

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Pengukuran Langsung Kurva Karakteristik Air - Tanah (SWCC) pada Limbah Beton dengan Metode *Tempe Cell*

Aldo Wirastana Adinegara*

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Email: aldo.wirastana@ui.ac.id

Rabbani Isya Ramadhan

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Email: rabbani.isya@ui.ac.id

Abdul Halim Hamdany

Kelompok Keahlian Bidang Geoteknik, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Email: abdul.halim04@office.ui.ac.id

Fathiyah Hakim Sagitaningrum

Kelompok Keahlian Bidang Geoteknik, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Email: fathiyahsagita@ui.ac.id

Abstrak

Terjadinya peningkatan volume limbah padat akibat pekerjaan konstruksi, sangat berdampak terhadap permasalahan ekologi serius. Dalam praktik rekayasa geoteknik, Capillary Barrier System dikenal sebagai suatu sistem konstruksi ramah lingkungan yang tersusun dari material limbah beton. Secara eksperimental, studi terhadap karakteristik material limbah beton pada kondisi takjenuh masih belum banyak dilakukan saat ini. Tujuan penelitian ini ialah untuk melakukan pengukuran secara langsung terhadap SWCC dan permeabilitas takjenuh pada material limbah beton dengan menggunakan alat Tempe Cell. Pengukuran SWCC berdasarkan alat Tempe Cell dilakukan secara bertahap, dengan mengaplikasikan tekanan udara sebesar 0,5, 1, 3, 5, 10, 20, dan 40 kPa. Adapun hasil data pengukuran, selanjutnya direpresentasikan dalam kurva best fit SWCC yang dianalisis dengan menggunakan fungsi regresi non-linier. Secara statistik, estimasi terhadap fungsi permeabilitas juga dilakukan berdasarkan hasil data pengujian permeabilitas jenuh dan representasi dalam kurva best fit SWCC. Berdasarkan hasil analisis, dapat diketahui bahwa karakteristik dari sifat hidraulik pada material limbah beton memiliki kemampuan penyimpanan air sebesar 31 %, serta pengaliran air dalam kondisi jenuh sebesar 1.12×10^{-5} m/s dan takjenuh sebesar 3.76×10^{-16} m/s.

Kata Kunci : Fungsi permeabilitas, kurva karakteristik tanah-air, limbah beton, tempe cell.

Abstract

The rise in solid waste from construction activities significantly impacts ecological issues. In geotechnical engineering practice, the Capillary Barrier System is an environmentally friendly construction system composed of concrete waste materials. Experimental studies on the characteristics of concrete waste materials under unsaturated conditions haven't been widely conducted at this time. The purpose of this study was to directly measure the SWCC and unsaturated permeability of concrete waste materials using the Tempe Cell. SWCC measurements based on the Tempe Cell were performed in stages, applying air pressures of 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, and 40 kPa. The measurement data results were then presented in the SWCC best-fit curve, which was analyzed using a non-linear regression function. A statistical estimation of the permeability function was carried out using data from the saturated permeability tests and the SWCC best-fit curve. Based on the analysis results, it is evident that the characteristics of the hydraulic properties of concrete waste material have a water storage capacity of 31 % and water flow in saturated conditions of 1.12×10^{-5} m/s and unsaturated conditions of 3.76×10^{-16} m/s.

Keywords: Concrete waste, permeability function, soil-water characteristic curve, tempe cell.

1. Pendahuluan

Pada era industri 5.0 saat ini, pembangunan infrastruktur sipil menjadi prioritas utama dalam pengembangan suatu kawasan perkotaan besar di

dunia. Semakin bertambahnya jumlah penduduk, maka semakin banyaknya kegiatan sosial ekonomi, seperti pendidikan, kesehatan, dan perdagangan (Adinegara, Iqbal and Ahmad, 2020). Adapun hal tersebut, sangat berbanding lurus terhadap kebutuhan pekerjaan

* Penulis Korespondensi: aldo.wirastana@ui.ac.id

konstruksi yang semakin tinggi di kawasan pemukiman padat penduduk. Peningkatan volume limbah padat yang dihasilkan oleh pekerjaan konstruksi, secara tidak langsung dapat menyebabkan permasalahan ekologi serius akibat kurangnya tempat pembuangan sampah (Hadavand and Imaninasab, 2019).

