

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan data dari Survei Geologi Amerika Serikat (USGS), beton adalah salah satu bahan bangunan yang paling banyak digunakan secara global, dengan perkiraan produksi semen (bahan utama beton) mencapai miliaran ton per tahun. Beton adalah material bangunan yang paling banyak digunakan dalam dunia teknik sipil, sehingga durabilitasnya menjadi hal yang sangat penting. Banyak faktor yang mempengaruhi durabilitas beton, seperti korosi pada tulangan dan masuknya ion klorida. Semua faktor tersebut sangat dipengaruhi oleh air yang masuk ke dalam beton (Zhao et al., 2019). Beton akan memiliki durabilitas yang baik apabila spesifikasi yang digunakan dalam proses pembuatannya telah menetapkan standar yang sesuai. Beton dikatakan tahan lama (*durable*) apabila dalam kondisi lingkungannya mampu memberikan masa layan sesuai dengan yang direncanakan tanpa memerlukan biaya perawatan atau perbaikan yang besar akibat terjadinya kerusakan (Mather, 2004).

Peningkatan mutu beton dapat dilakukan dengan penambahan bahan lain kedalam campuran beton (Usrina et al., 2018). Salah satu bahan tambah atau bahan pengganti semen adalah material abu terbang. Abu terbang memiliki kemiripan dengan sifat semen yang ditinjau dari dua sifat utama, yaitu sifat fisik dan kimiawi. Secara fisik, abu terbang memiliki kemiripan dengan semen dalam hal kehalusan butir-butirnya.

Abu terbang (*fly ash*) merupakan residu hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap, telah dikenal sebagai bahan tambahan yang berpotensi besar dalam bidang konstruksi, terutama sebagai pengganti sebagian semen pada campuran beton. Kandungan kimia abu terbang yang kaya akan silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3) membuatnya berfungsi sebagai material pozzolanik yang efektif. Sifat pozzolanik ini memungkinkan abu terbang bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) (Romli, 2010).

Penggunaan abu terbang dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif seperti serangan sulfat, klorida, dan karbonisasi. Beton yang mengandung abu terbang cenderung memiliki porositas lebih rendah serta pori yang lebih halus, sehingga secara signifikan memperlambat laju penetrasi ion berbahaya. Dalam jangka panjang, kondisi ini berkontribusi pada peningkatan umur layan struktur dan mengurangi kebutuhan perawatan dan perbaikan (Nurhadi, 2025).

Abu terbang merupakan jenis pozzolan yang paling banyak digunakan secara global dalam pembuatan semen campuran. Penambahan abu terbang memang dapat meningkatkan jumlah pori dalam pasta semen yang telah mengeras, tetapi ukuran rata-rata porinya menjadi lebih kecil. Akibatnya, pasta semen menjadi

kurang mudah ditembus air atau zat berbahaya (Chindaprasirt et al., 2005). Oleh karena itu beton yang menggunakan abu terbang tahan terhadap masuknya ion klorida yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur beton.

Meskipun penelitian mengenai penggunaan abu terbang cukup banyak, kajian yang secara khusus membandingkan pengaruh abu terbang terhadap nilai laju penetrasi ion klorida, porositas, dan penyerapan pada beton masih terbatas, terutama di lingkup penelitian lokal. Padahal, hubungan ketiga parameter tersebut sangat penting dalam menentukan tingkat durabilitas dan umur layanan beton pada jangka panjang.

Berdasarkan uraian diatas, kami melakukan penelitian dengan menggunakan abu terbang (*fly ash*) sebagai substitusi semen pada campuran beton dengan variasi 0%, 15%, 30%, dan 45% terhadap berat semen yang digunakan. Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui durabilitas beton dengan penambahan abu terbang berdasarkan laju penetrasi ion klorida, porositas dan penyerapan.

Berdasarkan latar belakang tersebut penulis mengangkat judul **“STUDI DURABILITAS BETON YANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG BERDASARKAN PENGUJIAN RCPT, POROSITAS DAN PENYERAPAN”**.

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana durabilitas beton abu terbang terhadap laju penetrasi ion klorida?
- Bagaimana durabilitas beton abu terbang terhadap porositas dan penyerapan air?
- Bagaimana hubungan nilai laju penetrasi ion klorida, porositas dan penyerapan air pada beton yang mengandung abu terbang?

1.1.2 Tujuan Penelitian

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

- Menganalisis durabilitas beton abu terbang terhadap laju penetrasi ion klorida
- Menganalisis durabilitas beton abu terbang terhadap porositas dan penyerapan air
- Untuk mengetahui hubungan nilai laju penetrasi ion klorida, porositas dan penyerapan air pada beton yang mengandung abu terbang

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih luas mengenai pengaruh substitusi abu terbang terhadap durabilitas beton terkhusus laju penetrasi ion klorida, porositas, dan penyerapan air.

1.1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan sesuai dengan sasaran yang ingin dicapai, maka penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

- Penelitian ini bersifat uji eksperimental yang dilakukan di laboratorium.
- Abu terbang kelas F digunakan sebagai substitusi campuran semen, dengan variasi 0%-FA, 15%-FA, 30%-FA, dan 45%-FA.
- Abu terbang yang digunakan adalah limbah hasil pembakaran batubara PLTU Punagaya, Jeneponto, Sulawesi Selatan, Indonesia.
- Semen yang digunakan adalah semen PCC (*Portland Composite Cement*).
- Pengujian porositas dan penyerapan air dilakukan berdasarkan metode ASTM C642 – 21.
- Pengujian laju penetrasi ion klorida (*Rapid Chloride Penetration Test*) dilakukan berdasarkan metode ASTM C1202 – 19.
- Pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil mengacu pada standar SNI (Standar Nasional Indonesia) dan ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

1.2 Teori

1.2.1 Beton

Berdasarkan (SNI 2847 : 2019), beton adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Beton merupakan bahan konstruksi yang banyak digunakan pada bangunan struktur. Dapat dikatakan bahwa semua bangunan struktur dibangun menggunakan beton sebagai bahan konstruksi utama, contohnya struktur gedung, struktur bangunan air, struktur bangunan transportasi dan banyak lagi bangunan struktur lainnya. Salah satu kelebihan beton yaitu mampu menahan beban tekan, perubahan cuaca, suhu yang tinggi, dapat dibentuk dan mudah dirawat (Hamdi et al., 2022).

Menurut (Tjokrodimuljo, 1996) mengemukakan bahwa beton merupakan suatu bahan komposit (campuran) dari beberapa material, yang bahan utamanya terdiri dari medium campuran antara semen, agregat halus, agregat kasar, air serta bahan tambah lain dengan perbandingan tertentu. Karena beton merupakan komposit, maka kualitas beton sangat bergantung dari kualitas masing-masing material pembentuk.

1.2.2 Material Penyusun Beton

1.2.2.1 Semen

Berdasarkan (SNI 2049 : 2015), semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri dari atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan

tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain.

Fungsi semen ialah untuk merekatkan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang kompak/padat. Selain itu semen berguna untuk mengisi rongga-rongga diantara butiran agregat walaupun semen hanya mengisi 10 % dari volume beton (Irmawaty et al., 2022). Bahan dasar semen dapat berupa batu kapur atau batu karang, pasir, lempung, *gypsum*, batu besi, batu bara dan air. Pembuatan semen dimulai dengan memproduksi klinker. Bahan dasar yang digunakan untuk memproduksi klinker adalah batu kapur dan campuran lempung yang mengandung silika, oksida besidan alumina. Oksida-oksida tersebut akan saling berinteraksi satu sama lain untuk membentuk serangkaian produk yang lebih kompleks selama proses peleburan. Komposisi susunan kimia semen portland disajikan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Komposisi Oksida Semen

Oksida	Kandungan (%)
Kapur, CaO	60 – 65
Silika, SiO ₂	17 – 25
Alumina, Al ₂ O ₃	3 – 8
Besi, Fe ₂ O ₃	0,5 – 6
Magnesia, MgO	0,5 – 4
Sulfur, SO ₃	1 – 2
Soda/potash Na ₂ O + K ₂ O	0,5 – 1

Sumber: (Irmawaty et al., 2022)

Menurut SNI 2049 : 2015, semen diklasifikasikan menjadi 5 tipe berdasarkan kegunaannya yaitu:

1. Jenis I
Semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
2. Jenis II
Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
3. Jenis III
Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
4. Jenis IV

Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.

5. Jenis V

Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

1.2.2.2 Agregat Kasar

Berdasarkan ASTM C33, agregat kasar didefinisikan sebagai material granural yang memiliki ukuran butiran lebih besar dari 4,75 mm (atau lolos ayakan No. 4). Agregat kasar termasuk kerikil, batu pecah, dan material sejenis lainnya yang digunakan dalam campuran beton. ASTM C33 merupakan standar spesifikasi untuk agregat kasar, termasuk karakteristik fisik, kimia, dan mekanik yang harus dipenuhi agar agregat tersebut dapat digunakan dalam campuran beton dan menghasilkan kualitas beton yang optimal. Adapun batas gradasi agregat kasar berdasarkan ASTM C33 dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Batas Gradasi Agregat Kasar

Diameter Saringan		% Lolos Saringan		
		Ukuran Maks.	Ukuran Maks.	Ukuran Maks.
SNI	ASTM	40 mm	20 mm	10 mm
75,0 mm	3 in	100	–	–
37,5 mm	1 ½ in	95 – 100	100	–
19,0 mm	¾ in	35 – 70	95 – 100	100
9,5 mm	¾ in	10 – 40	30 – 60	50 – 85
4,75 mm	No. 4	0 – 5	0 – 10	0 – 10

Sumber: ASTM C33

Berikut merupakan persyaratan agregat kasar yang diatur dalam ASTM C33 mencakup antara lain:

1. Kekerasan dan ketahanan: Agregat kasar dipersyaratkan cukup keras dan tahan lama untuk menahan proses pengangkutan, pencampuran, dan pengerasan beton tanpa mengalami kerusakan signifikan. Salah satu metode yang mengukur ketahanan agregat kasar Adalah pengujian abrasi Los Angeles.
2. Kebersihan dan bebas kontaminasi: Agregat kasar harus bebas dari kotoran, bahan organik, dan partikel halus yang dapat mengganggu proses pengikatan dan pengerasan beton.

