Journal of Scientech Research and Development
Volume 7, Issue 1, June 2025
P-ISSN: 2715-6974 E-ISSN: 2715-5846
Open Access at: http://idm.or.id/JSCR

# *COMPARISON ANALYSIS OF WATER TIGHTNESS IN K-350 CONCRETE USING INTEGRAL WATERPROOFING VERSUS K-500 CONCRETE*

# ANALISIS PERBANDINGAN KEKEDAPAN AIR BETON K-350 MENGGUNAKAN WATERPROOFING INTEGRAL DENGAN BETON K-500

**Muhamad Irfan Nurdin[1], Amirah Zakiyyah[2], Ira Puspitasari[3], Try Kurniawan Akhbar[4]**

[1,4] Program Studi Teknik Perawatan dan Perbaikan Gedung, Politeknik Negeri Bandung

[2] Program Studi Teknik Perancangan Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Bandung

[3] Program Studi Teknik Konstruksi Sipil, Politeknik Negeri Bandung

*E-mail: muhamad.irfan.nurdin@polban.ac.id[1], amirah.zakiyyah@polban.ac.id[2], ira.puspitasari@polban.ac.id[3], try.kurniawan@polban.ac.id[4]*

*ARTICLE INFO*

***Correspondent:***

**Muhamad Irfan Nurdin**
***muhamad.irfan.nurdin@polban.ac.id***

***Key words:***
***Concrete, integral waterproofing, additives, water permeability, water absorption, and water penetration***

***Website:***
***https://idm.or.id/JSCR/index.php/JSCR***

***Page:* 1231 - 1240**

*ABSTRACT*

*Concrete is a primary material in construction, including for underground structural elements that are often exposed to groundwater. A common issue in underground construction is leakage due to insufficient watertightness of concrete. This study aims to compare the performance of K-350 concrete with an integral waterproofing admixture to K-500 concrete without waterproofing, focusing on water absorption, penetration, and permeability characteristics. The research method involved preparing cylindrical specimens and conducting laboratory tests in accordance with SNI standards. The results show that K-500 concrete has lower water absorption (1.00–2.25%) compared to K-350 (1.16–2.52%), as well as smaller water penetration depth (46.04 mm versus 48.35 mm). However, the permeability test indicates that K-350 concrete with integral waterproofing performs better, with a value of $1.37 \times 10^{-8}$ m/s compared to $1.85 \times 10^{-8}$ m/s for K-500. Thus, K-350 concrete with integral waterproofing demonstrates superior water resistance in terms of permeability, but lower performance in water absorption and penetration compared to K-500.*

*Copyright ©2025 JSCR. All rights reserved.*

**INFO ARTIKEL**

**Koresponden**

**Muhamad Irfan Nurdin**
*muhamad.irfan.nurdin@polban.ac.id*

**Kata kunci:**
**Beton, waterproofing integral, aditif, permeabilitas air, serapan air, penetrasi air.**

*Website:*
*https://idm.or.id/JSCR/index.php/JSCR*

**Hal: 1231 - 1240**

**ABSTRAK**

Beton merupakan material utama dalam konstruksi, termasuk pada elemen struktur bawah tanah yang sering terpapar air tanah. Permasalahan umum pada konstruksi bawah tanah adalah kebocoran akibat beton yang kurang kedap air. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja beton K-350 dengan tambahan aditif waterproofing integral terhadap beton K-500 tanpa waterproofing integral, dengan fokus pada karakteristik serapan, penetrasi, dan permeabilitas air. Metode penelitian dilakukan dengan membuat benda uji silinder dan menguji di laboratorium sesuai standar SNI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton K-500 memiliki serapan air lebih rendah (1,00–2,25%) dibanding beton K-350 (1,16–2,52%), serta penetrasi air lebih kecil (46,04 mm dibanding 48,35 mm). Namun, uji permeabilitas memperlihatkan bahwa beton K-350 dengan waterproofing integral memiliki kinerja lebih baik, dengan nilai $1{,}37\times10^{-8}$ m/det dibanding beton K-500 sebesar $1{,}85\times10^{-8}$ m/det. Dengan demikian, beton K-350 dengan waterproofing integral menunjukkan ketahanan air yang lebih baik dari sisi permeabilitas, tetapi lebih buruk dalam hal serapan dan penetrasi dibanding beton K-500.

