

TUGAS AKHIR

**STUDI PERILAKU PERKUATAN BALOK BETON
BERTULANG DENGAN MORTAR GEOPOLIMER DAN
MATERIAL GROUTING**

***BEHAVIOR STUDY OF REINFORCED CONCRETE
STRENGTHENING WITH GEOPOLIMARY MORTAR AND
GROUTING MATERIAL***

**MUHAMMAD NURHIDAYAT HAKRAH
D011 17 1333**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

STUDI PERILAKU PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN MORTAR GEOPOLIMER DAN MATERIAL GROUTING

Disusun dan diajukan oleh:

MUHAMMAD NURHIDAYAT HAKRAH

D011 17 1333

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 26 Januari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Eng. Hi. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP: 197206192000122001



Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng
NIP: 19870228201931005

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196803292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

iii

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Muhammad Nurhidayat Hakrah, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Studi Perilaku Perkuatan Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan Mortar Geopolimer Dan Material Grouting”**, adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

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

Gowa, 26 Januari 2023

Yang membuat pernyataan,

A 10000 Indonesian postage stamp with a signature over it. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text '10000 METERAI TEMPEL' and 'K1990AK X1975S1011'.

Muhammad Nurhidayat Hakrah

NIM: D011 17 1333

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadiran Allah Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Perilaku Perkuatan Balok Beton Bertulang Dengan Mortar Geopolimer Dan Material Grouting**” 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 **Hakrah Halide, S.E.** dan ibunda **Rosnawati Razak** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan selama ini, baik spiritual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.

2. **Andrew, Dira, Naen, Alief, Dede, Fathur**, selaku partner dalam penelitian ini, yang selalu membantu dan memberikan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Rekayasa dan 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 Departemen 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 Allah Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 27 Januari 2023

Penulis

ABSTRAK

Struktur beton pada bangunan umumnya akan mengalami kerusakan atau penurunan kualitas, hal ini dapat diakibatkan oleh kerusakan pada balok beton bertulang yang retak, berlubang, dan *spalling* yang dapat menyebabkan kerusakan struktur secara keseluruhan. Permasalahan ini dapat diatasi dengan melakukan perbaikan dan perkuatan struktur pada balok. Umumnya, teknologi grouting paling sering digunakan dalam metode perbaikan dan perkuatan. Grouting menggunakan mortar dalam perbaikan dan perkuatan yang umum digunakan. Namun, mortar grouting masih menggunakan semen sebagai bahan utama yang mana seperti kita ketahui bahwa efek industri dari produksi semen menghasilkan gas CO₂ yang dikenal sebagai emisi gas rumah kaca. Untuk itu, diperlukan bahan alternatif pengganti semen pada material utama penyusun mortar. Mortar geopolimer yang menggunakan *fly ash* yang berasal dari limbah pembakaran batu bara pada PLTU sebagai pengganti semen adalah salah satu inovasi alternatif yang menjadi salah satu solusi dalam meminimalkan penggunaan semen karena merupakan material ramah lingkungan, memiliki kadar silika tinggi, dan bersifat *pozzolonic*. Akan tetapi, material ini memiliki sifat getas (*brittle*) yang sama seperti mortar grouting dibandingkan pada beton biasa.

Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku lentur serta pola retak dan mode kegagalan pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan mortar grouting. Metode yang digunakan bersifat eksperimental dengan variasi benda uji beton normal sebagai balok kontrol (CB), beton dengan perkuatan mortar geopolimer (GP), dan beton dengan perkuatan mortar grouting (GR). Hasil pengujian menunjukkan bahwa perkuatan balok dengan mortar grouting meningkatkan kapasitas balok dalam memikul beban lebih besar dibandingkan mortar geopolimer. Berdasarkan pola retak yang terjadi, kedua material memberikan efek retak yang lebih banyak dibandingkan beton normal, hal ini disebabkan karena sifatnya yang getas. Serta ditinjau dari mode kegagalan, balok dengan perkuatan mortar geopolimer mengalami delaminasi dan balok dengan perkuatan mortar grouting mengalami kegagalan tekan yang ditandai dengan hancurnya sisi tekan pada balok.

