

Rekayasa Injeksi Air Hujan untuk Peningkatan Kuantitas dan Kualitas Air Tanah di D.I. Yogyakarta dengan 3 Model Variasi Injeksi

Agus Maryono^{1,4*}, Pratama Tirza Surya Sembada³, Agus Prasetya², dan Muhammad Sulaiman^{2,4}

¹Magister Teknologi untuk Pengembangan Berkelanjutan, Prodi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana Universitas Gadjah Mada; *e-mail: agusmaryono@ugm.ac.id

²Magister Teknologi untuk Pengembangan Berkelanjutan, Prodi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

³Program Studi Doktorat, Prodi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada

⁴Departemen Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

ABSTRAK

Krisis air tanah di wilayah perkotaan semakin meningkat akibat perubahan iklim, peningkatan kebutuhan air, dan keterbatasan lahan resapan. Injeksi air hujan ke dalam sumur gali merupakan salah satu alternatif konservasi air tanah yang berpotensi diterapkan pada skala rumah tangga. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja hidrologis dan efisiensi injeksi air hujan melalui tiga model alat injeksi, yaitu model atap rendah, atap tinggi, dan model dengan tampungan. Penelitian dilakukan pada lima lokasi sumur gali masyarakat di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Parameter utama yang dianalisis meliputi debit injeksi air hujan, luas atap bangunan, efisiensi injeksi per satuan luas atap, serta implikasinya terhadap stabilitas aliran dan konservasi akuifer dangkal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa debit injeksi air hujan berkisar antara 1,35–3,31 m³/jam dengan nilai rata-rata ±2,5 m³/jam. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa efisiensi injeksi yang dinormalisasi terhadap luas atap bangunan relatif homogen pada seluruh lokasi penelitian, yaitu sekitar 0,053 m³/jam/m², sehingga variasi debit injeksi absolut terutama dipengaruhi oleh luas bidang tangkapan hujan. Perbandingan antar model injeksi menunjukkan bahwa perbedaan kinerja utama tidak terletak pada efisiensi hidrologis, melainkan pada stabilitas aliran, pengendalian kualitas air, dan risiko gangguan akuifer. Penelitian ini menegaskan bahwa injeksi air hujan skala rumah tangga dapat berfungsi sebagai bentuk managed aquifer recharge berbasis komunitas yang efektif dan adaptif untuk kawasan permukiman perkotaan dengan keterbatasan lahan resapan.

Kata kunci: injeksi air hujan; konservasi air tanah; sumur gali; efisiensi hidrologis; managed aquifer recharge

ABSTRACT

Groundwater scarcity in urban areas is increasing due to climate change, rising water demand, and limited infiltration areas. Rainwater injection into dug wells is considered a potential groundwater conservation strategy applicable at the household scale. This study aims to evaluate the hydrological performance and injection efficiency of three rainwater injection models, namely low-roof, high-roof, and storage-based systems. The research was conducted at five community dug wells in Sleman Regency, Special Region of Yogyakarta, Indonesia. The main parameters analyzed include rainwater injection discharge, roof catchment area, injection efficiency per unit roof area, and their implications for flow stability and shallow aquifer conservation. The results show that rainwater injection discharge ranged from 1.35 to 3.31 m³/hour, with an average value of approximately 2.5 m³/hour. Quantitative analysis indicates that injection efficiency normalized by roof area was relatively homogeneous across all sites, with a consistent value of approximately 0.053 m³/hour/m², suggesting that variations in absolute injection discharge were primarily influenced by roof catchment area. Comparative analysis of the three injection models reveals that the main performance differences lie not in hydrological efficiency, but in flow stability, water quality control, and potential risks to aquifer integrity. This study confirms that household-scale rainwater injection can function as a form of community-based managed aquifer recharge, offering an effective and adaptive solution for groundwater conservation in densely populated urban areas with limited infiltration capacity.

Keyword: rainwater injection; groundwater conservation; dug wells; hydrological efficiency; managed aquifer recharge

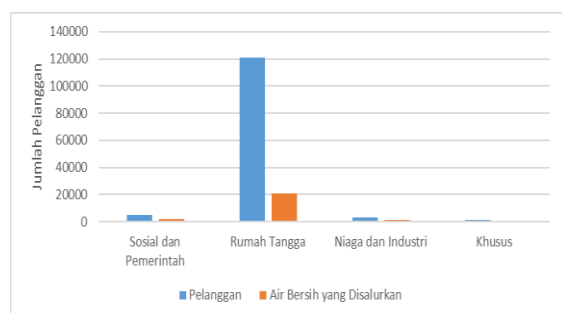
Citation: Maryono, A., Sembada, P. T. S., Prasetya, A., dan Sulaiman, M. (2025). Rekayasa Injeksi Air Hujan untuk Peningkatan Kuantitas dan Kualitas Air Tanah di D.I. Yogyakarta dengan 3 Model Variasi Injeksi. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(6), 1602-1610, doi:10.14710/jil.23.6.1602-1610

1. PENDAHULUAN

Keadaan wabah Covid-19 telah mempengaruhi aspek kehidupan masyarakat, salah satunya adalah kesadaran perlunya aspek perilaku hidup bersih dan sehat (PHBS). Salah satu penerapan PHBS adalah mencuci tangan dengan sabun, dimana hal ini juga menjadi salah satu protokol kesehatan yang disyaratkan di berbagai tempat. Purwanto (2020) menjelaskan peneliti di Inggris menyarankan agar setiap orang mencuci tangan setidaknya 6 sampai 10 kali sehari sebagai salah satu cara untuk mencegah penularan virus corona. Dalam hal ini, apabila diasumsikan kebutuhan air untuk mencuci tangan dalam satu kali cuci tangan adalah 1 liter maka akan ada peningkatan kebutuhan air untuk memenuhi aktivitas mencuci tangan.

Menurut pimpinan Indonesia Water Institute (IWI) Firdaus Ali total konsumsi air rumah tangga sebelum pandemi berkisar 415-615 liter per hari per rumah tangga, mengalami peningkatan setelah pandemi menjadi 995-1.1415 liter per hari per rumah (CNN Indonesia, 2021). Berdasarkan pernyataan tersebut, ketersediaan air bersih yang memadai menjadi prasyarat terwujudnya PHBS. Penggunaan konsumsi air domestik atau rumah tangga pada tahun 2019 sebesar 15,41 m³ per bulan dengan pelanggan yang menggunakan 11,9 juta pelanggan. Kemudian pada tahun 2020 terdapat peningkatan pemakaian menjadi 16 m³ per bulan dengan jumlah pelanggan 13,3 juta pelanggan. Peningkatan kebutuhan air yang setiap tahun terus meningkat menjadikan kebutuhan air tanah yang masih menjadi sumber air prioritas selain air permukaan terus ditekan.

