Available online at: http://jtb.ulm.ac.id/index.php/JTB
Volume 10 Nomor 1
ISSN: 2302-8394 (print)

SEBUAH REVIEW: EVALUASI DAN OPTIMASI JARINGAN PERPIPAAN AIR BERSIH

Dwi Cahya Rada[1], Radianta Triatmadja[1] dan Johan Syafri Mahathir A[1]
Magister Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
Jl. Grafika Kampus No.2 Senolowo Sinduadi Kab.Sleman DI Yogyakarta, 55284, Indonesia

ABSTRACT

This paper aims to provide a review of the evaluation and optimization of the water pipeline system for the community. This paper consists of two parts, namely the evaluation of the design of the installed transmission pipeline and the optimization of the distribution pipeline design to the public. The method that has been used in previous research is the basis for discussion. Evaluation and optimization methods are discussed using software to get the most suitable method.

Keyword :pipeline, transmission,distribution,evaluation,optimization

ABSTRAK

Makalah ini bertujuan untuk memberikan review tentang evaluasi dan optimalisasi sistem perpipaan air bagi masyarakat. Makalah ini terdiri dari dua bagian yaitu evaluasi desain pipa transmisi yang terpasang dan optimalisasi desain pipa distribusi kepada masyarakat. Metode yang digunakan pada penelitian sebelumnya menjadi dasar pembahasan. Evaluasi dan metode optimasi dibahas menggunakan perangkat lunak untuk mendapatkan metode yang paling sesuai.

Kata kunci: perpipaan,transmisi,distribusi,evaluasi,optimasi

1 PENDAHULUAN

Pertambahan penduduk pada tiap area secara eksponensial membutuhkan kebutuhan air bersih menjadi tantangan untuk para penyedia air bersih terutama dari pemerintah. Hal ini berarti bahwa penyediaan air bersih untuk penduduk diharapkan untuk seefisien mungkin. Jaringan transmisi dan distribusi air bersih pada umumnya berupa pompa, perpipaan, katup dan tangki penyimpanan yang menjadi usaha bersama para enjiner dan ilmuwan dalam menerapkan sistem yang efisien. Kehandalan dari sistem distribusi air bersih bergantung pada konfigurasi sistem, parameter desain perpipaan seperti tekanan dan debit yang melalui elemen – elemen perpipaan.

Correspondence: Dwi Cahya Rada
Email: cahyarada@gmail.com

Sistem distribusi air bersih masih beroperasi dengan menggunakan asumsi – asumsi yang sederhana dan analisis yang kaku sehingga sistem tersebut tidak dites pada berbagai kondisi yang memungkinan yang dapat ditemukan pada kondisi operasi atau beberapa skenario permintaan air bersih. Hal ini dapat menyebabkan penggunaan sumber daya yang tidak optimal pada situasi yang berada di lapangan. Usaha – usaha berkelanjutan perlu dilakukan untuk dapat mengurangi penggunaan sumber daya yang tidak optimal, kontaminasi dan biaya operasional sistem melalui optimasi dan analisis dari desain yang ada. Para peneliti telah melakukan optimasi dan metode evaluasi yang dapat diterapkan untuk menganalisa sistem distribusi air bersih. Metode ini mungkin akan menggunakan metode stokastik dan metaheristik untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Ketidakcukupan sistem distribusi air untuk memenuhi permintaan dan tekanan biasanya disebabkan oleh peningkatan populasi. Sumber permasalahan lain pada umumnya karena adanya kebocoran pada sistem distribusi dan adanya pengaruh burst atau semburan yang dapat menurunkan tekanan dari air. Burst atau semburan juga dapat mengakibatkan adanya penurunan kualitas dari air, biaya perawatan yang tinggi dari desain yang bergantung pada asumsi suplai yang tetap yang bertolak belakang dengan kondisi yang sebenarnya dimana suplai air tidaklah tetap tetapi terputus – putus. Desain dan konfigurasi sistem yang buruk dapat mengakibatkan sistem distribusi air bersih rentan terhadap kegagalan karena adanya asumsi yang kurang tepat, data statistik yang tidak memadai serta kesalah dalam perhitungan.

