

**PENGARUH PERLINDUNGAN INTEGRAL DAN EKSTERNAL  
*WATERPROOFING* TERHADAP KUAT TEKAN, PENETRASI AIR, DAN  
MIKROSTRUKTUR BETON *READY MIX***

**(Tesis)**

**Oleh**

**ILHAM FAJAR KHAIRI  
2425011007**



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

**PENGARUH PERLINDUNGAN INTEGRAL DAN EKSTERNAL  
*WATERPROOFING* TERHADAP KUAT TEKAN, PENETRASI AIR, DAN  
MIKROSTRUKTUR BETON *READY MIX***

Oleh

**ILHAM FAJAR KHAIRI  
2425011007**

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar  
MAGISTER TEKNIK**

**Pada  
Jurusan Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

## ABSTRAK

### **PENGARUH PERLINDUNGAN INTEGRAL DAN EKSTERNAL *WATERPROOFING* TERHADAP KUAT TEKAN, PENETRASI AIR, DAN MIKROSTRUKTUR BETON *READY MIX***

OLEH

**ILHAM FAJAR KHAIRI**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* terhadap kuat tekan, penetrasi air, dan mikrostruktur beton *ready mix*. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi jenis beton, yaitu beton normal, beton dengan integral *waterproofing*, dan beton dengan kombinasi integral *waterproofing* dan *coating* eksternal. Pengujian dilakukan terhadap kuat tekan, kedalaman penetrasi air, serta analisis mikrostruktur menggunakan SEM–EDX pada berbagai umur dan kondisi perendaman.

Hasil analisis statistik ANOVA dua arah menunjukkan bahwa variasi sistem perlindungan beton, umur, dan media perendaman tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton pada taraf signifikansi 5%. Namun, secara deskriptif seluruh beton telah melampaui kuat tekan rencana pada umur 28 hari, dan pada umur 365 hari terjadi penurunan kuat tekan yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan perendaman jangka panjang, seperti proses *leaching* dan degradasi mikrostruktur. Beton dengan kombinasi perlindungan integral dan *coating* menunjukkan penurunan yang lebih terkendali dibandingkan variasi lainnya.

Sebaliknya, hasil uji penetrasi menunjukkan bahwa sistem perlindungan *waterproofing* memberikan pengaruh signifikan terhadap ketahanan beton terhadap penetrasi air. Beton dengan kombinasi perlindungan integral dan *coating* eksternal secara konsisten menunjukkan nilai penetrasi terendah dan memenuhi kriteria beton kedap air untuk kondisi agresif kuat. Hasil SEM–EDX memperlihatkan bahwa beton dengan perlindungan *waterproofing* memiliki

mikrostruktur yang lebih rapat, pori yang lebih tertutup, serta distribusi C–S–H yang lebih merata.

Secara mekanisme, peningkatan kinerja beton lebih dipengaruhi oleh proses *pore blocking* dan *pore refinement* yang mengarah pada kondisi *pore discontinuity*, sehingga jalur aliran air dalam beton menjadi terputus. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* tidak berfungsi utama dalam meningkatkan kuat tekan beton *ready mix*, tetapi berperan signifikan dalam meningkatkan durabilitas beton, khususnya dalam mengurangi penetrasi air dan memperlambat degradasi jangka panjang.

Kata Kunci : beton *ready mix*, *waterproofing*, kuat tekan, penetrasi air, mikrostruktur beton, *pore discontinuity*, durabilitas

## **ABSTRACT**

### **EFFECT OF INTEGRAL AND EXTERNAL WATERPROOFING PROTECTION ON THE COMPRESSIVE STRENGTH, WATER PENETRATION, AND MICROSTRUCTURE OF READY-MIX CONCRETE**

**By**

**ILHAM FAJAR KHAIRI**

This study aims to analyze the effect of integral and external waterproofing protection on compressive strength, water penetration, and microstructure of ready-mix concrete. An experimental method was employed using three types of concrete: normal concrete, concrete with integral waterproofing, and concrete with a combination of integral waterproofing and external coating. The tests included compressive strength, water penetration depth, and microstructural analysis using SEM–EDX at various ages and immersion conditions.

The results of two-way ANOVA indicate that the variation in protection systems, curing age, and immersion media does not have a statistically significant effect on the compressive strength at a 5% significance level. However, descriptively, all concrete specimens exceeded the design strength at 28 days. At 365 days, a reduction in compressive strength was observed across all variations, which can be attributed to long-term environmental effects such as calcium leaching and microstructural degradation. The concrete with combined integral waterproofing and external coating exhibited a more controlled reduction compared to other variations.

In contrast, the water penetration test results show that waterproofing protection has a significant effect on improving resistance to water ingress. Concrete with combined internal and external protection consistently exhibited the lowest penetration depth and met the criteria for severe exposure conditions.

SEM–EDX analysis revealed a denser microstructure, reduced pore connectivity, and more uniform C–S–H distribution in waterproofed concrete.

Mechanistically, the improvement in performance is primarily governed by pore blocking and pore refinement processes, which lead to pore discontinuity, thereby interrupting the flow paths of water within the concrete matrix. Therefore, it can be concluded that integral and external waterproofing do not primarily enhance the compressive strength of ready-mix concrete but significantly improve its durability, particularly by reducing water penetration and slowing long-term degradation.

Keywords: ready-mix concrete, waterproofing, compressive strength, water penetration, microstructure of concrete, pore discontinuity, durability

Judul Tesis

**: PENGARUH PERLINDUNGAN INTEGRAL  
DAN EKSTERNAL WATERPROOFING  
TERHADAP KUAT TEKAN, PENETRASI  
AIR, DAN MIKROSTRUKTUR BETON  
READY MIX**

Nama Mahasiswa

**: Itham Fajar Khairi**

Nomor Pokok Mahasiswa

**: 2425011007**

Program Studi

**: Magister Teknik Sipil**

Fakultas

**: Teknik**



**Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.**  
NIP 19700430 199703 1 003

**Dr. Eng. Mohd Isneini, S.T., M.T.**  
NIP 19721026 200003 1 001

**2. Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil**

**Dr. Ir. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T.**  
NIP 19741004 200003 2 002

**MENGESAHKAN**

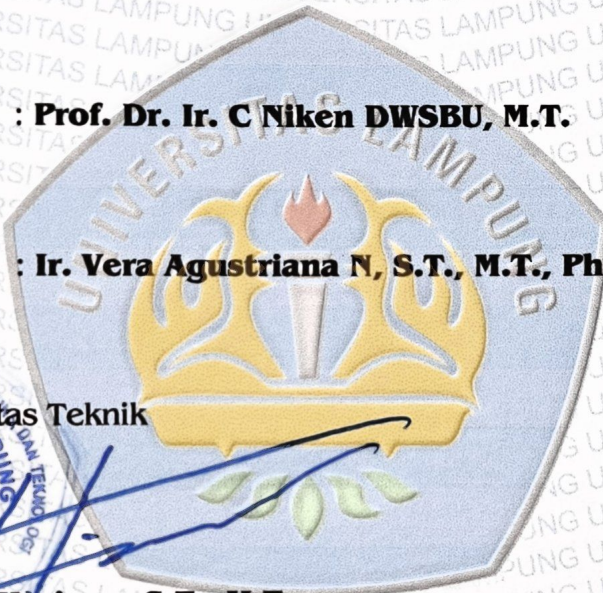
**1. Tim Penguji**

**Ketua : Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.** 

**Sekretaris : Dr. Eng. Mohd Isneini, S.T., M.T.** 

**Anggota : Prof. Dr. Ir. C Niken DWSBU, M.T.** 


**Anggota : Ir. Vera Agustriana N, S.T., M.T., Ph.D.** 



**2. Dekan Fakultas Teknik**

  
**Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**  
NIP 19691030 200003 1 001

**3. Direktur Program Pascasarjana**

  
**Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.**  
NIP 19640326 198902 1 001

**Tanggal Lulus Ujian Tesis : 30 April 2026**



## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis saya yang berjudul “Pengaruh Perlindungan Integral Dan Eksternal *Waterproofing* Terhadap Kuat Tekan, Penetrasi Air, Dan Mikrostruktur Beton *Ready Mix*” merupakan hasil karya sendiri atau bukan hasil karya orang lain dan saya tidak melakukan penjiplakan, kecuali yang secara tertulis terdapat dalam naskah ini sebagaimana disebutkan didalam daftar pustaka. Selain itu, hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, Mei 2026



Ilham Fajar Khairi  
NPM 2425011007

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 3 Juli 1998, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari pasangan Bapak Suratman dan Ibu Nur Kismiyati, S.Pd.

Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-kanak di TK Satria Sukarame, Kota Bandar Lampung pada tahun 2005. Pendidikan Sekolah Dasar diselesaikan di SD Negeri 1 Sukarame pada tahun 2011, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 5 Bandar Lampung pada tahun 2014, dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 2 Bandar Lampung pada tahun 2017.

Penulis melanjutkan pendidikan Sarjana (S1) pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dan merupakan bagian dari angkatan 2017. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada tahun 2022.

Setelah menyelesaikan pendidikan sarjana, penulis memperoleh pengalaman kerja di bidang teknik sipil sebagai upaya pengembangan pengetahuan dan keterampilan di dunia profesional.

Pada tahun 2024, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dan direncanakan lulus pada tahun 2026.

Dalam penyusunan tesis, penulis mengambil judul “Pengaruh Perlindungan Integral dan Eksternal *Waterproofing* terhadap Kuat Tekan, Penetrasi Air, dan Mikrostruktur Beton *Ready Mix*”.

Penulis memiliki minat pada bidang rekayasa struktur, khususnya dalam kajian kinerja, durabilitas, dan teknologi material beton.

## **PERSEMBAHAN**

Puji syukur kepada ALLAH swt yang telah memberikan kelancaran dan kemudahan dalam menyelesaikan tesis ini sebagai salah satu syarat mencapai gelar Magister Teknik.

Untuk kedua orang tua, Ibu dan Ayah tercinta terima kasih karna selalu memberikan kasih sayang, selalu memberikan do'a, dan selalu memberikan dukungan apapun yang dibutuhkan dalam perkuliahan maupun kehidupan.

Untuk diri sendiri, terima kasih sudah bertahan sejauh ini. Mohon maaf karna selama ini mendorong terlalu keras. Kedepannya masih banyak badai yang harus dihadapi. Semoga sehat selalu, semakin kokoh, dan kelak husnul khatimah.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada almarhumah **Ibu Dr. Eng. Ir. Ratna Widyawati, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.**, atas bimbingan, ilmu, dan arahan yang telah diberikan kepada penulis selama proses awal penyusunan tesis ini. Kontribusi beliau menjadi bagian yang sangat berarti dalam perjalanan penyelesaian tesis ini. Semoga almarhumah mendapatkan tempat terbaik di sisi Allah SWT.

## **MOTTO**

"Seberat apapun masalah yang akan dihadapi, jalanin saja, semua itu pasti berlalu."

*"Nikmati setiap momen yang terjadi, karna kelak akan menjadi cerita untuk dikenang."*

"Lakukan sesuatu yang membuat mu hidup, tapi jangan pernah lupa juga bahwa manusia tidak selamanya hidup."

"Segala hal dalam hidup libatkan Allah, agar benilai ibadah, diridhoi, dan insyaAllah disupport oleh-Nya."

*(.....Petunjukpagi.....)*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kepada Allah SWT atas berkat yang telah diberikan-Nya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi ini merupakan salah satu kewajiban yang harus diselesaikan untuk memenuhi sebagai salah satu persyaratan akademis dalam menempuh pendidikan di Jurusan Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, bantuan, dan doa dari berbagai pihak, tesis ini tidak akan dapat diselesaikan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses pengerjaan tesis ini, yaitu kepada :

1. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Bidang Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Ir. Rahayu Sulistiyorini, S.T., M.T., selaku Ketua Prodi Magister Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Utama yang sudah memberikan ilmu pengetahuan, saran, kritik, serta bimbingan dalam penelitian ini.

5. Bapak Dr. Eng. Mohd Isneini, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang telah memberikan ilmu pengetahuan, saran, kritik, dan bimbingan dalam penelitian ini.
6. Ibu Prof. Dr. Ir. C Niken DWSBU, M.T., selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan dukungan, saran, kritik, dan bimbingan dalam penelitian ini.
7. Ibu Ir. Vera Agustriana N, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan saran, kritik, dan bimbingan dalam penelitian ini.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung atas ilmu yang telah diberikan selama perkuliahan.
9. Keluarga tercinta Ibu, Ayah, serta Adik yang selalu memberikan dukungan, baik material maupun spiritual selama berkuliah di Magsiter Teknik Sipil Universitas Lampung.
10. Terimakasih juga kepada teman-teman seperjuangan angkatan 2024 MTS, adik-adik 2023 rakha dkk, staff admin jurusan, serta keluarga besar Magister Teknik Sipil yang telah memberikan bantuan dan semangat dalam menyelesaikan penelitian dan perkuliahan.

Dalam penulisan laporan ini, Penulis menyadari bahwa tesis ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan maaf sebesar-besarnya. Saran dan kritik diharapkan sebagai masukan yang berharga untuk perbaikan tesis ini. Akhir kata semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkannya terutama kepada penulis sendiri.

Bandar Lampung, 2026  
Penulis,

Ilham Fajar Khairi

## DAFTAR ISI

|  |    |
|--|----|
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....  | i  |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....  | ii |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....   | iv |
| <b>I. PENDAHULUAN</b> .....  | 4  |
| A. Latar Belakang .....  | 4  |
| B. Rumusan Masalah .....   | 4  |
| C. Batasan Masalah.....  | 5  |
| D. Tujuan Penelitian.....  | 6  |
| E. Manfaat Penelitian.....   | 6  |
| <b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....  | 7  |
| A. Beton <i>Ready-Mix</i> .....  | 7  |
| B. Bahan Tambah.....   | 8  |
| C. <i>Waterproofing</i> .....  | 10 |
| D. Beton pada Air Laut .....   | 12 |
| E. Penetrasi Air Beton .....   | 14 |
| F. Mekanisme <i>Pore Blocking</i> dan <i>Pore Refinement</i> pada Beton..... | 18 |
| G. Kuat Tekan .....  | 19 |
| H. Kuat Tarik Belah .....  | 20 |
| I. Penetrasi Standar .....   | 21 |
| J. SEM dan EDX.....  | 21 |
| K. Penelitian Terdahulu.....   | 23 |
| <b>III. METODE PENELITIAN</b> .....  | 31 |

|   |     |
|---|-----|
| A. Umum.....  | 31  |
| B. Lokasi Penelitian .....  | 31  |
| C. Variabel Penelitian .....                                      | 32  |
| D. Benda Uji.....   | 33  |
| E. Peralatan .....  | 34  |
| F. Bahan.....   | 35  |
| G. Prosedur Penelitian.....                                       | 37  |
| H. Perawatan Benda Uji .....                                      | 40  |
| I. Pengujian Benda Uji.....                                       | 40  |
| J. Analisis Data .....  | 43  |
| K. Diagram Alir Penelitian.....                                   | 46  |
| IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....                                    | 47  |
| A. Umum.....  | 47  |
| B. Hasil Pengujian Kuat Tekan.....                                | 48  |
| C. Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan.....                       | 50  |
| D. Hasil Pengujian Penetrasi.....                                 | 62  |
| E. Analisis Hasil Pengujian Penetrasi.....                        | 65  |
| F. Hasil Pengujian SEM-EDX.....                                   | 77  |
| G. Analisis Hasil Pengujian SEM-EDX.....                          | 82  |
| H. Hubungan SEM-EDX Terhadap Kuat Tekan dan Penetrasi Beton....   | 89  |
| I. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu..... | 97  |
| V. KESIMPULAN DAN SARAN .....                                     | 99  |
| A. Kesimpulan.....  | 99  |
| B. Saran.....   | 101 |