*Copyright ©2025 JSCR. All rights reserved.*

## PENDAHULUAN

Konstruksi bawah tanah seperti basement, tangki air, terowongan, dan saluran utilitas menghadapi tantangan utama berupa paparan air tanah dengan tekanan yang bervariasi (Huang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2021). Air yang merembes melalui pori-pori dan retakan beton dapat mengakibatkan kerusakan struktural jangka panjang, menurunkan durabilitas (Ramezanianpour *et al.*, 2011; Zhang and Zong, 2014), serta meningkatkan biaya pemeliharaan dan perbaikan.

Kebocoran pada basement, misalnya, tidak hanya berdampak pada fungsi ruang, tetapi juga dapat mengganggu keselamatan dan kenyamanan pengguna bangunan. Secara ekonomis, kegagalan dalam menjaga kekedapan air dapat memicu cost overrun akibat perbaikan tambahan. Oleh karena itu, salah satu persyaratan penting bagi beton yang digunakan pada konstruksi bawah tanah adalah kemampuannya menahan penetrasi air atau kekedapan air.

Beton merupakan material komposit yang terdiri dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air, serta bahan tambahan (admixture) apabila diperlukan (Makul, 2020). Karakteristik utama beton adalah kuat tekannya, yang menjadi dasar klasifikasi mutu beton. Kuat tekan beton biasanya diuji pada umur 28 hari dan dinyatakan dalam megapascal (MPa) atau kilogram per sentimeter persegi (kg/cm²).

Menurut SNI 2847:2019, mutu beton dinyatakan dalam notasi "K" yang merepresentasikan kuat tekan karakteristik. Beton K-350 memiliki kuat tekan 350 kg/cm², sedangkan beton K-500 memiliki kuat tekan 500 kg/cm². Beton dengan mutu tinggi umumnya memiliki faktor air semen (FAS) yang lebih rendah dan kepadatan yang lebih baik, sehingga lebih tahan terhadap penetrasi air maupun zat agresif dari luar.

Perbedaan mutu beton ini tidak hanya berimplikasi pada kekuatan struktur, tetapi juga berpengaruh terhadap durabilitas, khususnya pada konstruksi bawah tanah atau lingkungan lembap (Abbas, Nehdi and Saleem, 2016; Guo *et al.*, 2019; Sohail *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2022). Selain menentukan kekuatan tekan, mutu beton juga sangat berpengaruh terhadap sifat permeabilitasnya, yang pada akhirnya menentukan kemampuan beton menahan rembesan air.

Permeabilitas beton adalah kemampuan beton untuk dilalui oleh fluida, baik air maupun gas, melalui pori-pori yang terbentuk selama proses pengerasan (Zhang and Zong, 2014; Li, Xu and Chen, 2016; Milla *et al.*, 2021). Tingkat permeabilitas sangat dipengaruhi oleh struktur mikro beton, terutama ukuran, jumlah, serta distribusi pori (Zhang *et al.*, 2018; Shawnim and Mohammad, 2019). Beton dengan porositas tinggi lebih mudah ditembus air, sehingga berpotensi mengalami kerusakan akibat siklus basah-kering, serangan kimia, maupun korosi tulangan.

Beberapa faktor utama yang memengaruhi permeabilitas beton antara lain:

1. Faktor air semen (FAS) – semakin tinggi rasio FAS, semakin besar jumlah pori yang terbentuk sehingga meningkatkan permeabilitas.
2. Kualitas agregat – agregat yang keras, padat, dan bersih akan menghasilkan beton yang lebih rapat.
3. Proses pemadatan – pemadatan yang tidak sempurna meninggalkan rongga udara dalam beton.
4. Derajat hidrasi semen – hidrasi yang optimal menghasilkan produk reaksi yang mampu menutup sebagian pori-pori kapiler.
5. Umur beton – seiring waktu, reaksi hidrasi semakin lengkap sehingga mengurangi permeabilitas.

