

PEMODELAN PEMANENAN AIR HUJAN UNTUK MENDUKUNG KONSEP KAMPUS HIJAU DAN PENGURANGAN RISIKO BANJIR

Darman Ferianto Saragih^{1*}, Samiran¹, Citra Utami¹, Al Qadry², Wiwin Nurzanah³

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Medan,

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan

Jl. Almamater No 1, Padang Bulan, Medan, Indonesia, 20155

³Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UMSU, Medan, Indonesia,

Jl. Kapten Muchtar Basri, Medan Timur, Sumatera Utara, 20238

*)email: darmansaragih@polmed.ac.id

Diterima : 02 Agustus 2023

Direvisi : 04 September 2023

Disetujui : 11 September 2023

Diterbitkan : 30 November 2023

Abstract: High rainfall has two conflicting effects. On the one hand, it is beneficial because it has the potential to be used to replace conventional raw water sources. On the other hand, it creates disadvantages caused by flooding. The purpose of this study is to determine the design of a rainwater harvesting system based on the geometric model of the building and the rain regime in such a way that the collected water can replace the use of groundwater so far while at the same time reducing the urban drainage load. The research methods include literature study, determining analysis parameters, designing a Rainwater Harvesting System (RHS) model, creating a spreadsheet-based application (simulation table) for analysis of the RHS's performance, collecting data, analyzing the RHS model using a simulation table, and making conclusions. The RHS simulation designed for the Polmed campus lecture building produces a tank capacity of 45 m³ with a water-saving efficiency of 25% and an efficiency of reducing peak rain runoff of 67.5%. The RHS analysis table resulting from this study can generally be used to design an RHS.

Keywords : rainwater harvesting, behavioral model, urban drainage, rain regime

Abstrak: Curah hujan yang tinggi mempunyai dua dampak yang saling bertentangan, di satu sisi menguntungkan karena berpotensi digunakan untuk menggantikan sumber air baku konvensional, di sisi lain merugikan karena sering menyebabkan banjir. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan rancangan sistem pemanenan air hujan berdasarkan geometrik gedung model dan rejim hujan sedemikian rupa sehingga air yang dipanen dapat digunakan menggantikan pemakaian air tanah selama ini sekaligus dapat mengurangi beban drainase kota. Langkah-langkah penelitian secara berurutan meliputi studi pustaka, menentukan parameter analisis, merancang model Sistem Pemanenan Air Hujan (SPA), membuat aplikasi berbasis *spreadsheet* (tabel simulasi) untuk analisis kinerja SPAH tersebut, mengumpulkan data, menganalisis model SPAH menggunakan tabel simulasi, dan membuat kesimpulan. Simulasi SPAH yang dirancang untuk gedung kuliah kampus Polmed menghasilkan kapasitas tangki 45 m³ dengan efisiensi penghematan air sebesar 25% dan efisiensi pengurangan puncak limpasan hujan 67,5%. Tabel analisis SPAH hasil penelitian ini secara umum dapat digunakan untuk merancang SPAH.

Kata kunci : Pemanenan air hujan, model perilaku, drainase kota, rejim hujan

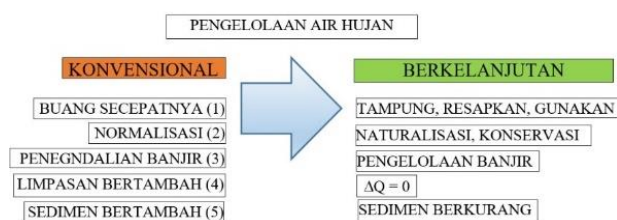
1. PENDAHULUAN

Satu dari tujuh belas tujuan pembangunan berkelanjutan yang diputuskan PBB (Persatuan

Bangsa-Bangsa) tahun 2015 adalah ketersediaan air bersih dan sanitasi [1], dimana salah satu solusinya adalah sistem pemanenan air hujan. Dua kategori

dari *GreenShip Existing Building* [2] dan *UI Green Metrik-Green Campus* [3] yang juga mendukung tujuan PBB tersebut adalah pengembangan tepat guna lahan dan konservasi air. Adapun sasaran dari kedua kategori tersebut antara lain adalah pengurangan beban volume limpasan air hujan dari lahan ke jaringan drainase kota, efisiensi penggunaan air, dan tidak digunakannya air tanah maupun PDAM untuk pemakaian non-air minum. Penggunaan non-air minum yang dimaksud adalah seperti penyiraman toilet, pembersih lantai, dan penyiraman tanaman.

Banjir merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di beberapa wilayah Negara Republik Indonesia, khususnya di perkotaan. Belakangan ini kejadian banjir malah semakin sering terjadi, yang menyebabkan kerugian dalam berbagai bidang, seperti rusaknya harta benda, rusaknya fasilitas umum, gangguan beraktivitas, timbulnya penyakit, dan sebagainya. Penyebab terjadinya banjir terutama adalah curah hujan yang tinggi, minimnya daerah resapan, dan buruknya pengelolaan air hujan atau sistem drainase kota. Berkurangnya daerah resapan karena alih fungsi lahan, yang menyebabkan berkurangnya waktu konsentrasi dan bertambahnya volume limpasan hujan. Sistem drainase kota yang masih menganut paradigma lama, yaitu “mengalirkan/membuang secepat mungkin”, hal mana terbukti gagal dengan makin bertambahnya volume limpasan hujan, sementara upaya penambahan kapasitas saluran drainase sangat dibatasi oleh kepadatan bangunan (urbanisasi). Oleh sebab itu dibutuhkan perubahan paradigma.



