



SKRIPSI

PENGUJIAN *NON-DESTRUCTIVE* DAN KUAT LENTUR PADA BETON YANG MENGANDUNG *FLY-ASH* DAN *BOTTOM-ASH*

Disusun dan diajukan oleh:

MUHAMMAD RAIHAN HASAN
D011 20 1032



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PENGUJIAN *NON-DESTRUCTIVE* DAN KUAT LENTUR PADA BETON YANG MENGANDUNG *FLY-ASH* DAN *BOTTOM-ASH*

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD RAIHAN HASAN
D011 20 1032

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 15 Agustus 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



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

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002

Ketua Program Studi,



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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muhammad Raihan Hasan
NIM : D011201032
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{PENGUJIAN *NON-DESTRUCTIVE* DAN KUAT LENTUR PADA BETON
YANG MENGANDUNG *FLY-ASH* DAN *BOTTOM-ASH*}

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

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

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

- Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, Mei 2024

Yang menyatakan



Muhammad Raihan Hasan

NIM: D011 20 1032



ABSTRAK

MUHAMMAD RAIHAN HASAN. *Pengujian Non-Destructive dan Kuat Lentur pada Beton yang Mengandung Fly-Ash dan Bottom-Ash* (dibimbing oleh Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.T. dan Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T.)

Penggunaan semen yang masif dalam dunia konstruksi turut menjadi penyumbang emisi CO₂ pemicu semakin meningkatnya efek rumah kaca, bersamaan dengan itu limbah batu bara berupa FABA sangat melimpah jumlahnya dan berujung mencemari lingkungan bila tak dikelola dengan tepat.

Bertujuan untuk mengetahui bagaimana kualitas beton sebelum dan setelah menggunakan FABA sebagai substitusi semen serta pengaruhnya terhadap *ultrasonic pulse velocity* dan kuat lentur beton.

Penelitian ini menggunakan benda uji berupa beton berukuran 400x100x100 mm³ sebanyak 9 buah yang terbagi menjadi tiga variasi yang masing-masing variasi terdiri atas tiga benda uji. Tiga variasi tersebut yaitu beton normal tanpa kandungan FABA sebagai *control*, beton dengan kandungan FABA terhadap total *binder* berupa *fly ash* 15 wt% dan *bottom ash* 50 wt% yang selanjutnya disebut FA15BA50, dan beton dengan kandungan FABA terhadap total *binder* berupa *fly ash* 30 wt% dan *bottom ash* 50 wt% yang selanjutnya disebut FA30BA50. Menggunakan metode *direct* yang dilakukan pada empat titik tiap sampelnya yang di masing-masing titiknya dilakukan tiga kali pemancaran untuk pengujian UPV dengan merujuk SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton dan SNI 4431:2011 tentang Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan sebagai acuan untuk pengujian Kuat Lentur. Diperoleh UPV rata-rata sebesar 4068,06 m/s pada beton normal, 4102,33 m/s pada beton FA15BA50 atau meningkat 0,84% dan 4147,81 m/s pada beton FA30BA50 atau meningkat 1,96%. Kemudian pada pengujian Kuat Lentur, diperoleh nilai kuat lentur beton normal sebesar 2,791 Mpa, kemudian meningkat 20,87% pada FA15BA50 menjadi 3,374 Mpa, dan 3,188 Mpa pada FA30BA50 atau meningkat 14,2% dari Kuat Lentur beton normal. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar FABA maka semakin tinggi pula kerapatan dan kekakuan beton. Adapun terhadap kuat lentur, peningkatan kadar penggunaan FABA hingga kadar optimumnya menjadikan kekuatan beton meningkat dan penambahan setelah mencapai kadar optimum akan menyebabkan kekuatan beton menurun.

Keyword: *fly ash*, *bottom ash*, lendutan, *ultrasonic pulse velocity*, kuat lentur, FABA



ABSTRACT

MUHAMMAD RAIHAN HASAN. *Non-Destructive Testing and Flexural Strength of Concrete Containing Fly-Ash and Bottom-Ash* (supervised by Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.T. and Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.T.)

The massive use of cement in the construction industry is a contributor to CO₂ emissions, which trigger the increasing greenhouse effect. At the same time, coal ash waste, in the form of FABA, is abundant and can pollute the environment if not managed properly.

This research aims to investigate the quality of concrete before and after using FABA as a cement substitute and its effect on UPV and flexural strength of concrete. Nine concrete test specimens were prepared, each measuring 400x100x100 mm³. These specimens were divided into three variations, each consisting of three test specimens. The three variations were: normal concrete without FABA content as a control, concrete with FABA content of 15 wt% fly ash and 50 wt% bottom ash, which is further referred to as FA15BA50, and concrete with FABA content of 30 wt% fly ash and 50 wt% bottom ash, which is further referred to as FA30BA50.

The direct method was used to measure UPV at four points on each specimen, with three transmissions at each point. The UPV test was conducted in accordance with SNI ASTM C597:2012 on the Test Method for Pulse Velocity Through Concrete and SNI 4431:2011 on the Two-Point Loading Method for Testing Flexural Strength of Normal Concrete.

The average UPV was 4068.06 m/s for normal concrete, 4102.33 m/s for FA15BA50 concrete, and 4147.81 m/s for FA30BA50 concrete. In the flexural strength test, the flexural strength of normal concrete was 2.791 MPa, 3.374 MPa for FA15BA50 and 3.188 MPa for FA30BA50.

These results indicate that the higher the FABA content, the higher the density and stiffness of the concrete. As for flexural strength, increasing the FABA content up to its optimum level increases the concrete strength, but adding more FABA after reaching the optimum level will decrease the concrete strength.

Keyword: fly ash, bottom ash, deflection, ultrasonic pulse velocity, flexural strength, FABA.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Beton	8
2.2.1 Jenis-jenis beton.....	8
2.2.2 Sifat-sifat beton.....	10
2.2.3 Kelebihan dan kekurangan beton.....	12
2.2.4 Material penyusun beton.....	13
2.3 <i>Fly Ash</i>	19
2.4 <i>Bottom ash</i>	21
2.5 Pengujian <i>Ultrasonic pulse velocity (UPV)</i>	21
2.6 Pengujian Kuat Lentur (<i>Flexural Strength Test</i>).....	23
BAB III METODE PENELITIAN.....	27
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	27
3.2 Jenis Penelitian dan Sumber Data	27
3.2.1 Waktu dan Bahan Penelitian	27
3.2.2 Pemeriksaan Karakteristik Material	28
3.2.3 Pemeriksaan karakteristik agregat halus.....	28



3.4.2 Pemeriksaan karakteristik agregat kasar	29
3.4.3 Pemeriksaan karakteristik <i>fly ash</i>	29
3.4.4 Pemeriksaan karakteristik <i>bottom ash</i>	29
3.5 Standar Pengujian Beton Segar	30
3.6 Pembuatan Benda Uji	30
3.7 Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji	31
3.8 Standar Pengujian Beton	32
3.8.1 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	32
3.8.2 Pengujian Kuat Lentur	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Pengujian Karakteristik Material.....	35
4.1.1 Agregat halus	35
4.1.2 Agregat kasar	36
4.1.3 <i>Fly ash</i>	37
4.1.4 <i>Bottom ash</i>	37
4.2 Rancangan campuran (<i>mix design</i>).....	38
4.3 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV)	38
4.4 Pengujian Kuat Lentur.....	40
4.5 Hubungan Beban dan Lendutan	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	44
5.1 Kesimpulan.....	44
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	46