Dalam rangka mewujudkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB), industri konstruksi dapat melakukan pembangunan infrastruktur berbasis “green construction”. Berdasarkan fakta, diketahui bahwa sekitar 80 % material komposit yang terkandung di dalam limbah beton (*concrete waste*) dapat didaur ulang, serta menguntungkan dari segi nilai ekonomis (Ahmad, 2020). Secara implementasi, proses pemisahan pada material komposit yang terkandung di dalam limbah beton, seperti besi, kaca, kayu, karet, plastik dilakukan dengan menggunakan alat *magnetic separator* dan *vibrating screen* (Batayneh, Marie and Asi, 2007). Selanjutnya, material limbah beton dihancurkan berdasarkan ukuran butirannya dengan menggunakan mesin pemecah batu (*stone crusher*), seperti pada lokasi penambangan batu kali (*quarry*).

Penelitian telah dilakukan untuk mendaur ulang kembali limbah beton sebagai “agregat buatan” yang diaplikasikan pada material konstruksi perkerasan jalan (*sub-base* dan *base course*), serta struktural bangunan (Arulrajah, Piratheepan and Disfani, 2014). Pada bidang ilmu rekayasa geoteknik (*geotechnical engineering*), *Capillary Barrier System* (CBS) telah menjadi salah satu topik utama dalam berbagai penelitian, dikarenakan keunggulannya yang bernilai ekonomis tinggi dan bersifat ramah lingkungan. CBS merupakan suatu sistem drainase horizontal yang dipasang pada bagian bawah permukaan lereng, berupa lapisan tanah non-kohesif yang berasal dari material limbah beton (Satyanaga et al., 2021). Adapun prinsip kerja pada sistem CBS, didasarkan terhadap karakteristik dari sifat hidraulik takjenuh dalam material limbah beton (Satyanaga, Rahardjo and Hua, 2019).

Sifat hidraulik menjadi tolok ukur dalam memahami setiap perilaku aliran air (*flow of water*) di bawah tanah pada kondisi jenuh dan takjenuh (Zhai, Rahardjo and Satyanaga, 2018). Secara garis besar, sifat hidraulik sangat bergantung terhadap fungsi permeabilitas dan kurva karakteristik tanah-air / *soil-water characteristic curve* (SWCC). Secara spesifik, SWCC menggambarkan perilaku dan kemampuan suatu material dalam melakukan penyimpanan ataupun pengaliran air yang direpresentasikan melalui fungsi permeabilitas. Secara detail, SWCC mendefinisikan hubungan antara kadar air dengan isapan matriks pada suatu material (Zhai, Rahardjo and Satyanaga, 2019).

Terdapat penelitian lain yang melakukan studi terhadap karakteristik material limbah beton pada kondisi jenuh (Rahardjo, Gofar and Satyanaga, 2018). Studi terhadap fungsi permeabilitas dan SWCC material limbah beton pada kondisi takjenuh, saat ini masih belum banyak dilakukan penelitian secara eksperimental. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan

untuk melakukan pengukuran secara langsung terhadap SWCC dan permeabilitas takjenuh pada material limbah beton dengan menggunakan alat *Tempe Cell*. Secara output, diharapkan dapat dijadikan sebagai studi lebih lanjut untuk mengetahui karakteristik dari sifat hidraulik pada material limbah beton, khususnya dalam kondisi jenuh dan takjenuh.

2. Teori Aplikasi

2.1 Kurva *best fit* SWCC

Adapun kurva *best fit* SWCC, terdiri atas tiga kondisi yang merepresentasikan zona desaturasi pada suatu jenis tanah, meliputi kondisi batas, kondisi peralihan, serta kondisi residu (Fredlund, Rahardjo and Fredlund, 2012). Secara spesifik, nilai masuknya udara (AEV) didefinisikan sebagai suatu titik terjadinya perbedaan tekanan yang cukup besar antara udara dengan air, sehingga molekul air dapat dipindahkan oleh udara dari ruang pori tanah. Sedangkan, hisapan residu (*residual suction*) didefinisikan sebagai suatu titik terjadinya peningkatan hisap matriks secara lanjut yang telah gagal melakukan pemindahan sejumlah besar air. Untuk melakukan *best fit* pada kurva SWCC secara *unimodal* yang berdasarkan penetapan nilai awal terhadap keenam parameter, dengan menggunakan fungsi regresi non – linier, maka dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Satyanaga, Rahardjo and Zhai, 2017) :