Adapun secara keseluruhan prosentase penggunaan air dalam menyediakan kebutuhan air masyarakat di Daerah Istimewa Yogyakarta terbagi menjadi 66,5% air tanah, 23,5% mata air, 7,3 % sungai, dan 2,7 % waduk. Menelisik dari data BPS pada tahun 2017, sebagian besar pelanggan PDAM di Daerah Istimewa Yogyakarta didominasi oleh sektor rumah tangga sebanyak 153.072 pelanggan, dimana jumlah ini telah mengalami peningkatan 8,82% dibandingkan tahun sebelumnya. Peningkatan ini tidak sepadan dengan jumlah air bersih yang disalurkan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Komposisi Jumlah Pelanggan PDAM dan Air Bersih yang disalurkan Tahun 2017
(Sumber: BPS Statistik Air Bersih D.I Yogyakarta, 2017)

Krisis air bersih juga diperparah dengan peningkatan jumlah penduduk perkotaan terutama di negara-negara berkembang akibat urbanisasi yang cepat, hal ini banyak menciptakan daerah yang kumuh dan minim akses air bersih (Raksanagara dkk., 2017). Hal ini juga sejalan dengan keadaan perilaku pertumbuhan di kawasan Daerah Istimewa Yogyakarta yang menjadi salah satu kawasan dengan perkembangan yang pesat dalam hal pembangunan dan pertumbuhan penduduk karena menjadi lokal destinasi populer bagi wisatawan domestik dan mancanegara. Pemanfaatan dan perkembangan pembangunan di Daerah Istimewa Yogyakarta juga telah menyebabkan terjadinya penurunan kuantitas atau tinggi muka air tanah di wilayah sumur gali masyarakat. Hal ini menyebabkan munculnya anomali perilaku lingkungan yang tidak seimbang dan tidak sejalan lagi dengan karakter musim yang terjadi di wilayah Indonesia. Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki musim kemarau dan musim penghujan. Seiring berjalannya waktu, banyak daerah yang ketika musim kemarau datang mengalami kekeringan sedangkan dikala musim penghujan mengalami banjir. Data BNPB mencatat pada periode 2018-2019 terdapat 1.064 kejadian banjir dan bencana kekeringan yang mencapai 162 kejadian (BNPB, 2019). Oleh sebab itu, perlu adanya perubahan sistem dan inovasi dalam manajemen bencana untuk meminimalkan terjadinya bencana tersebut.

Salah satu cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan ketersediaan air bersih adalah dengan mengoptimalkan potensi sumber daya air hujan dengan sebaik-baiknya. Potensi air hujan di Indonesia adalah dari 2000 mm/tahun sampai dengan 4000 mm/tahun (Maryono, 2016) dan potensi ini tergolong tinggi dibandingkan dengan di negara lain, misal di Eropa rata-rata hanya 1500 mm/tahun. Pemanfaatan air tanah yang terus menerus sepanjang tahun harus diimbangi dengan upaya konservasi, salah satu caranya adalah meresapkan air hujan ke dalam tanah. Selain meresapkan kedalam tanah, air hujan juga dapat diinjeksikan secara langsung kedalam sumur gali warga untuk menjaga keseimbangan tinggi Muka Air Tanah (MAT). Tidak hanya kuantitas, injeksi air hujan secara langsung ke sumur gali warga juga dapat memperbaiki kualitas air dalam sumur tersebut. Penelitian injeksi air hujan sudah dilakukan pada tahun 2018 hingga 2020 dengan hasil kenaikan air tanah pada sumur gali sebesar 9,5 cm dan untuk perubahan kualitas tanah juga menunjukkan perubahan yang lebih baik (Maryono, A. dkk 2022).

Permasalahan dari penelitian ini adalah kebutuhan air domestik masyarakat semakin meningkat yang menyebabkan penggunaan air tanah dan air permukaan terus diupayakan. Hal ini menyebabkan ketersediaan air tanah dan air permukaan terus menurun dan butuh solusi untuk menstabilkan ketersediaan tersebut. Salah satu solusi atas permasalahan tersebut adalah pemanfaatan alat injeksi air hujan. Penelitian ini bertujuan untuk

meningkatkan muka air tanah sekaligus memperbaiki kualitas air tanah menggunakan alat injeksi air hujan.

2. METODE PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian tentang efektivitas metode injeksi air hujan yang diimplementasikan pada sumur masyarakat menggunakan metode eksperimen dengan mengambil sampel sebanyak 5 titik sumur dengan lokasi di Kabupaten Sleman. Titik lokasi sumur berasal dari hasil survey dan observasi lapangan terkait pemanfaatan sumur oleh warga untuk keperluan mandi, mencuci, dan konsumsi. Jumlah penggunaan setiap sumur yang bervariasi ini digunakan sebagai acuan dalam pemilihan titik lokasi sumur.

Memiliki bentuk bangunan yang berbeda-beda, model injeksi air hujan yang diterapkan pada penelitian menggunakan 3 variasi model antara lain: model atap rendah, model atap tinggi, dan model dengan tampungan. Ketiga model ini diuji coba dengan rentan waktu uji coba produk dari bulan Juli hingga Oktober Tahun 2023. Adapun data lokasi sebaran titik sumur pada penelitian ini ada di Tabel 1.

Tabel 1. Lokasi Penelitian

Titik	Lokasi
1	Blok N 21 Perumahan Dosen UGM
2	Blok N 26 Perumahan Dosen UGM
3	Blok F 10 Perumahan Dosen UGM
4	Blok G 11 Perumahan Dosen UGM
5	RT 24 RW 5 Terban

Tahapan dari penelitian ini dibagi menjadi tahapan desain, tahapan pelaksanaan, dan tahapan identifikasi efektivitas model injeksi air hujan dilihat dari beberapa parameter. Parameter yang digunakan meliputi variabel sebagai berikut:

1. Dimensi dari produk injeksi air hujan ($a - m^3$)
2. Besaran luasan tempat untuk penerapan produk injeksi air hujan ($A - m^2$).
3. Waktu optimal selama proses injeksi air hujan ke sumur masyarakat ($t - \text{menit}$).
4. Proses filtrasi pada produk injeksi air hujan (n).

