

Eksperimen Performa Sistem Air Hujan Sifonik dan Sistem Gravitasi

Mochamad Fahri Fadlu Robbi^a, Syaiful^b, MSK Tony Suryo Utomo^b, Akhmad Zikri^c, Muhammad Ikhsan^c

^aProgram Magister Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Semarang, Indonesia

^bDepartemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro
Semarang, Indonesia

^cPT. Siphonic Flow Mandiri
Kawasan Industri Taman Tekno BSD, Tangerang Selatan, Indonesia
*E-mail: mfahrifadlurobby@gmail.com

Abstract

A high-performance rainwater drainage system is crucial to address the increasing frequency of extreme rainfall events caused by climate change. This study investigates the performance of gravity and siphonic systems. A full-scale experimental setup was constructed to measure the capacity, water level, and pressure. The results show that the siphonic system significantly outperforms the gravity system. Using DN75 (3") pipes, the siphonic system achieved a flow capacity of 31.86 L/s, which is 14.29 times higher than that of the gravity system, despite the water level being only 1.82 times greater (80 mm compared to 44 mm). Furthermore, when the gravity system operates beyond its recommended capacity (2.23 L/s), the pressure inside the pipe is no longer equal to or close to atmospheric pressure, thus failing to meet the fundamental principle of gravity drainage systems.

Keywords: Rainwater drainage system, Siphonic system, Roof Drainage

Abstrak

Sistem drainase air hujan berkinerja tinggi sangat penting untuk mengatasi meningkatnya frekuensi hujan ekstrem akibat perubahan iklim. Studi ini mengkaji kinerja sistem gravitasi dan sifonik. Sebuah rangkaian eksperimen skala penuh dibangun untuk mengukur kapasitas, ketinggian air, dan tekanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem sifonik memiliki kinerja yang jauh lebih baik daripada sistem gravitasi. Untuk pipa DN75 (3"), sistem sifonik mencapai kapasitas 31,86 L/s, 14,29 kali lebih tinggi daripada sistem gravitasi, meskipun perbedaan ketinggian air hanya 1,82 kali lebih besar (80 mm dibandingkan dengan 44 mm). Disamping itu, ketika sistem gravitasi dioperasikan melebihi kapasitas rekomendasinya (2,23 L/s), tekanan di dalam pipa tidak lagi sama atau mendekati tekanan atmosfer, sehingga tidak lagi memenuhi prinsip dasar dari sistem drainase gravitasi.

Kata kunci: Sistem drainase air hujan, Sistem sifonik, Drainase atap

1. Pendahuluan

Perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan intensitas dan frekuensi hujan ekstrim di berbagai wilayah dunia. Hal ini tidak hanya mengancam keberlanjutan lingkungan tetapi juga dapat menambah beban kerja pada infrastruktur bangunan, terutama sistem drainase air hujan. Curah hujan ekstrem dengan durasi yang singkat membutuhkan sistem drainase yang lebih efisien dan optimal untuk mencegah luapan yang dapat merusak properti bangunan dan struktur. Studi terbaru menunjukkan terjadi peningkatan curah hujan ~7% untuk setiap 1°C pemanasan [1]. Saat ini terdapat dua teknologi sistem drainase air hujan yang umum digunakan yaitu sistem gravitasi dan sistem sifonik.

Sistem gravitasi umumnya terdiri dari *outlet* terbuka yang terhubung ke pipa air hujan vertikal yang dirancang untuk beroperasi pada tekanan atmosfer dengan rongga udara yang menerus di tengah-tengah pipa [2]. Secara umum, pendekatan dalam desain sistem gravitasi adalah pipa tegak didesain hanya terisi oleh 33% air (sisanya 67% udara) dan pipa horizontal dipasang dengan kemiringan yang terisi 70% air (sisanya 30% udara) [3]. Pola aliran pada pipa tegak sistem gravitasi adalah *annular flow* dimana air mengalir pada dinding dalam pipa dengan rongga udara (*air core*) di tengah-tengahnya sehingga tekanan di dalam pipa sama atau mendekati dengan tekanan atmosfer [3, 4, 5, 6]. Umumnya, perhitungan desain kapasitas pipa tegak menggunakan persamaan Wyly-Eaton dan kapasitas pipa horizontal menggunakan persamaan Colebrook-white [3, 7]. Namun demikian, kapasitas aliran pada sistem gravitasi biasanya ditentukan oleh ukuran *outlet* dan ketinggian air di atasnya [2]. May [5] menyatakan bahwa poin penting pada sistem gravitasi adalah *roof drain*, karena *roof drain* menentukan debit yang dapat dialirkan pada sistem dan terkadang menentukan ketinggian air di talang. Tujuan utama merancang pipa tegak sistem gravitasi maksimum terisi 33% oleh air adalah untuk menjaga agar tekanan di dalam pipa tetap pada tekanan atmosfer. Dengan demikian operasi sistem gravitasi yang bekerja pada tekanan di bawah tekanan atmosfer (tekanan negatif) serta terjadinya fluktuasi tekanan di dalam pipa dapat dihindari. Tekanan negatif di dalam pipa dapat menyebabkan kegagalan pada sistem perpipaan dan fluktuasi

tekanan di dalam pipa dapat menyebabkan getaran pada struktur sistem perpipaan. Getaran pada struktur perpipaan dapat menyebabkan kerusakan komponen pipa, *fitting* dan sambungannya serta kegagalan pada *bracket*. Sistem gravitasi umumnya tidak didesain untuk mengantisipasi kondisi ini.