Kata Kunci: balok beton, mortar geopolimer, mortar grouting

ABSTRACT

Concrete structures in buildings will generally experience damage or decrease in quality, this can be caused by damage to reinforced concrete beams which are cracked, perforated, and spalled which can cause damage to the structure as a whole. Generally, grouting technology is most often used in repair and reinforcement methods. However, mortar grouting still uses cement as the main ingredient where cement production produces CO₂ gas which is known as a greenhouse gas emission. Geopolymer mortar that uses fly ash from coal combustion waste at PLTU as a substitute for cement is one of the alternative innovations. This study aims to analyze the flexural behavior as well as crack patterns and failure modes of reinforced concrete beams reinforced with geopolymer mortar and grouting mortar. The method used is experimental with variations of normal concrete specimens as control beams (CB), concrete with geopolymer mortar reinforcement (GP), and concrete with grouting mortar reinforcement (GR). The test results show that strengthening beams with mortar grouting increases the capacity of beams in carrying loads greater than geopolymer mortar. Based on the pattern of cracks that occur, the two materials give more cracking effects than normal concrete, this is due to their brittle nature. As well as in terms of failure mode, beams with reinforced geopolymer mortar experience delamination and beams with reinforced mortar grout experience compression failure which is characterized by the destruction of the compressive side of the beam.

Keywords: concrete beams, geopolymer mortar, mortar grouting

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	2
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	3
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian	4
E. Batasan Masalah.....	5
F. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
A. Penelitian Terdahulu.....	7
B. Kekuatan Lentur Balok Beton bertulang	9
C. Kegagalan Pada Balok Beton Bertulang	12
D. Metode Perbaikan dan Perkuatan	14
E. Mortar	17
F. Mortar Geopolimer.....	19
G. Mortar Grouting	21

BAB 3. METODE PENELITIAN.....	22
A. Alir Penelitian.....	22
B. Lokasi dan Waktu Penelitian	23
C. Alat dan Bahan Penelitian	23
C.1. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dan mortar grouting ...	23
C.2. Pengujian Karakteristik Mekanis Tulangan	24
C.3. Pengujian Karakteristik Mekanis Beton.....	25
C.4. Pengujian Lentur Balok.....	25
C.5. Bahan	28
D. Benda Uji	28
D.1. Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer dan Mortar Grouting	28
D.2. Pengujian Lentur Balok.....	29
E. Tahapan Penelitian	31
E.1. Pembuatan Mortar Geopolimer dan Mortar Grouting	31
E.2. Pembuatan Balok Beton Bertulang	33
E.3. Setup Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang	35
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	38
A. Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer dan Mortar Grouting	38
B. Pengujian Karakteristik Mekanis Beton	39
C. Pengujian Karakteristik Mekanis Tulangan	42
D. Pengujian Lentur Balok	43
D.1 Hubungan Beban-Lendutan.....	43
D.2 Beban Maksimum	45
D.3 Hubungan Beban-Regangan Beton.....	46
D.4 Hubungan Beban-Regangan Baja	47

