

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH SUBSTITUSI PARSIAL
AGREGAT KASAR DENGAN ABU BAWAH BATUBARA
TERHADAP SIFAT SIFAT BETON BERPORI

(Studi Penelitian)

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat-Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Sipil Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

Akbar Rizky Harianja

2207210125



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas Akhir di Ajukan oleh:

Nama : Akbar Rizky Harianja
Npm : 2207210125
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Abu Bawah Batubara Terhadap Sifat Sifat Beton Berpori
Bidang Ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

DISETUJUI DISAMPAIKAN
KEPADA PANITIA UJIAN
SKRIPSI

Medan, 20 Agustus 2026
Mengetahui dan Menyetujui
Dosen Pembimbing

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized capital 'F' followed by a series of loops and a final vertical stroke.

Fetra Venny Riza, S.T., MSc., Ph.D.

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir di Ajukan oleh:

Nama : Akbar Rizky Harianja
Npm : 2207210125
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Abu Bawah Batubara Terhadap Sifat Sifat Beton Berpori
Bidang Ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 20 Agustus 2026

Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Pembimbing



Fetra Venry Riza, S.T., MSc.,Ph.D.

Dosen Pembanding 1



Assoc. Prof. Ir. Fahrizal Zulkarnain S.T,
M.Sc, Ph.D, IPM.

Dosen Pembanding 2



Sri Karyanti,ST,MT.

Ketua Prodi Teknik Sipil



Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D.

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas Akhir di Ajukan oleh:

Nama : Akbar Rizky Harianja
Npm : 2207210125
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Abu Bawah Batubara Terhadap Sifat Sifat Beton Berpori
Bidang Ilmu : Struktur

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sejujur-jujurnya bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul “Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Abu Bawah Batubara Terhadap Sifat Sifat Beton Berpori (Studi Penelitian)”

Bukan merupakan hasil plagiarisme, bukan hasil pengambilan karya milik orang lain, serta bukan pula hasil pekerjaan pihak lain yang saya klaim sebagai karya sendiri., Tugas Akhir ini sepenuhnya merupakan hasil pemikiran, penelitian, dan penulisan saya sendiri secara asli dan autentik.

Apabila di kemudian hari ditemukan adanya indikasi ketidaksesuaian antara pernyataan ini dengan kondisi yang sebenarnya, saya bersedia untuk diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, serta menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku, termasuk sanksi paling berat berupa pembatalan kelulusan atau pencabutan gelar kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran tanpa adanya tekanan maupun paksaan dari pihak mana pun, sebagai bentuk komitmen saya dalam menjunjung tinggi integritas akademik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 20 Agustus 2026
Saya yang menyatakan



Akbar Rizky Harianja

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT. yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Abu Bawah Batu Bara Terhadap Sifat – Sifat Beton Berpori ” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

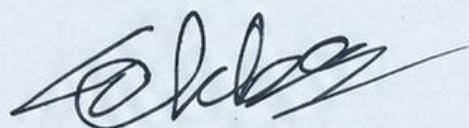
1. Ibu Dr. Fetra Veny Riza, ST. M.Sc selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Fahrizal Zulkarnain, ST., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Sri Frapanti, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Josef Hadipramana, ST. M.Sc selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Ibu Rizki Efrida, S.T., M.T. selaku Sekretaris Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Dr. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Bapak Dr. Khairul Umurani, ST., MT. selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

8. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu ketekniksipilan kepada penulis.
9. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
10. Terimakasih yang teristimewa sekali kepada Ayahanda tercinta Ahmad Yamin Harianja dan Ibunda tercinta Leli Usnah Tanjung yang telah bersusah payah mendidik dan membiayai saya serta menjadi penyemangat saya serta senantiasa mendoakan saya sehingga penulis dapat menyelesaikan studinya.
11. Terimakasih kepada Staf K3 PT PLN INDONESIA POWER UBP PANGKALAN SUSU, khususnya kepada Bapak Syawal atas persetujuan surat permohonan, dan Bapak Roma atas arahan di lapangan selama proses pengambilan limbah FABA.

Saya menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan.

Akhir kata saya mengucapkan terima kasih dan rasa hormat yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini. Semoga Tugas Akhir bisa memberikan manfaat bagi kita semua terutama bagi penulis dan juga bagi teman-teman mahasiswa Teknik Sipil khususnya. Aamiin.

Medan, 20 Agustus 2026
Penulis



Akbar Rizky Harianja

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH SUBSTITUSI PARSIAL AGREGAT KASAR DENGAN ABU BAWAH BATUBARA TERHADAP SIFAT SIFAT BETON BERPORI

Akbar Rizky Harianja

2207210125

Fetra Veny Riza, S.T., M.Sc., Ph.D.

Banjir yang melanda di kota medan sebanyak 32 kali dalam setahun disebabkan oleh menipisnya lahan resapan sehingga diperlukannya inovasi yang mampu mengurangi atau memberi ruang untuk resapan air, beton berpori adalah salah satu inovasinya. Penelitian ini di tujukan untuk mengkaji tentang penggunaan Abu Bawah Batubara yang bentuknya masih berupa agregat kasar (batubara) sebagai bahan substitusi parsial terhadap agregat kasar, Persentase yang digunakan sebesar 10%, 15% dan 20% dari berat agregat kasar. Standart yang digunakan untuk perencanaan pada campuran dan pembuatan beton berpori mengacu pada ACI 522R-10, Sedangkan pengujian yang dilaksanakan terhadap beton berpori ini mengacu pada standar SNI 1974:2011, pengujian lanjutan yang berupa porositas dan permeabilitas menggunakan standar ACI 522R-10. Hasil kuat tekan pada beton berpori standar yaitu 4,25 Mpa, dengan substitusi abu bawah batubara menghasilkan penurunan secara signifikan yaitu sebesar 4,09 Mpa (3,76%), 3,40 Mpa (20%) dan 2,95 (30,59%) Mpa. Nilai porositas yang didapatkan pada beton nornal yaitu sebesar 20,09% dan pada konsentrasi variasi yaitu sebesar 12,35%, 14,47% dan 14,31%, dan pada pengujian permeabilitas beton normal sebesar 0,48 cm/s dan pada variasi persentase nya yaitu 0,79 cm/s (64,58%), 0,94 cm/s (95,83%) dan 0,88 cm/s (83,33%). Persentase terbaik yaitu sebesar 15% dengan nilai kuat tekan yang diatas standar minimum dengan nilai porositas yang rendah namun nilai permeabilitas yang cuku baik. Di harapkan untuk penelitian selanjutnya menggunakan abu bawah batubara yang berupa agregat halus.

Kata Kunci: Banjir, Beton berpori, abu bawah batubara

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PARTIAL SUBSTITUTION OF COARSE AGGREGATE WITH COAL BOTTOM ASH ON THE PROPERTIES OF POROUS CONCRETE

Akbar Rizky Harianja

2207210125

Fetra Veny Riza, S.T., M.Sc., Ph.D.

Floods that strike Medan City up to 32 times a year are caused by the depletion of water catchment areas, thus requiring innovations capable of reducing runoff or providing space for water infiltration. Porous concrete is one of these innovations. This study aims to examine the use of Coal Bottom Ash, which is still in the form of coarse aggregate (coal), as a partial substitute for coarse aggregate. The substitution percentages used were 10%, 15%, and 20% by the weight of the coarse aggregate. The mix design and production of the porous concrete refer to the ACI 522R-10 standard. Meanwhile, the testing conducted on the porous concrete refers to the SNI 1974:2011 standard, and further tests for porosity and permeability use the ACI 522R-10 standard. The test results showed that the compressive strength of the standard porous concrete was 4.25 MPa. The substitution of coal bottom ash resulted in a significant decrease in compressive strength to 4.09 MPa (3.76%), 3.40 MPa (20%), and 2.95 MPa (30.59%). The porosity value obtained for the normal porous concrete was 20.09%, while for the variation concentrations, the values were 12.35%, 14.47%, and 14.31%. Furthermore, the permeability test for the normal porous concrete yielded 0.48 cm/s, and for the percentage variations, the results were 0.79 cm/s (64.58%), 0.94 cm/s (95.83%), and 0.88 cm/s (83.33%). The optimum substitution percentage is 15%, which yielded a compressive strength above the minimum standard, a low porosity value, and an adequately good permeability value. For future research, it is recommended to use coal bottom ash as a fine aggregate.

Keywords: Flood, Porous concrete, coal bottom ash

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Abu Bawah Batu Bara	6
2.1.1 Abu Bawah Batu Bara sebagai Alternatif Substitusi Semen dalam Konstruksi.	6
2.1.2 Abu Bawah Batu Bara sebagai Alternatif Substitusi Agregat halus dalam Konstruksi	7
2.1.3 Abu Bawah Batu Bara sebagai Alternatif Substitusi Agregat Kasar dalam Konstruksi	8
2.2 Beton Berpori	8
2.3 Pengujian Slump pada Beton Berpori	9
2.4 Kuat Tekan pada Beton Berpori	10
2.5 Porositas pada Beton Berpori	11
2.6 Permeabilitas pada Beton Berpori	11

BAB 3 METODE PENELITIAN	13
3.1 Bagan Alir	13
3.2 Sumber Sumber Dalam Penelitian	14
3.3 Metode Penelitian	15
3.3.1 Benda Uji Untuk Kuat Tekan Porositas Dan Permeabilitas	15
3.4 Tempat dan Waktu Penelitian	16
3.5 Bahan dan Alat	16
3.5.1 Alat	16
3.5.2 Bahan	24
3.6 Pemeriksaan Bahan	26
3.6.1 Pemeriksaan Material Abu Bawah Batu Bara	26
3.6.2 Pemeriksaan Agregat Kasar	28
3.7 Pembuatan Beton Pori	30
3.8 Perawatan (Curing)	33
3.9 Mix Desain	34
3.10 Takaran Mix Desain	35
3.10.1 Cetakan Kubus	35
3.10.2 Cetakan Silinder	36
3.10.3 Kebutuhan Dasar Material Mix Desain	37
3.11 Pengujian Beton Pori	37
3.11.1 Kuat Tekan	37
3.11.2 Porositas	38
3.11.3 Permeabilitas	38
BAB 4 PEMBAHASAN	39
4.1 Pemeriksaan Agregat Kerikil	39
4.1.1 Analisa Saringan	39
4.1.2 Berat Jenis	40
4.1.3 Kadar Air	41
4.2 Pemeriksaan Agregat Kasar ABB	41
4.2.1 Analisa Saringan	41
4.2.2 Berat Jenis	42
4.2.3 Kadar Air	43

4.2 Hasil Dan Pengujian Beton Berpori	43
4.2.1 Pengujian Kuat Tekan Beton	43
4.2.2 Pengujian Porositas	45
4.2.3 Pengujian Permeabilitas	47
4.2.4 Analisis Penentuan Proporsi Optimum Campuran Beton Berpori	50
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Abu Bawah Batu Bara	6
Gambar 2. 2 Beton Berpori	8
Gambar 3. 1 Bagan Alir	13
Gambar 3. 2 Timbangan Digital	16
Gambar 3. 3 Concrete Mixer	17
Gambar 3. 4 Cetakan Silinder	17
Gambar 3. 5 Cetakan Kubus	17
Gambar 3. 6 Alat Pemadat	18
Gambar 3. 7 Bak Rendam	18
Gambar 3. 8 Oven	19
Gambar 3. 9 Mesin Kuat Tekan Beton	19
Gambar 3. 10 Sekop	19
Gambar 3. 11 Gelas Ukur	20
Gambar 3. 12 Sarung Tangan	20
Gambar 3. 13 Masker	21
Gambar 3. 14 Kerucut Abrams	21
Gambar 3. 15 Kuas	22
Gambar 3. 16 Mesin Los Angles	22
Gambar 3. 17 Palu Karet	22
Gambar 3. 18 Satu Set Saringan Agregat Kasar	23
Gambar 3. 19 Pan	23
Gambar 3. 20 Semen Portland	24
Gambar 3. 21 Batu Kerikil	24
Gambar 3. 22 Air	25
Gambar 3. 23 Minyak Gemuk	25
Gambar 3. 24 Abu Bawah Batubara	26
Gambar 3. 25 Cetakan Kubus	35
Gambar 3. 26 Cetakan Silinder	36
Gambar 4.1 Grafik Hasil Nilai Kuat Tekan Rata-Rata	44
Gambar 4. 2 Grafik Porositas Rata-Rata	46
Gambar 4. 3 Grafik Rata-Rata Permeabilitas	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Mix Desain	34
Tabel 3. 2: Timeline Akhir	37
Tabel 4. 1 Analisa Saringan Agregat Kasar Silinder	39
Tabel 4. 2 Analisa Saringan Agregat Kasar Kubus	39
Tabel 4. 3 Berat Jenis Agregat Kasar	40
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kadar Air Agregat Kasar	41
Tabel 4. 5 Analisa Saringan Abu Bawah Batubara	42
Tabel 4. 6 Berat Jenis Abu Bawah Batubara	42
Tabel 4. 7 Kadar Air Abu Bawah Batubara	43
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Kuat Tekan	44
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Porositas	45
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Permeabilitas	48

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan infrastruktur di Kota Medan Mengalami dampak yang positif, melalui proyek pemerintah yaitu revitalisasi kawasan strategis kota, melalui data Pembangunan Infrastruktur Permukiman Kawasan Kota Lama Kesawan yang telah mencapai progres 54,830% (portal, 2023). Capaian ini dapat mempengaruhi tata guna lahan sehingga bencana banjir sangat sering terjadi di kota medan ini, Sepanjang tahun 2020 data yang didapati dari Grafik bencana BPBD-Medan terjadi bencana banjir sebanyak 32 kali dalam setahun di Kota Medan sehingga diperlukan inovasi yang krusial untuk mengurangi banjir di Kota Medan ini (bpbd, 2020).

Salah satu inovasi untuk mengatasi lahan penyerapan banjir yang berkurang dikarenakan infrastruktur yang terus meningkat ialah beton berpori, tidak seperti beton konvensional yang tidak dapat dilalui air, beton pori adalah beton yang dapat dilalui air dikarenakan beton berpori menggunakan sedikit atau tidak sama sekali agregat halus sehingga dapat mengembalikan tata guna lahan resapan yang berkurang.

Beton berpori biasanya digambarkan memiliki slump yang hampir mendekati nol, gradasi material terbuka terdiri dari semen portland, agregat kasar, sedikit atau tanpa agregat halus, air dan bahan tambah (opsional) (Dewi et al., 2021). Kombinasi bahan-bahan ini akan menghasilkan bahan yang mengeras dengan pori-pori terhubung, mulai dari ukuran 0,08 - 0,32 inchi (2 - 8 mm), yang memungkinkan air untuk melewatinya dengan mudah. Kandungan pori berada di rentang dari 15% sampai dengan 35%, dengan kuat tekan umumnya 400 - 4000 psi (2,8 - 28 MPa) (Elango et al., 2020). Tingkat drainase perkerasan beton tembus air akan bervariasi sesuai dengan ukuran agregat dan kepadatan campuran,

tetapi umumnya akan berkisar 2 sampai 18 gal/min/ft² (81 - 730 lt/mnt/m²) (ACI, 2010)

Berdasarkan karakteristik beton berpori diatas, agregat kasar memainkan peran yang penting dikarenakan dapat menentukan tingkat porositas dari beton berpori berdasarkan gradasi ukuran dari agregat kasar (Seeni et al., 2021), dikarenakan alasan tersebut peneliti dapat membuka potensi bahan ganti sebagai upaya peningkatan penggunaan limbah di negara indonesia dengan tujuan menambah nilai guna dari limbah tersebut. Abu bawah batu bara (Abu Bawah Batu Bara) menjadi kandidat yang kuat untuk menggantikan sebagian agregat kasar dari beton pori, dengan jumlah gelembung dan celah yang besar pada abu bawah secara langsung meningkatkan rongga dalam pencampuran beton berpori (Lee et al., 2016). Melansir dari PP No. 22 Tahun 2021 mengkatagorikan bahwasanya Fly Ash dan Abu bawah (FABA) tidak lagi dikatagorikan sebagai limbah B3 namun Pengelolaan FABB yang tidak sesuai SOP mengakibatkan pencemaran yang krusial baik terhadap tanah, air maupun udara yang berakibatkan dampak negatif bagi masyarakat baik secara ekonomi maupun kesehatan (Iman & Syafira, 2024). Menurut data dari Kementrian Perindustrian republik Indonesia pada tahun 2022, didapati bahwasannya pada rentang tahun 2021 sampai dengan 2027 diperkirakan jumlah limbah FABB meningkat dari 12 juta ton pada tahun 2027 menjadi 16,2 juta ton (Abinawa et al., 2024).