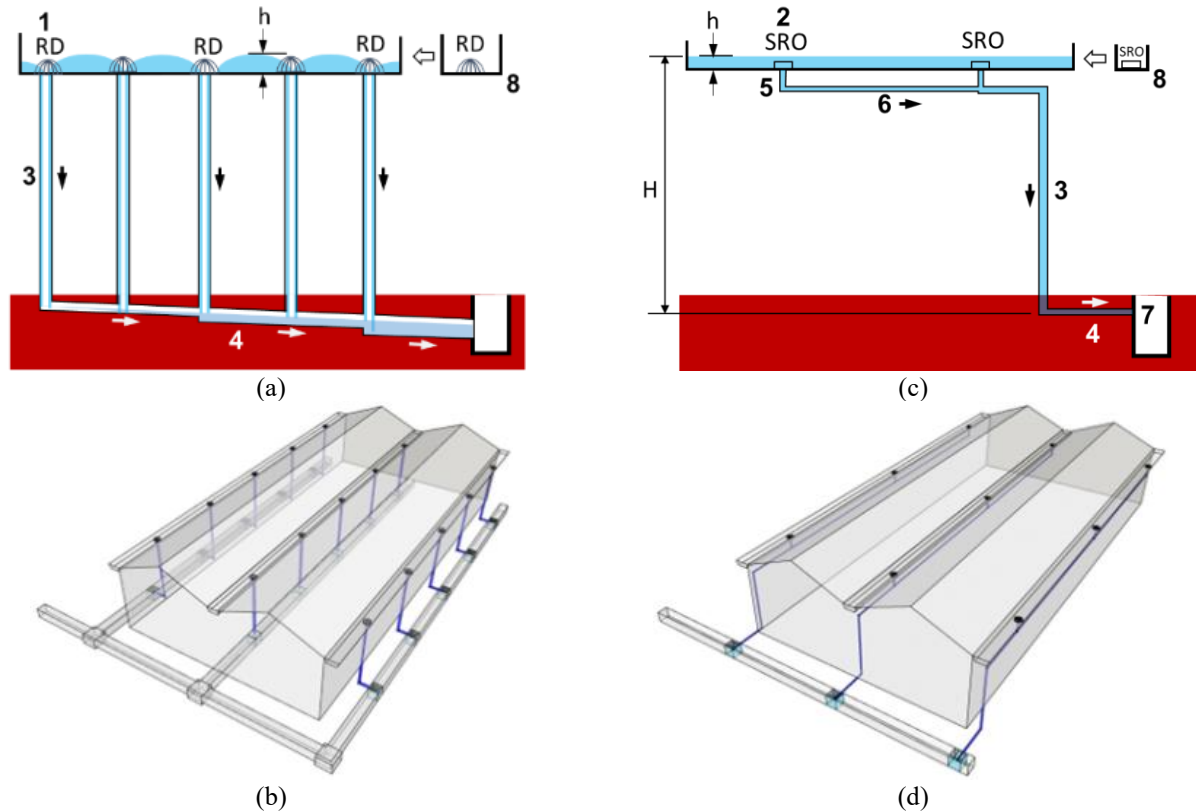
Saat ini terdapat beberapa standar yang dapat digunakan dalam mendesain sistem air hujan gravitasi. Standar BS EN 12056-3:2000 adalah salah satu standar yang banyak digunakan untuk mendesain sistem air hujan gravitasi khususnya di Inggris dan Eropa [8]. Pada standar ini, selain mencantumkan tabel kapasitas maksimum pipa tegak, juga dinyatakan persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung kapasitas pipa tegak dan pipa horizontal. Kapasitas pipa tegak dihitung berdasarkan persamaan Wyly-Eaton dan kapasitas pipa horizontal menggunakan persamaan Colebrook-white [8]. Disamping itu, standar BS EN 12056-3:2000 juga mengatur perhitungan desain kapasitas berdasarkan jenis *outlet* dan penggunaan *roof drain* atau saringan. May [7] menjelaskan bahwa *outlet* didefinisikan sebagai sebuah bukaan pada dasar talang atau atap yang mengalirkan air langsung ke pipa tegak air hujan. Terdapat 3 jenis *outlet* berbentuk lingkaran yaitu *straight taper*, *round edged* dan *sharp-edged*. Selain itu, pada standar ini penggunaan *roof drain* atau saringan pada *outlet* akan mengurangi 50% kapasitas dibandingkan dengan tanpa *roof drain*. Perhitungan kapasitas *outlet* juga dipengaruhi oleh ketinggian air diatas *outlet* dimana untuk $h \leq D/2$ adalah tipe *weir-type flow* dan untuk $h \geq D/2$ adalah tipe *orifice-type flow* [7, 8].

Di Indonesia, perhitungan perancangan drainase air hujan atap diatur berdasarkan standar SNI 8153:2015 tentang "Sistem Plumbing Pada Bangunan Gedung". Standar SNI 8153:2015 mengacu pada standar Uniform Plumbing Code (UPC) 2012 dan UPC Study Guide 2012 yang disusun dan diterbitkan oleh International Association of Plumbing and Mechanical Officials (IAPMO). Pendekatan perancangan sistem air hujan adalah berdasarkan metode luas atap. Pada standar SNI 8153:2015, kapasitas maksimum pipa tegak sistem gravitasi mengacu kepada Tabel 17 dengan perkiraan ketinggian air 44 mm. Berbeda dengan Standar BS EN 12056-3, Standar SNI 8153:2015 tidak mencantumkan persamaan yang dapat menghitung kapasitas pipa tegak dan horizontal serta tidak juga mencantumkan perhitungan desain kapasitas *outlet* dan penggunaan saringan (*roof drain*). Disamping itu, pada Tabel 17 standar SNI 8153:2015, tidak dinyatakan dengan jelas apakah tabel ini telah memperhitungkan jenis *outlet* dan penggunaan *roof drain* atau tidak. Standar UPC mensyaratkan harusnya penggunaan *roof drain* dengan dimensi ketinggian minimum 102 mm dari permukaan atap dan luas minimum bukaan *roof drain* 1,5 kali dari luas permukaan pipa tegak.

Laporan penelitian yang diterbitkan oleh American Society of Plumbing Engineers Research Foundation (ASPE RF) menyatakan bahwa metode perancangan sistem air hujan dengan pendekatan luas atap, seperti metode pada standar SNI 8153:2015 dan standar Uniform Plumbing Code (UPC) 2012, harus ditinggalkan karena tidak memperhitungkan kemiringan dan kekasaran dari atap serta tidak mempertimbangkan kapasitas dari *roof drain* [9]. Hasil penelitian ini juga merekomendasikan untuk menggunakan metode perhitungan baru dalam perancangan sistem air hujan yang didasarkan kepada kapasitas *roof drain*, ketinggian air pada *roof drain*, dan kapasitas maksimum dari sistem perpipaan, serta kemiringan talang. Rekomendasi ini pada dasarnya sama dengan pendekatan desain air hujan sebagaimana standar BS EN 12056-3:2000. Laporan ini juga menyebutkan beberapa dampak yang disebabkan kegagalan pada sistem gravitasi yaitu: keruntuhan atap, terpisahnya pipa dan *fitting*, *hanger* yang terlepas dari pelat lantai, banjir pada balkon di level atas, kegagalan *fitting*, dan banjir pada lantai teratas gedung akibat kegagalan pipa [9]. Salah satu penyebab kegagalan ini adalah operasi sistem gravitasi berubah dari regime 1 yang tidak bertekanan menjadi regime 2 yang bertekanan dan berfluktuasi. Laporan ASPE RE ini harus mendapat perhatian karena sampai saat ini belum dilakukan perubahan pada Standar SNI 8153:2015.

Berbeda dengan sistem gravitasi, pendekatan desain sistem sifonik adalah *steady state*, *non-aerated* dan pipa didesain 100 % penuh terisi oleh air atau disebut *full bore* [3, 10]. Dengan asumsi ini, maka memungkinkan dalam mendesain sistem sifonik menggunakan teori hidraulik pada keadaan tunak (*steady state*) seperti persamaan energi Bernoulli untuk aliran tunak (*steady*) yang umum digunakan untuk mengestimasi perbedaan energi antara dua titik aliran fluida [2, 11]. Teknologi sistem sifonik pertama kali ditemukan oleh Olavi Ebeling dan Lunden pada tahun 1967 [12]. Sistem sifonik memiliki keunggulan yang banyak dibandingkan dengan sistem gravitasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Performa tinggi, yaitu mampu membawa laju aliran dan kecepatan hingga 10 kali lebih besar daripada kapasitas *outlet* sistem gravitasi [10, 13]. Walaupun kapasitas laju aliran yang lebih tinggi, dibutuhkan ukuran talang yang lebih kecil dengan peningkatan ketinggian air yang tidak signifikan. Sangat aman dan sangat efisien, sehingga cocok untuk digunakan pada bangunan dengan atap yang luas. Karena aliran *full bore* dan kecepatan yang tinggi, menimbulkan tekanan negatif dan efek hisap (*suction effect*), sehingga terjadi *self-cleansing* yaitu menarik dan membersihkan sampah-sampah tertentu di dalam pipa dan SRO yang kemudian terbawa bersama laju aliran air dengan kecepatan yang tinggi menuju saluran drainase. *Outlet* lebih sedikit [2, 3], mengurangi penetrasi di talang dan atap, sehingga mengurangi kemungkinan titik kebocoran. Beberapa *outlet* dapat dihubungkan ke satu pipa horizontal tanpa kemiringan di bawah talang atau di bawah atap [2, 5, 14], kemudian diarahkan ke satu pipa vertikal di tepi bangunan [2, 10]. Hasilnya, kebutuhan akan pipa air hujan vertikal di dalam bangunan dapat dihilangkan, begitu pula kebutuhan untuk saluran pembuangan bawah tanah yang mahal di dalam bangunan dapat dihilangkan, yang kemudian menghasilkan penghematan biaya yang signifikan dari berkurangnya pekerjaan saluran bawah tanah. Diameter pipa yang lebih kecil [2, 3] menghasilkan pengurangan signifikan dalam penggunaan bahan baku pipa dan *fitting* (*dematerialization*) dan