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN

## DAFTAR GAMBAR

| Gambar   | Halaman |
|--|---------|
| 1. Benda uji kuat tekan beton.....   | 20      |
| 2. Ilustrasi pengukuran uji penetrasi standar.....   | 21      |
| 3. <i>Admixture integral waterproofing</i> Conplast CWP.....   | 37      |
| 4. Alat uji kuat tekan <i>Compression Testing Machine</i> .....  | 41      |
| 5. Mesin uji penetrasi standar.....  | 42      |
| 6. Diagram alir penelitian.....  | 46      |
| 7. Diagram tren rata-rata kuat tekan dengan variasi perlakuan.....   | 58      |
| 8. Benda uji yang telah dilakukan uji penetrasi standar.....   | 64      |
| 9. Benda uji penetrasi manual yang telah dilakukan uji tarik belah.....  | 65      |
| 10. Diagram rata-rata hasil uji penetrasi standar umur 28 hari.....  | 68      |
| 11. Diagram hasil uji penetrasi umur 90, 180, dan 365 hari.....  | 72      |
| 12. Diagram gabungan uji kuat tekan dan uji penetrasi.....   | 76      |
| 13. Hasil SEM dengan magnifikasi 2.00 K pada umur 365 hari terendam air<br>tawar: (a) Beton Normal, (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + <i>Coating</i> ..   | 77      |
| 14. Hasil SEM dengan magnifikasi 2.00 K pada umur 365 hari terendam air<br>laut: (a) Beton Normal, (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + <i>Coating</i> ..... | 77      |
| 15. Hasil SEM dengan magnifikasi 5.00 K pada umur 365 hari terendam air<br>tawar: (a) Beton Normal (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + <i>Coating</i> ...   | 78      |
| 16. Hasil SEM dengan magnifikasi 5.00 K pada umur 365 hari terendam air<br>laut: (a) Beton Normal, (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + <i>Coating</i> ..... | 78      |
| 17. Hasil SEM dengan magnifikasi 10.00 K pada umur 365 hari terendam air   |         |

- tawar: (a) Beton Normal, (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + *Coating* ..78
18. Hasil SEM dengan magnifikasi 10.00 K pada umur 365 hari terendam air  
laut: (a) Beton Normal, (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + *Coating* .....79
19. Hasil SEM dengan magnifikasi 15.00 K pada umur 365 hari terendam air  
tawar: (a) Beton Normal, (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + *Coating* ..79
20. Hasil SEM dengan magnifikasi 15.00 K pada umur 365 hari terendam air  
laut: (a) Beton Normal, (b) Beton Integral, (c) Beton Integral + *Coating* .....79
21. Diagram hasil data uji EDX .....81

## DAFTAR TABEL

| Tabel   | Halaman |
|---|---------|
| 1. <i>Time required to achieve a discontinuous pore structure</i> .....                     | 16      |
| 2. Jumlah benda uji kuat tekan.....   | 33      |
| 3. Jumlah benda uji penetrasi air beton.....  | 34      |
| 4. <i>Job Mix Formula</i> (JMF) beton <i>ready-mix</i> .....                                | 36      |
| 5. Hasil uji tekan beton umur 28 hari <i>curing</i> 7 hari.....                             | 48      |
| 6. Hasil uji tekan beton umur 56 hari perendaman air tawar.....                             | 49      |
| 7. Hasil uji tekan beton umur 56 hari perendaman air laut.....                              | 49      |
| 8. Hasil uji tekan beton umur 356 hari perendaman air tawar dan air laut.....               | 49      |
| 9. Hasil analisis ANOVA dua arah uji kuat tekan.....  | 53      |
| 10. Data gabungan hasil uji kuat tekan.....   | 56      |
| 11. Hasil uji penetrasi melalui uji penetrasi standar.....                                  | 63      |
| 12. Hasil uji penetrasi manual melalui uji tarik belah.....                                 | 64      |
| 13. Hasil distribusi ANOVA satu arah uji penetrasi standar.....                             | 67      |
| 14. Ringkasan data hasil uji penetrasi manual.....  | 69      |
| 15. Perbandingan hasil uji penetrasi standar (umur 28 hari) dengan<br>SNI 03-2914-1992..... | 74      |
| 16. Hasil pengamatan uji SEM.....   | 80      |
| 17. Data hasil uji EDX.....   | 81      |
| 18. Ringkasan sintesis hasil penelitian.....  | 94      |

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Beton merupakan bahan konstruksi utama yang banyak digunakan pada pembangunan gedung, bendungan, jalan raya, serta berbagai infrastruktur lainnya. Beton merupakan material komposit yang sangat bergantung pada kualitas serta proporsi masing-masing material penyusunnya (Hamdi et al., 2022). Material ini banyak digunakan karena memiliki kuat tekan yang tinggi, kemudahan dalam pelaksanaan konstruksi, serta biaya yang relatif ekonomis. Meskipun demikian, beton memiliki struktur mikro yang berpori sehingga memungkinkan terjadinya pergerakan air dan zat agresif ke dalam matriks beton. Kondisi ini dapat menurunkan tingkat durabilitas beton, terutama pada struktur yang terpapar lingkungan lembap, air tanah, maupun lingkungan laut (Neville, 2011).

Durabilitas beton dapat dipengaruhi oleh proses atau dampak dari lingkungan sekitar (eksternal) dan antar bahan-bahan penyusun dengan bahan yang tercemar baik yang berasal dari dalam beton, ataupun pada permukaan beton (internal). Salah satu masalah yang timbul untuk struktur bangunan yang berhubungan dengan air adalah rembesan air yang dapat masuk ke dalam beton. Rembesan tersebut dapat terjadi karena tegangan permukaan ataupun perbedaan tekanan air yang masuk ke dalam beton karena beton memiliki pori yang banyak dan saling berhubungan. Air yang masuk dapat menyebabkan korosi pada tulangan beton sehingga mengurangi keawetan beton dari masa layannya (Wibowo et al., 2019). Air yang masuk melalui pori-pori kapiler dapat membawa ion klorida, sulfat, serta zat agresif lainnya yang berpotensi menyebabkan degradasi beton dan mempercepat proses korosi pada tulangan

baja (Mehta & Monteiro, 2014). Oleh karena itu, pengendalian kemampuan beton dalam menyerap dan meloloskan air menjadi aspek penting dalam meningkatkan kinerja dan umur layan beton dalam jangka panjang.

Pada lingkungan pesisir, struktur beton secara langsung terpapar air laut yang memiliki salinitas tinggi dan bersifat agresif. Kandungan ion klorida dalam air laut dapat menembus pori-pori beton, merusak lapisan pasif beton yang bersifat basa, serta memicu terjadinya korosi tulangan secara bertahap (Kusminah & Aadziima, 2018). Selain itu, paparan air laut juga dilaporkan dapat mengganggu mikrostruktur beton dan menurunkan kuat tekan, sehingga mempercepat proses degradasi material beton (Tijani et al., 2015). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan ketahanan beton terhadap penetrasi air dan zat agresif merupakan aspek penting dalam perancangan beton yang digunakan pada lingkungan agresif.

Salah satu metode yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air adalah penggunaan *admixture* integral *waterproofing*. *Admixture* ini ditambahkan langsung ke dalam campuran beton dan bekerja dengan cara mengurangi ukuran pori kapiler, membentuk lapisan hidrofobik, atau menghasilkan kristal tidak larut yang dapat menutup jalur pergerakan air di dalam beton. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan *admixture* integral *waterproofing* mampu menurunkan permeabilitas serta kedalaman penetrasi air secara signifikan (Jahandari et al., 2023).

Selain perlindungan secara internal melalui *admixture* integral *waterproofing*, upaya peningkatan ketahanan beton terhadap air juga dapat dilakukan melalui perlindungan eksternal, yaitu dengan memberikan lapisan *coating waterproofing* pada permukaan beton. Lapisan ini berfungsi sebagai penghalang tambahan yang dapat mencegah masuknya air dan zat agresif dari lingkungan ke dalam struktur beton. Kombinasi antara perlindungan internal melalui *admixture* integral *waterproofing* dan perlindungan eksternal melalui

*coating waterproofing* berpotensi memberikan sistem perlindungan ganda terhadap penetrasi air pada beton.

Meskipun demikian, pengaruh penggunaan *admixture* integral *waterproofing* terhadap sifat mekanik beton, khususnya kuat tekan, masih menunjukkan hasil yang bervariasi. Beberapa penelitian menyatakan bahwa penambahan *admixture waterproofing* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton, sementara penelitian lain melaporkan adanya peningkatan ataupun penurunan kuat tekan tergantung pada jenis *admixture* serta komposisi campuran beton yang digunakan (Gojević et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi kinerja sistem *waterproofing* perlu dilakukan secara lebih spesifik pada kondisi material dan metode aplikasi yang digunakan.

Dalam praktik konstruksi modern, beton yang umum digunakan adalah beton *ready mix*, terutama pada proyek konstruksi berskala menengah hingga besar. Beton *ready mix* merupakan beton siap pakai yang diproduksi di *batching plant* berdasarkan desain campuran tertentu dan dikirim ke lokasi proyek dalam kondisi segar (Shah et al., 2014). Karakteristik beton *ready mix* yang diproduksi di *batching plant* dapat berbeda dengan beton yang dibuat di laboratorium karena dipengaruhi oleh berbagai faktor produksi nyata seperti kontrol mutu fasilitas, kalibrasi peralatan, serta kondisi operasional produksi (Skrzypczak et al., 2020). Oleh karena itu, pengujian terhadap beton *ready mix* dari proyek aktual menjadi penting untuk memperoleh data yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan.

Penelitian terdahulu umumnya mengkaji penggunaan *admixture* integral *waterproofing* pada beton skala laboratorium dengan kondisi yang terkontrol. Kajian yang mengevaluasi kombinasi perlindungan internal (*integral waterproofing*) dan perlindungan eksternal (*coating waterproofing*) pada beton *ready mix* dari proyek aktual masih relatif terbatas. Selain itu, penelitian yang tidak hanya menilai aspek kekuatan mekanik melalui uji kuat tekan dan aspek durabilitas melalui uji penetrasi air, tetapi juga mengkaji perubahan

mikrostruktur beton akibat perlakuan *waterproofing* masih jarang dilakukan secara komprehensif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh sistem perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* terhadap kinerja beton *ready mix* yang digunakan pada proyek konstruksi aktual di Bakauheni, Lampung Selatan. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi perlakuan terhadap kuat tekan beton pada umur 28, 56, dan 365 hari, termasuk kondisi perendaman air tawar dan air laut, serta terhadap kedalaman penetrasi air berdasarkan SNI 03-2914-1992. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis perubahan mikrostruktur beton menggunakan pengamatan mikroskopis guna memahami mekanisme pengaruh perlakuan *waterproofing* terhadap struktur pori beton. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai efektivitas kombinasi perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* dalam meningkatkan kedekatan serta ketahanan beton tanpa mengurangi kapasitas strukturalnya pada kondisi aplikasi lapangan.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan *admixture* integral *waterproofing* dan eksternal *waterproofing* terhadap penetrasi air dan kekuatan tekan pada beton *ready mix*?
2. Bagaimana perubahan mikrostruktur beton akibat penggunaan *admixture* integral *waterproofing* dan eksternal *waterproofing*?
3. Bagaimana efektivitas kombinasi perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* pada beton *ready mix*?

### C. Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah guna membatasi ruang lingkup penelitian yaitu :

1. Penelitian ini menggunakan *admixture* integral *crystalline waterproofing*, yaitu dengan merk *Conplast CWP (Concrete Waterproofing Powder)* merupakan produk dari PT Fosroc Indonesia.
2. Cat *waterproofing* eksternal dalam penelitian ini menggunakan jenis cat *waterproofing* merk *Sikalastic®-590 Deckseal* merupakan produk dari Sika Indonesia, yaitu pelapis anti bocor berbahan dasar *polyurethane modified acrylic dispersion*.
3. Sampel beton yang digunakan adalah beton pada suatu pekerjaan proyek dimana beton menggunakan beton *ready mix* dengan mutu rencana  $f'_c$  24,9 MPa.
4. Fokus penelitian adalah melihat pengaruh penambahan *admixture* integral *waterproofing* dan cat eksternal *waterproofing* melalui pengujian kekuatan tekan beton umur 28, 56, dan 365 hari, uji penetrasi air beton dengan uji penetrasi standar pada umur beton 28 hari dan uji tarik belah pada umur 90 hari, 180 hari, dan 365 hari, serta uji SEM-EDX untuk melihat mikrostruktur beton dengan *admixture* integral *waterproofing*.
5. Sampel direndam di air tawar dan di air laut selama 365 hari. Sampel diuji tekan, tarik belah, maupun permeabilitas pada hari ke-28, 56, 90, 180, 365.
6. Penelitian menggunakan benda uji yang berbentuk silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk uji tekan dan tarik belah dan benda uji berbentuk kubus ukuran  $20 \times 20 \times 12$  cm untuk uji penetrasi standar.
7. Karna jumlah sampel yang terbatas, untuk analisis data uji kuat tekan umur 365 hari dan uji penetrasi umur 90, 180, dan 365 hari tidak dilakukan analisis secara statistik melainkan hanya dilakukan analisis secara deskriptif.
8. Pengujian kuat tarik belah dilakukan hanya untuk mengukur kedalaman penetrasi air secara manual pada sampel beton.

#### **D. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini secara umum adalah untuk memenuhi persyaratan akademis Program Studi Magister Teknik Sipil S2 Teknik Sipil Universitas Lampung, sedangkan secara khusus adalah sebagai berikut :

1. Mengevaluasi pengaruh penggunaan *admixture* integral *waterproofing* dan eksternal *waterproofing* terhadap penetrasi air dan kekuatan tekan pada beton *ready mix*.
2. Mengkaji perubahan mikrostruktur beton akibat penggunaan *admixture* integral *waterproofing* dan eksternal *waterproofing*?
3. Mengevaluasi efektivitas kombinasi perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* pada beton *ready mix*.

#### **E. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menambah wawasan dan literatur ilmiah mengenai pengaruh penggunaan *admixture* integral *waterproofing* dan eksternal *waterproofing* terhadap sifat ketahanan air, kekuatan tekan, dan mikrostruktur beton.
2. Memberikan informasi yang bermanfaat bagi para praktisi konstruksi dalam memilih metode *waterproofing* beton yang tepat untuk proyek pekerjaan beton mereka.
3. Sebagai bahan referensi bagi mahasiswa, dosen, dan peneliti lain yang tertarik dalam topik teknologi beton dan bahan bangunan.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Beton *Ready-Mix*

Beton merupakan material campuran yang terdiri dari semen, air, agregat kasar, dan agregat halus serta bahan tambah apabila diperlukan dengan perbandingan tertentu. Pada awal pembuatannya, beton bersifat plastis sampai saat *initial setting* kemudian secara perlahan-lahan akan mengeras seperti batu (SNI 2493:2011). Beton merupakan bahan baku utama dalam konstruksi pembangunan gedung, bendungan, jalan raya, dan bangunan lainnya. Beton adalah material komposit yang sangat tergantung pada kualitas dan jumlah masing-masing material pembentuknya (Hamdi et al., 2022).