Gambar 1. Ilustrasi Perubahan paradigma drainase kota

Pergeseran paradigma tersebut diilustrasikan pada **Gambar 1** [4]. Paradigma lama mengidentifikasi drainase kota sebagai sinonim dengan istilah “normalisasi”, sedangkan paradigma baru identik dengan istilah “naturalisasi” atau “konservasi”. Pengalaman di banyak negara atau kota membuktikan kegagalan konsep “membuang sesegera mungkin” atau “*rapid disposal*” dalam menangani limpasan hujan, sehingga banyak pengelola kota beralih ke konsep “menampung, menyerap, menggunakan,

dan membuang setelah hujan berhenti” [5]. Perubahan paradigma tersebut telah dideklarasikan juga dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum [6].

Semakin padat bangunan maka semakin besar pula volume air hujan yang dibuang secara bersamaan waktunya ke saluran drainase kota, inilah yang menyebabkan saluran drainase yang ada meluap. Apabila setiap persil di perkotaan tidak membuang air hujan dalam waktu yang bersamaan, maka banjir dapat dicegah atau setidaknya dikurangi volumenya. Untuk itu dibutuhkan suatu metode menampung atau memanen air hujan skala persil. Konstruksi baru dibutuhkan pada setiap persil untuk menciptakan/melengkapi bangunan, dimana air hujan dapat ditampung, diresapkan, dan digunakan sedemikian rupa, sehingga tidak membebani saluran drainase kota ($\Delta Q = 0$) yang ada (lihat **Gambar 1**).

Muslim [7] memperkenalkan “GELA” atau Gerakan Lumbung Air, dengan melakukan empat tindakan, yaitu: 1) menampung air hujan, 2) menggunakan air hujan, 3) meresapkan air hujan jika memenuhi syarat, dan 4) membuang sisa air hujan secara perlahan. Semakin banyak bangunan di perkotaan menerapkan keempat langkah di atas, maka kurva debit-durasi dari saluran drainase semakin diperlandai, dengan kata lain mengurangi puncak banjir. Pada skala yang besar, kinerja mitigasi banjir dari sebuah pemanenan air hujan (PAH) sangat berhubungan dengan luas atap. Karena sebagian besar bangunan di perkotaan memiliki atap miring, maka sistem pemanenan air hujan lebih berpotensi dalam mereduksi banjir bila dibandingkan dengan sistem atap hijau atau *green roof* (GR). Instalasi PAH lebih murah dibanding sistem GR dalam mereduksi banjir perkotaan [8]. Kedua referensi di atas membuktikan bahwa pengaplikasian sistem pemanenan air hujan (SPA) mendukung gerakan konservasi air, menghemat pemakaian air, dan dapat mengurangi puncak banjir.

Kinerja SPA ditunjukkan oleh nilai efisiensi penghematan air, yang didefinisikan sebagai jumlah total penggunaan air dibagi jumlah total kebutuhan air selama periode simulasi dikalikan dengan 100 % [9]. Jadi secara teoritis, ukuran tangki yang optimal adalah yang menghasilkan efisiensi paling besar. Untuk mengevaluasi efisiensi retensi dan pengurangan puncak limpasan hujan, dua besaran berikut ini perlu dihitung untuk setiap interval waktu simulasi. Besaran pertama yaitu jumlah air hujan yang ditahan oleh SPA, dan jumlah air hujan yang dibuang ke saluran drainase kota [10]. Sejumlah studi telah dipublikasikan dengan tujuan mendimensi tangki PAH yang optimum untuk bangunan gedung di perkotaan, baik dari sisi keefektifan pelayanan

tangki (algoritma operasional tangki) maupun dari sisi kelayakan ekonomi.

