

Model Tangki-Codeq untuk Transformasi Seri Data Hujan menjadi Aliran Sungai Periode Harian

Tank-Codeq Model for Transformation of Rainfall Data in to Daily River Flow Data Series

Sulianto

Jurusan Teknik Sipil - Fakultas Teknik - Universitas Muhammadiyah Malang
Alamat korespondensi: Jalan Raya Tlogomas no.246 Malang
email: sulianto@umm.ac.id

Abstract

The Codeq algorithm is a synthesis of chaotic search, opposition-based learning, differential evolution and quantum mechanism. Its reliability in solving non-linear and complex equation systems makes this method interesting to be applied to solve various optimization problems. This study examines the effectiveness of the Tangki-Codeq model in the analysis of the transformation of rainfall data series into daily flow data series. The Tangki-codeq model is a model resulting from the combination of the Sugawara Tank model simulation equation system and the Codeq Algorithm for the parameter optimization process. Model testing was carried out in the Welang Watershed, East Java, involving a daily observation data set for 15 years, namely 2016 - 2020. The test results show that the Tangki-Codeq model is able to present the relationship between rainfall data series into Welang River discharge data in a daily period very effectively. The Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) > 0.8 resulting from the calibration and validation stages shows that the model's output discharge curve can approach the observed discharge curve.

Keywords: Tank Model; Codeq Algorithm, Rainfall; Discharge.

Abstrak

Algoritma Codeq merupakan sintesa dari *chaotic search, opposition-based learning, differential evolution dan quantum mechanism*. Keandalannya dalam menyelesaikan sistem persamaan non linier dan kompleks menjadikan metode ini menarik diterapkan untuk menyelesaikan berbagai masalah optimasi. Penelitian ini mengkaji efektivitas model Tangki-Codeq pada analisis transformasi seri data hujan menjadi seri data aliran periode harian. Model Tangki-Codeq merupakan model dari hasil penggabungan sistem persamaan simulasi model Tangki Sugawara dan metode optimasi parameter berbasis algoritma Codeq. Pengujian model dilakukan di daerah aliran Sungai (DAS) Welang Jawa Timur dengan melibatkan set data amatan periode harian sepanjang 15 tahun, yaitu Tahun 2016 – 2020. Hasil pengujian menunjukkan model Tangki-Codeq mampu mempresentasikan hubungan seri data hujan menjadi data debit Sungai Welang periode harian dengan sangat efektif. Indikator Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) > 0.8 yang dihasilkan dari tahap kalibrasi dan validasi menunjukkan kurva debit luaran model dapat mendekati kurva debit amatan.

Kata Kunci: Model Tangki; Algoritma Codeq; Hujan; Debit.

PENDAHULUAN

Perkembangan metode metaheuristik yang revolusioner dan handal dalam menyelesaikan sistem persamaan besar dan kompleks, menjadikan metode ini menarik diterapkan untuk menyelesaikan masalah optimasi nilai parameter model konseptual hidrologi. Penggabungan metode metaheuristik dengan model konseptual hidrologi dapat menghasilkan model baru

yang handal dan praktis diaplikasikan. Model baru tersebut dapat melakukan kalibrasi parameter model konseptual hidrologi secara otomatis dengan memanfaatkan pasangan seri data hujan dan limpasan dengan jumlah yang terbatas.

Telah banyak diusulkan model baru dari hasil kombinasi model konseptual hidrologi dengan metode metaheuristik oleh para peneliti terdahulu, antara lain; HBV model

Please cite this article as:

Sulianto (2020). Model Tangki-Codeq Untuk Transformasi Seri Data Hujan Menjadi Aliran Sungai Periode Harian. *Media Teknik Sipil*, 22(1), 1-9. <https://doi.org/10.22219/jmts.v22i1.35939>

dan GR4J model dikombinasi dengan Algoritma Differential Evolution (DE) dan Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) (Piotrowski et al., 2017), Genetic Algorithm (GA) dikombinasi dengan NAM model 10 parameter dan Tank model 16 parameter (Ngoc et al., 2013). Model konseptual hidrologi lainnya yang berhasil dikembangkan adalah HBV Modified model 13 parameter dikombinasi dengan GA (Seibert, 2000), HBV model dan NAM model 15 parameter dikombinasi dengan metode optimasi CTSM (Jonsdottir et al., 2006), kombinasi algoritma Shuffle Complex Evolution (SCE) dengan AFFDEF model 13 parameter (Darikandeh, dkk, 2014), dan KIDS models 7 parameter dikombinasi dengan metode Sufi-2 dari software SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (X. Zhang et al., 2012).