memberikan keuntungan secara arsitektural. Karena pipa horizontal tanpa kemiringan dan diameter pipa yang kecil, sistem sifonik mampu mengumpulkan air hujan dari area atap yang luas dan mengalirkan air yang dikumpulkan ini ke titik koleksi yang diinginkan (tangki air hujan). Hal ini memudahkan pemanfaatan kembali air hujan, yang sering kali sulit diimplementasikan dalam sistem gravitasi [15]. Pengurangan bahan (pipa & fitting, beton untuk saluran drainase, talang), pekerjaan bawah tanah, pekerjaan instalasi, dan pemanfaatan air hujan berdampak kepada pengurangan emisi karbon selama konstruksi dan operasional bangunan.



Keterangan Gambar: 1. Saringan atau *roof drain* sistem gravitasi, 2. *Siphonic roof outlet* (SRO), 3. Pipa tegak, 4. Pipa horizontal dibawah tanah atau lantai, 5. *Tail pipe*, 6. *Horizontal collector pipe*, 7. *Siphonic break*, 8. Talang

Gambar 1. (a) Skematik sistem drainase air hujan (a) sistem gravitasi (b) tipikal aplikasi sistem gravitasi pada gedung (c) sistem sifonik (d) tipikal aplikasi sistem sifonik pada gedung

Arthur dan Wright [16] menyatakan bahwa memahami kompleksitas proses *priming* adalah kunci untuk memahami bagaimana kinerja sistem sifonik. Dalam sistem sifonik, *priming* adalah proses dimana semua udara di dalam sistem digantikan dengan air hujan [17]. Setelah semua udara dikeluarkan dari sistem (digantikan dengan air hujan), aksi sifonik terjadi dan sistem dikatakan telah mencapai kondisi *primed* [14]. May dan Escameia [2] adalah peneliti pertama yang melaporkan proses *priming* dalam sistem sifonik. Arthur dkk, Arthur dan Swaffield [11, 17] kemudian melaporkan hasil penelitian terhadap sistem sifonik *single outlet configuration*, bahwa terdapat 3 *flow regime* pada proses *priming* sistem sifonik, yaitu: *free surface flow*, *unsteady two-phase flow*, dan *full-bore flow*. *Regime-1*, *free surface flow*, yaitu di bawah 40% kapasitas sistem *fully primed*. Pada kondisi ini karakteristik aliran yang terjadi sama seperti pada sistem gravitasi. Ketinggian air pada talang dan debit yang relatif rendah mengarah kepada aliran *free surface flow* (*subcritical*) pada pipa horizontal dan *annular flow* pada pipa vertikal. Tekanan yang terjadi di dalam sistem perpipaan sama dengan tekanan atmosfer. *Regime-2*, *unsteady two-phase flow*, yaitu di atas 40% kapasitas sistem *fully primed*. Pada kondisi ini, *regime* aliran adalah *unsteady*, *two phase-flow* atau *mixed flow*. Pada kondisi debit konstan, *regime* ini memiliki karakteristik terjadinya *cyclical variations* ketinggian air di talang dan tekanan pada sistem. Kondisi ini menghasilkan udara dalam jumlah yang besar tertarik ke dalam sistem yang mengarah kepada kebisingan dan getaran pada struktur. *Regime-3*, yaitu pada saat sistem dalam kondisi *fully primed* (kapasitas maksimum). Pada kondisi ini terjadi aliran *full bore*. Wright dkk [6] melakukan pengujian pada sistem sifonik *multiple outlet configuration* dan menyatakan bahwa proses *priming* hampir sama dengan sistem *single outlet configuration* hanya sedikit lebih kompleks.

Pada kenyataannya, berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, sistem sifonik tidak pernah 100% terisi penuh oleh air walaupun SRO terendam penuh oleh air. Di dalam pipa masih terdapat udara dengan tingkat kandungannya dapat mencapai hingga 10% [2, 6, 10, 14]. Walaupun demikian, meskipun desain sistem sifonik pada kondisi *full bore*

menafikan adanya kandungan udara ini, hasil penelitian laboratorium menunjukkan hasil yang hampir sama dengan perhitungan desain sehingga pendekatan perhitungan tersebut masih dapat diterima [2, 3, 6]. Namun demikian, metode perhitungan dengan kondisi *steady state*, *non-aerated* dan *full bore* tidak dapat diterapkan jika sistem sifonik beroperasi di bawah kapasitas *full bore* atau di bawah kapasitas *fully primed*. Kondisi operasi sistem sifonik di bawah kapasitas *full bore* merupakan kondisi normal operasi sistem sifonik (*day-to-day performance characteristic*) dimana kondisi ini lebih sering terjadi jika dibandingkan kondisi *full bore* [2]. Pada kondisi ini terjadi *two-phase flow* atau *part-full load* [6, 18]. Pada kondisi *two-phase flow*, sejumlah besar udara tertarik masuk ke dalam sistem, atau peristiwa dengan intensitas curah hujan yang bervariasi, dapat menyebabkan masalah operasional yang merugikan, seperti kebisingan, fluktuasi tekanan di dalam sistem perpipaan (fluktuasi tekanan ini dapat menyebabkan getaran struktural, yang berpotensi menyebabkan kegagalan fisik pada komponen sistem sifonik), serta fluktuasi ketinggian air pada talang [14].

