

PENGEMBANGAN PROTOTIPE ALAT UJI PERMEABILITAS BETON BERPORI UNTUK MENENTUKAN KOEFISIEN PERMEABILITAS

Jamal Mahbub¹⁾, Aiun Hayatu Rabinah^{1,*)}, Suparman¹⁾, Lilik Satriyadi¹⁾, Parhadi¹⁾, Bimawijaya Laia²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Semarang, Jl. Prof. H. Soedarto, S.H. Tembalang, Kota Semarang, 50275

²⁾Teknik Sipil Universitas Nias, Jl. Yos Sudarso Ujung E-S No.118, Ombolata Ulu, Kec. Gunungsitoli, 22812

^{*)}Correspondent Author: aiun.hayatu@polines.ac.id

Abstract

The increasing growth of infrastructure and building development has led to a reduction in land surface cover. The lack of surface cover significantly impacts the environment, such as causing severe flooding. To address water-related issues, one approach is to manage runoff at its source through Low Impact Development (LID) strategies, such as permeable pavements. One method used to infiltrate water is porous concrete. Key parameters of porous concrete include strength, water-cement ratio, porosity, and permeability coefficient. The permeability coefficient of porous concrete is obtained through permeability testing. Laboratory permeability tests are more commonly used than field-testing. Therefore, it is important to have a dedicated tool for testing the permeability of porous concrete. The first stage involves the development and testing of a prototype, which includes prototype design, material survey, material procurement, equipment preparation, prototype construction, and testing. The prototype development refers to the ACI 522R-10 standard. The results of the prototype testing are analyzed using Darcy's law to determine the permeability coefficient and analyze the flow characteristics. Based on the research findings, the permeability test prototype for porous concrete can be used as a testing tool for porous concrete permeability both in laboratory and field settings. The prototype exhibits laminar flow, thus allowing Darcy's law to be applied for evaluating hydraulic conductivity.

Keywords: design and development, hydraulic conductivity, laminar (flow)

PENDAHULUAN

Pertumbuhan pembangunan infrastruktur dan gedung-gedung yang semakin meningkat telah menyebabkan berkurangnya tutupan permukaan lahan. Kurangnya tutupan permukaan berdampak signifikan terhadap lingkungan seperti banjir besar, peningkatan polusi air hujan, efek pulau panas perkotaan, dan risiko

terhadap ekosistem alami (Lucke dkk. (2014) dan Sañudo-Fontaneda dkk. (2012)). Untuk mengatasi permasalahan yang berkaitan dengan air, adalah dengan mengelola limpasan langsung dari sumbernya melalui *Low Impact Development* (LID) seperti perkerasan permeabel.

Salah satu jenis material perkerasan permeabel adalah sistem

perkerasan blok. Material dari sistem perkerasan blok yang paling umum digunakan sebagai alternatif dari perkerasan konvensional adalah beton dan aspal, karena material tersebut mampu mendukung beban lalu lintas sekaligus mengalirkan air hujan (Lucke (2014), Lucke dkk (2014), dan Pezzaniti dkk. (2009)). Selain itu metode yang digunakan untuk meresapkan air adalah dengan beton porus. Beton porus adalah jenis beton yang memiliki pori-pori sehingga dapat berfungsi sebagai sistem drainase. Parameter penting beton porus meliputi kekuatan, rasio air semen, porositas, dan koefisien permeabilitas.

Koefisien permeabilitas beton porus didapatkan melalui uji permeabilitas. Uji permeabilitas terhadap air dibedakan menjadi uji serapan permukaan, uji penyerapan air (penetrasi), uji kecepatan aliran air, dan uji kapilaritas (Khatri dkk., 1997). Uji ini dapat dilakukan secara langsung di lapangan maupun di laboratorium. Uji permeabilitas di laboratorium lebih sering digunakan dibandingkan dengan pengujian secara langsung di lapangan. Hal ini terjadi karena pengujian di lapangan untuk memprediksi permeabilitas beton berpori lebih sulit dilakukan.