Dalam konteks konstruksi bawah tanah, permeabilitas beton menjadi parameter penting karena berhubungan langsung dengan ketahanan terhadap rembesan air. Beton dengan permeabilitas rendah akan lebih awet dan memerlukan biaya pemeliharaan yang lebih sedikit.

Sebagai alternatif, beton mutu menengah seperti K-350 dapat dipadukan dengan bahan tambahan berupa *waterproofing* integral. *Waterproofing* integral adalah aditif yang dicampurkan langsung ke dalam adukan beton saat pencampuran (Jahandari *et al.*, 2023). Prinsip kerjanya adalah membentuk kristal-kristal tidak larut di dalam pori-pori kapiler beton melalui reaksi kimia dengan kalsium hidroksida dan produk hidrasi semen lainnya. Kristalisasi ini menutup atau mempersempit jalur kapiler, sehingga aliran air terhambat.

Kelebihan *waterproofing* integral dibanding metode pelapisan (*surface coating*) antara lain:

1. Menyatu dengan beton – sifat kekedap air bertahan sepanjang umur beton.
2. Tidak mudah rusak – berbeda dengan lapisan eksternal yang bisa terkelupas akibat tekanan air, gesekan, atau perubahan suhu.
3. Efektif pada retakan halus – beberapa produk dapat bereaksi kembali saat terkena kelembapan, sehingga mampu memperbaiki retakan halus (self-healing).

Dengan demikian, penggunaan *waterproofing* integral pada beton K-350 diharapkan dapat meningkatkan kekedapan air sehingga performanya mendekati beton mutu tinggi seperti K-500, tetapi dengan biaya produksi yang lebih rendah.

Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa penambahan *waterproofing* integral dapat menurunkan nilai serapan air beton hingga 36–55% dibanding beton normal tanpa aditif (Jahandari *et al.*, 2023). Selain itu, permeabilitas beton juga mengalami

penurunan signifikan sehingga ketahanan terhadap rembesan meningkat. RJ Torrent (Torrent, Neves and Imamoto, 2021) menyatakan bahwa durabilitas beton tidak hanya dipengaruhi oleh kuat tekan, tetapi juga oleh kemampuan beton menahan penetrasi air.

Namun, sebagian besar penelitian terdahulu hanya membandingkan beton dengan dan tanpa *waterproofing* dalam mutu yang sama. Kajian yang secara khusus membandingkan beton mutu menengah dengan *waterproofing* integral terhadap beton mutu tinggi (misalnya K-350 + *waterproofing* vs K-500) masih jarang dilakukan.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komparatif yang lebih komprehensif serta menawarkan alternatif solusi yang lebih ekonomis namun tetap andal untuk konstruksi bawah tanah.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan melalui serangkaian uji laboratorium dengan prosedur yang mengacu pada standar SNI. Tahapan penelitian disusun secara sistematis mulai dari persiapan material, pembuatan benda uji, pengujian di laboratorium, hingga analisis hasil.

### Pendekatan Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental laboratorium. Fokus utamanya adalah membandingkan performa kekedapan air antara beton K-350 yang diberi *waterproofing* integral dan beton K-500 dengan aditif *superplasticizer*. Tahapan penelitian mencakup:

- Studi pustaka dan pengembangan landasan teori;
- Perancangan campuran beton (*mix design*);
- Pembuatan dan perawatan (*curing*) benda uji;
- Pengujian kuat tekan, serapan air, penetrasi air, dan permeabilitas;
- Analisis data untuk kesimpulan teknis.