Dalam penelitian ini, bahan subsitusi semen yang berupa Abu bawah didapatkan melalui PLTU-Pangkalan Susu, Kabupaten Langkat, Sumatera Utara. Pengambilan sampel dapat dilaksanakan melalui surat resmi dari Fakultas melalui MOU dengan BUMN PLN.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan latar belakang tersebut, maka permasalahan yang akan dikaji yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi persentase Abu bawah sebagai substitusi parsial agregat kasar terhadap kuat tekan beton berpori ?

2. Bagaimana pengaruh variasi persentase Abu bawah sebagai bahan substitusi parsial agregat kasar terhadap porositas dan permeabilitas beton berpori ?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Untuk memperjelas permasalahan yang akan di bahas serta tidak terjalin ulasan yang meluas ataupun menyimpang, sehingga di butuhkan batas permasalahan. Adapun ruang lingkup yang akan di bahas oleh penulis pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Metode perencanaan campuran beton pori menggunakan acuan Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2834) tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton serta penyesuaian karakteristik khusus beton pori mengacu pada ASTM C1688 mengenai *Density and Void Content of Fresh Pervious Concrete*.
2. Melakukan variasi campuran beton pori dengan menggunakan Abu Bawah Batubara sebagai pengganti sebagian agregat kasar pada persentase 0%, 10%, 15%, 20%. Penggantian dinyatakan sebagai persentase berat terhadap total berat agregat kasar.
3. Penelitian dilakukan pada skala laboratorium, mulai dari proses pembuatan benda uji hingga pengujian material, sehingga tidak mencakup analisis penerapan beton pori di lapangan maupun efektivitasnya terhadap mitigasi banjir pada kawasan tertentu.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pemaparan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh substitusi abu bawah batubara (bottom ash) terhadap agregat kasar terhadap nilai kuat tekan beton berpori.
2. Menganalisis pengaruh substitusi abu bawah batubara (bottom ash) terhadap agregat kasar terhadap nilai porositas beton berpori.
3. Menganalisis pengaruh substitusi abu bawah batubara (bottom ash) terhadap agregat kasar terhadap nilai permeabilitas beton berpori.
4. Menentukan persentase variasi terbaik (optimum) substitusi abu bawah batubara (bottom ash) pada beton berpori berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, porositas, dan permeabilitas yang memenuhi standar ACI 522R-10.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah;

1. Penelitian ini akan sangat bermanfaat pada bidang literatur ilmiah tentang bagaimana memanfaatkan limbah Abu bawah sebagai material substitusi parsial agregat kasar pada beton pori, khususnya terhadap sifat fisik (porositas dan permeabilitas) dan sifat mekanik (kuat tekan). Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan material konstruksi yang lebih inovatif, efisien, dan ramah lingkungan.
2. Penelitian ini secara praktis untuk menekan biaya industri melalui substitusi parsial agregat kasar serta mengurangi limbah industri dari PLTU sehingga terciptanya industri yang lebih ramah lingkungan.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pembahasan dalam penelitian ini, maka sistematika penulisan dilakukan dengan membagi tulisan menjadi beberapa bab, antara lain:

BAB 1 PENDAHULUAN

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

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang teori-teori yang berkaitan dengan penjelasan beton pori, serta variasi campuran Abu Bawah Batu Bara.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini menguraikan tentang tahapan penelitian, pelaksanaan penelitian, teknik pengumpulan data, dan metode analisa data.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil pengujian dan analisa data kekuatan tekan,porositas dan permeabilitas beton pori dengan Abu Bawah Batu Bara.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merupakan bagian akhir dari skripsi yang berisikan kesimpulan dan saran dari hasil pengujian dan analisa data.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Abu Bawah Batu Bara

Batu bara dimanfaatkan sebagai sumber energi, limbah penggunaan batu bara menghasilkan Abu terbang dan abu bawah. Abu bawah merupakan material dari sisa proses pembakaran yang terdapat pada lokasi bawah. *Abu bawah* dikenal sebagai bahan alternatif yang dimanfaatkan pada beton. *abu bawah* banyak mengandung silika dan oksida yang merupakan mineral dasar dalam pembuatan campuran semen sehingga dapat digunakan sebagai bahan konstruksi (Septriansyah & Umari, 2022).



Gambar 2. 1 Abu Bawah Batu Bara

2.1.1 Abu Bawah Batu Bara sebagai Alternatif Substitusi Semen dalam Konstruksi.

Penelitian Jamaluddin et al (2019) memanfaatkan Abu Bawah BatuBara (ABB) sebagai bahan substitusi parsial semen, dengan metode penggilingan ABB selama 20, 30, dan 40 jam dengan persentase yang digunakan yaitu 10%, 20%, 30%. Diperoleh hasil penelitian diatas yaitu ABB gilling dalam campuran mengurangi keterlecakan (Workability), kepadatan beton, dan meningkatkan kapasitas penyerapan air. pada persentase 10% dengan penggilingan 20, 30 jam dapat meningkatkan kuat tekan target yaitu 35 MPa dengan menunjukkan kinerja yang memuaskan. kuat tarik belah meningkat 8% dengan persentase 10% namun

pada penggilingan 30 jam. Penelitian ini memanfaatkan Abu Bawah Batu Bara (ABB) sebagai bahan substitusi parsial semen pada beton normal, dapat di ambil kesimpulan untuk penelitian tersebut pemanfaatan efektif ABB berada di angka 10% (Jamaluddin et al., 2019).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Mangi et al (2019) memanfaatkan Abu Bawah Batu Bara (ABB) sebagai substitusi semen pada beton dengan komposisi variasi 0% hingga 30%, didapati pada persentase 10% ABB yang digiling dengan umur beton 28 hari memiliki kuat tekan 35 MPa namun untuk hasil yang maksimal diperlukan waktu yang lebih lama dengan campuran kontrol sama sehingga didapatkan hasil kuat tekan meningkat hingga 44,5 Mpa (Mangi et al., 2019).

Studi penelitian yang dibuat oleh Jambri & Ali (2023) penggunaan Abu Bawah Batu Bara (ABB) sebagai substitusi parsial pada mortar dan persentase ABB yang digunakan ialah sebesar 10% hingga 30%. Hasil dari penelitian ini menunjukkan kandungan ideal ABB untuk kekuatan tekan dan penyerapan air sebesar 10% dan pada pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa pada persentase 10% dan 15% dapat melampaui spesimen kontrol pada umur mortar 28 hari (Jambri & Ali, 2023).

Penelitian lain yang dilakukan Haziman et al (2021) oleh menunjukan bahwa penggunaan Abu Bawah Batu Bara bahwa terjadinya penurunan kemampuan beton beriring peningkatan substitusi semen, namun ketika umur perawatan kekuatan terindikasi meningkat. persentase 10% menunjukkan persenan yang optimal sebagai substitusi parsial semen dengan hasil yang menunjukkan penambahan kuat tarik belah yang tinggi dibandingkan waktu kontrol (Haziman et al., 2021).

2.1.2 Abu Bawah Batu Bara sebagai Alternatif Substitusi Agregat halus dalam Konstruksi

Pada penelitian Septriansyah & Umari (2022) bertujuan memanfaatkan abu bawah sebagai bahan substitusi parsial pasir dalam beton pori, dengan persentase 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% di dapati bahwasanya pada persentase 30% abu

bawah berhasil mengurangi berat jenis menjadi 1.994 kg/m^3 dengan peningkatan kuat tekan secara signifikan hingga angka 39,12 MPa, melampaui kuat tekan beton normal namun pada persentase 50% secara akurat dapat mengurangi kuat tekan beton dengan nilai kuat tekan 18,73 MPa.

Penelitian ini berfokus memanfaatkan abu bawah sebagai bahan substitusi parsial agregat kasar dalam beton berpori namun peneliti bisa mengambil kesimpulan bahwasanya pemanfaatan maksimal abu bawah sebagai bahan substitusi parsial agregat halus berada di persentase 30%.

2.1.3 Abu Bawah Batu Bara sebagai Alternatif Substitusi Agregat Kasar dalam Konstruksi

Pada penelitian Lee et al (2016) memanfaatkan Abu Bawah Batu Bara (ABB) sebagai bahan substitusi parsial agregat kasar dengan hasil bahwasanya ABB dapat menurunkan kuat tekan beton namun dapat meningkatkan porositas pada beton berpori, dengan persentase 30% ABB dengan tambahan 10 % GF (Granular Fertiliser) adalah kombinasi yang cocok sebagai bahan substitusi parsial agregat kasar pada beton berpori.

Pada penelitian diatas dapat diambil kesimpulan bahwasanya persentase 30% pada substitusi parsial Abu Bawah Batu Bara terhadap agregat kasar adalah persentase yang efektif untuk penelitian beton berpori.

2.2 Beton Berpori



Gambar 2. 2 Beton Berpori

Beton berpori dikenal juga dengan “no fines concrete” atau “Permeable concrete” adalah salah satu perkerasan yang terdiri dari semen, air, agregat kasar yang seragam serta dibuat dengan sedikit agregat halus atau tidak menggunakan agregat halus sehingga memiliki porositas yang besar dan saling terhubung maka dapat dilalui oleh air untuk mengalir melewati struktur beton dengan efektif, pengurangan agregat halus ini juga menghasilkan Void content yang lebih tinggi dibandingkan beton normal. Beton jenis ini tersusun atas pori-pori terbuka yang saling terhubung dengan rentang ukuran antara 2 hingga 8 mm, sehingga membentuk pola aliran yang kontinu. Karakteristik ini menjadikan beton berpori memiliki kemampuan sebagai drainase untuk mengurangi limpasan air, serta mendukung manajemen air hujan pada area perkotaan. Dengan pola porositasnya yang tinggi, beton berpori memiliki peran yang vital dalam perkerasan berkelanjutan dan lingkungan yang memiliki dampak rendah (Adresi et al., 2023; Hung et al., 2021; Nazeer et al., 2020).

2.3 Pengujian Slump pada Beton Berpori

Adresi et al. (2023) Dalam tinjauan yang dilakukan secara terperinci mengenai beton berpori (*Pervious Concrete*), peneliti menggunakan standar ASTM C143 sebagai acuan dasar, namun penulis membuat sebuah catatan kritis terhadap aplikasinya. Secara metodologi, pengujian dilaksanakan untuk menilai viskositas campuran yang memiliki rasio air-semen (w/c) sangat rendah, yakni berada di rentang antara 0,27 hingga 0,34. Hasil tes menunjukkan bahwa beton berpori secara umum memiliki ciri zero-slump yang sangat rendah, dengan batas yang masih sangat bisa ditoleransi yakni berkisar antara 20 mm hingga 50 mm (Adresi et al., 2023).

Hamzah & Rochmah (2025) Studi ini mengaplikasikan standar ACI 522 R-10 dalam merancang dan menguji beton berpori dengan variasi gradasi agregat. Secara teknis, pengujian slump dilaksanakan untuk memverifikasi pasta semen memiliki viskositas yang cukup untuk menyelimuti agregat tanpa terjadi

pemisahan. Hasil tes memperlihatkan sifat zero-slump, di mana beton berpori tetap mempertahankan bentuk kerucut ketika kerucutnya diangkat. Pengaplikasian agregat dengan gradasi yang lebih besar (10-15 mm) cenderung memberikan campuran yang lebih sulit dilaksanakan bila jumlah pasta belum disesuaikan dengan luas permukaan spesifik agregat. Peneliti menyimpulkan hasil slump secara angka menunjukkan hasil nol (Hamzah & Rochmah, 2025).

Berdasarkan penelitian diatas dapat di ambil kesimpulan bahwasanya pada pembuatan beton berpori pengambilan nilai uji slump tidak perlu dilakukan dikarenakan nilainya yang terlalu kecil yaitu 20 mm - 50 mm bahkan nilai hasil slump mendapaati nol.

2.4 Kuat Tekan pada Beton Berpori

Beton berpori merupakan salah satu jenis beton yang mempunyai karakteristik yang lemah terhadap kuat tekan, hal ini dapat dipengaruhi oleh pori pori yang ada di internal beton serta komposisi agregatnya. Salah satu studi uji komposisi agregat, variasi agregat pada beton berpori meunjukkan hasil kuat tekan yang berbeda secara signifikan yaitu 9,24 Mpa, 7,20 Mpa dan 5,92 Mpa untuk gradasi A (5-10 mm), B (10-15 mm) dan C (15-20 mm) masing-masing, Hal ini menunjukkan bahwasanya semakin besar tingkat gradasi pada beton berpori maka akan meningkatkan porositas namun menurunkan kuat tekan pada beton berpori (Hamzah & Rochmah, 2025).

Pada penelitian lainnya didapati juga bahwasanya pengaruh gradasi agregat menjadi kunci utama dalam penentuan kuat tekan pada beton berpori, tak hanya gradasi campuran agregat namun faktor air semen (FAS) juga mempengaruhi keduanya sehingga pada penelitian ini didapati bahwasanya beton berpori kasar (BBK) memiliki nilai kekuatan yang lebih lemah dibandingkan beton berpori halus (BBH) .

Hubungan negatif antara porositas dan kuat tekan pada penelitian di atas dapat di ambil kesimpulan bahwasanya porositas yang tinggi cenderung membuat

kekuatan beton berpori menurun dikarenakan meningkatnya rongga internal di beton sehingga kontak yang terjadi antara agregat dan semen berkurang.

2.5 Porositas pada Beton Berpori

Porositas adalah indikator utama yang mendeskripsikan jumlah rongga kosong dalam beton berpori, rongga kosong ini mempunyai pengaruh terhadap aliran air dan sifat mekanik pada beton berpori. Berdasarkan penelitian berikut, nilai desain porositas pada beton berpori umumnya berada di rentang antara 15% hingga 25% dengan diameter pori rata rata berada berkisar antara 2-4 mm dan struktur rongga yang terhubung memberikan kontribusi besar terhadap permeabilitas beton berpori tersebut. Hasil penelitian ini menunjukkan korelasi antara porositas, permeabilitas beton berpori menjadi kunci dalam menentukan sifat mekanik pada beton berpori (Tuan et al., 2023).

Penelitian lainnya menunjukkan beton berpori dengan substitusi agregat didapatkan nilai porositas rata rata pada beton berpori meningkat antara 26,66 % hingga 35,82 % pada variasi agregat sungai kasar (19–9,5 mm) dan agregat hancur (9,5–2,36 mm dan 19–9,5 mm), hal ini menunjukkan bahwa variasi agregat menjadi inti dari porositas pada beton berpori (Sánchez-Mendieta et al., 2024).