Beton *ready mix* (*ready mixed concrete*) adalah beton yang diproduksi di *batching plant* dengan komposisi campuran yang telah dirancang sebelumnya (*mix design*), kemudian diangkut ke lokasi proyek menggunakan *truck mixer* dalam kondisi segar untuk digunakan pada proses pengecoran (ACI Committee 116R-00, 2000). Produksi beton di *batching plant* memungkinkan proses pencampuran material dilakukan secara lebih terkontrol sehingga mutu beton yang dihasilkan menjadi lebih konsisten dibandingkan pencampuran beton secara manual di lapangan (Aleem et al., 2014).

Penggunaan beton *ready mix* juga memberikan beberapa keuntungan dalam pelaksanaan konstruksi, seperti meningkatkan efisiensi waktu pekerjaan, mengurangi kesalahan dalam proporsi material, serta memudahkan pengendalian mutu beton melalui pengujian seperti slump test dan kuat tekan beton (Setiawan et al., 2025). Selain itu, proses produksi yang dilakukan secara

terstandar di *batching plant* dapat meningkatkan homogenitas campuran beton sehingga kinerja beton yang dihasilkan lebih stabil (Nanda et al., 2024).

## **B. Bahan Tambah**

Bahan tambah (*admixture*) merupakan komponen yang ditambahkan ke dalam campuran beton selain air, semen, dan agregat untuk memodifikasi sifat beton segar maupun beton yang telah mengeras. Menurut SNI 2847:2019, bahan tambah didefinisikan sebagai material selain air, agregat, dan semen hidraulik yang ditambahkan ke dalam beton sebelum atau selama proses pengadukan untuk mengubah sifat beton sesuai kebutuhan.

ACI 212.3R-10 mendefinisikan *admixture* sebagai bahan yang ditambahkan ke dalam beton, selain komponen utamanya, untuk memodifikasi sifat fisik, kimia, dan mekanis beton sehingga mencapai kinerja yang diinginkan.

Sementara itu, ASTM-C125-24 menyatakan bahwa *admixture* adalah bahan yang ditambahkan ke campuran beton dalam jumlah tertentu untuk menghasilkan perubahan karakteristik beton baik pada kondisi segar maupun kondisi setelah mengeras.

Secara umum, bahan tambah untuk beton dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu bahan tambah kimia (*Chemical Admixture*) dan bahan tambah mineral (*Mineral Admixtures/Supplementary Cementitious Materials – SCM*).

Bahan tambah kimia (*Chemical admixture*) (ASTM-C494/C494M-08), yaitu bahan tambah cairan kimia yang ditambahkan untuk mengendalikan waktu pengerasan (memperlambat atau mempercepat), mereduksi kebutuhan air, menambah kemudahan pengerjaan beton, meningkatkan nilai slump dan sebagainya. Bahan tambah kimia (*Chemical Admixture*) berfungsi memodifikasi sifat beton segar dan mempengaruhi proses hidrasi. ASTM

C494/C494M “*Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete*” mengelompokkan bahan tambah kimia, sebagai berikut :

- 1) Tipe A, *Water Reducing Admixture* adalah bahan tambah yang bersifat mengurangi jumlah air pencampuran beton tanpa mengurangi kekuatan beton.
- 2) Tipe B, *Retarding Admixture* adalah bahan tambahan yang berfungsi menghambat pengikatan beton.
- 3) Tipe C, *Accelerating Admixture* adalah bahan tambahan berfungsi mempercepat pengikatan dan pengembangan kekuatan awal beton.
- 4) Tipe D, *Water Reducing and Retarding Admixture* adalah bahan tambahan yang berfungsi ganda untuk mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu dan menghambat pengikatan beton.
- 5) Tipe E, *Water Reducing and Accelerating Admixture* adalah bahan tambahan berfungsi ganda untuk mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu dan mempercepat pengikatan beton.
- 6) Tipe F, *Water Reducing and High Range Admixture* adalah bahan tambahan yang berfungsi mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu sebanyak 12%.
- 7) Tipe G, *Water Reducing, High Range and Retarding Admixture* adalah bahan tambahan yang berfungsi mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu sebanyak 12% atau lebih dan juga menghambat pengikatan beton.

Bahan tambah mineral (*Mineral Admixtures/Supplementary Cementitious Materials – SCM*) merupakan material yang bersifat mineral sebagai semen tambahan yang dapat meningkatkan kinerja jangka panjang beton. Dalam SNI SNI 7656:2012 dan SNI 2847:2019, bahan tambah mineral mencakup Abu terbang (*fly ash*), *Pozzolan* alam (tras dan abu vulkanik), Terak tinggi (GGBFS/*slag*), dan *Silica fume*.

Standar internasional juga mengatur bahan tambah mineral secara spesifik melalui ASTM C618 (*Fly Ash dan Pozzolan*), ASTM C989 (*Slag Cement*), ASTM C1240 (*Silica Fume*).

Penggunaan bahan tambah pada beton bertujuan untuk memperbaiki atau mengubah sifat beton. Menurut SNI 2847:2019, fungsi utama bahan tambah meliputi:

- 1) Meningkatkan kemudahan pengerjaan (*workability*)
- 2) Mengatur waktu ikat (*setting time*)
- 3) Mengurangi penggunaan air
- 4) Meningkatkan kekuatan
- 5) Mengontrol entrainment udara
- 6) Meningkatkan durabilitas beton terhadap lingkungan agresif

ACI 212.3R-10 menambahkan bahwa *admixture* dapat digunakan untuk mengontrol hidrasi, meningkatkan performa mekanik, mengurangi reaktivitas kimia, serta memperbaiki ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan klorida.

Secara umum, bahan tambah memberikan fleksibilitas desain campuran sehingga beton dapat disesuaikan dengan kondisi lapangan, jenis struktur, dan karakteristik lingkungan.

### **C. *Waterproofing***

*Waterproofing* pada beton adalah proses penting untuk melindungi struktur beton dari penetrasi air maupun zat kimia yang dapat menyebabkan kerusakan seperti korosi pada tulangan dan penurunan kekuatan struktural. Menurut Neville, (1996) bahan tambah kedap air memiliki beberapa aksi tetapi efek yang paling menonjol adalah membuat beton menjadi *hydrophobic* (menolak air). Umumnya *waterproofing* pada beton menggunakan bahan kimia dengan

macam-macam metode perlakuan yang berbeda pada beton. Beberapa metode umum *waterproofing* yang digunakan pada beton diuraikan sebagai berikut:

a) *Waterproofing membrane*

Metode ini melibatkan aplikasi lapisan membran kedap air pada permukaan beton. Membran ini dapat berupa lembaran yang terbuat dari bahan monomer kimia, etilena, propilena yang dicampur karet. Membran ini juga dapat berupa pra-fabrikasi atau cairan yang diaplikasikan di lokasi dan kemudian mengeras membentuk lapisan pelindung. Lembaran membran disusun sesuai dengan keperluan di seluruh permukaan struktur yang dilindungi. Membran *waterproofing* sering digunakan pada atap dak beton, atap dengan kemiringan rendah, dan *basement* untuk mencegah infiltrasi air.

b) *Waterproofing Coating*

Metode ini melibatkan aplikasi lapisan tipis bahan pelapis kedap air, seperti cat khusus atau bahan berbasis semen, pada permukaan beton. *Coating* ini membentuk penghalang terhadap penetrasi air dan sering digunakan pada area basah seperti kamar mandi, balkon, dan kolam renang. Pelapis kedap air berbahan dasar semen dan polimer dengan fleksibilitas tinggi digunakan pada area basah untuk mencegah penetrasi air.

c) *Waterproofing integral*

Metode ini melibatkan penambahan bahan kimia khusus ke dalam campuran beton selama proses pencampuran. Bahan ini bereaksi dengan produk hidrasi semen untuk membentuk struktur kristal yang mengisi pori-pori dan retakan mikro dalam beton, membuatnya kedap air. Menurut Jahandari *et al.*, (2023), penggunaan *admixture waterproofing* integral dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air. Adapun jenis-jenis dari cairan integral adalah sebagai berikut :

1) *Crystalline Waterproofing*: Bahan ini bereaksi dengan air dan produk hidrasi semen untuk membentuk kristal tak larut yang mengisi pori-pori dan retak mikro pada beton.

- 2) *Hydrophobic Admixtures*: *Admixture* ini menciptakan lapisan hidrofobik di dalam beton sehingga mencegah penetrasi air.

Keunggulan Integral *Waterproofing* :

- a) Efisiensi Biaya: Mengurangi biaya konstruksi dan perawatan dibandingkan metode *waterproofing* eksternal.
- b) Estetika: Tidak mempengaruhi tampilan beton karena diaplikasikan di dalam campuran.
- c) Durabilitas: Meningkatkan ketahanan beton terhadap kondisi lingkungan yang agresif.

Menurut penelitian dari Aulia, (2012) kuat tekan beton yang menggunakan bahan *admixture waterproofing* 33% lebih besar dari pada beton normal.

#### D. Beton pada Air Laut

Beton adalah salah satu material konstruksi yang sering digunakan untuk berbagai keperluan struktural, termasuk di lingkungan pesisir dan laut, seperti dermaga, jembatan laut, pelabuhan, dan struktur lepas pantai. Namun, keberadaan air laut yang kaya akan ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ) dan sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dapat menimbulkan tantangan terhadap durabilitas beton.

Air laut memiliki sifat korosif yang dapat mempengaruhi performa beton dalam jangka panjang. Ion klorida dalam air laut dapat menembus ke dalam beton melalui pori-pori dan mencapai tulangan baja yang terkandung di dalamnya. Proses ini dapat memicu korosi tulangan baja, yang pada akhirnya dapat mengurangi kekuatan struktur beton dan menyebabkan kerusakan. Di sisi lain, ion sulfat dapat bereaksi dengan senyawa kimia dalam beton, seperti kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dan kalsium aluminat, sehingga menghasilkan produk reaksi yang menyebabkan ekspansi dan retakan pada beton.

Selain itu, lingkungan air laut juga mempercepat proses karbonasi, yaitu reaksi antara karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan senyawa kalsium dalam beton, yang dapat

menurunkan pH beton. Penurunan pH ini membuat tulangan baja dalam beton lebih rentan terhadap korosi.

Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa air laut juga memiliki potensi untuk meningkatkan kekuatan awal beton. Kandungan garam dalam air laut dapat mempercepat proses hidrasi semen, sehingga meningkatkan kekuatan awal beton. Meski demikian, efek ini biasanya bersifat sementara, karena paparan jangka panjang terhadap lingkungan air laut cenderung berdampak negatif terhadap durabilitas beton.

Wedhanto (2017) meneliti pengaruh air laut terhadap kekuatan tekan beton yang dibuat dari berbagai merek semen yang tersedia di Kota Malang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selama 7 hari perendaman dalam air laut, kekuatan tekan beton meningkat dengan cepat. Namun, perendaman yang lebih lama cenderung menurunkan kekuatannya. Selain itu, beton yang dibuat dengan Semen Tipe I menunjukkan toleransi yang lebih baik terhadap air laut dibandingkan dengan semen tipe lainnya.

Penelitian lain oleh Sidiq dan Walujodjati (2021) mengkaji kekuatan beton pada lingkungan air laut di Pameungpeuk, Garut. Studi ini menemukan bahwa tidak terjadi penurunan kuat tekan beton yang direndam dalam lingkungan air laut selama 7 dan 14 hari. Bahkan, terdapat peningkatan kuat tekan sebesar 4,84% setelah 7 hari perendaman dan 10,48% setelah 14 hari perendaman dibandingkan dengan beton yang direndam dalam air tawar.

Irawan (2023) menggunakan *Ground Penetrating Radar* (GPR) untuk menganalisis pengaruh air laut terhadap sifat mekanik beton. Hasil GPR menunjukkan bahwa beton yang terendam air laut menghasilkan nilai amplitudo yang semakin melemah, mengindikasikan perubahan dalam struktur internal beton akibat paparan air laut.

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan air laut dalam pembuatan dan perawatan beton dapat mempengaruhi kekuatan tekan dan durabilitas beton. Meskipun beberapa studi melaporkan peningkatan

awal dalam kekuatan tekan, perendaman yang lebih lama dalam air laut cenderung menurunkan kekuatan beton.

#### **E. Penetrasi Air Beton**

Penetrasi air merupakan proses dimana air masuk ke dalam pori-pori beton. Penetrasi air dapat menyebabkan korosi pada tulangan dan penurunan durabilitas beton. Penetrasi air terjadi melalui berbagai mekanisme, termasuk:

- 1) Permeabilitas: Pergerakan air melalui pori-pori beton akibat perbedaan tekanan hidrostatik. Menurut Neville (1996), permeabilitas beton sangat bergantung pada porositas dan distribusi ukuran pori dalam material. Permeabilitas beton adalah kemudahan air untuk menembus beton. Jika beton dapat ditembus air, maka dikatakan *permeabel*. Jika sebaliknya, beton dianggap kedap air (*impermeabel*). Oleh karena itu, sifat permeabilitas yang penting pada beton adalah permeabilitas air. Permeabilitas beton terjadi dalam dua cara yaitu terjebaknya gelembung udara akibat pemadatan beton yang belum sempurna dan rongga yang terbentuk akibat air dalam campuran beton yang menguap pada saat pelaksanaan pekerjaan beton. Akibat adanya rongga dan udara pada beton keras maka beton tidak kedap terhadap air, beton yang tidak kedap air mengakibatkan tulangan pada beton akan korosi dan berkurangnya volume air karena air memasuki rongga beton (Rizky & Saelan, 2019).

Sifat permeabilitas beton sangat mempengaruhi sifat mekanik beton (kuat tekan beton). Semakin besar permeabilitas beton maka akan semakin kecil kuat tekan beton dan semakin kecil permeabilitas beton maka nilai kuat tekan akan semakin besar. Hal ini terjadi karena beton yang memiliki permeabilitas beton tinggi, memiliki pori-pori yang besar sehingga kuat tekan beton akan kecil (Irawan, 2023).

- 2) Kapilaritas: Penyerapan air melalui aksi kapiler pada pori-pori kecil beton. Ukuran jumlah dan kontinuitas pori kapiler sangat mempengaruhi laju penyerapan air pada beton.

- 3) Difusi: Pergerakan molekul air yang terlarut dalam beton akibat perbedaan konsentrasi. Difusi ion-ion berbahaya dalam beton berkorelasi dengan durabilitas struktur.

Beberapa faktor utama mempengaruhi penetrasi air pada beton antara lain:

- 1) Porositas

Porositas beton ditentukan oleh rasio air-semen (*w/c ratio*) dan tingkat hidrasi. Rasio air-semen yang lebih rendah menghasilkan beton dengan porositas yang lebih kecil, sehingga mengurangi penetrasi air.

- 2) Mikrostruktur Beton

Penggunaan bahan tambahan (*admixture*) seperti *silica fume* atau *fly ash* dapat mengurangi ukuran dan jumlah pori dalam beton. Penambahan *fly ash* hingga 25% dari berat semen dapat menurunkan permeabilitas beton hingga  $\geq 50\%$ . Mohsen et al. (2023) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa substitusi *fly ash* (~20 % dari berat semen) menurunkan permeabilitas beton hingga 78 %, sedangkan pozzolan alami (NP) menurunkan permeabilitas sekitar 56,5 % dibanding beton tanpa substitusi.