Selain parameter di atas, parameter utama untuk dapat menentukan efektivitas dari penggunaan produk injeksi air hujan adalah potensi air hujan yang dapat diketahui dari analisis siklus hidrologi, besaran luasan atap bangunan, dan karakteristik bentuk bangunan yang dapat diketahui dari proses survey lapangan. Semua parameter ini kemudian diolah dan dianalisis untuk dapat mengetahui besar potensi injeksi air hujan kedalam sumur masyarakat. Kemudian, kualitas air sumur sebelum dan setelah adanya proses injeksi diuji laboratorium dengan menggunakan parameter terbatas dengan standar uji sesuai Peraturan Menteri Kesehatan no 2 tahun 2023 tentang Kesehatan Lingkungan.

2.1. Analisis Potensi Air Hujan

Data tinggi curah hujan (mm) yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan data hasil pengolahan satelit melalui media Jaxa. Penelitian

memanfaatkan data dari tahun 2011 hingga 2022 dengan hasil rata-rata tinggi curah hujan pertahun di D. I. Yogyakarta sebesar 2.541,012 mm/tahun. Karakteristik jumlah curah hujan yang ada di wilayah penelitian sama dengan karakteristik curah hujan secara menyeluruh di wilayah Indonesia, dimana pada Bulan April hingga Oktober mengalami fase musim kemarau dengan hujan yang sedikit, sedangkan di Bulan Oktober hingga Bulan April adalah fase musim hujan dengan tingkat intensitas hujan meningkat.

Analisis tinggi curah hujan harian maksimum (mm) yang didapatkan pada kompilasi data dari tahun 2011 hingga 2022 didapatkan jika tinggi hujan maksimum terjadi pada tahun 2015 dengan curah hujan harian 152,88 mm dan paling rendah terjadi pada tahun 2011 dengan curah hujan harian 13,032 mm. Setelah itu, untuk mengetahui karakteristik dari intensitas hujan digunakan analisis dengan menggunakan metode Log Person Type III untuk mengetahui kala ulang yang kemudian dilanjutkan dengan menggunakan metode Mononobe untuk mengetahui tinggi intensitas curah hujan (mm/jam):

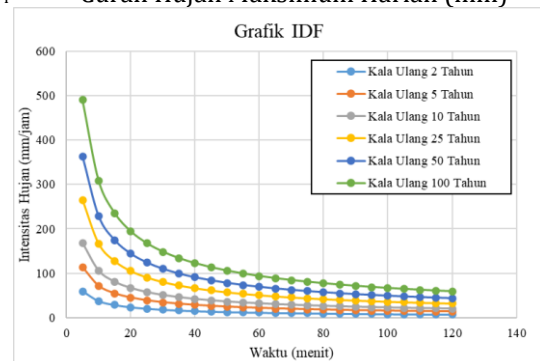
$$I = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{2/3} \quad (1)$$

Dimana:

I = Intensitas Hujan (mm/jam)

t = Lamanya Hujan (jam)

R_{24} = Curah Hujan Maksimum Harian (mm)



Gambar 2. Grafik IDF Intensitas Curah Hujan (mm/jam)

Hasil dari analisis data curah hujan (mm) di atas menunjukkan jika curah hujan harian maksimum dengan analisis frekuensi kala ulang 2 tahun, 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun, dan 100 tahun disajikan pada Tabel 2 yang digunakan untuk menghitung dan menampilkan karakteristik intensitas hujan (mm/jam) yang sudah diolah dengan persamaan 1 dalam bentuk gambar grafik IDF (Gambar 2).

Hasil dari analisis siklus hidrologi ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk mengetahui besaran potensi air hujan yang dapat diolah pada masing-masing titik yang digunakan sebagai lokasi penelitian (Tabel 1). Besaran potensi air hujan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan dari metode rasional (Suyono dan Takeda, 1999 disadur oleh Maryono, 2016) sebagai berikut:

$$V = \alpha \times \beta \times A \times I \times t \quad (2)$$

Dimana:

V = Volume air hujan (m^3)

- α = Koefisien run off (0,9)
 β = Koefisien distribusi hujan (1,0)
 I = Intensitas Hujan (mm/jam)
 A = Luas Penampang Pipa/Atap (m^2)

Tabel 2. Debit Air Hujan yang Terinjeksi

Titik	Lokasi	Intensitas Hujan (mm/jam)	Debit Air Hujan (m^3 /Jam)
1	Blok N 21 Perumahan Dosen UGM	59,49	2,68
2	Blok N 26 Perumahan Dosen UGM	59,49	3,31
3	Blok F 10 Perumahan Dosen UGM	59,49	1,35
4	Blok G 11 Perumahan Dosen UGM	59,49	2,39
5	RT 24 RW 5 Terban	59,49	3,21

Besaran debit air hujan yang masuk menjadi salah satu variabel utama dalam proses injeksi air hujan kedalam sumur. Tahapan berikutnya adalah mengukur perubahan dari tinggi muka air sumur (diambil sampel dari 5 titik lokasi penelitian) dan kualitas air sumur dan air hujan (saat ini masih dalam proses pengujian, bukti terlampir) yang digunakan sebagai data pelengkap dari pelaksanaan penelitian ini. Penerimaan masyarakat terhadap kegiatan penelitian ini sangat baik dibuktikan dengan keikutsertaan masyarakat selama proses pemasangan alat. Di sisi lain, pihak yang terlibat juga mendapatkan berbagai macam masukan dari masyarakat tentang keadaan ketersediaan air sumur pasca kemarau panjang yang terjadi di Tahun 2023. Kemunduran proses pengujian air sumur dan air hujan terjadi akibat dampak kemarau panjang yang terjadi. Tinggi muka air sumur warga turun drastis, sedangkan air hujan baru turun di pertengahan November. Oleh sebab itu, rencana jangka panjang yang dilakukan sebagai bentuk penyempurnaan kegiatan penelitian ini adalah mengukur secara manual dan atomotasi perubahan kuantitas air sumur setelah adanya injeksi air hujan. Selain itu, pengujian air sumur setelah adanya injeksi air hujan juga diukur untuk mengetahui perubahan yang terjadi. Air hujan langsung tanpa melewati media atap dan tampungan memiliki kualitas yang lebih tinggi daripada air hujan yang tersimpan (Handia, L. 2005).

