BAB 1. PENDAHULUAN

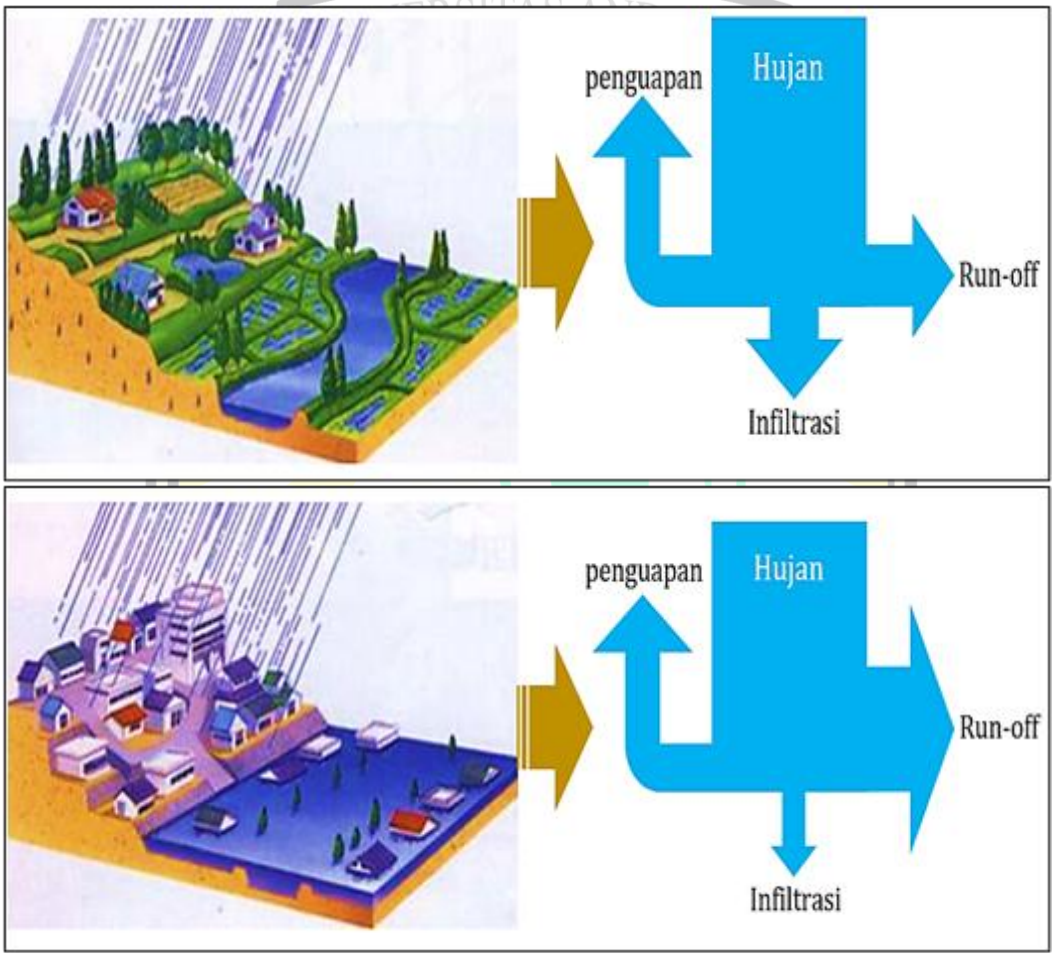
1.1. Latar Belakang

Secara alami, sebagian besar air hujan yang jatuh di permukaan tanah meresap ke dalam tanah melalui proses infiltrasi (Kuma, Feyessa, dan Demissie, 2023; Mgolozeli dkk., 2022). Besarnya infiltrasi dipengaruhi oleh intensitas hujan, kemiringan permukaan tanah, penutup permukaan tanah (vegetasi), kelembaban tanah, dan permeabilitas tanah (ASCE, 1996; Zewide, 2021). Perubahan pada faktor-faktor yang berpengaruh tersebut dapat mempengaruhi tingkat infiltrasi. Faktor permeabilitas tanah dan keberadaan vegetasi sering kali berubah akibat alih fungsi lahan.