3. Distribusi ukuran butir: Agregat kasar dipersyaratkan memiliki distribusi ukuran butir yang sesuai dengan persyaratan gradasi yang dipersyaratkan. Ukuran gradasi agregat kasar diatur dalam ASTM C33 seperti disajikan dalam **Tabel 2**.
4. Kandungan zat berbahaya: Agregat kasar bebas dari bahan kimia berbahaya yang dapat menyebabkan reaksi merugikan yang menurunkan pengikatannya dengan semen atau pasir.

1.2.2.3 Agregat Halus

Berdasarkan ASTM C33, agregat halus didefinisikan sebagai material granural yang lolos ayakan dengan ukuran 4,75 mm (No. 4 sieve) dan tertahan pada ayakan dengan ukuran 0,075 mm (No. 200 sieve). Agregat halus biasanya berupa pasir alami, pasir buatan, atau kombinasi keduanya. Agregat halus dalam campuran beton berfungsi membentuk mortar yang akan mengikat agregat kasar serta menjadi bahan pengisi untuk meningkatkan kekuatan beton. Adapun batas gradasi agregat halus berdasarkan ASTM C33 dan SNI 03-2834-2002 dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Batas Gradasi Agregat Halus

Ukuran Saringan		SNI 03-2843-2000			ASTM C-33	
Aayakan		Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Agak Halus	Pasir Halus	<i>Fine Agregat</i>
SNI (mm)	ASTM	Gradasi No.1	Gradasi No. 2	Gradasi No. 3	Gradasi No. 4	<i>Sieve Analysis</i>
9,6	3/8 in	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100
4,8	No. 4	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100	95 – 100
2,4	No. 8	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100	80 – 100
1,2	No. 16	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100	50 – 85
0,6	No. 30	15 – 34	35 – 59	60 – 78	80 – 100	25 – 60
0,3	No. 50	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50	5 – 30
0,15	No. 100	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15	0 – 10

Sumber: SNI 03-2834-2002 dan ASTM C33

Berikut merupakan persyaratan agregat halus yang diatur dalam ASTM C33 mencakup antara lain:

1. Kebersihan dan bebas dari kontaminasi: Agregat halus harus bebas dari bahan organik, lumpur dan partikel halus yang dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton.

2. Gradasi ukuran butir: Agregat halus dipersyaratkan memiliki distribusi ukuran butir yang sesuai dengan persyaratan gradasi yang ditetapkan dalam ASTM C33 seperti disajikan pada **Tabel 3**. Gradasi yang tepat memastikan beton memiliki kepadatan dan kohesi yang baik serta sifat mekanik yang optimal.
3. Kandungan zar berbahaya: Agregat halus harus bebas dari bahan kimia berbahaya yang dapat menyebabkan reaksi merugikan dengan semen atau mengurangi kekuatan dan daya tahan beton.
4. Kestabilan kimia dan fisik: Agregat halus dipersyaratkan harus memiliki kestabilan kimia dan fisik untuk memastikan tidak terjadi perubahan volume yang signifikan saat digunakan dalam campuran beton.

1.2.2.4 Air

Air dalam beton berfungsi untuk reaksi hidrasi semen dan meningkatkan *workability* saat pencampuran. Air yang digunakan untuk membuat beton harus memiliki kualitas setara air minum, yaitu air tawar, tidak berbau dan tidak keruh, namun tidak berarti bahwa air yang digunakan merupakan air minum (Irmawaty et al, 2022). Air yang berlebihan akan menyebabkan banyak gelembung air setelah proses hidrasi selesai sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak tercapai seluruhnya sehingga dalam pencampuran beton, air perlu disesuaikan dengan kebutuhan dalam *workability* serta mutu beton yang direncanakan.

Menurut (Departemen Pekerjaan Umum, 1982), pemakain air yang memenuhi syarat sebagai berikut:

1. Air harus bersih, tidak mengandung lumpur lebih dari 2 gram/liter, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
2. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram/liter.
3. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton lebih dari 15 gram/liter.
4. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.
5. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.

1.2.2.5 Abu Terbang (FA)

Berdasarkan SNI 2460-2014, abu terbang didefinisikan sebagai bubuk halus hasil pembakaran batu bara yang memiliki sifat pozzolan, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) dalam beton untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang meningkatkan kuat tekan dan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif. Penambahan abu terbang pada campuran beton dapat mempengaruhi beton antara lain menambah tingkat kemudahan dalam pengerjaan, tahan terhadap korosi *permeability*, mengurangi panas hidrasi, harga lebih ekonomis, dan menaikkan kekuatan akhir beton. Abu terbang adalah material pozzolan (Tillman et al., 2012). Istilah pozzolan berarti bahan yang sendiri tidak bisa mengikat seperti semen, tetapi ketika dicampur dengan kapur dan air, bahan tersebut akan bereaksi dan membentuk senyawa kuat mirip dengan semen (Montgomery et al., 1981).

Klasifikasi abu terbang terbagi menjadi 3 macam menurut SNI 2460-2014, sebagai berikut:

1. Abu terbang kelas F, adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran Batubara, jenis antrasit pada suhu 1560°C.
2. Abu terbang kelas N, adalah hasil kalsinasi dari pozzolan alam seperti tanah diatomea, *shale* (serpih), tuft, dan batu apung.
3. Abu terbang kelas C, adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran limit atau batubara dengan kadar karbon ± 60 %. Abu terbang ini mempunyai sifat pozzolan dan sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10 %.

Komposisi kimia dan fisik pada abu terbang juga diatur dalam SNI 2460-2014 dimana abu terbang dan pozzolan alam harus memenuhi persyaratan kimia dan fisik yang tercantum pada **Tabel 4.** dan **Tabel 5.**

Tabel 4. Komposisi Persyaratan Kimia Abu Terbang

Uraian	Kelas		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, min. %	70	70	50
SO_3 , maks. %	4	5	5
Kadar air, maks. %	3	3	3
Hilang pijar, maks. %	10	6	6

Sumber: SNI 2460-2014

Tabel 5. Persyaratan Fisik Abu Terbang

Uraian	Kelas		
	N	F	C
Kehalusan: Jumlah yang tertinggal di atas ayakan 45 μm (No. 325) diayak secara basah, maks. %	34	34	34
Indeks aktifitas kekuatan:			
Dengan semen portland, pada umur 7 hari, min, persen, kontrol	75	75	75
Dengan semen portland, pada umur 28 hari, min, persen, kontrol	75	75	75
Kebutuhan air, maks, persen, kontrol	115	105	105

Kekekalan bentuk (<i>Soundness</i>): Ekspansi atau penyusutan dengan autoclave, maks. %	0,8	0,8	0,8
Persyaratan keseragaman:			
Densitas dan kehalusan dari sampel individu tidak boleh bervariasi dari rata-rata 10 sampel atau dari seluruh sampel jika jumlahnya kurang dari 10, lebih dari: Densitas, variasi maksimal dari rata-rata, %	5	5	5
Persentase bahan yang tertinggal pada ayakan 45 μm , (No. 325), variasi maksimal, persentase dari rata-rata	5	5	5
Sumber: SNI 2460-2014			

1.2.3 Durabilitas

Struktur beton harus mampu bertahan dalam kondisi lingkungan tempat ia digunakan tanpa mengalami kerusakan selama umur rencana. Beton yang dapat memenuhi tuntutan tersebut disebut memiliki ketahanan (*durability*) yang baik. Kurangnya ketahanan dapat disebabkan oleh berbagai faktor eksternal, seperti pengaruh fisik, kimia, maupun mekanis, misalnya pelapukan akibat cuaca, perubahan suhu yang ekstrem, abrasi, serta serangan dari cairan atau gas baik alami maupun industri. Tingkat kerusakan yang terjadi sangat bergantung pada kualitas beton itu sendiri, meskipun dalam kondisi yang sangat ekstrem, beton yang sudah diberi perlindungan pun masih dapat mengalami kerusakan (Nugraha, 2007).

Secara umum, durabilitas berkaitan dengan ketahanan campuran beton dalam jangka waktu lama pada kondisi suhu maupun air rendaman tertentu. Beton yang memiliki durabilitas baik seharusnya mampu menahan pengaruh lingkungan dan perubahan cuaca. Salah satu bentuk ketahanan tersebut adalah kemampuan beton untuk bertahan terhadap reaksi kimia yang terdapat di air laut. Pada penelitian ini uji durabilitas akan dilakukan pada benda uji beton yang dibuat berdasarkan komposisi rancangan dengan material substitusi yaitu abu terbang. Uji durabilitas ini dinilai perlu dilakukan, untuk mengetahui tingkat porositas dan penyerapan dan tingkat ketahanan beton abu terhadap penetrasi ion klorida yang bisa menyebabkan terjadinya korosi pada tulangan.