Latham [11] menggunakan beberapa metode analisis untuk mendimensi tangki SPAH di Ottawa (Canada) dan menemukan bahwa analisis perilaku (*behaviour model*) adalah metode paling fleksibel dan interval waktu simulasi harian lebih akurat/moderat dibanding bulanan. Fewkes dan Butler [12] mensimulasikan kinerja model perilaku untuk mendimensi tangki SPAH menggunakan data hujan dari satu lokasi di Inggris dan menyimpulkan bahwa metode *YAS* (*Yield After Spillage*) dgn interval satu hari cocok utk fraksi penyimpanan (FP) antara 0,01 s.d 0,125. FP sama dengan volume tangki (m^3) dibagi oleh hasil kali luas (m^2) atap dengan curah hujan tahunan (m). Metode *YAS* lebih disukai, dibanding metode *YBS* (*Yield Before Spillage*), karena memberikan estimasi yang konservatif terlepas dari interval waktu simulasi yang digunakan. Fewkes [9] menggunakan model perilaku *YAS* dengan data hujan dari lima lokasi di Inggris, dengan menerapkan penggunaan air hujan untuk WC (30 % dari kebutuhan air minum di UK) secara konstan. Dia menyimpulkan bahwa waktu simulasi harian bisa digunakan untuk memprediksi kinerja semua SPAH yang memiliki nilai FP lebih besar atau sama dengan 0,01. Mitchell [13] menginvestigasi pengaruh waktu simulasi (4 jenis: 6 menit s.d. 1 hari), pendekatan model (2 jenis: *YAS* dan *YBS*), volume inisial tampungan (2 kondisi: kosong dan penuh), dan lama periode simulasi (3 jenis: 50, 20, dan 10 tahun) terhadap akurasi hasil analisis SPAH menggunakan data curah hujan dari tiga lokasi di Australia. Dia menyimpulkan bahwa aturan operasional *YAS* lebih akurat dibanding aturan *YBS*, terlepas dari interval waktu simulasi. Interval waktu 1 hari sesuai digunakan untuk data hujan harian, sehingga analisis berbasis spreadsheet dapat diterima untuk sebagian besar kasus. Marwoto et.al. [14] mendimensi tangki PAH (tanpa simulasi) untuk warga Desa Duren Sari di Purworejo menggunakan data hujan 10 tahun dari 3 stasion. Berdasarkan analisis suplai dan kebutuhan bulanan diperoleh dimensi tangki $64 m^3$ atau setara dengan 4 % kebutuhan air warga. Marselina et.al. [15] menggunakan data hujan selama satu tahun (tahun 2018) untuk menentukan kapasitas PAH (tanpa simulasi) yang dibutuhkan untuk menutupi kekurangan air daerah Kelurahan Leuwigajah, Cimahi. Volume tangki PAH hasil perhitungan relatif besar yaitu $125 m^3$. Carollo et.al. [10] menganalisis potensi konsumsi air minum dari SPAH di Kota Turin, Italia, menggunakan modifikasi model perilaku, untuk tiga scenario yaitu: 1) Semua rumah tinggal pakai SPAH untuk non-air

minum, 2) Sebagian rumah tinggal dan tangki umum untuk irigasi Ruang Terbuka Hijau, 3) Sebagian rumah tinggal dan tangki umum pembersih jalan. Kebutuhan air non-minum untuk keperluan rumah tangga adalah yang terbesar dari tiga pertimbangan kegunaan dan, pada skala kota, air hujan hanya dapat menggantikan 42% dari ini, yang setara dengan 15% dari total kebutuhan air rumah tangga. Istchuk and Ghisi [16] menganalisis kelayakan finansial dari SPAH untuk dua skema distribusi air hujan (secara gravitasi dan dengan pompa) pada rumah keluarga tunggal di Maringa, Brazil. Dari 54 skenario, 66 % dinyatakan layak. Secara finansial, kedua skema distribusi air hujan tidak berbeda secara signifikan. Sistem PAH dengan konsumsi air hujan yang semakin tinggi dinilai semakin layak secara ekonomi.

Dari studi literatur di atas dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut. Pertama, kinerja SPAH dipengaruhi terutama oleh geometri atap gedung, kebutuhan penghuni, dan data/rejim curah hujan di lokasi yang ditinjau. Kedua, studi kinerja SPAH di luar negeri telah menerapkan algoritma (khususnya model perilaku) yang dijalankan dalam program komputer khusus, sehingga relatif sulit diperoleh dan dipelajari. Dan yang ketiga, studi serupa di Indonesia sejauh ini masih sangat jarang dilakukan.

Berdasarkan latar belakang di atas maka rumusan masalah dalam studi ini adalah: Bagaimana membuat sistem pemanenan air hujan untuk mendukung kampus hijau (penghematan air) dan mengurangi ancaman banjir banjir (pengurangan puncak limpasan hujan) di wilayah perkotaan, dimana air hujan yang dipanen dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan non-air minum.

Sehubungan rumusan masalah di atas berikut ini adalah batasan-batasan yang diberlakukan:

- 1) Air hujan yang dipanen adalah limpasan dari hujan yang jatuh pada sebuah gedung model;
- 2) Data curah hujan yang digunakan adalah curah hujan harian untuk 10 tahun terakhir (2013 s.d. 2022);
- 3) Pendekatan algoritma analisis dimensi tangki menggunakan model perilaku atau *behavioral model*, dengan interval waktu simulasi satu hari;
- 4) Pengolahan air hujan hanya yang sederhana saja, karena akan digunakan untuk kebutuhan non-air minum, namun tidak dibahas dalam artikel ini.

Adapun tujuan penelitian dalam hal ini adalah:

- 1) Merancang sistem pemanenan air hujan (SPAH) sesuai dengan kondisi sebuah gedung model;
- 2) Menentukan model matematik (algoritma) untuk analisis kinerja tangki SPAH;

- 3) Membuat aplikasi algoritma perancangan tangki SPAH berbasis spreadsheet, yang disebut “Tabel Analisis Kikerja SPAH” (TAK-SPAH);
- 4) Menganalisis SPAH menggunakan hasil pemodelan di atas (aplikasi TAK-SPAH).

Beberapa manfaat dari hasil penelitian ini antara lain adalah:

- 1) Lebih mengenalkan potensi SPAH untuk menuju kota berkelanjutan, khususnya dalam hal penghematan air dan pengurangan puncak banjir;
- 2) Memberikan contoh aplikasi analisis kinerja SPAH berbasis pengolahan data (*spreadsheet*) untuk pendimensian tangki, yang dapat dan mudah diterapkan di seluruh Indonesia;
- 3) Sebagai masukan bagi pengampu keputusan di kota-kota yang kekurangan sumber air baku atau sering mengalami banjir.