Alih fungsi lahan menjadi area permukiman merupakan fenomena yang acapkali terjadi seiring dengan pesatnya perkembangan kota akibat urbanisasi. Dampak dari fenomena ini adalah terjadinya peningkatan permintaan lahan untuk permukiman (Angel, 2023; S. Yang dkk., 2020). Perubahan tata guna lahan dari daerah resapan air hujan menjadi daerah permukiman seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1. dapat mengganggu siklus air pada kawasan tersebut (Almeida dkk., 2018; Basset dkk., 2023; Locatelli dkk., 2017; Szpakowska dkk., 2022; L. Zhang dkk., 2020). Dampak perubahan ini adalah penurunan volume resapan air hujan ke dalam tanah, penurunan kapasitas infiltrasi, dan peningkatan aliran permukaan sehingga dapat menjadi pemicu terjadinya banjir (HAR dkk., 2021; Strohbach dkk., 2019; Xu dkk., 2020). Hal ini terjadi karena parameter tanah di lahan permukiman mengalami perubahan, seperti kepadatan tanah, tekstur tanah, dan porositas tanah (Sun dkk., 2018; Molla, Getnet, dan Mekonnen, 2022; Sun dkk., 2018; Xiao, Wang, dan Fu, 2023)).

Parameter tanah di lahan permukiman mengalami perubahan yang disebabkan oleh aktivitas selama proses pembangunan. Tanah asli diganti dengan tanah timbunan pilihan untuk meningkatkan daya dukungnya,

ditambah lalu lintas alat berat dan pemadatan selama konstruksi. Aktivitas ini dapat memengaruhi struktur tanah, tekstur, distribusi pori, serta ketersediaan air di dalam tanah (Kodikara, Islam, dan Sounthararajah, 2018; Obour dan Ugarte, 2021). Pemadatan tanah tersebut juga menyebabkan perubahan porositas, kapasitas infiltrasi, daya resap tanah, dan kapasitas tampung air tanah sehingga akan mengurangi pengaruh air terhadap tanah, dan memperkecil kemampatannya (*compressibility*) (Cleophas dkk., 2022; Goenaga dkk., 2023; Gregory dkk., 2006; Pitt dkk., 2009).



Gambar 1.1. *Siklus air daerah sebelum pengembangan (USEPA, 2003)*

Dampak perubahan parameter tanah tersebut menghasilkan tekstur tanah yang sulit ditembus air karena nilai porositas menjadi lebih kecil, sehingga menghasilkan kapasitas infiltrasi yang rendah (Yang dan Zhang, 2011). Kondisi ini menyebabkan air hujan yang jatuh di permukaan tanah sebagian besar menjadi aliran permukaan menuju ke saluran drainase dan

selanjutnya mengalir ke sungai. Proses ini terjadi dalam waktu yang singkat, sehingga kapasitas sungai tidak mampu menampung limpasan air ini maka terjadilah genangan banjir di sisi kiri dan kanan sungai (Alaoui dkk., 2018). Dengan hidrograf dapat dijelaskan bahwa kawasan yang telah mengalami pengembangan untuk permukiman, debit puncak cenderung meningkat dan terjadi dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan kondisi sebelum pengembangan untuk permukiman. Akibatnya, nilai debit puncak meningkat dan proses pencapaiannya menjadi lebih cepat.

Penundaan terjadinya aliran permukaan dan penurunan debit puncak dapat dilakukan dengan cara mengurangi volume aliran permukaan (Zhang dan Peralta, 2019). Salah satu upaya untuk mengurangi volume aliran permukaan di daerah perkotaan adalah dengan meningkatkan infiltrasi tanah atau dikenal dengan hydromodifikasi, yaitu dengan membuat infiltrasi buatan (Arvand dkk., 2023; Ghabayen dkk., 2013; Markovič dkk., 2014; Shahzad dkk., 2022; Zaqout, Andradóttir, dan Arnalds, 2022).