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Skematik peralatan untuk pengujian UPV	22
Gambar 2	Susunan benda uji kuat lentur, perletakan dan pembebanan.....	24
Gambar 3	Patah pada 1/3 bentang tengah.....	24
Gambar 4	Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang	25
Gambar 5	Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang	25
Gambar 6	Material beton	28
Gambar 7	Perawatan sampel beton.....	31
Gambar 8	Pengujian <i>ultrasonic pulse velocity</i> (UPV).....	32
Gambar 9	Pengujian kuat lentur.....	34
Gambar 10	Hasil gradasi agregat halus (pasir)	36
Gambar 11	Hasil gradasi agregat kasar.....	37
Gambar 12	Grafik nilai <i>velocity</i> rata-rata tiap variasi	39
Gambar 13	Grafik perbedaan hasil uji kuat lentur di tiap variasi	40
Gambar 14	Grafik hubungan beban dan lendutan terhadap benda uji.....	42



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Ukuran agregat halus berdasarkan zona.....	16
Tabel 2 Gradasi Agregat Kasar	17
Tabel 3 Komposisi kimia <i>fly ash</i>	20
Tabel 4 Klasifikasi kualitas beton berdasarkan UPV	22
Tabel 5 Standar pemeriksaan karakteristik agregat halus	28
Tabel 6 Standar pemeriksaan karakteristik agregat kasar	29
Tabel 7 Standar pemeriksaan karakteristik <i>fly ash</i>	29
Tabel 8 Standar pemeriksaan karakteristik <i>bottom ash</i>	29
Tabel 9 Rancangan campuran beton	30
Tabel 10 Hasil pengujian karakteristik agregat halus (pasir).....	35
Tabel 11 Hasil pengujian karakteristik agregat kasar (batu pecah).....	36
Tabel 12 Hasil pemeriksaan komposisi kimia <i>fly ash</i>	37
Tabel 13 Hasil pemeriksaan komposisi kimia <i>bottom ash</i>	38
Tabel 14 Rancangan campuran perkubik	38
Tabel 15 Peruntukan pekerjaan yang memenuhi	43



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
σ	Kuat lentur (MPa)
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Standard Testing and Material
B3	Bahan Beracun dan Berbahaya
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
FABA	<i>Fly Ash Bottom Ash</i>
FESEM	<i>Field Emission Scanning Electron Microscopy</i>
HRWR	<i>High Range Water Reducer</i>
LD-50	<i>Letal Dose 50</i>
PCC	<i>Portland Composite Cement</i>
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap
<i>Pozzolan</i>	Bahan yang mengandung senyawa silika atau silika alumina yang apabila berhubungan dengan air akan berreaksi kalsium hidroksida dan pada suhu kamar membentuk senyawa kalsium aluminat sehingga bersifat mengikat layaknya semen.
<i>Setting time</i>	Waktu yang diperlukan oleh semen untuk mengalami pengerasan sejak semen bercampur dengan air menjadi pasta.
SSD	<i>Saturated Surface Dry</i>
TCLP	<i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i>
UPV	<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>
XRF	<i>X-Ray Fluorescence</i>



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi penyiapan alat dan bahan	50
Lampiran 2 Dokumentasi pembuatan benda uji.....	51
Lampiran 3 Dokumentasi perawatan benda uji.....	52
Lampiran 4 Dokumentasi pengujian benda uji	53



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim. Alhamdulillahirobbil'aalamiin, segala puji bagi Allah, *Rabb* semesta alam, yang telah memberi taufiq dan sangat banyak hal kepada penulis. Salawat dan salam selalu tercurahkan kepada Muhammad bin 'Abdillah *shollallahu alaihi wasallam*, sang sebaik-baik manusia, hamba dan utusan *Rabb Azza wa jall* yang mendakwahkan Islam, *rahmatan lil 'aalamiin*, hingga sampai kepada kami, semoga kita diberi Allah syafaatnya kelak.

Skripsi ini berjudul “Pengujian *Non-Destructive* dan Kuat Lentur pada Beton yang Mengandung *Fly-Ash* dan *Bottom-Ash*” yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menjadi banyak mendapat pelajaran dan pengalaman baru, dalam konteks ilmu dan kemampuan ketekniksipilan juga kemampuan yang lebih luas yang sangat bermanfaat untuk diaplikasikan dalam berbagai keadaan kehidupan. Juga di balik tersusunnya skripsi ini, penulis kerap kali dihadapkan dengan kendala. Namun sebanyak kendala itu, *alhamdulillah* penulis memiliki bantuan yang lebih banyak lagi dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan penuh ketulusan hati, penulis berterima kasih kepada:

1. Ibu Rubiyanti dan bapak Andi Sakhrul, ibu dan ayah, yang telah dan terus membersamai penulis bahkan sebelum jasad ini ditiupkan ruh. Penulis persembahkan skripsi ini sebagai hadiah mungil untuk mengukir senyum kecil di wajah mereka, berharap keduanya menitih haru akan si putra bungsu.
2. Keluarga, yang turut membersamai sebagian usia penulis.
3. Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng. dan Dr. Eng. Bambang Bakri, ST, MT., selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis sejak awal penelitian.
5. Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II, yang juga telah banyak memberi arahan dan bimbingan kepada penulis.
6. Bapak Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng., selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas untuk digunakan.

Kak Hasan, ST., selaku Laboran Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan selama pelaksanaan penelitian di laboratorium.



8. Seluruh Asisten Laboratorium Struktur dan Bahan dan sahabat-sahabat *Eco-Squad*.
9. Kak Ucil, kak Juna, dan kak Fazil, yang telah banyak berbagi *insight*.
10. Seluruh dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
11. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
12. Teman-teman Entitas 2021, yang telah kebersamai proses selama menuntut ilmu di Kampus Merah.

Dengan skripsi ini, penulis berharap dapat memberi kontribusi untuk ilmu pengetahuan dan bermanfaat kepada banyak orang. Semoga Allah memberi taufiq kepada semuanya.

Gowa, Mei 2024

Penulis



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan semen dalam dunia konstruksi turut menjadi penyumbang emisi CO₂ penyebab gas rumah kaca yang memicu pemanasan global. Emisi gas rumah kaca bekerja menahan dan menangkap panas matahari dan radiasinya ke bumi. Hal ini mengakibatkan panas bumi mengalami peningkatan menjadi 2°C (United Nations Environment Programme, 2021). Salah satu penyebab timbulnya emisi ini yaitu dari penggunaan material konstruksi seperti beton konvensional yang terbuat dari semen. Semen diperoleh melalui proses kalsinasi yang menyumbang emisi CO₂ mulai dari pembuatan semen, pembakaran bahan bakar, dan energi listrik yang digunakan (Sapulete, C.A. dkk., 2018)

Bersamaan dengan itu, sektor industri yang juga kian meningkat turut menjadi salah satu penyumbang pencemar lingkungan dengan limbahnya. Salah satu jenis limbah yang sangat melimpah adalah limbah hasil pembakaran batu bara. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2023) melalui *press realese* 30 Januari 2023 menyebut konsumsi batu bara domestik Indonesia tahun 2022 sebesar 193 juta ton.

Batu bara sering digunakan sebagai salah satu sumber utama bahan bakar di industri seperti pada pembangkit listrik. Sisa pembakaran batu bara terbagi menjadi dua komponen utama yakni *fly ash* yaitu partikel halus berupa debu yang terbawa oleh gas buang dan *bottom ash* yaitu sisa pembakaran yang tertinggal di bawah tungku pembakaran (Samosir, G.B.G. dan Har, R., 2021).

Melansir dari Liputan6.com (2023), awalnya pemerintah telah mengklasifikasikan limbah batu bara atau FABA (*Fly ash Bottom ash*) sebagai limbah berbahaya B3 karena potensinya dalam mengandung bahan beracun. Namun, seiring berjalannya waktu, terjadi perubahan dalam kebijakan yang mengarah pada penilaian ulang terhadap sifat limbah ini. Direktur Jenderal

listrikan di Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Rida menjelaskan kepada media alasannya. Melalui uji karakteristik beracun CLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) dan LD-50 (*Lethal*



Dose 50) ini aman. Hasil pengujian menunjukkan zat yang berpotensi mencemari yang dihasilkan dari PLTU memiliki konsentrasi yang lebih rendah daripada batas yang telah ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021.

