



Kinerja Model Kotak Infiltrasi Pada Kondisi Tanah Jenuh dan Tidak Jenuh untuk Mengurangi Genangan di Jalan Perkotaan

Awliya Tribhuwana^{1,2}, *Slamet Imam Wahyudi¹, Moh Faiqun Ni'am¹, Henny Pratiwi Adi¹

¹ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang

² Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Swadaya Gunung Jati, Cirebon

*) wahyudi@unissula.ac.id

Received: 4 Februari 2025 Revised: 28 November 2025 Accepted: 8 Desember 2025

Abstract

Flooding on road surfaces due to heavy rainfall is a major problem, especially in urban areas. This situation requires an infiltration-based control system in accordance with the Low Impact Development (LID) concept. The infiltration box model is one solution to reduce inundation around road medians. This study aims to realize the infiltration box model, analyze the flow behavior of the model in the road median, and compare the model's performance under saturated and unsaturated soil conditions. The research method was carried out experimentally using flow in a laboratory flume channel. Based on the road area and return rainfall for a 2-year period, a discharge model of 0.109 l/s was used. The parameters analyzed included runoff discharge, infiltration discharge, and the volume of the box reservoir. The results showed that under saturated soil conditions, runoff reached 74.69% of the rainfall discharge, while infiltration and reservoir were only 11.20% and 5.89%, respectively. Under unsaturated soil conditions, runoff decreased to 46.65%, while infiltration increased to 30.43% and the box reservoir to 12.78%. Infiltration discharge in unsaturated soil was recorded at approximately 2.7 times greater than in saturated soil. These results demonstrate the influence of soil water content on the infiltration box performance model. Infiltration boxes should be integrated with other road drainage systems, including water pipes running under the road to the roadside drains.

Keywords: Model test, infiltration box, runoff, road median, groundwater content

Abstrak

Genangan air di permukaan jalan akibat intensitas hujan banyak mengganggu terutama di kawasan perkotaan. Kondisi ini memerlukan sistem pengendalian berbasis infiltrasi sesuai konsep low impact development (LID). Model kotak infiltrasi merupakan salah satu solusi mengurangi genangan air di sekitar median jalan. Penelitian ini bertujuan untuk merealisasikan model kotak infiltrasi, menganalisis perilaku aliran model di median jalan, membandingkan kinerja model pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan aliran di saluran flume laboratorium. Berdasarkan luasan jalan dan curah hujan return periode 2 tahun, digunakan debit sebesar 0,109 l/det. Parameter yang dianalisis meliputi debit limpasan, debit infiltrasi, dan volume tampungan kotak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi tanah jenuh, limpasan mencapai 74,69% dari debit hujan, sedangkan infiltrasi dan tampungan masing-masing hanya sebesar 11,20% dan 5,89%. Pada kondisi tanah tidak jenuh, limpasan menurun menjadi 46,65%, sementara infiltrasi meningkat menjadi 30,43% dan tampungan kotak menjadi 12,78%. Debit infiltrasi pada tanah tidak jenuh tercatat sekitar 2,7 kali lebih besar dibandingkan tanah jenuh. Hasil ini menunjukkan pengaruh kadar air tanah terhadap model kinerja kotak infiltrasi. Kotak infiltrasi perlu dipadukan dengan sistem drainasi jalan yang lain di antaranya pipa air melintang bawah jalan ke saluran tepi jalan.

Kata kunci: Uji model, kotak infiltrasi, limpasan, median jalan, kadar air tanah

Pendahuluan

Permasalahan banjir perkotaan semakin meningkat akibat perubahan tata guna lahan, urbanisasi,

pembangunan infrastruktur, serta perubahan iklim. Perubahan guna lahan dari area bervegetasi menjadi area kedap air, menurunkan kapasitas resapan. (Hu et al., 2020; Shrestha, 2021) Penambahan

permukaan kedap air menurunkan kapasitas resapan dan meningkatkan limpasan air permukaan (Tribhuwana *et al.*, 2021). Beberapa penelitian menegaskan hubungan antara perluasan area kedap air dengan peningkatan respon hidrologi (debit) di perkotaan (Alshammari *et al.*, 2023; Hameed, 2017; Pejiang *et al.*, 2018).

Median jalan yang tidak kedap air memiliki ruang terbatas namun strategis untuk meningkatkan infiltrasi dan mengurangi aliran permukaan. Kotak infiltrasi memiliki kantong tampungan dan resapan yang dapat meningkatkan kapasitas infiltrasi pada area sempit di median jalan tanpa perkerasan. (Benda *et al.*, 2019; Sitzenfreni *et al.*, 2020; Woznicki *et al.*, 2018). Peningkatan limpasan mengakibatkan genangan yang menimbulkan kerugian material, gangguan lalu lintas, serta peningkatan biaya pemeliharaan infrastruktur (Wahyudi *et al.*, 2017). Kotak infiltrasi di median jalan menjadi salah satu solusi mitigasi genangan yang potensial terutama di badan jalan. (Bai *et al.*, 2019; Basu *et al.*, 2021; Lin *et al.*, 2023; Malaviya, 2019).

