

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan material konstruksi yang tersusun dari campuran semen, agregat halus (pasir), agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambah tertentu yang dicampur hingga membentuk massa padat setelah mengalami proses pengerasan. Beton banyak digunakan dalam pekerjaan konstruksi karena memiliki beberapa keunggulan, yaitu kuat terhadap gaya tekan, mudah dibentuk sesuai kebutuhan, ekonomis, tahan terhadap air, tahan api, serta memiliki umur yang relatif panjang (Permatasari dkk., 2020). Oleh karena itu, beton sering diaplikasikan pada elemen struktur seperti pondasi, kolom, balok, pelat lantai, dan perkerasan jalan.

2.2 Material Penyusun Beton

Beton memiliki campuran material campuran semen, agregat halus, kasar, dan air. Beberapa beton juga ditambah bahan pozolan aktif dalam bahan penyusunnya (Badan Standardisasi Nasional, 2012a). Penelitian ini menggunakan campuran yang nantinya akan disusun menjadi benda uji berbentuk silinder. Berikut komposisi dari beton sebagai berikut :

2.2.1 Semen Portland

Semen portland adalah bahan pengikat hidrolis yang dihasilkan dari penggilingan klinker yang tersusun terutama atas senyawa kalsium silikat, kemudian ditambahkan gipsum untuk mengatur waktu pengikatan. Apabila pencampuran air dengan semen semen portland akan mengalami proses pengikatan dan membentuk pasta yang mampu merekatkan agregat menjadi massa padat serta memiliki kekuatan tertentu. Karena sifat tersebut, semen menjadi material utama yang banyak digunakan dalam proses pembuatan beton dan mortar (Irawan, 2017).

Berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (2015) dalam SNI 2049-1-2020, semen portland dibedakan menjadi beberapa jenis sesuai tujuan penggunaannya, yaitu Tipe I untuk penggunaan umum, Tipe II untuk konstruksi yang memerlukan ketahanan sulfat sedang, Tipe III untuk kekuatan awal tinggi, Tipe IV untuk kebutuhan panas hidrasi rendah, dan Tipe V untuk lingkungan dengan kadar sulfat tinggi. Semen portland dipilih sesuai jenis untuk disesuaikan dengan kebutuhan struktur, lingkungan, serta mutu beton yang direncanakan agar diperoleh hasil konstruksi yang optimal.

2.2.2 Agregat

Bahan utama beton berupa kerikil, pasir, atau material mineral lainnya yang digunakan sebagai bahan pengisi utama dalam campuran beton. Dilihat dari ukurannya, agregat dibedakan menjadi dua jenis yaitu agregat halus dan agregat kasar. Agregat halus memiliki ukuran karakteristik yang berbeda dengan agregat kasar, karena campuran material tersebut memiliki pengaruh kualitas pada beton. Berikut pemaparannya,

1) Agregat Kasar

Tabel 2.1. Persyaratan Gradasi Agregat Kasar

Nomor ukuran	Ukuran nominal (saringan dengan lubang persegi)	Jumlah lebih halus berasal dari saringan <i>grain size</i> laboratorium (lubang persegi), persen massa				
		50 mm (2 in)	37,5 mm (1,5 in)	25 mm (1 in)	19 mm (3/4 in)	12,5 mm (1/2 in)
1	90 mm-37,5 mm (3,5in-1,5 in)	-	0-5	-	0-5	-
2	63 mm-37,5 mm (2,5in-1,5 in)	35-70	0-15	-	0-5	-
3	50 mm-25 mm (2,5in-1 in)	90-100	35-70	0-15	-	0-5
357	50 mm-4,75 mm (2 in-no. 4)	95-100	-	35-70	-	10-30
4	37,5 mm-19 mm (1,5in-3/4 in)	100	90-100	20-55	0-15	-

