingan campuran yang tepat. Perbandingan antara volume semen dan volume pasir antara 1:3 hingga 1:6 atau lebih besar. Mortar ini kekuatannya lebih besar daripada mortar lumpur dan mortar kapur, karena mortar ini biasanya dipakai untuk tembok, pilar kolom atau bagian lain yang menahan beban. Karena mortar ini kedap air, maka dapat dipakai pula untuk bagian luar dan bagian yang berada di bawah tanah. Semen dan pasir mula-mula dicampur secara kering sampai merata di atas tempat yang rata dan kedap air. Kemudian sebagian air yang diperlukan ditambahkan dan diaduk kembali, begitu seterusnya sampai air yang diperlukan tercampur sempurna.
- d. Mortar khusus, yang mana dibuat dengan menambahkan *asbestos*, *fibers*, *jute fibers* (serat rami), butir-butir kayu, serbuk gergaji kayu dan

sebagainya. Mortar ini digunakan untuk bahan isolasi panas atau peredam suara. Mortar tahan api, diperoleh dengan menambahkan bubuk bata api dengan *aluminuos* semen, dengan membandingkan volume satu aluminous semen dan bubuk bata api. Mortar ini biasa dipakai untuk tungku api dan sebagainya.

Berdasarkan ASTM C270 (SNI 6882:2014), *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry* (Spesifikasi Mortar Untuk Pekerjaan Unit Pasangan Bata), mortar untuk adukan pasangan dapat dibedakan atas 5 tipe, yaitu:

a. Mortar tipe M

Mortar tipe M merupakan campuran dengan kuat tekan yang tinggi yang direkomendasikan untuk pasangan bertulang maupun pasangan tidak bertulang yang akan memikul beban tekan yang besar. Kuat tekan minimumnya 17,2 MPa.

b. Mortar tipe S

Mortar tipe ini direkomendasikan untuk struktur yang akan memikul beban tekan normal tetapi dengan kuat lekat lentur yang diperlukan untuk menahan beban lateral besar yang berasal dari tekanan tanah, angin dan beban gempa. Karena keawetannya yang tinggi, mortar tipe S juga direkomendasikan untuk struktur pada atau di bawah tanah, serta yang selalu berhubungan dengan tanah, seperti pondasi, dinding penahan tanah, perkerasan, saluran pembuangan dan mainhole. kuat tekan minimumnya adalah 12,4 MPa.

c. Mortar tipe N

Tipe N merupakan mortar yang umum digunakan untuk konstruksi pasangan di atas tanah. Mortar ini direkomendasikan untuk dinding penahan beban interior maupun eksterior. Mortar dengan kekuatan sedang ini memberikan kesesuaian yang paling baik antara kuat tekan dan kuat lentur, workabilitas, dan dari segi ekonomi yang direkomendasikan untuk aplikasi konstruksi pasangan umumnya. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.

d. Mortar tipe O

Mortar tipe O merupakan mortar dengan kandungan kapur tinggi dan kuat tekan yang rendah. Mortar tipe ini direkomendasikan untuk dinding interior dan eksterior yang tidak menahan beban struktur, yang tidak menjadi beku dalam keadaan lembab atau jenuh. Mortar tipe ini sering digunakan untuk pekerjaan setempat, memiliki workabilitas yang baik dan biaya yang ekonomis. Kuat tekan minimumnya adalah 2,4 MPa.

e. Mortar tipe K

Mortar tipe K memiliki kuat tekan dan kuat lekat lentur yang sangat rendah. Mortar tipe ini jarang digunakan untuk konstruksi baru, dan direkomendasikan dalam ASTM C270 hanya untuk konstruksi bangunan lama yang umumnya menggunakan mortar kapur. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.

Spesifikasi masing - masing tipe sesuai ASTM C270 diperlihatkan dalam Tabel 2 dan Tabel 3 berikut ini:

Tabel 2. Persyaratan Spesifikasi Proporsi Mortar

Mortar	Tipe	Campuran dalam volume (bahan bersifat semen)							Kapur Padam atau kapur Pasta	Rasio agregat (Pengukuran pada kondisi lembab atau gembur)
		Semen Portland/ semen campur	Semen Mortar			Semen Pasangan				
			M	S	N	M	S	N		
Semen Kapur	M	1	...	...	...	...	...	...	$\frac{1}{4}$	
	S	1	...	...	...	...	...	...	$> \frac{1}{4}$ sampai $\frac{1}{2}$	
	N	1	...	...	...	...	...	...	$> \frac{1}{2}$ sampai $1\frac{1}{4}$	
	O	1	...	...	...	...	...	...	$> 1\frac{1}{4}$ sampai $2\frac{1}{2}$	Tidak kurang dari $2\frac{1}{4}$ dan tidak lebih dari 3 kali jumlah dari volume terpisah material sementisius
Semen Mortar	M	1	...	...	1	...	...	...
	M	...	1	...	...	...	...	...
	S	$\frac{1}{2}$	...	...	1	...	...	...
	S	...	...	1	...	...	...	...
	N	...	...	...	1	...	...	...
	O	...	...	...	1	...	...	...
Semen Pasangan	M	1	...	...	...	...	...	1		
	M	...	...	...	...	1	...	...
	S	$\frac{1}{2}$	...	...	...	...	...	1		
	S	...	...	...	...	...	1	...		
	N	...	...	...	...	...	...	1		
	O	...	...	...	...	...	...	1		

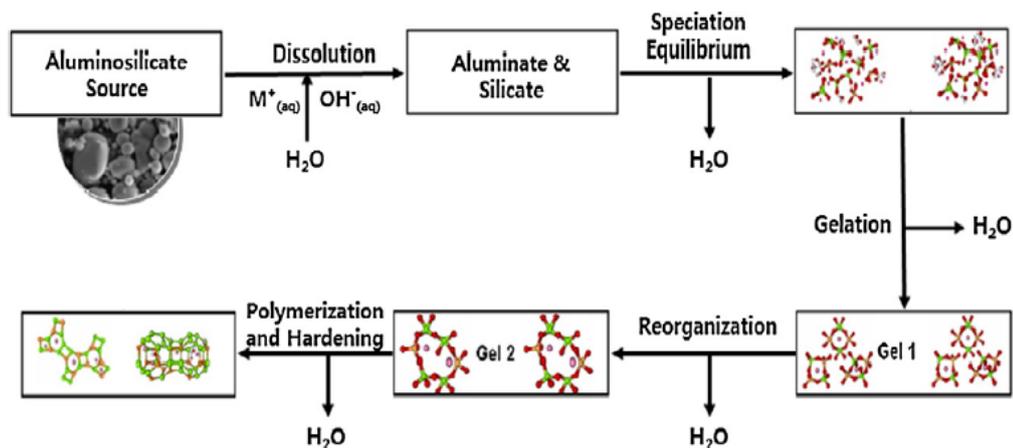
Tabel 3. Persyaratan Spesifikasi Sifat Mortar

Mortar	Tipe	Kekuatan tekan rata-rata pada umur 28 hari, min, MPa (psi)	Retensi air, min, %	Kadar udara, maks, % ^B	Rasio agregat (diukur dalam kondisi lembab, lepas)
Semen-kapur	M	17,2 (2 500)	75	12	Tidak kurang dari 2¼ dan tidak lebih dari 3½ jumlah dari volume terpisah material sementisius
	S	12,4 (1 800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14 ^C	
	O	2,4 (350)	75	14 ^C	
Semen Mortar	M	17,2 (2 500)	75	12	
	S	12,4 (1 800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14 ^C	
	O	2,4 (350)	75	14 ^C	
Semen Pasangan	M	17,2 (2 500)	75	18	
	S	12,4 (1 800)	75	18	
	N	5,2 (750)	75	20 ^D	
	O	2,4 (350)	75	20 ^D	

F. Mortar Geopolimer

Pada penelitian ini, mortar sebagai material perbaikan dikembangkan lebih lanjut dengan menggunakan geopolimer sebagai bahan pengikatnya. Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978. Geopolimer merupakan senyawa anorganik alumino silikat yang disintesis dari bahan-bahan yang banyak mengandung Silikon dan Aluminium melalui proses polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi ini, Aluminium (Al) dan Silika (Si) mempunyai peranan penting dalam ikatan polimerisasi (Davidovits,1994). Proses polimerisasi adalah suatu reaksi kimia antara aluminosilika oksida (Si_2O_5 , Al_2O_2) dengan alkali *polysialate*. Proses polimerisasi menghasilkan suatu rantai dalam bentuk tiga struktur dimensional dimana masing-masing terdiri dari bentuk ikatan-ikatan *polymeric* Si-O-Al-O (*Polysialate*). Ikatan-ikatan tersebut dibagi

dalam tiga jenis yaitu *Polysialate* (Si-O-Al-O), *Polysialate-Siloxo* (Si-O-Al-O-Si-O) dan *Polysialate-Disiloxo* (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O) (lihat Gambar 11) (Sugiri dkk., 2009). Salah satu parameter proses polimerisasi adalah reaktan yang digunakan, yaitu SiO₂, H₂O, dan NaOH. (Fansuri dkk., 2008)