E. Pola Retak dan Mode Kegagalan.....	48
E.1. Balok CB (Beton Normal).....	49
E.2. Balok GP (Beton Perkuatan Geopolimer)	51
E.3. Balok GR (Beton Perkuatan Grouting)	56
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
A. Kesimpulan.....	59
B. Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Proses perbaikan mortar geopolimer pada balok.....	7
Gambar 2. Pengujian lentur dan pola retak pada balok	8
Gambar 3. Pola retak yang terjadi pada benda uji	9
Gambar 4. Perilaku Lentur Pada Beban Ultimit	11
Gambar 5. Bagan Alir Penelitian.....	23
Gambar 6. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM).....	25
Gambar 7. LVDT	26
Gambar 8. (a) <i>strain gauge</i> baja (b) <i>CN Adhesive</i>	26
Gambar 9. (a) <i>strain gauge</i> beton (b) <i>CN-E Adhesive</i>	27
Gambar 10. (a) <i>Load Cell</i> 200 kN (b) <i>Data Logger</i> TDS 530	28
Gambar 11. Dimensi Benda Uji.....	30
Gambar 12. Material Geopolimer	31
Gambar 13. Pencampuran Material	32
Gambar 14. Menimbang Material Grouting.....	32
Gambar 15. Cetakan Benda Uji	33
Gambar 16. Pabrikasi Benda Uji Beton Normal	34
Gambar 17. Proses Penambahan Material Perbaikan dan Perkuatan.....	35
Gambar 18. (I) <i>Strain Gauge</i> , (II) <i>Set-up</i> Pengujian.....	37
Gambar 19. Penimbangan Benda Uji	38
Gambar 20. Pengujian Kuat Tekan.....	38
Gambar 21. Pengujian Karakteristik Mekanis Beton.....	40
Gambar 22. Hubungan Beban-Lendutan	43
Gambar 23. Beban Maksimum	45
Gambar 24. Hubungan Beban-Regangan Beton	46
Gambar 25. Hubungan Beban-Regangan Baja	47
Gambar 26. Pola Retak Pasca Pengujian.....	49
Gambar 27. Retak Awal Balok CB.....	49
Gambar 28. Kegagalan Pada Balok CB.....	50
Gambar 29. Pengukuran Lebar Retak	51

Gambar 30. <i>Micro-crack</i> pada sambungan.....	53
Error! Bookmark not defined.	
Gambar 31. Retak Awal Balok GP	54
Gambar 32. Pola Retak dan Kehancuran Pada Sisi Tekan Beton GP.....	55
Gambar 33. Pengukuran Lebar Retak Balok GP	55
Gambar 34. Delaminasi Antara Beton Normal dan Mortar Geopolimer ...	56
Gambar 35. Retak Awal Balok GR.....	56
Gambar 36. Pola Retak Balok GR	57
Gambar 37. Kegagalan Pada Sisi Tekan Balok GR.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi Mortar Geopolimer per m ³	29
Tabel 2. Komposisi Mortar Grouting per m ³	29
Tabel 3. Variasi Benda Uji	29
Tabel 4. Komposisi Beton Normal per m ³	30
Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan	39
Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	40
Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	41
Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton	41
Tabel 9. Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan Baja.....	42
Tabel 10. Rekapitulasi Hasil Pengujian.....	44

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan pesat pada dunia konstruksi menuntut penggunaan semen yang semakin tinggi setiap waktunya sebagai bahan utama dalam pembuatan beton. Seperti yang telah diketahui, beton telah menjadi bahan konstruksi populer di seluruh dunia untuk 180 tahun terakhir atau lebih. Angka pertumbuhan penduduk yang semakin tinggi menjadikan kebutuhan akan sarana dan fasilitas menjadi semakin tinggi. Hal ini pun sejalan dengan kebutuhan beton menjadi semakin tinggi karena bahan baku pembuatnya yang relatif sederhana dan mudah ditemukan. Beton bertulang merupakan salah satu konstruksi yang paling umum digunakan. Konstruksi ini mempunyai beberapa kelebihan yaitu memiliki durabilitas yang tinggi, kokoh, biaya pemeliharaan yang rendah dan dapat dibuat dalam banyak bentuk dengan beragam fungsi dan kegunaan seperti bentuk balok, bentuk pelat, bentuk kolom, dan lain-lain.

Balok merupakan salah satu konstruksi beton bertulang yang paling sering digunakan yang mampu memikul beban yang diberikan sesuai dengan kapasitas penampangannya. Struktur balok terdiri dari perpaduan antara beton dan baja tulangan, dimana beton kuat terhadap gaya tekan dan lemah terhadap gaya tarik. Beton terdiri dari campuran pasir, kerikil atau batuan pecah, semen dan air. Bahan lain juga dapat ditambahkan pada campuran beton untuk meningkatkan *workability*, *durability*, dan waktu pengerasan.