Urbanisasi yang berkembang cepat meningkatkan luas permukaan kedap air dan meningkatkan aliran permukaan di wilayah perkotaan, (Samouei, 2020). Kotak infiltrasi berperan sebagai salah satu bentuk penerapan *Low Impact Development* (LID) yang dinilai efektif untuk lahan terbatas. (C. Li, 2018; Y. Li *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2018). Perubahan iklim juga semakin meningkatkan frekuensi dan intensitas hujan ekstrem (Myhre, 2019; Ragno & Love, n.d.; Singh *et al.*, 2016), sehingga sistem drainase konvensional sering tidak mampu menampung debit puncak (Ben-Daoud, 2022; J. Li *et al.*, 2024).

Kotak infiltrasi dapat berfungsi sebagai unit penahan aliran sementara yang mengurangi beban saluran utama serta meningkatkan ketahanan sistem drainase (Tribhuwana *et al.*, 2025). Namun, performa infiltrasi sangat dipengaruhi oleh jenis tanah, kondisi kelembaban awal, dan kebutuhan perawatan, faktor-faktor yang telah ditekankan dalam penelitian mengenai infiltrasi tanah dan media bioretensi (Wei *et al.*, 2022).

Sebelum mengkaji lebih jauh, sangat penting untuk memahami teori dasar yang menjadi landasan perilaku infiltrasi (Wang *et al.*, 2024). Secara umum, laju infiltrasi tanah dijelaskan melalui beberapa model klasik. Persamaan Horton menggambarkan penurunan laju infiltrasi seiring bertambahnya waktu akibat kejenuhan pori (Jiang *et al.*, 2021). Selain itu, hukum Darcy digunakan untuk menggambarkan hubungan antara gradien hidrolik dan kecepatan aliran melalui media

berpori. Beberapa model klasik aliran dalam tanah menggunakan persamaan Horton untuk menggambarkan penurunan laju infiltrasi seiring bertambahnya waktu akibat kejenuhan pori.

Kajian literatur sebelumnya menunjukkan bahwa penelitian terkait LID dan teknologi infiltrasi lokal telah banyak difokuskan pada permeable pavements, bioretention, infiltration trenches, dan kotak infiltrasi berskala besar (Brugin *et al.*, 2017; Chui & Trinh, 2016; Y. Li, 2020; Maglionico, 2016; Regimes, 2018). Namun, penelitian yang spesifik mengkaji implementasi kotak infiltrasi pada median jalan sempit masih terbatas. Selain itu, perbandingan performa infiltrasi pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh pada skala prototipe sederhana belum banyak dilaporkan, meskipun penelitian hidrologi menunjukkan bahwa kelembaban awal tanah merupakan faktor penentu laju infiltrasi aktual (Y. Li, 2020; Regimes, 2018).

Teridentifikasi dari kajian-kajian tersebut adalah kurangnya kajian penerapan kotak infiltrasi pada median jalan sempit dengan kondisi tanah permeabel, dan belum adanya analisis perbandingan performa infiltrasi antara kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh pada prototipe berskala sederhana. Untuk itu diperlukan (1) pengujian prototipe kotak infiltrasi modular yang dirancang untuk ruang terbatas seperti median jalan perkotaan, (2) performa infiltrasi pada tanah lempung lokal dengan membandingkan kondisi jenuh dan tidak jenuh, serta (3) penyediaan prosedur uji sederhana yang dapat direplikasi untuk mendukung perencanaan drainase berbasis LID di kota-kota berkembang di Indonesia.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perilaku infiltrasi kotak infiltrasi modular pada media tanah lokal, serta menjelaskan perbedaan performa antara kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh, berdasar hasil penelitian dapat memberi rekomendasi teknis bagi penerapan kotak infiltrasi sebagai bagian dari strategi LID untuk mitigasi genangan di wilayah perkotaan Indonesia, tujuan penelitian ini adalah untuk: menganalisis perilaku infiltrasi kotak infiltrasi modular pada media tanah lokal. membandingkan performa infiltrasi antara kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh pada prototipe kotak infiltrasi, dan menyediakan rekomendasi teknis awal terkait penerapan kotak infiltrasi sebagai bagian dari strategi LID untuk mitigasi genangan di wilayah perkotaan Indonesia.

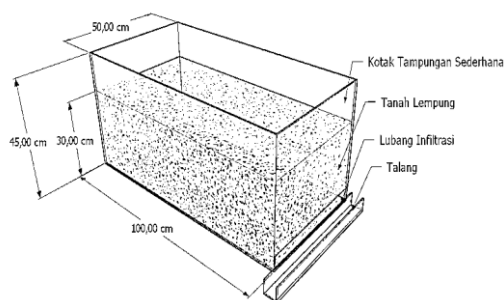
Metode

Penelitian dilakukan dengan pengujian laboratorium untuk mengevaluasi kapasitas

infiltrasi serta karakteristik limpasan pada model kotak infiltrasi. Tahapan penelitian ini meliputi persiapan material, pemasangan alat, pengujian pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh, serta analisis data menggunakan parameter hidrologi dan hidrolika.