Gambar 11. Ikatan polimerisasi pada geopolimer *fly ash*

Secara umum, ada tiga peggolongan dalam sintesis geopolimer yaitu aluminosilikat sebagai bahan mentah (*raw materia*), kaolin atau metakaolin sebagai filler, geopolimer liquor berupa alkali hidroksida untuk melarutkan alumina dan silika, serta natrium atau kalium silikat sebagai *binder/alkali activator/plasticizer*. Penambahan *filler* berupa kaolin atau metakaolin dilakukan bila laju pelarutan Al pada *raw material* tidak cukup untuk menghasilkan gel dengan komposisi yang diinginkan. (Komnitsas & Zaharaki, 2007)

Dalam konteks pengembangan proses berwawasan lingkungan, keunggulan geopolimer tidak hanya bertumpu pada konsumsi energi yang lebih rendah daripada OPC, tetapi juga pada fleksibilitas bahan baku yang

sangat tinggi. Proses sintesis geopolimer praktis dapat memanfaatkan padatan aluminosilikat apapun, dari mineral alami, bahan sintetik, hingga limbah anorganik. Xu & van Deventer (2003) menggolongkan bahan-bahan baku aluminosilikat ini sebagai: (1) bahan-bahan terkalsinasi, misalnya metakaolin, abu layang, ampas peleburan logam (*slag*), dan sebagainya, serta (2) bahan-bahan tak terkalsinasi seperti mineral-mineral kaolinit, feldspar, limbah pengolahan bijih tambang (*tailing*), dan lain-lain.

Geopolimer dapat dikatakan ramah lingkungan karena menggunakan bahan-bahan yang berasal dari limbah industri dan proses pembuatannya tidak memerlukan energi yang banyak, tidak seperti semen yang pembuatannya memerlukan proses pembakaran hingga suhu 800°C. Geopolimer yang berfungsi sebagai binder dapat dibagi menjadi empat yaitu: (Davidovits, 2013)

1. Semen geopolimer berbahan dasar *slag*
2. Semen geopolimer berbahan dasar *rock*
3. Semen geopolimer berbahan dasar *fly ash*
4. Semen geopolimer berbahan dasar *ferro-sialate*

Bahan dasar untuk pembuatan material geopolimer adalah bahan-bahan yang mengandung banyak unsur-unsur *silicon* (Si) dan aluminium (Al) (Hardjito, 2002). Salah satu bahan yang mengandung banyak unsur tersebut adalah *fly ash* yang merupakan abu sisa hasil pembakaran batu bara. *Fly ash* memiliki ukuran butiran yang hampir sama dengan semen sehingga *fly ash* dipilih sebagai bahan pengganti semen.

Dalam penggunaannya sebagai material perbaikan, mortar geopolimer mempunyai beberapa kelebihan diantaranya tahan terhadap serangan asam sulfat, mempunyai rangkai dan susut yang kecil, tahan terhadap reaksi alkali-silika, tahan terhadap api, dan dapat mengurangi polusi udara. Namun selain mempunyai banyak kelebihan, mortar geopolimer juga mempunyai kekurangan yaitu pembuatannya sedikit lebih rumit dibandingkan beton konvensional karena jumlah material yang digunakan lebih banyak daripada beton konvensional, serta belum ada perhitungan *mix design* yang pasti. (Andoyo, 2006)

G. Material Penyusun Mortar Geopolimer

Material penyusun mortar geopolimer yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash*, aktivator berupa Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3), *superplasticizer*, dan boraks.

G.1. Fly Ash

Menurut SNI 03-6414-2002, *Fly ash* adalah limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap berbentuk halus, bundar, dan bersifat pozolanik. *Fly ash* tergolong dalam limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun). Komposisi utama dari *fly ash* terdiri dari dari senyawa *silicate glass* yang mengandung silika (Si), Alumina (Al), Ferrum (Fe) dan Kalsium (Ca), juga terdapat magnesium (Mg), potassium (P), sodium (Na), sulfur (S), dan karbon(C) dalam jumlah yang sedikit.

Fly ash tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen. Tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus oksida silika yang dikandung oleh *fly ash* akan bereaksi secara kimia dengan sodium hidroksida dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat. (Hardjito, 2001). Selain itu secara mekanik, butiran *fly ash* yang lebih halus daripada butiran semen ini akan mengisi ruang kosong (rongga) di antara butiran-butiran agregat halus.