Metode uji permeabilitas untuk beton porus umumnya kurang praktis, memerlukan waktu lama, biaya tinggi, atau tidak sesuai dengan karakteristik unik beton berpori. Sebagian besar alat uji permeabilitas dirancang untuk pengujian permeabilitas tanah atau beton konvensional, sehingga

diperlukannya pengembangan alat uji beton porus yang dapat digunakan dalam baik di laboratorium maupun lapangan.

Sugiharto (2004) membuat alat uji permeabilitas beton yang dirancang menggunakan uji permeabilitas dengan cara aliran dan penetrasi. Lui dkk. (2021) melakukan studi komprehensif untuk memprediksi secara akurat permeabilitas air pada beton berpori dengan menggunakan metode *constant head*. Zhang dkk. (2020), Seifeddine (2022), dan Sathe dkk. (2024) membandingkan dua metode laboratorium yang umum digunakan untuk mengukur permeabilitas beton berpori, yaitu metode *constant-head* dan *falling-head*. Metode *constant-head* memberikan hasil pengukuran yang lebih stabil dan konsisten. Meskipun kedua metode menghasilkan tren nilai yang serupa, terdapat perbedaan signifikan dalam besarnya koefisien permeabilitas yang dihitung.

Berdasarkan latar belakang di atas Penelitian ini bertujuan untuk membuat prototipe alat uji permeabilitas beton porous yang dapat digunakan di lapangan dan di laboratorium. Penelitian ini mengkaji alat uji permeabilitas beton porous sehingga dapat digunakan di lapangan dan laboratorium, mudah digunakan, dan sesuai dengan standar pengujian.

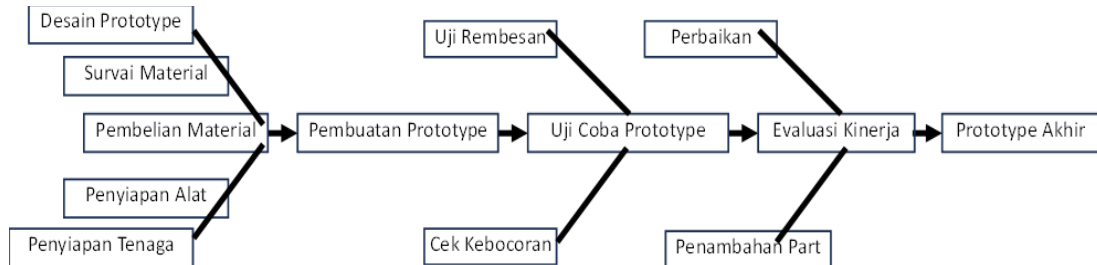
METODE PENELITIAN

Tahapan dalam pembuatan prototipe

Tahapan-tahapan dalam pembuatan dan pengujian prototipe (Gambar 1), mulai dari tahap persiapan hingga

menghasilkan prototipe akhir. Tahap persiapan meliputi desain prototipe, survei material, pembelian material,

penyiapan alat, dan penyiapan tenaga. Setelah persiapan selesai, dilakukan pembuatan prototipe.



Gambar 1. *Fishbone* pembuatan prototipe

Prototipe diuji coba melalui serangkaian pengujian, yaitu uji rembesan dan cek kebocoran. Berdasarkan hasil pengujian, dilakukan evaluasi kinerja prototipe. Jika ditemukan kekurangan atau masalah, dilakukan perbaikan dan penambahan komponen yang diperlukan. Proses ini diulang hingga prototipe mencapai kinerja yang diinginkan dan menghasilkan prototipe akhir yang siap digunakan. Pembuatan prototipe mengacu pada standar ACI 522R-10 tentang pengujian beton porous sebagaimana Gambar 2.