Proses pemakaian konstruksi seiring dengan waktu atau perkiraan umur rencana konstruksi akan mengalami kerusakan akibat beberapa faktor antara lain pengaruh lingkungan yang disebabkan karena cuaca dan suhu, salah dalam perencanaan, adanya perubahan fungsi bangunan dari rencana semula (disain) dan akibat beban yang berlebihan dari kapasitas yang direncanakan, serta akibat beban sementara seperti gempa. Maka akibat pengaruh diatas struktur bangunan akan mengalami kerusakan berupa terjadi retak-retak, untuk itu perlu dilakukan perbaikan konstruksi dengan jalan memberikan perkuatan pada struktur konstruksi. Dengan teknologi yang ada saat ini perbaikan dapat dilakukan dengan cara memberikan perkuatan ataupun penambahan bahan-bahan material tertentu pada konstruksi yang mengalami kerusakan dan diharapkan kekuatan akan bertambah atau minimal sama dengan kekuatan semula dari struktur tersebut.

Dengan makin banyaknya struktur bangunan yang mengalami kerusakan pada saat masa gunanya ataupun pada saat proses konstruksi, maka diperlukan pengetahuan mengenai teknologi perbaikan dan perkuatan yang tepat guna. Bentuk kemajuan teknologi saat ini dalam metode perbaikan dan perkuatan struktur adalah dengan teknologi Mortar. Pada umumnya mortar yang sering digunakan dalam metode perbaikan adalah mortar grouting karena sifatnya yang mirip beton. Mortar grouting menggunakan semen mutu tinggi sebagai bahan utama dalam pembuatannya yang tidak bersifat korosif dan tidak susut. Akan tetapi

disamping itu, material ini memiliki sifat getas (*brittle*) dibandingkan beton biasa.

Seperti yang kita ketahui bahwa penggunaan semen dalam dunia konstruksi akhir-akhir ini banyak diperbincangkan karena efek industri semen yang menghasilkan gas CO₂ atau yang dikenal emisi gas rumah kaca. Menurut Malhotra, V.M., (2002), produksi satu ton semen membebaskan sekitar satu ton CO₂ ke atmosfer. Untuk itu, diperlukan bahan alternatif pengganti semen pada penyusunan mortar. Salah satu alternatifnya yaitu dengan memanfaatkan ikatan geopolimer. Salah satu geopolimer yaitu terbuat dari bahan utama limbah industri *fly ash* yang kaya dengan unsur Alumina (Al) dan Silika (Si).

Geopolimer adalah bahan yang tidak menggunakan semen sebagai pengikat, tetapi menggunakan bahan yang memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi. Pada geopolimer, *fly ash* yang digunakan berasal dari limbah hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sehingga dapat mengurangi limbah PLTU dimana setiap tahunnya menghasilkan banyak limbah *fly ash*. Hal ini dapat menjadi solusi dalam memanfaatkan limbah serta meminimalkan penggunaan semen karena merupakan material ramah lingkungan dan dapat dimanfaatkan khususnya di dunia konstruksi. Adapun kekurangan dari *fly ash* yaitu bersifat getas sama halnya seperti pada mortar grouting.

Berdasarkan latar belakang di atas, dan untuk membandingkan kedua material perbaikan, maka perlu dilakukan penelitian terkait dengan judul **“STUDI PERILAKU PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN MORTAR GEOPOLIMER DAN MATERIAL GROUTING”**.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan material grouting.
2. Bagaimana pola retak dan mode keruntuhan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan material grouting.

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan material grouting.
2. Menganalisis pola retak dan mode keruntuhan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan material grouting.

D. Manfaat Penelitian

Diharapkan melalui penelitian ini dapat memberi manfaat berupa :

1. Dapat menjadi referensi untuk pemanfaatan *fly ash* dari limbah hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).
2. Menjadi perbandingan untuk metode perbaikan antara mortar geopolimer dan material grouting.