$$\theta_w = \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\Psi_r}\right)} \right) \cdot \left[\theta_r + \left\{ (\theta_s - \theta_r) \cdot \dots \right. \right. \\ \left. \left. \left(1 - (\beta) \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln\left(\frac{\Psi_{aev} - \Psi}{\Psi_{aev} - \Psi_m}\right)}{\sigma} \right) \right) \right\} \right] \quad (1)$$

Dimana :

θ_w = Kadar Air Volumetrik Tanah

Ψ = Hisapan Matriks Pada Tanah (kPa)

σ = Parameter Yang Mewakili Standar Deviasi Geometrik

θ_s = Parameter Yang Mewakili Kadar Air Volumetrik Jenuh

Ψ_{aev} = Parameter Yang Mewakili Nilai Masuknya Udara (kPa)

θ_r = Parameter Yang Mewakili Kadar Air Volumetrik Residu

Ψ_m = Parameter Yang Mewakili Hisapan Matriks Di Titik Belok (kPa)

Ψ_r = Parameter Yang Mewakili Hisapan Matriks Di Titik Residu (kPa)

Dengan Nilai :

$\beta_{(0)}$ = Pada Saat Kondisi $\Psi \leq \Psi_{aev}$

$\beta_{(1)}$ = Pada Saat Kondisi $\Psi > \Psi_{aev}$

2.2 Estimasi terhadap fungsi permeabilitas tanah

Pada mekanika tanah tak jenuh (*unsaturated soil*), fungsi permeabilitas tanah dapat direpresentasikan melalui kurva SWCC (Fredlund and Xing, 1994).

SWCC menggambarkan perilaku dan kemampuan tanah dalam menyimpan ataupun mengalirkan air, sangat bergantung terhadap distribusi ukuran butir pada jenis tanah. Adapun fungsi permeabilitas tanah (k_w), merefleksikan hubungan antara koefisien permeabilitas tanah jenuh (k_{sat}) ataupun koefisien permeabilitas tanah tak jenuh (k_{unsat}) dengan hisapan tanah (ψ_s). Secara statistik, estimasi terhadap fungsi permeabilitas tanah dilakukan berdasarkan prosedur yang telah dijelaskan dalam Fredlund, Rahardjo and Fredlund (2012). Untuk melakukan estimasi terhadap fungsi permeabilitas tanah yang berdasarkan tiga parameter pada kurva *best fit* SWCC, maka dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Fredlund and Xing, 1994) :

$$k_w = k_{sat} \cdot \frac{\int_{\ln(\psi)}^{\ln(\psi_r)} \frac{\theta_s(e^y) - \theta_s(\psi)}{e^y} \theta_s'(e^y) \cdot dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^{\ln(\psi_r)} \frac{\theta_s(e^y) - \theta_s(\psi_{aev})}{e^y} \theta_s'(e^y) \cdot dy} \quad (2)$$

Dimana :

e = Bilangan Euler (2.718)

ψ = Hisapan Matriks Pada Tanah (kPa)

k_w = Fungsi Permeabilitas Pada Tanah (m/s)

k_{sat} = Koefisien Permeabilitas Pada Tanah Jenuh (m/s)

θ_s' = Turunan Fungsi Dari Kadar Air Volumetrik Jenuh

θ_s = Parameter Yang Mewakili Kadar Air Volumetrik Jenuh

ψ_{aev} = Parameter Yang Mewakili Nilai Masuknya Udara (kPa)