Fly ash memiliki sifat pozzolan dengan kandungan silikat dan aluminat yang tinggi sehingga dapat bereaksi dengan air dan kapur padam serta dapat berubah menjadi massa padat yang tidak larut dalam air. (Tjokrodimulyo, 1996). *Fly ash* juga merupakan material ramah lingkungan karena merupakan hasil limbah industri dan tidak menghasilkan gas CO₂ yang dapat merusak atmosfer seperti halnya semen. Oleh karena itu, *fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti pemakaian semen, baik untuk adukan mortar maupun untuk campuran beton. Adapun kekurangan dari *fly ash* yaitu bersifat getas sehingga perlu penambahan serat untuk meningkatkan daktilitas dan kapasitas struktur dalam memikul beban.

Klasifikasi *fly ash* menurut ASTM C618-93 yaitu:

a. Kelas C

Fly ash yang mengandung CaO > 10 %, dihasilkan dari pembakaran batubara *lignite* atau sub bitumen. *Fly ash* tipe ini memiliki kadar (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) > 50 %.

b. Kelas F

Fly ash yang mengandung $\text{CaO} < 10 \%$, dihasilkan dari pembakaran batubara *anthracite* atau bitumen. *Fly ash* tipe ini memiliki kadar $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70 \%$.

c. Kelas N

Pozzolan alam / pozzolan yang telah dikalsinasi atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain tanah *diatomic*, *opaline chert* dan *shales, tuff* dan abu vulkanik, dapat diproses melalui pembakaran atau tidak. Selain itu juga berbagai hasil pembakaran yang mempunyai sifat pozzolan yang baik.

Unsur utama dalam proses geopolimerisasi adalah Si dan Al. Oleh karena itu *fly ash* yang bisa digunakan sebagai campuran mortar geopolimer adalah *fly ash* yang memiliki kandungan CaO rendah serta kandungan Si dan Al lebih dari 50 %. Dari ketiga tipe *fly ash* di atas, yang memenuhi persyaratan tersebut adalah *fly ash* tipe C dan tipe F. *Fly ash* yang digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash* tipe C yang berasal dari PLTU Bosowa Jeneponto, Sulawesi Selatan.

G.2. Aktivator

Aktivator digunakan untuk mengaktifkan *fly ash* agar mempunyai sifat mengikat. Aktivator yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3).

1. Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium Hidroksida atau biasa dikenal dengan soda api berfungsi sebagai aktivator dalam reaksi polimerisasi, bersifat basa kuat sebagai reaktan alkalin. Natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Natrium hidroksida yang dijual di pasaran berbentuk serbuk dengan kandungan natrium hidroksida 98%, maka dari itu perlu dijadikan larutan. Natrium hidroksida sangat larut dalam air dan akan melepaskan panas ketika dilarutkan karena pada proses pelarutannya dalam air bereaksi secara eksotermis. Larutan natrium hidroksida dalam penelitian ini akan menggunakan molaritas 8M berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Ekaputri dkk (2013). Larutan ini harus dibuat dan didiamkan setidaknya selama 24 jam sebelum pemakaian. (Hardjito,2004)

2. Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

Natrium silikat merupakan salah satu bahan tertua dan paling aman yang sering digunakan dalam industri kimia. Natrium Silikat atau *water glass* berperan sebagai katalisator untuk mempercepat reaksi polimerisasi yang terjadi pada *fly ash*. Campuran *fly ash* dengan natrium silikat jika diamati dalam ukuran mikroskopis, terlihat bahwa campuran *fly ash* dan natrium silikat membentuk ikatan yang sangat kuat namun terjadi banyak retakan (Andoyo,2006). Natrium silikat tersedia dalam 2 bentuk, yaitu padatan dan larutan dimana untuk campuran beton lebih banyak

digunakan dengan bentuk larutan. Natrium silikat pada mulanya digunakan sebagai campuran dalam pembuatan sabun. Tetapi dalam perkembangannya, Natrium silikat dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan, antara lain untuk bahan campuran semen, pengikat keramik, *coating*, campuran cat serta dalam beberapa keperluan industri, seperti kertas, tekstil dan serat. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa Natrium silikat dapat digunakan untuk bahan campuran dalam beton. (Hartono & Sutanto, 2005 (dalam Andoyo, 2006))