Metode metaheuristik untuk kalibrasi otomatis parameter model Tangki juga telah banyak dikembangkan oleh para peneliti dunia. Eksplorasi model Tangki sistem 3 tangki disusun seri 14 parameter dikombinasi dengan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) berhasil diterapkan pada DAS Shigenobu di Jepang (Santos et al., 2011). Model Tangki sistem 4 tangki seri 14 parameter dikombinasi dengan Marquard algorithm, GA (Ngoc et al., 2013), SCE dan PSO (Kuok et al., 2011) juga berhasil menunjukkan kinerja sangat bagus. Algoritma SCE, GA, PSO, Artificial Immune System (AIS) dan Differential Evolution (DE) dikombinasi dengan model Tangki juga berhasil diterapkan pada DAS Yellow River di Cina dan DAS Reynold Creek Boise ID, DAS Mahantango Creek University Park, DAS Little River Tifton di Amerika Serikat. Kelima metode optimasi tersebut dapat bekerja dengan baik, namun GA dan Algoritma PSO dapat menunjukkan hasil paling baik dalam hal akurasi dan kecepatan konvergensinya dibanding tiga metode lainnya (Xuesong Zhang et al., 2008).

Kombinasi model Tangki dengan Algoritma PSO untuk analisis debit banjir dengan periode jam-jaman pada kawasan perkotaan di Taiwan dapat menunjukkan kinerja sangat baik (Hsu & Yeh, 2015). Modifikasi model Tangki menjadi Multi Tank model dikombinasikan dengan metode metaheuristik untuk memantau fluktuasi muka air tanah juga telah dilakukan oleh para

peneliti terdahulu. Kenji (2008) membuktikan bahwa Multi Tank model dengan sistem 6 tangki tersusun seri-paralel memiliki 27 parameter dikombinasi dengan algoritma DDS dapat menunjukkan hasil lebih baik dibanding luaran dari finite element method (FEM). Model Para-Tank sistem 8 tangki 32 parameter dikombinasi dengan algoritma DDS dan GA juga dapat menunjukkan kinerja cukup bagus dalam memprediksi fluktuasi muka air tanah di Yamagata Jepang. Dalam kasus ini kedua model yang dikembangkan dapat menunjukkan tingkat kesalahan yang hampir sama, namun metode optimasi berbasis algoritma DDS lebih efektif dalam hal kecepatannya mencapai kondisi konvergen (Huang & Xiong, 2010).

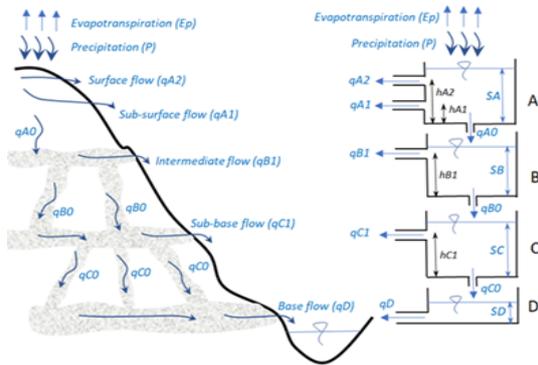
Artikel ini mengusulkan model baru dari penggabungan model Tangki dan algoritma Codeq. Algoritma Codeq merupakan salah satu metode metaheuristic yang diusulkan (Omran & al-Adwani, 2010). Algoritma ini merupakan sintesa dari *chaotic search*, *opposition-based learning*, *differential evolution* dan *quantum mechanism*. Algoritma Codeq berhasil diterapkan untuk menyelesaikan sistem persamaan hidrolis jaringan pipa kompleks (Sulianto, 2020). Pada kasus tersebut Algoritma Codeq memiliki kinerja sama baiknya dengan Algoritma DE, PSO dan SCE namun memiliki kelebihan pada kecepatan mencapai konvergensi. Model Tangki-Codeq yang dikembangkan dalam penelitian ini diselesaikan menggunakan kode program MFILE MATLAB, selanjutnya diuji tingkat keandalannya pada DAS Welang di Kabupaten Pasuruan Jawa Timur Indonesia. Analisis melibatkan set data periode harian. Hasil penelitian diharapkan dapat memberi kontribusi positif pada perkembangan bidang pemodelan hidrologi khususnya pada kegiatan pembangkitan data debit historik, sehingga dapat menjadi alternatif solusi untuk memecahkan masalah keterbatasan seri data debit yang sering menjadi kendala klasik dalam kegiatan pengembangan sumber daya air di negara-negara berkembang, termasuk di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Simulasi Model Tangki.