Nomor ukuran	Ukuran nominal (saringan dengan lubang persegi)	Jumlah lebih halus berasal dari saringan <i>grain size</i> laboratorium (lubang persegi), persen massa				
		50 mm (2 in)	37,5 mm (1,5 in)	25 mm (1 in)	19 mm (3/4 in)	12,5 mm (1/2 in)
467	37,5 mm-4,75 mm (1,5 in- no.4)	100	90-100	-	35-70	-
5	25,0 mm-12,5 mm (1 in-0,5 in)	-	100	90-100	20-55	0-10
56	25 mm-9,5 mm (1 in-3/8 in)	-	100	90-100	40-85	10-40
57	25 mm-4,75 mm (1 in-no. 4)	-	100	95-100	-	25-60
6	19 mm-9,5 mm (3/4 in-3/8 in)	-	-	100	90-100	20-55
67	19 mm-4,75 mm (3/4 in-no. 4)	-	-	100	90-100	-
7	12,5 mm-4,75 mm (3,5 in-1,5 in)	-	-	-	100	90-100
8	9,5 mm-2,36 mm (3/8 in-no. 8)	-	-	-	-	100
89	9,5 mm-1,18 mm (3/4 in-no. 16)	-	-	-	-	100
9 ^a	4,75 mm-1,18 mm (no. 4-no. 16 in)	-	-	-	-	-

Sumber : SNI-8321-2016

Agregat kasar menurut Badan Standardisasi Nasional (2016a) dalam SNI-1969-2016 berukuran 4,75 mm sampai ukuran 40 mm. Dalam pembuatan beton, standar agregat berupa kerikil yang harus dipenuhi berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (Badan Standardisasi Nasional, 2016d) dalam SNI-8321-2016 seperti tabel 2.1 di atas. Rentang yang ditunjukkan pada tabel tersebut agar mengendalikan mutu beton dan kebutuhan agregat untuk membuat beton.

2) Agregat Halus

Agregat halus berupa partikel mineral keras berukuran kurang dari 4,75 mm. Dalam pembuatan beton, ada standar yang harus dipenuhi yaitu ASTM C33 (2003). Batas pada pengujian lolos saringan dengan ukuran No. 200 memiliki batas 5%, karena kelolosan pada saringan tersebut merupakan material berupa debu dan lumpur.

Tabel 2.2. Susunan Saringan Agregat Halus

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos (%)
9,5 mm	100
4,75 mm (No.4)	95 - 100
2,36 mm (No.8)	80 - 100
1,18 mm (No.16)	50 - 85
600 μ m (No.30)	25 - 60
300 μ m (No.50)	5 - 30
150 μ m (No.100)	0 - 10

Sumber : ASTM C33 (ASTM International, 2003)

Selain itu kadar lumpur agregat halus memiliki kurang dari 5% kadar lumpur agar tidak mengganggu ikatan antara pasta semen dan butiran agregat (Departemen Pekerjaan Umum, 1989). Kondisi tersebut jika melebihi kadar tersebut akan menyebabkan penurunan kuat tekan pada beton. Maka dari itu, agregat halus atau pasir yang nantinya menjadi campuran beton memiliki kandungan melebihi syarat dari SNI, pasir tersebut harus dicuci sebelum melakukan percampuran ke material yang lainnya.

2.2.3 Air

Air adalah zat utama untuk segala kehidupan karena fungsinya yang beragam, salah satunya dalam konstruksi. Air memiliki peran penting sebagai material untuk meningkatkan efisiensi dalam pembuatan beton. Dalam proses pembuatan beton, air berfungsi sebagai hidrasi (Desti & Ula, 2021). Semen untuk merekatkan antar beton ditambahkan air, sehingga meningkatkan kekuatan dari beton. Air harus mencapai tingkat standarisasi yang ditentukan agar mutu beton yang diciptakan itu sesuai standar. Air memiliki persyaratan sebagai campuran pada beton, supaya

beton tersebut memiliki kualitas yang terbaik. Standar air tersebut yaitu SK SNI S-04-1989-F-1989 dengan syarat berikut:

1. Air harus jernih dan bebas bau;
2. Kandungan garam dan bahan organik tidak boleh melebihi 15 gram per liter;
3. Lumpur atau zat lainnya yang ada di dalam kandungan air tidak disarankan 2 gram per liter dari volume air;
4. Kadar klorida dalam air tidak disarankan lebih dari 0,5 gram setiap liter;
5. Kandungan senyawa seperti sulfat dalam air menurut standar SNI tidak disarankan lebih dari 1 gram per liter.