E. Batasan Masalah

1. Percobaan dilakukan dengan benda uji balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer dan material grouting.
2. Mortar geopolimer dibuat dengan campuran *fly ash*, pasir, NaOH, Na₂SiO₃, *superplasticizer*, dan boraks. *Fly Ash* berasal dari PLTU Bosowa, Jeneponto, Sulawesi Selatan, Indonesia.
3. Material grouting menggunakan mortar grouting komersil dari campuran air dan semen grout.
4. Terdiri dari 6 benda uji yang terdiri dari; 2 balok beton normal (CB-1), 2 balok beton yang diperkuat dengan mortar geopolimer sepanjang 2700 mm (GP-2700), 2 balok beton yang diperkuat dengan mortar grouting sepanjang 2700 mm (GR-2700).
5. Pengujian beban lentur menggunakan beban statik monotonik dengan kapasitas 1500 kN terhadap benda uji.
6. Pembebanan dilakukan pada benda uji hingga mengalami beban maksimum.

F. Sistematika Penulisan

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi tentang konsep dan teori dasar dari penelitian terdahulu untuk menjadi acuan dalam pemecahan masalah dan pelaksanaan penelitian.

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metode yang digunakan serta langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian yang dituangkan dalam bentuk bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode penelitian serta data penelitian berupa jenis dan sumber data.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dipaparkan hasil-hasil pengujian berupa data penelitian serta perhitungan data yang diperoleh dan selanjutnya dilakukan pembahasan.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini meliputi kesimpulan dari tujuan penelitian dan berisi saran untuk perbaikan pada penelitian ini.

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 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 structural 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 static 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, daktalitas, 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

Huilin Le, Shaorui Sun, dan Jihong Wei (2018) meneliti pengaruh jenis bahan grouting pada kekuatan kompresif dan perilaku retak spesimen mirip batuan dengan perbaikan grout di bawah beban aksial. Spesimen mirip batuan dengan isian grout dengan sudut kemiringan berbeda disiapkan untuk pengujian tekan uniaksial untuk mempelajari pengaruh jenis bahan grouting dan sudut kemiringan kerusakan pada kuat tekan dan pola retak benda uji. Epoxy resin dan pasta semen dipilih sebagai bahan grouting. Sifat mekanis kedua bahan grouting ini sangat berbeda. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa jenis bahan grouting berperan penting dalam meningkatkan kuat tekan uniaksial benda uji dengan perbaikan metode grouting. **Gambar 3** menunjukkan pola retak yang terjadi pada benda uji.



Gambar 3. Pola retak yang terjadi pada benda uji

B. Kekuatan Lentur Balok Beton bertulang

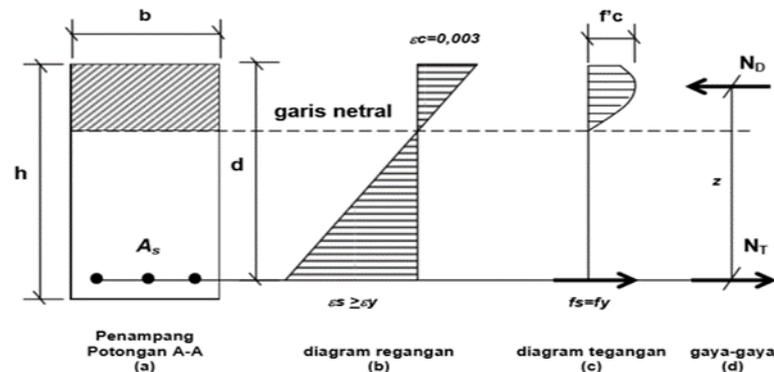
Kuat lentur beton merupakan kemampuan beton untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu memanjang serat ditengah-tengah

balok yang diberi tumpuan pada kedua ujungnya. Pada setiap penampang terdapat gaya-gaya dalam yang apabila diuraikan menjadi komponen yang saling tegak lurus dan menyinggung terhadap penampang tersebut. Komponen-komponen yang tegak lurus terhadap penampang tersebut merupakan tegangan-tegangan lentur (tarik pada salah satu sisi di daerah sumbu netral dan tekan pada sisi penampang lainnya). Fungsi dari komponen ini adalah untuk memikul momen lentur pada penampang.