Dalam praktiknya, infiltrasi buatan untuk meningkatkan kapasitas infiltrasi dikenal sebagai *recharge wells* (sumur resapan), *infiltration ponds* (kolam infiltrasi), *permeable pavements* (perkerasan berpori), dan *rainwater harvesting* (panen air hujan dengan infiltrasi langsung). Beberapa metode lainnya termasuk biopori, *trenches* (parit infiltrasi), serta *spreading basins* (cekungan penyebaran air) (Pizarro dkk., 2024; García-Ávila dkk., 2023; Hassan dan N.ghazi, 2023; Kayhanian dkk., 2019; Verma dkk., 2019; Triadmojo. B, 2019).

Infiltrasi buatan adalah suatu cara mengelola air hujan dengan menampungnya kemudian diresapkan atau dapat juga dialirkan menggunakan infrastruktur peresapan (Cao dkk., 2021; Wigati, 2020; Sakai Cao dkk., 2004). Secara umum, infiltrasi buatan merupakan suatu proses rekayasa teknologi yang bertujuan untuk mengalirkan air dari permukaan tanah ke dalam lapisan tanah secara terkendali. Teknologi ini dirancang untuk meningkatkan kapasitas infiltrasi alami tanah, sehingga air hujan

dapat meresap ke dalam tanah dan tidak langsung mengalir sebagai limpasan permukaan, yang dapat menyebabkan genangan air atau banjir.

Dalam empat dekade terakhir, berbagai metode dan perangkat infiltrasi buatan telah banyak dikembangkan, khususnya untuk diterapkan di kawasan permukiman perkotaan. Beberapa pendekatan yang umum digunakan antara lain kolam resapan, jaring-jaring pipa drainase, parit infiltrasi, trotoar permeabel, pemanenan air hujan, galeri infiltrasi, sumur resapan, lubang biopori, serta teknik remediasi dan pengolahan tanah. Selain itu, penggunaan bahan organik seperti kompos, pembangunan bendung rendah infiltrasi, penerapan atap hijau, dan sistem bioretensi juga menjadi bagian dari solusi untuk meningkatkan daya serap air di lahan permukiman perkotaan. (Seaburn. GE, 1970; Dune, 1978; Todd dan Mays, 1980; Sunjoto, 1989; Kamir, R.B., 1993; Curtis dan Claassen, 2007); Bartens Cao dkk., 2008; Estes, 2007; Fennessey, Hamlett, dan Ralston, 2009; Kuntjoro, Hadi.P., dan Santoso, 2011; Chahar, Graillot, dan Gaur 2012; Ghabayen Cao dkk., 2013; Olson Cao dkk., 2013; Locatelli Cao dkk., 2015; Jennings dan Baker, 2015; E.Asheefali dkk, 2018; Uddin, 2018; Abu-Zreig, Fujimaki, dan Elbasit, 2020; James Guo, 2020; Fahim Aslam, Habib-ur-Rehman, dan Muhammad Khan, 2021; Kirenda dan Mugume, 2019; Yu Cao dkk., 2022).