2.3 Zeolit

Zeolit merupakan kelompok mineral aluminosilikat yang mengandung struktur yang terdiri dari unit tetrahedral AlO_4 dan SiO_4 yang saling berhubungan dengan atom O dan Si^{4+} di dalam struktur dapat diganti dengan Al^{3+} . Zeolit terdiri dari aluminosilikat terhidrasi berupa mineral yang mengandung alkali tanah. Zeolit mengandung air dan kation di dalam rongga yang dapat disubstitusikan dalam molekul lain dengan cara *ion exchange treatment*. Zeolit memiliki sifat adsorpsi, dehidrasi, penukaran ion, katalis dan penyaringan. Zeolit memiliki 2 jenis yaitu zeolit alam dan sintetis. Zeolit alam di dapatkan dengan cara penambangan terbuka sedangkan sintesis lebih murni dibandingkan zeolit alam (Anggoro, 2017).

Secara mineralogi, karakteristik zeolit alam umumnya didominasi oleh mineral *mordenit*, *klinoptilolit*, *stilbit*, serta kuarsa. Sifat dasar bahan ini memiliki keunggulan berupa kapasitas pertukaran kation dan luas permukaan yang tinggi, sehingga sangat cocok bertindak sebagai material pengisi. Namun, untuk mengoptimalkan performa fungsionalnya, zeolit alam bawaan perlu melalui tahapan preparasi dan aktivasi terlebih dahulu melalui proses pencucian biasa serta perendaman menggunakan agen kimia (asam-basa). Proses aktivasi tersebut efektif membersihkan penutupan jaringan pori secara kimiawi sehingga mampu mendongkrak luas permukaan spesifik zeolit secara drastis, seperti peningkatan dari $35,076 \text{ m}^2/\text{g}$ melonjak menjadi $51,445 \text{ m}^2/\text{g}$, menjadikannya jauh lebih reaktif sebelum dicampurkan ke dalam matriks material beton (Putra, 2017).

Proses pengaktifan kimia dengan larutan asam dan basa berupa HCl dan NaOH berfungsi membersihkan permukaan pori serta menghilangkan zat pengotor pada kerangka zeolit alam perlakuan asam tersebut efektif melarutkan oksida logam yang menyumbat saluran, menurunkan kandungan unsur Ca dan Mg, serta meningkatkan rasio Si/Al melalui proses dealuminasi (Muttaqii dkk., 2019). Setelah melalui proses modifikasi kimia tersebut, zeolit berbutir halus dapat diaplikasikan ke dalam campuran beton sebagai material substitusi pasir. Penggantian fraksi pasir dengan material zeolit dalam proporsi porsi sebesar 15% terbukti sangat efektif memitigasi ekspansi merusak akibat reaksi alkali-silika (ASR) dengan tingkat reduksi minimal sebesar 75% (Pabiś-Mazgaj dkk., 2025, hlm. 15). Efektivitas mitigasi ini dipicu oleh sifat pozolanik zeolit yang mengubah distribusi ukuran pori beton sehingga membatasi jalur difusi ion alkali serta menurunkan intensitas keretakan pada matriks semen. Melalui pengamatan mikroskopis, retak mikro yang terbentuk di dalam internal butiran agregat saja tanpa membentuk jaringan retakan destruktif (Pabiś-Mazgaj dkk., 2025, hlm. 14).

2.4 Pengujian Material

Dalam pembuatan suatu produk konstruksi, material harus memenuhi spesifikasi dan persyaratan yang telah ditetapkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) agar diperoleh mutu, kekuatan, serta durabilitas yang sesuai dengan perencanaan. Kesesuaian kualitas material sangat berpengaruh terhadap kinerja struktur, sehingga sebelum digunakan perlu dilakukan serangkaian pengujian terhadap bahan penyusun beton. Adapun standar pengujian bahan pembuatan beton antara lain.