Kontaminasi tingkat tinggi merupakan suatu permasalahan yang ditimbulkan karena adanya suplai air yang terputus – putus, semburan dan kebocoran. Hal ini dilakukan dalam sistem di mana periode gangguan suplai diperpanjang karena tekanan yang tidak signifikan atau nol pada suatu sistem dan gangguan sistem yang sering terjadi. Penelitian ini menggunakan data yang didapatkan dari lapangan untuk mengoptimalkan sistem distribusi air dengan dampak lingkungan. Dengan kata lain, penelitian ini memberikan evaluasi pada sistem distribusi air bersih dan mengoptimalkan sistem tersebut dengan menggunakan model linier untuk mencapai solusi yang optimal. Dalam mengevaluasi sistem perpipaan tersebut pastinya tidak terlepas dari tantangan yang ada pada lokasi seperti permasalahan yang ditemui pada sisi Intake, sistem transmisi dan sistem distribusi itu sendiri. Optimasi itu sendiri berdasarkan dari model linier dengan menggunakan parameter diameter pipa, ketinggian, tekanan serta debit dari air. Paramater tersebut sangat berguna dalam menentukan model aliran dan kecepatan air pada pipa serta penentuan kehilangan tekanan dengan menggunakan WATERNET dan optimasi itu sendiri dengan menggunakan LINGO.

2 SISTEM TRANSMISI DAN DISTRIBUSI

Sistem penyediaan air terdiri dari proses ekstraksi dan transmisi air baku, pengolahan dan penyimpanan air, transmisi dan distribusi air jernih. Transmisi dan distribusi secara teknis adalah proses yang sama di mana air disalurkan melalui jaringan pipa yang disimpan secara berselang dan dipompa jika perlu untuk memenuhi permintaan dan tekanan dalam sistem. Perbedaan antara transmisi dan distribusi adalah dalam tujuannya, yang mempengaruhi pilihan konfigurasi sistem.

Sistem transmisi air terdiri dari saluran transmisi utama dengan kapasitas tinggi dan cukup konstan. Sistem ini dibangun untuk pengangkutan air mentah atau sebagian air yang telah diolah. Jalur sistem transmisi tidak langsung melayani konsumen sebagai bagian dari sistem air minum dan biasanya menghubungkan antara area pengolahan dengan beberapa penyimpanan pusat di daerah distribusi. Penyimpanan sementara atau *booster pumping station* mungkin diperlukan dalam kasus jarak jauh, topografi spesifik atau percabangan dalam sistem. Sistem transmisi air bercabang menyediakan air untuk lebih dari satu wilayah distribusi yang membentuk sistem pasokan air regional.

Sistem distribusi air terdiri dari jaringan pipa yang lebih kecil dengan banyak koneksi yang memasok air langsung ke pengguna. Variasi aliran dalam sistem tersebut jauh lebih luas daripada dalam kasus sistem transmisi air. Untuk mencapai operasi yang optimal, berbagai jenis reservoir, stasiun pompa, menara air, serta berbagai peralatan (katup, hidran, peralatan pengukur, dll.) Dapat dipasang dalam sistem.

Tujuan utama dari sistem transmisi dan distribusi air adalah memasok jumlah kebutuhan air yang cukup serta menjaga kualitas air yang diperoleh dari proses penjernihan air. Tiap tujuan tersebut hrus dipenuhi untuk semua pelanggan tiap saat pada skala sistem yang besar dengan pembiayaan yang dapat diterima. Berbicara dalam istilah hidrolik, kuantitas dan kualitas air yang cukup

dapat dipertahankan dengan tekanan dan kecepatan yang memadai. Menjaga pipa selalu di bawah tekanan secara drastis mengurangi risiko kontaminasi eksternal. Selain itu, pengangkutan air dengan kecepatan yang dapat diterima membantu mengurangi waktu retensi, yang mencegah penurunan kualitas akibat residu klorin rendah, penampakan sedimen, pertumbuhan mikroorganisme, dll. Oleh karena itu, air minum dalam transportasi dan distribusi sistem harus selalu dijaga di bawah tekanan minimum tertentu dan untuk alasan higienis tidak boleh dibiarkan stagnan di dalam pipa.