Pemerintah Indonesia sendiri telah mengeluarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 13 Tahun 2022 tentang Pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap, yang mengatur tata cara pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash*.

FABA umumnya bersifat *pozzolan*, yakni bahan yang mempunyai kadar CaO rendah, sehingga tidak mempunyai kemampuan pengikat. Tetapi bahan akan bersifat *pozzolanic* bila campuran untuk stabilisasi dicampur dengan semen *portland* kemudian ditambahkan air (Pangestuti, E.K., 2011). Dalam aplikasinya, bahan FABA dapat menggantikan atau mengurangi penggunaan sebagian dari semen *portland* dalam campuran (Yamin, A. dan Armela, H., 2017).

Sapulete, C.A. dkk. (2018) di dalam penelitiannya tentang penggunaan beton geopolimer dengan bahan dasar *fly ash* sebagai pengganti semen dan limbah silinder beton pekerjaan pembuatan *retaining wall* sebagai pengganti material batu kali memperoleh hasil evaluasi menyatakan penggunaan beton geopolimer dengan bahan dasar *fly ash* sebagai pengganti semen dapat mereduksi hingga 80% emisi CO₂ dengan kekuatan beton 75% lebih besar dibandingkan dengan beton konvensional.

Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian yang mengkaji tentang pengaruh penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* dalam perancangan beton dengan harapan dapat menjadi solusi untuk permasalahan emisi CO₂ dan limbah pembakaran batu bara. Penulis mengangkat judul "Pengujian *Non-Destructive* dan Kuat Lentur pada Beton yang Mengandung *Fly-Ash* dan *Bottom-Ash*".

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kualitas beton sebelum menggunakan FABA sebagai substitusi semen?
Bagaimana kualitas beton setelah menggunakan FABA sebagai substitusi semen?



3. Bagaimana hubungan antara beban dan lendutan beton yang menggunakan FABA sebagai substitusi semen dan yang tidak?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui kualitas beton sebelum menggunakan FABA sebagai substitusi semen.
2. Mengetahui kualitas beton setelah menggunakan FABA sebagai substitusi semen.
3. Mengetahui hubungan antara beban dan lendutan beton yang menggunakan FABA sebagai substitusi semen dan yang tidak.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu:

- a. Memperluas khazanah ilmu di bidang Teknik Sipil, khususnya tentang inovasi beton FABA mengingat jumlah penggunaan batu bara dan produksi emisi CO₂ yang terus saja meningkat seiring waktu.
- b. Dapat menjadi bahan para pelaku dunia konstruksi untuk semakin mempertimbangkan penggunaan FABA sebagai material konstruksi.
- c. Memberi gambaran akan kualitas beton yang meningkat sebab penggunaan FABA dengan rancangan campuran yang tepat.
- d. Dapat menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya untuk kemudian semakin dikembangkan.
- e. Penelitian ini juga merupakan bagian dari tugas akhir jenjang Strata 1 bidang Teknik Sipil sebagai persyaratan penulis untuk memperoleh gelar sarjana teknik sehingga penulis dapat secara kredibel dengan ilmunya memberi kontribusi kepada masyarakat.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian



Untuk berjalannya penelitian ini dengan baik dan sesuai rencana maka ruang lingkup penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bahan yang digunakan adalah *fly ash* dan *bottom ash* sebagai pengganti sebagian semen.
2. Semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement (PCC)*.
3. Benda uji yang dibuat berbentuk balok dengan ukuran 40x10x10 cm³.
4. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari dengan perawatan benda uji menggunakan metode *water curing*.
5. Pengujian dilakukan di laboratorium dengan mengikuti prosedur yang sesuai dengan standar pengujian yang berlaku di Indonesia.
6. Pengujian non-destruktif dalam penelitian ini yaitu pengujian *ultrasonic pulse velocity*.
7. Pengujian kuat lentur dilakukan dengan metode dua titik pembebanan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Fitra, A.S., dan Enda, D. (2023) melakukan pengujian untuk mengetahui pengaruh penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen dan *bottom ash* sebagai substitusi pasir pada beton 20 MPa dengan metode kering terhadap kuat tekan beton yang dirawat di air tawar dan air laut. Metode yang digunakan dalam pengujian ini yakni membuat campuran beton menggunakan SNI 03-2843-2000 untuk mutu beton 20 MPa dengan *fly ash* sebagai substitusi semen dan *bottom ash* sebagai substitusi pasir dengan metode adukan kering. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan *bottom ash* 30% memberikan pengaruh negatif terhadap kuat tekan beton yang dirawat di air tawar, sedangkan di air laut penggunaan *bottom ash* 30% memberikan pengaruh positif terhadap kuat tekan beton. Selanjutnya beton yang menggunakan *fly ash* 12,5% dan *bottom ash* 30% memberikan pengaruh negatif terhadap kuat tekan beton.

Karnailia, M. (2022) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui perilaku kinerja *fly ash* sebagai substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir dalam pembuatan mortar, dengan kadar *fly ash* 0 Wt%, 10 Wt%, 20 Wt%, 30 Wt%, 40 Wt%, dan 50 Wt% dari berat semen. Setelah mortar dikeluarkan dari cetakan dengan ukuran 5x5x5 cm³ mortar direndam di dalam bak berisi air selama 7, 14, dan 21 hari. Mortar diuji secara fisis dan mekanis meliputi uji porositas, massa jenis, absorpsi, dan kuat tekan serta dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Hasil penelitian menunjukkan pembuatan mortar dengan substitusi *fly ash* 20 Wt% selama 21 hari perendaman menghasilkan kuat tekan yang optimum yaitu sebesar 63,74 kg/cm², dan massa jenis tertinggi sebesar 2,17 g/cm³, kemudian nilai porositas dan absorpsi terendah pada substitusi *fly ash* sebesar 20 Wt% selama 21



ndaman yaitu sebesar 19,84% dan 8,55%. Hasil XRF menunjukkan yang terbentuk pada produk mortar didominasi oleh senyawa CaO yaitu 7,31%, dan SiO₂ sebesar 24,60%. Hasil SEM menunjukkan pada sampel

dengan substitusi *fly ash* sebesar 20 Wt% dengan waktu perendaman selama 21 hari memiliki bentuk yang bulat tidak beraturan dan memperlihatkan adanya aglomerasi atau penumpukan partikel menjadi satu serta penyebaran pori-pori lebih sedikit sehingga memiliki ikatan yang lebih kuat.

Ibrahim, W.M.W. et al. (2019) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mempelajari pengaruh rasio *fly ash* terhadap *bottom ash* dan menentukan rasio optimum *fly ash* terhadap *bottom ash* geopolimer untuk aplikasi bata beton. Komposisi kimia dan morfologi dari tulangan geopolimer dianalisa menggunakan *X-Ray Fluorescence* dan *Scanning Electron Microscope*. Molaritas larutan Natrium Hidroksida ditetapkan pada 12M. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah persentase berat *fly ash* geopolimer yang berbeda yaitu 0 %, 10 %, 20 %, 30 % dan 40 %. Rasio padat terhadap cair untuk penelitian ini adalah 2,0. Suhu *curing* pada penelitian ini adalah 80°C dan waktu *curing* 24 jam. Variabel kontrol untuk penelitian ini adalah geopolimer *bottom ash* 100%. Selama penelitian ini, perbandingan antara struktur mikro, komposisi kimia, uji tekan, uji densitas dan uji penyerapan air telah berhasil dievaluasi. Pengaruh dari menambahkan *fly ash* ke dalam geopolimer *bottom ash* dapat memperbaiki struktur mikro dan meningkatkan kekuatan geopolimer selama campuran dicampur secara homogen sesuai dengan parameter. Pengaruh rasio *fly ash* terhadap *bottom ash* dapat dilihat dari berbagai aspek. *Fly ash* membantu untuk meningkatkan sifat mekanik dan fisik geopolimer *bottom ash* dalam hal kekuatan, struktur mikro, permukaan, densitas dan daya serap air. Kuat tekan tertinggi yang tercatat dalam penelitian tertinggi yang telah dicatat dalam penelitian ini adalah 38,883 MPa dibandingkan dengan kontrol dengan 100 wt% geopolimer *bottom ash* sebesar 3,136 MPa. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa persentase berat 40 wt% geopolimer geopolimer *fly ash* memberikan sifat yang lebih baik dan sesuai untuk digunakan sebagai aplikasi bata beton.