1.2.3.1 Laju Penetrasi Klorida (RCPT)

Pengujian penetrasi ion klorida menggunakan metode *Rapid Chloride Penetration Test* (RCPT) sesuai dengan metode uji menurut ASTM C1202-19. Sebelum dilakukan pengujian RCPT, benda uji untuk RCPT divacum selama 3 jam untuk mengeluarkan udara yang terjebak dalam pori-pori beton. Kemudian beton direndam selama 18 jam agar pori-pori beton menjadi jenuh terisi oleh air. Uji RCPT

dilakukan dengan mengalirkan arus tegangan 60 Volt DC dari sel positif ke sel negatif selama 6 jam. Sel positif diisi larutan NaOH 0,3N sedangkan sel negatif diisi larutan NaCl 3%. Pengujian RCPT dilakukan dengan mencatat arus yang lewat setiap 30 menit selama 6 jam sehingga dapat dihitung nilai coulomb. Perhitungan dilakukan dengan persamaan 1. sebagai berikut:

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{0.1} + 2I_{0.2} + \dots + 2I_{0.10} + 2I_{0.11} + I_{0.12}) \quad (1)$$

Dimana:

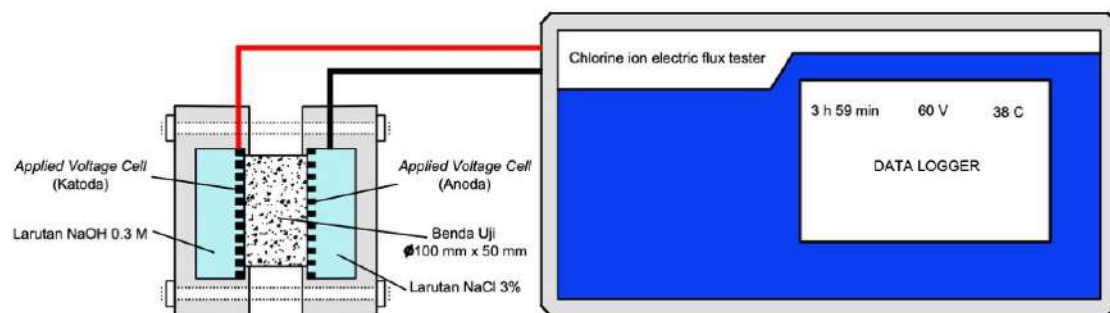
- Q = Muatan yang lewat / *Charge passed* (coulombs),
 I_0 = Arus segera setelah diberikan tegangan (ampere),
 I_t = Arus saat t menit setelah diberikan tegangan (ampere),

ASTM C1202-19 memberikan indikasi kualitatif penetrasi ion klorida berdasarkan nilai muatan yang lewat selama pengujian (coulomb) yang memberikan indikasi durabilitas beton terhadap ion klorida yang disajikan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Kriteria Penetrasi Klorida Berdasarkan Nilai *Charge Passed*

Charge Passed (coulomb)	Choloride Ion Penetrability
>4000	High
2000 – 4000	Moderate
1000 – 2000	Low
100 – 1000	Very Low
<100	Negligible

Sumber: ASTM C1202-19

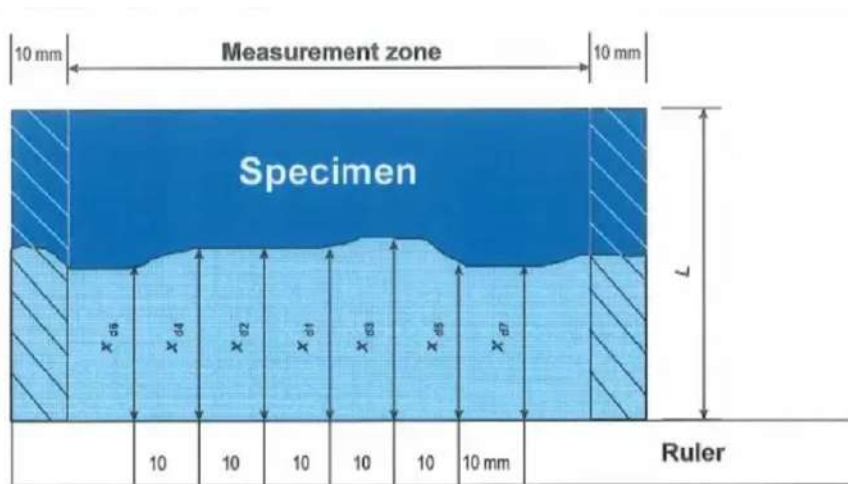


Gambar 1. Skema Pengujian RCPT

Sumber: ASTM C1202-19

Berdasarkan AASHTO NT Build 492, pengukuran kedalaman penetrasi klorida pada beton dilakukan setelah pengujian selesai, spesimen dibelah secara

vertikal untuk mengekspos area internal beton yang terpapar klorida. Permukaan potongan kemudian disemprot dengan larutan perak nitrat (AgNO_3), yang bereaksi secara kimia dengan ion klorida dan membentuk endapan putih keabu-abuan sebagai indikator visual. Kedalaman penetrasi diukur dari permukaan hingga batas perubahan warna menggunakan penggaris, dan dilakukan di beberapa titik pada zona pengukuran yang panjangnya sekitar 10 mm, untuk memperoleh data yang representatif. Zona pertama dengan warna putih perak adalah zona yang terkontaminasi ion klorida dan akan diukur sebagai kedalaman penetrasi, sedangkan zona yang lain adalah zona yang tidak terkontaminasi ion klorida dan diabaikan dalam pengukuran. Nilai kedalaman pada masing masing titik kemudian dirata-rata untuk menentukan sejauh mana ion klorida telah menembus beton. Metode pengukuran kedalaman penetrasi klorida dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Metode Pengukuran Kedalaman Penetrasi Klorida
Sumber: AASHTO NT Build 492

Menurut AASHTO NT Build 492 dirumuskan dengan persamaan 2. sebagai berikut:

$$X_{rata-rata} = \frac{X_{d1} + X_{d2} + \dots + X_{dn}}{n} \quad (2)$$

Dimana:

$X_{rata-rata}$ = Kedalaman penetrasi rata-rata (mm),

X_{dn} = Titik pengukuran kedalaman interval 10 mm (mm),

n = Jumlah titik pengukuran.

1.2.3.2 Porositas dan Penyerapan Air

Porositas dan penyerapan air merupakan dua parameter penting dalam mengevaluasi sifat fisik beton, khususnya dalam kaitannya dengan durabilitas. Porositas didefinisikan persentase ruang kosong atau jumlah pori yang terdapat dalam beton, dan menjadi salah satu faktor penting yang memengaruhi kekuatan

beton. Pori-pori ini umumnya terisi udara atau air dan saling terhubung membentuk kapiler beton. Kapiler tersebut tetap ada meskipun air pencampur telah menguap, sehingga keberadaannya dapat menurunkan tingkat kerapatan beton (Nugroho, 2010).

Porositas beton adalah tingkatan yang menggambarkan kepada konstruksi beton. Porositas berhubungan erat dengan penyerapan air beton. Porositas merupakan persentase pori-pori atau ruang kosong dalam beton terhadap volume benda (volume total beton). Ruang pori pada beton umumnya terjadi akibat kesalahan dalam pelaksanaan dan pengecoran seperti factor air semen yang berpengaruh pada lekatan antara pasta semen dengan agregat, besar kecilnya nilai *slump*, pemilihan tipe susunan gradasi agregat bangunan, maupun lamanya pemadatan (Tumingan, 2016). Berdasarkan penelitian (Hassan et al., 2000), penambahan abu terbang secara signifikan dapat menurunkan porositas beton. Penurunan porositas tersebut kemudian meningkatkan struktur pori dan kekuatan.

Porositas memiliki peran penting dalam menentukan ketahanan beton. Semakin besar jumlah pori, semakin tinggi pula permeabilitasnya, sehingga air dan zat kimia berbahaya lebih mudah masuk ke dalam beton. Kondisi ini dapat memicu berbagai bentuk kerusakan, termasuk korosi pada baja tulangan akibat penetrasi ion klorida (Kim et al., 2014).

Dengan menggunakan abu terbang sebagai pengganti sebagian semen, nilai penyerapan air, rongga permeabel meningkat seiring bertambahnya kadar abu terbang jika dibandingkan dengan beton normal. Namun, ketika abu terbang digunakan sebagai pengganti sebagian agregat, nilai dari parameter-parameter tersebut justru menurun dengan meningkatnya persentase abu terbang, meskipun tetap lebih rendah daripada beton acuan pada semua variasi abu terbang. Meski demikian, seluruh campuran menunjukkan nilai penyerapan air kurang dari 3% (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013). Hal ini mempertegas bahwa uji porositas dan penyerapan tidak hanya sekedar parameter fisik, melainkan indikator penting dalam perancangan beton tahan lama.