2.2. Besaran Luasan Atap dan Karakteristik Bangunan

Keadaan dari 5 titik lokasi yang disajikan pada tabel diatas memiliki karakteristik bentuk atap yang berbeda-beda, sehingga pengembangan alat injeksi air hujan dengan mengujicobakan 3 model variasi dapat dilakukan guna mencari efektivitas dari masing-masing lokasi. Selanjutnya, masing-masing model alat injeksi tersebut disempurnakan dan akan dikembangkan secara masif untuk membantu gerakan pemulihan muka air tanah yang selama ini semakin turun akibat penggunaan yang terus meningkat, disisi lain lahan-lahan yang digunakan sebagai media resapan air tidak lagi ada dan beralih fungsi menjadi bangunan. Hal ini menjadi konsen utama dari penelitian ini. Data luas atap pada tiap-tiap lokasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Luas Atap Bangunan Lokasi Injeksi

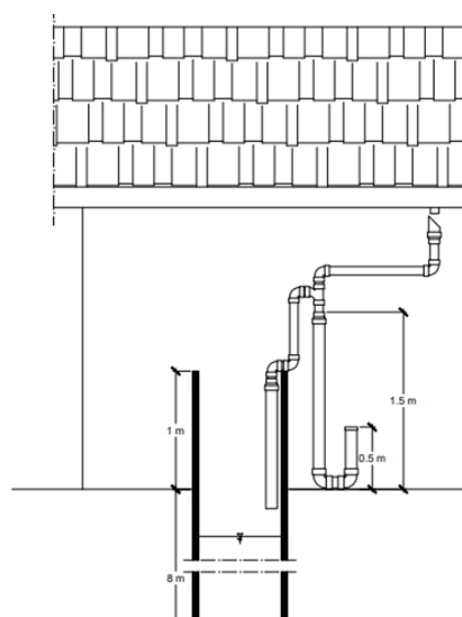
Titik	Lokasi	Luas Atap Bangunan (m^2)
1	Blok N 21 Perumahan Dosen UGM	50,19
2	Blok N 26 Perumahan Dosen UGM	61,97
3	Blok F 10 Perumahan Dosen UGM	25,36
4	Blok G 11 Perumahan Dosen UGM	44,82
5	RT 24 RW 5 Terban	60,12

2.3. Desain Injeksi Air Hujan

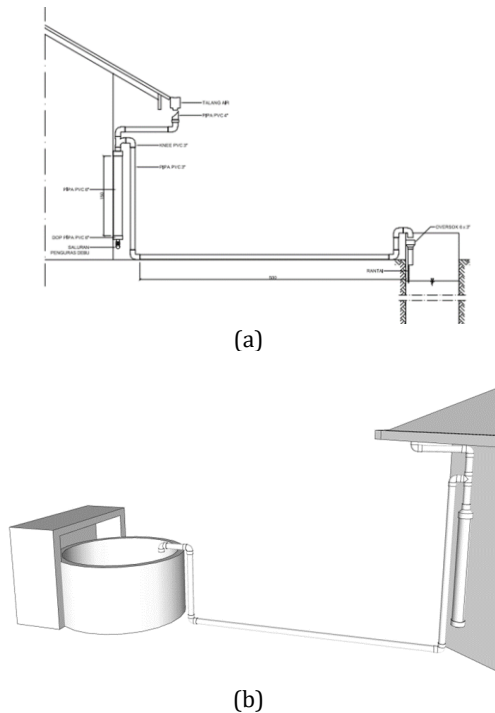
Pengembangan desain model alat injeksi air hujan yang selama ini dikembangkan masih relatif untuk bangunan atap rendah, sehingga belum optimal jika dipasang pada bangunan dengan atap tinggi dan memiliki luasan untuk tampungan air hujan yang kelebihannya langsung dimasukan ke dalam sumur gali milik warga. Pada penelitian ini, pengembangan bentuk model variasi alat injeksi air hujan yang disajikan sudah dapat mengakomodasi bentuk bangunan dengan atap rendah (eksisting), bangunan dengan atap tinggi, dan menggunakan air kelebihan dari tampungan air hujan. Persamaan untuk menghitung efisiensi menggunakan persamaan:

$$\text{Efisiensi Injeksi} = \frac{\text{Debit Injeksi Air Hujan (m}^3/\text{jam)}}{\text{Luas Atap Bangunan (m}^2\text{)}}$$

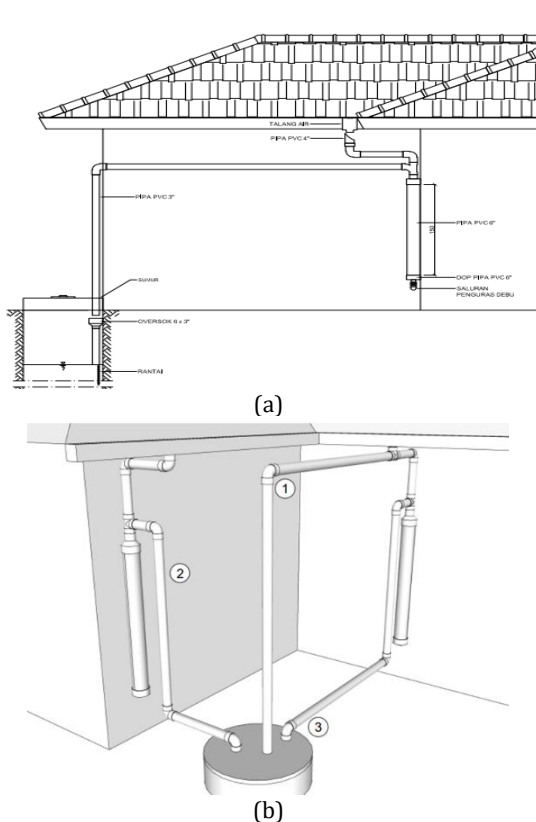
Perbedaan yang signifikan dari desain model alat injeksi berada pada saringan debu kasar, jika memanfaatkan bentuk bangunan dengan atap rendah, maka saringan debu kasar yang digunakan berbentuk U. Hal ini untuk mengoptimalkan debu-debu kasar yang terperangkap seperti yang disajikan pada Gambar 3 di bawah ini. Sedangkan untuk bangunan dengan atap tinggi, saringan debu kasar yang digunakan seperti ukuran dan bentuk yang digunakan pada teknologi Pemanen Air Hujan (PAH) Gama Rainfilter (model kelebihan air hujan yang tertampung langsung masuk ke dalam sumur). Model pengembangan ada pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 3. Model Alat Injeksi Air Hujan dengan Bangunan Atap Rendah