ψ_r = Parameter Yang Mewakili Hisapan Matriks Di Titik Residu (kPa)

y = Integrasi Pada Variabel *Dummy* Yang Mewakili Logaritma Kadar Air Volumetrik

3. Metode Penelitian

3.1 Pengujian laboratorium dan sifat mekanis tanah jenuh

Adapun pengujian laboratorium pada mekanika tanah jenuh (*saturated soil*), dilakukan sebanyak satu sampel untuk kondisi tanah terganggu (*disturbed sample*) yang diperoleh dari material limbah beton (CW). Tujuan dari pengujian ini, ialah guna mengetahui sifat mekanis (*mechanical properties*) pada jenis tanah non-kohesif dengan menggunakan material CW. Standar ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D 2434 – 19, dipergunakan dalam pelaksanaan pengujian sifat mekanis pada sampel CW (ASTM, 2019). Untuk mengetahui besaran dari koefisien permeabilitas jenuh pada sampel CW yang tertahan ayakan No. 30 (diameter 0.60 mm), maka dilakukan pengujian sifat mekanis dengan menggunakan alat *constant head*. Alat *constant head*, terdiri dari spesimen benda uji, batu berpori, sumbatan karet, besi pegas, wadah penampungan air, corong besar, dudukan, timbangan, penjepit, serta beberapa tabung plastik (Das, 2004). Adapun dimensi spesimen dari benda uji yang dibentuk, memiliki diameter sebesar 2.49 inci (63.2 mm), serta panjang sebesar 5.51 inci (140 mm).

Tabel 1. Rekapitulasi Data Hasil Pengujian Sifat Mekanis Tanah Jenuh

Sifat Mekanis Tanah Jenuh	CW – NO. 30
Uji Permeabilitas Jenuh (<i>Constant Head</i>)	
Koefisien Permeabilitas Jenuh, k_{sat} (cm/s)	0.00112
Koefisien Permeabilitas Jenuh, k_{sat} (m/s)	1.12×10^{-5}

Berdasarkan data hasil pengujian untuk sifat mekanis tanah jenuh, dapat diketahui bahwa sampel CW memiliki besaran koefisien permeabilitas jenuh (k_{sat}) yang relatif cukup tinggi, yaitu sebesar 1.12×10^{-5} m/s, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

3.2 Pengujian laboratorium mekanika tanah takjenuh

Adapun pengujian laboratorium pada mekanika tanah takjenuh, dilakukan sebanyak satu sampel untuk kondisi tanah terganggu yang diperoleh dari material limbah beton (CW). Untuk mengetahui karakteristik takjenuh pada sampel CW – No. 30 yang direpresentasikan melalui SWCC dan fungsi permeabilitas, maka dilakukan pengukuran secara langsung dengan menggunakan alat *Tempe Cell*. Istilah “*Tempe Cell*”, secara awal mengacu pada alat “*Pressure Plate*” yang diciptakan oleh Reginato dan Van Bavel di Laboratorium Konservasi Air, Tempe – Arizona (Reginato and Van Bavel, 1962). Alat *Tempe Cell* tersusun atas empat komponen utama, meliputi penutup dasar (*base cap*), piringan batu berpori (*porous ceramic disk*), silinder spesimen (*brass cylinder*), serta penutup atas (*top cap*). Pada tahap persiapan dalam **Gambar 1 (a)**, sampel CW dibentuk dengan menggunakan silinder spesimen yang memiliki diameter sebesar 2.12 inci (5.38 cm) dan tinggi sebesar 2.36 inci (6.00 cm). Standar ASTM D 698 – 12, dipergunakan saat tahap persiapan pengujian untuk mengetahui besaran densitas (*density*) sampel CW pada kondisi kering dan jenuh sepenuhnya (ASTM, 2012), seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2**. Selanjutnya, dilakukan proses saturasi pada sampel CW hingga mencapai kondisi jenuh



(a) Proses pembentukan pada sampel CW
(b) Proses saturasi pada sampel CW

Gambar 1. Tahapan persiapan pada pengukuran secara langsung

(Sumber : Dokumentasi peneliti, 2024)

Tabel 2. Perhitungan kadar air sampel CW pada kondisi kering dan jenuh

Data Perhitungan Kadar Air	Kering	Jenuh
Volume Silinder Spesimen	136.33 cm ³	136.33 cm ³
Berat Sampel CW	169.65 gr	212.57 gr
Densitas Sampel CW	1.24 gr/cm ³	1.56 gr/cm ³
Berat Air (Mass of Water)	24.95 gr	67.87 gr
Kadar Air (Water Content)	17.24 %	46.90 %

(Sumber : Hasil perolehan data, 2024)

sepenuhnya, secara akhir tercapai dalam waktu ± 7 hari, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1(b)**.