- 3) Kualitas *Curing*

*Curing* yang baik membantu mencapai hidrasi semen yang maksimal, sehingga menghasilkan beton dengan mikrostruktur yang lebih rapat. Xu et al. (2022) pada penelitiannya menunjukan *standard curing* (SC) memungkinkan hidrasi semen berjalan lebih lengkap (optimal), sehingga mikrostruktur beton menjadi lebih tersusun rapat dan durabilitas tinggi. Sebaliknya, kondisi *curing* buruk seperti *hot-dry* menyebabkan hidrasi tidak maksimal, struktur longgar, dan kualitas beton menurun. Karena mikrostruktur beton lebih rapat sehingga menurunkan penetrasi air pada beton.

- 4) Retak pada Beton

Retak, baik akibat beban mekanis maupun perubahan suhu, dapat menjadi jalur utama penetrasi air. Retak dengan lebar lebih dari 0,1 mm secara signifikan meningkatkan laju penetrasi air pada beton.

Menurut Hearn et al., (2006), sifat durabilitas dan permeabilitas beton sangat ditentukan oleh struktur pori internalnya, terutama kapiler-kapiler yang terbentuk akibat kelebihan air campuran pada proses produksi beton. Struktur pori tersebut pada awalnya masih saling terhubung (*continuous pores*), sehingga memungkinkan terjadinya pergerakan air, oksigen, dan ion agresif seperti klorida dan sulfat ke dalam beton. Untuk memperoleh beton yang kedap air dan tahan terhadap penetrasi zat agresif, beton harus mencapai kondisi *pore discontinuity*, yaitu keadaan ketika jalur kapiler dalam beton tidak lagi saling berhubungan, sehingga transportasi fluida menjadi sangat terbatas.

Hearn memformulasikan teori mengenai waktu yang diperlukan untuk mencapai *pore discontinuity* berdasarkan nilai *water-cement ratio* (w/c) dan tingkat hidrasi yang terjadi pada beton. Teori tersebut ditampilkan dalam Tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. *Time required to achieve a discontinuous pore structure*

| w/c   | Waktu yang dibutuhkan | Derajat hidrasi |
|-------|-----------------------|-----------------|
| 0.40  | ± 3 hari              | 0.5             |
| 0.45  | ± 7 hari              | 0.6             |
| 0.50  | ± 14 hari             | 0.7             |
| 0.60  | ± 6 bulan             | 0.95            |
| 0.70  | ± 1 tahun             | 1.0             |
| >0.70 | tidak mungkin         | >1              |

(Hearn et al., 2006)

Berdasarkan tabel tersebut,  $w/c \leq 0.45$  direkomendasikan untuk mencapai pemutusan pori dalam waktu yang relatif singkat. Hal ini terjadi karena semakin kecil nilai w/c, semakin rendah pula porositas beton akibat terbatasnya jumlah air kapiler yang tersisa setelah hidrasi.

Hearn juga mengemukakan bahwa keberhasilan mencapai *pore discontinuity* dipengaruhi oleh kondisi *curing*. Proses curing yang optimal akan memaksimalkan reaksi hidrasi semen sehingga lebih banyak rongga kapiler

yang terisi oleh produk hidrasi seperti C-S-H gel, dan akhirnya mempercepat tercapainya kondisi pori tidak saling terhubung.

Selain itu, Hearn mengingatkan bahwa lingkungan agresif, terutama air laut dengan kandungan ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ), dapat menyebabkan keterhubungan pori terbuka kembali akibat degradasi kimia pada pasta semen. Oleh karena itu, perlindungan tambahan seperti *coating waterproofing* atau *admixture* integral dapat memperkuat ketahanan struktur pori terhadap serangan eksternal.

Menurut SNI 03-2914-1992 lingkungan agresif terhadap beton dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu agresif sedang dan agresif kuat, yang dikaitkan dengan kemampuan beton dalam menahan penetrasi air.

1) Lingkungan Agresif Sedang

Lingkungan agresif sedang adalah kondisi lingkungan yang mengandung zat-zat yang berpotensi merusak beton dalam tingkat sedang, seperti air limbah industri, air payau, atau air laut. Pada kondisi ini beton masih dapat digunakan selama memiliki ketahanan yang cukup terhadap penetrasi air. Dalam pengujian penetrasi air sesuai standar, beton dikatakan memenuhi kriteria untuk lingkungan agresif sedang apabila kedalaman penetrasi air tidak melebihi 50 mm.

2) Lingkungan Agresif Kuat

Lingkungan agresif kuat merupakan kondisi lingkungan yang memiliki tingkat keagresifan lebih tinggi karena mengandung garam-garam atau senyawa agresif dalam konsentrasi besar, misalnya air yang mengandung garam agresif dengan kadar minimal sekitar 1500 ppm. Lingkungan ini dapat mempercepat proses degradasi beton serta meningkatkan risiko korosi pada tulangan. Oleh karena itu beton yang digunakan harus memiliki tingkat kedap air yang lebih baik. Dalam pengujian penetrasi air, beton dikategorikan memenuhi kondisi agresif kuat apabila kedalaman penetrasi air tidak melebihi 30 mm.

## F. Mekanisme *Pore Blocking* dan *Pore Refinement* pada Beton

Salah satu mekanisme utama dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air adalah melalui proses *pore blocking* dan *pore refinement*. *Pore blocking* merupakan mekanisme di mana pori-pori dan kapiler dalam beton terisi atau tersumbat oleh produk reaksi kimia, sehingga jalur aliran air menjadi terhambat atau bahkan terputus (Teng et al., 2014). Proses ini umumnya terjadi akibat pembentukan kristal tidak larut atau partikel padat di dalam pori beton yang berfungsi sebagai penghalang aliran fluida (Jalali & Afgan, 2018).

Pada sistem *waterproofing* berbasis kristalin, bahan aktif dalam *admixture* bereaksi dengan produk hidrasi semen, khususnya kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), untuk membentuk struktur kristal tidak larut yang berkembang di dalam pori, kapiler, dan mikroretak beton (Azarsa et al., 2021). Kristal ini tumbuh secara progresif dan mengisi ruang kosong dalam beton, sehingga mampu memblokir jalur masuk air dan zat agresif (Gojević et al., 2021). Mekanisme ini dikenal sebagai *pore blocking*, yang secara langsung menurunkan permeabilitas beton.

Selain itu, proses *pore refinement* juga berperan penting dalam meningkatkan durabilitas beton (Cappellesso et al., 2016). *Pore refinement* merupakan proses penyempurnaan struktur pori, di mana ukuran pori menjadi lebih kecil dan distribusinya menjadi lebih homogen akibat pembentukan produk hidrat sekunder seperti C–S–H tambahan (Pazderka & Hájková, 2016). Proses ini menyebabkan berkurangnya konektivitas antar pori, sehingga aliran air di dalam beton menjadi semakin sulit terjadi (Cappellesso et al., 2016).

Dalam praktiknya, kedua mekanisme ini bekerja secara simultan. *Pore blocking* berfungsi menutup jalur aliran yang sudah ada, sedangkan *pore refinement* memperbaiki struktur pori secara keseluruhan dengan memperkecil ukuran dan konektivitas pori (Pazderka & Hájková, 2016). Kombinasi kedua

mekanisme ini berkontribusi terhadap terbentuknya kondisi *pore discontinuity*, yaitu kondisi di mana pori-pori tidak lagi saling terhubung, sehingga beton menjadi lebih kedap terhadap penetrasi air (Hearn, 2006).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa efektivitas *admixture* integral *waterproofing* dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap air tidak berasal dari peningkatan kekuatan mekanik, melainkan dari kemampuannya dalam memodifikasi struktur pori melalui mekanisme *pore blocking* dan *pore refinement*, yang pada akhirnya menurunkan permeabilitas dan meningkatkan durabilitas beton.

## G. Kuat Tekan

Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan (SNI 03-1974-1990). Kuat tekan beton merupakan sifat terpenting dalam kualitas beton dibanding dengan sifat-sifat lain. Kuat tekan beton ditentukan dengan mengatur perbandingan semen, agregat kasar, agregat halus dan air.

Benda uji yang digunakan untuk kuat tekan berbentuk silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm dapat dilihat pada Gambar 1.

Rumus untuk mendapatkan kuat tekan:

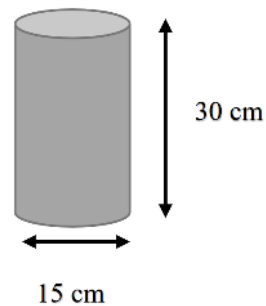
$$f'_c = \frac{P}{A}$$

Keterangan :

$f'_c$  = Kuat tekan (MPa)

P = Beban tekan maksimum (N)

A = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)



Gambar 1. Benda Uji Kuat Tekan Beton

## H. Kuat Tarik Belah

Kuat tarik belah beton adalah nilai kuat tarik tidak langsung benda uji beton berbentuk silinder yang diperoleh dengan memberikan beban pada benda uji yang diletakkan mendatar di atas meja tekan mesin uji (SNI 03-2491-2002).

Benda uji yang digunakan dalam uji belah berbentuk silinder atau kubus seperti pada uji kuat tekan. Namun, biasanya benda uji yang berbentuk silinder digunakan pada uji belah.

Ketika beban  $P$  mencapai nilai maksimumnya, silinder atau kubus beton yang diuji akan terbelah. Pada umumnya nilai kuat tarik pecahan beton adalah  $1/8$  sampai  $1/12$  dari nilai kuat tekan beton.

Berdasarkan SNI 2491:2014, rumus kekuatan tarik belah dihitung sebagai berikut:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld}$$

Keterangan:

$f_{ct}$  = Kuat tarik belah (MPa)

$P$  = Beban uji maksimum (kN)

$l$  = Panjang benda uji (mm)

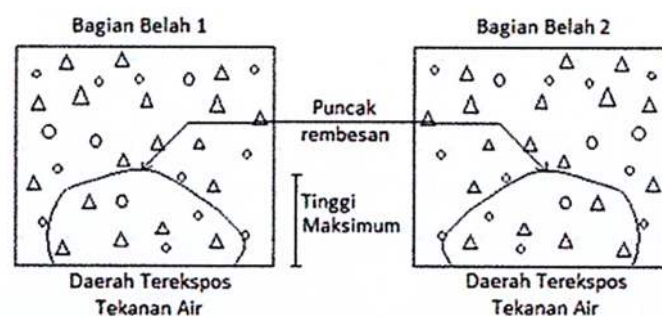
$d$  = diameter atau lebar benda uji (mm)

## I. Penetrasi Standar

Metode penetrasi standar yang mengacu kepada EN 12390-8 (2009) adalah sebuah metode pengujian beton yang mengukur kedalaman penetrasi pada beton di bawah tekanan air. Benda uji harus berbentuk kubik, silinder atau prisma dengan dimensi minimum permukaan benda uji yang akan diuji tidak kurang dari 150 mm dan tidak ada dimensi lain yang kurang dari 100 mm. Pada penelitian ini digunakan benda uji berbentuk balok dengan ukuran lebar 200 mm, panjang 200 mm dan tinggi 120 mm. Pengujian harus dimulai ketika benda uji berumur sekurang-kurangnya 28 hari. Pada metode ini memiliki prinsip kerja dengan memberikan tekanan air terhadap benda uji dan ditahan selama beberapa selang waktu sebagai berikut:

- 1 bar ( $1 \text{ kg/cm}^2$ ) selama 48 jam.
- 3 bar untuk 24 jam berikutnya.
- 7 bar untuk 24 jam berikutnya.

Setelah diberikan tekanan air sampel balok akan dibelah dan diukur kedalaman resapan air yang terjadi pada sampel yang diberikan tekanan.



Gambar 2. Ilustrasi pengukuran uji penetrasi standar

## J. SEM dan EDX

Mikroskop elektron pemindai atau *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah alat yang menggunakan berkas elektron untuk menghasilkan citra permukaan suatu material. Elektron yang ditembakkan ke permukaan material akan berinteraksi dan menghasilkan sinyal, yang kemudian memberikan

informasi terkait permukaan tersebut, seperti topografi, morfologi, komposisi, dan struktur kristalnya.

SEM merupakan jenis mikroskop elektron yang banyak dimanfaatkan dalam pengamatan permukaan material. Selain itu, alat ini juga dapat digunakan untuk menganalisis struktur kristalografis suatu bahan dan membantu dalam identifikasi unsur atau senyawa yang terkandung di dalamnya. SEM menggunakan dua berkas elektron secara bersamaan: satu diarahkan ke spesimen untuk dianalisis, sementara yang lainnya digunakan untuk membentuk gambar melalui tabung sinar katoda CRT (*Cathode Ray Tube*).

Sementara itu, EDX atau *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengetahui kandungan unsur dalam suatu sampel. Metode ini didasarkan pada pendeteksian dan pengukuran sinar-X yang dihasilkan akibat tembakan elektron berenergi tinggi ke permukaan material. Kedalaman penetrasi elektron ke dalam sampel dapat dihitung dengan rumus (Feldman, et al. 1986) :

$$X (\mu\text{m}) = \frac{0,1 E_0^{1,5}}{\rho}$$

Keterangan :

$X (\mu\text{m})$  = Kedalaman penetrasi elektron ( $\mu\text{m}$ )

$E_0$  = Tegangan pemercepat berkas electron (keV)

$\rho$  = Kerapatan dari sampel ( $\text{g/cm}^3$ )

Analisis unsur melalui EDX dilakukan dengan membandingkan intensitas sinar-X dari unsur dalam sampel terhadap sampel standar yang memiliki unsur serupa. Intensitas sinar-X yang dihasilkan sebanding dengan konsentrasi unsur dalam sampel, peluang terjadinya ionisasi, serta panjang lintasan elektron di dalam bahan.

## K. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan suatu upaya untuk membandingkan penelitian yang sedang dilakukan dengan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk mengidentifikasi kesamaan dan perbedaan antara penelitian saat ini dengan penelitian terdahulu, sehingga dapat mengevaluasi kelebihan dan kekurangan dari penelitian yang sedang dilaksanakan.

Songkhla et al., (2024) juga mengevaluasi efektivitas bahan pelapis kedap air kristalin integral (*Integral Crystalline Waterproofing/ICW*) terhadap ketahanan air, kekuatan mekanik, dan karakteristik mikrostruktur beton pada struktur *basement* gedung konvensi nasional dengan ketebalan beton 100 cm. Sampel inti beton diuji menggunakan metode pengeringan udara dan perendaman air berselang. Pengujian mencakup penyerapan air, kuat tekan, kecepatan gelombang ultrasonik (UPV), serta analisis mikrostruktur menggunakan SEM-EDS. Hasil menunjukkan bahwa pelapisan ICW secara signifikan mengurangi penyerapan air, meningkatkan kekuatan tekan hingga 17%, dan menghasilkan nilai UPV yang lebih tinggi dibandingkan beton tanpa pelapis, yang menandakan struktur beton lebih padat dan homogen. Analisis mikrostruktur mendeteksi senyawa titanium yang berasal dari ICW, berperan dalam pembentukan kristal tak larut yang menyumbat pori-pori beton. Distribusi senyawa ini lebih merata pada kondisi perendaman air. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas ICW sangat dipengaruhi oleh metode dan kondisi *curing*. Secara keseluruhan, ICW terbukti meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air serta memperkuat struktur internalnya. Penelitian ini menekankan pentingnya metode aplikasi dan *curing* yang tepat untuk mengoptimalkan performa ICW. Studi lanjutan disarankan untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang ICW dalam berbagai kondisi lingkungan.