Selain berfungsi untuk mengurangi tinggi genangan air akibat banjir, berbagai bentuk alat infiltrasi buatan juga memberikan manfaat penting dalam konservasi air. Teknologi ini memungkinkan air hujan untuk meresap ke dalam tanah dan menjadi cadangan air tanah, sekaligus mengurangi volume aliran permukaan yang dapat menimbulkan erosi maupun pencemaran. Menurut Bambang Triadmojo (2019), penerapan alat infiltrasi buatan dapat menjadi komponen utama dalam strategi pengelolaan sumber daya air secara terpadu, terutama di kawasan permukiman yang rentan terhadap limpasan air hujan. Dengan demikian, penerapan teknologi infiltrasi buatan sangat relevan untuk mendukung perencanaan sistem

drainase yang berkelanjutan, sejalan dengan semangat *New Urban Agenda* dan tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*) tahun 2016–2030 (UNDP, 2015).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji beragam teknologi infiltrasi buatan untuk mengurangi genangan banjir seperti galeri infiltrasi, sumur resapan, bak berpori, parit infiltrasi, dan lubang biopori. Studi-studi tersebut umumnya menunjukkan bahwa teknologi tersebut mampu meningkatkan laju infiltrasi dan mengurangi aliran permukaan. Tetapi, sebagian besar dari penelitian tersebut masih dilakukan pada lahan yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi khas permukiman perkotaan, yaitu tanah yang mengalami pemadatan akibat pembangunan, pergantian tanah timbunan, penutupan lahan oleh perkerasan, lahan terbuka yang sempit. Penelitian ini memposisikan kepada perangkat infiltrasi buatan untuk pengelolaan air hujan skala mikro di kawasan permukiman perkotaan menggunakan teknik yang mudah diterapkan dan ekonomis.

Dalam penelitian ini dikembangkan suatu perangkat infiltrasi buatan yang menggabungkan beberapa fungsi dari alat infiltrasi buatan yang telah ada sebelumnya. Perangkat yang dibuat ini diharapkan dapat menurunkan aliran permukaan di permukiman perkotaan dengan cara meningkatkan kapasitas infiltrasi. Penelitian ini memposisikan pada konsep pengelolaan air hujan dengan skala mikro yang dilakukan di lokasi daerah tangkapan air hujan yang kecil seperti di kawasan permukiman. Desain infiltrasi buatan menggunakan teknologi yang mudah diterapkan, sederhana, materialnya mudah diperoleh, ekonomis, dapat diterapkan pada lahan yang sempit, dan terhubung dengan sistem drainase perkotaan. Untuk mendapatkan perangkat infiltrasi buatan yang sesuai, sebelumnya harus dilakukan kajian tentang kemampuan tanah di lahan permukiman perkotaan dalam meresapkan air hujan melalui proses infiltrasi, yaitu melalui pengukuran laju infiltrasi dan parameter tanah.

1.2. Masalah Penelitian

Permasalahan dalam penelitian ini adalah lapisan tanah permukaan di lahan permukiman perkotaan yang padat sehingga sulit ditembus air (*hydrophobia*). Kondisi ini menghasilkan infiltrasi yang rendah. Infiltrasi yang rendah menyebabkan sebagian besar air hujan yang jatuh di permukaan tanah akan mengalir di permukaan tanah menjadi aliran permukaan. Aliran permukaan yang besar dapat menyebabkan genangan air dan banjir.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan utama (*primary objective*) penelitian ini adalah mengembangkan sebuah perangkat infiltrasi buatan untuk meningkatkan infiltrasi di area permukiman perkotaan. Sedangkan tujuan khususnya (*secondary objectives*) adalah:

1. Menganalisis karakteristik infiltrasi aktual di lahan permukiman perkotaan untuk mendapatkan tingkat laju infiltrasi dan kapasitas infiltrasi.
2. Menganalisis karakteristik parameter tanah di lahan permukiman perkotaan. Karakteristik parameter tanah tersebut adalah kadar air tanah, tekstur tanah, berat isi tanah, porositas tanah, permeabilitas tanah dan keadaan tanah di lapangan.
3. Merancang dan menguji model infiltrasi buatan yang paling sesuai berdasarkan kajian literatur dan data parameter tanah di lahan permukiman perkotaan.
4. Membuat prototipe infiltrasi dan menganalisis kinerjanya yang diaplikasikan di lahan permukiman perkotaan.
5. Menganalisis peningkatan kapasitas infiltrasi dan perlambatan terjadinya aliran permukaan dari penggunaan prototipe infiltrasi.
6. Menganalisis penurunan aliran permukaan (*surface runoff*) dari penggunaan prototipe infiltrasi di lahan permukiman perkotaan.