Setelah melewati proses saturasi, maka besaran kadar air (*water content*) sampel CW pada kondisi kering (batas minimum) dan jenuh (batas maksimum) dapat diketahui secara detail, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Secara teknis, besaran kadar air pada sampel CW dapat dianalisis berdasarkan prosedur yang telah dijelaskan dalam ASTM D 2216 – 10 (2019). Adapun batas kadar air pada kondisi minimum dan maksimum, dapat dijadikan sebagai tolok ukur dalam merepresentasikan data hasil pengukuran SWCC secara langsung.

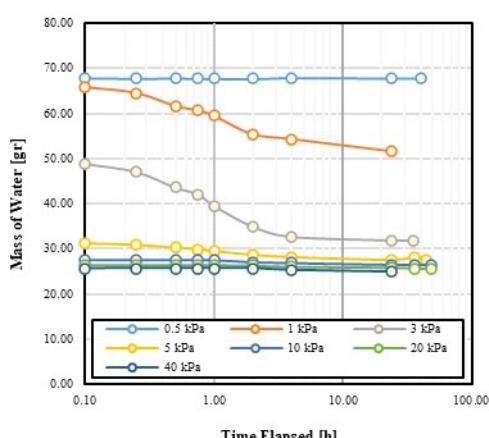
Dalam studi ini, pengukuran SWCC berdasarkan alat *Tempe Cell* dilakukan secara bertahap, yaitu dengan mengaplikasikan tekanan udara sebesar 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, serta 40 kPa. Tujuan dari pengaplikasian tekanan udara secara bertahap ini, ialah guna mengetahui karakteristik takjenuh pada sampel CW yang ditandai dengan nilai masuknya udara saat pengukuran SWCC berlangsung. Secara spesifik, nilai masuknya udara merepresentasikan terjadinya penurunan kadar dan massa air yang cukup signifikan akibat perpindahan sejumlah besar molekul air oleh udara dari ruang pori berukuran besar, sehingga cenderung menyulitkan kemampuan suatu material dalam melakukan penyimpanan ataupun pengaliran air. Secara teknis, pengukuran SWCC dengan menggunakan alat *Tempe Cell* dilakukan berdasarkan prosedur yang telah dijelaskan dalam ASTM D 6836 – 02 (2003). Hubungan antara penurunan massa air dengan pertambahan waktu tunggu pada sampel CW, secara eksperimental telah ditunjukkan dalam **Gambar 2(a)**.

Saat diaplikasikannya tekanan udara sebesar 0.5 kPa, massa air pada sampel CW menunjukkan nilai yang sangat konstan, yaitu sebesar 67.84 gr. Adapun pengaplikasian tekanan udara sebesar 1 kPa, menunjukkan penurunan massa air yang cukup signifikan, yaitu sebesar 14.16 gr. Sementara itu, pengaplikasian tekanan udara sebesar 3 kPa, menunjukkan penurunan massa air yang sangat signifikan, yaitu sebesar 19.76 gr. Secara detail, nilai masuknya udara (ψ_{aev}) terjadi pada waktu awal di saat pengaplikasian tekanan udara sebesar 1 kPa, dengan massa air sebesar 65.80 gr. **Gambar 2(b)** menunjukkan hubungan antara peningkatan isapan matriks dengan penurunan kadar air pada sampel CW yang telah dilakukan pengolahan data untuk hasil pengukuran SWCC secara langsung, selanjutnya direpresentasikan dalam suatu grafik.