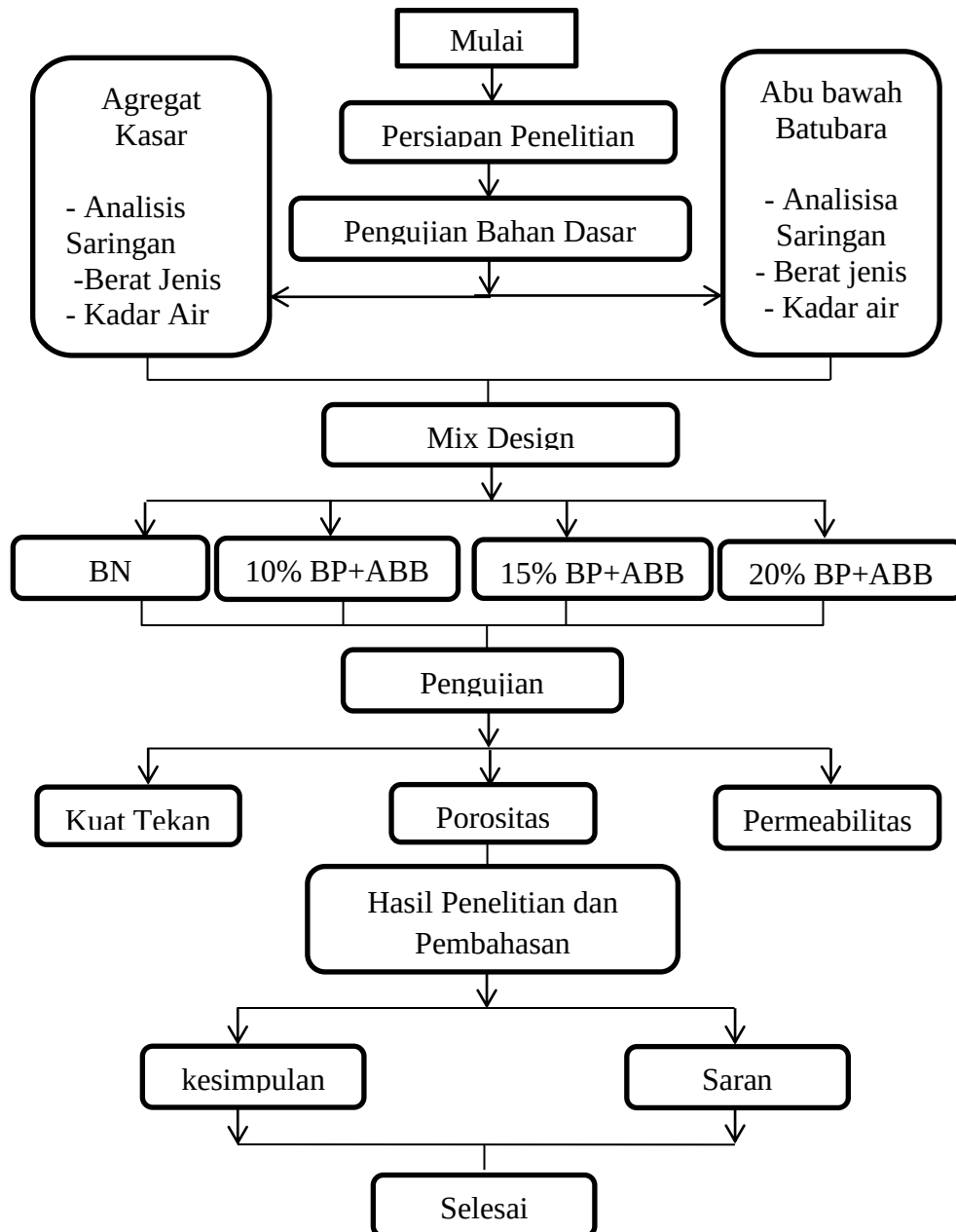
2.6 Permeabilitas pada Beton Berpori

Permeabilitas beton berpori memiliki hubungan pengaruh yang sangat kuat dengan struktur pori dan karakteristik rongga yang menghubungkan aliran jalur air. Studi penelitian ini menunjukkan nilai permeabilitas awal yang digunakan sebagai dasar adalah 0,1 sampai 3,3 cm/s berdasarkan variasi komposisi dan ukuran agregat (Tuan et al., 2023). Penelitian lain menunjukkan hubungan antara struktur permeabilitas dan pori juga menyatakan bahwa karakteristik efektif porositas dan diameter rongga menjadi indikasi inti yang menentukan kemampuan aliran fluida melalui beton berpori (Shan et al., 2022).

Dalam hal konteks hubungan antara permeabilitas dan sifat campuran, penambahan material seperti bagasse didapati tren menurunnya permeabilitas sejalan dengan penurunan porositas, dengan hasil nilai permeabilitas beton berpori sebesar 0,46 cm/s hingga 0,20 cm/s pada variasi persentase 0% hingga 6% bahan tambah bagasse (Ihsyan & Syahputri, 2024). Permeabilitas beton berpori pada penelitian (Lee et al., 2016) secara implisit dikendalikan oleh rongga (Void Ratio) yang menargetkan dan terukur pada variasi campuran beton berpori dengan agregat Abu Bawah Batu Bara (ABB), dengan menargetkan rasio rongga sebesar 15%, 20% dan 25% dan hasil penelitian mendapatkan bahwa substitusi agregat Abu Bawah Batu Bara (ABB) meningkatkan rasio rongga terukur dibandingkan campuran kontrol.

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Bagan Alir



Gambar 3. 1 Bagan Alir

3.2 Sumber Sumber Dalam Penelitian

Metodologi yang digunakan untuk mengatasi sebuah masalah dilaksanakan dengan cara mengumpulkan, mencatat, mempelajari, dan menganalisa data yang didapatkan selama penelitian terlaksana. Dalam melaksanakannya, proses penanganan masalah sangat bergantung pada data pendukung yang dikumpulkan secara sistematis dan terkeorganisir. Data tersebut didapatkan dari dua sumber, yaitu:

1. Data Primer

Data primer adalah data yang didapatkan langsung dari hasil pengujian yang dilaksanakan dilaboratorium selama penelitian berlangsung. Dalam penelitian beton berpori, data yang didapatkan meliputi:

- a. Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar yang berupa krikil dan Abu Bawah Batu Bara
- b. Pemeriksaan gradasi agregat kasar yang berupa krikil dan abu bawah batu bara
- c. Pemeriksaan kadar lumpur agregat kasar yang berupa krikil dan Abu Bawah Batu Bara
- d. Penentuan kadar air optimum
- e. Proporsi campuran beton pori sesuai variasi Faktor Air Semen (FAS)
- f. Hasil pengujian kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton pori setelah masa perawatan 28 hari.

2. Data sekunder

Data sekunder diperoleh dari berbagai sumber literatur dan referensi ilmiah yang relevan dengan penelitian beton pori, meliputi:

- a. Jurnal, buku, dan laporan penelitian terdahulu yang membahas perancangan dan karakteristik beton pori
- b. American Concrete Institute (ACI) yang digunakan sebagai acuan, seperti ACI 522R-10 tentang “Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Pori”.

3.3 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimental, yaitu melalui proses pembuatan benda uji berupa beton pori (pervious concrete). Beton pori tersebut dibuat menggunakan agregat kasar sebagai komponen utama, tanpa melibatkan agregat halus. Pada penelitian ini, mensubstitusi terhadap sifat dan performa beton pori yang dihasilkan dengan variasi sebagai berikut:

3.3.1 Benda Uji Untuk Kuat Tekan Porositas Dan Permeabilitas

a. Variasi Abu Bawah Batubara 0% (Normal)

Pada komposisi ini, beton pori dibuat tanpa mensubstitusi agregat kasar dengan Abu Bawah Batu Bara. Campuran ini berfungsi sebagai beton kontrol yang digunakan sebagai acuan pembandingan terhadap variasi substitusi lainnya untuk menilai pengaruh penggunaan Abu Bawah Batu Bara.

b. Variasi Abu Bawah Batubara 10%

Pada substitusi Abu Bawah Batu Bara digunakan sebanyak 10% dari total berat agregat kasar. Dengan demikian, berat agregat kasar dalam campuran dikurangi menjadi 90%, sementara 10% sisanya digantikan oleh Abu Bawah Batu Bara sebagai bahan substitusi parsial.

c. Variasi Abu Bawah Batu Bara 15%

Pada campuran ini, Abu Bawah Batu Bara ditambahkan sebesar 15% dari berat total agregat kasar yang digunakan. Penggunaan Abu Bawah Batu Bara ini menyebabkan porsi agregat kasar berkurang menjadi 85%, dan 15% sisanya digantikan oleh Abu Bawah Batu Bara untuk melihat pengaruhnya terhadap kekuatan serta porositas beton pori.

d. Variasi Abu Bawah Batu Bara 20%

Pada variasi terakhir, Abu Bawah Batu Bara digunakan sebanyak 20% dari berat agregat kasar, sehingga komposisi agregat kasar dalam campuran berkurang menjadi 80%. Variasi ini bertujuan untuk menilai sejauh mana peningkatan kadar Abu Bawah Batu Bara dapat memengaruhi karakteristik fisik dan mekanik beton pori yang dihasilkan.

3.4 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Beton, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, dengan menggunakan metode eksperimen laboratorium. Kegiatan penelitian berlangsung selama tiga bulan, yakni mulai dari Februari hingga Juni.

3.5 Bahan dan Alat

3.5.1 Alat

1. Timbangan Digital

Ge-162 digital 20000 Gram (20 kg) digunakan untuk menimbang bahan sampel seperti penyesunan beton pori sesuai dengan komposisi campuran yang di rencana.



Gambar 3. 2 Timbangan Digital

2. Concrete Mixer Atau Mixer Manual

Digunakan Untuk Mencampur Seluruh Bahan Beton pori dari semen portland agregat kasar serta bahan tambahan hingga di peroleh campuran yang baik.



Gambar 3. 3 Concrete Mixer

3. Cetakan Benda Uji Berbentuk Silinder
Berupa Cetakan Silinder Diameter 15 x 30 cm ,Sesuai Dengan Standar Pengujian Kuat Tekan Beton.



Gambar 3. 4 Cetakan Silinder

4. Cetakan Benda Uji Berbentuk Kubus
Berupa Cetakan kubus ukuran 15x15x15 cm ,Sesuai Dengan Standar Pengujian Kuat Tekan Beton.



Gambar 3. 5 Cetakan Kubus

5. Alat Pematat

Seperti Tongkat Pematat Atau Alat Getar Ringan, Digunakan Untuk Membantu Proses Pemadatan Tanpa Menutup Rongga Beton Pori.



Gambar 3. 6 Alat Pematat

6. Bak Perendaman Atau Curing Tank

Digunakan Untuk Perawatan Benda Uji Selama Masa Perawatan.



Gambar 3. 7 Bak Rendam

7. Oven Pengering

Digunakan Untuk Pengeringan Material Atau Benda Uji Pada Tahap beton pori ,Alat ini mampu bekerja pada suhu 50-250 °C dengan pengaturan suhu digital



Gambar 3. 8 Oven

8. Mesin Uji Kuat Tekan

Alat ini digunakan untuk menilai mutu serta kualitas beton berdasarkan kemampuan beton dalam menahan gaya tekan yang diberikan. Hasil pengujian kuat tekan tersebut dimanfaatkan sebagai acuan utama dalam perencanaan struktur beton bertulang, sekaligus menjadi tolok ukur kelayakan dan kestabilan mutu beton yang dihasilkan.



Gambar 3. 9 Mesin Kuat Tekan Beton

9. Sekop

Digunakan untuk memindahkan atau mengambil material bahan uji seperti agregat kasar.



Gambar 3. 10 Sekop

10. Gelas ukur

adalah alat laboratorium berbentuk silinder dengan skala pengukuran di sisi luar yang berfungsi untuk mengukur volume cairan secara tepat.



Gambar 3. 11 Gelas Ukur

11. Sarung tangan

Digunakan untuk melindungi tangan saat penelitian ,alat ini mencegah kontak langsung dengan material yang dapat menyebabkan iritasi atau cedera.



Gambar 3. 12 Sarung Tangan

12. Masker

Digunakan untuk melindungi saluran pernafasan akibat menghirup udara kotor pada proses penelitian di laboratorium



Gambar 3. 13 Masker

13. Krucut Abrams

alat uji slump beton yang digunakan untuk mengetahui tingkat kelecakan (workability) beton segar.



Gambar 3. 14 Kerucut Abrams

14. Kuas

Fungsinya adalah untuk meratakan lapisan minyak gemuk pada permukaan cetakan agar beton tidak lengket saat proses pembongkaran, sehingga hasil permukaan beton menjadi halus, rapi, dan mudah dilepaskan dari cetakan tanpa kerusakan.



Gambar 3. 15 Kuas

15. Mesin Los Angles

berfungsi untuk mengukur ketahanan aus (abrasion resistance) agregat kasar baik kerikil, batu pecah, maupun Abu Bawah Batu Bara yang telah dipecah terhadap gesekan dan benturan mekanis.



Gambar 3. 16 Mesin Los Angles

16. Palu Karet

Digunakan untuk memberikan pukulan ringan tanpa menimbulkan kerusakan pada permukaan benda uji maupun cetakan beton.



Gambar 3. 17 Palu Karet

17. Satu Set Saringan Agregat Kasar (Saringan No. 1,5";3/4";3/8"; dan No. 4.)

berfungsi untuk melakukan analisis gradasi untuk menentukan distribusi ukuran butir material yang berguna memverifikasi kepadatan campuran beton yang optimal. Saringan ini digunakan untuk memastikan dimensi-dimensi setiap agregat kasar berupa kerikil dan juga Abu Bawah Batu Bara yang akan mensubstitusi agregat kasar.



Gambar 3. 18 Satu Set Saringan Agregat Kasar

18. Pan

Berfungsi untuk Manahan cetakan agar tetap stabil saat beton di tuangkan, mencegah adukan tumpah kepermukaan kerja,mempermudah cetakan setelah pengecoran,menjaga area tempat kerja tetap bersih dan



Gambar 3. 19 Pan

3.5.2 Bahan

Bahan yang akan di gunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Semen portland

Berfungsi untuk sebagai bahan pengikat yang melapisi permukaan agregat kasar dan merekatkan campuran.



Gambar 3. 20 Semen Portland

2. Batu kerikil

Berfungsi untuk membantu menciptakan pori-pori yang saling terhubung peresapan air yang efektif .



Gambar 3. 21 Batu Kerikil

3. Air

Berfungsi Untuk Proses Hidrasi Semen dan air tersebut harus di kontrol agar tidak menyumbat sistem drainase terhadap beton pori tersebut



Gambar 3. 22 Air

4. Minyak Gemuk

minyak gemuk berfungsi sebagai pelumas kental yang digunakan untuk mengurangi gesekan serta mencegah kelengketan antara permukaan cetakan dengan beton, sehingga proses pembongkaran cetakan dapat dilakukan dengan mudah tanpa merusak permukaan beton dan sekaligus melindungi cetakan dari korosi maupun keausan.



Gambar 3. 23 Minyak Gemuk

5. Abu Bawah Batu Bara

Abu Bawah Batu Bara dapat digunakan sebagai material substitusi agregat kasar sehingga ketergantungan pada agregat kasar berkurang dan mampu mengurangi sampah bahaya dari PLTU.



Gambar 3. 24 Abu Bawah Batubara

3.6 Pemeriksaan Bahan

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan dan pemeriksaan bahan ,di antaranya :

3.6.1 Pemeriksaan Material Abu Bawah Batu Bara

Abu Bawah Batu Bara adalah material sisa pembakaran batubara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berada dibawah tungku pembakaran dan memiliki karakteristik butiran berpori yang mirip dengan agregat kasar. Karakteristik tersebut membuat Abu Bawah Batu Bara memiliki potensi dimanfaatkan sebagai substitusi parsial agregat kasar dalam campuran beton berpori. namun diperlukannya pengecekan kualitas material yang terdiri dari sebagai-berikut:

a. Analisa Saringan Abu Bawah Batu Bara

Agregat kasar yang akan di uji ditimbang sesuai kebutuhan, kemudian diayak menggunakan satu set saringan standar (19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, dan pan) sesuai SNI 03-1968-1990. Proses pengayakan dilakukan selama ± 10 menit dengan mesin pengayak atau secara manual. Setelah selesai, berat agregat yang tertahan pada tiap saringan ditimbang dan dicatat. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan

distribusi ukuran butiran (gradasi) agregat. Untuk beton pori, digunakan gradasi seragam (uniform grading) dengan ukuran butiran dominan 9,5–19 mm agar terbentuk rongga udara antar butir sebagai jalur permeabilitas.

$$\% \text{ Tertahan} = \frac{W_i}{W_t} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\% \text{ Lolos Kumulatif} = 100 - (\text{Jumlah } \% \text{ Kumulatif})$$

Keterangan :

- W_i = Berat agregat yang tertahan pada saringan ke-i (gram)
- W_t = Berat total sampel (gram)

b. Berat Jenis

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui massa jenis (specific gravity) dan daya serap air (absorption) agregat kasar berdasarkan SNI 1970:2008. Sampel agregat dikeringkan di oven hingga berat konstan, kemudian direndam dalam air selama 24 jam. Setelah itu, agregat dikeringkan hingga kondisi Surface Saturated Dry (SSD) dan ditimbang dalam tiga kondisi: kering oven, SSD, dan dalam air. Hasil penimbangan digunakan untuk menghitung berat jenis curah, berat jenis semu, serta penyerapan air, yang berpengaruh terhadap perhitungan proporsi campuran beton.

$$G_{ssd} = \frac{B}{B - C} \quad (3.2)$$

Keterangan :

B = Berat agregat dalam kondisi SSD (gram)

C = Berat agregat dalam air (gram)

c. Kadar Air

Pengujian kadar air merupakan prosedur untuk mengetahui jumlah air yang terkandung didalam pori-pori dan permukaan agregat dalam kondisi tertentu dengan menggunakan standar SNI 1971:2011. kadar air memiliki peran yang sangat berpengaruh terhadap rasio air efektif kedalam campuran beton, karena air yang sudah terserap atau terikat pada agregat akan mempengaruhi nilai water cement ratio yang direncanakan.

$$\text{Kadar air (\%)} = ((W_k - W_b) / W_k) \times 100\% \quad (3.3)$$

Keterangan:

W_k = Berat Kering Agregat

W_b = Berat Basah Agregat

3.6.2 Pemeriksaan Agregat Kasar

Agregat kasar adalah material berupa batu pecah atau kerikil alami yang berukuran lebih besar dari 4,75 mm dan berfungsi sebagai pengisi utama dalam campuran beton, termasuk beton pori (pervious concrete). Agregat kasar berperan penting dalam membentuk struktur kerangka beton, menentukan kekuatan tekan, daya tahan (durabilitas), serta porositas campuran. Oleh karena itu, sebelum digunakan, agregat kasar harus melalui serangkaian pemeriksaan laboratorium untuk memastikan kualitasnya sesuai standar. Berikut langkah-langkah pemeriksaan agregat kasar :

a. Analisa Saringan

Agregat kasar yang akan di uji ditimbang sesuai kebutuhan (± 5 kg), kemudian diayak menggunakan satu set saringan standar (19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, dan pan) sesuai SNI 03-1968-1990. Proses pengayakan dilakukan selama ± 10 menit dengan mesin pengayak atau secara manual. Setelah selesai, berat agregat yang tertahan pada tiap saringan ditimbang dan dicatat. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan distribusi ukuran butiran (gradasi) agregat. Untuk beton

pori, digunakan gradasi seragam (uniform grading) dengan ukuran butiran dominan 9,5–19 mm agar terbentuk rongga udara antar butir sebagai jalur permeabilitas.

$$\% \text{ Tertahan} = \frac{W_i}{W_t} \times 100\% \quad (3.4)$$

$$\% \text{ Lolos Kumulatif} = 100 - (\text{Jumlah } \% \text{ Kumulatif})$$

Keterangan :

- W_i = Berat agregat yang tertahan pada saringan ke-i (gram)
- W_t = Berat total sampel (gram)

b. Berat Jenis

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui massa jenis (specific gravity) dan daya serap air (absorption) agregat kasar berdasarkan SNI 1970:2008. Sampel agregat dikeringkan di oven hingga berat konstan, kemudian direndam dalam air selama 24 jam. Setelah itu, agregat dikeringkan hingga kondisi Surface Saturated Dry (SSD) dan ditimbang dalam tiga kondisi: kering oven, SSD, dan dalam air. Hasil penimbangan digunakan untuk menghitung berat jenis curah, berat jenis semu, serta penyerapan air, yang berpengaruh terhadap perhitungan proporsi campuran beton.

$$G_{ssd} = \frac{B}{B - C} \quad (3.5)$$

Keterangan :

- B = Berat agregat dalam kondisi SSD (gram)
- C = Berat agregat dalam air (gram)

c. Kadar Air

Pengujian kadar air merupakan prosedur untuk mengetahui jumlah air yang terkandung didalam pori-pori dan permukaan agregat dalam kondisi tertentu dengan menggunakan standar SNI 1971:2011. kadar air memiliki peran yang sangat berpengaruh terhadap rasio air efektif kedalam campuran beton, karena air yang sudah terserap atau terikat pada agregat akan mempengaruhi nilai water cement ratio yang direncanakan.

$$\text{Kadar air (\%)} = ((W_k - W_b)/W_k) \times 100\% \quad (3.6)$$

Keterangan:

W_k = Berat Kering Agregat

W_b = Berat Basah Agregat

3.7 Pembuatan Beton Pori

Berdasarkan ACI 522R-10 tentang *Pervious Concrete Report*, pembuatan benda uji beton pori bertujuan untuk menghasilkan spesimen yang dapat mewakili kondisi beton pori di lapangan secara konsisten, baik dari segi struktur internal, porositas, maupun kekuatan mekanis. Spesimen harus dipersiapkan sedemikian rupa agar hasil pengujian dapat diinterpretasikan secara objektif, terukur, dan dapat dibandingkan antarvariabel penelitian.

Berikut tahapan umum dalam proses pembuatan beton pori sesuai dengan panduan ACI 522R-10:

a. Persiapan Material

Material penyusun beton pori terdiri atas semen portland, agregat kasar bergradasi seragam (*uniformly graded coarse aggregate*), air, serta bahan tambahan (*admixture*) jika diperlukan. Agregat kasar yang digunakan harus bersih, keras, tahan aus, dan bebas dari debu, lempung, serta bahan organik, karena kontaminan dapat menghambat ikatan antara pasta semen dan agregat. Gradasi agregat yang umum direkomendasikan oleh ACI 522R-10 berada pada kisaran 9,5 mm

hingga 19 mm, dengan proporsi yang menghasilkan porositas efektif 15–25%. Rasio air-semen (w/c ratio) dijaga pada kisaran 0,27–0,35 untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan dan permeabilitas.

b. Penentuan Proporsi

Perencanaan campuran beton pori dilakukan dengan rasio air-semen remdah. Umumnya berkisar antara 0.26-0,45 untuk menghasilkan pasta semen yang cukup melapisi gregat tanpa mengisi rongga. Proporsi campuran disesuaikan dengan kuat tekan yang direncanakan dan permeabilitas yang diinginkan.

c. Persiapan Cetakan

Cetakan benda uji dibuat sesuai dengan ukuran standar ASTM C39/C192, umumnya berbentuk silinder berukuran 100 mm × 200 mm atau 150 mm × 150 mm tergantung kebutuhan pengujian kuat tekan. Cetakan harus dalam kondisi bersih, kering, kedap air, dan dilapisi minyak pelumas tipis (release agent) agar beton tidak menempel dan mudah dilepas setelah proses perawatan awal.

d. Proses Pencampuran

Pencampuran dilakukan sesuai dengan rekomendasi ACI 522R-10 Section 4.3, yaitu dengan mengaduk agregat kasar dan semen terlebih dahulu dalam keadaan kering hingga merata. Setelah itu, air ditambahkan sedikit demi sedikit sambil diaduk hingga semua butiran agregat terlapisi secara merata oleh pasta semen tipis. Proses pencampuran harus dilakukan secara cepat dan efisien, untuk menghindari kehilangan air akibat penguapan serta menjaga kestabilan pori dalam campuran. Pengadukan biasanya dilakukan menggunakan mixer berputar lambat (low-speed mixer) untuk mengurangi segregasi material.

e. Pengisian Beton dalam Cetakan

Campuran beton pori yang telah homogen dimasukkan ke dalam cetakan secara bertahap dalam dua atau tiga lapisan, sambil ditekan ringan menggunakan batang penusuk baja atau kayu. Tujuannya adalah untuk mengisi cetakan secara merata tanpa menyebabkan pemisahan agregat (segregation) maupun penutupan rongga udara antarbutir (clogging). Selama pengisian, harus dipastikan bahwa struktur pori tetap terbentuk secara kontinu di seluruh bagian benda uji.

f. Pemadatan Beton Pori

Menurut ACI 522R-10 Section 4.4, beton pori tidak boleh dipadatkan secara berlebihan karena dapat menutup pori dan mengurangi permeabilitas. Pemadatan dilakukan dengan tekanan ringan menggunakan pelat datar atau penumbuk kayu, cukup untuk menstabilkan agregat tanpa menghancurkan jaringan pori. Dalam beberapa kasus, pemadatan dapat dilakukan menggunakan vibrator permukaan frekuensi rendah, namun harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak mengakibatkan segregasi.

g. Perataan Permukaan

Permukaan beton pori diratakan menggunakan alat perata baja atau kayu (screed) hanya sampai campuran tampak padat dan rata. Tekanan yang diberikan harus minimal untuk menjaga porositas di lapisan permukaan atas agar beton tetap memiliki kemampuan drainase.

h. Pelepasan Cetakan

Setelah proses pencetakan dan pemadatan selesai, cetakan dilepas dalam waktu 24 jam setelah beton mencapai kekakuan yang cukup. ACI 522R-10 merekomendasikan agar pelepasan cetakan dilakukan tanpa guncangan atau hentakan untuk mencegah kerusakan pada struktur pori.

i. Perawatan (Curing)

Perawatan beton pori sangat penting untuk menjamin proses hidrasi semen berlangsung optimal, mengingat beton pori memiliki permukaan kontak yang tinggi antara pasta semen dan udara. Menurut ACI 522R-10 Section 4.6, curing dapat dilakukan dengan beberapa metode:

- Penutupan rapat dengan plastik kedap air untuk mempertahankan kelembapan internal
- Penyemprotan kabut air secara berkala selama 7 hari pertama.
- Perendaman sebagian (partial immersion) apabila dimungkinkan di laboratorium.

Perawatan harus dilakukan hingga beton mencapai umur uji rencana (28 hari) agar hasil kuat tekan dan sifat fisik lainnya mencerminkan performa sebenarnya dari beton pori di lapangan.

3.8 Perawatan (Curing)

Perawatan beton pori dilakukan untuk menjaga kelembapan beton agar proses hidrasi semen berjalan optimal tanpa merusak struktur porinya, dengan mengacu pada SNI 2493:2011 dan disesuaikan dengan karakter beton pori yang berongga dan berporositas tinggi. Setelah beton mencapai kekerasan awal, benda uji dilepas dari cetakan secara hati-hati lalu segera dirawat agar tidak kehilangan air terlalu cepat. Perawatan dilakukan dengan menjaga beton tetap lembap, misalnya melalui perendaman atau metode lain yang sesuai, serta disimpan pada lingkungan bersuhu terkontrol dan terhindar dari sinar matahari langsung maupun angin. Proses ini dilakukan sampai umur uji, umumnya 28 hari, agar perkembangan kekuatan beton berlangsung optimal dan hasil pengujian dapat dipertanggungjawabkan.

3.9 Mix Desain

Penentuan komposisi material penyusun beton pori dilakukan dengan tujuan memperoleh campuran yang tidak hanya ekonomis, tetapi juga mampu memenuhi persyaratan kekuatan dan keawetan sesuai rencana, serta memiliki tingkat kelecakan yang cukup agar proses pengerjaan di lapangan dapat berlangsung dengan baik. Pada penelitian ini, Abu Bawah Batu Bara dimanfaatkan sebagai bahan alternatif untuk menggantikan sebagian semen. Jumlah benda uji yang digunakan sebanyak 36 sampel, dengan variasi Abu Bawah Batu Bara pada substitusi agregat kasar sebesar 0%, 10%, 15%, dan 20% . Terdiri dari 3 sampel kuat tekan 10% , 3 sampel 15 % dan 3 sampel 20% , untuk pengujian kuat tekan menggunakan alat cetak berbentuk kubus dan porositas ,permeabilitas menggunakan alat cetak berbentuk silinder ,untuk persentasi dan jumlah sampel uji sama seperti kuat tekan.

Tabel 3. 1 Mix Desain

MIX DESAIN					
Variasi Beton	Fas	ABB	Jumlah Sampel Kuat Tekan	Jumlah Sampel Permeabilitas	Jumlah Sampel Porositas
BN	0,34	0	3	3	3
BP+ ABB	0,34	10%	3	3	3
BP+ ABB	0,34	15%	3	3	3
BP+ ABB	0,34	20%	3	3	3
TOTAL			12	12	12
TOTAL KESELURUHAN			36		

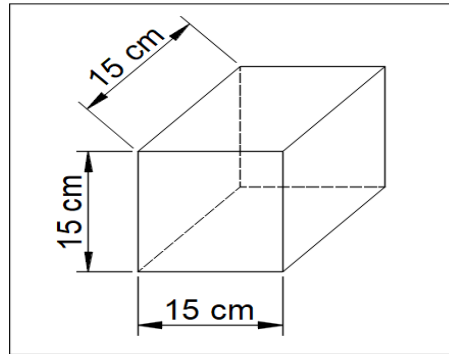
Keterangan:

- BN = Beton Normal
- BP+ABB = Beton Berpori + Campuran abu bawah batubara

3.10 Takaran Mix Desain

3.10.1 Cetakan Kubus

Acuan : ACI 255R (Spesifikasi beton pori untuk pengujian kuat tekan) SNI 03-6805-2002 (Kuat tekan). Dimensi Benda Uji:



Gambar 3. 25 Cetakan Kubus

Menghitung campuran mortar dengan perbandingan 1:4

Berat cetakan beton pori = 10.000 gr.

Volume Cetakan beton pori = $15 \times 15 \times 15$
= $0,003375 \text{ m}^3$

Berat isi semen = 1,180 kg

Berat isi agregat kasar = 4,700 kg

Faktor air semen = 0,34

Jumlah yang akan di cetak = 12 buah

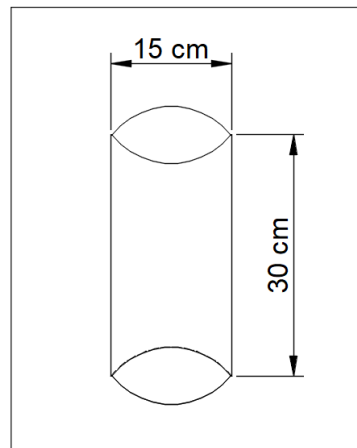
Catatan teknis:

1. Tidak ada slump tes
2. Pemadatan ringan menggunakan palu karet
3. Curing plastic min 7 hari
4. Target 2,8 - 28 mpa
5. Uji kuat tekan setelah 28 hari

3.10.2 Cetakan Silinder

Acuan : ACI 255R/ ASTM C1701 (Spesifikasi beton pori untuk pengujian porositas dan permeabilitas). Dimensi Benda Uji:

Dimensi benda uji:



Gambar 3. 26 Cetakan Silinder

Menghitung campuran beton pori dengan perbandingan 1:4

Berat cetakan beton pori = 10.000 gr.

Volume Cetakan beton pori $= v = 3,14 \times \frac{0,15^2}{4} \times 0,30$
 $= 0,0053 \text{ m}^3$

Berat isi semen = 1,850 kg

Berat isi agregat kasar = 7,400 kg

Faktor air semen = 0,34

Jumlah yang akan di cetak = 24 buah

Catatan teknis:

1. Tidak ada slump tes
2. Pemadatan ringan menggunakan palu karet
3. Curing plastic min 7 hari
4. Uji porositas dan permeabilitas setelah 28 hari

3.10.3 Kebutuhan Dasar Material Mix Desain

Tabel 3. 2 Kebutuhan Material

No.	Persentase	Semen (Kg)	Air (ml)	Agregat Kasar (kg)	ABB (kg)
1	BN	1,180	401	4,700	-
2	BP+ABB 10%	1,180	401	4,700	0,470
3	BP+ABB 15%	1,180	401	4,700	0,705
4	BP+ABB 20%	1,180	401	4,700	0,940

Tabel 3. 3 Kebutuhan Material Silinder

No.	Persentase	Semen (Kg)	Air (ml)	Agregat Kasar (kg)	ABB (kg)
1	BN	1,850	629	7,400	-
2	BP+ABB 10%	1,850	629	7,400	0,740
3	BP+ABB 15%	1,850	629	7,400	1,110
4	BP+ABB 20%	1,850	629	7,400	1,480

3.11 Pengujian Beton Pori

3.11.1 Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan berdasarkan (SNI) 1974:2011 cara uji kuat tekan beton dengan benda uji kubus diperoleh melalui persamaan berikut:

$$f'c(\text{MPa}) = \frac{P_{\text{maks}}}{A} \quad (3.7)$$

dimana:

$f'c$ = kuat tekan beton pori (MPa)

P_{maks} = beban tekan maksimum yang dicatat selama pengujian (N)

A = luas permukaan penampang benda uji (mm²)

3.11.2 Porositas

Besarnya nilai porositas dapat dihitung menggunakan persamaan rumus sebagai berikut:

$$n = \frac{M_{jenuh} - M_{kering}}{\rho \cdot V} \times 100\% \quad (3.8)$$

dimana:

n = Persentase porositas beton

M_{jenuh} = Berat benda uji setelah direndam hingga jenuh (gram)

M_{kering} = Berat benda uji setelah pengeringan (gram)

ρ = Massa jenis air (1 g/cm³)

V = Volume total benda uji (cm³)

3.11.3 Permeabilitas

Nilai pada permeabilitas beton berpori diperoleh melalui persamaan rumus berikut:

$$k = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (3.9)$$

Keterangan :

(k)= Koefisien permeabilitas (m/s atau cm/s)

(Q)= Volume air yang mengalir (m³)

(L)= Panjang/tebal benda uji (arah aliran)(m)

(A)=Luas penampang benda uji (m²)

(h) =Perbedaan tinggi tekanan air (head loss)(m)

(t) =Waktu aliran (s)

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1 Pemeriksaan Agregat Kerikil

4.1.1 Analisa Saringan

Berdasarkan acuan standar ASTM C33 dan ACI 522R, diperoleh hasil pengujian analisis saringan untuk agregat kasar sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Analisa Saringan Agregat Kasar Silinder

SIEVE SIZE	Retained Fraction				Cumulative	
	Sampel 1	Sampel 2	Total Weight (gr)	Retained (%) (% Berat Tertahan)	Cum Retained (% Kum Berat Tertahan)	Passing (%) Berat yang Lolos)
3/4"	210,45	185,6	396,05	4,71	4,71	95,29
1/2"	1465,8	1512,15	2977,95	35,45	40,17	59,83
3/8"	1680,25	1625,4	3305,65	39,35	79,52	20,48
No. 4	843,5	876,85	1720,35	20,48	100,00	0,00
Total	4200	4200	8400	100,00		
FM (Modulus Kehalusan):				2,24		
Wt. Of Oven Dry Sampel:				8400		

Tabel 4. 2 Analisa Saringan Agregat Kasar Kubus

SIEVE SIZE	Retained Fraction				Cumulative	
	Sampel 1	Sampel 2	Total Weight (gr)	Retained (%) (% Berat Tertahan)	Cum Retained (% Kum Berat Tertahan)	Passing (%) Berat yang Lolos)
3/4"	68,25	55,4	123,65	4,76	4,76	95,24
1/2"	442,9	460,15	903,05	34,73	39,49	60,51
3/8"	518,35	502,8	1021,15	39,28	78,76	21,24
No. 4	270,5	281,65	552,15	21,24	100,00	0,00
Total	1300	1300	2600	100,00		
FM (Modulus Kehalusan):				2,23		
Wt. Of Oven Dry Sampel:				2600		

Berdasarkan hasil uji saringan, material yang lolos ayakan 3/8 inci dan tertahan pada ayakan No. 4 ($\geq 4,75$ mm) dikategorikan sebagai agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton berpori. Fraksi ini berfungsi sebagai kerangka

utama penyusun beton, sehingga dapat membentuk ruang kosong di antara butiran agregat.