7. Menganalisis penurunan debit puncak karena penggunaan prototipe infiltrasi buatan di lahan permukiman perkotaan.

1.4. Kontribusi Bagi Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini memberikan kontribusi kebaruan (*novelty*) berupa desain perangkat infiltrasi buatan yang memberikan solusi praktis dan efektif untuk meningkatkan kapasitas infiltrasi serta mengurangi risiko banjir di kawasan perkotaan dengan karakteristik tanah padat. Perangkat ini juga berkontribusi pada perbaikan dinamika hidrologi aliran permukaan, penurunan debit puncak dan berpotensi menjadi model standar baru bagi sistem infiltrasi buatan di wilayah permukiman perkotaan.

1. Kombinasi multifungsi**:** perangkat infiltrasi buatan yang dikembangkan menggabungkan berbagai teknik infiltrasi yang ada, seperti galeri infiltrasi, parit infiltrasi, bak berpori dan sumur resapan, menjadi satu sistem terpadu.
2. Desain modular dan ekonomis: perangkat infiltrasi buatan didesain modular agar dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik di lahan permukiman, menggunakan material yang mudah diperoleh dan biaya yang rendah, sehingga dapat diterapkan secara luas di kawasan perkotaan.
3. Integrasi dengan sistem drainase perkotaan: perangkat ini dirancang untuk terhubung langsung dengan sistem drainase perkotaan, memungkinkan manajemen air hujan yang lebih efektif dan berkelanjutan, sesuai dengan konsep SDGs (*Sustainable Development Goals*).
4. Penerapan pada skala mikro: fokus pada pengelolaan air hujan di lokasi tangkapan air hujan yang kecil, seperti kawasan permukiman, memungkinkan pendekatan yang lebih lokal dan spesifik, memberikan solusi yang lebih tepat guna dibandingkan dengan pendekatan skala besar yang umum.

5. Hasil desain perangkat infiltrasi buatan yang efektif dan inovatif berupa prototipe infiltrasi buatan berbentuk sumur dangkal dengan dimensi spesifik (50 cm × 50 cm × 100 cm) memanfaatkan kombinasi material unik seperti geotekstil non-woven, ijuk, dan split berukuran 2×3 cm. Penggunaan pipa PVC berlubang dengan konfigurasi vertikal dan cabang horizontal menciptakan distribusi air yang optimal, mengurangi konsentrasi aliran dan meningkatkan stabilitas struktur.
6. Satu unit perangkat infiltrasi buatan untuk daerah tangkapan hujan seluas 30 m² mampu meningkatkan kapasitas infiltrasi hingga 11 kali lipat dibandingkan kondisi tanpa alat, menurunkan debit puncak sebesar 48,8%, dan efektif diterapkan pada jenis tekstur tanah *sand, loamy sand dan sandy loam* dengan porositas terbatas. Alat ini juga mengubah dinamika hidrologi aliran permukaan dengan memperlambat awal terjadinya aliran permukaan serta menggeser titik kritisnya

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari hasil penelitian ini adalah:

1. Memberikan data empiris tentang karakteristik tanah dan laju infiltrasi di lahan permukiman perkotaan sebagai referensi untuk penelitian lanjutan di bidang hidrologi dan manajemen air tanah.
2. Menyumbangkan model rancangan perangkat infiltrasi buatan yang inovatif untuk meningkatkan kapasitas infiltrasi tanah secara signifikan, khususnya di wilayah dengan kondisi tanah padat dan permeabilitas rendah.
3. Menurunkan debit puncak dengan cara memperbesar air hujan masuk ke dalam tanah, menurunkan dan menunda terjadinyanya aliran permukaan.

4. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai panduan dalam penerapan teknologi infiltrasi buatan untuk mengurangi risiko genangan air dan banjir di kawasan permukiman perkotaan.
5. Peningkatan kapasitas infiltrasi melalui penggunaan perangkat infiltrasi buatan membantu menjaga keseimbangan siklus hidrologi, meningkatkan cadangan atau isian air tanah, mengurangi aliran permukaan dan sedimentasi.
6. Memberikan panduan desain teknis yang dapat diterapkan di berbagai kondisi lahan, mencakup spesifikasi dimensi, material, dan metode instalasi alat infiltrasi buatan.
7. Menyediakan pendekatan yang dapat diimplementasikan untuk skala individu (kavling) maupun kolektif (kawasan permukiman) dengan hasil yang terukur dalam menurunkan debit puncak dan menunda waktu terjadinya aliran permukaan.
8. Memberikan solusi praktis bagi masyarakat dalam mengelola limpasan air hujan, sehingga mengurangi dampak negatif dengan cara memperpanjang waktu retensi air yang membantu mencegah aliran permukaan langsung dan mendukung konservasi air secara lokal.

1.6. Batasan Penelitian

Beberapa batasan dalam penelitian ini, adalah:

1. Penelitian ini difokuskan kepada upaya pengembangan perangkat infiltrasi buatan untuk diterapkan di lahan permukiman perkotaan yang telah mengalami perubahan sifat fisik tanah.
2. Penelitian tidak mencakup seluruh jenis teknologi infiltrasi buatan yang tersedia, namun berfokus pada pengembangan satu jenis alat infiltrasi buatan skala mikro yang dirancang agar mudah diterapkan, bersifat ekonomis, menggunakan bahan lokal, dan dapat bekerja secara efektif pada lahan sempit serta terkoneksi dengan sistem drainase kota.

3. Kajian difokuskan pada pengukuran laju infiltrasi, karakteristik tanah, dan evaluasi kinerja perangkat infiltrasi buatan melalui eksperimen terbatas di lahan permukiman perkotaan.
4. Lokasi pengambilan data sampel tanah berdasarkan kepada peta lokasi pengembangan permukiman Kota Padang ke arah Timur dan Utara, sesuai dengan Perda no. 4 tahun 2012 tentang rencana tata ruang wilayah Kota Padang tahun 2010-2030 meliputi Kecamatan Koto Tangah, Nanggalo, Pauh, Lubuk Kilangan dan Kuranji.
5. Pengujian sampel tanah (terdiri dari: sifat fisik tanah, porositas, tekstur, kerapatan relatif dan permeabilitas) dan pengujian model alat infiltrasi buatan dilakukan di Laboratorium Mekanika tanah dan Laboratorium Hidro Departemen Teknik Sipil Universitas Negeri Padang.
6. Metode dan tata cara pengujian mengacu kepada kepada standar internasional seperti *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *United States Department of Agriculture* (USDA) dan Standar Nasional Indonesia (SNI) berdasarkan kebutuhan pengujian yang dilakukan.
7. Pembuatan model infiltrasi buatan dengan tujuan sebagai petunjuk awal apakah usulan pengembangan alat infiltrasi buatan dapat digunakan di lapangan.
8. Kajian pengembangan prototipe infiltrasi dengan kriteria desain dan dimensi berdasarkan usulan yang direncanakan tanpa memvariasikan dimensi dan bahan isian sumur.
9. Perangkat infiltrasi buatan dipasang di atas elevasi muka air tanah (lebih dari 2 meter) untuk memastikan kinerja yang optimal, serta berjarak minimal 3 meter dari fondasi rumah untuk mencegah gerusan lokal akibat aliran bawah tanah.
10. Analisis infiltrasi pada permukiman berdasarkan hasil data pengukuran di lapangan menggunakan alat *double ring infiltrometer* dengan mengabaikan faktor fenomena histerisis.