Model Tangki dikembangkan oleh Sugawara (1979, 1995) dan telah populer di Jepang, Korea, dan banyak negara lain di Asia

untuk peramalan banjir, pemodelan daerah aliran sungai, pengoperasian waduk dan lain-lain (Kuok et al., 2011). Faktor popularitas tersebut menjadikan model Tangki menarik dieksplorasi lebih lanjut. Konsep simulasi model Tangki sebagaimana disajikan Gambar 1, dipresentasikan oleh serangkaian tangki konseptual dimana penyimpanan tangki pertama diisi oleh curah hujan dan penyimpanan tangki berikutnya diisi oleh infiltrasi tangki atas. Penyimpanan di setiap tangki dibuang sebagian melalui outlet samping dan sebagian lagi meresap melalui outlet dasar ke tangki bawah berikutnya. Jumlah limpasan atau infiltrasi melalui outlet berbanding lurus dengan tinggi muka air dalam tangki.



Gambar 1. Skema simulasi model Tangki.

Pada Gambar 1, koefisien limpasan tangki pertama adalah CA1 dan CA3, koefisien limpasan tangki kedua adalah CB1, koefisien limpasan tangki ketiga adalah CC1, dan koefisien limpasan keempat adalah CD0. Satuan koefisien ini adalah 1/jam. CA0, CB0 dan CC0 masing-masing adalah koefisien infiltrasi dari tangka A, B, C dan satuannya adalah 1/jam. hA1, hA2, hB1 dan hC1 masing-masing adalah tinggi outlet horizontal setiap tangki dalam satuan mm. Tinggi lubang outlet horizontal mencerminkan konsep fisik proses limpasan; yaitu, infiltrasi dimulai segera tetapi limpasan permukaan tertunda karena pengambilan curah hujan awal. Di tangki yang lebih rendah, proses berlangsung dengan cara yang sama. Oleh karena itu, tinggi muka air di outlet yang diperoleh dengan mengurangi tinggi outlet dari penyimpanan di dalam tangki, mencerminkan waktu terjadinya setiap komponen limpasan. Perlu dicatat bahwa meskipun jumlah lubang limpasan yang digunakan di tangki pertama umumnya satu atau dua, tiga lubang di tangki pertama lebih akurat mencerminkan aliran

puncak limpasan banjir. Persamaan keseimbangan volume untuk model tangki dapat dinyatakan sebagai.

$$\frac{dSA}{dt} = R - Et - qA1 - qA2 - qA0 \quad (1)$$

$$\frac{dSB}{dt} = qA0 - qB0 - qB1 \quad (2)$$

$$\frac{dSC}{dt} = qB0 - qC1 - qC0 \quad (3)$$

$$\frac{dSD}{dt} = qC0 - qD \quad (4)$$

dimana SA = penyimpanan tangki pertama, yang disuplai oleh curah hujan (mm); SB, SC dan SD = penyimpanan tangki kedua, ketiga dan keempat, masing-masing disuplai oleh infiltrasi dari tangka-tangki di atasnya. R = curah hujan (mm/hari); dan qA0, qB0 dan qC0 = laju infiltrasi ke tangki bawah (mm/hari). qA2 = surface flow (mm/hari), qA1 = sub surface flow (mm/hari), qB1 = intermediate flow (mm/hari), qC1 = sub base flow (mm/hari), qD = baseflow (mm/hari). Besarnya limpasan atau infiltrasi melalui outlet tangki berbanding lurus dengan tinggi air terhadap outlet, dapat dinyatakan:

Tangki A:

$$qA0 = CA0 * SA;$$

$$qA1 = CA1 * (SA - hA1);$$

$$qA2 = CA2 * (SA - hA2) \quad (5)$$

Tangki B:

$$qB0 = CB0 * SB;$$

$$qB1 = CB1 * (SB - hB1) \quad (6)$$

Tangki C:

$$qC0 = CC0 * SC;$$

$$qC1 = CC1 * (SC - hC1) \quad (7)$$

Tangki D:

$$qD = CD * SD \quad (8)$$

SA, SB, SC, SD pada penerapan persamaan (5) – (8) merupakan nilai rerata dari periode ke t dan t-1. Total limpasan periode t dalam satuan mm/hari dinyatakan:

$$q(t) = qA1(t) + qA2(t) + qB1(t) + qC1(t) + qD(t) \quad (9)$$

dan dalam satuan m3/detik, dinyatakan:

$$Q(t) = q(t) * ADAS/86.4 \quad (10)$$

dimana,

ADAS - Luas DAS (Km²).