4.1.2 Berat Jenis

Hasil pemeriksaan menurut ASTM C127 dan ACI 255R berat jenis dan penyerapan agregat kasar sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Berat Jenis Agregat Kasar

Nama Contoh	Simbol	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Wt of SSD sample in Air (Berat contoh (SSD) kering permukaan jenuh) (A)	A	2220	1950	2085
Wt of SSD sample in Water (Berat contoh (SSD) didalam air) (B)	B	1490	1510	1500
Wt of Oven Dry Sample (Berat contoh (SSD) kering oven (110°C) Sampai Konstan (C)	C	2197	1934,4	2066
Bulk Sp. Gravity-Dry (Berat Jenis contoh kering)		3,01	4,40	3,70
Bulk Sp. Gravity-SSD (Berat jenis contoh SSD)		3,04	4,43	3,56
Apparent Sp. Gravity-Dry (Berat jenis contoh semu)		3,11	4,56	3,65
Penyerapan air (%)		1,05	0,81	0,93

Berdasarkan hasil pengujian, agregat kasar menunjukkan nilai berat jenis SSD rata-rata sebesar 2,45, berat jenis kering sebesar 2,40, serta berat jenis semu sebesar 2,53. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat masih tergolong sebagai agregat normal karena berada pada kisaran standar agregat normal menurut ASTM C127 dan ACI 255R, yaitu sekitar $\pm 2,5$. Selain itu, nilai penyerapan air rata-rata sebesar 2,16% termasuk dalam kategori rendah hingga sedang dan masih memenuhi batas yang diizinkan untuk material agregat kasar.

4.1.3 Kadar Air

Pengujian kadar air pada agregat kasar dilaksanakan berdasarkan ketentuan SNI 1971-2011 mengenai metode pemeriksaan kadar air agregat. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah kandungan air yang terdapat di dalam agregat kasar sebelum digunakan pada campuran beton.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kadar Air Agregat Kasar

Fine Agregate Passing	Satuan	Sampel 1	Sampel 2
Massa Wadah + Benda Uji (a)	gr	2055	2068
Massa Wadah (b)	gr	500	495
Massa Benda Uji (W1)	gr	1555	1573
Massa Wadah + Benda Uji Kering Oven (c)	gr	2045	2060
Massa Benda Uji Kering Oven (W2)	gr	1545	1565
Kadar Air Total (P)	%	0.65	0.51
Rata - Rata	%	0.58	

4.2 Pemeriksaan Agregat Kasar ABB

4.2.1 Analisa Saringan

Hasil pengujian dan analisa saringan pada abu bawah batubara yang memiliki berat sampel 2000 gram sampel ABB difokuskan untuk fraksi agregat kasar yang tertahan di atas saringan No. 4, menggunakan nilai Modulus Kehalusan (FM) sebesar 2,61. Didapati hasil menunjukkan bahwa material alam ini didominasi oleh butiran material berukuran besar ($>3/8$ inci) sebanyak 74%. Demi memenuhi kinerja mutu beton berpori, dilakukan pemisahan ukuran untuk

mengambil fraksi spesifik yang lolos saringan 3/8 inci dan tertahan di saringan no 4 (Sebesar 26%). Fraksi target inilah dihunakan untuk kerangka utama struktur beton guna memastikan terciptanya rongga saling terhubung (interconnected voids) yang optimal, sementara fraksi butiran halus di eliminasi agar tidak terjadinya penyumbatan pada pori beton.

Tabel 4. 5 Analisa Saringan Abu Bawah Batubara

SIEVE SIZE	Retained Fraction				Cumulative	
	Sampel 1	Sampel 2	Total Weight (gr)	Retained (%) (% Berat Tertahan)	Cum Retained (% Kum Berat Tertahan)	Passing (%) Berat yang Lolos)
3/4"	225	355	580,0	29,00	29,00	71,00
1/2"	280	290	570,0	28,50	57,50	42,50
3/8"	220	110	330,0	16,50	74,00	26,00
No. 4	275	245	520,0	26,00	100,00	0,00
Total	1000	1000	2000,0	100,00		
FM (Modulus Kehalusan):				2,61		
Wt. Of Oven Dry Sampel:				2000		

4.2.2 Berat Jenis

Berdasarkan pengujian berat jenis menyatakan bahwa ABB memiliki karakteristik agregat ringan berdasarkan ciri umum pada standar ACI 213R, hal ini berdasarkan nilai Bulk Sp Gravity-Dry sebesar 1,47 dan ACI menyatakan jika nilai dibawah nilai agregat normal maka dinyatakan agregat ringan.

Tabel 4. 6 Berat Jenis Abu Bawah

Nama Contoh	Simbol	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Wt of SSD sample in Air (Berat contoh (SSD) kering permukaan jenuh) (A)	A	500,00	500,00	500,00
Wt of SSD sample in Water (Berat contoh (SSD) didalam air) (B)	B	218,00	221,50	219,75
Wt of Oven Dry Sample (Berat contoh (SSD) kering oven (110°C) Sampai Konstan (C)	C	410,00	415,00	412,50
Bulk Sp. Gravity-Dry (Berat Jenis contoh kering)		1,45	1,49	1,47
Bulk Sp. Gravity-SSD (Berat jenis contoh SSD)		1,77	1,80	1,78

Tabel 4.6 *Lanjutan*

Apparent Sp. Gravity-Dry (Berat jenis contoh semu)		2,14	2,14	2,14
Penyerapan air (%)		21,95%	20,48%	21%

4.2.3 Kadar Air

Berdasarkan hasil pengujian dibawah yang berpanduan terhadap SNI 1971:2011, kadar air total rata rata didapati sebesar 18% maka tidak diperlukannya perlakuan khusus untuk mengatasi penyerapan air pada pengujian berat jenis yang sebesar 21%, sehingga ABB dipastikan tidak mengambil air pada pasta semen terlalu banyak.

Tabel 4. 7 Kadar Air Abu Bawah Batubara

Fine Agregate Passing	Satuan	Sampel 1	Sampel 2
Massa Wadah + Benda Uji (a)	gr	1015	750
Massa Wadah (b)	gr	515	250
Massa Benda Uji (W1)	gr	500	500
Massa Wadah + Benda Uji Kering Oven (c)	gr	945,7	669,5
Massa Benda Uji Kering Oven (W2)	gr	430,7	419,5
Kadar Air Total (P)	%	0,16	0,19
Rata - Rata	%	0,18	

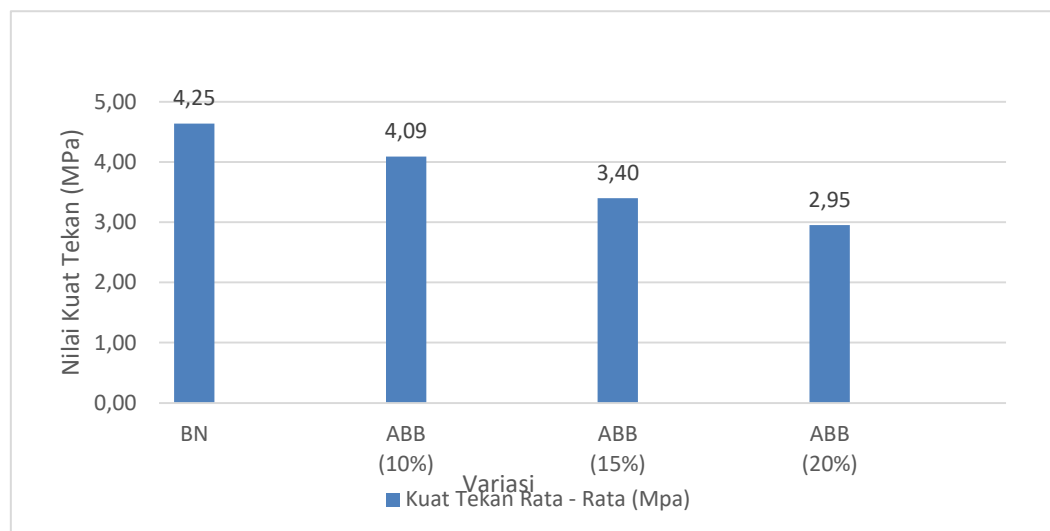
4.2 Hasil Dan Pengujian Beton Berpori

4.2.1 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan pada penelitian ini dilakukan pada saat beton umur 28 hari dengan jumlah benda uji 3 setiap variasi. Pengujian kuat tekan beton pada penelitian ini menggunakan mesin kuat tekan dengan kapasitas 1200 KN. Dengan ukuran benda uji yang akan di uji yaitu berupa kubus dengan ukuran 15 x15 x15 cm. berikut merupakan hasil pengujian kuat tekan beton.

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Variasi	Benda Uji	Luas (mm ²)	Beban Maksimum (KN)	Kuat Tekan (Mpa)	Kuat Tekan Rata - Rata (Mpa)
BN	1	22,500	88,29	3,92	4,25
	2	22,500	102,9	4,57	
	3	22,500	95,65	4,25	
ABB (10%)	1	22,500	88,29	3,92	4,09
	2	22,500	92,214	4,10	
	3	22,500	95,6475	4,25	
ABB (15%)	1	22,500	73,575	3,27	3,40
	2	22,500	76,518	3,40	
	3	22,500	79,461	3,53	
ABB (20%)	1	22,500	70,632	3,14	2,95
	2	22,500	66,2175	2,94	
	3	22,500	62,2935	2,77	



Gambar 4.1 Grafik Hasil Nilai Kuat Tekan Rata-Rata

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, beton berpori normal memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 4,25 MPa dan pada persentase substitusi 10%, 15%, dan 20% mendapatkan kuat tekan rata-rata sebesar 4,09 MPa, 3,40 MPa dan 2,95

MPa. Hasil tersebut konsisten mengalami penurunan seiring bertambahnya substitusi terhadap agregat kasar pada beton berpori.

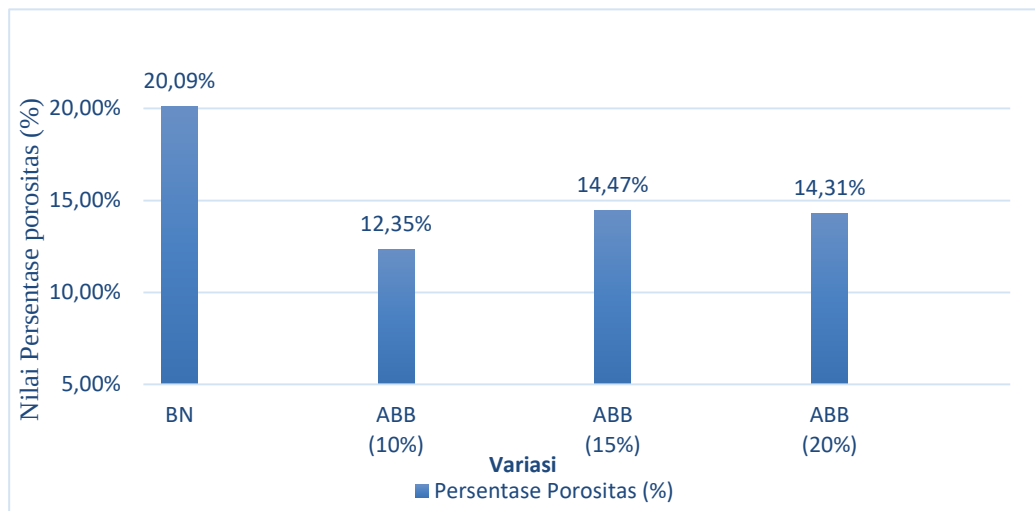
Hasil kuat tekan beton normal kami yang sebesar 4,25 Mpa selaras dengan hasil dari peneliti terdahulu (Ibrahim et al., 2014) dengan desain mix yang di ambil untuk menjadi acuan dan validasi yaitu desain PC 16 yang memiliki nilai kuat tekan 4,76 Mpa, Pemilihan ini didasari oleh gradasi agregat, Semen, FAS yang mendekati dari mix desain kami.

4.2.2 Pengujian Porositas

Pengujian porositas beton berpori dilakukan pada umur 28 hari dengan jumlah benda uji sebanyak tiga sampel pada setiap variasi campuran. Tujuan pengujian ini adalah untuk menentukan persentase rongga (void ratio) yang terdapat dalam beton berpori. Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Hasil pengujian porositas beton bepori terdapat pada tabel berikut.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Porositas

Variasi	Benda Uji	M Jenuh	M Kering	ρ Air	Volume Benda uji	Persentase porositas beton	Rata - Rata
BN	1	8925	7865	1	5298,75	20%	20,09%
	2	8850	7756	1	5298,75	21%	
	3	8890	7850	1	5298,75	20%	
ABB 10%	1	9155	8505	1	5298,75	12,27%	12,35%
	2	9185	8530	1	5298,75	12,36%	
	3	9138	8480	1	5298,75	12,42%	
ABB 15%	1	9480	8715	1	5298,75	14,44%	14,47%
	2	9445	8685	1	5298,75	14,34%	
	3	9515	8740	1	5298,75	14,63%	
ABB 20%	1	8505	7745	1	5298,75	14,34%	14,31%
	2	8485	7725	1	5298,75	14,34%	
	3	8535	7780	1	5298,75	14,25%	



Gambar 4. 2 Grafik Porositas Rata-Rata

Berdasarkan hasil pengujian, beton berpori normal memiliki nilai porositas rata-rata sebesar **20,06%**. Penurunan porositas pada persentase 10% disebabkan oleh kepadatan isi material kerangka agregat dan kepadatan ini adalah yang terbaik sebagai filler namun tidak sebagai pengganti agregat kasar. Namun pada persentase 15%-20%, bentuk ABB yang angular dan tajam membuat agregat mengunci pada saat dipadatkan, ditambah kurangnya daya pelumasan pada pasta semen memaksa susunan agregat menjauh hingga ruang berpori kembali terbentuk.