Mohamad, M.E. et al. (2018) melakukan penelitian dengan memanfaatkan *bottom ash* dan granit sebagai pengganti agregat kasar dan *fly ash* sebagai pengganti

ada beton porous. Kedua agregat diayak dengan ukuran antara 10 mm 4 mm. Sebanyak 4 desain campuran yang berbeda (benda uji PC1, PC2, PC4) digunakan dengan 0%, 20%, 40% dan 60% *bottom ash* sebagai



agregat kasar. Campuran kontrol dengan 100% agregat kasar dan pasta semen digunakan untuk membandingkan hasil dengan campuran lainnya. Penggantian sebagian semen sebesar 5% dengan *fly ash* (FA) digunakan untuk setiap desain campuran. 5% FA dianggap sebagai penggantian semen yang optimal. Beberapa pengujian dilakukan untuk memeriksa sifat-sifat agregat, yaitu uji penyerapan air, uji nilai penghancuran agregat (ACV) dan uji abrasi Los Angeles (LA). Uji kuat tekan dilakukan untuk mengetahui kekuatan maksimum beton, sedangkan uji permeabilitas air dilakukan untuk menguji laju aliran air yang melewati beton berpori. Analisis struktur mikro dengan menggunakan mikroskop digital dengan perbesaran 10x dilakukan untuk mengamati tekstur permukaan agregat dan ikatan antara agregat dan pasta semen. Rasio agregat-semen yang digunakan adalah 1:3,6, sedangkan rasio air-semen adalah 0,31. Kisaran kuat tekan yang dapat diterima adalah antara 5,8 dan 13,8 MPa, sedangkan nilai optimum untuk permeabilitas air adalah 22,6 mm/dtk. Kuat tekan yang ditentukan adalah antara 7,5 N/mm² dan 12,3 N/mm², mencapai kisaran yang dapat diterima antara 5,8 MPa hingga 13,80 MPa.

Lincoln, K. (2017) melakukan penelitian berjudul "Pengaruh *Fly ash* Sebagai Bahan Pengganti Semen pada Beton Beragregat Halus *Bottom ash*" dengan tujuan mencari komposisi campuran beton dengan bahan tambahan *fly ash* dan *bottom ash* yang menghasilkan kuat tekan optimum. Pengujian yang dilakukan berupa uji kuat tekan beton dan uji porositas beton. Komposisi penggantian agregat halus dengan *bottom ash* sebanyak 80% dan penggantian semen dengan *fly ash* sebanyak 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% dan 30%. Benda uji yang digunakan untuk pengujian kuat tekan berupa silinder beton 150 x 300 mm pada umur 28 hari dan 56 hari serta pengujian porositas berupa silinder beton 100 x 200 mm pada umur 28 hari. Dari hasil penelitian uji kuat tekan beton diperoleh kadar *fly ash* optimum pada penggunaan 15% dengan kuat tekan sebesar 29,8032 MPa pada umur 28 hari dan 34,4245 MPa pada umur 56 hari. Nilai porositas optimum diperoleh pada penggunaan kadar 0% *fly ash* yaitu sebesar 23,8753%. Dapat disimpulkan bahwa *bottom ash* dan *fly ash* yang berasal dari PLTU Tarahan Lampung Selatan baik

n sebagai bahan pengganti pada beton.



2.2 Beton

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

2.2.1 Jenis-jenis beton

Menurut Mulyono, T. (2006) secara umum beton dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu sebagai berikut.

1. Beton Berdasarkan Kelas dan Mutu Beton

Kelas dan mutu beton dibedakan menjadi 3 kelas sebagai berikut.

a. Beton kelas I

Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan non struktural. Untuk pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahan-bahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Mutu kelas I dinyatakan dengan B0.

b. Beton Kelas II

Beton kelas II adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan structural secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Beton kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar B1, K125, K175, dan K225. Pada mutu B1, pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan terhadap mutu bahan-bahan sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Pada mutu-mutu K125 dan K175 dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinu dari hasil-hasil pemeriksaan benda uji.

c. Beton Kelas III

Beton kelas III adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan structural yang lebih tinggi dari K225. Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Disyaratkan adanya laboratorium beton dengan peralatan yang lengkap



serta dilayani oleh tenaga-tenaga ahli yang dapat melakukan pengawasan mutu beton secara kontinu.

2. Beton Berdasarkan berat jenisnya

a. Beton Ringan

Beton ringan merupakan beton yang dibuat dengan bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan bobot beton normal. Agregat yang digunakan untuk memproduksi beton ringan pun merupakan agregat ringan juga. Agregat yang digunakan umumnya merupakan hasil dari pembakaran *shale*, lempung, *slates*, residu *slag*, residu batu bara dan banyak lagi hasil pembakaran vulkanik. Berat jenis agregat ringan sekitar 1900 kg/m^3 atau berdasarkan kepentingan penggunaan strukturnya berkisar antara $1440 \text{ kg/m}^3 - 1850 \text{ kg/m}^3$, dengan kekuatan tekan umur 28 hari lebih besar dari 17,2 MPa.

b. Beton Normal

Beton normal adalah beton yang menggunakan agregat pasir sebagai agregat halus dan batu pecah sebagai agregat kasar sehingga mempunyai berat jenis beton antara $2200 \text{ kg/m}^3 - 2400 \text{ kg/m}^3$ dengan kuat tekan sekitar 15 - 40 MPa.

c. Beton Berat

Beton berat adalah beton yang dihasilkan dari agregat yang memiliki berat isi lebih besar dari beton normal atau lebih dari 2400 kg/m^3 . Untuk menghasilkan beton berat digunakan agregat yang mempunyai berat jenis yang besar.

d. Beton Massa (*Mass Concrete*)

Mass Concrete atau beton massa ialah beton yang dituang dalam volume besar yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaannya besar. Biasanya dianggap beton massa jika dimensinya lebih dari 60 cm. Beton massa digunakan untuk pekerjaan beton yang besar dan masif, misalnya untuk proyek bendungan, kanal, fondasi, dan jembatan.

. Beton Serat



Beton serat adalah beton komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan lain yang berupa serat. Bahan serat dapat berupa serat asbes, serat tumbuh-tumbuhan (rami, bambu, ijuk), serat plastik (*polypropylene*) atau potongan kawat logam.

f. Beton Non Pasir

Beton non pasir adalah suatu bentuk sederhana dan jenis beton ringan yang diperoleh menghilangkan bagian halus agregat pada pembuatannya. Rongga dalam beton mencapai 20-25 %.

g. Beton Siklop

Beton siklop sama dengan beton normal namun agregat yang digunakan memiliki ukuran yang besar. Ukurannya bisa mencapai 20 cm. Namun, proporsi agregat yang lebih besar tidak boleh lebih dari 20 %.

h. Beton Hampa (*Vacuum Concrete*)

Beton hampa adalah beton yang dibuat seperti beton biasa namun setelah tercetak padat kemudian air sisa reaksi disedot secara khusus. Dengan demikian air yang tinggal hanyalah air yang dipakai untuk bereaksi dengan semen sehingga beton yang diperoleh sangat kuat.