G.4. Superplasticizer

Superplasticizer (high range water admixtures) adalah bahan tambah (admixture) yang dapat meningkatkan kelecakan (*workability*) dari campuran. *Superplasticizer* terutama digunakan pada beton mutu tinggi karena dapat mengurangi air sampai 30%. *Superplasticizer* dapat menghasilkan beton yang mengalir tanpa terjadi pemisahan (segregasi/bleeding) yang umumnya terjadi pada beton dengan jumlah air yang besar sehingga berguna untuk percetakan beton di tempat-tempat yang sulit seperti tempat pada penulangan yang rapat. Jenis-jenis *superplasticizer* yang biasa digunakan adalah *superplasticizer naphthalene*, *superplasticizer polycarboxylate*, dan *superplasticizer sodium glukonat*. *Superplasticizer naphthalene* cocok untuk cuaca panas, memiliki nilai slump yang baik, bisa digunakan untuk *ready mix* atau pekerjaan dengan jangka waktu panjang. *Superplasticizer sodium glukonat* memiliki kemampuan untuk mengurangi kadar air pada beton biasa, memperlambat

setting time beton dan meningkatkan *workability*. *Superplasticizer polycarboxylate* (PCE) adalah *superplasticizer* yang paling efektif. PCE mampu 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. *Superplasticizer* yang digunakan dalam penelitian adalah *Superplasticizer polycarboxylate (Plastiment Vz)*.

G.5. Boraks

Boraks merupakan senyawa yang bisa digunakan sebagai salah satu aktivator atau senyawa tambahan dalam pembuatan mortar geopolimer. Boraks yang digunakan memiliki senyawa kimia *Sodium Tetraborate Pentahydrate* ($(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$). Boraks merupakan senyawa yang berbentuk kristal lunak yang apabila dilarutkan dalam air akan terurai menjadi natrium hidroksida dan asam borat. Perbandingan dari campuran boraks terhadap alkali aktivator lainnya memberi pengaruh terhadap kekuatan mortar geopolimer yang dihasilkan. Boraks juga bisa digunakan untuk memperlambat *setting time* pada sebuah mortar geopolimer. (Mackenzie et al., 2005)

H. Serat PVA

PVA (*Polyvinyl Alcohol*) merupakan salah satu polimer yang larut dalam air dan memiliki kemampuan membentuk serat yang baik,

biokompatibel, memiliki ketahanan kimia, dan *biodegradable*. Pada penelitian (Shalumon, 2010), PVA dapat berinteraksi dengan natrium alginat melalui metode *electrospinning* membentuk komposit. Selain itu juga diketahui bahwa PVA dapat membentuk gel dengan berbagai pelarut. Pemanfaatan polimer hidrofilik seperti *Polyvinyl Alcohol* (PVA) dan *Polyvinyl Pirrolidon* (PVP) sebagai bahan biomaterial menarik perhatian dikarenakan bersifat nonkarsinogenik dan memiliki biokompatibilitas yang tinggi. Tabel 4 menunjukkan karakter fisik dari PVA. (Ogur, 2005)

Tabel 4. Karakter Fisik PVA

Karakter	Nilai
Densitas	1.19-1.31 g/cm ³
Titik leleh	180-240°C
Titik didih	228°C
Suhu penguraian	180°C

Adapun Serat *Polyvinyl Alcohol* (PVA) atau PVA fiber adalah jenis serat sintetis, yang terbuat dari bahan yang berkualitas tinggi. Serat PVA memiliki tingkat polimerisasi yang tinggi dan diproses khusus dengan teknologi canggih. Serat PVA juga memiliki kuat tarik yang tinggi, modulus tinggi, elongasi rendah, ketahanan terhadap aus, asam, dan alkali, tahan cuaca yang baik, tidak beracun, tidak menimbulkan polusi dan tidak merusak kulit manusia, serta tidak berbahaya bagi tubuh manusia. Tujuan utama penambahan serat PVA pada mortar geopolimer adalah untuk

mengurangi panjang dan lebar retak yang terjadi sehingga dapat meningkatkan daktilitas struktur.

Lebih lanjut, studi tentang pemanfaatan serat pada beton semakin banyak dilakukan untuk meningkatkan kekuatan lentur beton (Ekaputri, 2016a). Dalam beton geopolimer, serat *polyvinyl alcohol* (PVA) diketahui memberikan efek kuat tarik dan kuat belah yang meningkat dibandingkan dengan pengaruh suhu perawatan (Ekaputri, 2016b). Dengan demikian, pengaruh serat jelas akan memberikan kontribusi pada peningkatan lekatan antara tulangan dengan matriks geopolimer.