Jahandari et al., (2023) menjelaskan penetrasi air dan zat agresif merupakan penyebab utama kerusakan fisik dan kimiawi pada infrastruktur beton, yang menurunkan durabilitas dan masa pakai struktur. Untuk mengatasi masalah ini, berbagai metode pelindung seperti pelapisan permukaan dan bahan tambah (*admixture*) keadap air telah digunakan. Studi ini secara komprehensif mengulas beton keadap air integral, yang menggunakan *admixture* seperti *floor hardener*, bahan hidrofobik, dan kristalin yang dicampurkan langsung ke dalam beton. Dibandingkan metode pelapisan permukaan, pendekatan ini menawarkan keunggulan seperti kemudahan aplikasi dan minimnya perawatan. Namun, beberapa *admixture* dapat menurunkan kelecakan (*workability*) dan kekuatan tekan beton. *Admixture* kristalin terbukti efektif menutup pori dan bahkan dapat menyegel retak-retak kecil, tetapi pengaruhnya terhadap durabilitas jangka panjang masih belum pasti. Studi ini menyimpulkan perlunya panduan teknis dan penelitian lanjutan, termasuk analisis siklus hidup, untuk mengoptimalkan penggunaan beton keadap air integral dalam berbagai aplikasi teknik sipil.

Jalal et al., (2023) mengevaluasi efektivitas beberapa produk *waterproofing* pada beton—yakni *integrated waterproofing compound* (IWC), semen *water-repellent*, dan pelapis *waterproofing* berbasis akrilik serta *lateks kopolimer styrene-butadiena*. Uji dilakukan terhadap properti beton segar (*slump*), kepadatan, kekuatan mekanik (kekuatan tekan, lentur, dan tarik belah), serta daya tahan (penyerapan air dan sorptivitas). Hasilnya, beton dengan IWC menunjukkan *slump* tertinggi (56 mm), kekuatan tekan terbaik (39,33 N/mm<sup>2</sup>), kekuatan lentur (5,85 N/mm<sup>2</sup>), dan tarik belah (3,80 N/mm<sup>2</sup>) pada umur 28 hari. Sementara itu, kepadatan tertinggi (2.459 kg/m<sup>3</sup>) dicapai oleh beton dengan semen *water-repellent*. Untuk daya tahan, beton berlapis akrilik mencatat penyerapan air terendah (0,36) serta sorptivitas minimal (0,022 mm/min<sup>0,5</sup>) setelah 48 jam. Secara keseluruhan, IWC unggul dalam meningkatkan sifat mekanik, sedangkan pelapis akrilik memberikan perlindungan terbaik terhadap penetrasi air, menjadikannya pilihan cocok untuk durabilitas beton berkelanjutan.

Penelitian yang dilakukan oleh Kaur et al., (2022) bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan bahan tambah kedap air (*waterproofing admixture*) terhadap sifat fisik dan mekanik beton, terutama dalam meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air. Beton dengan rasio air-semen 0,55 dibuat dengan penambahan *admixture* dalam kisaran 0,12%–0,40% dari berat semen. Pengujian dilakukan terhadap kelecakan (*slump*), kekuatan tekan pada umur 7 dan 28 hari, serta permeabilitas air. Hasil menunjukkan bahwa penambahan *admixture* meningkatkan kelecakan beton hingga 2,5 kali lipat, memperbaiki kekuatan tekan, dan secara signifikan menurunkan volume pori serta permeabilitas air. Selain itu, peningkatan modulus elastisitas menunjukkan beton yang lebih kaku dan tahan deformasi. Secara keseluruhan, *admixture waterproofing* terbukti efektif dalam meningkatkan durabilitas beton, dengan dosis optimal berada pada rentang 0,12%–0,40%.

Penelitian yang dilakukan oleh Jamal et al., (2022) mengevaluasi pengaruh penambahan bahan integral *waterproofing* terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton dengan menggunakan agregat lokal dari Kalimantan Timur, yaitu agregat halus Mahakam dan Sambera. Persentase penambahan bahan *waterproofing* adalah 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, dan 2% dari berat semen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan integral *waterproofing* memberikan peningkatan signifikan pada karakteristik mekanik beton. Pada agregat Mahakam, kuat tekan maksimum dicapai pada penambahan 2% sebesar 34.73 MPa dan kuat tarik belah maksimum juga pada 2% sebesar 2.38 MPa. Sementara itu, pada agregat Sambera, kuat tekan tertinggi juga dicapai pada penambahan 2% sebesar 30.91 MPa, namun kuat tarik belah tertinggi justru pada penambahan 1.5% sebesar 2.34 MPa. Secara keseluruhan, tingkat optimum penambahan bahan integral *waterproofing* adalah 2%, serta agregat lokal Kalimantan Timur dinilai layak digunakan dalam produksi beton kedap air.

Penelitian yang dilakukan oleh Firmansyah et al., (2022) menjelaskan beton yang dicampur *admixture waterproofing* perlu dilakukan uji permeabilitas. Namun sangat jarang beton yang sudah tercampur *admixture waterproofing* dilakukan pengujian kuat tekan. Metode penelitian yang dilakukan adalah dengan pendekatan penelitian eksperimen di laboratorium, yaitu mencari nilai kuat tekan dari masing-masing sampel beton dan kuat tekan beton tertinggi dengan menggunakan campuran *Penetron Admix* dengan persentase dari berat semen setiap variasi. Persentase campuran beton yang digunakan adalah beton normal dan campuran *Penetron Admix* 0,8 %, 0,9 % dan 1 % pada masing-masing variasi. Nilai kuat tekan beton normal yaitu 16,14 MPa. Penambahan *Penetron Admix* 0,8 % menghasilkan kuat tekan beton sebesar 13,59 MPa. Penambahan *Penetron Admix* 0,9 % menghasilkan kuat tekan beton sebesar 15,76 MPa. Penambahan *Penetron Admix* 1 % menghasilkan kuat tekan beton sebesar 16,61 MPa. Kuat tekan beton dengan campuran *Penetron Admix* 0,8 % dan 0,9 % mengalami penurunan, namun penambahan *Penetron Admix* sebesar 1 % meningkatkan kuat tekan beton. Hasil penelitian menunjukkan penambahan persentase *Penetron Admix* akan meningkatkan kuat tekan beton. Nilai kuat tekan tertinggi didapat pada penambahan *Penetron Admix* sebesar 1 %.

Gojević et al., (2021) meneliti efektivitas suatu *admixture* kedad air kristalin / *Crystalline Waterproofing Admixtures* (CWA) pada beton, khususnya berkaitan dengan rasio *air-binder*. Empat campuran beton dibuat: dua dengan rasio 0,45 dan dua dengan rasio 0,55, masing-masing dengan dan tanpa CWA. Parameter yang diuji meliputi kedalaman penetrasi air, kekuatan tekan, dan *self-healing* retak. Analisis mikrostruktur melalui SEM, EDS, XRD, dan FTIR dilakukan untuk memahami mekanismenya. Hasil utamanya: tambahan CWA tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tekan, namun berhasil mengurangi kedalaman penetrasi air, terutama pada campuran dengan rasio *air-binder* rendah. Selain itu, CWA juga meningkatkan kemampuan penutupan retak (*self-healing*), meskipun efektivitasnya tergantung pada lebar retak awal.

Azarsa et al., (2021) mengevaluasi efektivitas *Crystalline Waterproofing Admixtures* (CWA), sebuah jenis *Permeability Reducing Admixture* (PRA), pada ketahanan beton terhadap siklus beku-cair, kemampuan penyegelan diri (*self-sealing*), dan resistensi korosi pada tulangan baja. Beton yang diberi CWA menunjukkan kinerja unggul dibanding beton kontrol: 1) Setelah 300 siklus beku-cair, beton bermodifikasi CWA—meskipun tanpa udara *entrained*—menampilkan Faktor Ketahanan (*Durability Factor*) >80% tanpa kerusakan, sementara beton kontrol *non-entrained* hanya mencapai <60% dan mengalami kehilangan massa paling besar. 2) Adanya kristal CWA mengurangi permeabilitas dan menurunkan ketersediaan air dalam matriks beton, yang menjadi penyebab utama peningkatan daya tahan. 3) Uji *self-healing* menunjukkan bahwa beton CWA mampu menutup retakan lebih lebar dan lebih cepat daripada beton biasa. 4) Pengukuran korosi tulangan menunjukkan performa lebih baik pada campuran berbahan CWA dibanding kontrol. Penambahan CWA pada beton secara signifikan meningkatkan daya tahan beton terhadap siklus beku-cair, mempercepat kemampuan penutupan retakan spontan, dan mengurangi laju korosi tulangan. CWA merupakan solusi efektif untuk meningkatkan umur panjang dan kinerja struktural beton di lingkungan yang menantang.

Jalali & Afgan, (2018) menjelaskan beton yang bersifat porous rentan terhadap penetrasi air, klorida, dan zat kimia agresif, yang dapat mempercepat kerusakan struktur dan merusak integritasnya. Metode konvensional seperti pelapisan permukaan tidak cukup efektif dalam jangka panjang karena mudah terlepas dan rusak. Teknologi permeabilitas kristalin integral (*Integral Crystalline Waterproofing*) memanfaatkan permeabilitas alami beton sebagai sistem distribusi bahan kedap air. *Admixture* kristalin meresap ke dalam pori kapiler, dan retakan mikro beton, lalu membentuk kristal tidak larut yang menyumbat jalur air dan bahkan menutup retakan. Kristal ini menjadi bagian integral dari struktur beton dan tetap aktif membentuk kristal baru ketika terkena air kembali. Teknologi *Integral Crystalline Waterproofing* (ICW)

terbukti efektif meningkatkan daya tahan beton terhadap penetrasi air dan bahan kimia. Dengan membentuk kristal tak larut ICW menyumbat pori dan retakan mikro. Teknologi ini menyediakan perlindungan jangka panjang dan kemampuan *self-healing*. ICW juga mengurangi kebutuhan perawatan dan memperpanjang umur struktur beton. Teknologi ini sangat sesuai untuk konstruksi bawah tanah, *basement*, dan area lembab.

Jaya et al., (2017) menjelaskan beton Integral *waterproofing* merupakan campuran beton dengan penambahan *waterproofing* integral yang bertujuan untuk memperbaiki sifat beton terhadap ketahanan air. Penambahan Integral *waterproofing* juga akan berpengaruh terhadap kuat tekan maupun kuat tarik belah pada beton yang dihasilkan. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton, dengan perlakuan yang diberikan pada benda uji meliputi: benda uji dengan penambahan Integral *waterproofing* dan benda uji normal. Benda uji direncanakan dengan mutu  $f'_c$  25 MPa, dengan jumlah masing-masing benda uji untuk uji kuat tekan sebanyak 15 buah, sedangkan untuk pengujian kuat tarik belah 5 buah benda uji. Hasil pengujian menunjukkan terjadi penurunan kuat tekan karakteristik sebesar 7,62% pada beton integral terhadap beton normal. Hal ini disebabkan oleh adanya penambahan air untuk pencampuran *waterproofing* integral. Sedangkan dari uji kuat tarik belah ( $f_{ct}$ ) rata-rata beton, terjadi peningkatan sebesar 3,52% pada beton integral, yaitu dari  $f_{ct} = 10.22$  MPa pada beton normal sedangkan pada beton integral nilai  $f_{ct} = 10.58$  MPa.

Gupta & Biparva, (2017) mengkaji pengaruh penggunaan bahan tambah kedap air kristalin terhadap perilaku retak akibat penyusutan plastik pada beton dalam kondisi terbatas (*restrained*). Tiga jenis *admixture* kristalin diuji dan dibandingkan dengan beton kontrol melalui dua tahapan: pengujian berdasarkan standar ASTM C1579 dan pengujian pada kondisi pengeringan ekstrem yang mensimulasikan lingkungan dengan suhu tinggi dan kelembapan rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh *admixture* kristalin

mampu mengurangi retakan secara signifikan, meskipun efektivitasnya bervariasi tergantung jenis *admixture* dan kondisi lingkungan. Salah satu *admixture* menunjukkan penurunan retak hingga 80% pada kondisi standar dan 55% pada kondisi ekstrem. Temuan ini menunjukkan bahwa selain meningkatkan ketahanan terhadap air, bahan tambah kristalin juga memberikan manfaat tambahan dalam mengurangi potensi retak pada beton usia dini.

Cappellesso et al., (2016) mengevaluasi efektivitas penggunaan *admixture* kristalin sebagai campuran beton dan sebagai pelapis permukaan (dengan dan tanpa pengamplasan) untuk mengurangi porositas kapiler serta meningkatkan ketahanan beton terhadap air. Beton dengan atau tanpa tambahan *silica fume* dibandingkan dalam tiga pengaturan: (1) kontrol tanpa perlakuan, (2) *admixture* kristalin dalam campuran, dan (3) pelapis kristalin pada permukaan beton. Pengujian mencakup penyerapan air total, penetrasi air di bawah tekanan 30 kPa, dan kekuatan tekan. Hasil menunjukkan bahwa: *Silica fume* paling efektif — meningkatkan kekuatan tekan dan menurunkan penyerapan serta penetrasi air. *Admixture* kristalin dalam campuran meningkatkan kekuatan tekan, namun justru meningkatkan penyerapan dan penetrasi air, kemungkinan karena perubahan ukuran pori kapiler atau sifat higroskopiknya. Pelapis kristalin (*coating*), terutama setelah pengamplasan permukaan, secara signifikan menurunkan penyerapan dan penetrasi air, meski tidak mempengaruhi kekuatan tekan. Secara umum, penggunaan pelapis (*coating*) kristalin lebih efektif dibandingkan dengan pencampuran *admixture* kristalin, tetapi *silica fume* tetap unggul dalam meningkatkan durabilitas beton dari aspek porositas kapiler dan kekuatan.

Pazderka & Hájková, (2016) meneliti pengaruh penambahan aditif kristalin (*Crystalline admixtures*) pada beberapa sifat beton. Meskipun banyak studi sebelumnya berfokus pada kemampuan *waterproofing* dan daya tahan beton dengan aditif kristalin, beberapa sifat penting lainnya kurang dieksplorasi

secara andal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aditif kristalin mampu mengurangi permeabilitas uap air beton sebesar 16–20 %. Pengujian tekanan air juga dilakukan pada interval waktu tertentu selama fase hidrasi awal semen, dan hasilnya menunjukkan bahwa efek *waterproofing* optimal tercapai sekitar hari ke-12 setelah pencetakan beton. Selain itu, pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa beton dengan 2 % adisi kristalin memiliki kekuatan tekan yang hampir sama dengan beton tanpa aditif setelah 28 hari.

Muhammad et al., (2015) meninjau secara kritis kinerja kedap air (*waterproof*) beton dan pendekatan - pendekatan yang telah digunakan untuk meningkatkannya. Penulis mengkaji berbagai jenis bahan tambahan (*additives*), seperti polimer, silikat, dan nano-material, serta metode pengujian yang paling umum, terutama pengujian serapan air. Artikel ini menyajikan klasifikasi bahan tambahan berdasarkan struktur, aplikasi, dan fungsinya. Tujuan utamanya adalah menyediakan pemahaman sistematis guna memandu perancangan beton tahan air yang lebih efektif. Fokus penelitian perlu beralih dari hanya pengukuran serapan air ke pengujian kinerja mekanik dan durabilitas jangka panjang. Kombinasi *additive* (misalnya polimer + nano) kemungkinan efektif untuk meningkatkan ketahanan air beton. Teknik pelapisan permukaan efektif, tetapi integrasi *additive* langsung ke dalam campuran (metode integral) juga penting untuk struktur yang rentan kelembaban.