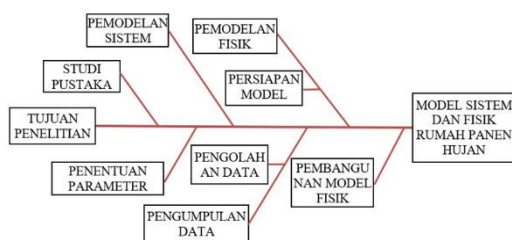
2. METODE PENELITIAN

Adapun lokasi model fisik SPAH yang akan dibangun ditunjukkan pada **Gambar 2** di bawah ini.



Gambar 2. Lokasi pemodelan fisik SPAH di kampus Polmed

Tahapan-tahapan penelitian ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Diagram Metodologi Penelitian

Sesuai tujuan penelitian, yaitu menciptakan model sistem pemanenan air hujan, maka langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut.

Parameter Penelitian

Menentukan parameter penelitian, terutama untuk menentukan data apa saja yang perlu dikumpulkan. Parameter penelitian yang dilibatkan dalam model analisis diberikan pada **Tabel 1**.

Nilai koefisien limpasan hujan dan tinggi hujan untuk pembersih atap diambil berturut-turut sebesar 80% dan 1 mm [10]. Luas bidang atap gedung model, sesuai hasil pengukuran yaitu $24 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 1200 \text{ m}^2$. Jumlah penghuni/pengguna gedung model diambil 250 orang, dengan perincian 225 orang mahasiswa serta 25 orang pegawai administrasi dan dosen. Untuk sekali penyiraman kloset dibutuhkan air sebanyak 6 liter, dimana setiap pengguna gedung diperkirakan memakai WC rata-rata 3 kali (selama sehari perkuliahan). Setelah ditambahkan 2 liter untuk cuci tangan, maka kebutuhan air non-minum ditetapkan sebesar 20 liter/orang/hari. Ukuran volume tangki SPAH sebenarnya dapat disimulasikan dengan kelipatan 1 m^3 , namun untuk alasan efisiensi waktu dalam studi ini diambil kelipatan 5 m^3 . Data curah hujan harian selama 10 tahun atau sama dengan 120 bulan tidak ditampilkan pada artikel ini, dengan alasan penghematan tempat.

Pemodelan Sistem Pemanenan Air Hujan

Pemodelan sistem pemanenan air hujan, yaitu untuk menentukan komponen-komponen apa saja yang termasuk ke dalam sistem tersebut, misalnya input sistem, dari mana air hujan ditampung, ke mana saja didistribusikan, dan luaran dari sistem itu sendiri.

Model yang digunakan terdiri dari model sistem (model matematik) dan model fisik (tidak dibahas dalam artikel ini). Dengan model sistem ini masyarakat calon pengguna dapat dengan mudah mensimulasikan fasilitas SPAH pada persil yang mereka miliki, jika akan membangun rumah atau bangunan tertentu.

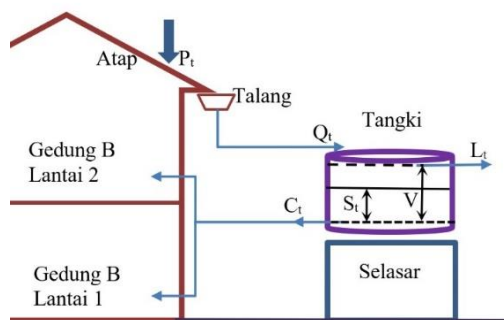
SPAH (diilustrasikan pada **Gambar 4**) yang diterapkan dalam penelitian ini dimodelkan mengikuti apa yang disebut pemodelan perilaku. Curah hujan yang jatuh di atap gedung selama interval waktu simulasi t (P_t dalam mm) mengumpul ke talang datar, selanjutnya melalui pipa vertikal dan pipa horizontal, volume air (Q_t dalam liter) akan masuk ke dalam tangki penampungan air hujan (TPAH) yang memiliki kapasitas V . Pada selama waktu interval, tangki akan mengeluarkan volume air (C_t) untuk pemakaian di gedung model (gedung B lantai 1 dan 2).

Pendistribusian air dari TPAH ke dalam fasilitas dalam gedung model dilakukan dengan cara menyambungkan pipa keluar TPAH ke jaringan pipa

yang lama (pipa masuk gedung), yaitu pada titik setelah katub (stop kran). Pada ujung pipa keluar TPAH, yaitu sebelum titik sambungan dengan pipa masuk gedung, dipasang juga stop kran. Jika air dari TPAH tidak mencukupi, maka pipa yang dari TPAH ditutup sedangkan pipa masuk yang lama dibuka, demikian sebaliknya.

Tabel 1 Data input untuk TAK-SPAH

N o	Parameter	Nilai input	Satuan
1	Koefisien limpasan hujan pada atap	80	%
2	Luas bidang atap (tangkapan hujan)	1200	m ²
3	Jumlah penghuni/pengguna	250	orang
4	Kebutuhan air non-air minum	20	l/orang/hari
5	Tinggi hujan untuk perbersih atap	1	mm
6	Ukuran volume tangki SPAH	5 s.d 100 (dengan interval 5)	m ³
7	Curah hujan harian kota Medan (10 tahun atau 120 bulan)	(Data tidak ditampilkan)	mm



Gambar 4. Ilustrasi Sistem Pemanenan Air Hujan (SPA)

Pada akhir interval waktu simulasi t , akan ada dua kemungkinan kondisi jumlah air dalam tangki (S_t), yaitu:

- 1) Air penuh ($S_t = V$), terjadi bila volume air dalam tangki pada akhir interval waktu $t-1$ (S_{t-1}) ditambah Q_t dan dikurangkan dengan C_t , lebih besar dari atau sama dengan kapasitas tangki (V);
- 2) Air tidak penuh ($S_t < V$), ini terjadi bila volume

air dalam tangki pada akhir interval waktu $t-1$ (S_{t-1}) ditambah Q_t dan dikurangkan dengan C_t , lebih kecil dari kapasitas tangki (V).