2.4.1 Pengujian Saringan Agregat Halus

Pengujian menurut Badan Standardisasi Nasional (Badan Standardisasi Nasional, 2012b) dalam SNI ASTM-C136-2012 saringan agregat halus untuk menentukan pembagian butiran ukuran gradasi pasir dengan syarat spesifikasi yang baik dan dapat dipakai pada saat pengujian. Pengujian untuk melakukan ketepatan data dapat

dilakukan menggunakan benda uji 300 g dan 500 g. Pasir tidak dibolehkan mengandung lumpur pada agregat > 5% lewat ayakan ukuran 0,063 mm, ditentukan dari berat kering. Apabila agregat halus memiliki kandungan lumpur 5%, maka agregat halus harus dicuci. Persyaratan modulus menurut SNI-8321-2016 pada agregat halus terletak diantara 2,2 – 3,1 menggunakan ayakan berurutan 0,16-0,315;0,63-1,25-2,5-5-10.

2.4.2 Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Persentase yang melewati saringan No. 200 (0,075 mm) di dalam sampel pasir melalui prosedur pengujian menganalisis material. Lumpur pada pasir perlu dikendalikan karena dapat menurunkan mutu beton, terutama terhadap kuat tekan. Semakin tinggi kadar lumpur yang terdapat pada agregat, maka kekuatan beton cenderung semakin menurun karena partikel lumpur dapat menghambat proses hidrasi semen (Achmad & Supriyan, 2019). Oleh karena itu, kadar lumpur pada agregat halus dibatasi maksimum sebesar 5% sesuai ketentuan standar SK SNI S-04-1989-F-1989. Pengujian kadar lumpur umumnya dilakukan dengan metode pencucian menggunakan acuan SNI ASTM C117:2012, yaitu metode uji bahan yang lebih halus dari saringan 75 μ m (No.200) pada agregat mineral dengan pencucian.

2.4.3 Pengujian Berat Jenis Material

Pengujian berat jenis saat kondisi SSD dilakukan untuk menentukan perhitungan *job mix* pada campuran beton. Densitas pasir terdapat pada SNI-1970-2016 dengan piknometer dengan hitungan berat jenis dan pengujian agregat kasar terdapat pada SNI-1969-2016 dilakukan pada material agregat kasar dengan berat jenis jenuh kering permukaan (SSD).

2.4.4 Pengujian Absorpsi Material

Penyerapan atau absorpsi material menyesuaikan SNI pada agregat halus dan kasar. Agregat halus menurut Badan Standardisasi Nasional (2016b) dalam SNI-1970-

2016 melakukan pengujian pada pengujian menggunakan oven dan uji kondisi material secara jenuh kering permukaan. Sedangkan pengujian kerikil yang digunakan pada penelitian ini menggunakan SNI-1969-2016.

2.4.5 Pengujian Kadar Air Material

Pengujian kadar air agregat halus dan kasar merupakan pengujian untuk mengetahui kandungan air yang terdapat pada material beton dalam kondisi lapangan. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan berat agregat basah dan berat agregat setelah dikeringkan hingga mencapai berat konstan untuk memperoleh persentase kadar air. Nilai kadar air sangat penting dalam perencanaan campuran beton karena memengaruhi jumlah air pencampur, faktor air semen, *workability*, serta mutu beton yang dihasilkan, sehingga hasil pengujian digunakan sebagai dasar koreksi kebutuhan air pada *mix design* agar kualitas beton tetap sesuai perencanaan.

2.4.6 Pengujian Berat Isi Agregat Kasar

Melakukan berat isi pada kerikil memiliki hubungannya dengan massa agregat kasar. Menurut ASTM C29/C29M (1997) pengujian ini memiliki 3 metode, yaitu metode susuk, penyekopan dan dihentakkan. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian dengan metode dihentakkan. Pengujian ini menggunakan bejana yang diangkat ± 50 mm secara berulang sebanyak 50 kali setiap lapisannya.

2.5 Pengujian Benda Uji

Dalam pembuatan beton, diperlukan pengujian terhadap benda uji dengan perbandingan apakah hasil dari beton yang dihasilkan telah memenuhi dari rencana dan persyaratan seperti SNI-2847-2019. Pengujian benda uji dilakukan karena kualitas beton sangat dipengaruhi oleh bahan penyusun, proses pencampuran, pelaksanaan pengecoran, serta perawatan selama masa pengerasan. Oleh karena itu, melalui pengujian benda uji dapat diketahui karakteristik beton sehingga mutu

beton yang dihasilkan dapat dievaluasi secara tepat. Adapun beberapa jenis pengujian benda uji beton antara lain sebagai berikut.