Berdasarkan ASTM C642-21, porositas dan penyerapan suatu bahan dinyatakan dengan persamaan:

$$Penyerapan = \frac{A - B}{C - D} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

- | | | |
|---|----------------------------|---------|
| A | = Berat kering oven | (gram), |
| B | = Berat setelah perendaman | (gram), |
| C | = Berat setelah perendaman | (gram), |
| D | = Berat dalam air | (gram). |

$$g = \frac{m}{V} \times r \quad (4)$$

$$g = \frac{m}{V} \times r \quad (5)$$

$$Porositas = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100\% \quad (6)$$

Dimana:

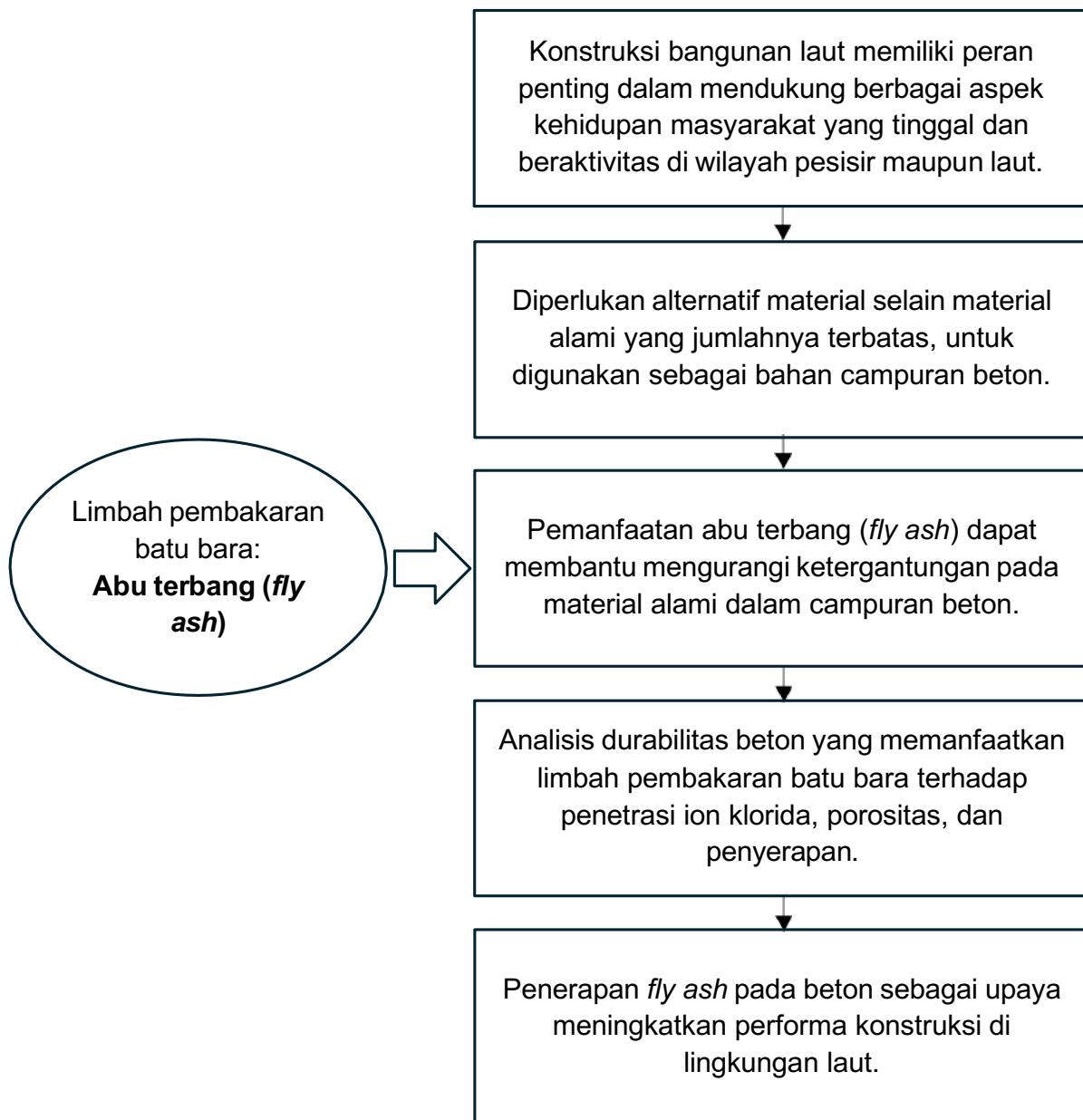
g_1	= Massa jenis curah kering	(Mg/m ³)
g_2	= Massa jenis semu	(Mg/m ³)
r	= densitas air	(1 g/cm ³ = 1 Mg/cm ³)

1.2.4 Desain Konseptual

Konsep penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas serta keberlanjutan infrastruktur, khususnya pada bangunan yang berada di wilayah pantai atau laut. Pemanfaatan limbah industri sebagai bahan campuran beton menjadi salah satu solusi yang dapat diterapkan. Beton yang digunakan pada lingkungan laut harus memiliki permeabilitas, porositas, dan penyerapan air yang rendah, sehingga lebih kedap dan tahan terhadap serangan ion klorida maupun kondisi agresif lainnya dibandingkan beton yang digunakan di darat.

Studi ini dilatarbelakangi oleh perkembangan teknologi konstruksi yang mendorong pemanfaatan produk sampingan industri, seperti abu terbang (*fly ash*) yang merupakan hasil pembakaran batubara. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa abu terbang telah banyak diterapkan sebagai bahan pengganti material alami dalam beton normal dan terbukti mampu mengurangi permeabilitas beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku beton terhadap penetrasi ion klorida, porositas, dan penyerapan air yang menjadi parameter penting dalam evaluasi durabilitas beton.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pembangunan konstruksi di Indonesia dengan menyajikan bukti nyata mengenai manfaat pemanfaatan limbah industri dalam beton, khususnya untuk bangunan di lingkungan laut yang rentan terhadap penetrasi ion klorida. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menunjukkan bagaimana penggunaan abu terbang (*fly ash*) dapat menurunkan porositas dan penyerapan air pada beton, sehingga meningkatkan kedekatan dan durabilitasnya. Jika penelitian ini menunjukkan hasil yang positif, penggunaan abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan campuran beton dapat semakin luas diterapkan. Hal ini tidak hanya meningkatkan ketahanan beton, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap material alami dalam proses konstruksi.



Gambar 3. Kerangka Konseptual Penelitian

1.2.5 Penelitian Terdahulu

(Kumar et al., 2024) mengevaluasi penggunaan abu terbang dengan kadar klorida berbeda (tinggi, sedang, rendah) sebagai bahan tambahan campuran semen dalam beton. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang secara signifikan meningkatkan resistensi beton SCC terhadap penetrasi ion klorida dibandingkan campuran tanpa penggunaan abu terbang, sejalan dengan penelitian sebelumnya. Namun, seperti yang dilaporkan oleh studi lain, permeabilitas meningkat seiring naiknya suhu. Beton dengan penggunaan 50% FA memiliki performa lebih baik dibanding beton konvensional termasuk resistensi penetrasi ion klorida yang meningkat dengan kategori sangat rendah (pada uji ASTM C1202). Peningkatan

ketahanan beton SCC terhadap penetrasi klorida pada campuran FA terutama disebabkan oleh mekanisme pengikatan kimia, sehingga jumlah ion klorida bebas di dalam beton menjadi lebih sedikit.

Penelitian yang dilakukan (Golewski, 2023) mengevaluasi penggunaan abu terbang dengan penyerapan air yang beragam pada beton dengan FA sebagai bahan tambah dalam campuran semen pada beton. Melalui penelitian yang melibatkan variasi substitusi FA sebesar 0%, 20%, dan 30%, hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan FA sebesar 20% meningkatkan penyerapan air sekitar 6% dibandingkan beton tanpa FA. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan 20% FA memiliki jumlah rongga yang lebih besar. Namun, penambahan FA hingga 30% memberikan efek sebaliknya, yaitu menurunkan penyerapan air sekitar 8%. Dengan demikian, beton 30% FA dapat dikatakan memiliki struktur yang lebih rapat. Hasil ini mendukung temuan penelitian lain yang juga melaporkan penurunan penyerapan air dengan meningkatnya kadar FA dalam campuran,

(Boğa & Topu, 2012) melakukan penelitian untuk mengevaluasi penetrasi ion klorida pada beton berdasarkan variasi kadar *fly ash* (FA). Hasil pengujian menunjukkan penggunaan *fly ash* sebesar 15% sebagai pengganti semen menurunkan tingkat penetrasi klorida menjadi kategori rendah (low). Pada seri 28W dan 56W, penambahan FA sebesar 30% dan 45% bahkan menghasilkan penetrasi klorida yang sangat rendah. Namun pada seri 28A, penggunaan FA sebesar 30% dan 45% justru meningkatkan penetrasi klorida hingga kategori sedang jika dibandingkan dengan campuran yang hanya menggunakan FA 15%. Hal ini terjadi karena reaksi pozzolanik pada kadar FA yang tinggi belum berlangsung secara optimal pada beton yang hanya mengalami perawatan (*curing*) selama 28 hari. Akibatnya, sampel tersebut memiliki pori yang lebih banyak dan ketahanan terhadap penetrasi klorida yang lebih rendah. Selain itu, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa material pozzolan seperti FA mampu mengikat ion klorida, sehingga permeabilitas beton menurun.