Gambar 2 memperlihatkan beberapa komponen utama prototipe alat uji, antara lain:

- Silinder Bertingkat (Graduated Cylinder): Berfungsi sebagai wadah penampung air yang akan meresap melalui beton porous. Silinder ini memiliki skala untuk mengukur volume air yang tertampung.
- Pipa Drainase (Drain Pipe): Saluran yang mengalirkan air dari silinder bertingkat setelah melewati beton porous.
- Permukaan Sampel (Top of the Sample): Bagian atas dari spesimen beton porous yang akan diuji.
- Sampel (Sample): Spesimen beton porous berbentuk silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 150 mm.
- O-Ring: Karet gelang yang digunakan untuk menyegel sambungan antara silinder bertingkat dan sampel beton, mencegah kebocoran air.



Gambar 2. Alat uji permeabilitas beton porous (ACI 522R-10)

- f. Katup (Valve): Pengontrol aliran air yang masuk ke dalam sistem pengujian.

model yang sudah ada maupun melalui survei atau peninjauan lapangan, dan pengujian laboratorium. Tabel 1 merupakan bagian komponen alat dalam penelitian ini.

Jenis bahan yang diperlukan dalam penelitian ini didapatkan berdasarkan

Tabel 1. Bagian komponen alat

Kategori	Nama Alat	Deskripsi
Komponen Utama	Silinder bertingkat	Wadah penampung air dengan skala pengukuran volume
	Pipa drainase	Saluran untuk mengalirkan air dari silinder bertingkat
	Katup	Pengontrol aliran air
Perlengkapan Sampel	Cetakan sampel beton	Cetakan untuk membuat sampel beton porous berbentuk silinder (diameter 100 mm, tinggi 150 mm)
	O-ring	Karet gelang untuk mencegah kebocoran air pada sambungan
Alat Bantu	Wadah air	Wadah untuk menampung air sebelum dialirkan ke silinder bertingkat
	Stopwatch	Pengukur waktu untuk mencatat lamanya pengujian

Koefisien Permeabilitas

Uji permeabilitas pada beton porus dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton porus dalam meloloskan air. Skema uji permeabilitas ditunjukkan pada Gambar 3. Alat uji permeabilitas beton porus didesain menggunakan sistem pengujian *constant head*.

Pengujian permeabilitas standar pada tanah, tanah biasanya dianggap memiliki aliran laminar, sehingga hukum Darcy dapat diterapkan untuk mengevaluasi konduktivitas hidraulik. Namun, untuk material berbutir kasar yang permeabel, asumsi aliran laminar tidak lagi valid. Beberapa peneliti, termasuk Fwa et al., telah mengadopsi hubungan alternatif berikut untuk menggambarkan kondisi aliran non-

laminar dalam media granular permeabel, yang dinyatakan sebagai Persamaan 1:

$$v = k \cdot i^n \quad (1)$$

Persamaan ini disebut sebagai modifikasi dari Hukum Darcy, di mana k dan n merupakan koefisien eksperimental. Secara umum, nilai n berkisar antara 1 hingga 0,5, tergantung pada kondisi aliran dari laminar hingga turbulen. Untuk uji permeabilitas yang dilakukan oleh Fwa et al., nilai k dan n diperoleh dengan cara memplot logaritma kecepatan aliran ($\log(v)$) terhadap logaritma gradien hidraulik ($\log(i)$). Analisis koefisien permeabilitas juga menggunakan persamaan 2:

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad (2)$$

Dimana:

k = koefisien permeabilitas (cm/detik)