2.5.1 Pengujian Densitas Beton

Densitas diukur berdasarkan perbandingan massa terhadap volume suatu benda. Semakin tinggi nilai massa jenis, maka semakin besar massa per satuan volumenya. Pada beton, pengujian massa volume dilakukan untuk mengetahui tingkat kepadatan beton sebagai indikator mutu campuran. Nilai massa volume dipengaruhi oleh jenis agregat, kadar air, dan proses pemadatan. Beton yang lebih padat umumnya memiliki porositas lebih kecil serta kekuatan yang lebih baik. Pengujian densitas dilakukan pada saat beton keluar dari mixer atau beton masih kondisi beton segar (Badan Standardisasi Nasional, 2016c).

2.5.2 Pengujian *Slump Test* Beton

Pengujian *slump test* beton dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan (*workability*) beton segar sebelum proses pengecoran. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai slump beton semen hidrolis plastis. Metode pengujian dilakukan menggunakan kerucut Abrams yang diisi adukan beton dalam tiga lapisan, kemudian setiap lapisan dipadatkan sebanyak 25 tusukan. Setelah cetakan diangkat secara vertikal, beton akan mengalami penurunan, dan selisih tinggi antara cetakan dengan permukaan beton setelah turun dinyatakan sebagai nilai slump. Nilai slump digunakan sebagai indikator kemudahan pengerjaan campuran beton segar serta pengendalian mutu pada pelaksanaan pembetonan. Pengujian ini mengacu pada Badan Standardisasi Nasional (2008) dalam SNI-1972-2008 tentang cara uji slump beton.

2.5.3 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan terhitung pada rasio antara gaya tekan dan luas dari penampang yang diperoleh dari mesin uji kuat tekan dalam menahan beban tanpa mengalami kerusakan atau retak (Amalia & Rochmah, 2024). Kuat tekan

dipengaruhi banyak faktor antara lain komposisi bahan, suhu, lingkungan. Semakin tinggi nilai kuat tekan, semakin kuat material tersebut dapat menahan beban. Tata cara pengujian kuat tekan beton menggunakan standar SNI yaitu Badan Standardisasi Nasional (2011b) dalam SNI-1974-2011 mengenai benda uji silinder pada uji kuat tekan dan Badan Standardisasi Nasional (Badan Standardisasi Nasional, 2019) dalam SNI-2847-2019 untuk kuat minimal beton struktur. Kuat tekan minimal dapat dilihat di tabel di bawah.

Tabel 2.3. Kuat Tekan Minimum Beton

Kegunaan	Jenis Beton	Nilai f'_c Minimum (MPa)	Nilai f'_c Maksimum (MPa)
Umum	Beton normal dan beton berat ringan	17	Tidak ada batasan
Sistem rangka pemikul momen khusus dan dinding struktural khusus	Beton berat normal	21	Tidak ada batasan
	Beton berat ringan	21	35

Sumber : SNI-2847-2019 Tabel 19.2.1.1

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan kajian terhadap penelitian yang relevan sebagai dasar dan pembanding dalam penelitian ini. Kajian ini digunakan untuk mengetahui metode, hasil, serta pengaruh penggunaan bahan substitusi seperti pasir zeolit terhadap sifat beton, sehingga dapat menjadi acuan dalam penyusunan penelitian yang dilakukan. Tidak hanya itu saja, penelitian terdahulu dapat menjadi acuan keberhasilan penelitian yang dilakukan peneliti.