(Nayak et al., 2022) meninjau penggunaan abu terbang pada beton dan studi kasus manfaatnya, termasuk laju penetrasi klorida, porositas dan penyerapan. Penggunaan FA dengan SF membantu memperbaiki struktur pori beton. Pada penelitian tersebut, penambahan 20% FA menyebabkan peningkatan porositas sebesar 12,4% di banding campuran control pada umur 3 hari. Namun, pada umur 28 dan 90 hari, porositas justru menurun masing-masing sebesar 20,9% dan 16,1%. Studi lain juga melaporkan bahwa penambahan FA secara signifikan menurunkan porositas beton yang kemudian berkontribusi pada peningkatan struktur pori dan kekuatan pada beton berkinerja tinggi. Kemampuan penyerapan air pada pasta semen meningkat seiring dengan bertambahnya ukuran butir dan persentase abu terbang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai penyerapan air masih berada di bawah kritis 30% pada tingkat substitusi FA sebesar 10% dan 30%. Namun, Ketika kadar penggantian FA mencapai 50-90%, nilai penyerapan air melebihi 30%. Kondisi

ini menandakan bahwa beton dengan kadar FA tinggi tidak direkomendasikan untuk digunakan pada bagian konstruksi yang terpapar air. Beton dengan penambahan sebesar 30% memiliki tingkat penetrasi klorida dengan kategori sedang, tetapi nilai ini meningkat seiring penambahan kadar FA. Namun, penambahan 5% *silica fume* (SF) Bersama FA mampu menurunkan penetrasi klorida ke kategori rendah. Penelitian ini tidak hanya memberikan solusi untuk pengelolaan limbah industri, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan material konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

(Hassan et al., 2000) penelitian ini mengevaluasi nilai porositas beton dari berbagai variasi campuran berada pada kisaran 5% hingga 9% pada umur pengujian 365 hari. Hasil penelitian melaporkan bahwa setiap penambahan 10% FA sebagai pengganti semen portland dapat mengurangi kebutuhan air sebesar 3–4%, sehingga meningkatkan kemampuan pemadatan campuran dan menurunkan porositas. Namun, pada penilitiannya beton FA memiliki porositas terbesar pada umur awal. Meski demikian, penurunan porositas secara signifikan terjadi seiring bertambahnya umur. Bahkan, beton FA merupakan satu-satunya campuran yang menunjukkan pengurangan porositas yang jelas setelah umur 28 hari. Dengan demikian, penambahan FA 10% memberikan manfaat dalam menurunkan tingkat porositas beton.

(Çelik et al., 2022) melakukan penelitian untuk mengevaluasi permeabilitas ion klorida dalam *Self-Compacting Concrete* (SCC) dengan variasi FA sebagai pengganti semen. Hasil uji RCPT pada campuran SCC menunjukkan bahwa beton control memiliki nilai 2917 C (*moderate*). Namun, pada beton dengan campuran 45% FA menghasilkan nilai terendah yaitu 345 C (*very low*). Penambahan FA secara signifikan meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi klorida. Kinerja baik FA disebabkan oleh kemampuan bahan pozzolan ini dalam mengikat ion klorida. Selain itu, FA memperbaiki struktur pori, sehingga campuran menjadi lebih rapat.

Tabel 7. Ringkasan Penelitian Terdahulu

Referensi (Penulis, Tahun)	Material Pengikat	Parameter yang Diuji	Hasil Penelitian
Junior et al., 2021 (Constr. Build. Mater.)	PCC + FA (0– 27%)	RCPT, Porositas dan Penyerapan	Silinder 0100 $\times$ 50 mm; porositas dan penyerapan menurun seiring penambahan FA di 91 hari <i>curing</i> , Variasi 27% FA menurunkan tingkat penetrasi klorida
Le et al., 2025			
(<i>Application in Engineering Science</i>)	PCC + FA (0– 30%) + SP	RCPT	Penambahan FA secara signifikan menurunkan tingkat penetrasi klorida
Kou & Poon, 2013			
(<i>Cement & Concrete Composites</i>)	OPC + RAC + FA (0–35%)	RCPT	meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida pada beton agregat alami dan daur ulang agregat pada semua benda uji
Wang et al., 2018			
(Constr. Build. Mater.)	OPC + FA 0–25%	RCPT	Penambahan FA pada kadar 25% dengan rasio W/B 0,33 terbukti efektif dalam penghalusan pori sehingga nilai RCPT menurun drastic.
Sim & Park, 2011 (<i>Waste Management</i>)	PCC + FA 0–30% + RCA	RCPT	Penggunaan 30% FA menghasilkan beton dengan ketahanan klorida yang sangat baik
Arellanes et al.,			
2025 (<i>Journal of Building Engineering</i>)	PCC + FA + SP	Porositas	Penggunaan 20% FA dengan rasio W/B 0,6 mampu menurunkan porositas pada beton.
Arunchaitanya & Dey, 2023 (<i>AI in Civil Engineering</i>)	2018 (<i>Materials Today</i>)		SCC + OPC + FA 30% RCPT 0–
Ammasi & Ragul,			

OPC + HVFA
40–

Penyerapan
Air pada
SP-1100 +

Kadar *fly ash* 20% mampu menurunkan tingkat penetrasi klorida yang sangat baik

Penambahan abu terbang dalam jumlah besar meningkatkan penyerapan air dan menurunkan

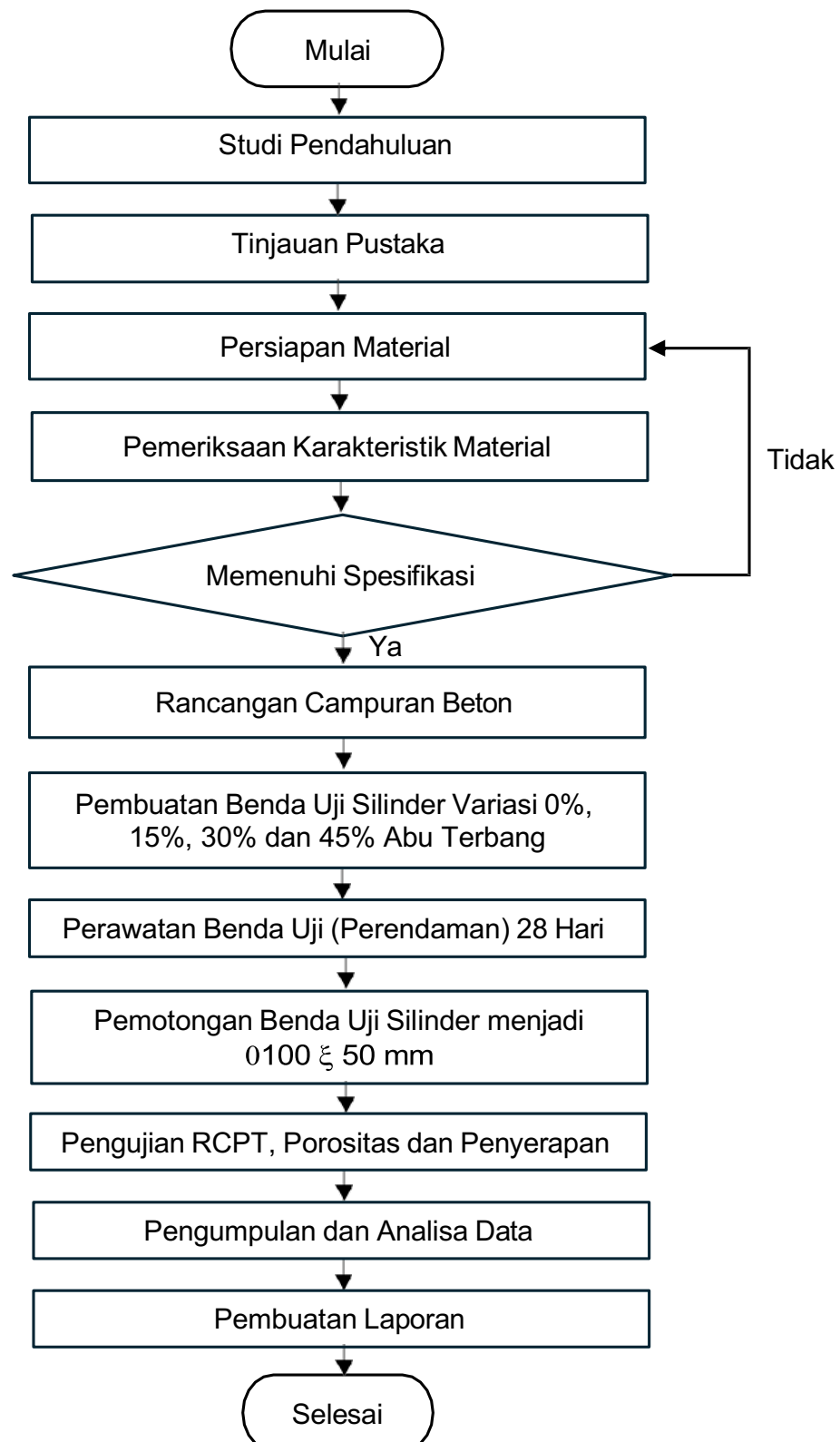
tingkat penetrasi ion klorida seiring bertambahnya usia <i>curing</i> .		
Mohamed & Hawat, 2018 (<i>Material Science and Engineering</i>)	SCC + FA (0–40%)	RCPT
Ketahanan terbaik terhadap penetrasi klorida pada campuran <i>fly ash</i> ditunjukkan oleh 40% FA setelah 14 hari <i>curing</i> , dimana <i>charge passed</i> tergolong sangat rendah.		
Turk et al., 2022 (<i>Sustainability</i>)	PCC + LSP + FA	Porositas dan RCPT
Penggunaan kadar FA yang lebih tinggi meningkatkan porositas pada beton dan tingkat laju penetrasi klorida menurun seiring penambahan kadar FA		
Samani et al.,		Porositas dan penyerapan meningkat seiring
2018 (<i>Journal of Applied Engineering Science</i>)	PCC + FA (0–90%)	RCPT, Porositas dan Penyerapan
penambahan FA. Namun, penambahan FA secara signifikan mampu menurunkan tingkat penetrasi klorida		
Cheruvu & Rao, 2024 (<i>Advance in Science and Technology Research Journal</i>)	SCC + FA (0–70%)	RCPT
Penggunaan kadar FA 50% dan 0,3 W/B mempunyai tingkat penetrasi klorida sangat rendah dan mempunyai daya tahan lama yang baik		
Pitroda & Umrigar, 2013 (<i>International Journal of Engineering and Innovative Technology</i>)	OPC + RCA + FA (0–40%)	Penyerapan Air
Penyerapan air pada beton dengan tambahan <i>fly ash</i> memiliki penyerapan air yang tinggi seiring bertambahnya kadar <i>fly ash</i> dibandingkan dengan beton tanpa penambahan <i>fly ash</i>		
Zhao et al., 2019 (<i>International Federation for</i>	OPC + FA (0–40%)	Porositas
Penggunaan kadar <i>fly ash</i> 20% mampu menurunkan porositas pada beton dibandingkan beton normal		