Bahan dan peralatan utama penelitian

Model kotak infiltrasi diuji awal dengan menggunakan flume. Kemudian tahap berikutnya uji fisik kotak infiltrasi di median jalan. Berikut Gambar 1 adalah kotak infiltrasi di dalamnya merupakan rangkaian jaringan material plastik.



Gambar 1. Skema model kotak infiltrasi sederhana

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sampel tanah yang lolos saringan No. 10 sebagai media infiltrasi, simulasi air hujan dengan debit terukur 0,109 l/det sebagai representasi hujan intensitas tinggi, dan model kotak infiltrasi berukuran 100 cm × 50 cm × 45 cm sebagai wadah tampungan dan media resapan. Tanah diuji dalam dua kondisi, yaitu tanah tidak jenuh yang masih memiliki ruang pori sehingga mampu menyerap air lebih cepat, serta tanah jenuh ketika seluruh ruang pori telah terisi air.

Peralatan utama terdiri atas model kotak infiltrasi dari plastik dengan volume tampungan 0,178 m³, saringan No. 10, pipa PVC 1/2 inch sebagai jalur aliran, stopwatch, gelas ukur 1000 ml dan 100 ml, penggaris, ember dan botol pendukung, aluminium foil untuk uji rembesan awal, timbangan digital untuk mengukur berat sampel tanah, serta oven untuk proses pengeringan. Seluruh peralatan digunakan untuk mengukur debit infiltrasi, debit limpasan, perubahan kadar air tanah, dan geometri aliran selama pengujian.

Prosedur pengujian

Prosedur pengujian diawali dengan persiapan tanah, yaitu mengayak sampel tanah dan mengkondisikannya menjadi tanah jenuh dan tidak jenuh. Selanjutnya dilakukan pemasangan alat dengan menyusun kotak infiltrasi menggunakan

lapisan tanah homogen serta memasang pipa pemasukan dan keluaran air. Simulasi hujan dilakukan dengan mengalirkan air dengan debit 0,109 l/det secara konstan hingga tanah mencapai kondisi jenuh. Pengukuran dilakukan terhadap volume infiltrasi per interval waktu, volume limpasan, waktu kejenuhan, dan perubahan tinggi muka air. Pengujian diulang untuk memperoleh data yang stabil.

Metode analisis

Debit infiltrasi dihitung dari volume air yang meresap per satuan waktu terhadap luas bidang kontak ($A = 0,5 \text{ m}^2$) menggunakan Persamaan 1.

$$Q = v \times A \quad (1)$$

Analisis limpasan dilakukan berdasarkan volume air yang keluar dari kotak setelah tanah jenuh. Perbandingan kondisi jenuh dan tidak jenuh disajikan dalam bentuk grafik dan tabel. Efisiensi atau kinerja infiltrasi dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$Efisiensi = \frac{Q_{infiltrasi}}{Q_{total}} \times 100\% \quad (2)$$

Metode perumusan hasil

Metode perumusan hasil dilakukan melalui simulasi hujan intensitas tinggi pada model kotak infiltrasi, pengukuran limpasan dan infiltrasi pada kondisi jenuh dan tidak jenuh, identifikasi titik kegagalan sistem, analisis efektivitas desain, serta penyusunan rekomendasi desain untuk meningkatkan kinerja infiltrasi pada area sempit perkotaan.

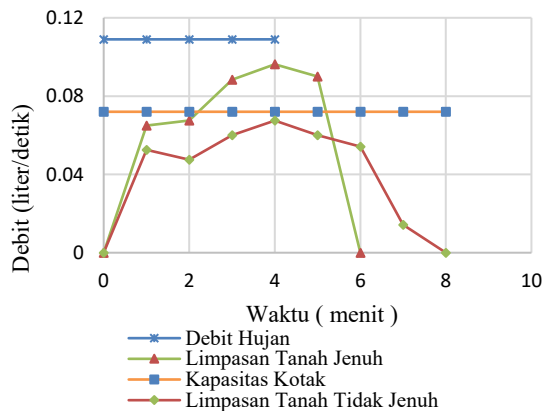
Hasil dan Pembahasan

Debit aliran uji model kotak infiltrasi

Debit aliran representatif intensitas hujan yang digunakan dalam pengujian laboratorium dijaga relatif konstan yaitu sebesar 0,109 l/det. Kondisi ini dilakukan untuk memastikan bahwa respon hidraulik yang terjadi pada sistem dipengaruhi oleh karakteristik tanah dan kinerja kotak infiltrasi, bukan oleh fluktuasi intensitas hujan. Kapasitas hidraulik kotak infiltrasi dihasilkan rata 0,072 l/det dan relatif stabil sepanjang pengujian. Nilai ini merupakan representatif batas maksimum debit yang dapat ditampung dan disalurkan oleh sistem kotak infiltrasi ke dalam tanah. Kestabilan debit hujan dan kapasitas sistem menjadi dasar untuk membandingkan perilaku limpasan, infiltrasi, serta tampungan kotak pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh air. Dengan demikian, hasil uji hidrolika dapat diinterpretasikan sebagai dasar dari kondisi awal kelembaban tanah, debit input dan output aliran.