Mempertimbangkan aspek teknik, persyaratan kuantitas dan kualitas dipenuhi dengan membuat pilihan yang tepat dalam pemilihan komponen dan bahan. Komponen sistem yang digunakan untuk sistem transmisi dan distribusi air harus dibangun, yaitu dibuat dari bahan tahan lama yang tahan terhadap serangan mekanik dan kimia, dan pada saat yang sama tidak berbahaya bagi kesehatan manusia, selain itu dimensi dari komponen tersebut harus memenuhi standar yang ditetapkan. Akhirnya, dalam memenuhi tujuan kuantitas dan kualitas, perhatian khusus harus diberikan pada tingkat pengerjaan selama fase konstruksi dan juga pada saat melaksanakan operasi dan pemeliharaan sistem. Kurangnya konsistensi dalam setiap langkah yang ditunjukkan ini dapat menyebabkan pompa tidak berfungsi, bocor, pecah, dll. Dengan kemungkinan konsekuensi dari air yang terkontaminasi.

3 METODE EVALUASI DAN OPTIMASI

3.1 Metode Evaluasi Jaringan Perpipaan Air Bersih

Evaluasi kinerja teknis bermaksud untuk mengklasifikasikan jaringan distribusi air bersih sesuai dengan skala prestasi yang berupa indek prestasi. Indek prestasi mengevaluasi perilaku masing-masing elemen model nodal dan link dengan membandingkan nilai keduanya saat ini dengan nilai referensi untuk mendapatkan nilai kinerjanya. Metodologi evaluasi kinerja ini didasarkan pada tiga komponen (Carvalho & Teixeira, 1996) yaitu variabel keadaan, kurva kinerja dan operator generalisasi. Variabel keadaan terkait dengan aspek spesifik yang dipertimbangkan. Kurva kinerja menyatakan hubungan antara nilai variabel dan skala klasifikasi kinerja. Operator generalisasi mengumpulkan nilai-nilai kinerja individual untuk menghasilkan indeks kinerja sistem global. Operator generalisasi dapat berupa fungsi agregat rata-rata. Beberapa indek prestasi dapat digabungkan untuk mendapatkan indek prestasi global dari jaringan distribusi air bersih.

Kurva kinerja menghasilkan nilai kinerja antara 0% (tidak ada layanan) dan 100% (layanan optimal). Kurva ini mencoba menangkap hubungan relatif dari nilai variabel keadaan untuk fitur yang sedang dianalisis dengan digambar secara empiris. Kurva kinerja untuk tekanan mencoba menangkap gagasan bahwa tekanan nodal yang mendekati persyaratan minimum tekanan layanan lebih disukai karena mewakili kondisi energi yang lebih rendah karena elemen sistem berada di bawah tekanan mekanis yang lebih rendah dan sesuai dengan tingkat kerugian air yang lebih rendah. Kurva kinerja untuk kecepatan aliran pipa bermaksud untuk menyatakan bahwa nilai di atas maksimum yang disarankan tidak diinginkan.

Indek prestasi global diperoleh dengan menggunakan sofware WATERNET yang dibagi menjadi 2 yaitu indek prestasi untuk tekanan (IPpressure) dan indek prestasi untuk kecepatan (IPvelocity). WATERNET merupakan alat yang digunakan lintas batas untuk memodelkan, menganalisis dan mengevaluasi sistem distribusi air. WATERNET adalah perangkat lunak yang digunakan untuk menjalankan simulasi high-end pada sistem distribusi air yang memerinci secara hidraulik pada sistem distribusi air yang tertutup dan bertekanan yang biasanya berisi komponen seperti pompa, pipa, katup, tangki penyimpanan, dan reservoir.