Structural Concrete)			
Çelik et al., 2021 (Iranian Journal of Science and Technology)	SCC + FA (0–45%) + SP	RCPT	Penambahan abu terbang pada kadar 45% mampu menurunkan tingkat penetrasi klorida di 180 hari curing
Chindaprasit, et al., 2005 (Cement & Concrete Composites)	OPC + FA (0–40%)	Porositas	Penambahan FA secara signifikan meningkatkan porositas pada beton dibandingkan dengan beton normal
Uysal & Akyuncu,			Permeabilitas ion klorida pada beton yang
2012 (Constr. Build. Mater.)	PCC + FA	RCPT	mengandung abu terbang menurun seiring meningkatnya kadar abu terbang
Salcedo et al., 2022 (Cleaner Materials)	PCC + FA (25–50%)	RCPT	Penggunaan kadar fly ash 50% memiliki tingkat penetrasi klorida sangat rendah jika dibandingkan dengan beton normal
Boğa & Topçu, 2012 (Constr. Build. Mater.)	PCC + FA (0–45%) + SP	RCPT	Beton normal memiliki penetrasi klorida yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan FA
Mostazid et al., 2025 (Cement & Concrete Composites)	GPC + PCC + FA	Porositas dan RCPT	Penambahan kadar abu terbang secara signifikan memiliki porositas yang lebih tinggi. Namun, berbanding terbalik dengan RCPT yang semakin menurun seiring penambahan abu terbang
Golewski, 2023			
(Case Studies in Construction Materials)	OPC + LVFAC + FA (0–30%) + SP	Penyerapan Air	Penyerapan air yang terendah didapat dengan menggunakan kandungan 30% FA
Islam & Islam,	OPC + FA (0–		Peningkatan jumlah abu terbang yang digunakan
2011 (ICETCESD)	70%)	RCPT	dalam beton, charge passed menurun

Huang & Yang, 2018 (Constr. Build. Mater.)	PCC + FA (0–65%) + SP	RCPT	Penambahan kadar abu terbang 35% menurunkan tingkat penetrasi ion klorida
Kumar et al., 2024			
(<i>Journal of Building Engineering</i>)	SCC + OPC + FA (0–100%) + SF	RCPT	Penggunaan 50% FA pada beton mampu menurunkan tingkat penetrasi ion klorida
Nayak et al., 2022			20% FA pada rasio 0,35 W/B meningkatkan porositas
(<i>Cleaner Materials</i>)	PPC + FA	RCPT, Porositas dan Penyerapan	pada beton, penambahan FA pada beton secara signifikan meningkatkan penyerapan air dan menurunkan tingkat penetrasi klorida

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian



Gambar 4. Bagan Alir Penelitian

2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di Laboratorium Riset Eco-Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kampus Gowa, dengan waktu penelitian selama 1 bulan dengan pengujian sampel beton pada usia 28 hari.

2.3 Teknik Pengumpulan Data

Untuk memperoleh data sebagai dasar utama dengan penelitian ini, diterapkan dua metode pengumpulan data, yaitu:

- Tinjauan pustaka, untuk mengumpulkan data sekunder dengan menganalisis berbagai buku, jurnal dan artikel ilmiah yang membentuk dasar teoritis untuk mendukung perkembangan penelitian ini.
- Pengujian sampel di laboratorium, untuk memperoleh data primer yang akan digunakan dalam analisis hasil penelitian.

2.4 Persiapan Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Gambar 5.** sebagai berikut:

1. Neraca akurat (sensitivitas $\leq 0,025$ % massa spesimen),
2. Oven yang dapat dipertahankan 100–110 °C,
3. Wadah/ember besar untuk perendaman, kawat/penyangga untuk menggantung spesimen dalam air,
4. Kain/towel non-serat untuk mengelap permukaan (SSD),
5. Label dan buku catatan,
6. *Vacum Saturation Apparatus* digunakan untuk mengeluarkan udara dalam pori-pori beton,
7. *Power supplay* sebagai sumber tegangan selama pengujian RCPT,
8. *Applied Voltage Cell* digunakan sebagai wadah sampel beton dan larutan,
9. Gerinda digunakan untuk memotong sampel,
10. Timbangan.



1



2



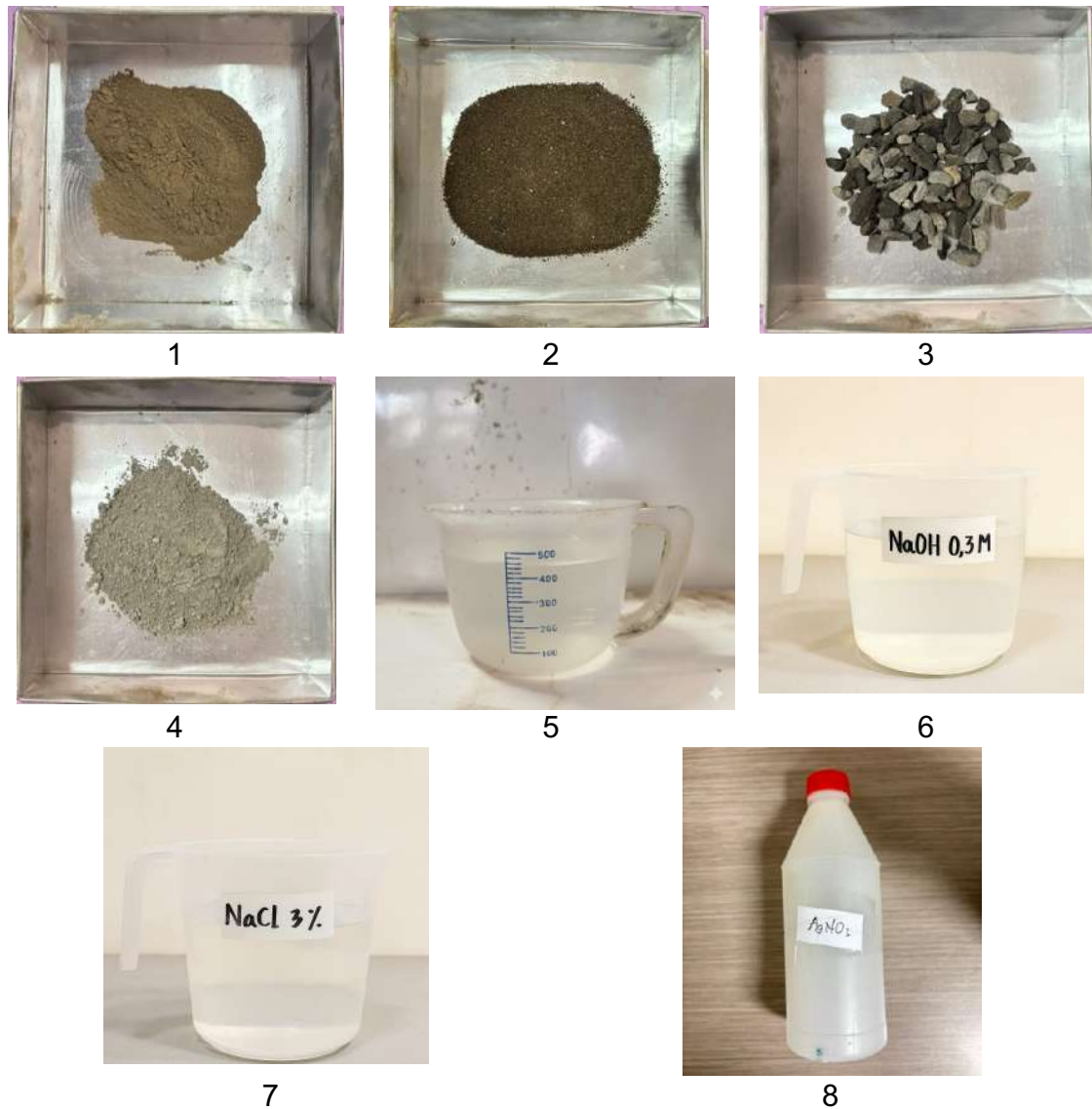
3



Gambar 5. Alat yang digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Gambar 6.** sebagai berikut:

1. *Fly ash* kelas F dari PLTU Punagaya,
2. Agregat Halus,
3. Agregat Kasar,
4. Semen,
5. Air,
6. Larutan Natrium Hidroksida (NaOH) 0,3 M,
7. Larutan Natrium Klorida (NaCl) 3%,
8. Cairan Silver Nitrat (AgNO_3).