Jika volume air dalam tangki pada akhir interval waktu $t-1$ (S_{t-1}) ditambah Q_t dan dikurangkan dengan C_t , lebih besar dari kapasitas tangki (V), maka akan ada limpahan tangki sebesar L_t (lihat rumus 7).

Dalam penelitian ini diterapkan metode pemodelan perilaku (*behavioral model*) yang terdiri dari dua jenis pendekatan, sebagai berikut [9], [13], [17]. Yang pertama disebut pendekatan *YAS (Yield After Spillage)* dimana tangki memberikan hasil (mengeluarkan air untuk penggunaan) setelah lebih dahulu ada limpahan, dengan menerapkan persamaan 1 dan 2. Yang kedua disebut pendekatan *YBS (Yield Before Spillage)* dimana tangki memberikan hasil (mengeluarkan air untuk penggunaan) sebelum ada limpahan, dengan menerapkan **Persamaan 1** dan **Persamaan 3**.

$$C_t = \min \left\{ \begin{matrix} d_p * D_t * n \\ S_{t-1} + Q_t \end{matrix} \right. \quad (1)$$

$$S_t = \min \left\{ \begin{matrix} S_{t-1} + Q_t - C_t \\ V - C_t \end{matrix} \right. \quad (2)$$

$$S_t = \min \left\{ \begin{matrix} S_{t-1} + Q_t - C_t \\ V \end{matrix} \right. \quad (3)$$

Dimana:

C_t = volume air yang dikonsumsi selama waktu t (liter)

d_p = nilai persentase dari kebutuhan air standard D_t (%)

D_t = kebutuhan air standard (dari sumber air tanah atau PDAM) selama waktu t (liter/orang/hari)

n = jumlah orang (pengguna) pada bangunan yang ditinjau

S_{t-1} = volume air sisa pada akhir waktu $t-1$ (liter)

Q_t = volume air yang masuk tangki selama waktu t (liter)

S_t = volume air sisa pada akhir waktu t (liter)

V = kapasitas tangki

t = waktu periode simulasi (hari)

Persamaan 1 dapat dijelaskan sebagai berikut. Untuk kedua pendekatan (*YAS* atau *YBS*) di atas, volume air yang dikonsumsi selama waktu t (C_t) adalah sama dengan yang terkecil dari pada dua kondisi di bawah ini:

- 1) Jika air yang tersedia dalam tangki mencukupi:
 $C_t = d_p * D_t * n$
- 2) Jika air yang tersedia dalam tangki tidak

mencukupi: $C_t = S_{t-1} + Q_t$

Fewkes dan Butler [12] menunjukkan bahwa untuk tujuan disain, algoritma operasi tangki YAS lebih disukai, karena memberikan estimasi yang konservatif, tidak bergantung pada waktu interval pemodelan. Volume air yang tersisa pada setiap akhir periode t , jika menerapkan pendekatan YAS, adalah yang terkecil dari dua kondisi di bawah ini (lihat **Persamaan 2**):

- 1) Untuk tangki yang besar (kapasitas tangki lebih besar atau sama dengan volume air dalam tangki pada akhir periode sebelumnya ditambah volume air masuk tangki pada periode waktu t), sama dengan volume air dalam tangki pada akhir periode $t-1$ ditambah volume air yang masuk tangki selama waktu t dikurang volume air yang dikonsumsi selama waktu t : $S_t = Q_t + S_{t-1} - C_t$
- 2) Untuk tangki yang kecil (kapasitas tangki lebih kecil dari volume air sisa pada akhir waktu $t-1$ ditambah volume air yang masuk tangki selama waktu t), sama dengan kapasitas tangki dikurang volume air yang dikonsumsi selama waktu t : $S_t = V - C_t$.

Jika terjadi bahwa nilai terkecil dari kedua keadaan di atas lebih kecil dari nol (bertanda negatif), maka nilainya dianggap sama dengan nol. Untuk itu **Persamaan 2** disempurnakan menjadi **Persamaan 4** [17].

$$S_t \max \begin{cases} 0 \\ \min \left\{ Q_t + S_{t-1} - C_t, V - C_t \right\} \end{cases} \quad (4)$$

Volume air yang masuk ke dalam tangki selama waktu t (liter) pada rumus-rumus di atas dihitung dengan **Persamaan 5** dan **Persamaan 6**.

$$Q_t = C_p * A * P_t - Pa_t \quad (5)$$

$$Pa_t = A * H_{pa} \quad (6)$$

Dimana:

C_p = koefisien limpasan permukaan atap

A = luas atap yang diperhitungkan (m^2)

P_t = tinggi curah hujan selama waktu t (mm)

Pa_t = pengurangan volume untuk pembersih atap

H_{pa} = tinggi hujan yang diasumsikan untuk pembersih atap (mm)