Debit limpasan dengan perbedaan kondisi kadar air tanah

Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 2 dan rekapitulasi pada Tabel 1, terlihat bahwa kondisi kejenuhan tanah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap besarnya debit limpasan. Pada kondisi tanah jenuh, debit limpasan meningkat dengan cepat mulai awal pengaliran dan mencapai nilai puncak dalam waktu yang relatif singkat. Secara kuantitatif, debit limpasan rata-rata pada kondisi tanah jenuh sebesar 0,0814 l/det atau 74,69% dari debit hujan.



Gambar 2. Hubungan debit hujan, debit limpasan pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh, serta kapasitas kotak infiltrasi terhadap waktu.

Tabel 1. Perbandingan debit limpasan pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh

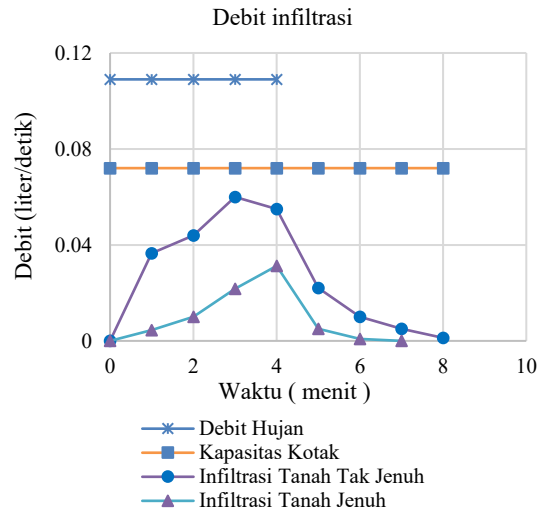
Kondisi	Debit limpasan	
	(litar/detik)	%
Tanah jenuh	0,0814	74,69
Tanah tidak jenuh	0,0509	46,65

Sebaliknya, pada kondisi tanah tidak jenuh, debit limpasan yang terjadi lebih kecil dan fluktuasi secara lebih lambat. Debit limpasan rata-rata tercatat sebesar 0,0509 l/det atau 46,65% dari debit hujan. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pada tanah yang belum jenuh masih tersedia ruang pori yang cukup besar untuk menyerap air hujan, sehingga limpasan permukaan berkurang.

Secara fisik, tinggi limpasan pada tanah jenuh disebabkan oleh hampir seluruh pori tanah telah terisi air, sehingga kemampuan tanah untuk menerima tambahan air menjadi sangat terbatas. Dengan demikian air hujan yang jatuh di permukaan lebih cepat berubah menjadi aliran permukaan. Temuan ini mengindikasikan bahwa kondisi awal tanah sebelum hujan merupakan faktor kunci dalam menentukan besarnya limpasan yang berpotensi menyebabkan genangan atau banjir.

Hasil uji debit infiltrasi

Perilaku debit infiltrasi terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 4 dan dirangkum dalam Tabel 2. Pada kondisi tanah tidak jenuh, debit infiltrasi meningkat tajam pada awal pengaliran dan mencapai nilai maksimum sebesar 0,0332 l/det atau 30,43% dari debit hujan. Setelah itu, debit infiltrasi berangsur menurun seiring dengan meningkatnya tingkat kejenuhan tanah.



Gambar 3. Hubungan debit hujan, kapasitas kotak infiltrasi, serta debit infiltrasi pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh terhadap waktu.

Tabel 2. Perbandingan Debit Infiltrasi pada Kondisi Tanah Jenuh dan Tidak Jenuh

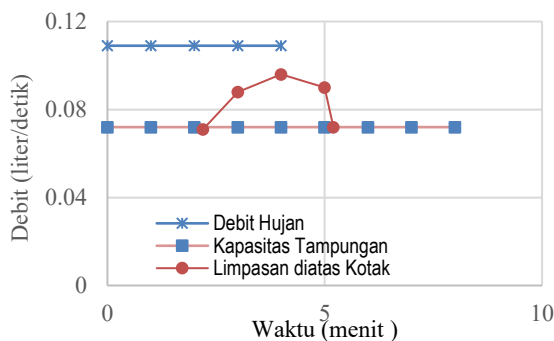
Kondisi	Debit infiltrasi	
	(liter/detik)	%
Tanah jenuh	0,0122	11,20
Tanah tidak jenuh	0,0332	30,43

Pada kondisi tanah jenuh, debit infiltrasi yang terjadi jauh lebih kecil, dengan nilai rata-rata hanya sebesar 0,0122 l/det atau 11,20% dari debit hujan. Rendahnya nilai ini menunjukkan bahwa tanah yang telah jenuh memiliki kemampuan infiltrasi yang sangat terbatas. Dengan kata lain, sebagian besar air hujan tidak dapat lagi diserap ke dalam tanah dan cenderung menjadi limpasan permukaan.