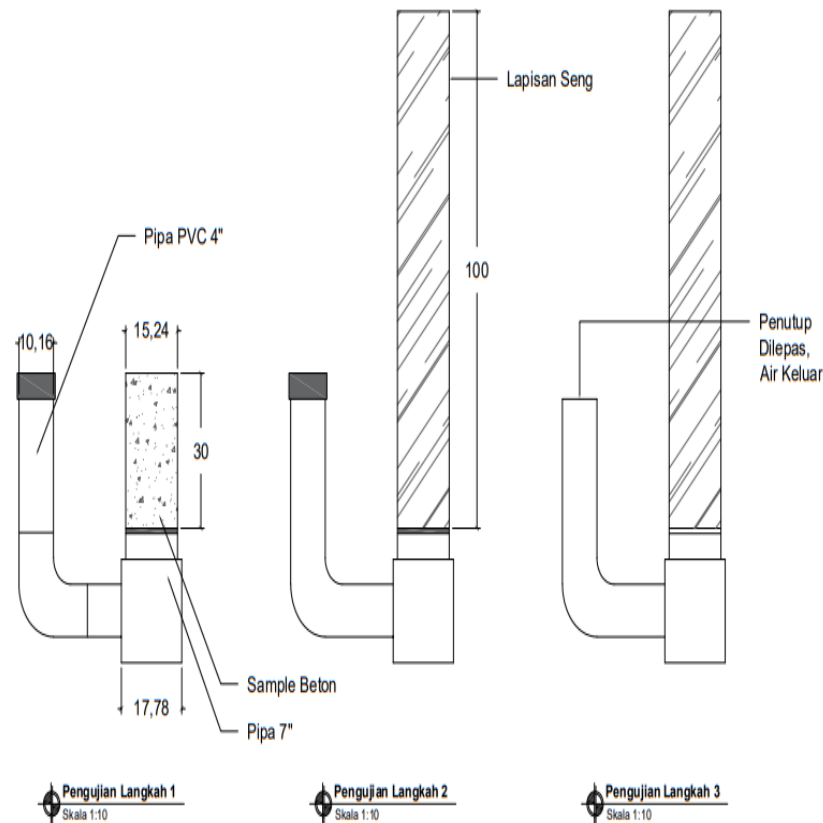
Q = volume air yang terkumpul (cm³)

L = tinggi benda uji (cm)

h = perbedaan tinggi muka air (cm)

A = luas penampang benda uji (cm²)

t = waktu yang dibutuhkan untuk menampung air (detik)



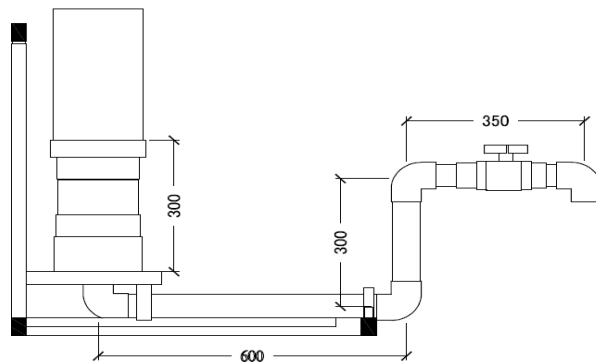
Gambar 3. Skema Pelaksanaan Uji Permeabilitas Beton Porus (ACI 522R-10)

HASIL DAN PEMBAHASAN

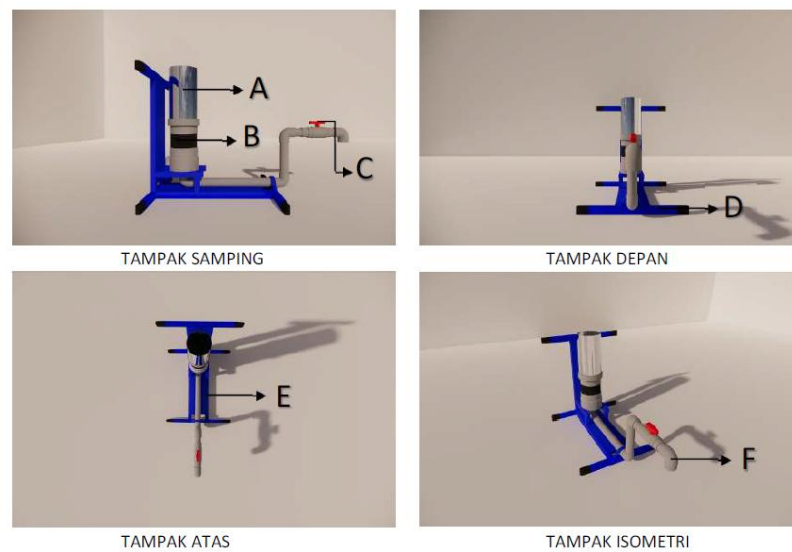
Prototipe Alat Uji Permeabilitas Beton Porus