Penelitian yang membandingkan performa kapasitas sistem gravitasi dan sistem sifonik masih belum banyak dilakukan. Escaramia dan May [19] adalah peneliti pertama yang berusaha mengukur kapasitas berbagai jenis *outlet* dengan *roof drain* dan tanpa *roof drain* pada sistem gravitasi untuk kasus pada atap datar (*flat roof*). Penelitian mereka melibatkan enam jenis *roof outlet* dengan bentuk *outlet* dan *roof drain* (*leafguard*) yang berbeda. Jenis *outlet* yang mereka teliti terdiri dari tipe *straight-taper outlet*, tipe *square-tapered outlet*, dan tipe *sump outlet*. *Outlet-outlet* ini juga memiliki variasi diameter spigot, diameter dan ketinggian *roof drain* (*leafguard*), dan material yang berbeda-beda. Pada sistem sifonik, mereka melakukan penelitian pada empat jenis SRO yang berbeda. Jenis SRO yang mereka teliti semuanya adalah tipe *bowl*. May dan Escaramia [2] juga melaporkan hasil eksperimen kapasitas sistem gravitasi dan sistem sifonik untuk kasus pada talang. Jenis SRO sistem sifonik yang mereka teliti adalah tipe *bowl*. Akan tetapi eksperimen kapasitas sistem gravitasi dan sistem sifonik pada penelitian ini tidak menggunakan konfigurasi pipa yang sama, sehingga tidak dapat dibandingkan. Salah satu hasil penting eksperimen mereka adalah kelemahan dari SRO tipe *bowl* dengan *leafguard* yaitu meskipun *leaf guard* efektif dalam mencegah sampah masuk ke dalam sistem, tetapi sampah-sampah tersebut terakumulasi di sekitar *leafguard* yang menyebabkan SRO tersumbat, yang berdampak kepada kenaikan tajam ketinggian air di talang hingga pompa harus dimatikan untuk menghindari *overflow*. Sementara itu, Zikri dkk. [20] menyatakan kapasitas sistem air hujan (sistem gravitasi) pada Tabel 17 standar SNI 8153:2015 tidak mempertimbangan kapasitas *outlet* dan *roof drain*. Berdasarkan hasil eksperimen, rekomendasi kapasitas maksimum pipa tegak DN 75 (3") dengan ketinggian air $h = 44$ mm adalah 4.67 L/s untuk *outlet* tipe *sharp-edge outlet* tanpa *roof drain* dan 2.23 L/s dengan *roof drain* tipe *dome*. Hal ini menunjukkan bahwa geometri *outlet* dan *roof drain* mempengaruhi kapasitas yang dapat masuk ke dalam pipa tegak sistem gravitasi. Kapasitas desain maksimum 5,52 L/s (Tabel 17 standar SNI 8153:2015) pada pipa DN 75 (3") tidak direkomendasikan digunakan untuk mendesain sistem air hujan gravitasi yang menggunakan *sharp-edge outlet* dan *roof drain* tipe *dome* dikarenakan aliran di dalam pipa beroperasi pada kondisi *unsteady flow* dengan karakteristik terjadi tekanan negatif dan fluktuasi tekanan yang dapat menyebabkan kegagalan sistem.

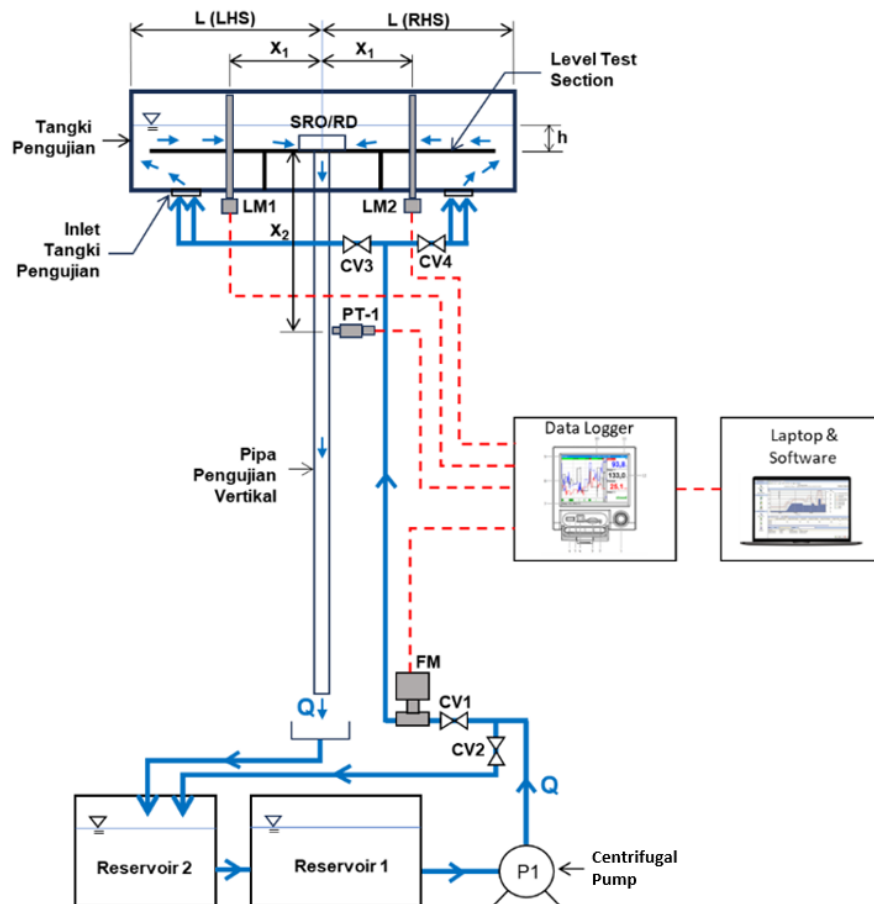
Namun demikian, penelitian-penelitian yang membandingkan performa sistem gravitasi dan sistem sifonik sebelumnya menggunakan geometri dan jenis *outlet* dan *roof drain* sistem gravitasi yang berbeda dengan geometri dan jenis yang umumnya tersedia secara komersial di pasaran Indonesia. Di Indonesia, untuk sistem gravitasi, salah satu yang umumnya digunakan adalah tipe *sharp-edge outlet* dan *roof drain* tipe *dome*. Bentuk dan geometri *outlet* dan *roof drain* akan mempengaruhi kapasitas yang dapat masuk ke dalam pipa tegak sistem gravitasi. Disamping itu, jenis SRO sistem sifonik yang digunakan pada penelitian sebelumnya adalah tipe *bowl* yang merupakan generasi awal SRO. Beberapa penelitian tersebut tidak menggunakan *layout* pipa pengujian yang sama, sehingga hasil eksperimen sistem gravitasi dan sistem sifonik tidak dapat dibandingkan. Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui performa sistem gravitasi dan sistem sifonik melalui metode eksperimen. Pada sistem gravitasi, jenis *outlet* yang digunakan adalah tipe *sharp-edge outlet* dan *roof drain* berbentuk *dome* yang umum digunakan dan tersedia secara komersial dipasaran di Indonesia. Sedangkan pada sistem sifonik menggunakan *siphonic roof outlet* (SRO) tipe NOFLAF (*non-bowl finless laminar agitating flow*) dengan konstruksi dan teknologi tanpa *fin* (*finless*), *circular flat-baffle plate*, *flat base plate* dan *3-way inlet flow*. SRO ini merupakan teknologi SRO generasi terbaru dan teknologi sistem sifonik pertama di Indonesia yang didesain dan diproduksi di Indonesia dengan menggunakan sumber daya bahan yang tersedia di dalam negeri. Disamping itu, SRO ini memiliki keunggulan pada kapasitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan tipe *bowl* serta performa *antiblocking* terhadap sampah yang lebih baik dibandingkan dengan tipe *bowl* yang menggunakan *strainer* atau *leafguard*. Untuk mencapai tujuan ini, sebuah sarana eksperimen skala penuh dibangun berdasarkan standar ASME A112.6.9-2005 yang digunakan untuk pengujian kapasitas *outlet* dan *roof drain* sistem gravitasi dan kapasitas sistem sifonik.

2. Material dan metode penelitian

Gambar 2 memperlihatkan skema fasilitas pengujian eksperimen skala penuh yang dibangun berdasarkan standar ASME A112.6.9-2005 [21] yang dimodifikasi pada bentuk tangki.