### III. METODE PENELITIAN

#### A. Umum

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh sistem perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* terhadap kinerja beton *ready mix* yang digunakan pada proyek konstruksi aktual di Bakauheni, Lampung Selatan. Melalui pengujian terhadap kekuatan tekan, penetrasi air melalui pengujian tarik belah dan penetrasi standar, melihat mikrostruktur dan unsur kimia beton *admixture* integral melalui uji SEM-EDX, serta membandingkan performa tiga jenis beton, yaitu:

- 1) Beton normal tanpa campuran *admixture* integral *waterproofing*.
- 2) Beton dengan campuran *admixture* integral *waterproofing*.
- 3) Beton dengan campuran *admixture* integral *waterproofing* yang dilengkapi dengan lapisan cat *waterproofing* eksternal.

#### B. Lokasi Penelitian

Lokasi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- 1) Pengambilan sampel beton diambil dari beton *ready mix* pada proyek pekerjaan yang berlokasi di Kecamatan Bakauheni, Lampung Selatan.
- 2) Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung berlokasi di Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro No.1 Kota Bandar Lampung.
- 3) Pengujian permeabilitas standar dilakukan di Laboratorium Uji Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia beralamat di Kampus UI, Kukusan, Kecamatan Beji, Kota Depok, Jawa Barat.

- 4) Pengujian SEM-EDX dilakukan di Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung berlokasi di Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro No.1 Kota Bandar Lampung.

### C. Variabel Penelitian

Pada penelitian ini digunakan metode eksperimental, yaitu metode penelitian yang dilakukan dengan memberikan perlakuan tertentu pada suatu variabel untuk mengetahui pengaruhnya terhadap variabel lainnya sehingga diperoleh hubungan yang bersifat rasional dan terukur.

Penelitian ini melibatkan variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah sistem perlindungan beton, yang terdiri dari:

- 1) Beton normal tanpa perlindungan,
- 2) Beton dengan penambahan *admixture integral waterproofing*, dan
- 3) Beton dengan kombinasi *admixture integral waterproofing* dan lapisan *coating* eksternal *waterproofing*.

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kuat tekan beton (MPa), kedalaman penetrasi air (mm), serta karakteristik mikrostruktur beton berdasarkan hasil pengujian SEM–EDX.

Selain itu, penelitian ini juga menggunakan variabel kontrol, yaitu umur beton dan media perendaman, yang terdiri dari perendaman air tawar dan air laut pada beberapa variasi umur pengujian.

Sampel beton yang digunakan merupakan beton *ready mix* yang berasal dari produksi *batching plant* yang digunakan pada proyek konstruksi di Kecamatan Bakauheni, Kabupaten Lampung Selatan. Beton dirancang dengan mutu rencana  $f'c = 24,90$  MPa dan rasio air-semen (w/c) sebesar 0,44. Perencanaan

campuran beton atau *Job Mix Formula* (JMF) mengacu pada ketentuan SNI 7656:2012.

Penerapan *admixture* integral *waterproofing* serta kombinasi dengan *coating* eksternal *waterproofing* pada penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh sistem perlindungan tersebut terhadap kuat tekan beton, ketahanan terhadap penetrasi air, serta perubahan mikrostruktur beton *ready mix* yang diamati melalui pengujian SEM-EDX.

#### D. Benda Uji

Penelitian ini menggunakan sampel jenis silinder beton yang memiliki diameter 15 cm dengan tinggi 30 cm untuk uji kuat tekan dan uji kuat tarik belah, serta beton dengan dimensi 20 cm × 20 cm × 12 cm untuk uji permeabilitas standar. Sampel pengujian SEM-EDX berupa serpihan dari beton yang diberi penambahan *admixture* integral *waterproofing*.

Untuk jumlah, jenis, serta perlakuan benda uji dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Jumlah benda uji kuat tekan

| Benda Uji                       | Kuat Tekan              |           |          |           |          |
|---------------------------------|-------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                 | 28 hari                 | 56 hari   |          | 365 hari  |          |
| Umur                            |                         | Air Tawar | Air Laut | Air Tawar | Air Laut |
| Perlakuan Rendaman              | Curing 7 hari Air Tawar |           |          |           |          |
| Cetakan                         | Silinder                | Silinder  | Silinder | Silinder  | Silinder |
| Beton Normal                    | 3                       | 3         | 3        | 1         | 1        |
| Beton Integral                  | 3                       | 3         | 3        | 1         | 1        |
| Beton Integral + <i>Coating</i> | 3                       | 3         | 3        | 1         | 1        |
| Jumlah                          | 9                       | 9         | 9        | 3         | 3        |
| Total                           | 33                      |           |          |           |          |

Tabel 3. Jumlah benda uji penetrasi air beton

| Benda Uji                       | Penetrasi Dasar         | Uji Tarik Belah (Untuk mengetahui kedalaman penetrasi secara manual) |          |                              |          |                              |          |
|---------------------------------|-------------------------|--|----------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|
|                                 |                         | 90 Hari (direndam 62 hari)   |          | 180 Hari (direndam 152 hari) |          | 365 Hari (direndam 337 hari) |          |
| Umur                            | 28 hari (Curing 7 hari) | Air Tawar  | Air Laut | Air Tawar                    | Air Laut | Air Tawar                    | Air Laut |
| Perlakuan Rendaman              | Air Tawar               | Air Tawar  | Air Laut | Air Tawar                    | Air Laut | Air Tawar                    | Air Laut |
| Cetakan                         | Kubus                   | Silinder   | Silinder | Silinder                     | Silinder | Silinder                     | Silinder |
| Beton Normal                    | 3                       | 1  | 1        | 1                            | 1        | 1                            | 1        |
| Beton Integral                  | 3                       | 1  | 1        | 1                            | 1        | 1                            | 1        |
| Beton Integral + <i>Coating</i> | 3                       | 1  | 1        | 1                            | 1        | 1                            | 1        |
| Jumlah                          | 9                       | 3  | 3        | 3                            | 3        | 3                            | 3        |
| Total                           | 9                       | 18   |          |                              |          |                              |          |

## E. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

### 1. Cetakan Benda Uji

Cetakan digunakan untuk mencetak beton dengan bentuk silinder dan kubus. Cetakan berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm digunakan pada pengujian kuat tekan dan tarik belah. Cetakan berbentuk kubus dengan ukuran 200 mm × 200 mm × 120 mm digunakan pada pengujian penetrasi standar.

### 2. Vibrator

Fungsi utama vibrator adalah untuk memadatkan beton segar saat pengecoran dengan mengeluarkan gelembung udara dan rongga di dalamnya, sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih kuat, padat, halus, dan tahan lama. Alat ini membantu partikel beton tersusun lebih rapat dan mengisi setiap celah pada bekisting atau cetakan beton.

### 3. Mesin Pengaduk Beton (*Concrete Mixer*)

Alat ini berfungsi untuk mengaduk campuran beton. Pada penelitian ini mesin pengaduk menggunakan mobil *truck mixer* (TM) milik perusahaan *ready mix*.

4. *Compression Testing Machine (CTM)*

*Compression Testing Machine* digunakan untuk pengujian kuat tekan beton dan uji tarik belah dengan metode *compression test*. Uji tarik belah dilakukan sebagai metode dalam membelah beton yang kemudian diambil data ukur kedalaman penetrasi air secara manual menggunakan alat ukur.

5. *Slump Test Apparatus*

Kerucut Abrams yang digunakan beserta tilam pelat baja dan tongkat baja ini berfungsi untuk mengetahui kelecakan (*workability*) adukan secara sederhana dengan percobaan *slump test*. Ukuran kerucut Abrams memiliki diameter bagian bawah 200 mm, diameter bagian atas 100 mm, dan tinggi 300 mm. Ukuran tongkat baja memiliki panjang 60 cm dan diameter 16 mm.

6. *Scanning Electron Microscope Dan Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM/EDX)*

SEM-EDX digunakan untuk mengetahui struktur mikroskopik dari beton integral *waterproofing* dan unsur-unsur kimia yang terkandung di dalamnya. Dengan menguji serpihan dari beton yang diberi penambahan *admixture* integral *waterproofing*.

7. Penetrasi Standar

Pengujian penetrasi standar menggunakan alat dan prosedurnya sesuai dengan spesifikasi EN 12390-8:2009. Pengujian ini untuk mengetahui tingkat kedalaman penetrasi air pada sampel beton. Cara kerja alat penetrasi standar yaitu sampel beton diberikan tekanan air kemudian dibelah dan diukur kedalaman resapan air yang terjadi.

## F. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Adukan Beton

Sampel beton yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beton yang berasal dari beton *ready mix* yang digunakan pada proyek pekerjaan yang

berlokasi di Kecamatan Bakauheni, Lampung Selatan. Beton tersebut menggunakan kuat tekan rencana yaitu mutu  $f'c$  24.90 MPa dan rasio air-semen (w/c) sebesar 0,44. Metode pencampuran yang menjadi pedoman pada *Job Mix Formula* (JMF) pada beton *ready mix* tersebut adalah SNI 7656:2012. *Job Mix Formula* (JMF) beton *ready-mix* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. *Job Mix Formula* (JMF) beton *ready-mix*

| No   | Uraian                      | Spesifikasi / Sumber                  | Nilai                         |
|--|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| <b>A. Parameter Beton</b>                                |                             |                                       |                               |
| 1  | Mutu beton                  | Beton <i>ready mix</i>                | K-300 ( $\pm 24,9$ MPa)       |
| 2  | Standar desain campuran     | SNI 7656:2012                         | –                             |
| 3  | Slump rencana               | Beton segar                           | 10 – 20 cm                    |
| 4  | Rasio air-semen (w/c)       | Desain campuran                       | $\pm 0,44$                    |
| 5  | Target densitas beton segar | –                                     | $\pm 2.400$ kg/m <sup>3</sup> |
| <b>B. Material Penyusun Beton</b>                        |                             |                                       |                               |
| 6  | Semen                       | OPC Type I – Semen Baturaja           | BJ $\pm 3,15$                 |
| 7  | Agregat halus               | Pasir Gunung Sugih                    | BJ $\pm 2,588$                |
| 8  | Agregat kasar 1–2           | Batu andesit (split)                  | BJ $\pm 2,678$                |
| 9  | Agregat kasar 2–3           | Batu andesit (split)                  | BJ $\pm 2,681$                |
| 10   | Air                         | Air base camp <i>batching plant</i>   | BJ $\pm 1,00$                 |
| <b>C. Komposisi Campuran Beton (per 1 m<sup>3</sup>)</b> |                             |                                       |                               |
| 11   | Semen                       | Kebutuhan material                    | 377 kg                        |
| 12   | Air                         | Kebutuhan material                    | 166 kg                        |
| 13   | Pasir                       | Kebutuhan material                    | 671 kg                        |
| 14   | Agregat kasar (C. Agg 1–2)  | Kebutuhan material                    | 1182 kg                       |
| 15   | <i>Admixture</i> 1          | Naptha RD-31 ( <i>Retarder</i> )      | 1,71 liter (0,5 %)            |
| 16   | <i>Admixture</i> 2          | Conplast CWP ( <i>Waterproofing</i> ) | 2,52 liter (0,8 %)            |

## 2. Air

Air yang digunakan pada penelitian ini adalah air tawar dan air laut sebagai media *curing* dan untuk merendam benda uji selama umur rendaman.

## 3. Cat *waterproofing* eksternal

Cat *waterproofing* eksternal dalam penelitian ini menggunakan jenis cat *waterproofing* merk Sikalastic®-590 Deckseal merupakan produk dari Sika Indonesia, yaitu pelapis anti bocor berbahan dasar *polyurethane modified acrylic dispersion*, merupakan komponen yang sangat elastis, tahan sinar UV, dan tahan genangan air.

## 4. *Admixture* Integral *Waterproofing*

*Admixture* integral *waterproofing* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu jenis *crystalline waterproofing* dengan merk Conplast CWP (*Concrete Waterproofing Powder*) dari PT Fosroc Indonesia.



Gambar 3. *Admixture* integral *waterproofing* Conplast CWP

## G. Prosedur Penelitian

Ada beberapa prosedur penelitian yaitu:

1. Persiapan alat dan bahan

Tahapan pertama menyiapkan bahan-bahan material yang dibutuhkan. Kemudian dilakukan pengecekan peralatan kembali, untuk mengetahui alat-alat masih berfungsi dengan baik agar penelitian tidak terhambat.

2. Perencanaan campuran (*mix design*)

Tahap ini adalah tahap pembuatan perencanaan campuran beton dengan didasarkan pada SNI 7656:2012. Perencanaan campuran beton dengan semen, agregat, dan air sangat penting agar mendapatkan kekuatan beton yang telah direncanakan dengan kuat tekan ( $f'c$ ) = 24,90 MPa pada umur 28 hari. Pada penelitian ini ada dua jenis *mix design*, yaitu beton normal tanpa *admixture* integral *waterproofing* dan beton dengan *admixture* integral *waterproofing*.

3. Pencampuran material beton integral *waterproofing* (*Mixing*)

Tahap ini adalah tahap pencampuran bahan material yang sudah disiapkan sesuai dengan takaran yang telah direncanakan pada *mix design*, termasuk mencampur *admixture* integral *waterproofing*. Material penyusun beton

dimasukkan ke dalam mesin pengaduk (*concrete mixer*). Pada penelitian ini digunakan *truck mixer* milik *ready mix* sesuai urutan metode pencampuran. Pada tahap ini juga dibuat dua macam adukan beton yaitu yang pertama beton normal tanpa *admixture* integral *waterproofing* dan yang kedua adalah beton dengan *admixture* integral *waterproofing*. Pencampuran *admixture* integral *waterproofing* dilakukan di lokasi proyek sesaat sebelum beton segar dituangkan. Jarak *batching plant* ke lokasi proyek berjarak  $\pm 60$  km.

Tahapan metode pencampuran beton segar dengan *admixture* integral *waterproofing* dilakukan sebagai berikut:

- a) Setibanya *truk mixer* di lokasi proyek, dilakukan pengujian *slump* awal. Nilai *slump* yang diperoleh sebesar 12 cm, masih berada dalam rentang yang disyaratkan yaitu 10–20 cm, sehingga beton memenuhi persyaratan sebelum penambahan bahan tambah.
- b) Selanjutnya, *admixture* integral *waterproofing* jenis Conplast CWP ditambahkan ke dalam *drum mixer* dengan dosis 0,8% dari berat semen, dengan rasio air-semen (w/c) tetap mengikuti rencana campuran. Pemilihan dosis 0,8% didasarkan pada rekomendasi pabrikan yang umumnya berada pada kisaran 0,6% – 1% dari berat semen, serta didukung oleh penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa dosis tersebut merupakan kisaran optimum. Berdasarkan perhitungan kebutuhan bahan, dosis tersebut setara dengan volume *admixture* sekitar  $\pm 2,52$  liter untuk setiap 1 m<sup>3</sup> beton. Dengan kapasitas rata-rata satu *truk mixer* sebesar 6 m<sup>3</sup> beton, maka total *admixture* yang ditambahkan untuk satu truk adalah sekitar  $\pm 15,12$  liter. Penambahan dilakukan secara langsung ke dalam *drum mixer* agar tercampur merata selama proses pengadukan ulang.
- c) Setelah penambahan *admixture*, *drum mixer* dijalankan kembali pada kecepatan putaran penuh selama kurang lebih 5 menit. Pengadukan ulang ini bertujuan untuk memastikan *admixture* tercampur secara homogen di dalam beton segar.