3.2 Metode Optimasi Jaringan Perpipaan Air Bersih

Metode ini meminimalkan biaya pemasangan dan pengoperasian sistem sambil memenuhi permintaan dan kriteria hidrolik. Beberapa faktor yang harus ditentukan termasuk diameter pipa, panjang pipa yang sesuai, dan jumlah sambungan. Pendekatan yang digunakan adalah dengan menggunakan pendekatan *objective function* dan *constraints* (Samani & Mottaghi, 2006).

a. *Objective Function*

Objective function digunakan untuk meminimalisir biaya sistem yang dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan, (Samani & Mottaghi, 2006)

$$TCC = I(D_N) + h(R_k)$$

$I(D_N)$ = Pengeluaran untuk pipa – pipa (Rp)
$h(R_k)$ = Biaya untuk penghasil tekanan (Rp)

Dalam hal ini $I(D_N)$ adalah pengeluaran untuk pipa – pipa dan pemasangannya dimana merupakan fungsi dari diameter pipa (D_N) dan $h(R_k)$ merupakan biaya untuk fasilitas penghasil tekanan contohnya pada pompa intake, pompa IPA dan lain sebagainya.

Selain untuk meminimalisir biaya, penelitian terdahulu telah dilakukan dengan objective function atau tujuan pengoptimalan yang berbeda yang terdiri dari sisi ekonomis, sisi komunitas, sisi kinerja dan sisi lingkungan. Penulis telah merangkum tiap sisi tersebut dalam bentuk Tabel 1.

Tabel 1. Tujuan optimasi sistem perpipaan air bersih

Sisi Tujuan	Tujuan Optimasi	Judul	Penulis
Ekonomi	Biaya Modal	*Incorporation of variable speed pumping in multiobjective genetic algorithm optimization of the design of water transmission systems*	(Wu et al., 2012)
	Biaya Rehabilitasi	*Optimal rehabilitation model for water distribution systems*	(Kim & Mays, 1993)
	Biaya Operasi	*Optimal design and operation of multiquality networks under unsteady conditions*	(Ostfeld, 2005)
	Biaya Perawatan	*Scenario-based robust optimization of regional water and wastewater infrastructure*	(Kang & Lansey, 2013)
Komunitas	Manfaat dari solusi	*Fuzzy multiobjective optimization of water distribution networks.*	(Vamvakeridou-Lyroudia et al., 2005)
	Kualitas Air	*Optimizing hydraulics and water quality in water distribution networks using genetic algorithms*	(Dandy, 2000)
	Defisit Tekanan	*Automated construction of evolutionary algorithm operators for the bi-objective water distribution network design problem using a genetic programming based hyper-heuristic approach.*	(McClymont et al., 2014)
	Kegagalan Hidrolik	*Optimal design of water distribution systems using many-objective visual analytics.*	(Fu et al., 2013)

Tabel 1. Lanjutan

Sisi Tujuan	Tujuan Optimasi	Judul	Penulis
	Potensi kerusakan akibat kebakaran	*Least-cost design of water distribution networks including fire damages.*	(Filion & Jung, 2010)
Kinerja	*Robustness* dari Sistem	*Robust least-cost design of water distribution networks using redundancy and integration-based methodologies.*	(Babayan et al., 2007)
	Kehandalan Sistem	*Accounting for phasing of construction within the design of water distribution networks.*	(Creaco et al., 2019)
	Resilience dari Sistem	*Flexible water distribution system design under future demand uncertainty.*	(Basupi & Kapelan, 2015)
Lingkungan	Biaya Emisi	*Single-objective versus multiobjective optimization of water distribution systems accounting for greenhouse gas emissions by carbon pricing.*	(Wu et al., 2010)

b. *Constraints*

Persamaan *objective function* perlu diberikan batasan atau *constraints* dalam analisis yang berkaitan dengan pemenuhan kebutuhan air dengan parameter tekanan dan debit dan pemenuhan aliran yang melalui *node* dengan parameter ketinggian dan head tekan. Untuk setiap pipa dalam sistem, persamaan *objective function* harus memasukkan semua ukuran yang dijual di pasaran sehingga solusi optimal memberikan solusi yang realistis dan dapat diaplikasikan.