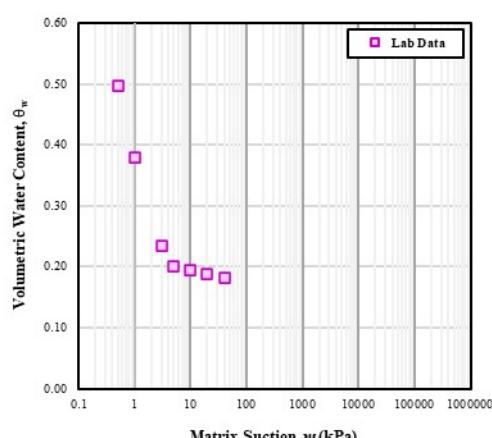
4. Hasil dan Diskusi

4.1 Kurva best fit SWCC

Adapun kurva *best fit* SWCC secara *unimodal*, direpresentasikan setelah melakukan penetapan nilai awal yang sesuai terhadap keenam parameter, dengan menggunakan fungsi regresi non-linier pada **Persamaan (1)**. Secara spesifik, keenam parameter pada kurva *best fit* SWCC, meliputi kadar air volumetrik jenuh (θ_s), nilai masuknya udara (ψ_{aev}), titik belok isapan matriks (ψ_m), standar deviasi geometrik (σ), isapan residu (ψ_r), serta kadar air volumetrik residu (θ_r). Secara prosedur, pengaplikasian pada fungsi regresi non-linier dilakukan dengan menggunakan *software Microsoft Excel* (Dodge, 2003). **Gambar 3** menunjukkan hasil representasi dari kurva *best fit* SWCC yang telah dilakukan pengolahan data secara berulang (*trial and error*), melalui penggunaan *add-in solver* dalam Microsoft Excel. Terjadinya perpindahan sejumlah besar molekul air oleh udara dari ruang pori berukuran besar pada sampel CW, dapat dinyatakan sebagai nilai masuknya udara (ψ_{aev}) yang memiliki nilai sebesar 0.485 kPa. Terlihat jelas, bahwa isapan matriks dalam sampel CW memiliki besaran peningkatan secara singkat pada kondisi peralihan yang berkorelasi dengan kecepatan desaturasi (δ_s).

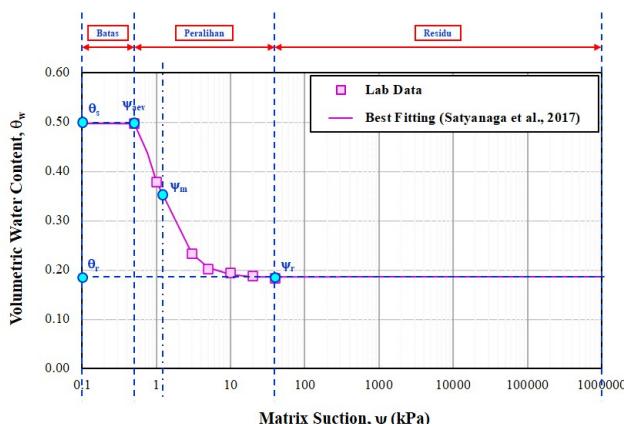


(a) Hubungan antara massa air dan waktu tunggu



(a) Hubungan antara massa air dan waktu tunggu

Gambar 2. Komponen dan aksesoris pada alat *tempe cell*



Gambar 3. Hasil representasi data pada kurva best fit SWCC

(Sumber : Hasil perolehan data, 2024)

Tabel 3. Parameter hasil pengolahan data pada kurva best fit SWCC

Parameter Kurva Best Fit SWCC	Sampel CW – No. 30
	Kadar Air Volumetrik (θ_w)
σ	1.181
R^2	1.000
θ_s	0.498
θ_r	0.186
ψ_{aev} (kPa)	0.485
ψ_m (kPa)	1.221
ψ_r (kPa)	40.00

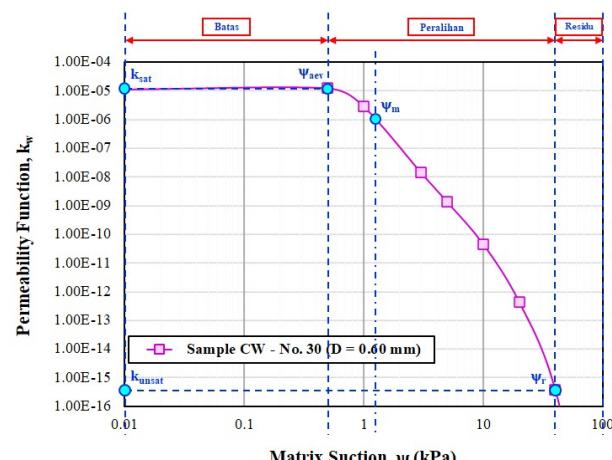
(Sumber : Hasil perolehan data, 2024)

serta dinyatakan sebagai titik belok isapan matriks (ψ_m) yang memiliki nilai sebesar 1.221 kPa. Terjadinya peningkatan tekanan udara secara lebih lanjut yang diakibatkan oleh kegagalan perpindahan pada sejumlah besar molekul air di dalam sampel CW, dapat dinyatakan sebagai isapan residu (ψ_r) yang memiliki nilai sebesar 40.00 kPa. Secara eksperimental, kadar air volumetrik jenuh (θ_s) yang terkandung di dalam sampel CW memiliki nilai sebesar 0.498 atau 50 %. Sementara itu, kadar air volumetrik residu (θ_r) yang terkandung di dalam sampel CW memiliki nilai sebesar 0.186 atau 19 %. Untuk standar deviasi geometrik (σ) pada kurva best fit SWCC memiliki nilai sebesar 1.181, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 1.000.