- d) Setelah proses pengadukan selesai, dilakukan pengujian *slump* kembali untuk mengevaluasi perubahan kelecakan akibat penambahan *admixture*. Nilai *slump* setelah pencampuran ulang tercatat sebesar 13 cm, yang masih berada dalam rentang spesifikasi 10–20 cm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *admixture* tidak menyebabkan perubahan *workability* yang signifikan di luar batas yang diizinkan.
- e) Beton segar yang telah memenuhi persyaratan selanjutnya digunakan untuk pembuatan benda uji berbentuk kubus dan silinder. Proses pencetakan, pemadatan, dan perawatan benda uji dilakukan sesuai prosedur standar pengujian beton, sehingga hasil pengujian dapat merepresentasikan kondisi beton secara akurat.

#### 4. Pembuatan benda uji

Benda uji dibuat dengan memasukkan campuran adukan beton kedalam cetakan silinder dan kubus. Hal tersebut dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- a) Menyiapkan cetakan benda uji, dengan memastikan cetakan dalam keadaan baik dan cukup bersih
- b) Mengoleskan oli pada sisi dalam cetakan
- c) Menuangkan adukan beton segar ke dalam cetakan silinder dan kubus, kemudian dipadatkan menggunakan vibrator serta meratakan permukaan cetakan dan memukul-mukul bagian luar cetakan agar udara yang terjebak didalam adukan keluar.
- d) Melepaskan benda uji beton dari cetakan setelah berumur 24 jam dari waktu pengecoran.
- e) Menandai masing-masing sampel dengan memberi kode pada bagian atas benda uji agar tidak tertukar antara beton normal dan beton dengan *admixture* integral *waterproofing*.

## H. Perawatan Benda Uji

Perawatan atau *curing* beton dilakukan untuk membuat beton selalu dalam keadaan lembab. Kelembapan membuat proses hidrasi berjalan dengan baik dan proses pengerasan jadi lebih sempurna sehingga tidak terjadi retakan dan mutu beton dapat tercapai. Proses *curing* awal ini dilakukan dengan cara perendaman benda uji selama 7 hari dalam bak tampungan air tawar.

Setelah melalui perendaman selama 7 hari, benda uji kemudian diberi perlakuan pelapisan *coating waterproofing* dengan aplikasi cat sebanyak dua lapis. Sesudah kering, sampel direndam kembali bersamaan dengan benda uji yang lainnya. Setelah umur 28 hari benda uji yang perlakuan rendamnya di air laut dipindahkan ke rendaman air laut.

Semua sampel direndam di air tawar dan air laut sampai umur 365 hari, dengan ada beberapa sampel yang diuji tekan, tarik belah, maupun permeabilitas pada hari ke-28, 56, 90, 180, 365.

## I. Pengujian Benda Uji

Pada penelitian kali ini, sampel benda uji ini akan dilakukan 3 pengujian, yaitu pengujian kuat tekan beton, kuat tarik belah beton, dan permeabilitas standar.

### 1. Kuat tekan

Uji tekan beton dengan menggunakan alat CTM (*Compression Testing Machine*) dengan kapasitas 150 ton dan kecepatan pembebanan 0,14 - 0,34 MPa/detik. Benda uji silinder setelah proses *curing* diangkat kemudian ditimbang, setelah itu dicatat. Benda uji diberi lapisan belerang 1,5-3 mm pada permukaan yang ditekan. Pengujian ini dilakukan pada umur beton mencapai 28, 56, 365 hari.



Gambar 4. Alat uji kuat tekan *Compression Testing Machine*

## 2. Kuat tarik belah

Setelah beton melewati masa perendaman atau *curing*, beton harus dikeluarkan dari bak rendam saat mencapai umur rencana. Silinder beton kemudian dikeringkan dari air, ditimbang untuk menentukan berat isi beton keras, dan kemudian dilakukan pengujian kuat tarik belah beton dengan menggunakan *Compressing Testing Machine* (CTM). Artinya, silinder dibelah oleh gaya kearah diameternya untuk mendapatkan kekuatan tarik belah. Sebuah batang ditambahkan ke mesin uji untuk mendistribusikan beban secara merata di sepanjang silinder.

Pengujian kuat tarik belah pada penelitian ini dilakukan sebagai metode dalam membelah benda uji dengan mengukur secara manual kedalaman penetrasi air pada beton menggunakan alat ukur.

## 3. Pengujian penetrasi air beton

Selain pengujian sifat mekanik beton, pada penelitian ini juga dilakukan pengujian penetrasi air beton. Pengujian penetrasi air beton dilakukan dengan dua metode, yaitu untuk beton umur 28 hari melalui uji pnetrasi standar, dan untuk beton umur 90, 180, dan 365 hari di uji dengan metode manual visual setelah diuji tarik belah sebagai data pendukung untuk melihat tren penetrasi air di umur beton pada jangka panjang:

- a. Penetrasi air secara visual

Metode ini dilakukan dengan merendam benda uji pada jangka waktu 90 hari, 180 hari, dan 365 hari. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian ini dilakukan menggunakan mesin pengujian kuat tarik belah. Pengujian dilakukan pada saat kondisi benda uji basah setelah perendaman. Pengujian ini dilakukan secara visual setelah benda uji dibelah, kemudian diamati jejak bekas air yang terserap masuk kedalam beton, lalu diukur kedalaman air yang menyerap secara manual menggunakan penggaris.

b. Penetrasi standar

Pada metode yang kedua beton diuji menggunakan mesin uji penetrasi standar. Pada metode ini memiliki prinsip kerja dengan memberikan tekanan air terhadap benda berbentuk balok (lebar 200 mm, panjang 200 mm dan tinggi 120 mm) dan ditahan selama beberapa selang waktu sebagai berikut:

- 1 bar ( $1 \text{ kg/cm}^2$ ) selama 48 jam
- 3 bar untuk 24 jam berikutnya
- 7 bar untuk 24 jam berikutnya

Setelah diberikan tekanan air, sampel kubus dibelah lalu diukur kedalaman resapan air yang ada pada sampel yang diberikan tekanan.



Gambar 5. Mesin uji penetrasi standar

#### 4. SEM-EDX

Pengujian beton dengan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) bertujuan untuk mendapat data visual struktur mikro serta komposisi kimia dari material beton yang diberi penambahan *admixture* integral *waterproofing*. Prosedur dimulai dengan menyiapkan sampel serpihan beton yang dibubuk, kemudian dimasukkan ke dalam ruang vakum pada alat SEM.

Pada tahap SEM, berkas elektron ditembakkan ke permukaan sampel, yang kemudian menghasilkan citra beresolusi tinggi dari mikrostruktur beton. Gambar ini memungkinkan pengamatan detail terhadap tekstur, pori-pori, dan retakan mikro.

Sementara itu, analisis EDX digunakan untuk mengetahui unsur-unsur kimia yang terdapat pada sampel dengan mendeteksi sinar-X yang dipancarkan oleh unsur seperti kalsium, silikon, dan oksigen. Kombinasi hasil SEM dan EDX memberikan gambaran menyeluruh mengenai morfologi dan distribusi unsur kimia dalam beton dengan penambahan *admixture* integral *waterproofing*.

#### J. Analisis Data

Analisis data yang dilakukan merupakan bahasan dari hasil penelitian yang selanjutnya akan ditarik kesimpulan pada akhir penelitian. Data dari uji kuat tekan, uji penetrasi, dan SEM-EDX diolah menggunakan metode Analisis Varian (ANOVA) sebagai metode analisis statistik, kemudian dilakukan analisis deskriptif untuk melengkapi hasil ANOVA yang sifatnya inferensial.

##### 1) Pengertian ANOVA

Analisis Varian (*Analysis of Variance/ANOVA*) adalah metode statistik yang digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara dua atau lebih rata-rata kelompok perlakuan. Menurut Montgomery, 2017, ANOVA digunakan ketika variabel respon dipengaruhi oleh satu atau lebih faktor yang memiliki beberapa level (taraf perlakuan). ANOVA

dinamakan demikian karena analisis dilakukan dengan membandingkan ragam (varians) antar kelompok dengan ragam dalam kelompok.

Montgomery, 2017 menjelaskan bahwa penggunaan ANOVA yang valid memerlukan beberapa asumsi dasar, yaitu:

- a) Normalitas: kesalahan (*error*) data mengikuti pola distribusi normal.
- b) Independensi: setiap data tidak saling memengaruhi satu sama lain.
- c) Homogenitas varians: besarnya variasi data antar kelompok sama.

Pemeriksaan asumsi dilakukan dengan melihat pola kesalahan data (*error*), misalnya melalui histogram kesalahan dan grafik normalitas.

## 2) ANOVA satu arah (*one-way ANOVA*)

ANOVA satu arah digunakan untuk menganalisis pengaruh satu faktor terhadap variabel respon. Model matematisnya:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Dengan pembagian varians total menjadi dua komponen utama:

$$SST = SSA + SSE$$

dengan:

- $y_{ij}$  : nilai pengamatan ke-j pada perlakuan ke-i
- $\mu$  : rata-rata umum (*overall mean*)
- $\tau_i$  : pengaruh perlakuan ke-i
- $\epsilon_{ij}$  : galat acak yang berdistribusi normal  $N(0, \sigma^2)$
- $SST$  : total *sum of squares*
- $SSA$  : *sum of squares* antar perlakuan
- $SSE$  : *sum of squares error* (dalam perlakuan)

Nilai F hitung diperoleh dari:

$$F = \frac{MSA}{MSE}$$

dimana,

- $MSA = \frac{SSA}{(a-1)}$
- $MSE = \frac{SSE}{(N-a)}$

Jika  $F_{hitung} > F_{tabel}$ , maka terdapat perbedaan yang signifikan antar rata-rata perlakuan (Montgomery, 2017).

### 3) ANOVA dua arah (*two-way* ANOVA)

ANOVA dua arah digunakan ketika terdapat dua faktor yang mempengaruhi respon. Model umum menurut Montgomery, 2017 adalah:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Keterangan:

- $\tau_i$  : pengaruh faktor A (baris)
- $\beta_j$  : pengaruh faktor B (kolom)
- $(\tau\beta)_{ij}$  : interaksi antara faktor A dan B
- $\epsilon_{ijk}$  : *error* acak

Sumber variasi yang diuji meliputi faktor A, faktor B, interaksi AB, dan *error*. Nilai F untuk masing-masing dihitung dengan rasio antara *mean square* faktor dengan *mean square error*. Besarnya F dibandingkan dengan nilai kritis distribusi F untuk menentukan signifikansi pengaruh.

### 4) Model dan uji hipotesis ANOVA

Untuk ANOVA satu arah, hipotesis diuji sebagai berikut:

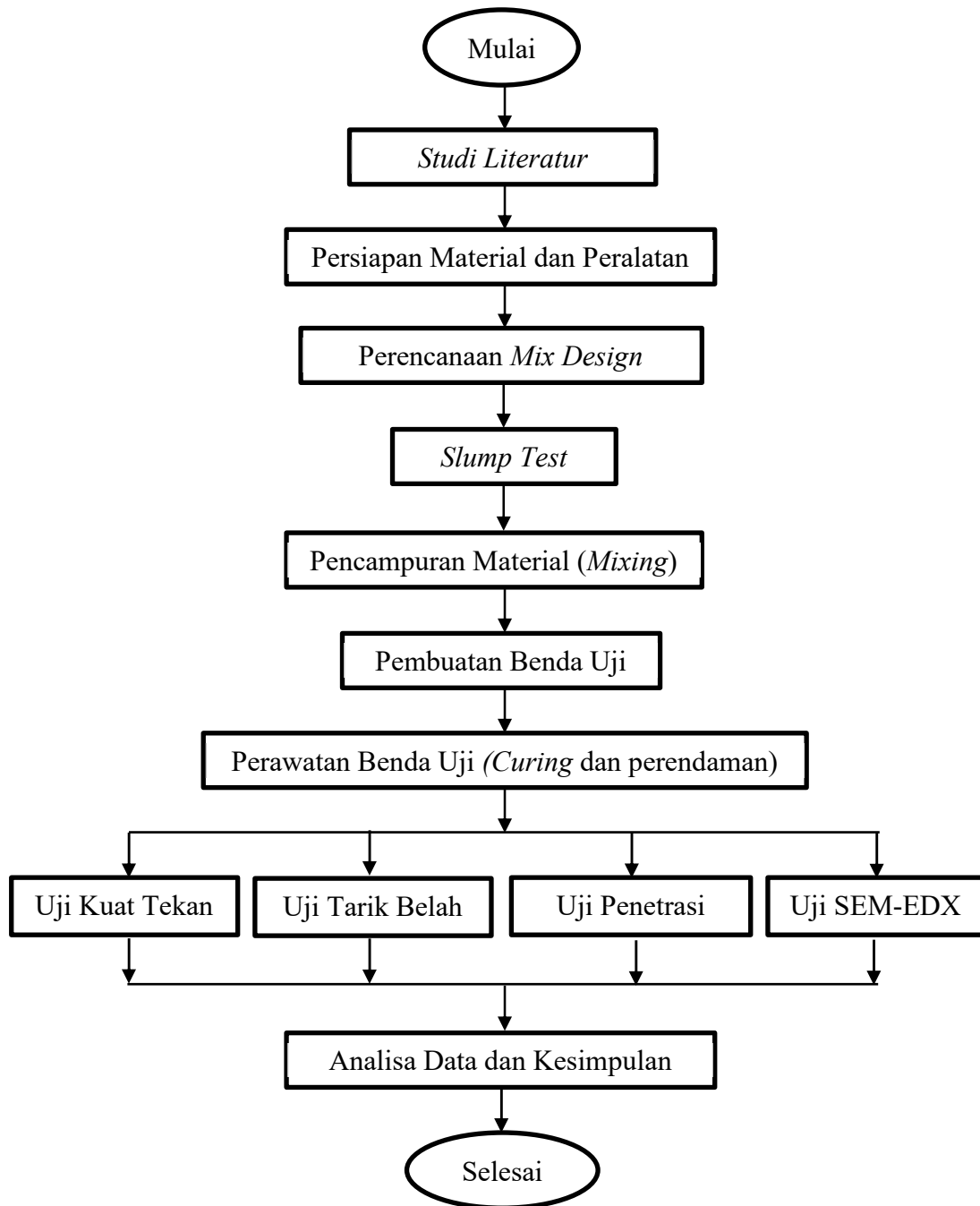
- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$  (tidak ada perbedaan rata-rata antar perlakuan)
- $H_1$ : minimal satu  $\mu_i$  berbeda

Sedangkan untuk ANOVA dua arah:

- $H_0(A): \tau_1 = \tau_2 = \dots = 0$  (tidak ada pengaruh faktor A)
- $H_0(B): \beta_1 = \beta_2 = \dots = 0$  (tidak ada pengaruh faktor B)
- $H_0(AB): (\tau\beta)_{ij} = 0$  (tidak ada interaksi antara A dan B)

Apabila nilai F hitung  $>$  F tabel atau p-value  $<$  0,05, maka hipotesis nol ditolak dan disimpulkan terdapat pengaruh signifikan (Montgomery, 2017).