Kuat lentur balok beton terjadi karena berlangsungnya mekanisme tegangan-regangan yang timbul di dalam balok, pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam. Kuat lentur balok dikenal sebagai modulus runtuh (*modulus of rupture*). Pada suatu kondisi tertentu balok dapat menahan beban yang terjadi hingga regangan tekan lentur beton maksimum $(\epsilon'_c)_{maks}$ mencapai 0.003 sedangkan regangan tarik tulangan mencapai regangan leleh. Jika hal itu terjadi, maka nilai $\epsilon_s = \epsilon_y$ dan penampang disamakan mencapai keseimbangan regangan (penampang bertulangan seimbang). Berdasarkan pada asumsi tersebut dapat dilakukan pengujian regangan, tegangan, dan gaya-gaya yang timbul pada penampang balok yang bekerja menahan momen batas (M_u), yaitu momen yang timbul akibat beban luar yang bekerja pada saat terjadi kehancuran.

Saat diberikan pembebanan, nilai tegangan pada daerah tekan beton akan bersifat linear atau kira-kira sebanding dengan nilai regangannya hingga tingkat pembebanan tertentu. Apabila beban ditambah secara terus-menerus, maka keadaan sebanding tersebut akan lenyap dan

muncul retak pada balok. Retak terjadi ketika nilai pembebanan yang diberikan telah melebihi nilai kuat tarik beton sehingga beton mulai mengalami retak rambut. Pada kondisi ini beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak disebabkan kondisi lebar retak yang menyebabkan terputusnya aliran distribusi tegangan di sepanjang sisi tarik beton. Ketika beban kerap ditambahkan maka nilai tegangan dan regangan akan meningkat dan cenderung tidak sebanding lagi, dimana tegangan tekan pada beton akan mulai membentuk kurva nonlinear.



Gambar 4. Perilaku Lentur Pada Beban Ultimit

Kurva tegangan di atas garis netral penampang balok atau pada daerah tekan balok akan berbentuk seperti Gambar 4 dimana distribusi tegangan berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral. Gambar menunjukkan model distribusi tegangan regangan yang timbul pada saat kondisi pembebanan mendekati beban ultimit. N_D merupakan resultan gaya tekan dalam dan merupakan resultan gaya tekan pada daerah yang berada diatas garis netral. Sedangkan N_T merupakan resultan gaya tarik

dalam dan merupakan seluruh gaya tarik yang direncanakan untuk daerah yang berada di bawah garis netral.

Momen tahanan dalam akan memikul momen lentur secara aktual yang diakibatkan oleh beban luar. Untuk tujuan perencanaan, balok yang dibebani harus disusun sesuai dengan dimensi balok dan jumlah luasan tulangan yang dapat menahan momen akibat beban luar. Pertama harus diketahui terlebih dahulu resultan total gaya beton tekan ND dan letak garis kerja dihitung terhadap serat tepi tekan terluar, sehingga jarak z dapat dihitung. Nilai ND dan NT dihitung dengan menyederhanakan bentuk distribusi tegangan lengkung menjadi bentuk ekuivalen yang lebih sederhana dengan memanfaatkan nilai intensitas tegangan rata-rata agar nilai dan letak resultan tidak berubah.

C. 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 (Navy, Edward G., 2010).

1. Kondisi *Balanced Reinforced*

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

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.

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.

D. Susut Pada Beton Bertulang

Adapun pada saat beton mulai mengeras, beton tersebut akan mengalami susut (*shrinkage*). Susut pada beton dapat disebabkan karena proses evaporasi, serta disebabkan oleh karbonasi (reaksi antara CO₂ yang ada di atmosfer dan yang ada pada pasta semen). Macam-macam susut yang terjadi pada beton adalah :

1. Susut Plastis (*plastis shrinkage*)

Susut plastic adalah perubahan volume akibat berkurangnya air dalam beton segar pada proses hidrasi. Berkurangnya air tersebut diakibatkan adanya penguapan air dari permukaan beton (evaporasi) dan penyerapan air (absorpsi) oleh cetakan beton.