Gambar 6. Bahan yang digunakan

2.5 Pemeriksaan Karakteristik Material

2.5.1 Agregat Kasar

Pembuatan dan hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar dapat dilihat pada **Tabel 8.** sebagai berikut:

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar

Karakteristik Agregat	Hasil Pemeriksaan	Satuan	Spesifikasi	Standar
Modulus Kehalusan	-	-	5,5 – 8,5	SNI ASTM C136:2012

Berat Jenis Semu	2,75	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis Curah	2,64	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis SSD	2,68	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Penyerapan Air	2,54	%	Maks. 4%	SNI 1970:2016
Berat Volume Lepas	1,30	Kg/lt	1,4 – 1,9	SNI 03-4804- 1998
Berat Volume Padat	1,52	Kg/lt	1,4 – 1,9	SNI 03-4804- 1998
Kadar Air	2,43	%	0,5 – 2,0	SNI 1971:2011
Kadar Lumpur	1,89	%	0,2 – 1,0	SNI ASTM C177:2012
Keausan Agregat	31,1	%	Maks. 40%	SNI 2417:2008

Sumber: Laboratorium Struktur dan Bahan, Universitas Hasanuddin, 2025

2.5.2 Agregat Halus

Pembuatan dan hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus dapat dilihat pada **Tabel 9.** sebagai berikut:

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus

Karakteristik Agregat	Hasil Pemeriksaan	Satuan	Spesifikasi	Standar
Modulus Kehalusan	2,80	-	2,2 – 3,1	SNI ASTM C136:2012
Berat Jenis Semu	2,71	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis Curah	2,59	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis SSD	2,65	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Penyerapan Air	1,88	%	Maks. 2%	SNI 1970:2016
Berat Volume Lepas	1,62	Kg/lt	1,4 – 1,9	SNI 03-4804- 1998
Berat Volume Padat	1,60	Kg/lt	1,4 – 1,9	SNI 03-4804- 1998

Kadar Air	7,83	%	3,0 – 5,0	SNI 1971:2011
Kadar Lumpur	3,82	%	0,2 – 6,0	SNI ASTM C177:2012
Kadar Organik	No.2	%	< No.3	SNI 2816:2014

Sumber: Laboratorium Struktur dan Bahan, Universitas Hasanuddin, 2025

2.5.3 Abu Terbang (FA)

Standar dan hasil pengujian karakteristik abu terbang sebagai pengganti semen untuk pembuatan campuran beton dapat dilihat pada **Tabel 10**. Sebagai berikut:

Tabel 10. Pemeriksaan Karakteristik Abu Terbang

Jenis Pemeriksaan	Hasil Pemeriksaan	Satuan	Spesifikasi	Standar
<i>Specific gravity</i> (SSD)	2,61	g/cm ³	2,1 – 3,0	SNI ASTM 2531:2015

Sumber: Laboratorium Struktur dan Bahan, Universitas Hasanuddin, 2025

2.6 Rancangan Campuran Beton

Rancangan campuran beton dengan variasi untuk abu terbang sebagai pengganti semen disajikan pada **Tabel 11**. Target *slump* beton normal sebagai kontrol adalah 10 ± 2 cm sedangkan beton abu terbang adalah 14 ± 2 cm.

Tabel 11. Komposisi Campuran Beton (Kg/m³)

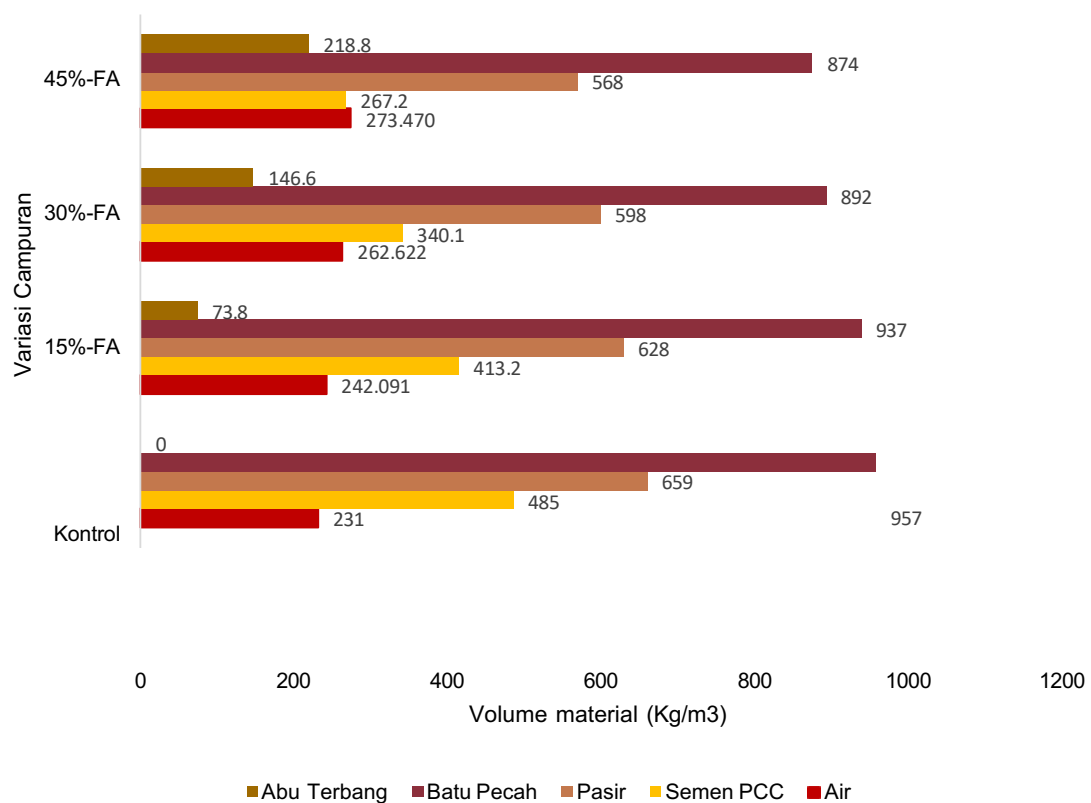
MIX ID	Air			Abu Terbang	Semen	Pasir	Batu Pecah	Volume	W/B
	Awal	Tambahan	Total						
Control	231	0	231	0	485	659	957	2328	0,48
15%-FA	231	11,091	242,091	73,8	413,2	628	937	2289,1	0,59
30%-FA	231	31,622	262,622	146,6	340,1	598	892	2235,3	0,77
45%-FA	231	42,470	273,470	218,8	267,2	568	874	2196,5	1,02

Sumber: Laboratorium Struktur dan Bahan, Universitas Hasanuddin, 2025

Tabel 12. Komposisi Campuran Beton (m³)

MIX ID	Air			Abu Terbang	Semen	Pasir	Batu Pecah	Volume
	Awal	Tambahan	Total					
Control	0,231	0	0,231	0	0,154	0,253	0,361	1,000
15%-FA	0,231	0,011	0,242	0,031	0,131	0,242	0,354	1,000
30%-FA	0,231	0,032	0,263	0,062	0,108	0,230	0,337	1,000
45%-FA	0,231	0,042	0,273	0,093	0,085	0,218	0,330	1,000

Sumber: Laboratorium Struktur dan Bahan, Universitas Hasanuddin, 2024

**Gambar 7.** Grafik Komposisi Campuran (Kg/m³)

2.7 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan dan pengujian ini dirancang untuk mengetahui bagaimana pengaruh abu terbang sebagai bahan campuran semen dalam pembuatan beton konvensional terhadap penetrasi ion klorida, porositas dan penyerapan. Cetakan benda uji yang digunakan adalah silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. proses pencampuran dan pembuatan benda uji pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Menyiapkan material dengan komposisi campuran yang telah ditentukan.
2. Abu terbang, agregat kasar, dan agregat halus dimasukkan kedalam *mixer*.
3. Mengaduk abu terbang dan agregat menggunakan *mixer* selama 60 detik.
4. Memasukkan air yaitu setengah takaran air yang telah ditentukan dan mengaduk selama 60 detik.

5. Memasukkan semen dan mengaduk menggunakan *mixer* selama 30 detik kemudian matikan *mixer* dan mengaduk manual hingga campuran rata.
6. Menyalakan *mixer* dan memasukkan air yaitu setengah takaran air yang telah ditentukan dan mengaduk selama 60 detik menggunakan *mixer* kemudian matikan *mixer*.
7. Mengeluarkan hasil campuran kemudian melakukan uji *slump test*.
8. Mencetak hasil campuran kedalam cetakan silender sebanyak 3 lapis, masing-masing 25 kali tumbukan per lapis menggunakan penumbuk manual dengan diameter 10 mm dengan ketinggian jatuhnya yaitu 2 kali diameter penumbuk dengan berat 500 gram.
9. Memadatkan benda uji dengan menggunakan *vibrator*.
10. Mendinginkan benda uji dalam cetakan selama 24 jam agar campuran memadat.
11. Mengeluarkan benda uji dari cetakan, kemudian *curing* benda uji selama 28 hari dalam kondisi *curing* air.