2.2.2 Sifat-sifat beton

Joni, I.G.P. (2017) menyebutkan bahwa sifat-sifat beton di antaranya yaitu:

a. *Workability*

Workability ialah kemudahan pengerjaan beton untuk dicampur, dicor dan diangkut serta didapatkan tanpa mengurangi homogenitas beton dan beton tak terurai, *bleeding* berlebihan untuk mencapai kekuatan yang direncanakan *workability* ini tergantung pada konsistensi beton, dan konsistensi beton tergantung pada proporsi campuran, sifat-sifat material penyusun beton, diameter maksimum agregat kasar, jenis konstruksi yang akan dibangun, dan temperatur.

b. *Durability*

Durability atau ketahanan, pada prinsipnya ada 3 ketahanan (*resistance*) yang harus dimiliki beton, yaitu:



1. *Weathering resistance* atau ketahanan terhadap keadaan cuaca. Beton harus tahan terhadap kerusakan-kerusakan yang mungkin timbul karena pengembangan dan penyusutan akibat perbedaan temperatur (temperatur siang dan temperatur malam) yang menyebabkan beton yang basah tiba-tiba akan menjadi kering sehingga timbul retak dan sebagainya.
 2. *Resistance to chemical deterioration* atau ketahanan terhadap pengaruh bahan kimia yang meliputi bahan kimia dan lingkungan agresif.
 3. *Resistance to erosion*, yaitu ketahanan terhadap erosi atau kerusakan permukaan beton yang pada umumnya disebabkan karena pengaruh-pengaruh gesekan atau tumbukan bahan-bahan dari luar.
- c. *Strength* (Kekuatan)
1. Kuat tekan, dimana ini sangat dipengaruhi oleh mutu beton. Beberapa faktor yang mempengaruhi mutu beton sendiri yaitu faktor air semen, ketelitian pelaksanaan pengecoran, dan perawatan (*curing*) beton termasuk temperatur yang digunakan.
 2. Kuat tarik. Merupakan sifat yang penting untuk memprediksi retak dan defleksi balok. Kuat tarik jauh lebih kecil dari kuat tekannya, yaitu sekitar 10% – 15% nilai kuat tekannya.
- d. Modulus Elastisitas
- Modulus elastisitas adalah nilai tegangan-regangan beton dalam kondisi elastis, dimana tegangan mencapai 40% dari kuat tekan maksimum
- e. *Creep*
- Creep* ialah perubahan bentuk tambahan (yang berbentuk plastis) di samping perubahan bentuk elastis akibat pembebanan tetap.
- f. Susut
- Susut adalah perpendekan akibat mengering dan proses kimia fisik pasta semen sekeliling bahan pengisi yang terjadi pada beton pada waktu mengeras.



g. Kekedapan Beton (*Watertightness*)

Ialah ketahanan beton terhadap merembesnya atau meresapnya air masuk (penetrasi) ke dalam celah-celah yang terdapat dalam spesi beton. Jadi yang dimaksud beton kedap air adalah beton yang mempunyai angka permeabilitas tertentu sehingga untuk menembus lapisan beton tersebut memerlukan waktu yang Panjang..

2.2.3 Kelebihan dan kekurangan beton

Tjokrodinuljo, K. (2012) menyebutkan bahwa beton memiliki kelebihan dan kekurangan dibanding bahan bangunan lain. Di antara kelebihannya yaitu:

1. Harganya relatif murah karena menggunakan bahan-bahan dasar yang umumnya tersedia di dekat lokasi pembangunan, kecuali semen *portland*. Hanya untuk daerah tertentu yang sulit mendapatkan pasir atau kerikil mungkin harga beton agak mahal.
2. Termasuk bahan yang awet, tahan aus, tahan kebakaran, tahan terhadap pengaratn atau pembusukan oleh kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan murah.
3. Kuat tekannya cukup tinggi sehingga jika dikombinasikan dengan baja tulangan (yang kuat tariknya tinggi) dapat dikatakan mampu dibuat untuk struktur berat. Beton dan baja tulangan boleh dikatakan mempunyai koefisien muai yang hampir sama. Saat ini beton bertulang banyak dipakai untuk fondasi, kolom, balok, dinding, jalan raya, landasan pesawat udara, gedung, penampung air, pelabuhan, bendungan, jembatan, dan sebagainya.
4. Beton segar dapat dengan mudah diangkut maupun dicetak dalam bentuk dan ukuran sesuai keinginan. Cetakan dapat pula dipakai beberapa kali sehingga secara ekonomi menjadi murah

Di samping kelebihan, beton pun memiliki kekurangan, di antaranya yaitu:

1. Bahan dasar penyusun beton (agregat halus maupun agregat kasar) bermacam-macam sesuai dengan lokasi pengambilannya, sehingga cara perencanaannya bermacam-macam pula.



2. Beton keras mempunyai beberapa kelas kekuatan sehingga harus disesuaikan dengan bagian bangunan yang dibuat.
3. Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga getas atau rapuh dan mudah retak. Oleh karena itu perlu diberikan cara-cara mengatasinya, misalnya dengan memberikan baja tulangan, serat, dan sebagainya

2.2.4 Material penyusun beton

2.2.4.1 Semen

Semen adalah bahan pengikat hidrolisis atau bahan perekat yang diproduksi dalam bentuk bubuk halus yang diperoleh dengan menghaluskan klinker, bahan ini termasuk silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis. Semen tersusun atas batu kapur, tanah liat, pasir besi yang mengandung silika, alumina, oksida besi, dan oksida-oksida yang digunakan untuk merekat, melapis, dan membuat mortar (Zuraidah, S. dan Hastono, B., 2017).

Prasetyadi, W.P. (2018) memaparkan, beberapa jenis semen menurut SNI antara lain:

a. *Portland Cement*

Merupakan bahan dasar beton dan plesteran semen, semen jenis ini adalah yang paling umum digunakan di dunia.

b. *Super Masonry Cement*

Semen jenis ini sangat cocok untuk digunakan pada konstruksi jalan dan irigasi yang struktur beton maksimal K225, juga untuk konstruksi perumahan gedung.

c. *Oil Well Cement*

Merupakan semen khusus yang penggunaannya lebih tepat untuk konstruksi sumur minyak bawah permukaan laut dan bumi. OWC *class G-HSR (High Sulfat Resitance)* atau disebut sebagai “*Basic OWC*” adalah jenis OWC yang telah diproduksi saat ini.

d. *Portland Pozzolan Cement*

Adalah semen hidrolisis yang pembuatannya dilakukan dengan menggiling bahan *pozzolan*, *clinker* dan *gypsum*. Jenis ini lebih cocok untuk konstruksi bangunan umum dan bangunan yang membutuhkan



ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang seperti irigasi, bendungan, jalan raya, dan fondasi pelat penuh.

e. Semen Putih

Dibuat dari bahan utama *calcite limestone* murni, semen putih cocok digunakan untuk pekerjaan *finishing* juga sebagai *filler*.

f. *Portland Composite Cement*

Dibanding OPC, PCC mempunyai panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pendinginan, sehingga pengerjaan akan lebih mudah dan menghasilkan permukaan beton/plester yang lebih halus dan rapat. Penggunaannya seperti penggunaan OPC dengan kuat tekan yang sama, digunakan untuk bangunan pada umumnya.

Karnailia, M. (2022) menyebut semen *portland* dikelompokkan menjadi :

1. *Portland Cement Type I (Ordinary Portland Cement)*

Jenis semen yang paling besar penggunaannya oleh masyarakat secara luas dan dapat dipakai untuk seluruh aplikasi yang tidak membutuhkan persyaratan khusus.

2. *Portland Cemen Type II (Moderate Sulfat Resistance)*

Semen dengan panas hidrasi sedang atau di bawah semen pada tipe I juga tahan terhadap sulfat. Biasanya semen ini cocok digunakan pada daerah dengan suhu tinggi serta struktur drainase. Semen ini disarankan digunakan pada bangunan seperti bendungan, dermaga dan landasan berat yang ditandai dengan adanya kolom-kolom dan dimana proses hidrasi rendah juga merupakan pertimbangan utama.