2. *Drying shrinkage*

Drying shrinkage dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain jenis kehalusan semen, jumlah dan modulus elastisitas agregat, kelembaban udara, faktor air semen, ukuran dan bentuk beton, serta campuran bahan kimia.

3. Susut Karbonasi (*carbonation shrinkage*)

Susut karbonasi adalah reaksi kimia antara CO₂ dengan hasil hidrasi semen, dimana gas CO₂ berasal dari udara sekitar. Pada daerah lembab gas CO₂ membentuk asam karbonat yang akan bereaksi dengan Ca(OH)₂ dan membentuk CaCO₃, sedangkan komponen semen yang lain akan terurai. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya susut dari proses karbonasi tersebut.

4. *Autogenous Shrinkage*.

Autogenous shrinkage adalah penyusutan yang disebabkan oleh berkurangnya air pori karena dikonsumsi oleh semen untuk proses hidrasi sehingga menyebabkan naiknya tegangan pori. Pada awal pengerasan, Sebagian besar pori-pori kapiler dan partikel agregat dalam keadaan jenuh, Ketika proses hidrasi berlanjut, air yang dibutuhkan untuk proses hidrasi ini tersedia cukup dengan adanya external curing, namun bila beton tertutup rapat dan tidak mendapatkan external curing, maka semen mengonsumsi air pori yang ada dalam beton untuk proses hidrasi tersebut.

A. Metode Perbaikan dan Perkuatan

Perkuatan struktur beton bertulang biasanya dilakukan ketika terjadi degradasi kekuatan material beton maupun baja tulangan akibat faktor usia bangunan dan pengaruh lingkungan. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan timbulnya retak pada material beton dan korosi pada baja

tulangan. Adanya perubahan fungsi bangunan atau perubahan tata cara dalam perancangan elemen-elemen struktur juga menjadi salah satu faktor sehingga diperlukan adanya perkuatan struktur.

Perbaikan dan perkuatan struktur pada umumnya bertujuan untuk meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan desain rencana. Tetapi terdapat perbedaan konsep diantara keduanya dimana perbaikan dilakukan untuk mengembalikan fungsi dan kinerja struktur seperti semula sementara perkuatan dilakukan untuk meningkatkan kestabilan struktur yang telah ada.

Pemilihan material dan penentuan metode perbaikan dan perkuatan didasarkan pada jenis kerusakan yang terjadi, besar dan luasnya kerusakan, faktor lingkungan, ketersediaan peralatan, waktu pelaksanaan, dan biaya yang dibutuhkan. Berikut merupakan beberapa metode perbaikan dalam menangani kerusakan yang umum terjadi pada beton :

1. Injeksi

Perbaikan injeksi dilakukan pada kerusakan akibat retak, dimana retak dibedakan menjadi dua yaitu retak struktur dan non-struktur. Untuk retak non-struktur digunakan metode injeksi dengan material pasta semen yang dicampur dengan *expanding agent* atau hanya melakukan *sealing* dengan material mortar polymer. Sedangkan untuk retak struktur digunakan metode injeksi dengan material epoxy yang memiliki viskositas rendah sehingga dapat mengisi sekaligus melekatkan kembali bagian beton yang terpisah.

2. Grouting

Perbaikan grouting adalah metode perbaikan dengan melakukan pengecoran memakai bahan *non-shrink* mortar. Metode ini dapat dilakukan secara manual atau menggunakan pompa dengan persyaratan material harus memiliki sifat mengalir dan tidak susut.

3. *Shotcrete*

Perbaikan *shotcrete* adalah menembakkan mortar dengan tekanan pada lubang atau permukaan beton yang memerlukan perbaikan. Metode ini dilakukan dengan memompa material yang telah dicampur melalui pipa kemudian mortar yang masih kering ditembak/dipompa dan akan tercampur dengan air di ujung saluran.