Limpahan tangki akan terjadi jika volumenya lebih kecil dari jumlah total volume air sisa pada periode sebelumnya ditambah volume air masuk dan dikurang volume pemakaian air pada periode yang ditinjau, seperti dituliskan pada **Persamaan 7**.

$$L_t = \max \left\{ S_{t-1} + Q_t - C_t - V, 0 \right\} \quad (7)$$

Pengumpulan, Pengolahan, dan Analisis Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder dan data primer. Data sekunder yaitu data curah hujan, diperoleh dari instansi Kantor BMKG setempat. Data primer berupa geometrik gedung model diambil dengan mengukur langsung di lapangan. Analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak pengolah data (spreadsheet) Excel. Model matematik untuk analisis SPAH disusun dalam bentuk tabel-tabel di lembar kerja Excel, dimana simulasi akan diaktifkan menggunakan perintah-perintah Excel. Setelah disimulasi, maka dua besaran efisiensi SPAH dapat dihitung, pertama efisiensi penghematan air (**Persamaan 8**) [9] dan yang kedua efisiensi pengurangan puncak limpasan hujan (**Persamaan 9**) [10].

$$E_{pa} = \frac{\sum_{t=1}^T C_t}{\sum_{t=1}^T D_t} * 100\% \quad (8)$$

$$E_{pl} = 100\% \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^T (L_t + Pa_t)}{\sum_{t=1}^T (C_p * A * P_t)} \right) \quad (9)$$

Seluruh algoritma analisis model perilaku untuk menentukan kinerja tangki SPAH tersebut telah dituangkan dalam bentuk rumus-rumus ke dalam sel-sel tabel pengolah data, seperti ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Ilustrasi Analisis Kinerja Tangki SPAH menggunakan model perilaku, dalam bentuk Tabel-spreadsheet

Tgl	P_t (mm)	Q_t (liter)	L_t (liter)	C_t (liter)	S_t (liter)
0					
1					
2					
3					
...					
31					
Total					

Tabel 2 mengilustrasikan susunan kolom dan baris untuk menghitung besaran-besaran dalam algoritma model perilaku berdasarkan rumus-rumus tersebut di atas.

3. HASIL PEMBAHASAN

Aplikasi Model SPAH

Model SPAH (lihat **Gambar 4** dan uraian

terkait) telah dikonversi menjadi model matematik (menggunakan **Persamaan 1** sampai **Persamaan 9**) yang kemudian dikemas dalam sebuah tabel, yang disebut “Tabel Analisis Kinerja SPAH” (disingkat dengan TAK-SPAH). Tabel inilah yang merupakan hasil utama dari penelitian ini. Tabel yang diciptakan ini kemudian diaplikasikan untuk menganalisis kinerja sebuah SPAH. Nilai-nilai data untuk input pada TAK-SPAH (lihat kolom ke-3 dari Tabel 1) dapat diubah-ubah (disimulasikan) sesuai scenario analisis yang diinginkan. Khusus untuk artikel ini dipilih skenario seperti pada **Tabel 1**.

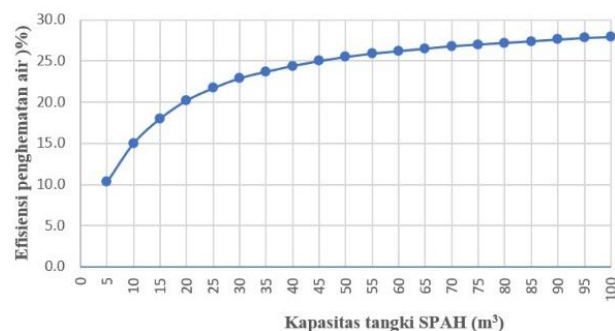
Data analisis yang diberikan pada **Tabel 1** telah diinput ke dalam TAK-SPAH sesuai pemodelan SPAH di atas, dimana hasil-hasilnya adalah sebagai berikut. Sesuai tujuan penelitian ini, maka dua jenis kinerja SPAH yang dimodelkan telah diperoleh. Hasil simulasi dengan tabel *spreadsheet* (TAK-SPAH) yang dirancang khusus untuk mendimensi tangki SPAH dalam penelitian ini dipresentasikan pada **Tabel 3**.

Duapuluh skenario ukuran tangki (dari 5 s.d. 100 m³) masing-masing menghasilkan nilai efisiensi penghematan air (E-pa) dan pengurangan puncak limpasan hujan (E-pl).

Hubungan antara kapasitas tangki dengan efisiensi penghematan air ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Tabel 3. Hubungan kapasitas tangki SPAH (V) dengan Efisiensi penghematan air (E-pa) dan Efisiensi pengurangan puncak limpasan hujan (E-pl)

V (m ³)	E- pa (%)	E-pl (%)	V (m ³)	E- pa (%)	E-pl (%)
5	10.3	42.9	55	25.9	69.0
10	15.0	50.5	60	26.2	69.5
15	18.0	55.4	65	26.5	70.1
20	20.2	59.1	70	26.8	70.6
25	21.7	61.9	75	27.0	71.0
30	22.9	63.9	80	27.2	71.4
35	23.7	65.4	85	27.4	71.8
40	24.4	66.6	90	27.6	72.1
45	25.0	67.5	95	27.8	72.4
50	25.5	68.3	100	27.9	72.7