Kalibrasi dan validasi model

Proses kalibrasi parameter-parameter model Tangki dianalogikan sebagai proses optimasi untuk menemukan nilai optimum parameter-parameter model Tangki sedemikian hingga kurva aliran hasil simulasi berimpit dengan kurva aliran amatan. Atau dengan kata lain, fungsi tujuan optimasi adalah minimasi simpangan kurva debit observasi (Q^{obs}) dan debit simulasi model (Q^{sim}). Dalam metode heuristik fungsi tujuan dinyatakan sebagai fungsi *fitness*. Fungsi fitness adalah minimasi nilai *root mean square error (RMSE)*, dinyatakan sebagai:

$$F = \min[RMSE] = \min \left[\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - Q_t^{obs})^2}{n}} \right] \quad (11)$$

dimana,

- F : nilai *fitness*,
 Q_t^{sim} : debit simulasi model periode t ,
 Q_t^{obs} : debit observasi periode t ,
 n : jumlah titik data.

Validasi model menggunakan set data testing, yaitu set data periode lain yang tidak dilibatkan dalam proses kalibrasi. Evaluasi kinerja model menggunakan indikator *RMSE dan Nash-Shutcliffe efficiency (NSE)*. *NSE* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - Q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_{\bar{Q}}^{mean})^2} \quad (12)$$

dimana

- Q_t^{obs} : Debit observasi periode t , m³/detik
 $Q_{\bar{Q}}^{mean}$: Debit observasi rerata, m³/detik

Algoritma Codeq

Langkah-langkah penyelesaian Algoritma CODEQ pada kasus minimasi diuraikan sebagai berikut. (Omran & Salman, 2010)(Omran & al-Adwani, 2010)(Omran & Salman, 2009)

- 1) Variabel yang dioptimasi dinyatakan sebagai xi . Pada kasus optimasi parameter Model Tangki, maka variabel yang dioptimasi adalah 16 parameter model Tangki.
- 2) Inisialisasi populasi dari s vektor secara random pada daerah pencarian solusi.
- 3) Membangkitkan trial vektor $vi(t)$ untuk setiap vektor $xi(t)$ pada iterasi t dengan cara mutasi.

- 4) Jika fitness function dari trial vector $vi(t)$ lebih baik dari vector $xi(t)$, maka vector $vi(t)$ menggantikan posisi $xi(t)$, jika tidak maka sebaliknya.
- 5) Pembangkitan *new vector* $w(t)$ pada setiap iterasi t .
- 6) Jika fitness function dari *new vector* $w(t)$ lebih baik dari *worst vector* $xb(t)$ maka *vector* $w(t)$ menggantikan posisi $xb(t)$, jika tidak maka sebaliknya. *Fitness function* dihitung dengan menggunakan persamaan (11).
- 7) Langkah 3-6 diulang sampai terpenuhinya stopping criteria.
- 8) Menentukan nilai optimum parameter model Tangki, yaitu $xb(t)$ yang diperoleh dari nilai fitness terbaik.

Pada kondisi konvergen maka nilai optimum parameter model Tangki telah diperoleh. Selanjutnya dengan memanfaatkan sistim persamaan simulasi sesuai persamaan (1)-(10), maka variable luaran model Tangki dapat disajikan dalam bentuk data numeris maupun grafis.