Perbandingan kedua kondisi tersebut menunjukkan bahwa debit infiltrasi pada tanah tidak jenuh sekitar 2,7 kali lebih besar dibandingkan pada tanah jenuh. Hal ini menunjukkan bahwa ketersediaan ruang pori tanah sangat menentukan efektivitas infiltrasi. Penurunan laju infiltrasi seiring bertambahnya kejenuhan tanah juga sesuai dengan konsep dasar hidrologi tanah, di mana konduktivitas hidraulik efektif menurun ketika tanah mendekati kondisi jenuh.

Limpasan sebagai indikator maksimal kapasitas infiltrasi

Debit limpasan di atas kotak infiltrasi terhadap waktu sebagai indikasi maksimum kapasitas tampungan dan infiltrasi. Hasil pengamatan pada Gambar 4 menunjukkan terjadinya limpasan di atas kotak infiltrasi ketika debit masuk melebihi kapasitas tampungan dan infiltrasi tanah. Limpasan di atas kotak mulai muncul setelah pengaliran mencapai nilai maksimum atau sistem sudah berada pada kondisi jenuh, sehingga perlu tambahan aliran melintang di bawah jalan dari median ke drainasi tepi jalan.



Gambar 4. Debit limpasan di atas kotak infiltrasi

Terjadinya limpasan di atas kotak mengindikasikan kapasitas tampungan kotak dan laju infiltrasi tanah tidak mampu lagi menampung seluruh debit air yang masuk. Kondisi ini menggambarkan terjadinya *overflow* pada sistem kotak infiltrasi. Maka, kotak infiltrasi mampu mereduksi sebagian limpasan, pada kondisi debit maksimal dan tanah jenuh, diperlukan tambahan drainase melintang jalan bawah jalan ke saluran tepi jalan. Sistem kotak infiltrasi memiliki keterbatasan operasional yang harus diperhitungkan dalam perencanaan. Untuk itu perlu menambah kapasitas tampungan kotak infiltrasi atau dikombinasikan dengan sistem drainase melintang bawah jalan, sehingga dapat menghindari genangan air di jalan.

Kinerja tampungan kotak infiltrasi

Berikut tabel mempresentasikan debit tampungan yang dikoversi dari volume tampungan dalam waktu hujan.

Tabel 3. Debit tampungan kotak infiltrasi pada kondisi tanah jenuh dan tidak jenuh

Kondisi	Debit tampungan kotak	
	(liter/detik)	%
Tanah jenuh	0,0042	5,89
Tanah tidak jenuh	0,0092	12,78

Kinerja tampungan kotak infiltrasi ditunjukkan pada Tabel 3. Pada kondisi tanah jenuh, debit tampungan kotak hanya sebesar 0,0042 l/det atau 5,89% dari debit hujan. Nilai ini menunjukkan bahwa kemampuan kotak untuk menampung dan menyalurkan air ke dalam tanah berkurang ketika tanah di sekitarnya telah mencapai kondisi jenuh.

Pada kondisi tanah tidak jenuh, debit tampungan kotak meningkat menjadi 0,0092 l/det atau 12,78% dari debit hujan. Peningkatan ini menunjukkan bahwa ketika tanah masih memiliki kapasitas infiltrasi yang cukup, air yang masuk ke dalam kotak dapat lebih cepat dilepaskan ke dalam tanah, sehingga volume air yang dapat ditampung oleh kotak juga menjadi lebih besar.

Jika dibandingkan, debit tampungan kotak pada kondisi tanah tidak jenuh sekitar 2,2 kali lebih besar daripada pada kondisi tanah jenuh. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja hidraulik kotak infiltrasi tidak hanya ditentukan oleh dimensi dan kapasitas strukturnya, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi tanah sebagai media peresapan.

Analisis neraca air infiltrasi dan limpasan

Berdasarkan Tabel 1, 2, dan 3, neraca air sistem dapat dianalisis dengan membagi debit hujan menjadi tiga komponen utama, yaitu limpasan permukaan, infiltrasi tanah, dan tampungan kotak infiltrasi. Pada kondisi tanah jenuh, sebagian besar debit hujan (74,69%) berubah menjadi limpasan, sementara hanya 11,20% yang dapat diinfiltrasikan dan 5,89% yang tertampung di dalam kotak. Pada kondisi tanah tidak jenuh, distribusi debit hujan menjadi lebih seimbang. Limpasan permukaan berkurang menjadi 46,65%, sementara infiltrasi meningkat menjadi 30,43% dan tampungan kotak mencapai 12,78%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kotak infiltrasi bekerja jauh lebih efektif pada kondisi tanah tidak jenuh, baik dalam meningkatkan infiltrasi maupun dalam mengurangi limpasan permukaan. Secara keseluruhan, analisis neraca air ini menunjukkan bahwa efektivitas pengendalian limpasan berbasis infiltrasi sangat bergantung pada kondisi awal tanah. Sistem kotak infiltrasi mampu memberikan kontribusi signifikan dalam mereduksi limpasan apabila didukung oleh kondisi tanah yang masih memiliki kapasitas infiltrasi