### Pengujian Material

Seluruh material penyusun beton diuji terlebih dahulu untuk memastikan kesesuaiannya dengan standar SNI, meliputi:

- Semen Portland tipe I: diuji berat jenis, kehalusan, serta waktu ikat awal dan akhir.
- Agregat halus (pasir): diuji gradasi, kadar lumpur, berat jenis, dan kadar air alami.
- Agregat kasar (kerikil 5–20 mm): diuji gradasi, berat jenis, penyerapan air, dan kebersihan.
- Air pencampur: diuji sesuai SNI 03-7063-2004 untuk memastikan bebas zat organik/kimia berbahaya.
- Aditif *waterproofing* integral berbasis kristalisasi: digunakan dengan dosis sekitar 0,7% dari berat semen sesuai rekomendasi pabrikan. Trial mix dilakukan untuk memastikan homogenitas pencampuran aditif.

Hasil pengujian material digunakan sebagai dasar perancangan campuran beton (*mix design*).

### Pembuatan Benda Uji

Benda uji dibuat untuk dua variasi campuran, yaitu:

- Beton K-350 dengan tambahan *waterproofing* integral.
- Beton K-500 dengan aditif superplasticizer.

Seluruh benda uji berbentuk silinder berukuran 15 × 30 cm. Total dibuat 24 benda uji, terdiri dari 12 beton K-350 dan 12 beton K-500. Setiap variasi dibagi rata untuk empat jenis pengujian (3 benda uji untuk pengujian tekan, 3 benda uji untuk pengujian

serapan, 3 benda uji untuk pengujian penetrasi air, dan 3 benda uji untuk pengujian permeabilitas).

Seluruh benda uji dicetak sesuai standar, dipadatkan dengan vibrator untuk mengurangi rongga udara, kemudian dilakukan *curing*, yaitu perendaman dalam air untuk menjaga proses hidrasi hingga umur pengujian.

**Pengujian Benda Uji**

Pengujian dalam penelitian ini mencakup kuat tekan, serapan air, penetrasi air, dan permeabilitas, yang seluruhnya dilakukan di laboratorium menggunakan benda uji sesuai standar sebagai berikut:

1. Pengujian Kuat Tekan
   Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan benda uji silinder berukuran 15×30 cm. Setiap benda uji ditempatkan pada mesin uji tekan hidrolik, kemudian diberikan beban secara bertahap hingga benda uji hancur. Nilai kuat tekan diperoleh dengan membagi beban maksimum yang diterima benda uji terhadap luas penampangnya. Prosedur ini mengacu pada SNI 1974:2023 tentang Metode uji untuk kekuatan tekan spesimen beton silinder.
2. Pengujian Serapan Air
   Pengujian serapan air bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori-porinya. Benda uji mula-mula dikeringkan dalam oven pada suhu 105 ± 5 °C hingga beratnya konstan, kemudian didinginkan dan ditimbang untuk memperoleh berat kering. Selanjutnya benda uji direndam dalam air dengan dua interval waktu, yaitu 10,5 menit dan 24 jam. Setelah perendaman, benda uji ditimbang kembali, dan persentase serapan dihitung berdasarkan selisih berat sebelum dan sesudah perendaman. Pengujian ini mengikuti standar ASTM C642-13 tentang Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
3. Pengujian Penetrasi Air
   Pengujian penetrasi air dilakukan menggunakan alat uji bejana tekan (water penetration apparatus). Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dipasang pada alat, kemudian diberi tekanan air sebesar 5 bar selama 72 jam secara terus-menerus. Setelah pengujian, benda uji dibelah secara vertikal, dan kedalaman penetrasi air diukur dengan mistar geser. Prosedur ini mengacu pada DIN 1048 Part 5 mengenai pengujian kekedapan air beton.
4. Pengujian Permeabilitas
   Uji permeabilitas dilakukan dengan menggunakan benda uji berbentuk bejana silinder. Air dialirkan melalui benda uji dengan tekanan tertentu, dan debit keluaran diukur pada interval waktu 24, 48, 72, dan 96 jam. Nilai koefisien permeabilitas kemudian dihitung menggunakan persamaan Darcy, yaitu:

   $$K = \frac{\rho g L Q}{P A}$$

   Dengan K = Koefisien permeabilitas (m/det), ρ = Massa jenis air, g = Percepatan gravitas (m/s$^2$), L = Panjang atau tinggi sample (m), Q = Debit air (m$^3$/s), P = Tekanan (kN) , A = Luas penampang tekan (m$^2$).