Gambar 8. Proses *Mixer* Campuran Beton

Tabel 13. Jumlah Benda Uji

Jenis	Waktu	Dimensi benda uji	Jenis pengujian	Jumlah
Variasi	Pengujian			benda uji
Control	28 Hari	Silinder 0100 $\times$ 50 mm	Porositas dan Penyerapan, Laju Penetrasi Klorida	3
			Porositas dan	
15%-FA		Silinder 0100 $\times$ 50 mm	Penyerapan, Laju Penetrasi Klorida	3

Jenis Variasi	Waktu Pengujian	Dimensi benda uji	Jenis pengujian	Jumlah benda uji
30%-FA		Silinder 0100 $\times$ 50 mm	Porositas dan Penyerapan, Laju Penetrasi Klorida	3
45%-FA		Silinder 0100 $\times$ 50 mm	Porositas dan Penyerapan, Laju Penetrasi Klorida	3
Jumlah				12

2.8 Metode Pemeriksaan *Slump Test*

Pengukuran *Slump test* dilakukan untuk mengetahui tingkat kekentalan adukan beton, yang mencerminkan *workability* atau kemudahan beton untuk diaduk, dituang, diangkat ataupun dipadatkan tanpa menimbulkan segregasi maupun porositas. Metode pengujian slump mengacu pada SNI 1972:2008, yaitu dengan mengisi cetakan kerucut abram dalam tiga lapisan. Setiap lapisan dipadatkan sebanyak 25 kali penusukan menggunakan batang penumbuk. Setelah cetakan terisi penuh, kerucut abram diangkat secara vertical dengan hati-hati tanpa gerakan menyamping. Nilai slump kemudian ditentukan dengan mengukur penurunan tinggi adukan beton pada pusat permukaan setelah cetakan diangkat.



Gambar 9. Pengujian *Slump Test*

2.9 Perawatan (Curing Benda Uji)

Perawatan (*curing*) benda uji dilakukan setelah beton mengeras. Pada penelitian ini, semua variasi benda uji *curing* dengan air pada suhu 20 °C.



Gambar 10. Curing Air Benda Uji

2.10 Pengujian Benda Uji

Jenis pengujian dan metode yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 14.** sebagai berikut:

Tabel 14. Uraian dan Standar Pengujian

Uraian Pengujian	Benda Uji	Metode
Porositas dan Penyerapan	Silinder 0100 $\times$ 50 mm	ASTM C642-21
Laju Penetrasi Klorida	Silinder 0100 $\times$ 50 mm	ASTM C1202-19

2.10.1 Uji Porositas dan Penyerapan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui Tingkat porositas dan penyerapan (absorpsi) pada setiap variasi sampel atau benda uji. Metode pengujian mengacu pada ASTM C641-21 (*Standart Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*). Adapun tahapan pengujiannya dilakukan sebagai berikut:

1. Pemeriksaan awal
 - a) Periksa setiap spesimen: tidak ada retak atau pecah yang nyata. Catat dimensi dan massa awal bila perlu. (ASTM mensyaratkan spesimen bebas retak besar).
2. Penentuan massa oven-kering (A)
 - a) Tempatkan spesimen di oven 100–110 °C selama $\geq$ 24 jam.
 - b) Keluarkan, dinginkan di desikator atau udara kering sampai 20–25 °C. timbang.
 - c) Jika spesimen sempat basah saat penimbangan pertama, ulangi pengeringan 24 jam dan timbang lagi sampai dua pengukuran berturut-turut berbeda $< 0,5\%$ dari nilai yang lebih kecil. Nilai akhir disebut A (g).
3. Saturasi setelah perendaman, massa SSD setelah perendaman (B)

- a) Setelah A ditetapkan, rendam spesimen dalam air bersuhu 21 °C selama ≥ 48 jam dan lanjutkan sampai dua pembacaan massa *surface-dry* (SSD) pada interval 24 jam menunjukkan peningkatan $< 0,5\%$ dari nilai lebih besar.
- b) Ambil spesimen, lap permukaan dengan towel sampai kondisi *saturated-surface-dry* (SSD), timbang untuk memperoleh nilai B (g).
4. Saturasi setelah perebusan, massa SSD setelah perebusan (C)
 - a) Dari keadaan setelah perendaman, tempatkan spesimen dalam wadah, tutupi dengan air dan rebus selama 5 jam.
 - b) Dinginkan secara alami minimal 14 jam sampai suhu 20–25 °C. lap permukaan hingga SSD, timbang untuk memperoleh nilai C (g).
5. Penentuan massa terendam, massa dalam air (D)
 - a) Setelah Langkah 5 (sudah direbus dan dingin), gantungkan spesimen pada kawat dan ukur massa tampaknya saat terendam penuh dalam air (gunakan neraca dengan fasilitas pengukuran massa terendam atau teknik penyangga), diperoleh nilai D(g).
6. Perhitungan menggunakan notasi A, B, C dan D
 - a) Penyerapan setelah perendaman (%) = $(B-A)/A \times 100$.
 - b) Penyerapan setelah perendaman + perebusan (%) = $(C-A)/A \times 100$.
 - c) Massa jenis curah kering, (g_1 , Mg/m^3) = $A/(C-D) \times r$.
 - d) Massa jenis curah setelah perendaman, (g_2 , Mg/m^3) = $A/(A-D) \times r$.
 - e) Porositas (voids, %) = $(g_2-g_1)/g_2 \times 100$.

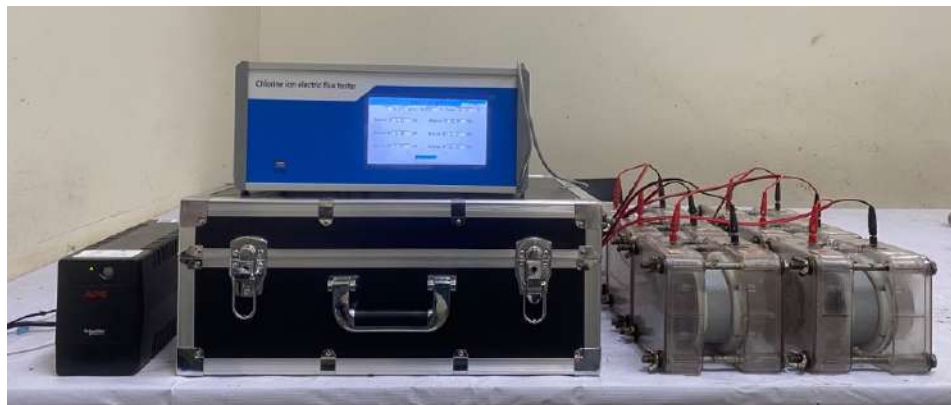
Keterangan: r = densitas air ($1\text{ g/cm}^3 = 1\text{ Mg/m}^3$). (Rumus dan definisi sesuai ASTM).
7. Catatan pelaksanaan dan kontrol kualitas
 - a) Pastikan spesimen benar-benar SSD sebelum menimbang pada Langkah B dan C (lap cepat, jangan tekan pori).
 - b) Suhu air perendaman kira-kira 21 °C; setelah perebusan dinginkan minimal 14 jam sampai 20–25 °C sebagaimana standar.
 - c) Timbangan harus memiliki kalibrasi terakhir tercatat; jika ada fluktuasi massa $>0,5\%$ antar pengukuran selama tahap yang memerlukan kestabilan, ulangi proses pengeringan/penimbangan menurut aturan ASTM.

2.10.2 Uji Laju Penetrasi Klorida (RCPT)

Pengujian laju penetrasi klorida mengacu pada ASTM C1202-19. Pengujian ini dilakukan untuk menentukan ketahanan benda uji beton terhadap penetrasi ion klorida sebagai salah satu parameter pengukuran durabilitas beton. Prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Siapkan benda uji yang diambil dari spesimen beton dengan diameter 100 mm dan ketebalan 50 mm.

2. Oleskan *coating* pada sisi benda uji sebanyak dua lapis. Lapis pertama dilakukan dengan campuran air, diikuti dengan lapis kedua tanpa campuran air.
3. Proses vakum dilakukan setelah *coating* kering, lakukan proses vakum pada benda uji selama 3 jam. Proses vakum dibagi menjadi dua tahap, yaitu satu jam pertama menggunakan metode vakum kering, diikuti dengan dua jam menggunakan metode vakum basah.
4. Rendam benda uji dalam wadah tertutup selama 12 ± 2 jam untuk memastikan penetrasi larutan yang optimal.
5. Tuangkan larutan NaOH 0,3 M pada sisi katode dan larutan NaCl 3% pada sisi anoda dari alat uji.
6. Siapkan rangkaian alat pengujian RCPT seperti yang terlihat pada **Gambar 11.** dan dilakukan pengujian selama 6 jam. Catat arus dan suhu setiap 30 menit selama periode pengujian.
7. Setelah pengujian selesai benda uji dibelah lalu di semprot benda uji dengan cairan 0,1 N silver nitrate (AgNO_3) lalu perhatikan bagian specimen yang berubah warna menjadi lebih terang.
8. Laporkan hasil pengukuran bagian specimen.



Gambar 11. Pengujian RCPT