Alat uji permeabilitas beton berpori mengacu pada standar ACI 522R-10. Alat ini dirancang lebih praktis dan efisien dengan kemampuan bongkar pasang dan penyesuaian dimensi sampel. Alat uji ini menggunakan metode *constant-head* dan terdiri dari

tabung air, tempat sampel, stop kran, dan dudukan yang stabil. Desain alat uji ini diwujudkan dalam rancangan yang mempertimbangkan kemudahan penggunaan dan akurasi pengujian. Berdasarkan hal tersebut, maka desain prototipe alat dibuat seperti Gambar 4. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan model prototipe alat dengan rincian kebutuhan bahan sebagaimana Tabel 2.



Gambar 4. Rancangan protoipe alat permeabilitas beton porus



Keterangan :

- A : Tabung plastik Ø8 inch
- B : Karet ban pelapis benda uji beton
- C : Valve stop on off kran
- D : Besi hollow 3x3x0,1 cm
- E : Plat besi 0,2 cm
- F : Elbow 90°

Gambar 5. Rancangan prototipe alat dalam 3D

Tabel 2. Kebutuhan bahan

Jenis bahan	Jumlah
1. Tabung akrilik diameter 18 mm dan tinggi 30 cm	1 buah
2. Elbow diameter 4 inchi	4 buah
3. Pipa PVC diameter 4 inchi Pipa paralon PVC 6'	2 meter
4. Stop kran diamater 4 inchi	1 buah
5. Dop PVC diameter 6 inchi	1 buah
6. Karet ban bekas	1 buah
7. Besi hollow 30x30x10 mm	6 meter
8. Pelat besi 20 mm	2 meter
9. Lem PVC	1 buah

Perakitan prototipe alat uji permeabilitas beton porous dilakukan dalam dua tahap utama. Tahap pertama adalah perakitan komponen utama, di mana bagian-bagian alat seperti tabung air, tempat sampel, dan stop kran disatukan menggunakan lem perekat PVC dan lem busa. Tahap kedua adalah perakitan dudukan, di mana kerangka besi hollow dipotong dan disambung dengan las untuk membentuk dudukan yang stabil, kemudian dihubungkan dengan komponen utama yang telah dirakit sebelumnya. Gambar 6 menunjukkan proses perakitan prototipe alat.



Gambar 6. Perakitan prototipe alat

Uji coba alat dilakukan untuk mengetahui sejauh mana alat tersebut bisa digunakan dan mengidentifikasi kendala-kendala yang terjadi selama pengujian. Benda uji yang digunakan berupa beton porous dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Dari hasil uji coba, ditemukan beberapa kendala, di antaranya kebocoran di beberapa sambungan. Untuk mengatasi masalah tersebut, dilakukan perbaikan dengan menambal kebocoran menggunakan las

plastik, lem tembak, dan lem busa. Gambar 7 menunjukkan proses pengujian prototipe alat.



Gambar 7. Pengujian prototipe alat

Prototipe alat uji permeabilitas beton porous ini bekerja dengan menempatkan sampel beton di antara tabung plastik dan plat besi, yang disegel dengan karet ban. Air kemudian diisi ke dalam tabung akrilik hingga ketinggian tertentu, dan kran dibuka untuk mengalirkan air ke sampel beton. Air akan meresap melalui pori-pori beton dan keluar melalui pipa horizontal. Waktu yang dibutuhkan air untuk melewati sampel diukur, dan permeabilitas beton dihitung berdasarkan data waktu dan volume air yang terkumpul.