   Pengujian ini merujuk pada SNI 03-2435-2002 tentang Metode Pengujian Permeabilitas Beton.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil penelitian yang meliputi dua kelompok utama, yaitu hasil pengujian material penyusun beton dan hasil pengujian beton. Hasil pengujian

beton mencakup kuat tekan, serapan air, penetrasi air, dan permeabilitas, dengan tujuan mengevaluasi perbedaan kinerja antara beton K-350 dengan tambahan *waterproofing* integral dan beton K-500 tanpa bahan tambahan. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil laboratorium, serta mengaitkannya dengan standar teknis yang berlaku untuk konstruksi bawah tanah.

**Material Pembentuk**

Pengujian material dilakukan terhadap semen, agregat halus, dan agregat kasar. Hasil uji ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Hasil Pengujian Material Penyusun Beton**

| Material | Parameter Uji | Hasil Uji | Satuan |
|---|---|---|---|
| Semen | Berat jenis | 2.91 | gr/cm³ |
| Agregat Halus | Berat jenis SSD | 2.40 | gr/cm³ |
| | Penyerapan air | 11.54 | % |
| | Modulus kehalusan (FM) | 2.95 | |
| Agregat Kasar | Berat jenis SSD | 2.70 | gr/cm³ |
| | Penyerapan air | 1.85 | % |
| | Bobot isi gembur | 1.52 | gr/cm³ |
| | Kadar lumpur | 3.76 | % |

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semen memiliki berat jenis 2,91 gr/cm³ sesuai karakteristik semen Portland pada umumnya. Agregat halus memiliki berat jenis 2,40 gr/cm³ dengan FM 2,95, menandakan pasir bergradasi sedang. Namun, nilai penyerapan air 11,54% jauh lebih tinggi dibandingkan batas umum (≤3% menurut SNI 03-2834-2000), sehingga dapat meningkatkan porositas beton jika tidak dikompensasi. Hal inilah yang berpotensi memengaruhi serapan dan penetrasi air pada beton K-350 meskipun telah ditambahkan waterproofing.

Agregat kasar menunjukkan mutu baik dengan berat jenis SSD 2,70 gr/cm³, penyerapan air 1,85%, dan kadar lumpur 3,76% yang masih dalam batas toleransi (≤5%). Secara keseluruhan, meskipun agregat halus memiliki kelemahan dari sisi serapan, material lainnya memenuhi persyaratan teknis untuk pembuatan beton.

**Kuat Tekan Beton**

Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan tiga benda uji untuk masing-masing variasi. Hasil ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton**

| No. | Kode | Umur (hari) | Kuat Tekan (kg/cm²) | Kuat Tekan dengan Konversi Umur (kg/cm²) |
|---|---|---|---|---|
| | | | Beton K-350 | |
| 1 | K-350-1 | 21 | 286,29 | 301,36 |
| 2 | K-350-2 | 21 | 347,47 | 365,76 |
| 3 | K-350-3 | 21 | 367,96 | 387,33 |
| | Rata-rata (σbk) | | | 324,65 |
| | | | Beton K-500 | |
| 1 | K-500-1 | 21 | 499,79 | 526,10 |
| 2 | K-500-2 | 21 | 485,07 | 510,60 |
| 3 | K-500-3 | 21 | 487,74 | 513,41 |
| | Rata-rata (Σbk) | | | 511,75 |

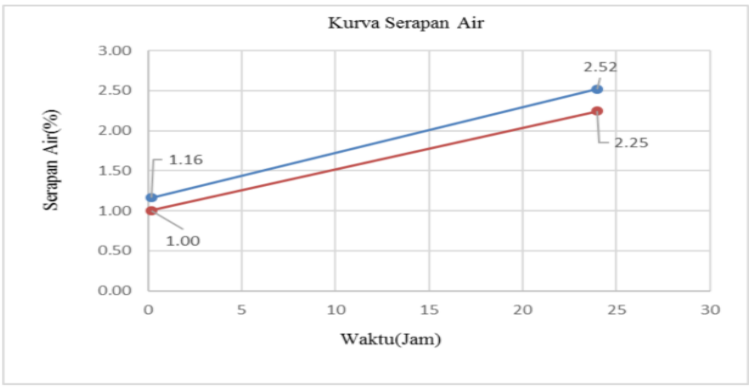
Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata kuat tekan beton K-500 setelah konversi mencapai 511,75 kg/cm², sedangkan beton K-350 sebesar 324,65 kg/cm². Hasil menunjukkan nilai mutu yang cukup sesuai dengan yang direncanakan.