Tabel 2.4. Jurnal Pendukung

No	Sumber	Variabel	Hasil	Output	Pengujian	Bahan Tambah	Kekurangan
1	Ramu & Manikandan (2017)	Penggunaan zeolit sebagai substitusi agregat halus (10%, 20%, 30%) dan substitusi semen (10%) pada beton.	Kuat tekan beton pada umur 28 hari mengalami peningkatan dibanding beton normal. Nilai tertinggi diperoleh pada variasi zeolit 30% (pasir) dan 10% (semen) sebesar 37,46 MPa, lebih tinggi dari beton konvensional (35,38 MPa).	Kualitas kuat tekan dan kuat tarik beton meningkat serta memiliki kemampuan menyerap CO ₂ dengan penggunaan zeolit sebagai bahan substitusi	Pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan penyerapan karbon dioksida (CO ₂)	Pasir zeolit dan bubuk zeolit	Perlu penelitian lebih lanjut terkait variasi kadar zeolit yang lebih luas dan pengaruhnya terhadap durabilitas jangka panjang beton.
2	Zhang & Wang (Zhang & Wang, 2020)	Penggunaan pasir zeolit alami (NZ) dan zeolit kalsinasi (CZ) sebagai substitusi agregat halus sebesar 15% dan 30% pada beton.	Pada umur beton 28 hari, kuat tekan beton CZ30 mencapai sekitar 99,29 MPa atau $\pm 97\%$ dari beton normal (103,12 MPa), sehingga tidak mengalami penurunan signifikan	Dengan penambahan zeolit memiliki kemampuan mengurangi penyusutan (<i>shrinkage</i>) tanpa kuat tekan secara	Pengujian kuat tekan, <i>autogenous shrinkage</i> , <i>water absorption</i> , dan XRD, dan <i>isothermal calorimetry</i>	Pasir zeolit alami dan pasir zeolit kalsinasi	Adanya porositas pada zeolit dapat menurunkan kuat tekan pada umur awal

No	Sumber	Variabel	Hasil	Output	Pengujian	Bahan Tambah	Kekurangan
				signifikan pada umur 28 hari.			
3	Fariqie (Fariqie dkk., 2023)	Penggunaan pasir zeolit sebagai substitusi agregat halus sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100% pada batako.	Kuat tekan batako peningkatan ketahanan terhadap penetrasi klorida mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar zeolit. Nilai kuat tekan berturut-turut sebesar 76,33 kg/cm ² (0%), 68,00 kg/cm ² (25%), 61,33 kg/cm ² (50%), 50,33 kg/cm ² (75%), dan 37,67 kg/cm ² (100%). Sebaliknya, nilai penyerapan air meningkat dari 6,84% (normal) hingga 12,91% pada variasi 100% zeolit.	Penggunaan pasir zeolit menurunkan kuat tekan namun meningkatkan daya serap air batako, meskipun masih memenuhi standar SNI.	kuat tekan dan daya serap air batako umur 28 hari	Pasir zeolit sebagai substitusi agregat halus	Penggunaan zeolit dalam kadar tinggi menyebabkan penurunan kuat tekan dan peningkatan porositas sehingga daya serap air meningkat dan kualitas batako menurun.
4	Islam & Mohr (2024)	Penggunaan natural zeolit sebagai substitusi agregat halus sebesar 10%, 20%, 30%, dan 50% pada beton.	Penggunaan zeolit hingga 50% meningkatkan kuat tekan mortar hingga $\pm 35\%$ dibandingkan beton normal, dengan nilai optimum pada 30% substitusi. Selain itu, terjadi peningkatan derajat hidrasi dan gel/space ratio akibat efek internal curing.	Peningkatan kuat tekan, mikro struktur (ITZ lebih padat dengan C-S-H), serta durabilitas beton melalui penggunaan zeolit sebagai agregat halus.	Pengujian kuat tekan, <i>autogenous shrinkage</i> , <i>drying shrinkage</i> , <i>alkali-silica reaction (ASR)</i> , <i>chloride ion permeability (SR)</i> , serta analisis	zeolit alam sebagai agregat halus	Penggunaan zeolit dalam kadar tinggi (50%) dapat menurunkan kuat tekan dibandingkan variasi optimum karena kekuatan agregat zeolit lebih rendah serta meningkatkan