Pada penelitian ini, tangki pengujian dibuat berbentuk persegi empat agar dapat menggunakan material transparan sehingga mempermudah observasi pada waktu pengujian. Tangki pengujian memiliki dimensi Panjang = 2L, Lebar = 2L

dan Tinggi = $0,55L$ dengan $L = 1$ m. *Level test section* tangki pengujian dikalibrasi dengan menggunakan *water pass laser cross line* yang memiliki ketelitian ± 1 mm. Air di reservoir 1 dan reservoir 2 di pompa ke tangki pengujian dengan menggunakan satu unit pompa sentrifugal dengan kapasitas 65 L/s. Debit air diukur dengan menggunakan *electromagnetic flow meter* (FM) dengan ketelitian $\pm 0,5$ % dan kemudian air masuk ke tangki pengujian melalui empat *inlet* yang memiliki dimensi diameter internal yang sama dan jarak yang sama dari center SRO atau *roof drain* pada setiap kuadran. Dalam penelitian ini, pendekatan dan metode baru untuk mengukur ketinggian air diusulkan dengan menggunakan dua unit *continues level measurement* (LM), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. *Continues level measurement* terdiri dari *active length* di bagian atas *level test section* dan *in-active length* di bagian bawah *level test section*. Pembacaan ketinggian air dilakukan oleh *active length*. Panjang *Active length* dan *in-active length* didesain dan diproduksi khusus untuk penelitian ini. *Continues level measurement* masing-masing dipasang pada titik pengukuran $x_1 = 500$ mm pada *Right Hand Side* (RHS) dan *Left Hand Side* (LHS) tangki pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Setelah pemasangan pada tangki pengujian, dilakukan kalibrasi terhadap *level test section* dan didapatkan akurasi sebesar ± 1 mm. Satu unit *pressure transducer* yaitu PT-1 dengan ketelitian ± 60 mmH₂O ($\pm 0,06$ mH₂O) dipasang pada pipa pengujian vertikal dengan jarak $x_2 = 850$ mm dari permukaan *level test section*. Total panjang pipa pengujian transparan (termasuk panjang *spigot* SRO atau *spigot outlet* sistem gravitasi) dari *level test section* ke ujung *discharge* pipa transparan adalah 3L. Ujung dari pipa transparan dalam kondisi *free discharge*. Baik *spigot outlet* sistem gravitasi dan *spigot* SRO disambung dengan pipa pengujian transparan vertikal dengan menggunakan *flexible coupling*. Dengan fasilitas eksperimen ini maka ketinggian air, laju aliran dan tekanan dapat diakuisisi secara simultan. Semua data yang terbaca pada alat instrumentasi dicatat dan direkam pada *data logger*, yang kemudian diunduh melalui perangkat lunak yang diinstal pada satu unit laptop untuk dianalisis lebih lanjut (lihat Gambar 2).



Gambar 2. Skema fasilitas pengujian sistem air hujan gravitasi dan sistem sifonik.

Dengan fasilitas eksperimen ini maka ketinggian air, laju aliran dan tekanan dapat diakuisisi secara simultan. Pengujian eksperimen sistem gravitasi dilakukan pada pipa dengan diameter nominal DN 75 (3"). Pada pengujian sistem gravitasi, jenis *outlet* yang digunakan adalah *sharp-edge outlet*, jenis *roof drain* adalah tipe *dome* yang umum digunakan di Indonesia dan tersedia secara komersial di pasaran. Gambar 3 menunjukkan foto dari *outlet* jenis *sharp-edge* dan *roof drain* tipe *dome* yang digunakan.



Gambar 3. (a) Foto outlet tipe *sharp-edge* tanpa *roof drain* (b) Foto outlet tipe *sharp-edge* dengan *roof drain* tipe *dome*

Sementara itu, pada pengujian sistem sifonik, SRO yang digunakan adalah SRO tipe NOFLAF 300-075. SRO ini merupakan SRO generasi terbaru yaitu tipe NOFLAF yang merupakan singkatan dari *Non-Bowl Finless Laminar Agitating Flow*. SRO ini menerapkan teknologi tanpa *fin* (*finless*), *3-way flow inlet*, *circular-flat baffle plate* dan *flat-base plate* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Tujuan pengujian adalah: 1) mengetahui kapasitas maksimal dan ketinggian air sistem sifonik untuk DN 75 dan membandingkan dengan sistem gravitasi berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Zikri dkk [20], dan 2) membandingkan ketinggian rata-rata ($\bar{h}$) dan tekanan rata-rata ($\bar{P}$) sistem sifonik dan sistem gravitasi pada target debit 8 L/s, 16 L/s, 24 L/s (*regime 2*), dan kapasitas *full bore* (*regime 3*) sistem sifonik.

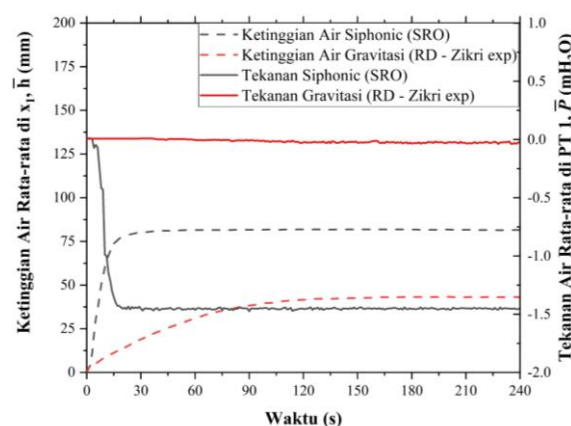


Gambar 4. Foto SRO tipe NOFLAF (atas izin PT. Siphonic Flow Mandiri)

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Kapasitas Sistem Sifonik dan Sistem Gravitasi Hasil Eksperimen

Berdasarkan eksperimen, kapasitas maksimum (*full bore*) sistem sifonik dengan menggunakan SRO tipe NOFLAF 300-075 dicapai pada $Q = 31,86$ L/s. Pada kondisi *full bore* ini, didapatkan tekanan rata-rata di PT-1 sebesar $\bar{P} = -1,45$ mH₂O dan ketinggian air rata-rata yang stabil di x_1 sebesar $\bar{h}_1 = 80$ mm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kapasitas maksimum dan ketinggian air yang stabil adalah 51 detik. Sementara itu, Zikri dkk [20], merekomendasi kapasitas maksimum pipa tegak DN 75 (3") dengan ketinggian air $h = 44$ mm adalah 2.23 L/s dengan *roof drain* tipe *dome* dengan tekanan rata-rata di PT-1 sebesar $\bar{P} = -0,027$ mH₂O dan ketinggian air stabil pada detik ke-172.