Beberapa metode perkuatan yang umum dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Concrete Jacketing*

Concrete Jacketing adalah suatu metode perkuatan dengan cara menyelimuti beton yang telah ada dengan beton tambahan. Dalam melakukan perkuatan dengan *concrete jacketing* biasanya digunakan bahan *micro concrete* yang memiliki sifat dapat memadat tanpa bantuan vibrator (*self compaction*). Teknik perkuatan ini digunakan pada kolom dengan tujuan untuk memperbesar penampang kolom sehingga kekuatan geser beton menjadi meningkat.

2. *Steel Jacketing*

Steel Jacketing adalah metode perkuatan kolom persegi beton bertulang. *Steel jacketing* terdiri dari empat sudut baja longitudinal yang ditempatkan di setiap sudut kolom. Sudut longitudinal ini terhubung bersama menjadi sebuah kerangka yang dihubungkan dengan strap baja transversal.

3. *Fiber Reinforced Polymer*

Perkuatan pada balok dilakukan dengan menggunakan *fiber carbon*. Metode perkuatan menggunakan FRP dilakukan dengan cara menempelkan pada permukaan beton dengan menggunakan perekat epoxy. FRP merupakan bahan yang ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi.

B. 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 aluminos semen, dengan membandingkan volume satu aluminos semen dan bubuk bata api. Mortar ini biasa dipakai untuk tungku api dan sebagainya.

C. Mortar Geopolimer

Geopolimer merupakan senyawa anorganik alumino silikat yang disintesis dari bahan-bahan yang banyak mengandung Silikon dan Aluminium melalui proses polimerisasi. Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978. Proses polimerisasi adalah suatu reaksi kimia antara aluminosilika oksida (Si_2O_5 , Al_2O_2) dengan alkali

polysialate. Dalam reaksi polimerisasi ini, Aluminium (Al) dan Silika (Si) mempunyai peranan penting dalam ikatan polimerisasi (Davidovits, 1994).

Geopolimer adalah bahan yang ramah lingkungan yang menjadi inovasi dalam pengembangan mortar pada zaman ini. 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. Bahan dasar pembuatan material geopolimer adalah bahan-bahan yang mengandung unsur-unsur *silicon* (Si) dan aluminium (Al) (Hardjito, 2002). Salah satu bahan yang mengandung banyak unsur tersebut dan paling umum digunakan dalam pembuatan mortar geopolimer adalah *fly ash* yang merupakan abu sisa hasil pembakaran batu bara. *Fly ash* memiliki ukuran butiran yang hampir sama dengan semen sehingga 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).

D. Mortar Grouting

Grouting adalah slurry semen yang diinjeksikan ke dalam retak-retak, pipa-pipa, dan lubang-lubang lainnya. Atau di samping bangunan beton sebagai pelindung yang tak tembus air. Dapat dipakai pasir bila volumenya besar. admixture mineral, seperti abu terbang dan bentonite, sering dipakai untuk menambah kecairan. Admixture kimiawi ditambahkan untuk mengurangi kadar air, menambah daya lekat dan mengendalikan waktu pengikatan. Admixture juga bisa ditambahkan untuk melawan susut.

Mortar grouting adalah bahan pengisi yang digunakan untuk perbaikan suatu komponen struktur. Sika Grout 215 merupakan salah satu produsen bahan bangunan dan produk kimia yang sering digunakan dalam suatu proyek konstruksi. Dalam pengerjaan grouting tentunya dibutuhkan semen grouting yang siap pakai dan mempunyai karakteristik tidak susut, dapat mengalir dengan baik serta memenuhi persyaratan standar *corps of engineering* CDR C-621 dan ASTM C-1107 yang keseluruhannya terdapat pada Sika Grout 215. Sika Grout 215 berfungsi sebagai komponen semen grouting untuk memperbaiki beton yang keropos dan juga untuk pengisi celah dan rongga, serta dapat diaplikasikan pada stuktur kelautan.