Sintesis temuan hidrologis sistem kotak infiltrasi

Sintesis dari Gambar 2 hingga Gambar 4 serta Tabel 1 hingga Tabel 3 menunjukkan adanya keterkaitan yang konsisten antara kondisi awal kelembaban tanah, perilaku limpasan, laju infiltrasi, dan kinerja tampungan kotak infiltrasi. Pada kondisi

tanah jenuh, sistem didominasi oleh limpasan permukaan dengan kontribusi mencapai 74,69%, sementara infiltrasi dan tampungan kotak hanya berperan minor. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi jenuh, fungsi kotak lebih berperan sebagai penunda aliran sesaat dibandingkan sebagai media resapan yang efektif. Pada kondisi tanah tidak jenuh, peran kotak infiltrasi sebagai elemen pengendali limpasan jauh lebih signifikan. Infiltrasi meningkat hingga 30,43% dan tampungan kotak mencapai 12,78%, yang secara keseluruhan mampu mereduksi hampir setengah debit hujan yang masuk. Sintesis ini menegaskan bahwa kotak infiltrasi bekerja optimal sebagai *buffer* hidraulik pada kondisi tanah yang masih memiliki kapasitas resapan. Dengan demikian, temuan utama penelitian ini dapat disintesis menjadi dua kondisi batas kinerja sistem, yaitu (1) kontribusi kondisi optimal pada tanah tidak jenuh, di mana infiltrasi dan tampungan berperan dominan dalam mereduksi limpasan, dan (2) kontribusi saat kondisi kritis pada tanah jenuh, di mana limpasan permukaan tetap mendominasi meskipun telah diterapkan kotak infiltrasi. Sintesis ini menjadi jembatan ilmiah antara hasil pengujian laboratorium dengan rekomendasi teknis penerapan di lapangan.

Implikasi terhadap perencanaan drainase berbasis infiltrasi

Hasil penelitian ini memberikan implikasi penting bagi perencanaan sistem drainase berbasis infiltrasi, khususnya pada median jalan di kawasan perkotaan. Pada kondisi tanah tidak jenuh, kotak infiltrasi terbukti mampu menurunkan limpasan secara signifikan melalui peningkatan infiltrasi (30,43%) dan tampungan sementara (12,78%), sehingga secara total mampu mereduksi limpasan hampir setengah dari debit hujan yang masuk. Pada kondisi tanah jenuh, kinerja sistem menurun drastis dengan dominasi limpasan permukaan mencapai 74,69%, sementara infiltrasi hanya 11,20% dan tampungan kotak 5,89%. Kondisi ini menunjukkan tanah jenuh merupakan skenario batas (*worst case*) dalam perencanaan sistem berbasis infiltrasi. Beberapa upaya menurunkan muka air tanah diperlukan. Berdasarkan temuan tersebut, kotak infiltrasi modular dapat direkomendasikan sebagai salah satu komponen *Low Impact Development* (LID) untuk mitigasi genangan di kawasan perkotaan Indonesia, dengan fungsi utama sebagai prapenahan limpasan (*pre-storage*), pengurang debit puncak (*peak shaving*), serta media resapan lokal yang menyalurkan air ke dalam tanah secara bertahap sesuai kapasitas infiltrasi setempat. utama sebagai prapenahan limpasan sekaligus media resapan lokal. Secara teknis, penerapan kotak infiltrasi direkomendasikan pada area dengan kondisi tanah

dominan tidak jenuh atau memiliki muka air tanah yang relatif dalam, agar efektivitas infiltrasi tetap optimal. Untuk area dengan potensi kejenuhan tinggi, seperti daerah dataran rendah dan kawasan dengan muka air tanah dangkal, diperlukan strategi berupa peningkatan volume tampungan, penambahan jumlah unit kotak infiltrasi, serta integrasi dengan sistem drainase konvensional. Berdasarkan hasil uji ini, kotak infiltrasi belum dapat diandalkan sebagai satu-satunya sistem pengendalian limpasan pada kondisi tanah jenuh ekstrem.

Temuan ini juga relevan untuk wilayah perkotaan beriklim tropis dengan intensitas hujan tinggi, di mana kondisi tanah jenuh sering terjadi. Dengan desain berbasis kinerja hidraulik lokal seperti yang diperoleh dalam penelitian ini, kotak infiltrasi pada median jalan dapat diintegrasikan secara efektif dalam strategi LID untuk mengurangi beban limpasan dan risiko genangan.

Secara teknis, hasil laboratorium ini dapat dijadikan parameter awal desain sebagai berikut: (1) kotak infiltrasi sebaiknya difungsikan untuk menangani limpasan awal (*first flush*) dengan target reduksi limpasan minimum 40–50% dari debit hujan efektif pada kondisi tanah tidak jenuh; (2) pada area dengan dominasi tanah tidak jenuh, jarak antar kotak dapat direncanakan berdasarkan kontribusi infiltrasi sebesar 30% dan tampungan 13% dari debit hujan; (3) pada zona rawan jenuh, kapasitas tampungan perlu ditingkatkan minimal dua kali lipat dari konfigurasi uji laboratorium atau dikombinasikan dengan saluran drainase terbuka; dan (4) sistem kotak infiltrasi lebih efektif berperan sebagai *pre-storage* dan *peak shaving* dibandingkan sebagai satu-satunya pengendali banjir pada kondisi ekstrem. Parameter awal ini bersifat konseptual dan perlu dikalibrasi lebih lanjut melalui uji lapangan sebelum diterapkan secara luas.