Algoritma model Tangki-Codeq

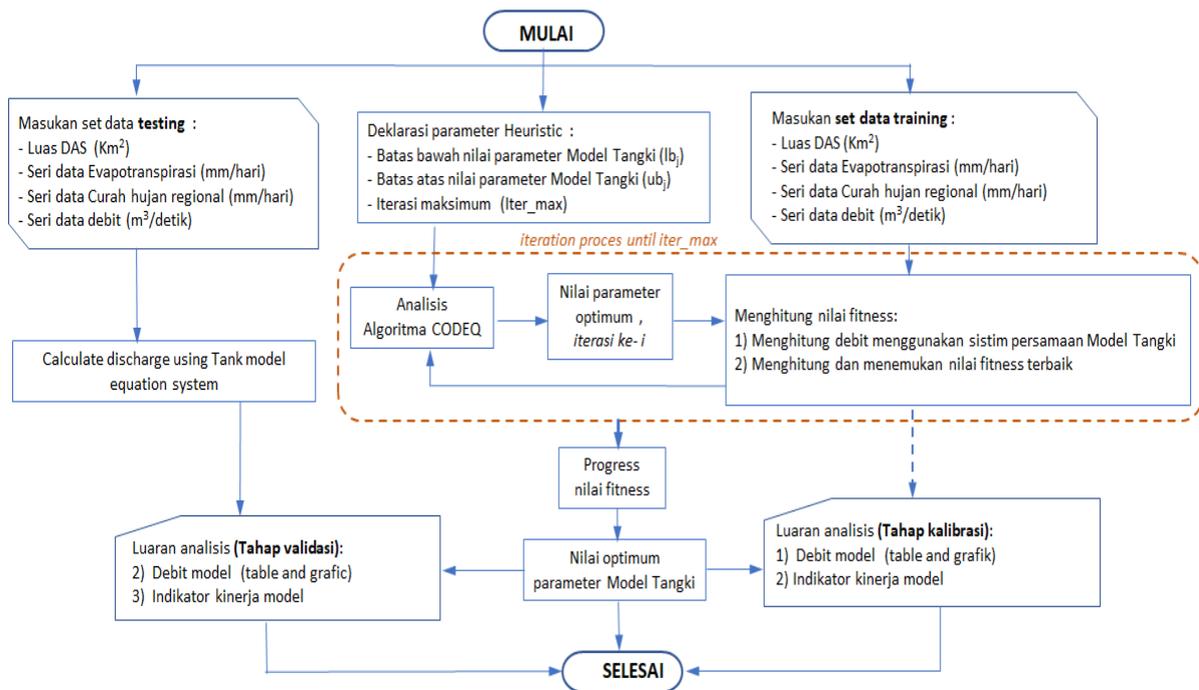
Algoritma model Tangki-Codeq secara skematis ditunjukkan Gambar 2. Sebagai data masukan model adalah luas DAS, set data hidroklimatologi training dan testing, serta parameter Algoritma Codeq yang relevan. Analisis untuk mencapai fitness terbaik dilakukan secara iterative dari generasi ke generasi menggunakan Algoritma Codeq, dan proses iterasi akan berhenti pada jumlah iterasi maksimum (*iter_max*) yang ditetapkan. Pada kondisi fitness terbaik akan diperoleh nilai optimum parameter-parameter Model Tangki. Selanjutnya simulasi model Tangki menggunakan nilai optimal parameternya serta dengan masukan set data training akan menghasilkan debit model dan indikator kinerja model tahap kalibrasi, dengan masukan set data testing akan menghasilkan debit model dan indikator kinerja model tahap validasi.

Data studi kasus

Studi kasus penelitian adalah daerah aliran sungai (DAS) Welang pada titik kontrol stasiun AWLR Dhompo. DAS Welang memiliki luas 473.39 km², secara geografis terletak pada 7°40'0" - 8°0'0" Lintang Selatan dan 112°35'0" - 112°55'0" Bujur Timur, dan

secara administratif terletak di Kabupaten Pasuruan, Provinsi Jawa Timur, Indonesia. Data hidroklimatologi sebagai masukan dalam penerapan model Tangki adalah evapotranspirasi, curah hujan dan debit. Panjang seri data hidroklimatologi yang dilibatkan dalam penelitian adalah 15 tahun, tercatat dari Tanggal 1 Januari 2006 hingga Tanggal 31 Desember 2020. Data evapotranspirasi potensial diperoleh dari analisis menggunakan metode Penman Modifikasi yang dihitung dari parameter iklim

bulanan dari hasil pencatatan Stasiun Tretes. Untuk keperluan analisis maka set data hidroklimatologi dibagi menjadi dua kelompok, masing-masing sebagai set data *training* dan set data *testing*. Seri data periode 1 Januari 2006 sampai dengan 31 Desember 2010 digunakan sebagai set data *training* untuk proses kalibrasi parameter model Tangki, dan seri data hidroklimatologi 1 Januari 2011 sampai 31 Desember 2020 sebagai set data *testing* untuk validasi model.



Gambar 2. Algoritma model Tangki-Codeq.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan model Tanki-Codeq menggunakan kode program MATLAB M-FILE yang terdiri dari sebuah program utama dan 9 sub program. Sistem persamaan Algoritma Codeq sebagai program utama yang didukung oleh 9 sub program function meliputi; 1) fungsi fitness, 2) proses kalibrasi, 3) proses validasi, 4) data curah hujan training, 5) data training evapotranspirasi, 6) data debit training, 7) data testing curah hujan, 8) data testing evapotranspirasi, 9) data testing debit.