Adapun keenam parameter dari hasil pengolahan data pada kurva best fit SWCC untuk sampel CW, secara ringkas dapat ditunjukkan dalam Tabel 3.

4.2 Estimasi terhadap fungsi permeabilitas

Adapun estimasi terhadap fungsi permeabilitas pada sampel CW, dilakukan berdasarkan ketiga parameter dari hasil representasi data dalam kurva best fit SWCC, secara statistik dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan (2). Tidak luput dari perhatian juga, data hasil pengujian sifat mekanis tanah jenuh yang berdasarkan alat *constant head* dalam Tabel 1, digunakan pada estimasi terhadap fungsi permeabilitas untuk sampel CW. Gambar 4 menunjukkan hubungan antara fungsi permeabilitas dengan isapan matriks pada sampel CW yang telah dilakukan estimasi dan pengolahan data secara statistik, serta direpresentasikan dalam suatu grafik. Saat mencapai kondisi batas,



Gambar 4. Hubungan antara fungsi permeabilitas dan isapan matriks

(Sumber : Hasil perolehan data, 2024)

koefisien permeabilitas jenuh (k_{sat}) yang terkandung di dalam sampel CW memiliki nilai sebesar 1.12×10^{-5} m/s. Sementara itu, nilai masuknya udara (ψ_{aev}) yang terjadi pada sampel CW saat mencapai kondisi batas, memiliki nilai sebesar 0.485 kPa. Adapun titik belok isapan matriks (ψ_m) pada kondisi peralihan, memiliki besaran koefisien permeabilitas takjenuh (k_{unsat}) sebesar 1.22×10^{-6} m/s, dengan nilai isapan matriks dalam sampel CW sebesar 1.221 kPa. Saat mencapai kondisi residu, koefisien permeabilitas takjenuh (k_{unsat}) yang terkandung di dalam sampel CW memiliki nilai sebesar 3.76×10^{-16} m/s. Secara akhir, nilai isapan residu (ψ_r) yang terjadi pada sampel CW saat mencapai kondisi residu, memiliki nilai sebesar 40.00 kPa.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengukuran secara langsung terhadap SWCC dan permeabilitas takjenuh pada material limbah beton dengan menggunakan alat *Tempe Cell*, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Adapun besaran kadar air pada material limbah beton cenderung mengalami penurunan yang cukup signifikan, seiring dengan terjadinya peningkatan nilai isapan matriks secara bertahap. Secara eksperimental, kadar air volumetrik jenuh (θ_s) yang terkandung di dalam material limbah beton memiliki nilai sebesar 0.498 atau 50 %, dengan nilai masuknya udara (ψ_{aev}) sebesar 0.485 kPa. Sementara itu, kadar air volumetrik residu (θ_r) yang terkandung di dalam material limbah beton memiliki nilai sebesar 0.186 atau 19 %, dengan nilai isapan residu (ψ_r) sebesar 40.00 kPa. Sehingga, dapat diketahui bahwa karakteristik dari sifat hidraulik pada material limbah beton memiliki kemampuan untuk melakukan penyimpanan air sebesar 0.312 atau 31 %.
2. Adapun besaran koefisien permeabilitas pada material limbah beton cenderung mengalami penurunan yang cukup signifikan, seiring dengan terjadinya peningkatan nilai isapan matriks secara