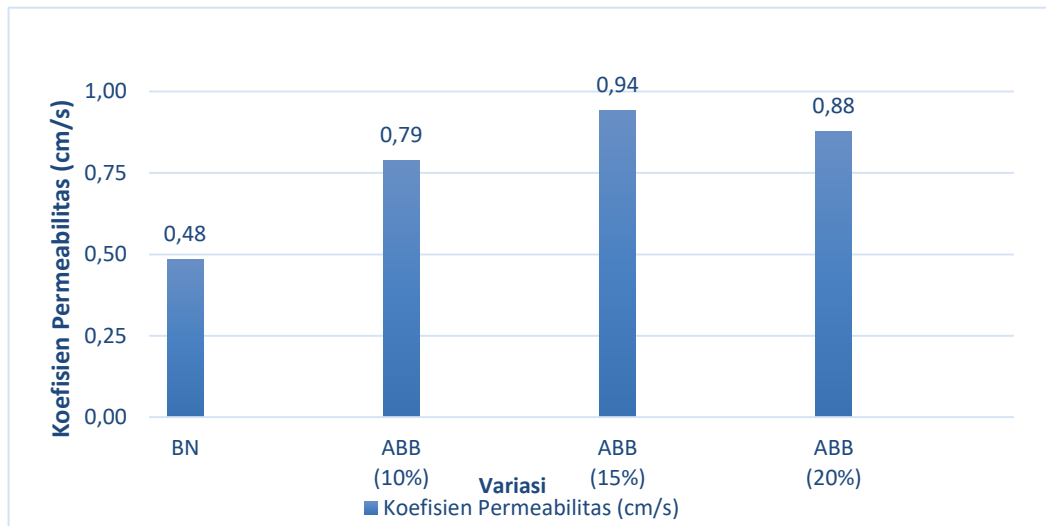
Pola perubahan nilai hasil porositas ini dapat diambil kesimpulan, penambahan persentase ABB menentukan karakteristik beton berpori yang dihasilkan. Ketika penggunaan ABB terlalu sedikit (10%) maka material ini justru lebih banyak mengisi celah kosong pada beton hingga padat dan mengecilkan pori-pori yang ada. Hal ini berbanding terbalik dikarenakan pada persentase 15% adalah proporsi terbaik dan secara faktual terbukti dengan memiliki nilai porositas tertinggi di antara persentase lainnya dengan hasil nilai sebesar 14,47 %. Hal ini menyebabkan ketersediaan rongga untuk jalur air mengalir.

4.2.3 Pengujian Permeabilitas

Pengujian permeabilitas dilakukan ketika beton telah mencapai umur 28 hari. Pada setiap variasi campuran digunakan 3 benda uji untuk memperoleh hasil yang lebih representatif. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton dalam mengalirkan air dengan menggunakan metode Constant Head. Selama pengujian, tinggi muka air dijaga tetap konstan, kemudian volume air yang melewati benda uji diukur dalam jangka waktu tertentu. Hasil pengukuran tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai koefisien permeabilitas beton. Berikut merupakan hasil pengujian permeabilitas beton pada setiap variasi campuran yang telah dilakukan.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Permeabilitas

Variasi	Benda Uji	Luas (A) (mm ²)	Tebal Benda Uji (L)	Head Air, h (cm)	Volume air (Q) (cm ³)	Waktu, t (detik)	Koefisien Permeabilitas (cm/s)	Permeabilitas Rata - Rata (cm/s)
BN	1	176,71	30	11,32	1950	59,89	0,49	0,48
	2	176,71	30	11,32	1920	60,15	0,48	
	3	176,71	30	11,32	1900	58,72	0,49	
ABB (10%)	1	176,71	30	11,32	1815	35,17	0,77	0,79
	2	176,71	30	11,32	1812	34,67	0,78	
	3	176,71	30	11,32	1810	33,77	0,80	
ABB (15%)	1	176,71	30	11,32	1870	28,79	0,97	0,94
	2	176,71	30	11,32	1878	30,74	0,92	
	3	176,71	30	11,32	1873	29,92	0,94	
ABB (20%)	1	176,71	30	11,32	1826	31,2	0,88	0,88
	2	176,71	30	11,32	1820	30,94	0,88	
	3	176,71	30	11,32	1829	31,57	0,87	

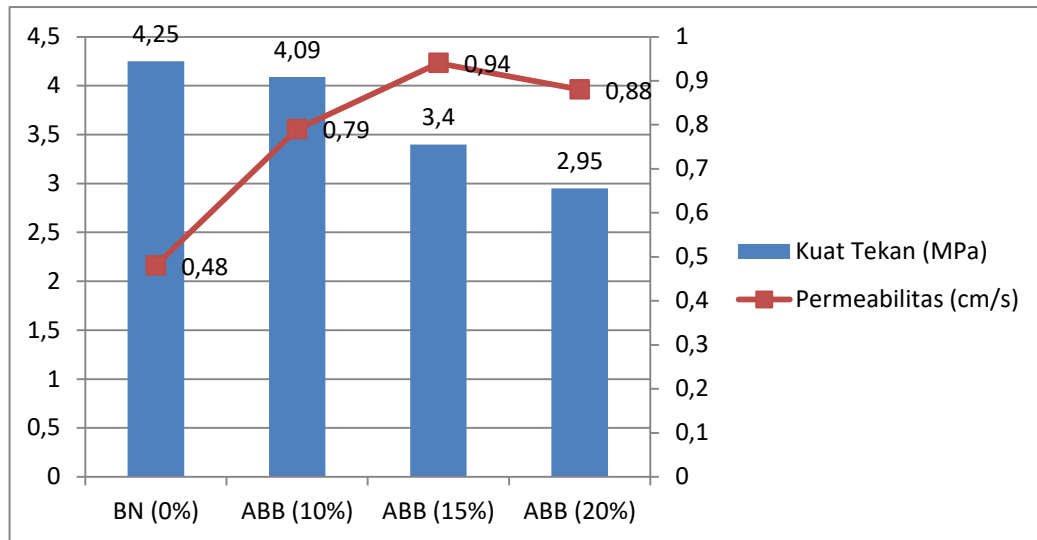


Gambar 4. 3 Grafik Rata-Rata Permeabilitas

koefisien permeabilitas mengalami lonjakan yang signifikan seiring dengan penambahan persentase ABB sehingga pada variasi tertentu. Nilai permeabilitas meningkat drastis dari 0,48 cm/s pada beton normal (BN) menjadi 0,79 cm/s pada substitusi ABB 10%. hal ini berlanjut mengalami peningkatan hingga persentase optimum yaitu 15, hasil dari pengujian menunjukkan koefisien 15% yaitu sebesar 0,94 cm/s. Hal ini membuktikan bahwa variasi 15% adalah komposisi yang paling ideal dalam menghasilkan rongga pori yang saling terhubung untuk jalan air dengan maksimal.

Namun demikian, tren kenaikan tersebut tidak berlanjut terhadap persentase lebih tinggi yaitu substitusi ABB 20%. Pada persentase 20%, nilai koefisien permeabilitas sedikit mengalami penurunan menjadi 0,88 cm/s jika dibandingkan dengan variasi 15%. Penurunan ini merupakan bukti konkrit bahwasanya 15% adalah batas variasi ABB, dan hasil permeabilitas ini sejalan dengan hasil porositas sebelumnya yang mana porositas mengalami sedikit penurunan sehingga menghasilkan nilai permeabilitas mengalami sedikit penurunan juga. Kemungkinan indikasi lain juga disebabkan oleh proporsi ABB yang terlalu besar (melebihi batas 15%) dapat menyebabkan kerangka agregat di kandungan campuran menjadi terlalu padat, atau bentuk angular dari ABB mulai saling mengunci (interlocking yang terlalu padat), sehingga menyebabkan menyempitnya ruang kosong antar agregat dan memperkecil laju aliran air.

4.2.4 Analisis Penentuan Proporsi Optimum Campuran Beton Berpori



Gambar 4. 4 Grafik Korelasi Kuat Tekan dan Permeabilitas

Berdasarkan grafik diatas sangat jelas terlihat adanya korelasi berbanding terbalik antara nilai kuat tekan dan koefisien permeabilitas seiring dengan perubahan variasi Abu Bawah Batubara (ABB). Secara teoritis terhadap beton berpori, peningkatan rongga yang memfasilitasi permeabilitas air secara langsung mengurangi luas area solid yang memikul beban, sehingga mereduksi kemampuan kuat tekannya.

Penentuan komposisi optimal didasarkan pada konsep mencari keseimbangan terbaik antara performa hidrologis dan kapasitas struktural. Pada variasi ABB 15%, permeabilitas mencapai titik tertinggi (0,94 cm/s) dengan kuat tekan 3,40 MPa yang masih memenuhi batas aman ACI 522R-10 ($\geq 2,8$ MPa). Pada variasi 20%, kinerja permeabilitas (0,88 cm/s) dan kuat tekan (2,95 MPa) justru turun akibat interlocking agregat berlebih. Dengan demikian, substitusi ABB 15% dengan rasio 1 : 3,4 : 0,6 : 0,34 disimpulkan sebagai komposisi paling optimum.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai penggunaan abu bawah batubara sebagai pengganti sebagian semen pada campuran beton berpori, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penggunaan abu bawah batubara memberikan pengaruh terhadap kuat tekan beton berpori. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, beton berpori normal memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 4,25 Mpa dan pada persentase substitusi 10%, 15%, dan 20% mendapatkan kuat tekan rata-rata sebesar 4,09 Mpa, 3,40 Mpa dan 2,95 Mpa. Hasil tersebut konsisten mengalami penurunan seiring bertambahnya substitusi terhadap agregat kasar pada beton berpori.
2. Penambahan abu bawah batubara juga memengaruhi nilai porositas beton berpori. Berdasarkan hasil pengujian, beton berpori normal memiliki nilai porositas rata-rata sebesar 20,06%. Penurunan porositas pada persentase 10% disebabkan oleh kepadatan isi material kerangka agregat dan kepadatan ini adalah yang terbaik sebagai filler namun tidak sebagai pengganti agregat kasar. Namun pada persentase 15%-20%, bentuk ABB yang angular dan tajam membuat agregat mengunci pada saat dipadatkan, ditambah kurangnya daya pelumasan pada pasta semen memaksa susunan agregat menjauh hingga ruang berpori kembali terbentuk.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton berpori normal memiliki nilai permeabilitas rata-rata sebesar 0,48 cm/s. Substitusi yang dilakukan terhadap agregat kasar pada persentase 10% 15% dan 20% dapat meningkatkan permeabilitas terhadap beton berpori, ini dapat terjadi dikarenakan bentuk

ABB yang angular dan berbentuk tajam dapat mengunci agregat sehingga menciptakan ruang kosong yang dapat dilalui oleh air.

4. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, porositas, dan permeabilitas, Variasi terbaik dalam pemanfaatan abu bawah batubara adalah pada persentase 15%, persentase 15% di dapati bahwasanya kuat tekan yang didapati masih diatas standar minimum yang diatur oleh ACI 522R-10 yaitu sebesar 3,40 Mpa (didas 2,8 Mpa berdasarkan ACI 522R-10), porositas yang didapatkan sebesar 14,47% dan permeabilitas yang dihasilkan sebesar 0,94 cm/s. Beton yang dihasilkan cukup untuk menahan beban minium dengan porositas yang rendah namun baik dalam hal mengalirkan air menuju ke tanah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat menjadi pertimbangan untuk penelitian selanjutnya.

1. Penelitian berikutnya disarankan untuk memvariasikan abu bawah batubara (ABB) yang masih dalam bentuk agregat kasar dengan ABB yang dalam bentuk agregat halus.
2. Untuk mengatasi abu bawah batubara yang terlalu banyak menyerap air yaitu dilakukan dengan cara perendaman agregat ABB dalam skala waktu 1 hari dan mengeringkan agregat hingga dalam kondisi SSD.
3. Pengujian yang dilakukan sebaiknya tidak hanya terbatas pada kuat tekan, porositas, dan permeabilitas, tetapi juga dilengkapi dengan pengujian lain seperti kuat tarik belah, kuat lentur, ketahanan terhadap abrasi, serta durabilitas beton agar karakteristik beton berpori dapat diketahui secara lebih menyeluruh.
4. Penelitian selanjutnya juga dapat mengkaji pengaruh faktor lain, seperti variasi faktor air-semen (FAS), ukuran agregat, maupun penggunaan bahan tambah lainnya yang dipadukan dengan abu bawah batubara untuk memperoleh campuran beton berpori dengan performa yang lebih baik.

5. Sebelum diterapkan secara luas di lapangan, perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai kinerja beton berpori yang menggunakan abu bawah batubara terhadap kondisi lingkungan sebenarnya, seperti pengaruh beban lalu lintas, perubahan cuaca, serta umur layan beton. Dengan demikian, hasil penelitian dapat menjadi acuan dalam pengembangan beton berpori yang lebih ramah lingkungan dan memiliki kinerja yang baik untuk konstruksi perkerasan maupun sistem drainase.

DAFTAR PUSTAKA

- Abinawa, C., Gobel, A. P., Pertambangan, J. T., Teknik, F., Sriwijaya, U., & Selatan, S. (2024). *Studi Pengolahan Limbah Fly Ash Batubara dalam Upaya Peningkatan Konsentrasi Silika Menggunakan Asam Sitrat*. 3(3), 288–296. <https://doi.org/10.55123/insologi.v3i3.3519>
- ACI, 10 522R. (2010). *10 522R ACI*.
- Adresi, M., Yamani, A., Karimaei, M., & Rooholamini, H. (2023). *A comprehensive review on pervious concrete*. 407(July).
- bpbd. (2020). *Grafik Data Bencana Kota Medan 2020*. Bpbd.Medan.Go.Id. <https://bpbd.medan.go.id/menu/Profil/Grafik-Data-Bencana-Kota-Medan-2020.html>
- Dewi, S. U., Studi, P., Sipil, T., Teknik, F., Metro, U. M., Ash, F., Tekan, K., Beton, B., Tarik, K., & Beton, B. (2021). *Analisa penambahan bottom ash terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton*. 02(02), 31–45.
- Elango, K. S., Gopi, R., Saravanakumar, R., Rajeshkumar, V., Vivek, D., & Raman, S. V. (2020). Materials Today : Proceedings Properties of pervious concrete – A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.839>
- Hamzah, M. S., & Rochmah, N. (2025). *Pengaruh Gradasi Agregat terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas pada Beton Porus*. 5(3), 558–563.
- Haziman, M., Ibrahim, W., Mangi, S. A., Yahya, M., & Al-fasih, M. (2021). *Influence of Lime and Coal Bottom Ash as Partial Cement Replacement Material on Mechanical Properties of Concrete*. 12(2), 89–96.
- Hung, V. V., Seo, S., Kim, H., & Lee, G. (2021). *Permeability and Strength of Pervious Concrete According to Aggregate Size and Blocking Material*.
- Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., & Chowdary, V. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. *Construction and Building Materials*, 50, 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>
- Ihsyan, N. Al, & Syahputri, D. (2024). *Engineering , Environment , and Technology Analysis of the Effect of Bagasse Addition on Compressive Strength , Porosity , and Permeability of Pervious Concrete as Material for Green Building Program*. 9(4), 2–7. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2024.9.04.15093>
- Iman, M. B., & Syafira, F. (2024). *Analisis Peraturan Pemerintah Nomor 22 tahun 2021*. 283–296.
- Jamaluddin, N., Arshad, M. F., & Ramadhansyah, P. J. (2019). *EFFECTS OF*

GROUND COAL BOTTOM ASH ON THE PROPERTIES OF CONCRETE. 14(1), 338–350.

Jambri, S. S., & Ali, N. (2023). *Performance of Coal Bottom Ash as Partial Cement Replacement in Mortar*. 4(2), 189–196.

Lee, B. J., Prabhu, G. G., Lee, B. C., & Kim, Y. Y. (2016). *Eco-friendly porous concrete using bottom ash aggregate for marine ranch application*. <https://doi.org/10.1177/0734242X15620006>

Mangi, S. A., Haziman, M., Ibrahim, W., Jamaluddin, N., Arshad, M. F., & Mudjanarko, S. W. (2019). *Recycling of Coal Ash in Concrete as a Partial Cementitious Resource*. 7–9.

Nazeer, M., Kapoor, K., & Singh, S. P. (2020). *Pervious concrete : a state-of-the-art review*. 7, 417–437.

portal. (2023). *Progres Pembangunan Infrastruktur Permukiman Kawasan Kota Lama Kesawan Medan Telah Capai 54,830%*. Portal.Medan.Go.Id. https://portal.medan.go.id/berita/progres-pembangunan-infrastruktur-permukiman-kawasan-kota-lama-kesawan-medan-telah-capai-54830__read3124.html?utm_source=chatgpt.com

Sánchez-Mendieta, C., Galán-Díaz, J. J., & Martinez-Lage, I. (2024). *Relationships between density , porosity , compressive strength and permeability in porous concretes : Optimization of properties through control of the water-cement ratio and aggregate type*. 97(July), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110858>

Seenii, B. S., Madasamy, M., Seenii, B. S., Seenii, B. S., & Madasamy, M. (2021). *Factors influencing performance of pervious concrete*. 73, 1017–1030.

Septriasyah, V., & Umari, Z. F. (2022). *Analisa campuran bottom ash sebagai bahan campuran agregat halus dalam pembuatan beton ringan*. 07(04), 190–194.