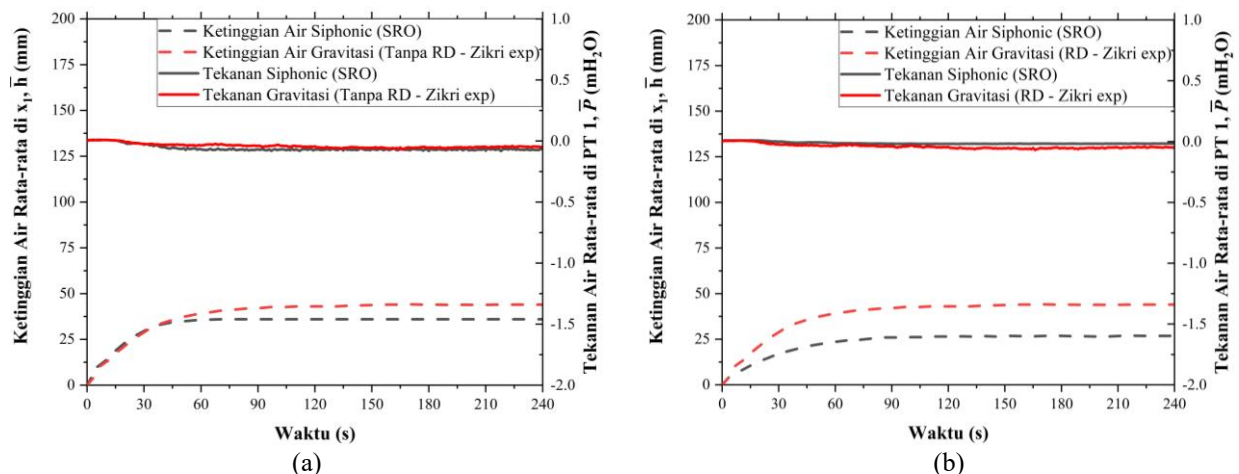
Gambar 5. Perbandingan ketinggian air $\bar{h}_1$ di x_1 dan tekanan $\bar{P}$ di PT-1 antara sistem sifonik (kondisi *full bore*, $Q = 31,86$ L/s) dan sistem gravitasi berdasarkan hasil Zikri dkk [20] (*roof drain* tipe *dome*, $Q = 2,23$ L/s)

3.2. Perbandingan Performa Sistem Sifonik dan Sistem Gravitasi

Gambar 5 juga memperlihatkan perbandingan sistem sifonik dan sistem gravitasi yang menggunakan *roof drain* tipe *dome* dengan kapasitas maksimum $Q = 2,23$ L/s (lihat juga Gambar 6.b).

Untuk diameter nominal yang sama yaitu DN 75, sistem sifonik sangat efisien karena memiliki kapasitas yang sangat tinggi yaitu mencapai 14,29 kali lebih besar jika dibandingkan sistem gravitasi. Walaupun perbedaan kapasitas sangat tinggi, peningkatan ketinggian air relatif rendah yaitu hanya sebesar 1,82 kali dibandingkan dengan sistem gravitasi, yaitu 80 mm berbanding 44 mm. Disamping itu, sistem sifonik memiliki respon yang lebih baik terhadap laju aliran yang tiba-tiba dimana untuk mencapai ketinggian yang stabil dan kapasitas maksimum dibutuhkan waktu 51 detik, sementara sistem gravitasi membutuhkan waktu 172 detik. Sistem sifonik 3,4 kali lebih cepat jika dibandingkan sistem gravitasi walaupun dengan kapasitas 14,29 lebih besar. Dengan demikian, sistem sifonik sangat cocok untuk mengantisipasi peningkatan curah hujan ekstrim dengan durasi yang lebih pendek akibat perubahan iklim global.

Gambar 6 (a) memperlihatkan perbandingan performa sistem sistem sifonik apabila bekerja pada kapasitas maksimum sistem gravitasi tanpa *roof drain* hasil eksperimen Zikri dkk [20] yaitu debit 4,67 L/s. Dari grafik ini terlihat bahwa ketinggian air rata-rata sistem sifonik adalah $\bar{h}_1 = 36$ mm, lebih rendah 18,18 % dari sistem gravitasi dengan $\bar{h}_1 = 44$ mm. Sementara tekanan rata-rata di PT-1 baik untuk sistem sifonik dan sistem gravitasi cenderung relatif sama dan kecil, sehingga dapat diabaikan dan dianggap sama dengan tekanan atmosfer. Sementara itu, Gambar 6 (b) memperlihatkan perbandingan performa sistem sistem sifonik apabila bekerja pada kapasitas sistem gravitasi dengan *roof drain* tipe *dome* hasil eksperimen Zikri dkk [20] pada debit 2,23 L/s. Dari grafik ini terlihat bahwa ketinggian air rata-rata sistem sifonik adalah $\bar{h}_1 = 26$ mm, lebih rendah 40,9 % dari sistem gravitasi dengan $\bar{h}_1 = 44$ mm. Sementara tekanan rata-rata di PT-1 baik untuk sistem sifonik dan sistem gravitasi juga cenderung relatif sama dan kecil, sehingga dapat diabaikan dan dianggap sama dengan tekanan atmosfer. Hasil ini menjelaskan bahwa sistem sifonik ketika bekerja pada kapasitas desain sistem gravitasi hasil eksperimen, memiliki performa yang lebih baik yaitu ketinggian air yang lebih rendah.



Gambar 6. Grafik perbandingan tekanan $\bar{P}$ di PT-1 dan ketinggian air $\bar{h}_1$ di x_1 untuk sistem sifonik dan sistem gravitasi berdasarkan hasil Zikri dkk [20] (a) tanpa *roof drain*, $Q = 4,67$ L/s (b) dengan *roof drain* tipe *dome*, $Q = 2,23$ L/s

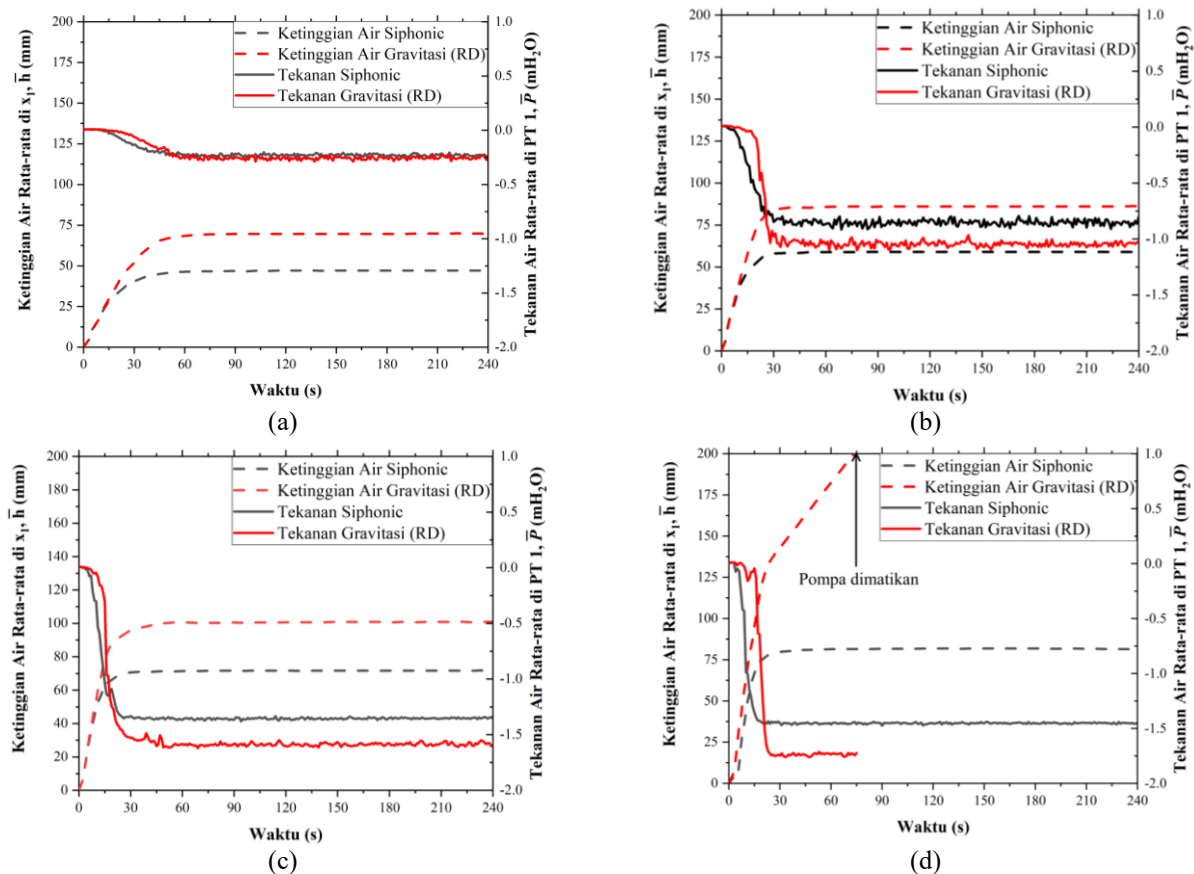
Gambar 7 (a) memperlihatkan grafik perbandingan sistem sifonik dan sistem gravitasi dengan *roof drain* pada target debit 8 L/s. Dari grafik ini didapatkan ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ di x_1 untuk sistem gravitasi dan sistem sifonik masing-masing adalah 69 mm dan 47 mm. Tekanan rata-rata $\bar{P}$ di PT-1 untuk sistem gravitasi dan sistem sifonik masing-masing adalah -0,25 mH₂O dan -0,22 mH₂O. Hasil ini menunjukkan ketinggian air rata-rata $\bar{h}_1$ sistem gravitasi lebih tinggi 46,8% dibandingkan dengan sistem sifonik. Sementara itu, tekanan negatif rata-rata $\bar{P}$ sistem gravitasi lebih besar 13,6% dibandingkan sistem sifonik. Terjadi fluktuasi tekanan di dalam pipa sistem gravitasi dengan tekanan maksimum -0,218 mH₂O dan tekanan minimum -0,284 mH₂O.