Batas kelayakan nilai parameter-parameter model Tangki sangat bervariasi, nilainya sangat bergantung pada karakteristik

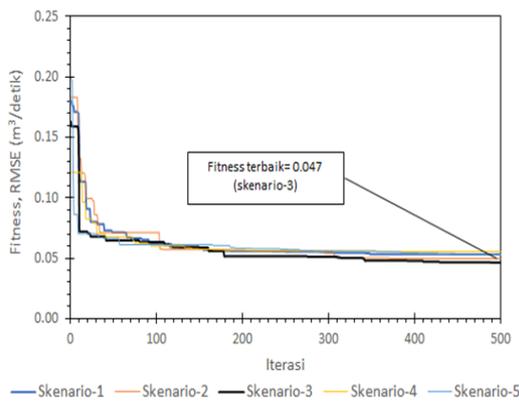
hubungan data iklim, karakteristik DAS dengan debit. Beberapa penelitian menentukan batas nilai parameter yang berbeda-beda. Sebagai upaya untuk menemukan nilai optimal global parameter-parameter model Tangki, maka analisis dilakukan melalui 5 skenario untuk setiap model dengan nilai batas parameter yang bervariasi. Untuk setiap skenario batas bawah dan batas atas parameter C bernilai sama, masing-masing 0.0001 dan 1.00. Batas bawah nilai parameter H, S sebesar 0.0001 dan nilai H, S meningkat sebagaimana ditunjukkan Tabel 1.

Tabel 1. Skenario pengujian model

Parameter	Batas	Sk-1	Sk-2	Sk-3	Sk-4	Sk-5
HA1, HA2, HB1, HC1, SA0, SB0, SC0, SD0	bawah	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	atas	50.00	150.00	250.00	350.00	500.00
CA0, CA1, CA2, CB0, CB1, CC0, CC1, CD	bawah	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	atas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Keterangan: Sk = skenario

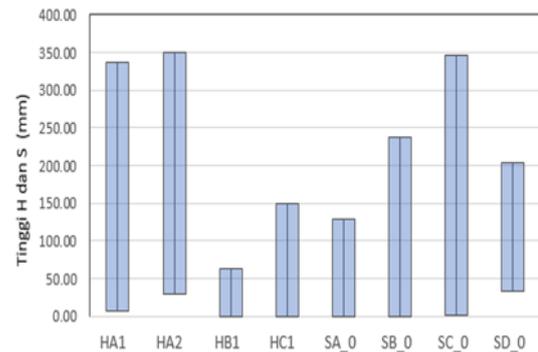
Running program model Tangki-Codeq dengan menggunakan jumlah iterasi 500 menghasilkan nilai fitness terbaik dari skenario-1 hingga skenario-5 berturut-turut 0.053, 0.050, 0.047, 0.055, 0.053. Progress pencapaian nilai fitness terbaik dari iterasi ke-1 hingga ke-500 ditunjukkan pada Gambar 3. Secara kualitatif hasil analisa dari 5 skenario menunjukkan hasil sama baiknya, namun secara kuantitatif hasil analisis dari skenario-3 paling baik.



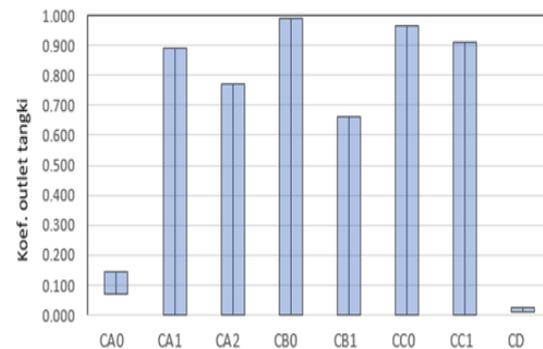
Gambar 3. Progress fitness terbaik.

Nilai optimum parameter-parameter model Tangki dari hasil analisis kelima skenario yang diterapkan ditunjukkan Gambar 4 dan Gambar 5. Nilai optimum semua parameter umumnya menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan, walaupun semuanya menunjukkan nilai fitness terbaik yang setara. Hal ini bisa terjadi karena faktor kompleksitas parameter dan sifat non linearitas sistem persamaan model Tangki, serta sifat acak dari algoritma Codeq. Daerah kelayakan nilai setiap parameter model Tangki merupakan superposisi dari nilai-nilai yang dihasilkan. Tentu nilai ini hanya berlaku pada studi kasus ini. Rentang nilai parameter model mengindikasikan tingkat sensitivitas parameter tersebut terhadap indikator kinerja model. Semakin kecil rentang nilai parameter maka semakin sensitif, demikian sebaliknya. Parameter HB1, HC1, SA_0 dan SD_0

menunjukkan sifat yang relatif sensitif dibanding parameter H dan S lainnya, dan parameter CA0 dan CD bersifat sangat sensitif.