Constraints atau batasan – batasan untuk persamaan *objective function* terdiri dari batasan tekanan dan batasan kecepatan.

1) Batasan Tekanan
Dalam mempertimbangkan batasan tekanan, *node* untuk referensi perlu ditetapkan terlebih dahulu yang pada umumnya terletak pada fasilitas penghasil tekanan. Sehingga head tekan pada *node* I dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan, (Samani & Mottaghi, 2006)

$$p_i = H_R - \Delta Y_{R\text{-}i} - \sum_{i-NCP}^{m} HL_i$$

p_i = head tekan pada *node* I (m)
H_R = Head pada *node* referensi (m)
$\Delta Y_{R\text{-}I}$ = Perbedaan ketinggian antara *node* referensi dengan *node* I (m)
m = Jumlah pipa pada jalur R-i
$\sum_{i-NCP}^{m} HL_i$ = Tambahan dari penurunan head tekan sepanjang *node* referensi (m)

2) Batasan Kecepatan
Batasan kecepatan dan aliran diekspresikan dalam bentuk persamaan, (Samani & Mottaghi, 2006)

$$V_{min} \leq V_n \leq V_{max}$$

Dimana V_{min} dan V_{max} merupakan kecepatan yang diijinkan di dalam pipa (m/s). Sedangkan nilai Vn dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan, (Samani & Mottaghi, 2006)

$$V_n = \sum_{i=1}^{NCA} \frac{Q_n}{\frac{\pi}{4} D_{Ni}^2} X_{Ni}$$

V_n = Batasan Kecepatan (m/s)
Q_n = Debit Keluaran Air (L/s)
D_{Ni} = Diameter pipa ke-N pada lokasi i (m)
X_{Ni} = Variabel Zero-Unity

Batasan – batasan yang telah disebutkan merupakan bagian dari batasan – batasan hidrolik. Selain itu, terdapat batasan – batasan lain untuk optimasi yang telah dilakukan penelitian terdahulu yang dijelaskan pada Tabel 2

Tabel 2. Batasan optimasi sistem perpipaan air bersin

Batasan	Definisi	Judul	Penulis
Batasan Hidraulik	Batasan hidraulik yang diberikan oleh hukum fisika aliran fluida dalam jaringan pipa: (i) kekekalan massa aliran, (ii) kekekalan energi, (iii) kekekalan massa penyusun	*Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems.*	(Ostfeld & Tubaltzev, 2008)
Batasan Sistem	Batasan sistem diberikan oleh batasan dan persyaratan operasional Sistem Distribusi Air Bersih, misalnya, tekanan minimum / maksimum pada node (permintaan) dan kecepatan aliran dalam pipa, defisit / surplus air di tangki penyimpanan pada akhir periode simulasi, pengambilan air maksimum dari sumber	*An Approach for Integrated Optimization of Wastewater, Recycled and Potable Water Networks.*	(Dandy et al., 2009)
Batasan pada variabel keputusan x	Batasan pada variabel keputusan x, misalnya, batasan diameter pipa, panjang segmen pipa (disebut desain pipa terpisah), kapasitas stasiun pompa	*Multiobjective evolutionary computation approach for redesigning water distribution systems to provide fire flows.*	(Kanta et al., 2012)

4 KESIMPULAN

Untuk mendapatkan perencanaan sistim transmisi dan distribusi air bersih maka perlu adanya evaluasi serta optimasi pada perancangaan. Untuk memberikan evaluasi terhadap desain dapat menggunakan bantuan dari software WATERNET. Indek prestasi global diperoleh dengan menggunakan sofware WATERNET yang dibagi menjadi 2 yaitu indek prestasi untuk tekanan (IPpressure) dan indek prestasi untuk kecepatan (IPvelocity). WATERNET merupakan alat yang digunakan lintas batas untuk memodelkan, menganalisis dan mengevaluasi sistem distribusi air. Metode dalam optimasi dapat berdasarkan dari model linier dengan menggunakan parameter diameter pipa, ketinggian, tekanan serta debit dari air. Paramater tersebut sangat berguna dalam menentukan model aliran dan kecepatan air pada pipa serta penentuan kehilangan tekanan dengan meminimalkan biaya pemasangan dan pengoperasian sistem sambil memenuhi permintaan dan kriteria hidrolik.