Gambar 4. Model Alat Injeksi Air Hujan dengan Bangunan Atap Tinggi (a) bentuk dalam Gambar 2D dan (b) bentuk dalam Gambar 3D



Gambar 5. Model Alat Injeksi Air Hujan dengan Bangunan Atap Tinggi Kedua (a) bentuk dalam Gambar 2D dan (b) bentuk dalam Gambar 3D

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai efisiensi injeksi air hujan pada seluruh lokasi penelitian berada pada kisaran yang sangat homogen, yaitu sekitar $0,053 \text{ m}^3/\text{jam}/\text{m}^2$. Temuan ini

mengindikasikan bahwa secara hidrologis, kapasitas injeksi per satuan luas atap relatif konsisten, terlepas dari variasi bentuk bangunan dan model injeksi yang digunakan. Dengan kata lain, perbedaan debit injeksi absolut yang teramati antar lokasi terutama dipengaruhi oleh luas atap bangunan, bukan oleh tipe atap semata. Data debit dan efisiensi injeksi air hujan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Debit dan Efisiensi Injeksi Air Hujan

Lokasi	Luas Atap (m^2)	Debit Injeksi (m^3/jam)	Efisiensi ($\text{m}^3/\text{jam}/\text{m}^2$)
Blok N 21 Perumahan Dosen UGM	50,19	2,68	0,0534
Blok N 26 Perumahan Dosen UGM	61,97	3,31	0,05341
Blok F 10 Perumahan Dosen UGM	25,36	1,35	0,05323
Blok G 11 Perumahan Dosen UGM	44,82	2,39	0,05332
RT 24 RW 5 Terban	60,12	3,21	0,05339

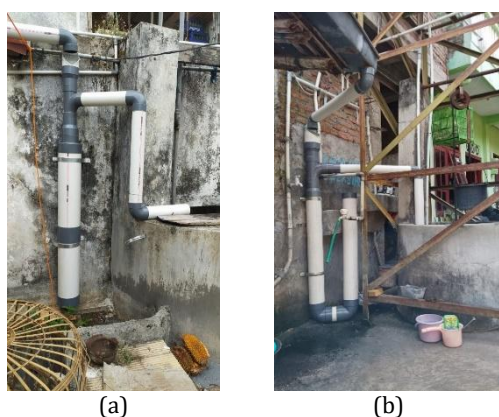
Implikasi dari hasil ini adalah bahwa klaim efektivitas model atap rendah tidak dapat didasarkan pada nilai debit injeksi absolut, melainkan perlu dimaknai sebagai keunggulan operasional, seperti stabilitas aliran, kemudahan pengendalian kualitas air, dan rendahnya risiko sedimentasi. Temuan ini konsisten dengan prinsip metode rasional dan studi managed aquifer recharge yang menekankan bahwa volume limpasan hujan berbanding lurus dengan luas bidang tangkapan, sementara efektivitas injeksi jangka panjang ditentukan oleh kestabilan aliran dan perlindungan akuifer (Maryono, 2016; Dillon & Toze, 2008).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemasangan alat injeksi di 5 titik lokasi penelitian dilakukan sesuai dengan alat dan model yang dibuat berdasarkan desain sebelumnya. Model alat injeksi yang digunakan pada 5 titik lokasi penelitian bervariasi, menyesuaikan keadaan atap (bangunan dengan atap rendah dan atap tinggi). Pengaruh lain yang perlu diperhatikan adalah bahan atap yang digunakan. Perlu diperhatikan untuk atap berbahan baja galvanis, ditemukan lumut yang dapat berdampak buruk pada kualitas fisik, kimia, dan mikrobiologi air hujan (Ju Young Lee, dkk. 2012). Air hujan yang dapat dimasukan ke dalam sumur sebagai media injeksi harus air yang lebih baik daripada air tanah yang ada di lokasi. Lokasi penelitian yang sesuai dengan sajian pada Tabel 1. di atas mengalami sedikit perubahan. Terdapat 1 lokasi yang berubah, dari semula rumah dinas Dekan Sekolah Vokasi menjadi rumah warga di permukiman Kampung Code. Hal ini dikarenakan adanya perubahan fungsi bangunan sehingga dipindahkan ke permukiman agar membantu masyarakat secara edukasi dalam upaya kegiatan konservasi air untuk menjaga tinggi muka air tanah tetap stabil. Proses pengerjaan setiap titik membutuhkan waktu 2-3 hari dengan penyesuaian

kondisi yang ada. Berikut disajikan hasil pemasangan alat injeksi di 5 titik lokasi penelitian.

Perbedaan tipe bangunan atap tinggi dengan atap rendah berada dipemakaian komponen saringan debu kasar. Jika bangunan memiliki atap yang tinggi dari permukaan tanah, desain saringan debu kasar berbentuk memanjang dengan dimensi pipa yang digunakan berukuran 6". Sedangkan jika penerapan alat injeksi ini dilakukan pada bangunan atap rendah, desain saringan debu kasar berbentuk U untuk mendapatkan nilai waktu tunggu mengedap sama seperti pada saat air hujan mengalirkan debu yang terbawa dari atap menuju saringan debu kasar yang memanjang. Hal ini dipilih untuk mengoptimalkan ruang pemasangan alat injeksi air hujan yang minim.



(a) (b)
Gambar 6. Bentuk Injeksi Air Hujan (a) Atap Tinggi dan (b) Atap Rendah yang Terpasang



Gambar 7. Pemasangan Alat Injeksi Air Hujan dengan Tipe Bangunan Atap

Injeksi air hujan ini mampu memberikan asupan air ke dalam tanah rata-rata dari 5 titik yang menjadi titik lokasi penelitian sebesar 2,5 m³/jam. Metode ini merupakan teknologi memanen air hujan yang mudah tanpa harus membutuhkan tampungan. Teknologi sederhana dan murah (Alam, R. dkk. 2012) sering memanfaatkan tangki penyimpanan air hujan, tetapi untuk penelitian ini, air hujan langsung dimasukkan ke dalam sumur. Teknologi lebih sederhana dan murah dibandingkan dengan memanfaatkan tampungan. Kedepan, sebagai bentuk adaptasi perubahan iklim yang berdampak pada menurunnya sumber air, masyarakat dapat mengadopsi teknologi ini.