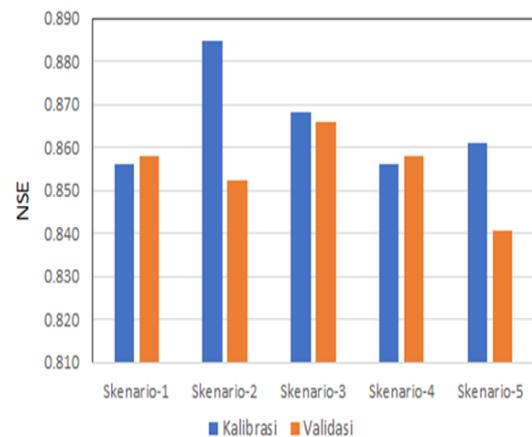


Gambar 4. Batas kelayakan nilai H dan S



Gambar 5. Batas kelayakan nilai C

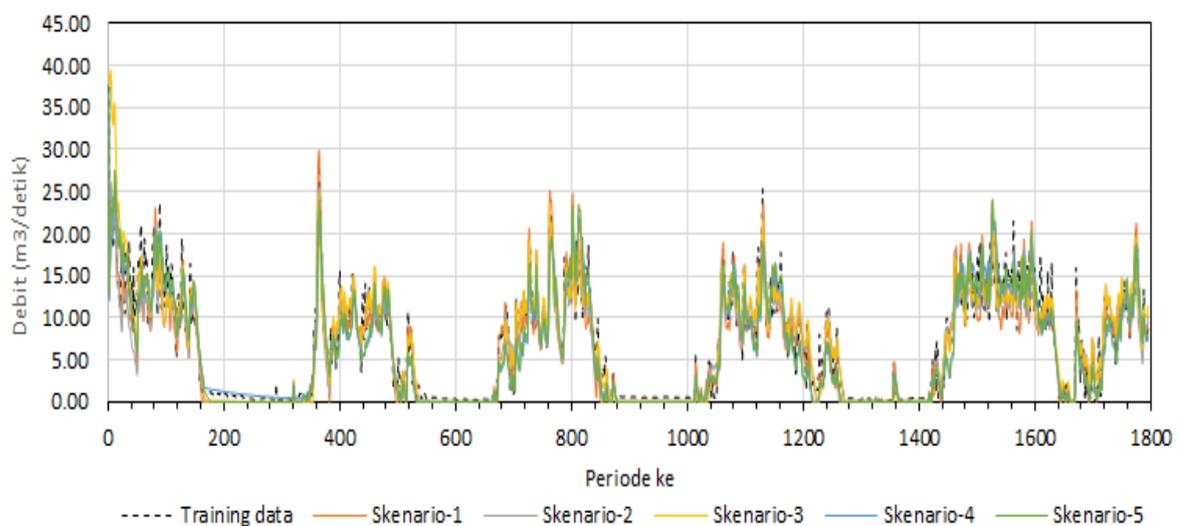
Indikator kinerja model ditunjukkan oleh nilai NSE secara grafis ditunjukkan Gambar 6. Skenario-1, skenario-3 dan skenario-4 menunjukkan konsistensinya, dimana kinerja pada tahap kalibrasi dan validasi tidak menunjukkan perbedaan yang nyata. Nilai NSE lebih dari 0.8 menunjukkan model Tangki-Codeq dapat bekerja efektif pada studi kasus DAS Welang.