**Serapan Air**

Pengujian serapan air dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori-pori kapiler. Benda uji terlebih dahulu dikeringkan hingga mencapai berat konstan, kemudian direndam dalam air selama 10,5 menit dan 24 jam. Persentase serapan dihitung dari perbandingan antara berat setelah perendaman dengan berat kering awal. Hasil pengujian serapan air untuk beton K-350 dengan tambahan waterproofing integral dan beton K-500 tanpa bahan tambahan ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3. Hasil Pengujian Serapan Air**

| Jenis Beton | Waktu Perendaman | Serapan Air (%) |
|---|---|---|
| K-350 | 10,5 menit | 1,16 |
| | 24 jam | 2,52 |
| K-500 | 10,5 menit | 1,00 |
| | 24 jam | 2,25 |




**Gambar 1. Kurva Serapan Air pada Beton**

Keterangan:
Garis biru : Beton K-350
Garis merah : Beton K-500

Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton K-350 memiliki serapan lebih tinggi, baik jangka pendek (1,16% vs 1,00%) maupun jangka panjang (2,52% vs 2,25%). Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh karakteristik agregat halus yang memiliki serapan air sangat tinggi (11,54%). Aditif *waterproofing* memang menutup sebagian pori, tetapi tidak mampu sepenuhnya mengimbangi efek pasir dengan porositas tinggi. Menurut SNI 03-1971-1990, serapan beton normal umumnya ≤3%, sehingga kedua jenis beton masih berada dalam batas yang diizinkan.

**Penetrasi Air**

Pengujian penetrasi air bertujuan untuk mengetahui sejauh mana air dapat masuk ke dalam pori-pori beton ketika diberikan tekanan tertentu. Pada penelitian ini, benda uji beton diberi tekanan air sebesar 5 bar selama 72 jam, kemudian dibelah untuk mengukur kedalaman penetrasi menggunakan mistar geser. Benda uji pengukuran penetrasi air dapat dilihat pada Gambar 2. Adapun hasil pengujian penetrasi air ditunjukkan pada Tabel 4.

**Gambar 2. Benda Uji Beton yang Dibelah Setelah Dilakukan Pengujian Permeabilitas**

**Tabel 4. Hasil Pengujian Penetrasi Air**

| Benda Uji | Penetrasi Air pada Beton (mm) |
|---|---|
| K-350 | 48.352 |
| K-500 | 46.039 |

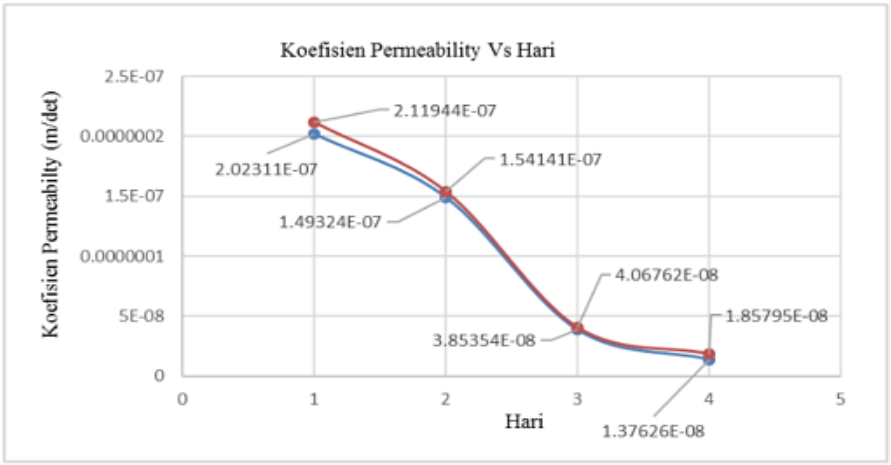
Nilai penetrasi pada beton K-350 sedikit lebih tinggi (48,35 mm) dibanding K-500 (46,04 mm). Hal ini mengindikasikan bahwa jalur kapiler masih aktif pada beton K-350 akibat sifat agregat halus, meskipun ditambahkan waterproofing. Perbedaan 4,8% memang relatif kecil, tetapi tetap menegaskan bahwa K-500 lebih kedap terhadap tekanan air. Jika dibandingkan dengan batas penetrasi maksimum 50 mm yang sering dipakai pada konstruksi kedap air, kedua jenis beton masih dapat diterima.