No	Sumber	Variabel	Hasil	Output	Pengujian	Bahan Tambah	Kekurangan
			Penyusutan autogenous berkurang hingga 80% dan drying shrinkage hingga 25%. Durabilitas juga meningkat dengan penurunan ekspansi ASR hingga 90%.		mikrostruktur (SEM, gel/space ratio, derajat hidrasi), Pengujian		penyerapan air yang berlebih.
5	Pabiś-Mazgaj dkk., (2025)	Penggunaan <i>fine-grained zeolite</i> sebagai substitusi fraksi pasir halus pada beton.	Penggunaan zeolit mampu menurunkan ekspansi akibat alkali-silica reaction (ASR) secara signifikan. Nilai ekspansi berkurang hingga ± 5 kali pada beberapa jenis pasir dan berhasil menurunkan reaktivitas agregat dari kategori reaktif menjadi non-reaktif ($<0,1\%$). Selain itu, zeolit membantu memperbaiki mikrostruktur dengan mengurangi retak akibat ASR.	Peningkatan durabilitas beton melalui penurunan reaktivitas alkali-silika (ASR) dan pengendalian retak pada beton.	Pengujian alkali-silica reaction (ASR) menggunakan accelerated mortar-bar test (AMBT), analisis petrografi, SEM-EDS, dan XRD	<i>Fine-grained zeolite (clinoptilolite dust)</i> sebagai substitusi pasir halus	Diperlukan pengujian jangka panjang (long-term aging test) untuk memastikan pengaruh zeolit terhadap durabilitas dan sifat mekanik beton secara menyeluruh.

2.7 Analisa Gap

Berdasarkan berbagai penelitian terkait penggunaan zeolit sebagai substitusi pasir, diketahui bahwa zeolit memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja beton. Penggunaan pasir zeolit dalam kadar tinggi hingga 30% pada penelitian Islam & Mohr, (2024) cenderung menurunkan kuat tekan beton secara signifikan akibat penyerapan air adukan yang tinggi. Sebaliknya, penggunaan pasir zeolit pada kadar sedang sebesar 15% terbukti paling optimum dalam menjaga stabilitas adukan dan memberikan peningkatan kuat tekan beton yang maksimal sesuai pada penelitian Ramu & Manikandan, (2017).

Namun demikian, mayoritas penelitian terdahulu seperti studi efek kelembapan agregat oleh Islam & Mohr, (2024) maupun pengeringan oven oleh Zhang & Wang, (Zhang & Wang, 2020) umumnya masih memanfaatkan pasir zeolit dalam kondisi fisik tanpa rekayasa khusus terhadap struktur pori mikro. Menurut penelitian oleh Muttaqii dkk., (2019), zeolit alam memiliki reaktivitas yang terbatas karena permukaannya masih tertutup debu dan pengotor alami. Penelitian yang mengkaji modifikasi kondisi pori zeolit pada melalui perlakuan fisik maupun aktivasi kimia masih sangat terbatas, jika mengaitkan pasir zeolit tersebut dengan material pozolanik.

Oleh karena itu, penelitian ini menetapkan kadar substitusi pasir zeolit sebesar 15% sebagai variabel tetap mengacu pada batas kadar optimum dari studi Pabiś-Mazgaj dkk., (2025) dan Ramu & Manikandan, (2017) guna mengevaluasi pengaruh berbagai perlakuan kelembapan fisik dan aktivasi kimia terhadap kondisi void pasir zeolit. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai hubungan antara rekayasa zeolit dan kinerja beton.

2.8 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian teori dan penelitian terdahulu, penggunaan pasir zeolit pada substitusi sebagian pasir dapat memengaruhi spesifikasi beton khususnya pada kuat

tekan, densitas, dan *workability*. Karena itu, hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

- 1 Penggunaan pasir zeolit sebagai substitusi sebagian pasir dapat mengurangi berat isi pada beton disebabkan oleh berat jenis pada zeolit lebih rendah dibanding pasir;
- 2 Penggunaan pasir zeolit sebagai substitusi sebagian pasir dapat mengurangi *workability* beton disebabkan oleh penyerapan air pada zeolit tergolong tinggi;
- 3 Penggunaan pasir zeolit sebagai substitusi sebagian pasir dapat memengaruhi kuat tekan beton disebabkan oleh karakteristik pasir zeolit.