Pengembangan sistem infiltrasi di median jalan

Secara umum, tren hubungan antara limpasan, infiltrasi, dan kejenuhan tanah yang diperoleh dalam penelitian ini sejalan dengan teori dasar hidrologi tanah dan hasil-hasil penelitian sebelumnya terkait sistem resapan. Tanah yang tidak jenuh selalu menunjukkan kapasitas infiltrasi yang lebih besar dibandingkan tanah jenuh. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah penyajian hubungan kuantitatif antara limpasan, infiltrasi, dan tampungan kotak dalam skala laboratorium yang merepresentasikan penerapan kotak infiltrasi pada median jalan. Hasil ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan desain sistem infiltrasi yang lebih andal dan aplikatif di lapangan.

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan analisis neraca air sistem, diperoleh beberapa kesimpulan operasional. Pengaruh kondisi tanah terhadap limpasan aliran melalui kotak infiltrasi adalah sebagai berikut: Pada kondisi tanah jenuh, limpasan mencapai 74,69% dari debit hujan, sedangkan pada kondisi tidak jenuh turun menjadi 46,65%. Kapasitas infiltrasi optimal untuk kondisi tanah tidak jenuh. Debit infiltrasi pada tanah tidak jenuh mencapai 0,0332 l/det (30,43%), sekitar 2,7 kali lebih besar dibandingkan kondisi tanah jenuh (0,0122 l/det atau 11,20%). Tampungan dalam kotak infiltrasi berperan sebagai penyangga tambahan. Pada tanah tidak jenuh, tampungan kotak mencapai 12,78% dari debit hujan, sedangkan pada tanah jenuh hanya 5,89%. Kotak infiltrasi efektif sebagai komponen sistem drainase terpadu berbasis LID untuk pengendalian limpasan awal, dengan target reduksi limpasan minimum 40–50% pada kondisi tanah tidak jenuh. Kotak infiltrasi lebih tepat diterapkan sebagai bagian dari sistem drainase terpadu berbasis LID.

Saran penelitian lanjutan

Penelitian lanjutan perlu melakukan pengujian skala lapangan untuk memvalidasi hasil laboratorium pada kondisi hujan alami, variasi intensitas hujan, dan fluktuasi muka air tanah, dan mengkaji kinerja kotak infiltrasi pada berbagai jenis tanah. Selain itu perlu mengevaluasi pengaruh sedimentasi dan penyumbatan pori terhadap penurunan kapasitas infiltrasi kotak dalam jangka waktu operasi yang panjang, dan juga integrasi kotak infiltrasi dengan sistem drainase eksisting.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat DIKTI, Tim BBWS Cimanuk Cisanggarung Cirebon dan Tim Laboratorium Hidrolika Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang dan Universitas Swadaya Gunung Jati Cirebon yang telah bekerjasama untuk realisasi penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Alshammari, E., Rahman, A. A., Rainis, R., Seri, N. A., Fazeera, N., & Fuzi, A. (2023). *The Impacts of Land Use Changes in Urban Hydrology, Runoff and Flooding: A Review*. 120–141. <https://doi.org/10.4236/cus.2023.111007>
- Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., & Zeng, X. (2019). *Storm Water Management of Low Impact*

Development in Urban Areas Based on SWMM. <https://doi.org/10.3390/w11010033>

Basu, A. S., Pilla, F., Sannigrahi, S., Gengembre, R., & Guiland, A. (2021). Theoretical framework to assess green roof performance in mitigating urban flooding as a potential nature-based solution. *Sustainability (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313231>

Ben-Daoud, A. (2022). The use of low impact development technologies in the attenuation of flood flows in an urban area: Settat city (Morocco) as a case. *Environmental Challenges*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100403>

Benda, L., James, C., Miller, D., & Andras, K. (2019). *Road Erosion and Delivery Index (READI): A Model for Evaluating Unpaved Road Erosion and Stream Sediment Delivery*. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12729>

Brugin, M., Marchioni, M., Becciu, G., Giustozzi, F., Toraldo, E., Andrés-valeri, V. C., Brugin, M., Marchioni, M., Becciu, G., & Giustozzi, F. (2017). Clogging potential evaluation of porous mixture surfaces used in permeable pavement systems. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 8189(December), 1–11. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1411834>

Chui, T. F. M., & Trinh, D. H. (2016). Modelling infiltration enhancement in a tropical urban catchment for improved stormwater management. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10926>

Hameed, H. (2017). Estimating the effect of urban growth on annual runoff volume using GIS in the Erbil Sub-Basin of the Kurdistan Region of Iraq. *Hydrology*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology4010012>

Hu, S., Fan, Y., & Zhang, T. (2020). *Assessing the Effect of Land Use Change on Surface Runoff in a Rapidly Urbanized City: A Case Study of the Central Area of Beijing*. 1–15. <https://doi.org/10.3390/land9010017>