**Permeabilitas Beton**

Pengujian permeabilitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan aliran air melalui pori-porinya. Hasil pengujian permeabilitas pada beton K-350 dengan tambahan *waterproofing* integral dan beton K-500 tanpa bahan tambahan ditunjukkan pada Tabel 5.

**Tabel 5. Hasil Pengujian Permeabilitas Beton**

| Jenis Beton | *Umur (jam)* | *Nilai Permeabilitas (m/det)* |
|---|---|---|
| K-350 + Waterproofing | 24 | $2{,}02311 \times 10^{-7}$ |
| | 48 | $1{,}49324 \times 10^{-7}$ |
| | 72 | $3{,}85354 \times 10^{-8}$ |
| | 96 | $1{,}37626 \times 10^{-8}$ |
| K-500 | 24 | $2{,}11944 \times 10^{-7}$ |
| | 48 | $1{,}54141 \times 10^{-7}$ |
| | 72 | $4{,}06762 \times 10^{-8}$ |
| | 96 | $1{,}85795 \times 10^{-8}$ |




**Gambar 3. Kurva Perbandingan Koefisien Permeabilitas Terhadap Waktu**

Keterangan:
Garis biru : Beton K-350
Garis merah : Beton K-500

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai permeabilitas kedua jenis beton menurun seiring waktu. Temuan penting dari penelitian ini adalah beton K-350 dengan *waterproofing* memiliki nilai permeabilitas lebih kecil dibandingkan K-500, terutama pada umur 96 jam ($1{,}37 \times 10^{-8}$ m/det vs $1{,}86 \times 10^{-8}$ m/det). Hal ini mengindikasikan bahwa aditif *waterproofing* efektif menutup pori-pori mikro yang menjadi jalur aliran air, meskipun beton dasar yang digunakan adalah K-350. Jika merujuk pada kriteria beton kedap air menurut SNI ($\leq 1 \times 10^{-8}$ m/det), hasil ini menunjukkan bahwa K-350 + *waterproofing* mendekati persyaratan, sementara K-500 masih sedikit lebih tinggi.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh bahwa material penyusun beton umumnya memenuhi persyaratan teknis, dengan semen memiliki berat jenis 2,91 gr/cm³ dan agregat kasar berat jenis SSD 2,70 gr/cm³ serta penyerapan 1,85%, namun agregat halus memiliki penyerapan air cukup tinggi, yaitu 11,54%, yang berpotensi meningkatkan porositas beton. Beton K-500 menunjukkan kuat tekan rata-rata lebih tinggi, yaitu 511,75 kg/cm² dibanding K-350 sebesar 324,65 kg/cm², serta ketahanan air lebih baik dengan serapan 1,00–2,25% dan penetrasi 46,04 mm, sedangkan K-350 dengan *waterproofing* memiliki serapan 1,16–2,52% dan penetrasi 48,35 mm. Menariknya, dari uji permeabilitas pada umur 96 jam, beton K-350 dengan *waterproofing* integral menunjukkan nilai lebih rendah, yaitu $1{,}37 \times 10^{-8}$ m/det, dibanding beton K-500 sebesar $1{,}86 \times 10^{-8}$ m/det. Dengan demikian, beton K-350 dengan *waterproofing* dapat menjadi alternatif ekonomis untuk konstruksi bawah tanah karena mampu meningkatkan kekedapan air dengan biaya lebih ekonomis meskipun kuat tekannya lebih rendah.