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan injeksi air hujan pada lima sumur gali masyarakat di Kabupaten Sleman mampu memberikan asupan air ke

akuifer dangkal dengan debit injeksi berkisar antara 1,35–3,31 m³/jam, dengan nilai rata-rata $\pm 2,5$ m³/jam. Menurut Kim *et al.*, (2024) injeksi langsung air permukaan termasuk air hujan ke dalam akuifer merupakan salah satu strategi dalam *managed aquifer recharge* untuk menambah simpanan air tanah di wilayah dengan infiltrasi terbatas. Analisis kuantitatif lebih lanjut menunjukkan bahwa efisiensi injeksi yang dinormalisasi terhadap luas atap bangunan relatif homogen pada seluruh lokasi penelitian, yaitu sekitar 0,053 m³/jam/m². Temuan ini mengindikasikan bahwa variasi debit injeksi absolut terutama dipengaruhi oleh luas bidang tangkapan hujan, sedangkan tipe bangunan dan model injeksi tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap efisiensi hidrologis per satuan luas. Hal ini sejalan dengan dengan studi-studi tentang *managed aquifer recharge* yang menunjukkan bahwa sistem pemanenan air hujan berbasis atap menghasilkan volume air tersedia untuk injeksi secara langsung yang dipengaruhi oleh luas atap sebagai area tangkapan air hujan, sementara variasi dalam desain, sistem atau konfigurasi sumur tidak berdampak signifikan terhadap efisiensinya (Ajur & Baalousha, 2021; Baptista *et al.*, 2023).

Perbandingan tiga model injeksi air hujan (atap rendah, atap tinggi, dan dengan tampungan) menunjukkan bahwa perbedaan kinerja utama terletak pada aspek stabilitas aliran, pengendalian kualitas air, dan risiko gangguan akuifer, bukan pada kapasitas injeksi maksimum. Hal ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh Al-Maktoumi (2025) yang menunjukkan bahwa performa sistem *managed aquifer recharge* dipengaruhi oleh desain dan kondisi operasional yang dapat mempengaruhi stabilitas aliran dan interaksi kimia dengan air tanah sehingga variasi konfigurasi sistem berdampak lebih pada aspek stabilitas dan kualitas daripada total volume yang dapat diinjeksi.

Model atap rendah dan atap tinggi memiliki efisiensi injeksi yang sebanding secara kuantitatif, namun model atap rendah menunjukkan kestabilan aliran yang lebih baik dan risiko sedimentasi yang lebih rendah. Sementara itu, model dengan tampungan unggul dalam perlindungan kualitas air dan keberlanjutan akuifer, namun memerlukan ruang dan biaya investasi yang lebih tinggi serta memiliki respons yang lebih lambat terhadap kejadian hujan.

Berdasarkan temuan tersebut, injeksi air hujan skala rumah tangga dapat diposisikan sebagai bentuk *managed aquifer recharge* (MAR) berbasis komunitas yang efektif untuk kawasan permukiman perkotaan dengan keterbatasan lahan resapan. Dari perspektif kebijakan teknis, penerapan model injeksi langsung tanpa tampungan direkomendasikan untuk permukiman padat dengan luasan atap terbatas, dengan catatan dilengkapi pengendalian kecepatan aliran dan sistem filtrasi awal. Hal ini sejalan dengan studi Amihere-Ackah *et al.*, (2025) yang menegaskan bahwa penerapan *managed aquifer recharge* model injeksi langsung lebih cocok diterapkan di area permukiman padat dengan luasan lahan terbatas

dengan sistem kontrol aliran dan filtrasi untuk menjamin kualitas dan efektivitas. Untuk bangunan bertingkat atau fasilitas dengan luasan atap besar, model injeksi dengan pengaturan head aliran atau tampungan antara direkomendasikan guna menjaga stabilitas aliran dan kualitas air tanah jangka panjang (Page *et al.*, 2018; Sufyan *et al.*, 2024).

Sebagai arah penelitian lanjutan, diperlukan pemantauan jangka menengah hingga panjang terhadap perubahan muka air tanah (ΔMAT) secara kontinu, termasuk pengukuran otomatis berbasis data logger, serta evaluasi kualitas air tanah pasca injeksi secara lebih komprehensif. Selain itu, kajian kuantitatif mengenai kontribusi injeksi air hujan terhadap neraca air tanah skala kawasan dan integrasinya dalam perencanaan konservasi air perkotaan menjadi agenda penting untuk memperkuat peran teknologi ini dalam adaptasi perubahan iklim dan pengelolaan sumber daya air berkelanjutan. Perbedaan model variasi injeksi air hujan disajikan dalam Tabel 5.

Meskipun secara deskriptif model injeksi pada bangunan atap rendah menunjukkan kinerja yang lebih stabil, klaim efektivitasnya perlu ditinjau secara kuantitatif dengan mempertimbangkan variabel pengendali utama, yaitu luas atap bangunan, debit injeksi, dan karakteristik aliran masuk ke sumur. Data penelitian menunjukkan bahwa besaran debit injeksi air hujan yang dihasilkan tidak semata-mata ditentukan oleh tipe atap, melainkan sangat dipengaruhi oleh luasan bidang tangkapan hujan. Hal ini tercermin pada lokasi dengan atap luas ($\geq 60 \text{ m}^2$) yang menghasilkan debit injeksi lebih tinggi, terlepas dari tipe atap yang digunakan.

Untuk menghindari bias interpretasi berbasis nilai absolut debit (m^3/jam), efektivitas model injeksi dianalisis menggunakan indikator efisiensi relatif,

yaitu rasio antara debit injeksi terhadap luas atap bangunan ($\text{m}^3/\text{jam}/\text{m}^2$). Berdasarkan data Tabel 2 dan Tabel 3, lokasi dengan model atap rendah menunjukkan nilai efisiensi injeksi yang relatif lebih homogen dibandingkan model atap tinggi. Variasi debit per satuan luas atap pada model atap rendah berada pada kisaran yang lebih sempit, sedangkan pada model atap tinggi variasinya lebih besar akibat perbedaan kecepatan aliran dan potensi kehilangan energi aliran sebelum masuk ke sumur.