Jiang, R., Li, T., Liu, D., Fu, Q., Hou, R., Li, Q., Cui, S., & Li, M. (2021). Soil infiltration characteristics and pore distribution under freezing-thawing conditions. *Cryosphere*, 15(4), 2133–2146. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2133-2021>

Li, C. (2018). Evaluating the hydrologic performance of low impact development scenarios in a micro Urban catchment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph15020273>

- Li, J., Zeng, J., Huang, G., & Chen, W. (2024). Urban Flood Mitigation Strategies with Coupled Gray – Green Measures: A Case Study in Guangzhou City , China. *International Journal of Disaster Risk Science, Lid*.
<https://doi.org/10.1007/s13753-024-00566-6>
- Li, Y. (2020). Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost. *Journal of Flood Risk Management, 13*(3).
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12625>
- Li, Y., Huang, J. J., Hu, M., Yang, H., & Tanaka, K. (2020). Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost. *Journal of Flood Risk Management, 13*(3), 1–15.
<https://doi.org/10.1111/jfr3.12625>
- Lin, J., Uchiyama, S., Bhattacharya, Y., & Nakamura, H. (2023). Efficacy of rain barrels and rain gardens to reduce urban pluvial flooding in densely built - up residential areas : a case study on Miyahara - Cho in Saitama City , Japan. *City and Built Environment, 1*–17.
<https://doi.org/10.1007/s44213-023-00024-x>
- Maglionico, M. (2016). *Soil Air Water. 44*(1).
<https://doi.org/10.1002/clen.201400550>
- Malaviya, P. (2019). Rain gardens as stormwater management tool. In *Sustainable Green Technologies for Environmental Management* (pp. 141–166). https://doi.org/10.1007/978-981-13-2772-8_7
- Myhre, G. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports, 9*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- Peijiang, W., Haifeng, Z., Zhibin, R. E. N., Dan, Z., Chang, Z., Zhixia, M. A. O., & Ze, T. (2018). *Effects of urbanization, soil property and vegetation configuration on soil infiltration of urban forest in Changchun, Northeast China. 28*(2).
- Ragno, E., & Love, C. A. (n.d.). *Quantifying Changes in Future Intensity-Duration-Frequency Curves Using Multi-Model Ensemble Simulations. 1*–38.
- Regimes, M. (2018). *A Review of Permeable Pavement Clogging Investigations and Recommended Maintenance Regimes*.
<https://doi.org/10.3390/w10030337>
- Samouei, S. (2020). *Uncorrected Proof Uncorrected Proof. 1*–15.
- <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.054>
Shrestha, S. (2021). Impact of land use change due to urbanisation on surface runoff using GIS-based SCS–CN method: A case study of Xiamen city, China. *Land, 10*(8).
<https://doi.org/10.3390/land10080839>
- Singh, R., Arya, D. S., Taxak, A. K., & Vojinovic, Z. (2016). Potential Impact of Climate Change on Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves in Roorkee , India. *Water Resources Management*.
<https://doi.org/10.1007/s11269-016-1441-4>
- Sitzenfrei, R., Kleidorfer, M., Bach, P. M., & Bacchin, T. K. (2020). Green infrastructures for urban water system: Balance between cities and nature. *Water (Switzerland), 12*(5), 10–14.
<https://doi.org/10.3390/w12051456>
- Tribhuwana, A., Rohman, F., & Farhan, O. (2021). Analysis of The Carrying Capacity of Urban Drainage Dimensions. *Journal of Green Science and Technology, 1*(1), 11–20.
- Tribhuwana, A., Wahyudi, S. I., & Ni'am, M. F. (2025). *Evaluation of The Effectiveness of Modular Infiltration Boxes in Reduction Surface in Urban Area: A Case Study in Cirebon City Indonesia. 9*(2), 128–138.
- Wahyudi, S. I., Adi, H. P., & Schultz, B. (2017). Revitalizing and preparing drainage operation and maintenance to anticipate climate change in Semarang heritage city. In *J. Environ. Sci. Eng. B*. davidpublisher.com. <http://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/58fec755f0343.pdf>
- Wang, D., Chen, J., Tang, Z., & Zhang, Y. (2024). *Effects of Soil Physical Properties on Soil Infiltration in Forest Ecosystems of Southeast China. 1*–13.
- Wei, L., Yang, M., Li, Z., Shao, J., Li, L., Chen, P., Li, S., & Zhao, R. (2022). Experimental Investigation of Relationship between Infiltration Rate and Soil Moisture under Rainfall Conditions. *Water (Switzerland), 14*(9).
<https://doi.org/10.3390/w14091347>
- Woznicki, A. S. A., Hondula, K. L., & Jarnagin, S. T. (2018). *Effectiveness of landscape-based green infrastructure for stormwater managemen in suburban catchments*.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13144>
- Wu, J., Yang, R., Song, J., & Kong, H. (2018). *Effectiveness of low-impact development for urban inundation risk mitigation under different scenarios : a case study in. 2525*–2536.