Gambar 7 (b) memperlihatkan grafik perbandingan sistem sifonik dan sistem gravitasi dengan *roof drain* pada target debit 16 L/s. Dari grafik ini didapatkan ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ di x_1 untuk sistem gravitasi dan sistem sifonik masing-masing adalah 86 mm dan 59 mm. Tekanan rata-rata $\bar{P}$ di PT-1 sistem gravitasi dan sistem sifonik masing-masing adalah -1,05 mH₂O dan -0,89 mH₂O. Hasil ini menunjukkan ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ sistem gravitasi meningkat 24,64% dari 69 mm menjadi 86 mm. Sementara itu, ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ sistem sifonik meningkat 25,53% dari 47 mm menjadi 59 mm. Sedangkan tekanan negatif rata-rata $\bar{P}$ sistem gravitasi meningkat 320% dari -0,25 mH₂O menjadi -1,05 mH₂O dan sistem sifonik meningkat 304,5% dari -0,22 mH₂O menjadi -0,89 mH₂O. Pada debit ini, ketinggian air dan tekanan negatif

sistem gravitasi lebih tinggi dibandingkan sistem sifonik. Terjadi fluktuasi tekanan di dalam pipa sistem gravitasi dengan tekanan maksimum $-0,996 \text{ mH}_2\text{O}$ dan tekanan minimum $-1,093 \text{ mH}_2\text{O}$.

Gambar 7 (c) memperlihatkan grafik perbandingan sistem sifonik dan sistem gravitasi dengan *roof drain* pada target debit 24 L/s . Dari grafik ini didapatkan ketinggian air rata-rata $\bar{h}_1$ di x_1 untuk sistem gravitasi dan sistem sifonik masing-masing adalah 101 mm dan 72 mm . Tekanan rata-rata $\bar{P}$ di PT-1 sistem gravitasi dan sistem sifonik masing-masing adalah $-1,57 \text{ mH}_2\text{O}$ dan $-1,35 \text{ mH}_2\text{O}$. Hasil ini menunjukkan ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ sistem gravitasi meningkat $17,44\%$ dari 86 mm menjadi 101 mm . Sementara ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ sistem sifonik meningkat $22,03\%$ dari 59 mm menjadi 72 mm . Sedangkan tekanan negatif rata-rata $\bar{P}$ sistem gravitasi meningkat $49,52\%$ dari $-1,05 \text{ mH}_2\text{O}$ menjadi $-1,57 \text{ mH}_2\text{O}$ dan sistem sifonik meningkat $51,69\%$ dari $-0,89 \text{ mH}_2\text{O}$ menjadi $-1,35 \text{ mH}_2\text{O}$. Pada debit ini, ketinggian air dan tekanan negatif sistem gravitasi lebih tinggi dibandingkan sistem sifonik. Terjadi fluktuasi tekanan di dalam pipa sistem gravitasi dengan tekanan maksimum $-1,55 \text{ mH}_2\text{O}$ dan tekanan minimum $-1,616 \text{ mH}_2\text{O}$.

Gambar 7 (d) memperlihatkan grafik perbandingan sistem sifonik dan sistem gravitasi dengan *roof drain* pada debit $31,86 \text{ L/s}$, yaitu kapasitas *full bore* sistem sifonik. Dari grafik ini, didapatkan ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ di x_1 untuk sistem gravitasi meningkat tajam hingga pada detik ke-86 mencapai 200 mm , sehingga pompa harus dimatikan untuk menghindari *overflow*. Sementara ketinggian air rata-rata $\bar{h}_1$ di x_1 untuk sistem sifonik stabil pada $\bar{h}_1 = 80 \text{ mm}$. Tekanan rata-rata $\bar{P}$ di PT-1 sistem gravitasi dan sistem sifonik masing-masing adalah $-1,73 \text{ mH}_2\text{O}$ dan $-1,45 \text{ mH}_2\text{O}$. Tekanan rata-rata $\bar{P}$ sistem sifonik meningkat $7,4\%$ dari $-1,35 \text{ mH}_2\text{O}$ menjadi $-1,45 \text{ mH}_2\text{O}$. Pada debit ini, ketinggian air dan tekanan negatif sistem gravitasi lebih tinggi dibandingkan sistem sifonik.



Gambar 7. Grafik perbandingan ketinggian rata-rata $\bar{h}$ dan tekanan rata-rata $\bar{P}$ sistem sifonik dan sistem gravitasi dengan *roof drain* untuk DN75 pada target debit (a) 8 L/s , (b) 16 L/s , (c) 24 L/s , dan (d) $31,86 \text{ L/s}$, kapasitas maksimum sistem sifonik.

Hasil ini menunjukkan bahwa pada semua variasi debit, sistem gravitasi tidak lagi beroperasi sesuai dengan kriteria sistem gravitasi yaitu tekanan di dalam pipa sama atau mendekati dengan tekanan atmosfer. Tekanan statik di dalam pipa turun di bawah tekanan atmosfer, yaitu terjadi tekanan negatif. Disaat yang bersamaan, terjadi fluktuasi tekanan negatif di dalam pipa. Peningkatan kapasitas menyebabkan peningkatan ketinggian air dan tekanan negatif di dalam sistem gravitasi yang lebih tinggi dibandingkan sistem sifonik. Maka dapat disimpulkan, pada semua variasi debit, sistem gravitasi tidak lagi bekerja pada regime 1, tetapi bekerja pada regime 2 yang menjadi karakteristik sistem sifonik.

4. Kesimpulan dan Rekomendasi

Sistem sifonik yang menggunakan SRO tipe NOFLAF 300-075 dapat mencapai kapasitas maksimum (*full bore*) sebesar 31,86 L/s dengan tekanan rata-rata di PT-1 sebesar $\bar{P} = -1,45 \text{ mH}_2\text{O}$ dan ketinggian rata-rata air yang stabil pada $\bar{h}_1 = 80 \text{ mm}$. Waktu (*priming time*) yang dibutuhkan untuk mencapai kapasitas maksimum dengan ketinggian yang stabil adalah 51 detik.