Secara hidraulik, kondisi ini dapat dijelaskan oleh perbedaan head aliran dan kontrol kecepatan masuk (inflow control). Pada model atap tinggi, energi potensial aliran yang lebih besar berpotensi meningkatkan debit sesaat, namun sekaligus meningkatkan risiko turbulensi dan sedimentasi di dalam sumur apabila tidak dilengkapi sistem reduktor yang memadai. Temuan ini sejalan dengan Gould dan McPherson (1987) serta Dillon dan Toze (2008) yang menyatakan bahwa keberhasilan injeksi air hujan ke akuifer dangkal lebih ditentukan oleh stabilitas aliran dan kualitas air masuk, dibandingkan debit maksimum semata.

Dengan demikian, klaim bahwa model atap rendah “lebih efektif” tidak dimaknai sebagai menghasilkan debit injeksi tertinggi secara absolut, melainkan sebagai model dengan efisiensi injeksi yang lebih stabil per satuan luas atap dan risiko gangguan akuifer yang lebih rendah. Dalam konteks konservasi air tanah skala rumah tangga, stabilitas aliran dan kemudahan pengendalian kualitas air merupakan indikator efektivitas yang lebih relevan dibandingkan pencapaian debit puncak. Pendekatan ini konsisten dengan prinsip managed aquifer recharge (MAR) yang menekankan keberlanjutan fungsi akuifer jangka panjang (Dillon & Toze, 2008; USGS, 2016).

Tabel 5. Perbedaan Model Variasi Injeksi Air Hujan

Aspek Pembanding	Model Atap Rendah	Model Atap Tinggi	Model dengan Tampungan
Prinsip kerja hidrologis	Injeksi langsung dengan head aliran rendah dan aliran relatif stabil	Injeksi langsung dengan head aliran tinggi dan kecepatan aliran besar	Injeksi tidak langsung melalui tampungan (buffer)
Debit injeksi absolut (m^3/jam)	Sedang ($\pm 2,3\text{--}2,7$)	Tinggi pada hujan intens (hingga $>3,0$)	Rendah–sedang, tergantung volume tampungan
Efisiensi injeksi per luas atap ($\text{m}^3/\text{jam}/\text{m}^2$)	$\approx 0,053$ (stabil dan homogen)	$\approx 0,053$ (variatif antar kejadian hujan)	Tidak langsung sebanding (dipengaruhi kehilangan tampungan)
Stabilitas aliran masuk ke sumur	Tinggi (aliran terkendali)	Sedang–rendah (potensi turbulensi)	Sangat tinggi (aliran teredam)
Risiko sedimentasi dalam sumur	Rendah	Sedang–tinggi tanpa reduktor aliran	Sangat rendah
Kontrol kualitas air hujan	Terbatas (filter awal sederhana)	Terbatas–sedang	Tinggi (filtrasi dan waktu tinggal)
Respons cepat terhadap hujan	Sangat cepat	Sangat cepat	Lambat–sedang
Kesesuaian untuk lahan terbatas	Sangat sesuai	Sesuai	Kurang sesuai
Kompleksitas teknis & biaya	Rendah	Sedang	Tinggi
Implikasi terhadap keberlanjutan akuifer	Baik (risiko gangguan akuifer rendah)	Perlu kontrol tambahan	Sangat baik
Konteks penerapan optimal	Permukiman padat, skala rumah tangga	Bangunan bertingkat dengan kontrol aliran	Bangunan dengan ruang & investasi cukup

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan injeksi air hujan pada lima sumur gali masyarakat di Kabupaten Sleman mampu memberikan asupan air ke akuifer dangkal dengan debit injeksi berkisar antara 1,35–3,31 m³/jam, dengan nilai rata-rata $\pm 2,5$ m³/jam. Analisis kuantitatif lebih lanjut menunjukkan bahwa efisiensi injeksi yang dinormalisasi terhadap luas atap bangunan relatif homogen pada seluruh lokasi penelitian, yaitu sekitar 0,053 m³/jam/m². Temuan ini mengindikasikan bahwa variasi debit injeksi absolut terutama dipengaruhi oleh luas bidang tangkapan hujan, sedangkan tipe bangunan dan model injeksi tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap efisiensi hidrologis per satuan luas.

Perbandingan tiga model injeksi air hujan (atap rendah, atap tinggi, dan dengan tampungan) menunjukkan bahwa perbedaan kinerja utama terletak pada aspek stabilitas aliran, pengendalian kualitas air, dan risiko gangguan akuifer, bukan pada kapasitas injeksi maksimum. Model atap rendah dan atap tinggi memiliki efisiensi injeksi yang sebanding secara kuantitatif, namun model atap rendah menunjukkan kestabilan aliran yang lebih baik dan risiko sedimentasi yang lebih rendah. Sementara itu, model dengan tampungan unggul dalam perlindungan kualitas air dan keberlanjutan akuifer, namun memerlukan ruang dan biaya investasi yang lebih tinggi serta memiliki respons yang lebih lambat terhadap kejadian hujan.

Berdasarkan temuan tersebut, injeksi air hujan skala rumah tangga dapat diposisikan sebagai bentuk managed aquifer recharge (MAR) berbasis komunitas yang efektif untuk kawasan permukiman perkotaan dengan keterbatasan lahan resapan. Dari perspektif kebijakan teknis, penerapan model injeksi langsung tanpa tampungan direkomendasikan untuk permukiman padat dengan luasan atap terbatas, dengan catatan dilengkapi pengendalian kecepatan aliran dan sistem filtrasi awal. Untuk bangunan bertingkat atau fasilitas dengan luasan atap besar, model injeksi dengan pengaturan head aliran atau tampungan antara direkomendasikan guna menjaga stabilitas aliran dan kualitas air tanah jangka panjang. Sebagai arah penelitian lanjutan, diperlukan pemantauan jangka menengah hingga panjang terhadap perubahan muka air tanah (Δ MAT) secara kontinu, termasuk pengukuran otomatis berbasis data logger, serta evaluasi kualitas air tanah pasca injeksi secara lebih komprehensif. Selain itu, kajian kuantitatif mengenai kontribusi injeksi air hujan terhadap neraca air tanah skala kawasan dan integrasinya dalam perencanaan konservasi air perkotaan menjadi agenda penting untuk memperkuat peran teknologi ini dalam adaptasi perubahan iklim dan pengelolaan sumber daya air berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Sekolah Pascasarjana UGM melalui pendanaan Hibah Penelitian dengan Nomor Kontrak