Shan, J., Zhang, Y., Wu, S., Lin, Z., Li, L., & Wu, Q. (2022). *Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes*. *Construction and Building Materials*, 327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126874>

Tuan, N. K., Minh, P. Q., Giang, N. H., Dung, N. T., & Kawamoto, K. (2023). *POROSITY AND PERMEABILITY OF PERVIOUS CONCRETE USING CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE IN VIETNAM*. 24(101).

LAMPIRAN

A. Perhitungan Kebutuhan Bahan

Data dasar mix desain untuk kg/m^3

1. Semen

Berat semen yang dipakai sebesar 350 kg/m^3 . Berdasarkan ACI 522R-10 rasio yang diizinkan yaitu $300 - 400 \text{ kg/m}^3$, maka semen yang dibutuhkan untuk membuat 1 benda uji yaitu:

$$\text{Kubus} = 350 \text{ kg/m}^3 \times 0,003375 \text{ m}^3 = \pm 1,180 \text{ kg}$$

$$\text{Silinder} = 350 \text{ kg/m}^3 \times 0,005301 \text{ m}^3 = \pm 1,850 \text{ kg}$$

2. Agregat Kasar

Berat agregat kasar yang dipakai sebesar 1400 kg/m^3 . Berdasarkan ACI 522R-10 rasio yang diizinkan yaitu $1400 - 1600 \text{ kg/m}^3$, maka agregat kasar yang dibutuhkan untuk membuat 1 benda uji yaitu:

$$\text{Kubus} = 1400 \text{ kg/m}^3 \times 0,003375 \text{ m}^3 = \pm 4,700 \text{ kg}$$

$$\text{Silinder} = 1400 \text{ kg/m}^3 \times 0,005301 \text{ m}^3 = \pm 7,400 \text{ kg}$$

3. Air

Rasio FAS yang dipakai sebesar 0,34. Berdasarkan ACI 522R-10 rasio w/c yang diizinkan yaitu $0,27 - 0,34$, maka Air yang dibutuhkan untuk membuat 1 benda uji yaitu:

$$\text{Kubus} = \pm 1,180 \text{ kg} \times 0,34 = 0,401 \text{ kg} = \pm 401 \text{ ml}$$

$$\text{Silinder} = \pm 1,850 \text{ kg} \times 0,34 = 0,629 \text{ kg} = \pm 629 \text{ ml}$$

4. Abu Bawah Batubara

Persenan ABB yang dipakai yaitu 10%, 15% dan 20% dikali dengan total berat agregat kasar, maka ABB yang dibutuhkan untuk membuat 1 benda uji yaitu:

a. ABB 10%

$$\text{Kubus} = \pm 4,700 \text{ kg} \times 10\% = \pm 0,470 \text{ kg}$$

$$\text{Silinder} = \pm 7,400 \text{ kg} \times 10\% = \pm 0.740 \text{ kg}$$

b. ABB 15 %

$$\text{Kubus} = \pm 4,700 \text{ kg} \times 15\% = \pm 0.705 \text{ kg}$$

$$\text{Silinder} = \pm 7,400 \text{ kg} \times 15\% = \pm 1,110 \text{ kg}$$

c. ABB 20%

$$\text{Kubus} = \pm 4,700 \text{ kg} \times 20\% = \pm 0,940 \text{ kg}$$

$$\text{Silinder} = \pm 7,400 \text{ kg} \times \% = \pm 1,480 \text{ kg}$$

B. Pengujian Kuat Tekan

a. Perhitungan Kuat Tekan Beton Normal

Hasil dari pengujian kuat tekan pada beton normal sebagai berikut:

Benda Uji 1 (A1)

- Beban (P) = 9 ton x 9.81 = 88.29 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$
= $\frac{88.29 \text{ Kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$
= $\frac{88.290 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$
= 3.924 N/mm²
= 3.92 MPa

Benda Uji 2 (A2)

- Beban (P) = 10.5 ton x 9.81 = 102.9 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$
= $\frac{102.9 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$
= $\frac{102.90 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$
= 4.573 N/mm²
= 4.6 MPa

Benda Uji 3 (A3)

- Beban (P) = 9.75 ton x 9.81 = 95.65 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$
= $\frac{95.65 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$

$$\begin{aligned}
&= \frac{95.650 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2} \\
&= 4.25 \text{ N/mm}^2 \\
&= 4.25 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Hasil Kuat Tekan Beton Rata-Rata

$$\begin{aligned}
\text{Kuat Tekan Beton Rata- Rata} &= \frac{\text{Hasil A1}+\text{Hasil A2}+\text{Hasil A3}}{3} \\
&= \frac{3.9 + 4.6 + 4.25}{3} \\
&= 4.25 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

b. Perhitungan Kuat Tekan Beton Variasi ABB (10%)

Benda Uji 1 (B1)

- Beban (P) = 9,00 ton x 9.81 = 88,29 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$

$$\begin{aligned}
&= \frac{88,29 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2} \\
&= \frac{88.290 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2} \\
&= 3,924 \text{ N/mm}^2 \\
&= 3,92 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Benda Uji 2 (B2)

- Beban (P) = 9,40 ton x 9.81 = 92,21 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$

$$\begin{aligned}
&= \frac{92,21 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2} \\
&= \frac{92.140 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2} \\
&= 4,098 \text{ N/mm}^2 \\
&= 4,10 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Benda Uji 3 (B3)

- Beban (P) = 9,75 ton x 9.81 = 95,65 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$
$$= \frac{95,65 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$$
$$= \frac{95.651 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$$
$$= 4,251 \text{ N/mm}^2$$
$$= 4,25 \text{ MPa}$$

Hasil Kuat Tekan Beton Rata-Rata

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan Beton Rata- Rata} &= \frac{\text{Hasil B1} + \text{Hasil B2} + \text{Hasil B3}}{3} \\ &= \frac{3,92 + 4,10 + 4,25}{3} \\ &= 4,09 \text{ MPa}\end{aligned}$$

b. Perhitungan Kuat Tekan Beton Variasi ABB (15%)

Benda Uji 1 (C1)

- Beban (P) = 7,50 ton x 9.81 = 73,58 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$
$$= \frac{73,58 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$$
$$= \frac{73.580 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$$
$$= 3,27 \text{ N/mm}^2$$
$$= 3,30 \text{ MPa}$$

Benda Uji 2 (C2)

- Beban (P) = 7,80 ton x 9.81 = 73,58 Kn
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm²

- Kuat Tekan Beton $= \frac{P}{A}$
 $= \frac{73,58 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$
 $= \frac{73.580 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$
 $= 3,401 \text{ N/mm}^2$
 $= 3.40 \text{ MPa}$

Benda Uji 3 (C3)

- Beban (P) $= 8,10 \text{ ton} \times 9.81 = 79,46 \text{ Kn}$
- Luas Kubus (A) $= 22.500 \text{ mm}^2$
- Kuat Tekan Beton $= \frac{P}{A}$
 $= \frac{79,46 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$
 $= \frac{79.460 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$
 $= 3,532 \text{ N/mm}^2$
 $= 3,53 \text{ MPa}$

Hasil Kuat Tekan Beton Rata-Rata

$$\text{Kuat Tekan Beton Rata- Rata} = \frac{\text{Hasil C1} + \text{Hasil C2} + \text{Hasil C3}}{3}$$

$$= \frac{3,30 + 3,40 + 3,53}{3}$$

$$= 3.40 \text{ MPa}$$

c. Perhitungan Kuat Tekan Beton Variasi ABB (20%)

Benda Uji 1 (D1)

- Beban (P) $= 7,20 \text{ ton} \times 9.81 = 70,63 \text{ Kn}$
- Luas Kubus (A) $= 22.500 \text{ mm}^2$
- Kuat Tekan Beton $= \frac{P}{A}$
 $= \frac{70,63 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$
 $= \frac{70.630 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$

$$= 3,139 \text{ N/mm}^2$$

$$= 3,14 \text{ MPa}$$

Benda Uji 2 (D2)

- Beban (P) = $6,75 \text{ ton} \times 9.81 = 66,22 \text{ Kn}$
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm^2
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$

$$= \frac{66,22 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$$

$$= \frac{66.220 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$$

$$= 2,943 \text{ N/mm}^2$$

$$= 2,94 \text{ MPa}$$

Benda Uji 3 (D3)

- Beban (P) = $6,35 \times 9.81 = 62,29 \text{ Kn}$
- Luas Kubus (A) = 22.500 mm^2
- Kuat Tekan Beton = $\frac{P}{A}$

$$= \frac{62,29 \text{ kn} \times 1000}{22.500 \text{ mm}^2}$$

$$= \frac{62.290 \text{ N}}{22.500 \text{ mm}^2}$$

$$= 2,769 \text{ N/mm}^2$$

$$= 2,77 \text{ MPa}$$

Hasil Kuat Tekan Beton Rata-Rata

$$\text{Kuat Tekan Beton Rata- Rata} = \frac{\text{Hasil D1} + \text{Hasil D2} + \text{Hasil D3}}{3}$$

$$= \frac{3,14 + 2,94 + 2,77}{3}$$

$$= 2,95 \text{ MPa}$$

C. Pengujian Porositas.

a. Perhitungan Porositas Beton Berpori Normal

Hasil pengujian permeabilitas pada beton normal sebagai berikut:

Benda Uji 1 (A1)

- M (Jenuh) = 8925 gr
- M (Kering) = 7865 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$
 $= \frac{8925 \text{ gr} - 7865 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$
 $= 20 \%$

Benda Uji 2 (A2)

- M (Jenuh) = 8850 gr
- M (Kering) = 7756 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$
 $= \frac{8850 \text{ gr} - 7756 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$
 $= 20.65\%$

Benda Uji 3 (A3)

- M (Jenuh) = 8890 gr
- M (Kering) = 7850 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$

$$= \frac{8890 \text{ gr} - 7850 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$$

$$= 19.62 \%$$

Hasil Porositas Beton Rata-Rata

$$\text{Porositas Beton Rata- Rata} = \frac{\text{Hasil A1} + \text{Hasil A2} + \text{Hasil A3}}{3}$$

$$= \frac{20 + 20.65 + 19.62}{3}$$

$$= 20.09\%$$

b. Perhitungan Porositas Variasi ABB (10%)

Benda Uji 1 (B1)

- M (Jenuh) = 9155 gr
 - M (Kering) = 8505 gr
 - ρ Air = 1 gr/cm³
 - Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
 - Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{\text{Jenuh}} - M_{\text{Kering}}}{\rho \cdot v} \times 100$
- $$= \frac{9155 \text{ gr} - 8505 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$$
- $$= 12,27 \%$$

Benda Uji 2 (B2)

- M (Jenuh) = 9185 gr
 - M (Kering) = 8530 gr
 - ρ Air = 1 gr/cm³
 - Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
 - Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{\text{Jenuh}} - M_{\text{Kering}}}{\rho \cdot v} \times 100$
- $$= \frac{9185 \text{ gr} - 8530 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$$
- $$= 12,36 \%$$

Benda Uji 3 (B3)

- M (Jenuh) = 9138 gr
- M (Kering) = 8480 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$
= $\frac{9138 \text{ gr} - 8480 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$
= 12,42 %

Hasil Porositas Beton Rata-Rata

$$\begin{aligned}\text{Porositas Beton Rata- Rata} &= \frac{\text{Hasil B1} + \text{Hasil B2} + \text{Hasil B3}}{3} \\ &= \frac{12,27 + 12,36 + 12,42}{3} \\ &= 12,35 \%\end{aligned}$$

c. Perhitungan Porositas Variasi ABB (15%)

Benda Uji 1 (C1)

- M (Jenuh) = 9480 gr
- M (Kering) = 8715 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$
= $\frac{9480 \text{ gr} - 8715 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$
= 14,44 %

Benda Uji 2 (C1)

- M (Jenuh) = 9445 gr
- M (Kering) = 8685 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³

- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$
 $= \frac{9445 \text{ gr} - 8685 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$
 $= 14,34 \%$

Benda Uji 3 (C1)

- M (Jenuh) = 9515 gr
- M (Kering) = 8740 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$
 $= \frac{9715 \text{ gr} - 8740 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$
 $= 14,63 \%$

Hasil Porositas Beton Rata-Rata

$$\begin{aligned} \text{Porositas Beton Rata- Rata} &= \frac{\text{Hasil C1} + \text{Hasil C2} + \text{Hasil C3}}{3} \\ &= \frac{14,44 + 14,34 + 14,63}{3} \\ &= 14,47 \% \end{aligned}$$

d. Perhitungan Porositas Variasi ABB (20%)

Benda Uji 1 (D1)

- M (Jenuh) = 8505 gr
- M (Kering) = 7745 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$
 $= \frac{8505 \text{ gr} - 7745 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$

$$= 14,34 \%$$

Benda Uji 2 (D2)

- M (Jenuh) = 8485 gr
- M (Kering) = 7725 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$

$$= \frac{8485 \text{ gr} - 7725 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$$

$$= 14,34 \%$$

Benda Uji 3 (D3)

- M (Jenuh) = 8535 gr
- M (Kering) = 7780 gr
- ρ Air = 1 gr/cm³
- Volume Benda Uji = 5298.75 cm³
- Persentase Porositas Beton = $\frac{M_{Jenuh} - M_{Kering}}{\rho \cdot v} \times 100$

$$= \frac{8535 \text{ gr} - 7780 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3 \times 5298.75 \text{ cm}^3} \times 100$$

$$= 14,25 \%$$

Hasil Porositas Beton Rata-Rata

$$\begin{aligned} \text{Porositas Beton Rata- Rata} &= \frac{\text{Hasil D1} + \text{Hasil D2} + \text{Hasil D3}}{3} \\ &= \frac{14,34 + 14,34 + 14,25}{3} \\ &= 14,31 \% \end{aligned}$$

D. Pengujian Permeabilitas.

a. Perhitungan Permeabilitas Beton Berpori Normal

Hasil pengujian permeabilitas pada beton normal sebagai berikut:

Benda Uji 1 (A1)

- Volume Air (Q) = 1950 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²
- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 59.89 dt
- Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$
= $\frac{1950 \text{ cm}^3 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 59.89 \text{ dt}}$
= 0.50 cm/dt

Benda Uji 2 (A2)

- Volume Air (Q) = 1920 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²
- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 60.15 s
- Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$
= $\frac{1920 \text{ cm}^3 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 60.15 \text{ dt}}$
= 0.48 cm/dt

Benda Uji 3 (A3)

- Volume Air (Q) = 1900 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²

- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 58.72 dt
- Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$

$$= \frac{1900 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 58.72 \text{ dt}}$$

$$= 0.47 \text{ cm/dt}$$

Hasil Permeabilitas Beton Rata-Rata

$$\begin{aligned} \text{Permeabilitas Beton Rata- Rata} &= \frac{\text{Hasil A1} + \text{Hasil A2} + \text{Hasil A3}}{3} \\ &= \frac{0.50 + 0.48 + 0.47}{3} \\ &= 0.48 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Permeabilitas Variasi ABB (10%)

Benda Uji 1 (B1)

- Volume Air (Q) = 1815 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²
- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 35,17 dt
- Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$

$$= \frac{1815 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 35,17 \text{ dt}}$$

$$= 0.77 \text{ cm/s}$$

Benda Uji 2 (B2)

- Volume Air (Q) = 1812 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²
- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 34,67 dt

- Koefisien Permeabilitas $= \frac{QXL}{AXhxt}$
 $= \frac{1812 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 34,67 \text{ dt}}$
 $= 0.78 \text{ cm/s}$

Benda Uji 3 (B3)

- Volume Air (Q) $= 1810 \text{ cm}^3$
- Tebal Benda Uji (L) $= 30 \text{ cm}$
- Luas Penampang (A) $= 176.71 \text{ cm}^2$
- Beda Tinggi Muka Air (h) $= 11.32 \text{ cm}$
- Waktu Aliran (t) $= 33,77 \text{ dt}$
- Koefisien Permeabilitas $= \frac{QXL}{AXhxt}$
 $= \frac{1810 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 33,77 \text{ dt}}$
 $= 0.80 \text{ cm/s}$

Hasil Permeabilitas Beton Rata-Rata

Permeabilitas Beton Rata- Rata $= \frac{\text{Hasil B1} + \text{Hasil B2} + \text{Hasil B3}}{3}$
 $= \frac{0.77 + 0.78 + 0.80}{3}$
 $= 0.79 \text{ cm/s}$

c. Perhitungan Permeabilitas Variasi ABB (15%)

Benda Uji 1 (C1)