3. *Portland Cement Type III (High Early Strength Portland Cement)*

Tipe ini dapat dipergunakan pada daerah yang memiliki temperatur rendah, terutama pada daerah yang mempunyai musim dingin. Kegunaan pembuatan jalan beton, landasan lapangan udara, bangunan tingkat tinggi, bangunan dalam air yang tidak memerlukan ketahanan terhadap sulfat.

4. *Portland Cement Type IV (Low Heat Of Hydration)*

Semen tipe ini digunakan untuk keperluan konstruksi yang memerlukan jumlah dan kenaikan panas harus diminimalkan. Oleh



karena itu semen jenis ini akan memperoleh tingkat kuat tekan beton dengan lebih lambat ketimbang *portland* tipe I. Tipe semen seperti ini digunakan untuk struktur beton masif seperti bendungan gravitasi besar yang mana kenaikan temperatur akibat panas yang dihasilkan selama proses *curing* merupakan faktor kritis.

5. *Portland Cemen Type V (Sulfat Resistance Cement)*

Tipe ini cocok digunakan untuk pembuatan beton pada daerah yang tanah dan airnya mempunyai kandungan garam sulfat tinggi. Sangat cocok untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan, dan pembangkit tenaga nuklir.

2.2.4.2 Agregat halus

Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5,0 mm (SNI 03-2847-2002).

KemenPUPR RI (2023) dalam Buku Saku Petunjuk Umum Konstruksi PISEW 2023 memaparkan persyaratan agregat halus secara umum:

- a. Agregat halus terdiri dari butir-butir tajam dan keras.
- b. Butir-butir halus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca. Sifat kekal agregat halus dapat di uji dengan larutan jenuh garam. Jika dipakai natrium sulfat maksimum bagian yang hancur adalah 10% berat.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (terhadap berat kering), jika kadar lumpur melampaui 5% maka pasir harus di cuci.

Agregat halus memiliki modulus kehalusan atau *fineness modulus* (FM) yang berada di kisaran antara 1,5 s/d 3,8 (SNI 03-2461-1991). Agregat halus ini dapat diperoleh dari dalam tanah ataupun dasar sungai dan tepi laut. Oleh karena itu, pasir digolongkan menjadi 3 macam, yaitu: pasir galian pasir sungai; dan pasir

sedangkan, ukuran agregat halus (pasir) dibagi menjadi 4 zona yang hui dari uji gradasi ditunjukkan pada tabel berikut.



Tabel 1 Ukuran agregat halus berdasarkan zona

Lubang Ayakan (mm)	Presentase Lolos			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Sumber: Badan Standardisasi Nasional. (2000). Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal (SNI 03-2834-2000). <https://akses-sni.bsn.go.id/viewsni/baca/9782>

Ket : Daerah agregat halus I : Pasir Kasar
 Daerah agregat halus II : Pasir Agak Kasar
 Daerah agregat halus III : Pasir Agak Halus/
 Daerah agregat halus IV : Pasir Halus

2.2.4.3 Agregat kasar

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm (SNI 03-2847-2002).

KemenPUPR RI (2023) dalam Buku Saku Petunjuk Umum Konstruksi PISEW 2023 memaparkan bahwa dalam penggunaannya, agregat kasar harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- a. Butir-butir keras yang tidak berpori serta bersifat kekal yang artinya tidak pecah karena pengaruh cuaca seperti sinar matahari dan hujan.
- b. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%, apabila melebihi maka harus dicuci lebih dahulu sebelum menggunakannya/
- c. Tidak boleh mengandung zat yang dapat merusak batuan seperti zat-zat yang reaktif terhadap alkali.
- d. Agregat kasar yang berbutir pipih hanya dapat digunakan apabila jumlahnya tidak melebihi 20% dari berat keseluruhan.

Agregat kasar memiliki modulus kehalusan atau *fineness modulus* (FM) yang berada di kisaran antara 6,0 s/d 7,1 (SNI 03-2461-1991). Ukuran maksimal agregat kasar dikelompokkan menjadi 3 golongan yang dapat diketahui melalui tabel berikut.



Tabel 2 Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Saringan (mm)	Presentasi Lolos (%) Gradasi Agregat		
	40 mm	20 mm	10 mm
76	100	-	-
38	95-100	100	-
19	35-70	95-100	100
9,6	10-40	30-60	50-85
4,8	0-5	0-10	0-10

Sumber: Badan Standardisasi Nasional. (2000). Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal (SNI 03-2834-2000). <https://akses-sni.bsn.go.id/viewsni/baca/9782>

2.2.4.4 Air

Tjokrodimuljo, K. (2007) memaparkan bahwa fungsi air dalam pembuatan beton adalah untuk membuat semen bereaksi dan sebagai bahan pelumas antara butir-butir agregat. Untuk membuat semen bereaksi hanya dibutuhkan air sekitar 25-30 persen dari berat semen. Tetapi pada kenyataan dilapangan apabila faktor air semen (berat air dibagi berat semen) kurang dari 0,35 maka adukan sulit dikerjakan, sehingga umumnya faktor air semen lebih dari 0,40 yang mana terdapat kelebihan air yang tidak bereaksi dengan semen. Kelebihan air inilah yang berfungsi sebagai pelumas agregat, sehingga membuat adukan mudah dikerjakan. Tetapi seiring dengan semakin mudahnya pengerjaan, maka akan menyebabkan beton menjadi porous atau terdapat banyak rongga, maka kuat tekan beton itu sendiri akan menurun. Dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut:

- Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
- Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
- Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
- Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter

2.2.4.5 Admixture



Admixture adalah bahan yang ditambahkan pada campuran beton untuk erikan sifat tertentu pada beton. Berdasarkan sifatnya, *admixture* dibagi di *admixture* kimia yang dapat larut dalam air (*chemical admixture*) dan

admixture mineral yang tidak dapat larut dalam air (*mineral admixture*). *Admixture* kimia lebih banyak digunakan untuk memperbaiki kinerja pelaksanaan sedangkan *admixture* mineral lebih banyak digunakan untuk memperbaiki kinerja kekuatan. Penggunaan *admixture* mengikuti spesifikasi yang ditetapkan produsennya, dan *trial mix* sebelum pengujian sangat dianjurkan (Imran, I., 2006). *Admixture* yang digunakan pada campuran beton dalam penelitian ini adalah *retarder* dan *superplasticizer*.

2.2.4.5.1 Retarder

Retarder adalah bahan kimia pembantu untuk memperlambat waktu pengikatan (*setting time*) sehingga campuran akan tetap mudah dikerjakan (*workable*) untuk waktu yang lebih lama. Temperatur setinggi 30- 32°C atau lebih sering menyebabkan makin cepatnya *hardening*, yang menyebabkan sukarnya penuangan dan penyelesaian (Antoni dan Nugraha, P., 2007).

Cara kerja *retarder* dalam memperlambat waktu ikat awal adalah dengan memecah senyawa residu hasil reaksi hidrasi semen berupa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ atau yang biasa disebut kalsium hidroksida menjadi OH dan garam Ca. *Retarder* akan membungkus butir semen dengan OH sehingga memperlambat reaksi awal dari hidrasinya. Terbentuknya garam Ca dalam air mengurangi konsentrasi ion Ca dan memperlambat kristalisasi selama fase hidrasi (Sabrina, N.A. et al., 2017).

2.2.4.5.2 Superplasticizer

Superplasticizer merupakan bahan aditif pereduksi air penting (HRWR/*High Range Water Reducer*), yang merupakan bahan tambahan kimia kelas F dalam klasifikasi SNI 03-2495-1991. Bahan aditif ini digunakan untuk meningkatkan nilai *slump* dan kekuatan beton, menciptakan beton yang mudah dikerjakan tanpa menambahkan terlalu banyak air yang akan menyebabkan *bleeding* atau segregasi. *Superplasticizer* memiliki komposisi asam sulfonat yang berfungsi memisahkan gaya permukaan pada partikel semen sehingga menyebar lebih luas, melepas air yang terkait pada kumpulan partikel semen, untuk



menciptakan viskositas yang lebih rendah untuk campuran semen atau beton segar. Dosis yang dipakai tergantung pada dosis yang direkomendasikan oleh produsen *superplasticizer*. Overdosis tidak hanya tidak ekonomis tetapi juga menyebabkan keterlambatan *setting* yang berlangsung sampai beton kehilangan kekuatan *ultimate*-nya (Sitanggang, R. et al., 2022).