Untuk diameter nominal yang sama yaitu DN 75, sistem sifonik yang menggunakan SRO tipe NOFLAF 300-75 memiliki kapasitas 14,29 kali lebih besar jika dibandingkan dengan sistem gravitasi yang menggunakan *roof drain* tipe *dome* dan memiliki kapasitas maksimum 2,23 L/s. Walaupun memiliki kapasitas yang tinggi, tetapi peningkatan ketinggian air sistem sifonik relatif rendah yaitu hanya 1,82 kali dari sistem gravitasi. Pada sistem sifonik, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *priming* dengan ketinggian yang stabil adalah 3,4 kali lebih cepat dibandingkan sistem gravitasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem sifonik dengan SRO tipe NOFLAF 300-075 memiliki performa yang tinggi dan sangat efisien jika dibandingkan sistem gravitasi sehingga sangat sesuai untuk digunakan pada bangunan dengan atap yang luas dan besar serta sangat sesuai untuk mengantisipasi peningkatan curah hujan ekstrim dengan durasi yang lebih pendek akibat perubahan iklim global. Ketika sistem sifonik beroperasi pada kapasitas maksimum sistem gravitasi 2.23 L/s, didapatkan performa yang lebih baik yaitu ketinggian yang lebih rendah.

Pada variasi target debit 8 L/s, 16 L/s, dan 24 L/s sistem gravitasi yang beroperasi pada regime 2. Berdasarkan hasil eksperimen, didapatkan bahwa sistem gravitasi memiliki *reserve capacity* dimana pada target debit 24 L/s sistem gravitasi memiliki ketinggian air stabil $\bar{h}_1 = 101 \text{ mm}$. Namun demikian, sistem gravitasi beroperasi pada regime 2 (*unsteady two phase flow*) yang menjadi karakteristik sistem sifonik dengan ketinggian rata-rata $\bar{h}_1$ meningkat 129,5 % dari 44 mm menjadi 101 mm dan tekanan negatif rata-rata $\bar{P}$ meningkat 5715 % dari $-0,027 \text{ mH}_2\text{O}$ menjadi $-1,57 \text{ mH}_2\text{O}$ serta terjadi fluktuasi tekanan di dalam pipa. Dengan demikian, walaupun sistem gravitasi memiliki *reserve capacity*, perlu diperhatikan pula peningkatan yang signifikan pada ketinggian air, tekanan negatif, serta terjadinya fluktuasi tekanan yang dapat menyebabkan kegagalan pada sistem gravitasi. Sementara itu, pada debit 31,86 L/s (kapasitas *full bore* sistem sifonik), ketinggian air sistem gravitasi terus meningkat dan mencapai 200 mm di detik ke-86. Akibatnya, pompa pengujian harus dimatikan untuk menghindari *overflow* di tangki pengujian.

Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengetahui perbandingan sistem gravitasi dan sistem sifonik pada seluruh ukuran diameter nominal (DN) yang digunakan pada sistem drainase air hujan di Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Tim peneliti berterima kasih atas bantuan, dari segi pengetahuan, waktu, dan dukungan yang diberikan oleh Bapak Achmad Widodo, Bapak Ojo Kurdi, dan Bapak Rusnaldy dari Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia, atas saran dan dukungannya selama penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] J.-L. Martel, F. P. Brissette, P. Lucas-Picher, M. Troin, and R. Arsenault, "Climate Change and Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves: Overview of Science and Guidelines for Adaptation," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 26, no. 10, pp. 1–18, 2021, doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0002122.
- [2] R. W. P. May and M. Escameia, "Performance of Siphonic Drainage Systems for Roof Gutters," HR Wallingford Ltd, Oxon, 1996.
- [3] S. Arthur and G. B. Wright, "Recent and future advances in roof drainage design and performance," *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 337–348, 2005, doi: 10.1191/0143624405bt127tn.
- [4] T. Lucke and S. Beecham, "Aeration and gutter water levels in siphonic roof drainage systems," *Build. Res. Inf.*, vol. 38, no. 6, pp. 670–685, 2010, doi: 10.1080/09613218.2010.503050.
- [5] R. W. P. May, "The Design of Conventional and Siphonic Roof Drainage Systems," *Water Environ. J.*, 1997, doi: 10.1111/j.1747-6593.1997.tb00088.x.
- [6] G. B. Wright, J. A. Swaffield, and S. Arthur, "the performance characteristics of multi-outlet siphonic roof drainage systems," *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, pp. 1–16, 2002, doi: 10.1061/40644(2002)48.
- [7] R. W. P. May, "Manual for the Design of Roof Drainage Systems: A guide to the use of European standard BS EN 12056-3:2000," HR Wallingford Ltd., Oxon, UK, 2003.
- [8] British Standards, "Gravity Drainage System Inside Building," BS EN 12056-3, 2000
- [9] ASPE Research Fondation, "Storm Drainage System Research Project," 2012
- [10] S. Beecham and T. Lucke, "Air water flows in building drainage systems," *Urban Water J.*, vol. 12, no. 6, pp.

- 455–467, 2015, doi: 10.1080/1573062X.2013.820335.
- [11] S. Arthur, J.A. Swaffield, and Richard W.P. May, “Priming of a siphonic rainwater drainage system,” 1998, *Rotterdam, Netherlands*.
 - [12] O. Ebeling, “Improvement in rainwater outlet,” Finland Patent 41451, 1967
 - [13] T. Lucke and S. Beecham, “Capacity loss in siphonic roof drainage systems due to aeration,” *Build. Res. Inf.*, vol. 38, no. 2, pp. 206–217, 2010, doi: 10.1080/09613210903236631.
 - [14] S. Arthur, G. Wright, and J. Swaffield, “Operational performance of siphonic *roof drainage* systems,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 6, pp. 788–796, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.08.015.
 - [15] T. Lucke and S. Beecham, “Cavitation, aeration and negative pressures in siphonic *roof drainage* systems,” *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 103–119, 2009, doi: 10.1177/0143624408101567.
 - [16] S. Arthur and G. B. Wright, “Siphonic *roof drainage* systems-priming focused design,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 6, pp. 2421–2431, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.08.021.
 - [17] S. Arthur and J. A. Swaffield, “Numerical modelling of the priming of a siphonic rainwater drainage system,” *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 83–91, 1999, doi: 10.1177/014362449902000207.
 - [18] A. Öngören and R. Materna, “Multi-phase flow characteristics of a siphonic *roof drainage* system under part load conditions,” *CIB W062 Symp. Int. Counc. Build. Res.*, no. 1, pp. 1–12, 2006.
 - [19] M. Escameia and R.W.P May, *Performance of Flat Roof Outlets*. 1996.
 - [20] A. Zikri, O. Kurdi, S. Syaiful, R. Rusnaldy, and M. Ikhsan, “*Investigasi Performa dan Kapasitas Sistem Air Hujan Gravitasi*,” ROTASI, vol. 27, no. 1, pp. 57-66, Jan. 2025. <https://doi.org/10.14710/rotasi.27.1.57-66>.
 - [21] American Standard of Mechanical Engineers, “ASME A112.6.9-2005, Siphonic *Roof drains* Siphonic *Roof drains*,” 2015