- Volume Air (Q) $= 1870 \text{ cm}^3$
- Tebal Benda Uji (L) $= 30 \text{ cm}$
- Luas Penampang (A) $= 176.71 \text{ cm}^2$
- Beda Tinggi Muka Air (h) $= 11.32 \text{ cm}$
- Waktu Aliran (t) $= 28,79 \text{ dt}$
- Koefisien Permeabilitas $= \frac{QXL}{AXhxt}$

$$= \frac{1870 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 28,79 \text{ dt}}$$

$$= 0.97 \text{ cm/s}$$

Benda Uji 2 (C2)

- Volume Air (Q) = 1878 cm^3
 - Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
 - Luas Penampang (A) = 176.71 cm^2
 - Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
 - Waktu Aliran (t) = $30,74 \text{ dt}$
 - Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$
- $$= \frac{1878 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 30.74 \text{ dt}}$$
- $$= 0.92 \text{ cm/s}$$

Benda Uji 3 (C3)

- Volume Air (Q) = 1873 cm^3
 - Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
 - Luas Penampang (A) = 176.71 cm^2
 - Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
 - Waktu Aliran (t) = $29,92 \text{ s}$
 - Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$
- $$= \frac{1873 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 29.92 \text{ dt}}$$
- $$= 0.94 \text{ cm/s}$$

Hasil Permeabilitas Beton Rata-Rata

$$\text{Permeabilitas Beton Rata- Rata} = \frac{\text{Hasil C1} + \text{Hasil C2} + \text{Hasil C3}}{3}$$

$$= \frac{0.97 + 0.92 + 0.94}{3}$$

$$= 0.94 \text{ cm/s}$$

d. Perhitungan Permeabilitas Variasi ABB (20%)

Benda Uji 1 (D1)

- Volume Air (Q) = 1826 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²
- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 31,20 s
- Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$
= $\frac{1826 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 31,20 \text{ dt}}$
= 0,88 cm/s

Benda Uji 2 (D2)

- Volume Air (Q) = 1820 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²
- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 30,94 s
- Koefisien Permeabilitas = $\frac{QXL}{AXhxt}$
= $\frac{1820 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 30.94 \text{ dt}}$
= 0.88 cm/s

Benda Uji 3 (D3)

- Volume Air (Q) = 1829 cm³
- Tebal Benda Uji (L) = 30 cm
- Luas Penampang (A) = 176.71 cm²
- Beda Tinggi Muka Air (h) = 11.32 cm
- Waktu Aliran (t) = 31,57 s

- Koefisien Permeabilitas $= \frac{QXL}{AXh_{xt}}$
 $= \frac{1829 \text{ cm}^2 \times 30 \text{ cm}}{176.71 \text{ cm}^2 \times 11.32 \text{ cm} \times 31,57 \text{ dt}}$
 $= 0.87 \text{ cm/s}$

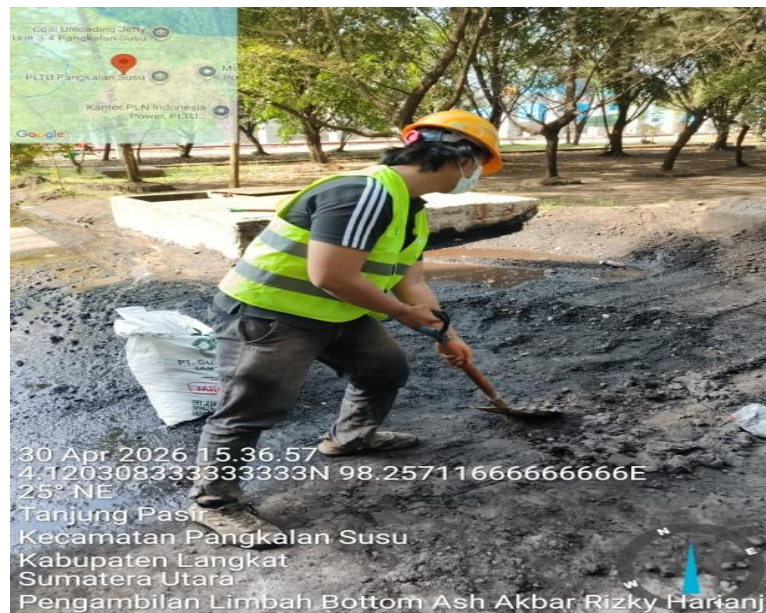
Hasil Permeabilitas Beton Rata-Rata

Permeabilitas Beton Rata- Rata $= \frac{\text{Hasil D1} + \text{Hasil D2} + \text{Hasil D3}}{3}$
 $= \frac{0.88 + 0.88 + 0.87}{3}$
 $= 0,88 \text{ cm/s}$

E. Dokumentasi Pelaksanaan



Gambar L- 1: Persiapan Agregat Kasar



Gambar L- 2: Pengambilan Abu Bawah Batubara



Gambar L- 3: Pengambilan Abu Bawah Batubara



Gambar L- 4: Penimbangan abu bawah batubara



Gambar L- 5: Pembuatan Benda Uji



Gambar L- 6: Penimbangan Benda Uji



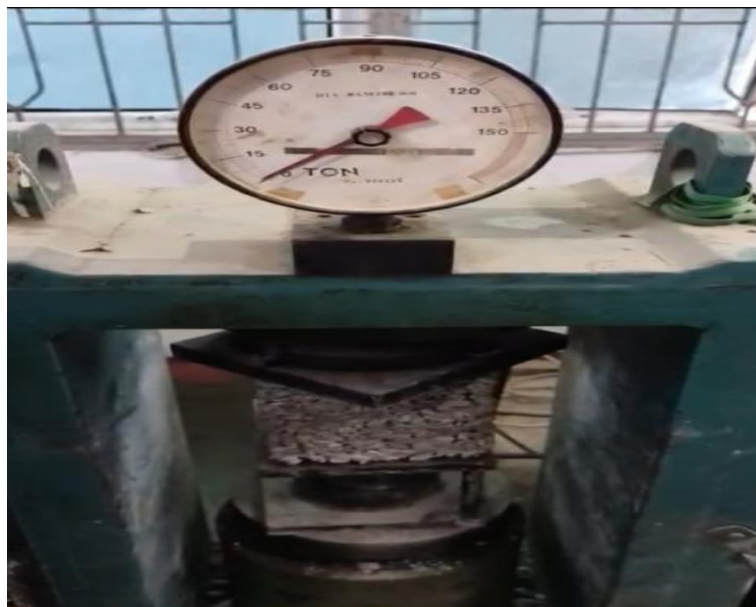
Gambar L- 7: Proses Memasukan Benda Uji Ke Cetakan



Gambar L- 8: Proses Melepaskan Cetakan Dari benda Uji



Gambar L- 9:Proses Curing



Gambar L- 10: Proses Pengujian Kuat Tekan



Gambar L- 11: Proses Pembuatan Alat tes Permeabilitas



Gambar L- 12: Proses Pengujian Porositas

F. DOKUMEN PENDUKUNG PENELITIAN

1. Dokumen Berita Acara Pengambilan Limbah FABA PT. PLN INDONESIA POWER UBP PANGKALAN SUSU

 **PLN**
Indonesia Power

PT. PLN INDONESIA POWER UBP PANGKALAN SUSU
Dusun VI/Sei Dua, Desa Tanjung Pasir Kec. Pangkalan Susu – Kab. Langkat
Telp. 0620 – 51971, Fax. 0620 – 51972, Email : Sekretariat.ubhpns@plnindonesiapower.co.id

No. PNS - 030/FABA/IV/2026

BERITA ACARA PENYERAHAN FABA

Pada hari ini Kamis tanggal 30 bulan April tahun 2026 yang bertandatangan dibawah ini :

I. Nama : Indra Dedi Afriza
Jabatan : Officer Lingkungan
Perusahaan : PT. PLN Indonesia Power
Alamat : Dusun VI/Sei Dua Tj Pasir
Selaku Penghasil Limbah non-B3 yang selanjutnya kemudian disebut **PIHAK PERTAMA**

II. Nama : Akbar Riski
Jabatan : Mahasiswa
Instansi : UMSU (Universitas Muhamadiyah Sumatera Utara)
Alamat : Medan, Sumut
Selaku Pengangkut Limbah non-B3 yang selanjutnya kemudian disebut **PIHAK KEDUA**

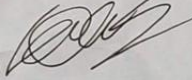
III. Nama : Akbar Riski
Jabatan : Mahasiswa
Instansi : UMSU (Universitas Muhamadiyah Sumatera Utara)
Alamat : Medan, Sumut
Selaku Pemanfaat Langsung Limbah non-B3 yang selanjutnya kemudian disebut **PIHAK KETIGA**

Bahwa **PIHAK PERTAMA** telah menyerahkan Limbah non-B3 yang dihasilkan kepada **PIHAK KETIGA** melalui pengangkut Limbah non-B3 selaku **PIHAK KEDUA** terhadap:

a. Nama : FABA
b. Jumlah : 300 Kg
c. Tanggal dikirim : 04 April 2026
d. Tanggal diterima : 04 April 2026
e. Jenis alat angkut / nomor polisi : Mobil Terbuka (BK 8558 GI)

Demikian Berita Acara ini dibuat dan ditandatangani untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

PIHAK KEDUA

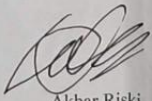

Akbar Riski

PIHAK PERTAMA


Indra Dedi Afriza

PIHAK KETIGA

Diterima Tanggal 04 April 2026


Akbar Riski

L. 13: Surat B.A Pengambilan Limbah FABA

2. Dokumen Surat Seminar Proposal

 UMSU Unggul Cerdas Terpercaya	MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA FAKULTAS TEKNIK UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Pp/PT/III/2024 Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003 https://fatek.umsu.ac.id fatek@umsu.ac.id umsumedan umsumedan umsumedan umsumedan
Nomor : 348 /II.3-AU/ UMSU-07/ F/2026 Lamp : - Hal : Undangan Seminar Proposal Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil	Medan, <u>19 Sya'ban 1447 H</u> 07 Februari 2026 M
Kepada : Yth. Sdr. 1. Fetra Venny Riza, ST., M.Sc., Ph.D. (Dosen Pembimbing) 2. Fahrizal Zulkarnain, ST., M.Sc., Ph.D. (Dosen Pembimbing - I) 3. Sri Frapanti, ST., MT. (Dosen Pembimbing - II) di- Medan.	
<i>Bismillahirrahmanirrahim.</i> <i>Assalamu'alaikum Wr. Wb.</i>	
Dengan hormat, sesuai dengan Rekomendasi Ka. Prodi Teknik Sipil Tanggal 26 Januari 2026 tentang dosen Pembimbing Tugas Akhir maka melalui surat ini kami mengundang Saudara untuk menghadiri Seminar Proposal Tugas Akhir, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara atas nama mahasiswa yang tersebut di bawah ini:	
Nama : Akbar Rizky Harianja NPM : 2207210125 Jurusan : Teknik Sipil Judul Tugas Akhir : Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Coal Botton Ash Terhadap Sifat-Sifat Beton Berpori	
Insya Allah akan dilaksanakan pada : Hari / tanggal : Rabu / 11 Februari 2026 Waktu : 13.00 WIB – Selesai Tempat : Fakultas Teknik UMSU Jln. Muchtar Basri No. 3 Medan	
Demikian undangan ini kami sampaikan atas perhatian saudara kami ucapkan terimakasih. Akhirnya selamat dan sejahteralah kita semua Amin.	
	 Wassalam. Dekan,  Ir. Ade Faisal, ST., M.Sc., Ph.D. NIDN. 0123097203
  	

L. 14: Surat Undangan Seminar Proposal (SEMPRO)

3. Dokumen Surat Seminar Hasil

**UMSU**
Unggul | Cerdas | Terpercaya
Bila menjawab surat ini agar disebutkan nomor dan tanggalnya

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Pp/PT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238
<https://fatek.umsu.ac.id> fatek@umsu.ac.id [umsu](#) [umsu](#) [umsu](#) [umsu](#)

Nomor : 1400/II.3-AU/UMSU-07/F/2026
Lamp : -
Hal : Undangan Seminar Hasil Tugas Akhir

Medan, 14 Safar 1448 H
28 Juli 2026 M

Kepada: Yth.Sdr.
1. Fetra Venny Riza, ST, MSc PhD
2. Assoc. Prof, Dr. Fahrizal Zulkarnain
3. Sri Frapanti, S.T., M.T.
di-
Medan.

(Dosen Pembimbing - I)
(Dosen Pembimbing - I)
(Dosen Pembimbing - II)

Bismillahirrahmanirrahim.
Assalamu'alaikum Wr. W.b.

Dengan hormat, sesuai dengan persyaratan akademik yang telah dipenuhi, maka melalui surat ini kami mengundang Saudara untuk menghadiri Seminar Hasil Tugas Akhir, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara atas nama mahasiswa yang tersebut di bawah ini:

Nama : Akbar Rizky Harianja
NPM : 2207210125
Jurusan : Teknik Sipil
Judul Tugas Akhir : **EAnalisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Abu Bawah Batu Bara Terhadap Sifat Sifat Beton Berpori**

Insyallah akan dilaksanakan pada:
Hari / tanggal : Kamis / 30 Juli 2026
Waktu : 10.00-Selesai Wib
Tempat : Fakultas Teknik UMSU Lantai III Gd G

Demikian undangan ini kami sampaikan atas perhatian saudara kami ucapkan terima kasih. Akhirnya selamat dan sejahteralah kita semua Amin.



Wassalam
Dekan,

Ir. Ade Faisal, ST, M.Sc., Ph.D.
NIDN. 0123097203

L. 15: Surat Undangan Seminar Hasil (SEMHAS)

4. Dokumen Surat Sidang Meja Hijau



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

Bila menerima surat ini agar dicatukan nomor dan tanggalnya

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Pp/PT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238
<https://fatek.umsu.ac.id> fatek@umsu.ac.id [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#)

Nomor : 1745/IL.3-AU/UMSU-07/F/2026 Medan, 8 Rabiul Awal 1448 H
Lamp : - 21 Agustus 2026 M
Hal : Undangan Sidang Meja Hijau / Ujian Tugas Akhir

Kepada: Yth.Sdr.
1. Fetra Venny Riza, ST, MSc, PhD (Dosen Pembimbing - I)
2. Assoc. Prof, Dr. Fahrizal Zulkarnain (Dosen Pembimbing - II)
3. Sri Frapanti, S.T., M.T. (Dosen Pembimbing - III)
di-
Medan.

*Bismillahirrahmanirrahim.
Assalamu'alaikum Wr. W.b.*

Dengan hormat, sesuai dengan persyaratan akademik yang telah dipenuhi, maka melalui surat ini kami mengundang Saudara untuk menghadiri Sidang Meja Hijau / Ujian Tugas Akhir, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara atas nama mahasiswa yang tersebut di bawah ini:

Nama : Akbar Rizky Harianja
NPM : 2207210125
Jurusan : Teknik Sipil
Judul Tugas Akhir : **Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Kasar Dengan Abu Bawah Batu Bara Terhadap Sifat-sifat Beton Berpori**

InshaAllah akan dilaksanakan pada:
Hari / tanggal : Rabu / 26 Agustus 2026
Waktu : 09.00- Selesai Wib
Tempat : Gedung G/L3

Demikian undangan ini kami sampaikan atas perhatian saudara kami ucapkan terima kasih. Akhirnya selamat dan sejahteralah kita semua Amin.



Wassalam
Dekan,



Ir. Ade Faisal, ST, M.Sc., Ph.D.
NIDN. 0123097203

L. 15: Surat Undangan Seminar Hasil (SEMHAS)

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA IDENTITAS DIRI

Nama Lemgkap	: Akbar Rizky Harianja
Tempat Tanggal Lahir	: Medan, 14 November 2004
Jenis Kelamin	: Laki- Laki
Agama	: Islam
Alamat	: Jl . Bunga Tanjung, No. 21, Dusun IV, Marindal II, Kec Patumbak, Deli Serdang, Sumatera Utara.
Nomor Hp	: +6285355919986
Nama Ayah	: Ahmad Yamin Harianja
Nama Ibu	: Leli Usnah

RIWAYAT PENDIDIKAN

NIM	: 2207210125
Program Studi	: Teknik Sipil
Fakultas	: Teknik
Perguruan Tinggi	: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Alamat Perguruan Tinggi	: Jl. Kapten Muchtar Basri, No. 3, Medan, 20238

PENDIDIKAN FORMAL

Sekolah Dasar	: SD Nurul Hadina Patumbak	2010-2016
Sekolah Menengah Pertama	: SMP Negeri 3 Medan	2016-2019
Sekolah Menengah Atas	: SMA Negeri 21 Medan	2019-2022