## DAFTAR PUSTAKA

Abbas, S., M. L. Nehdi, and M. A. Saleem. 2016. "Ultra-HighPerformance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges." International Journal of Concrete Structures and Materials.

Fan, Haobo, Zhengguo Zhu, Yuxiang Song, Shiyu Zhang, Yongquan Zhu, Xinqiang Gao, Zhinan Hu, Jiaqi Guo, and Zhiming Han. 2021. "Water Pressure Evolution and Structural Failure Characteristics of Tunnel Lining under Hydrodynamic Pressure." Engineering Failure Analysis. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105747.

Guo, Yongchang, Jianhe Xie, Jianbai Zhao, and Kexian Zuo. 2019. "Utilization of Unprocessed Steel Slag as Fine Aggregate in Normal- and High-Strength Concrete." Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.178.

Huang, Zhen, Zhenquan Jiang, Shuyun Zhu, Xianshuai Wu, Lining Yang, and Yunzhang Guan. 2016. "Influence of Structure and Water Pressure on the Hydraulic Conductivity of the Rock Mass around Underground Excavations." Engineering Geology. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.01.003.

Jahandari, Soheil, Zhong Tao, Md Abdul Alim, and Wengui Li. 2023. "Integral Waterproof Concrete: A Comprehensive Review." Journal of Building Engineering.

Li, Xinxin, Qing Xu, and Shenghong Chen. 2016. "An Experimental and Numerical Study on Water Permeability of Concrete." Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.184.

Liu, Ze Jun, Yong Huang, Ding Zhou, and Hong Ge. 2017. "Analysis of External Water Pressure for a Tunnel in Fractured Rocks." Geofluids. doi: 10.1155/2017/8618613.

Makul, Natt. 2020. "Modern Sustainable Cement and Concrete Composites: Review of Current Status, Challenges and Guidelines." Sustainable Materials and Technologies.

Milla, Jose, Tara L. Cavalline, Tyson D. Rupnow, Bharath Melugiri-Shankaramurthy, Gilson Lomboy, and Kejin Wang. 2021. "Methods of Test for Concrete Permeability: A Critical Review." Advances in Civil Engineering Materials.

Ramezanianpour, Ali Akbar, Amirreza Pilvar, Mahdi Mahdikhani, and Faramarz Moodi. 2011. "Practical Evaluation of Relationship between Concrete Resistivity, Water Penetration, Rapid Chloride Penetration and Compressive Strength." Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069.

Sharma, Arpan, Parikshit Thakur, Rajneesh Vashisht, and Abhilash Shukla. 2022. "Durability Evaluation of Normal and HighPerformance Concrete." Global Journal of Researches in Engineering. doi: 10.34257/gjreevol22is1pg45.

Shawnim, P., and F. Mohammad. 2019. "Porosity, Permeability And Microstructure Of Foamed Concrete Through Sem Images." Journal of Civil Engineering, Science and Technology. doi: 10.33736/jcest.1434.2019.

Sohail, Muazzam Ghous, Ramazan Kahraman, Nasser Al Nuaimi, Bora Gencturk, and Wael Alnahhal. 2021. "Durability Characteristics of High and Ultra-High Performance Concretes." Journal of Building Engineering. doi: 10.1016/j.jobe.2020.101669.

Torrent, Roberto J., Rui D. Neves, and Kei ichi Imamoto. 2021. Concrete Permeability and Durability Performance: From Theory to Field Applications.

Zhang, Junzhi, Fan Bian, Yurong Zhang, Zhaofeng Fang, Chuanqing Fu, and Jie Guo. 2018. "Effect of Pore Structures on Gas Permeability and Chloride Diffusivity of Concrete." Construction and Building Materials. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.111.

Zhang, S. P., and L. Zong. 2014. "Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials." Advances in Materials Science and Engineering. doi: 10.1155/2014/650373.