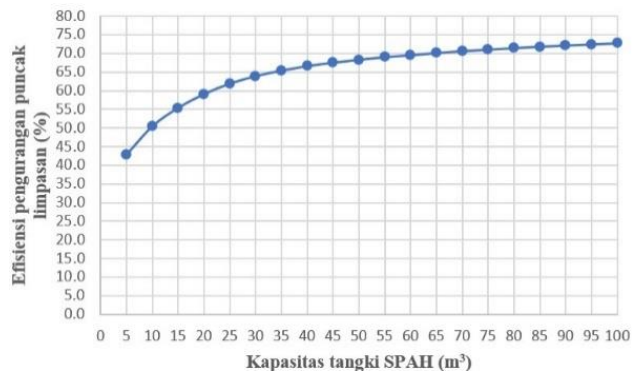
Gambar 5. Grafik efisiensi penghematan air

Berdasarkan **Tabel 3** yang ditunjukkan oleh **Gambar 5** dapat disimpulkan bahwa semakin besar tangki, maka semakin tinggi pula efisiensi penghematan air, hal mana sesuai dengan yang ditemukan dalam [9]. Namun perlu diperhatikan peningkatan efisiensi yang signifikan adalah sampai dengan kapasitas 45 m³, dengan nilai efisiensi sebesar 25%. Ini berarti bahwa hanya 25% dari total kebutuhan air (non-air minum) yang dapat digantikan oleh sumber air hujan.

Perhitungan menggunakan data curah hujan yang ada menunjukkan bahwa total air hujan yang dapat ditampung rata-rata setahun sebesar 25.494 m³, sedangkan kebutuhan air (non-air minum) sebesar 57.200 m³, sehingga efisiensi maksimum secara teoritis dapat mencapai $25.494/57.200 \times 100\% = 44,5\%$, jauh lebih besar dari hasil simulasi yang hanya 25%. Hal ini disebabkan oleh pembatasan kapasitas tangki (untuk alasan efisiensi) dan terutama karena regim curah hujan (menentukan skenario air masuk tangki) yang sangat jauh dari konstan, sementara pemakaian air tangki (menentukan skenario air keluar tangki) yang diterapkan dalam simulasi adalah konstan setiap hari.

Sebagai contoh dalam periode waktu tertentu (misalnya 7 hari) volume air yang dibutuhkan sama dengan tujuh kali kebutuhan air harian, sementara itu volume air dalam tangki tidak tersedia karena hujan tidak turun sebelumnya. Kondisi ini menghasilkan efisiensi penghematan air yang minimal. Seandainya hujan turun setiap hari dalam jumlah yang cukup, maka untuk dimensi tangki tertentu efisiensi penghematan air dimungkinkan mencapai 100%. Demikian juga halnya bila dimensi tangki tidak dibatasi walaupun hujan tidak turun setiap harinya, maka efisiensi penghematan air dapat menjadi besar tergantung pada curah hujan bulanan atau tahunan.

Berikutnya adalah hubungan antara kapasitas tangki dengan efisiensi pengurangan puncak limpasan hujan yang ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Grafik efisiensi pengurangan puncak limpasan hujan

Mirip dengan pada efisiensi penghematan air, **Tabel 3** dan **Gambar 6** menunjukkan bahwa semakin besar kapasitas tangki SPAH maka semakin tinggi pula efisiensi pengurangan puncak limpasan hujan yang ditimbulkannya, seperti yang juga ditemukan dalam [10]. Jika disinkronkan dengan kapasitas optimum untuk penghematan air (45 m^3), maka diperoleh efisiensi pengurangan puncak limpasan sebesar 67,5%.

Efisiensi pengurangan puncak limpasan hujan (efisiensi pengurangan beban drainase kota) ditentukan oleh dua besaran, yaitu total limpahan tangki L_t dan total pencucian atap P_{at} (lihat rumus 9). Yang terakhir bernilai konstan sebesar 1 sampai 2 mm curah hujan pertama. Semakin kecil limpahan tangki maka semakin besar efisiensi penurunan beban drainase kota. Penurunan limpahan tangki dicapai dengan memperbesar pemakaian air dari tangki C_t dan volume tangki V (lihat **Persamaan 7**). Volume penggunaan air sudah tertentu dan diasumsikan konstan sesuai dengan fungsi bangunan tempat SPAH. Maka yang dapat dioptimalkan adalah dimensi tangkinya.

SPAH dapat diterapkan lebih luas, misalnya pada sebuah kota. Jika semua bangunan memiliki SPAH, maka dengan mengoptimalkan dimensi tangki di setiap SPAH, pengurangan ancaman banjir di wilayah perkotaan dapat dicapai secara signifikan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Algoritma model perilaku (*behavioural model*) untuk mendimensi tangki sistem penampungan air hujan (SPAH) dapat diaplikasikan dalam tabel pengolah data (*spreadsheet*), seperti yang dihasilkan dalam penelitian ini. Tabel hitungan tersebut dapat digunakan dengan relatif mudah untuk mengevaluasi kinerja sebuah tangki SPAH dengan variabel luas atap, jumlah pengguna, dan curah hujan harian.

Semakin panjang data curah hujan yang digunakan (total periode simulasi) maka semakin panjang pula tabel yang dibutuhkan, sehingga hanya dianjurkan untuk interval waktu simulasi terpendek yaitu satu hari, seperti yang diterapkan dalam studi ini. Salah satu kelebihan dari penggunaan tabel pengolah data ini adalah bahwa proses perubahan/simulasi dapat relatif lebih mudah diikuti/diketahui dibandingkan dengan aplikasi lainnya.