2150/UNI/SPs/SDM/PT/2023 dan Direktorat Pendidikan Vokasi melalui pendanaan Hibah Penelitian Produk Vokasi dengan Nomor Kontrak 31/SPK/D.D4/PPK.01.APTV/III/2024 yang mendukung selama proses penelitian dan pengembangan produk ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajjur, S. B., & Baalousha, H. M. 2021. A review on implementing managed aquifer recharge in the Middle East and North Africa region: methods, progress and challenges. In *Water International* (Vol. 46, No. 4). <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1889192>
- Al-Maktoumi, A. 2025. A review of factors affecting the performance and impact of managed aquifer recharge projects: Insights from arid regions. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 13(3). <https://doi.org/10.26599/JGSE.2025.9280057>
- Alam, R. Munna, G. Chowdhury, M.A.I. Sarkar, M.S.K.A. Ahmed, M. Rahman, M.T. Jesmin, F. dan Toimoor, M.A. 2012. Feasibility study of rainwater harvesting system in Sylhet City, *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol 184 (1), 573 – 580.
- Amihere-Ackah, P., Monney, I., Okyere, D. C., Adjei, K. A., & Appiah-Adjei, E. K. (2025). Assessing the potential of managed aquifer recharge using rooftop rainwater harvesting with shallow wells in peri-urban communities in Kumasi, Ghana. *Discover Water*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00245-7>
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. 2019. Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI). Jakarta: BNPB
- Badan Pusat Statistik. 2019. Statistik Air Bersih Indonesia. Jakarta: Badan Pusat Statistik
- Bappenas. 2019. Bahas Rapat Program 10 Juta Sambungan Air Minum dalam Rakor Kantor Wakil Presiden.
- Baptista, V. S. G., Coelho, V. H. R., Bertrand, G. F., da Silva, G. B. L., Caicedo, N. O. L., Montenegro, S. M. G. L., Stefan, C., Glass, J., Heim, R., Conrad, A., & Almeida, C. das N. (2023). Rooftop water harvesting for managed aquifer recharge and flood mitigation in tropical cities: Towards a strategy of co-benefit evaluations in João Pessoa, northeast Brazil. *Journal of Environmental Management*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118034>
- CNN, Indonesia. 2021. Studi: Konsumsi Air Bersih Naik 3 Kali Lipat Saat Pandemi. Studi: Konsumsi Air Bersih Naik 3 Kali Lipat Saat Pandemi" selengkapnya di sini: <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20210211175246-92-605397/studi-konsumsi-air-bersih-naik-3-kali-lipat-saat-pandemi>.
- Dillon, P. Toze S. 2008. Managed aquifer recharge: rediscovering nature as a leading edge technology. *Water Science & Technology*, 62 (10), 2338-2345.
- Eroksuz, E., dan Rahman, A. 2010. Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1449-1452
- Gouldm J.E dan H.J McPherson. 1987. Bacteriological Quality of Rainwater in Roof and Groundwater Catchment System in Botswana, *Water International*, (12), 135-138
- Handia, Lubinga. 2005. Operational paper comparative study of rainwater quality in urban Zambia, *Journal of Water Supply: Research and Technology (AQUA)*, Vol 54 (1), 55 – 64
- Ju Young Lee., Gippeum Bak., dan Mooyoung Han. 2011. Quality of roof-harvested rainwater--comparison of

- different roofing materials, *Environmental Pollution*, Vol 162, 422 – 429
- Kim, M. C., Koh, E. H., Koh, C. S., & Park, W. B. (2024). Assessment of the impact of greenhouse rainwater harvesting managed aquifer recharge on the groundwater system in the southern Jeju Island, South Korea: Implication from a numerical modeling approach. *Journal of Hydro-Environment Research*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2024.10.002>
- Lestari, F., Susanto, T., dan Kastamto. 2021. Pemanenan Air Hujan Sebagai Penyediaan Air Bersih Pada Era New Normal di Kelurahan Susunan Baru. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan* 4(2):427-434
- Maryono, A. 2016. *Memanen Air Hujan (Rainwater Harvesting)*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Maryono, A. dkk 2022. The effect of rainwater injection into dug wells on the changing of ground water level in Kusumanegara Region of Yogyakarta City. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 986 (2022), 012057.
- Mori, Kiyotoka. 1999. *Hidrologi untuk Pengairan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Nolde, E. 2007. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, 215(1), 1-11.
- Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J., & Sidhu, J. (2018). Managed aquifer recharge (MAR) in sustainable urban water management. *Water (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/w10030239>
- Purwanto, E. K. 2020. Pembangunan Akses Air Bersih Pasca Krisis Covid-19. *The Indonesia Journal Of Development Planning IV* (2):207-214
- Raksanagara, Ardini S., Ayu M. S., Sari., Yusnita, S. I. 2017. Faktor Yang Memengaruhi Perilaku Penggunaan Air Bersih Pada Masyarakat Kumuh Perkotaan Berdasar Atas Integrated Behavior Model. *MKB* 49(2)
- Sembada, P. T. S., & Maryono, A. (2020). Evaluasi Pola Fluktuasi Air Tanah dengan Metode Injeksi Air Hujan untuk Peningkatan Kuantitas dan Perbaikan Kualitas Aquifer di Kawasan Perkotaan Studi Kasus Permukiman di Jalan Kusumanegara Kota Yogyakarta. *Universitas Gadjah Mada*
- Sufyan, M., Martelli, G., Teatini, P., Cherubini, C., & Goi, D. (2024). Managed Aquifer Recharge for Sustainable Groundwater Management: New Developments, Challenges, and Future Prospects. In *Water (Switzerland)* (Vol. 16, Number 22). <https://doi.org/10.3390/w16223216>
- Usmar. 2006. *Tinjauan Hidrologi Laporan Tugas Akhir Pemanfaatan Air Tanah Untuk Memenuhi Air Irigasi Di Kabupaten Kudus Jawa Tengah. Laporan Tugas Akhir*
- Zaizen, M., Urakawa, T., Matsumoto, Y., & Takai, H. (2000). The collection of rainwater from dome stadiums in Japan. *Urban water*. 1(4), 355-359