2.3 Fly Ash

Fly ash merupakan hasil pemisahan sisa pembakaran halus dari pembakaran batubara yang mengalir melalui boiler berupa kepulan asap dari ruang bakar. Sekitar 75-90% abu dari cerobong asap dapat ditangkap oleh *electrostatic precipitator system*. Sisanya terletak dibagian bawah tungku disebut *bottom ash*. Menurut ASTM C6187-19, *fly ash* didefinisikan sebagai partikel halus yang dihasilkan oleh pembakaran batubara atau bubuk batubara. *Fly ash* dan *slag* telah terbukti menjadi sumber bahan pembuatan geopolimer. *Fly ash* dianggap menguntungkan karena reaktivitas partikelnya lebih halus daripada *slag*. *Fly ash* merupakan limbah yang dihasilkan dari pembakaran batubara dan mengalir keluar dari ruang pembakaran. *Fly ash* adalah bubuk keabu-abuan yang sangat ringan, *fly ash* merupakan bahan oksida anorganik yang mengandung 58,20% silika (SiO₂) (Rochmanto, D., 2019). Berdasarkan SNI 2460:2014, klasifikasi *fly ash* terbagi menjadi 3 macam, yaitu:

- a. Kelas N, *pozzolan* alam mentah atau telah dikalsinasi memenuhi persyaratan yang berlaku untuk kelas N, misalnya beberapa tanah *diatomae* (hasil lapukan); batu rijang opalan dan serpih; tufa dan abu vulkanik atau batu apung, dikalsinasi atau tidak, dan berbagai bahan yang memerlukan kalsinasi untuk menghasilkan sifat-sifat yang diinginkan, misalnya lempung dan serpih,
- b. Kelas F, *fly ash* dari batubara yang memenuhi persyaratan yang berlaku untuk kelas F. *Fly ash* kelas F mempunyai sifat Pozzolanik. *Fly ash* kelas F biasanya dihasilkan dari pembakaran antrasit atau batubara *bituminous*, tetapi dapat juga dihasilkan dari batubara *subbituminous* dan *lignite*.



- c. Kelas C, *fly ash* dari batubara memenuhi persyaratan yang berlaku untuk kelas C, *fly ash* kelas C memiliki sifat Pozzolanik dan sementisius. *Fly ash* kelas C biasanya dihasilkan dari pembakaran *lignite* atau batubara *subbituminous*, dan dapat juga dihasilkan dari antrasit atau batubara *bituminous*. *Fly ash* kelas C mengandung kadar kalsium total, yang dinyatakan sebagai kalsium oksida (CaO), lebih tinggi dari 10%.

Komposisi kimia pada *fly ash* juga diatur dalam SNI 2460:2014 dimana *fly ash* dan *pozzolan* alam harus memenuhi persyaratan komposisi kimia yang tercantum pada tabel berikut:

Tabel 3 Komposisi kimia *fly ash*

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

Sumber: SNI 2460:2014

Penggunaan *pozzolan* kelas F dengan kadar hilang pijar sampai dengan 12% dapat disetujui oleh pengguna jika salah satu dari catatan kinerja yang dapat diterima atau hasil uji laboratorium tersedia.

Dari ketiga jenis *fly ash* di atas yang bisa digunakan sebagai geopolimer adalah jenis *fly ash* yang memiliki kandungan CaO rendah dan kandungan Si dan Al yang lebih dari 50% yaitu *fly ash* tipe C dan F karena Si dan Al merupakan unsur yang utama dalam terjadinya proses geopolimerisasi. Geopolimer yang menggunakan *fly ash* tipe C menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan *fly ash* tipe F baik yang menggunakan *curing* dengan oven maupun pada suhu ruang. *Fly ash* cukup baik digunakan sebagai bahan ikat karena bahan penyusun utamanya adalah silikon dioksida (SiO₂), aluminium (Al₂O₃), besi (Fe₂O₃) dan kalsium (CaO) sedangkan magnesium, *potassium*, *sodium*, titanium, dan sulfur juga ada tetapi dalam jumlah yang kecil. Pemakaian *fly ash* kurang baik untuk pekerjaan beton yang memerlukan waktu pengerasan dan kekuatan awal yang tinggi karena proses pengerasan dan penambahan kekuatan betonnya agak lambat yang disebabkan karena terjadi reaksi *pozzolan* (Suarnita, I.W., 2011).



2.4 *Bottom ash*

Sama halnya dengan *fly ash*, *bottom ash* merupakan hasil pembakaran batubara di *boiler* pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Ukuran partikel *bottom ash* lebih besar dari pada *fly ash*, sehingga *bottom ash* jatuh ke dasar tungku pembakaran. Bentuk fisik *bottom ash* mirip dengan pasir sungai alami, dan kadarnya dibagi menjadi pasir halus dan pasir kasar (Singh, M. dan Siddique, R., 2015).

Kim, H.K. dan Lee, H.K. (2015) dalam Ibrahim, W.M.W. et al. (2019) menyebutkan bahwa *bottom ash* adalah bagian dari residu pembakaran yang tidak mudah terbakar di dalam tungku atau insinerator. Ini diproduksi dalam pembakaran batu bara dan menempel pada dinding sisi panas tungku pembakaran batu bara dan menghasilkan jejak-jejak yang mudah terbakar yang tertanam dalam membentuk klinker.

Latifi, N. et al. (2015) menjelaskan bahwa *bottom ash* mengandung logam besi (Fe) dan non-besi (NFe) yang dapat dipulihkan. Ini memiliki potensi tinggi untuk digunakan dalam konstruksi sebagai agregat ringan karena memiliki berbagai sifat seperti porositas tinggi, nilai penyusutan rendah, kepadatan rendah, ketahanan api dan kimia yang baik dan imobilisasi yang baik dari logam berat (Ibrahim, W.M.W. et al., 2019).

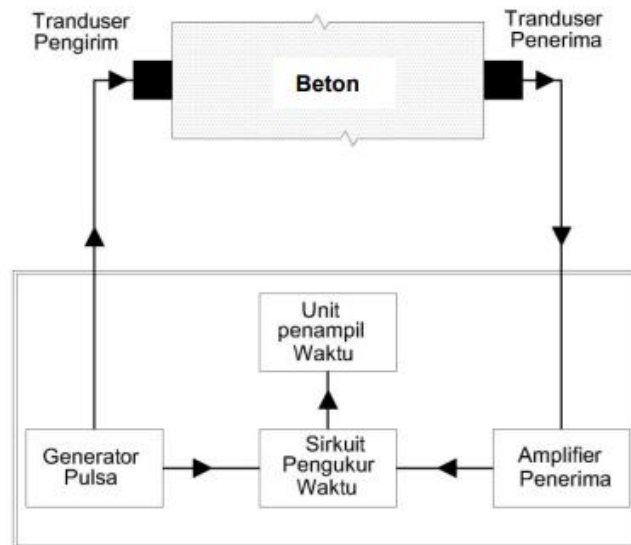
Karakteristik fisik dari *bottom ash* ditentukan oleh beberapa faktor yaitu jenis dan kualitas sumber batubara, kehalusan serbuk dan kondisi operasi pembangkit listrik. Partikel dari *bottom ash* memiliki tekstur berpori dengan bentuk bersudut dan berwarna gelap (Ngohpok, C. et al., 2017 dalam Ibrahim, W.M.W. et al., 2019).