Untuk kasus yang disimulasikan dalam penelitian ini, yaitu untuk luas atap 1200 m^2 , jumlah pengguna 250 orang (gedung kuliah dan beberapa ruang dosen dan pegawai administrasi), dimana kebutuhan non-air minum ditentukan sebesar 20 liter/orang/hari), dan data curah hujan harian untuk wilayah Padang Bulan (Kota Medan) sepanjang 10 tahun, maka diusulkan kapasitas tangki SPAH sebesar 45 m^3 , dimana ini menghasilkan penghematan pemakaian air sebesar 25% dan pengurangan puncak limpasan hujan sebesar 67,5%.

Saran

Penelitian ini menerapkan 20 skenario dengan jalan memvariasikan hanya dimensi tangki saja. Untuk lebih meyakinkan akan kehandalan tabel simulasi (TAK-SPAH) yang dibuat, maka disarankan untuk melakukan analisis sensitivitas terhadap model tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan menerapkan sejumlah skenario lainnya dengan jalan memvariasikan data input yang ditunjukkan pada tabel 1, antaralain luas bidang atap, jumlah pengguna gedung, kebutuhan air, dan curah hujan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Medan yang memberi dukungan dana untuk penelitian ini melalui DIPA Polmed tahun 2023.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Admin, "Tujuan Pembangunan Berkelanjutan Yang Perlu Diketahui Pemerintah Daerah", UCLG-ASPAC. [online]. Tersedia: <https://www.uclg.org/sites/default/files/tujuan-sdgs.pdf>
- [2]. Admin, "GREENSHIP Rating Tools Existing Building", GBCI. [Online]. Tersedia: <https://www.gbciindonesia.org/greens/existing>
- [3]. Admin, "UI GreenMetric Guidelines 2022", ILRC-UI (2022). [Online]. Tersedia: <https://greenmetric.ui.ac.id/publications/guidelines/2022/english>

- [4]. D. F. Saragih, "Problems and solutions for the flood control program in Medan City and its surroundings", *Journal of the Civil Engineering Forum*, vo. 9, no. 1, pp. 47-58, January 2023. <https://doi.org/10.22146/jcef.4784>
- [5]. N. Armitage, M. Vice, S.L. Fisher-Jeffe, K. Winter, A. Spiegel, & J. Dunstan, *Alternative Technology for Storm Water Management: The South African Guidelines for Sustainable Drainage Systems*. University of Cape Town. 2013
- [6]. Menhumkam RI, *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum RI, No.12/PRT/M/ 2014, Tentang Penyelenggaraan Sistem Drainase Perkotaan*. Kemenhumkam, Jakarta. 2014.
- [7]. M. Muslim, "Naturalisasi Solusi Banjir Kota Padang", *Webinar Teknik Sipil: Permasalahan Banjir Kota dan Pengelolaannya*. Pemkot Padang, UBH, ITB, dan LIPI, 24 September 2020.
- [8]. E. Cristiano, F. Stefano, D. Roberto & V. Francesco, "How much green roofs and rainwater harvesting systems can contribute to urban flood mitigation?" *Urban Water Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 140-157, 2023. DOI: 10.1080/1573062X.2022.2155849.
- [9]. A. Fewkes, "Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach", *Urban Water Journal*, 1 , pp. 323 – 333, 2000.
- [10]. M. Carollo, I. Butera, R. Revelli, "Water savings and urban storm water management: Evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale", *PLoS ONE*, vol. 17, no. 11, e0278107, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278107>
- [11]. B. G. Latham, *Rainwater Collection Systems: The Design of Single-Purpose Reservoirs*. Master Thesis, Civil Engineering Department, University of Ottawa, Canada. 1983.
- [12]. A. Fewkes, D. Butler, "Simulating the Performance of Rainwater Collection and Reuse Systems Using Behavioral Models". 2000.
- [13]. V. G. Mitchell, "How important is the selection of computational analysis method to the accuracy of rainwater tank behaviour modelling?", *Hydrol. Process*, 21, pp. 2850–2861. Wiley InterScience, 2007. (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.649
- [14]. Marwoto, A. Setiawan, U.A. Aziz, "Perancangan Tangki Penampung Air Hujan Guna Pemanfaatan Air Hujan Sebagai Sumber Air Cadangan Pemukiman Warga (Studi Kasus: Desa Durensari Kec. Bagelen Kab. Purworejo)", *Jurnal Ilmu Teknik Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 2776-1606, 2021.
- [15]. M. Marselina, K. I. Choirunnisa, E. Nuralamsyah, S. A. Nurhayati, "Analysis of Rainwater Harvesting (RWH) Capacity in Leuwigajah Urban-Village, South Cimahi", *Jurnal Presipitasi*, vol. 19, no. 1, pp.122-136, 2022.
- [16]. R. N. Istchuk, E. Ghisi, "Financial Feasibility Analysis of Residential Rainwater Harvesting in Maringá, Brazil". *Sustainability*,14, 12859, 2023. <https://doi.org/10.3390/su141912859>
- [17]. A. S. Silva, E. Ghisi, "Uncertainty analysis of daily potable water demand on the performance evaluation of rainwater harvesting systems in residential buildings", *J. Environ. Manag.*, 180, 82–93. 2016. [CrossRef]