DAFTAR RUJUKAN

Babayan, A. V., Savic, D. A., Walters, G. A., & Kapelan, Z. S. (2007). Robust Least-Cost Design of Water Distribution Networks Using Redundancy and Integration-Based Methodologies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *133*(1), 67–77. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2007)133:1(67)

Basupi, I., & Kapelan, Z. (2015). Flexible Water Distribution System Design under

Future Demand Uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *141*(4), 04014067. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000416

Carvalho, S., & Teixeira, D. M. (1996). *PERFORMANCE ASSESSMENT IN WATER SUPPLY by*.

Creaco, E., Campisano, A., Fontana, N., Marini, G., Page, P. R., & Walski, T. (2019). Real time control of water distribution networks: A state-of-the-art review. *Water Research*, *161*, 517–530. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.025

Dandy, G., Duncker, A., Wilson, J., & Pedeux, X. (2009). An approach for integrated optimization of wastewater, recycled and potable water networks. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009 - World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, *342*, 364–374. https://doi.org/10.1061/41036(342)35

Filion, Y. R., & Jung, B. S. (2010). Least-Cost Design of Water Distribution Networks Including Fire Damages. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *136*(6), 658–668. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000075

Fu, G., Kapelan, Z., Kasprzyk, J. R., & Reed, P. (2013). Optimal Design of Water Distribution Systems Using Many-Objective Visual Analytics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *139*(6), 624–633. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000311

Kang, D., & Lansey, K. (2013). Scenario-Based Robust Optimization of Regional Water and Wastewater Infrastructure. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *139*(3), 325–338. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000236

Kanta, L., Zechman, E., & Brumbelow, K. (2012). Multiobjective Evolutionary Computation Approach for Redesigning Water Distribution Systems to Provide Fire Flows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *138*(2), 144–152. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000156

Kim, J. H., & Mays, L. W. (1993). Optimal rehabilitation model for water distribution systems. *Water Resources Planning and Management and Urban Water Resources*, *120*(5), 400–403. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(1994)120:5(674)

McClymont, K., Keedwell, E. C., Savić, D., & Randall-Smith, M. (2014). Automated construction of evolutionary algorithm operators for the bi-objective water distribution network design problem using a genetic programming based hyper-heuristic approach. *Journal of Hydroinformatics*, *16*(2), 302–318. https://doi.org/10.2166/hydro.2013.226

Ostfeld, A. (2005). *Optimal Design and Operation of Multiquality Networks under Unsteady Conditions*. *131*(April), 116–124.

Ostfeld, A., & Tubaltzev, A. (2008). Ant Colony Optimization for Least-Cost Design and Operation of Pumping Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *134*(2), 107–118. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2008)134:2(107)

Samani, H. M. V., & Mottaghi, A. (2006). Optimization of Water Distribution Networks Using Integer Linear Programming. *Journal of Hydraulic Engineering*, *132*(5), 501–509. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2006)132:5(501)

Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., Walters, G. A., & Savic, D. A. (2005). Fuzzy Multiobjective Optimization of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *131*(6), 467–476. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2005)131:6(467)

Wu, W., Maier, H. R., & Simpson, A. R. (2010). Single-Objective versus Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems Accounting for Greenhouse Gas

Emissions by Carbon Pricing. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *136*(5), 555–565. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000072

Wu, W., Simpson, A. R., Maier, H. R., & Marchi, A. (2012). Incorporation of Variable-Speed Pumping in Multiobjective Genetic Algorithm Optimization of the Design of Water Transmission Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *138*(5), 543–552. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000195