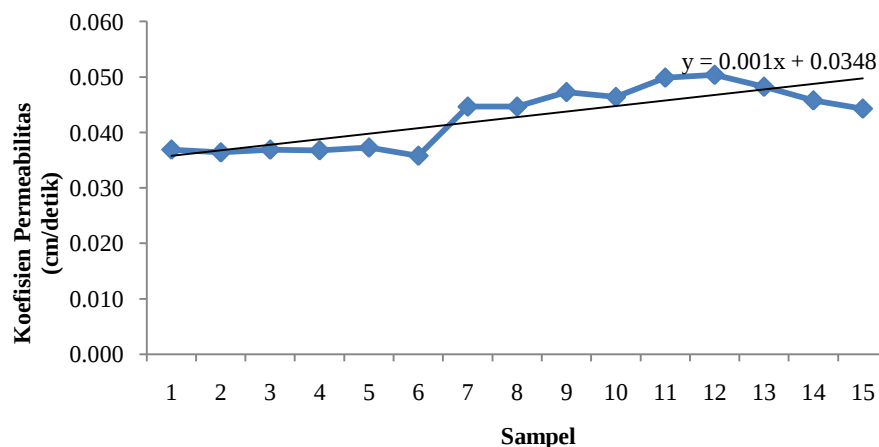
Keunggulan prototipe alat uji ini adalah kemudahannya dalam bongkar pasang, yang memudahkan penyimpanan. Selain itu, alat ini dapat disesuaikan dengan tinggi sampel dan dapat dikombinasikan dengan berbagai jenis sampel, seperti sampel beton dan sampel tanah. Dengan demikian, prototipe alat uji ini terbukti efektif

dan efisien dalam mengukur permeabilitas beton porous.

Koefisien Permeabilitas

Pengujian permeabilitas beton menggunakan prinsip pengujian *constant head*. Berdasarkan hasil

pengujian beton porous menggunakan alat uji dapat dilihat bahwa rata-rata nilai koefisien permeabilitasnya sebesar 0,043 cm/detik. Sebaran nilai koefisien dari pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 8.



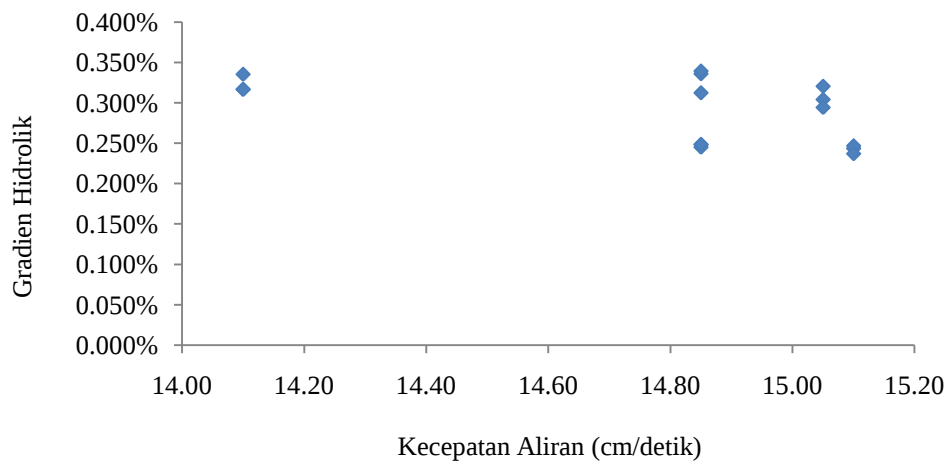
Gambar 8. Grafik Nilai Koefisien Permeabilitas

Gambar 8 menjelaskan hasil uji nilai koefisien permeabilitas dari 15 kali pengujian. Berdasarkan hasil pengujian nilai koefisien permeabilitas berkisar antara 0,035 cm/detik sampai 0,05 cm/detik. Dari hasil uji ini dapat dilihat bahwa beton memiliki nilai porositas yang tinggi.