## K. Diagram Alir Penelitian



Gambar 6. Diagram alir penelitian

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, analisis statistik, analisis deskriptif, serta pembahasan yang telah dilakukan terhadap beton *ready mix* dengan variasi perlindungan integral dan eksternal *waterproofing*, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Seluruh variasi beton *ready mix* yang diuji telah melampaui kuat tekan rencana sebesar 24,9 MPa pada umur 28 hari. Hasil analisis ANOVA dua arah menunjukkan bahwa variasi sistem perlindungan beton, baik penggunaan integral *waterproofing* maupun perlindungan eksternal berupa *coating*, serta variasi umur dan media perendaman tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan beton *ready mix* pada tingkat kepercayaan 95%. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan sistem perlindungan *waterproofing* (integral dan eksternal) tidak meningkatkan kuat tekan secara signifikan, namun juga tidak menurunkan performa struktural beton *ready mix*.
2. Pada umur lanjut (365 hari), terjadi kecenderungan penurunan kuat tekan pada seluruh variasi beton *ready mix* yang diuji. Penurunan ini disebabkan oleh pengaruh lingkungan perendaman jangka panjang, seperti proses leaching (pelarutan kalsium) dan interaksi dengan zat agresif yang dapat menyebabkan degradasi mikrostruktur beton. Meskipun demikian, beton dengan kombinasi perlindungan integral *waterproofing* dan *coating* eksternal menunjukkan tingkat penurunan yang lebih terkendali, sehingga lebih mampu mempertahankan kinerja mekanik dalam jangka panjang.

3. Sistem perlindungan pada beton *ready mix* yang mengombinasikan integral *waterproofing* dan perlindungan eksternal berupa *coating* secara konsisten menunjukkan kedalaman penetrasi air paling rendah, yaitu sekitar  $\pm 1-13$  mm pada seluruh umur pengujian dan media perendaman. Nilai tersebut telah memenuhi kriteria beton kedap air untuk kondisi agresif kuat ( $\leq 30$  mm) menurut ketentuan SNI 03-2914-1992, sedangkan beton tanpa perlindungan eksternal umumnya hanya memenuhi kategori agresif sedang ( $\leq 50$  mm). Hasil analisis ANOVA satu arah menunjukkan bahwa perbedaan kedalaman penetrasi antar sistem perlindungan beton signifikan secara statistik.
4. Hasil pengamatan SEM–EDX menunjukkan bahwa beton *ready mix* dengan perlindungan integral *waterproofing*, terutama yang dikombinasikan dengan perlindungan eksternal, memiliki mikrostruktur yang lebih rapat, pori yang lebih tertutup, serta distribusi produk hidrasi C–S–H yang lebih merata dibandingkan beton tanpa perlindungan. Kondisi mikrostruktur tersebut selaras dengan hasil pengujian penetrasi air yang menunjukkan peningkatan ketahanan beton *ready mix* terhadap masuknya air.
5. Pada rasio air–semen (w/c) sebesar 0,44, beton *ready mix* dengan kombinasi perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* mampu mencapai kondisi diskontinuitas pori yang lebih baik pada umur lanjut, sehingga jalur aliran air dalam beton menjadi lebih terputus. Kondisi ini menunjukkan bahwa mekanisme utama kerja integral *waterproofing* adalah melalui proses *pore blocking* dan *pore refinement*, yaitu penyumbatan dan penyempurnaan struktur pori, bukan melalui pembentukan fase struktural baru yang secara langsung meningkatkan kuat tekan beton. Temuan ini sejalan dengan konsep *pore discontinuity* yang dikemukakan oleh Hearn, yang menyatakan bahwa penurunan permeabilitas beton lebih dipengaruhi oleh terputusnya konektivitas pori dibandingkan sekadar pengurangan ukuran pori. Dengan demikian, semakin terputus jaringan pori dalam beton, maka semakin sulit air dan zat agresif menembus ke dalam matriks beton.

6. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan perlindungan integral dan eksternal *waterproofing* pada beton *ready mix* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton, namun memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan durabilitas beton, khususnya dalam meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air dan memperlambat laju degradasi jangka panjang. Kombinasi kedua sistem perlindungan tersebut terbukti memberikan kinerja paling efektif dalam meningkatkan ketahanan beton *ready mix* terhadap lingkungan yang berpotensi agresif.

## B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemui, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jumlah sampel yang lebih banyak pada setiap variasi pengujian, terutama untuk umur lanjut, sehingga seluruh analisis dapat dilakukan secara statistik dengan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi.
2. Sebagai variasi penelitian, disarankan pembuatan benda uji juga dilakukan di laboratorium dengan pengendalian material, proses pencampuran, dan waktu pengecoran yang lebih ketat. Meskipun *batching plant* memiliki sistem kontrol proporsi campuran yang baik, penggunaan beton *ready-mix* proyek tetap berpotensi menimbulkan variasi akibat faktor operasional lapangan. Pengujian tambahan di laboratorium akan membantu membandingkan pengaruh variabel penelitian secara lebih terkontrol serta memperkuat validitas hasil penelitian.
3. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian perendaman beton secara langsung di lingkungan laut alami agar hasil yang diperoleh lebih merepresentasikan kondisi lapangan. Hal ini penting karena pada penelitian ini perendaman hanya dilakukan dalam bak air laut statis, sehingga

pengaruh gelombang, aktivitas biota laut, kandungan zat terlarut, serta paparan lingkungan laut lainnya belum sepenuhnya terakomodasi.

4. Penelitian lanjutan dapat mengkaji variasi dosis *admixture* integral *waterproofing*, jenis semen, kombinasi *admixture* lain, serta kombinasi metode *curing* untuk mendapatkan performa durabilitas beton yang lebih optimal.
5. Hasil penelitian ini diharapkan dapat:
  - a) Menambah wawasan dan literatur ilmiah mengenai pengaruh *admixture* integral *waterproofing* dan kombinasi eksternal *coating* terhadap kuat tekan, ketahanan air, dan mikrostruktur beton.
  - b) Memberikan informasi yang bermanfaat bagi praktisi konstruksi dalam memilih metode *waterproofing* beton yang tepat sesuai kondisi lingkungan proyek.
  - c) Menjadi referensi bagi mahasiswa, dosen, dan peneliti yang tertarik pada pengembangan teknologi beton dan bahan bangunan, khususnya dalam konteks beton kedap air dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- ACI 212.3R-10. (2010). Report on Chemical Admixtures for Concrete First. In *American Standard Testing and Material*.
- ACI Committee 116R-00. (2000). *Cement and Concrete Terminol*.
- Aleem, A., Kannan, A., Subramanian, K., & Aleem, M. I. A. (2014). Optimum Mix of Quarry Dust as Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete. *International Journal of Research in Engineering Technology and Management*, 3–7. <https://www.researchgate.net/publication/298721601>
- ASTM-C125-24. (2024). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. In *American Standard Testing and Material: Vol. i*. <https://doi.org/10.1520/C0125-24.2>
- ASTM-C494/C494M-08. (2008). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. In *American Standard Testing and Material*.
- Aulia, D. M. (2012). Studi Eksperimental Permeabilitas Dan Kuat Tekan Beton K-450 Menggunakan Zat Adiktif Conplast WP421 Vol.10, No. 2. *Majalah Ilmiah UNIKOM*, 10(2), 211–222.
- Azarsa, P., Gupta, R., Azarsa, P., & Biparva, A. (2021). Durability and self-sealing examination of concretes modified with crystalline waterproofing admixtures. *Materials*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/ma14216508>
- Cappellesso, V. G., dos Santos Petry, N., Dal Molin, D. C. C., & Masuero, A. B. (2016). Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 1(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0012-7>

- Firmansyah Agustiana, K., Koco Buwono, H., & Tanjung Rahayu, dan R. (2022). Pengaruh Waterproofing Integral Crystalline (Penetron Admix) Terhadap Kuat Tekan Beton. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2022*, 1–10. <https://doi.org/jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek>
- Gojević, A., Ducman, V., Grubeša, I. N., Baričević, A., & Pečur, I. B. (2021). The effect of crystalline waterproofing admixtures on the self-healing and permeability of concrete. *Materials*, *14*(8). <https://doi.org/10.3390/ma14081860>
- Gupta, R., & Biparva, A. (2017). Do crystalline water proofing admixtures affect restrained plastic shrinkage behavior of concrete? *Revista ALCONPAT*, *7*(1), 15–24. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.172>
- Hamdi, F., Lapian, F. E., Tumpu, M., Mansyur, & Irianto. (2022). TEKNOLOGI BETON. In *TOHAR MEDIA*.
- Hamdi, F., Lapian, F., Tumpu, M., Irianto, M., Suryamihatja, D., Raidiyatro, A., Sila, A., Madiana, Rangan, P., & Hamka. (2022). TEKNOLOGI BETON. In *TOHAR MEDIA*. TOHAR MEDIA.
- Hearn, N., Hooton, R. D., & Nokken, M. R. (2006). Pore structure, permeability, and penetration resistance characteristics of concrete. *ASTM Special Technical Publication*, *169 D-STP*, 238–252.
- Irawan, D. (2023). Pengaruh Air Laut Terhadap Sifat Mekanik Beton dan Sifat Fisik Beton. In *Universitas Lampung*. <http://digilib.unila.ac.id/id/eprint/77917>
- Jahandari, S., Tao, Z., Alim, A., & Li, W. (2023a). Integral waterproof concrete : A comprehensive review Integral waterproof concrete. *Journal of Building Engineering*, *78*(September), 107718. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107718>

- Jahandari, S., Tao, Z., Alim, M. A., & Li, W. (2023b). Integral waterproof concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 78(September), 107718. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107718>
- Jalal, P. S., Tiwari, A. K., & Srivastava, V. (2023). Evaluation of the Efficiency of Different Waterproofing Products in Concrete for Sustainability. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 12(4), 43–51. <https://doi.org/10.13074/jent.2023.12.234482>
- Jalali, U. H., & Afgan, S. (2018). Analysis of Integral Crystalline Waterproofing Technology for Concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(10). [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- Jamal, M., Jazir Alkas, M., Haryanto, B., & Rasyid, A. (2022). Mechanical Characteristics of Concrete with the Addition of Integral Waterproof Using Local Aggregate East Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1065(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012010>
- Jaya, I. M., Kader, I. M. S., Suasira, I. W., & Yuda, I. P. I. (2017). Perbandingan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Antara Beton Normal dan Beton Integral Waterproofing. *Jurnal Logic*, 17(3), 142–147. <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/LOGIC/article/view/642>  
<http://ojs.pnb.ac.id/index.php/LOGIC/article/download/642/508>
- Kaur, M., Arora, K., & Kaur, G. (2022). Effect of waterproofing admixtures on concrete. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 7(8), 137–141. <https://doi.org/10.1063/1.5066880>
- Kusminah, I. L., & Aadziima, A. F. (2018). Pengaruh Salinitas Air Laut Terhadap Nilai Potensial Proteksi Anoda Dengan Metode Iccp. *Jurnal Untag Surabaya*, Vol. 1 No. 01 (2018), 251–258. <http://jurnal.untag-sby.ac.id/index.php/semnasuntag/article/view/1674>

- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. In *The McGraw-Hill* (3rd ed.).  
<https://doi.org/10.1036/0071462899> worksaccounts.com
- Mohsen, M. O., Aburumman, M. O., Al Diseet, M. M., Taha, R., Abdel-Jaber, M., Senouci, A., & Abu Taqa, A. (2023). Fly Ash and Natural Pozzolana Impacts on Sustainable Concrete Permeability and Mechanical Properties. *Buildings*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/buildings13081927>
- Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments. In *Translational Radiation Oncology* (9th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Muhammad, N. Z., Keyvanfar, A., Muhd, M. Z., Shafaghat, A., & Mirza, J. (2015). Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. *Construction and Building Materials*, 101, 80–90.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048>
- Nanda, R. D., Milo, F., Nalindri, I. R., Anjasari, G. W., & Safitri, D. A. (2024). Peninjauan Mutu Beton Ready Mix pada Baching Plant-Surabaya. *Jurnal Kendali Teknik Dan Sains*, 2(2), 24–33. <https://doi.org/10.59581/jkts-widyakarya.v2i2.3019>
- Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. In *Pearson Education Limited* (5th ed.). Pearson Education Limited. <https://doi.org/http://www.pearsoned.co.uk>
- Pazderka, J., & Hájková, E. (2016). Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. *Acta Polytechnica*, 56(4), 306–311.  
<https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306>
- Rizky, C. B., & Saelan, P. (2019). Studi Mengenai Pengaruh Faktor Air-Semen dan Nilai Slump Beton Segar terhadap Permeabilitas Beton. *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 5(4), 33. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v5i4.33>
- Setiawan, E. Y., Nanda, M. P., & Abdulgani, H. (2025). Analisis Pengendalian

Mutu Beton Ready Mix Pada Pekerjaan Pile Cap Menggunakan Statistical Quality Methods Control. *Journal of Applied Civil Engineering and Infrastructure (JACEIT)*, 6(1), 8–18.

Shah, A., Pitroda, J., & Bhavsar, J. J. (2014). Ready Mix Concrete : Economic and Qualitative Growth for Construction Industry. *Civil Engineering Department S.N.P.I.T. & R.C.*

Sidiq, F. A., & Walujodjati, E. (2021). Meninjau Kekuatan Beton Pada Lingkungan Air Laut Pameungpeuk Kabupaten Garut. *Jurnal Konstruksi*, 19(1), 43–51. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.19-1.892>

Skrzypczak, I., Kokoszka, W., Zi, J., & Le, A. (2020). A Proposal of a Method for Ready-Mixed Concrete Quality Assessment Based on Statistical-Fuzzy Approach. *Materials*, 13 (24)(5674), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma13245674>

SNI 03-1974. (1990). Metode Pengujian Kuat Tekan Beton. In *Badan Standar Nasional Indonesia*.

SNI 03-2491-2002. (2002). Metode Pengujian Kuat Tarik Belah Beton. In *Badan Standar Nasional Indonesia*.

SNI 03-2914-1992. (1992). Spesifikasi Beton Bertulang Kedap Air. In *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.

SNI 2491:2014. (2014). Metode Uji Kekuatan Tarik Belah Spesimen Beton Silinder Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C496/C496M-04, IDT). In *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.

SNI 2493:2011. (2011). Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium. In *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)

SNI 2847:2019. (2019). Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan

penjelasan. In *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.

SNI 7656:2012. (2012). Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal Beton Berat dan Beton Massa. In *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.

Songkhla, W. N., Oonta-On, K., & Sua-Iam, G. (2024). Investigating the effectiveness of integral crystalline waterproofing and microstructural analysis: A case study of national convention building basement. *Engineering and Applied Science Research*, 51(3), 362–375.  
<https://doi.org/10.14456/easr.2024.34>

Teng, L., Huang, R., Chen, J., Cheng, A., & Hsu, H. (2014). *A Study of Crystalline Mechanism of Penetration Sealer Materials*. 399–412.  
<https://doi.org/10.3390/ma7010399>

Tijani, M. N., Inim, I. J., Inim, J. I., & Adetu, S. O. (2015). Experimental Study of Influence of Seawater on Strength of Concrete Structures. *Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE)*. <https://www.researchgate.net/publication/311994427>

Wedhanto, S. (2017). Pengaruh Air Laut Terhadap Kekuatan Tekan Beton Yang Terbuat Dari Berbagai Merk Semen Yang Ada Di Kota Malang. *Jurnal Bangunan*, 22(2), 21–30.

Wibowo, W., Mediyanto, A., & Valentin, S. (2019). Kajian Penetrasi dan Permeabilitas Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri terhadap Variasi Komposisi Metakaolin dan Superplasticizer MasterEase 3029 Kadar 1,9% dari Berat Binder. *Matriks Teknik Sipil*, 7(3), 247–254.  
<https://doi.org/10.20961/mateksi.v7i3.36495>

Xu, Z., Han, X., Feng, K., Zhang, W., & Ma, K. (2022). Improvement of Mechanical Properties and Microstructure of Cementitious Materials in a Hot-Dry Environment. *Crystals*, 12(7).  
<https://doi.org/10.3390/cryst12070981>