bertahap. Secara grafis, koefisien permeabilitas jenuh (k_{sat}) yang terkandung di dalam material limbah beton memiliki nilai sebesar 1.12×10^{-5} m/s, dengan nilai masuknya udara (ψ_{aev}) sebesar 0.485 kPa. Sementara itu, koefisien permeabilitas takjenuh (k_{unsat}) yang terkandung di dalam material limbah beton memiliki nilai sebesar 3.76×10^{-16} m/s, dengan nilai isapan residu (ψ_r) sebesar 40.00 kPa. Sehingga, dapat diketahui bahwa karakteristik dari sifat hidraulik pada material limbah beton dalam kondisi jenuh dan takjenuh, masing-masing memiliki kemampuan untuk melakukan pengaliran air sebesar 1.12×10^{-5} m/s dan 3.76×10^{-16} m/s.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Penelitian dan Pengembangan, Universitas Indonesia melalui Hibah PUTI 2024 (Nomor Hibah NKB-457/UN2.RST/HKP.05.00/2024).

Daftar Pustaka

- Adinegara, A. W., Iqbal, M. and Ahmad, M. M. (2020). *Pelaksanaan Pekerjaan Struktur Lantai 25 Area Tower A Proyek Transpark Bintaro Tangerang Selatan*. In: Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil. pp.188–194.
- Ahmad, O. A. (2020). *The Usefulness of Construction and Destruction Waste as Recycled Aggregates in Concrete*. International Journal of GEOMATE, 19(75), pp.8–18. <https://doi.org/10.21660/2020.75.15242>.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J. and Disfani, M. M. (2014). *Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation*. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(2), pp.349–357.
- ASTM. (2019). *ASTM D2216—Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*.
- ASTM. (2019). *ASTM D2434: Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*. ASTM International, [online] pp.3–5. Available at: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/50899458-622b-4b86-b3e9-bfa0755bc727/en-14427-2022>>.
- ASTM. (2012). *ASTM D698—Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN·m/m³))*.
- ASTM. (2003). *ASTM D6836-02: Test Methods for Determination of The Soil Water Characteristic Curve for Desorption using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge*. Annual book of ASTM standards, 4.
- Batayneh, M., Marie, I. and Asi, I. (2007). *Use of Selected Waste Materials in Concrete Mixes*. Waste Management, 27(12), pp.1870–1876.
- Das, B. M. (2004). *Soil Mechanics. The Engineering Handbook*, Second Edition, pp.81-1-81-7. <https://doi.org/10.1007/bf01704074>.
- Dodge, M. (2003). *Microsoft Office Excel 2003 Inside Out*. Microsoft Press.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. <https://doi.org/10.1002/9781118280492>.
- Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). *Equations for The Soil-Water Characteristic Curve*. Canadian Geotechnical Journal, 31(4), pp.521–532.
- Hadavand, B. and Imaninasab, R. (2019). *Assessing The Influence of Construction and Demolition Waste Materials on Workability and Mechanical Properties of Concrete using Statistical Analysis*. Innovative Infrastructure Solutions, 4, pp.1–11.
- Rahardjo, H., Gofar, N. and Satyanaga, A. (2018). *Effect of Concrete Waste Particles on Infiltration Characteristics of Soil*. Environmental Earth Sciences, 77, pp.1–12.
- Reginato, R. J. and Van Bavel, C. H. M. (1962). *Pressure Cell for Soil Cores*. Soil Science Society of America Journal, 26(1), pp.1–3.
- Satyanaga, A., Rahardjo, H. and Hua, C. J. (2019). *Numerical Simulation of Capillary Barrier System under Rainfall Infiltration in Singapore*. ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories, 5(1), pp.43–54.
- Satyanaga, A., Rahardjo, H. and Zhai, Q. (2017). *Estimation of Unimodal Water Characteristic Curve for Gap-Graded Soil*. Soils and Foundations, 57(5), pp.789–801.
- Satyanaga, A., Zhai, Q., Rahardjo, H., de FN Gitirana Jr, G., Moon, S. W. and Kim, J. (2021). *Performance of Capillary Barrier as a Sustainable Slope Protection*. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. pp.3021.
- Zhai, Q., Rahardjo, H. and Satyanaga, A. (2018). *A Pore-Size Distribution Function Based Method for Estimation of Hydraulic Properties of Sandy Soils*. Engineering Geology, 246, pp.288–292.
- Zhai, Q., Rahardjo, H. and Satyanaga, A. (2019). *Estimation of Air Permeability Function from Soil-Water Characteristic Curve*. Canadian Geotechnical Journal, 56(4), pp.505–513.