Prototipe alat uji permeabilitas beton porous juga diuji untuk mengetahui aliran yang mengalir pada alat. Karena prototipe di desain dengan menggunakan metode *contant head* jenis aliran yang mengalir pada alat uji beton porous bersifat aliran laminar. Jenis aliran yang mengalir dianalisis berdasarkan nilai gradien hidrolik. Nilai gradien hidrolik didapatkan dengan menggunakan hukum darcy (Pers. 1). Dari hasil

penelitian didapatkan nilai gradien hidrolik adalah berkisar antara 0,237% sampai 0,339%.

Gambar 9 menggambarkan hubungan antara kecepatan aliran dengan gradien hidrolik. Semakin tinggi kecepatan aliran air, gradien hidrolik yang terbentuk semakin kecil. Hal ini biasanya terjadi pada saat pengujian material berporus. Berdasarkan hasil penelitian dapat dilihat bahwa rata-rata nilai gradien hidrolik yang terjadi adalah 0,290%. Nilai gradien hidrolik 0,290% termasuk aliran laminar. Berdasarkan nilai gradien hidrolik tersebut dapat disimpulkan bahwa pengujian permeabilitas pada beton porous dapat menggunakan Alat Uji Prototipe yang dikembangkan.



Gambar 9. Grafik Hubungan antara Gradien Hidrolik dengan Kecepatan Aliran

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa prototipe uji permeabilitas beton porus dapat digunakan sebagai alat pengujian permeabilitas beton porus. Hasil analisis gradien hidrolik menggunakan hukum Darcy, menyatakan bahwa pengujian permeabilitas pada beton porus dengan menggunakan Alat Uji Prototipe yang dikembangkan dapat dilakukan karena aliran yang dihasilkan dari alat uji adalah aliran laminar. Prototipe uji permeabilitas beton porus dapat digunakan untuk pengujian di laboratorium dan di lapangan karena didisain secara modular dan tinggi benda uji dapat disesuaikan, namun diameter benda uji harus sama dengan diameter alat.

DAFTAR PUSTAKA

American Concrete Institute, 2006, ACI 522R-06 Pervious Concrete. U.S.A.
American Concrete Institute, 2010, ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete. U.S.A.

ASTM C1701 / C1701M-17a, *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*.

Darcy, H., 1856, *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*. Paris: Dalmont.

Fwa, T., Tan, S., dan Chuai, C., 1998, *Permeability measurement of base materials using falling-head test apparatus*. *Transportation Research Record*, 1615, 94–99.

Khatr, R.P., dan Sirivivatnanon, P., 1997, *Methods for determination of water permeability of concrete*. *ACI Materials Journal*, 94, 257–260.

Lucke, T., 2014, *Using drainage slots in permeable paving blocks to delay the effects of clogging: Proof of concept study*. *Water*, 6, 2660–2670.

Lucke, T., Boogaard, F., dan van de Ven, F., 2014, *Evaluation of a*

- new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems. Urban Planning and Transport Research*, 2, 22–35.
- Liu, Y., Gao, J., & Dai, J., 2021, *Comprehensive study to accurately predict the water permeability of pervious concrete using constant head method. Construction and Building Materials*, 302, 125046.
- Pezzaniti, D., Beecham, S., dan Kandasamy, J., 2009, *Influence of clogging on the effective life of permeable pavements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management*, 162, 211–220.
- Sañudo-Fontaneda, L.A., Rodriguez-Hernandez, J., Vega-Zamanillo, A., dan Castro-Fresno, D., 2012, *Laboratory analysis of the infiltration capacity of interlocking concrete block pavements in car parks. Water Science and Technology*, 67, 675–681.
- Sathe, S., Kolapkar, Sagar S., Bhosale, A., Dandin, S., 2024, *Permeability Measurement of Pervious Concrete by Constant and Falling Head Methods: Influence of Aggregate Gradation and Cement-to-Aggregate Ratio. ASCE. Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 29(4)
- Seifeddine, K., Amziane, S., dan Toussaint, E., 2022, *State of the art on the hydraulic properties of pervious concrete. Road Materials and Pavement Design*.
- Zhang, Yi, Li, Hui, Abdelhady, A. dan Yang, Jie., 2020, *Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods. Construction and Building Materials*.