2.5 Pengujian *Ultrasonic pulse velocity (UPV)*

Berdasarkan SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton, metode pengujian UPV dapat digunakan untuk menilai keserasaman dan mutu relatif beton, mendeteksi adanya rongga dan retak, luasi efektivitas perbaikan retak, juga untuk mengetahui adanya perubahan n, dan memperkirakan tingkat kerusakan atau retakan pada pemeriksaan beton. Apabila digunakan untuk mengamati perubahan kondisi pada



periode tertentu, lokasi uji harus diberi tanda pada struktur untuk memastikan pengujian dapat diulang pada posisi yang sama.



Gambar 1 Skematik peralatan untuk pengujian (SNI ASTM C597:2012)

Peralatan untuk pengujian terdiri dari generator kecepatan rambat gelombang, sepasang alat *transducer* (pengirim dan penerima), *amplifier*, sirkuit pengukur waktu, unit untuk menampilkan waktu, dan kabel penghubung. Rambat gelombang dari gelombang longitudinal dipancarkan oleh *transducer* elektroakustik yang terhubung dengan permukaan beton. Setelah melalui beton, rambat gelombang diterima dan dikonversikan menjadi energi listrik oleh *transducer* kedua yang berjarak L dari *transducer* pemancar. Waktu tempuh T diukur secara elektronik. Kecepatan rambat gelombang V dihitung dengan membagi L dengan T .

International Atomic Energy Agency (2002) mengklasifikasikan kualitas beton berdasarkan UPV seperti pada tabel berikut.

Tabel 4 Klasifikasi kualitas beton berdasarkan UPV

Longitudinal pulse velocity		Quality of concrete
km/s.10 ³	ft/s	
>4.5	>15	excellent
3.5-4.5	12-15	good
3.0-3.5	10-12	doubtful
2.0-3.0	7-10	poor
<2.0	<7	very poor

ber: International Atomic Energy Agency (2002)



2.6 Pengujian Kuat Lentur (*Flexural Strength Test*)

Berdasarkan SNI 2493:2011 tentang Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium, pada prinsipnya struktur beton pada bangunan sipil harus mampu menahan gaya yang bekerja seperti tekan dan lentur yang diakibatkan oleh energi dari luar. Untuk mendapatkan mutu beton yang sesuai dengan yang disyaratkan pada beton untuk struktur bangunan sipil, perlu dilakukan pengujian laboratorium baik untuk agregat, adukan beton maupun beton pada umur tertentu. Agar struktur beton aman terhadap gaya lentur yang bekerja, beton harus mempunyai kuat lentur tertentu sesuai dengan yang disyaratkan. Untuk mengetahui kuat lentur dari struktur beton perlu dilakukan pengujian kuat lentur di laboratorium. Kuat lentur beton merupakan kemampuan balok beton yang diletakan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan kepadanya, sampai benda uji patah, dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas.

Terkait dimensi benda uji, panjang spesimen harus minimal 50 mm lebih besar dari tiga kali ketebalannya dan lebar spesimen tidak boleh melebihi 1,5 kali ketebalannya yang diatur dalam ASTM C31/C31M-22.

Selanjutnya setelah cetakan selesai diisi dengan beton segar, tutup menggunakan goni basah untuk menghindari penguapan beton sebelum mengeras, letakkan lembaran plastik di atas goni untuk menjaga agar karung goni tetap basah hingga benda uji dibuka dari cetakan ($24 \text{ jam} \pm 8 \text{ jam}$ setelah pencetakan). Kecuali selama penyimpanan untuk masa minimum 20 jam segera sebelum pengujian harus direndam dalam cairan jenuh kapur pada $23^{\circ}\text{C} \pm 1,7^{\circ}\text{C}$. Saat akhir masa perawatan, antara waktu benda uji dipindahkan dari perawatan hingga pengujian selesai, pengeringan benda uji harus dihindari (SNI 2493:2011).

Pengujian kuat lentur beton menggunakan mesin tekan beton yang mendukung pengujian kuat lentur dengan perlengkapan antara lain manometer dengan dua jarum pembacaan beban, dua buah titik perletakan berbentuk silinder, dua buah titik pembebanan berbentuk silinder, ketelitian peralatan pada skala minimum adalah 12,5 g. Sebelum pengujian, harus dilakukan kalibrasi skala pembacaan beban pada manometer. Kalibrasi dilakukan setiap tertentu. Cara uji kuat beton normal dengan dua titik pembebanan diatur



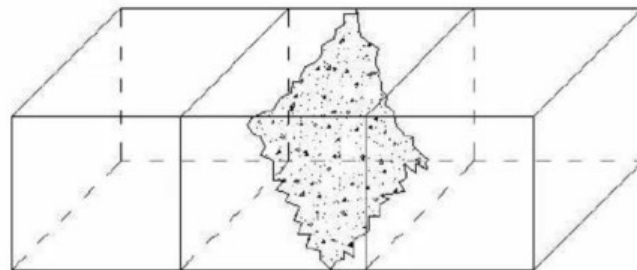
dalam SNI 4431:2011.



Gambar 2 Susunan benda uji kuat lentur, perletakan dan pembebanan (SNI 4431:2011)

Rumus-rumus perhitungan yang digunakan adalah:

- a) Untuk pengujian dimana bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah),



Gambar 3 Patah pada 1/3 bentang tengah (SNI 4431:2011)

maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{P.L}{b.h^2} \quad (1)$$

dimana,

σ = kuat lentur benda uji (MPa),

P = beban max (N),

r = jarak perletakan (mm)

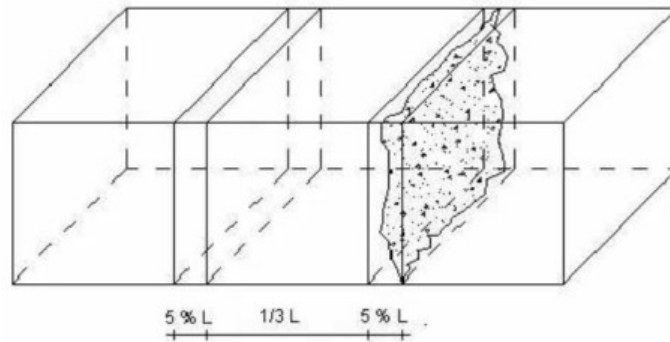
b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm),

h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)

untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada diluar pusat (daerah 1/3



jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan.



Gambar 4 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang (SNI 4431:2011)

Maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{P.a}{b.h^2} \quad (2)$$

dimana,

σ = kuat lentur benda uji (MPa),

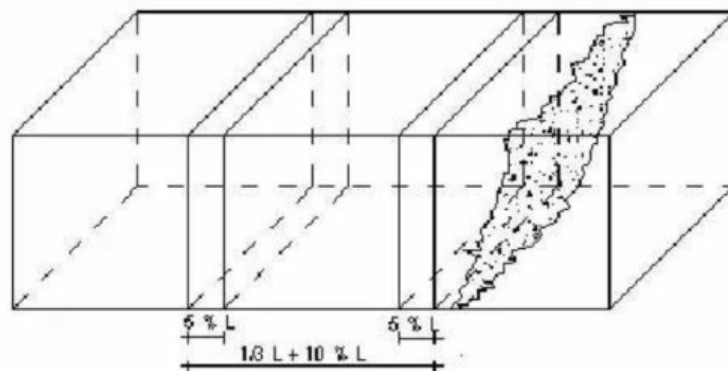
P = beban max (N),

a = jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada 4 tempat pada sudut dari bentang (mm),

b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm),

h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm).

- c) Untuk benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pembebanan dan titik patah lebih dari 5% bentang, hasil pengujian tidak digunakan.



Gambar 5 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang (SNI 4431:2011)



Pada penelitian ini digunakan sampel beton dengan ukuran $40 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, dengan panjang bentang efektif yang digunakan 30 cm dengan bentang tumpuan 5 cm dari tiap ujung balok di kedua sisi dan 2 pembebanan berada 5 cm dari tengah bentang hal ini mengacu pada aturan.