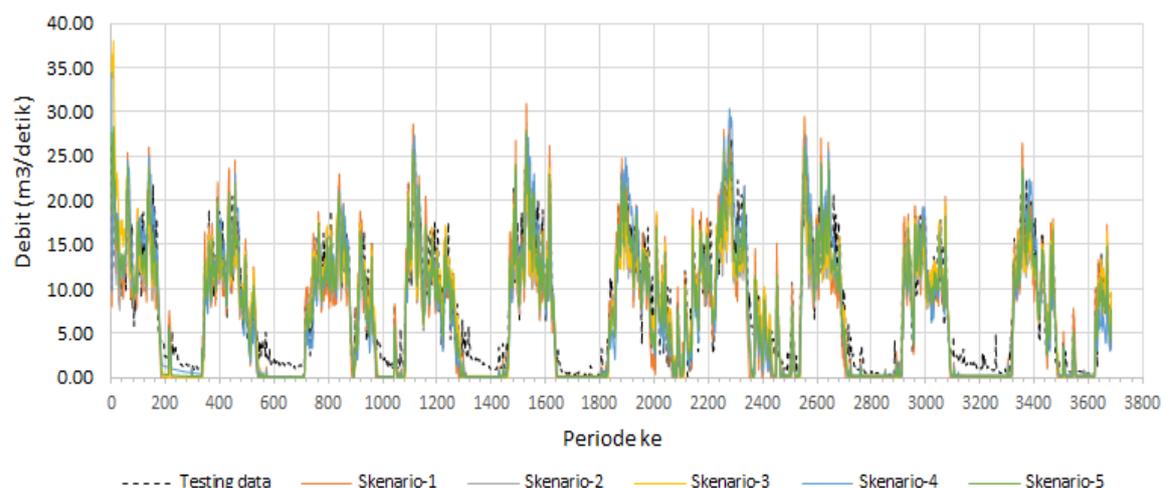
Gambar 6. Indikator kinerja model

Perbandingan fluktuasi debit model pada tahap kalibrasi dan validasi ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Pada gambar tersebut tampak bahwa trend fluktuasi debit model dapat mengikuti fluktuasi debit amatan, baik pada tahap kalibrasi maupun tahap validasi. Pada tahap kalibrasi tampak debit dari lima skenario berimpit, menunjukkan bahwa secara teoritik sistim persamaan yang dikembangkan konsisten. Pada tahap kalibrasi debit kecil dan debit besar dapat didekati dengan baik, namun pada aliran menengah pada kisaran 3.00 - 11.00 m³/detik terdapat perbedaan yang cukup mencolok. Pada kondisi ini debit luaran model cenderung

over estimate. Pada tahap validasi debit besar dari setiap luaran model terdapat sedikit perbedaan, namun pada debit rendah dan sedang cenderung berimpit. Pada debit besar luaran model cenderung *over estimate*, namun pada debit rendah sedikit *under estimate* bila dibandingkan dengan data debit *testing*. Secara kualitatif model Tangki-Codeq yang dikembangkan dapat mempresentasikan hubungan seri data hujan menjadi debit pada DAS Welang. Kesalahan yang terjadi mungkin disebabkan oleh tidak konsistennya hubungan antara set data iklim dengan debit. Hal tersebut adanya faktor tertentu yang tidak diakomodasi dalam sistim persamaan yang dikembangkan.



Gambar 7. Perbandingan fluktuasi debit training dan debit luaran model pada tahap kalibrasi



Gambar 8. Perbandingan fluktuasi debit testing dan debit luaran model pada tahap validasi

KESIMPULAN

Model Tangki-Codeq yang dikembangkan dalam dalam riset ini terbukti dapat bekerja sangat baik dalam mempresentasikan hubungan seri data iklim menjadi seri data debit periode harian pada DAS Welang. Pada tahap kalibrasi, progres pencarian nilai fitness terbaik dapat berjalan efektif. Upaya untuk menemukan kondisi optimal global dari sistim persamaan Model Tangki sulit ditemukan, oleh karena banyaknya parameter yang menentukan sifat non linearitas persamaan tersebut. Upaya menemukan kondisi optimal global dengan cara menerapkan analisis secara diskrit dengan batas nilai parameter yang sempit dapat dilakukan, namun secara teknis tidak efisien. Penentuan hubungan variable karakteristik fisik DAS dan karakteristik hubungan data iklim dan debit terhadap batas kelayakan nilai parameter DAS sangat diperlukan untuk penelitian selanjutnya, sehingga penerapan model Tangki dapat diterapkan lebih praktis.

DAFTAR PUSTAKA

- Darikadeh, D., Akbarpour, A., Pourezza, M.B., Hashemi, S.R. (2014). *Automatic calibration for estimation of the parameters of rainfall-runoff model*, SCIJOU. Journal of River Engineering. Vol. 2. Iss. 8 pp. 9.
- Hsu, P. Y. & Yeh, Y. L. (2015). Study on flood Para-Tank model parameters with particle swarm optimization. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 6(5), 911–923.
- Huang, X.-L. & Xiong, J. (2010). Parameter Optimization of Multi-tank Model with Modified Dynamically Dimensioned Search Algorithm. In *Proceedings of the Third International Symposium on Computer Science and Computational Technology* (Vol. 14, Issue 5).
- Jonsdottir, H., Madsen, H. & Palsson, O. P. (2006). Parameter estimation in stochastic rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 326(1–4), 379–393. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.004>
- Kuok, K. K., Harun, S. & Chiu, P. C. (2011). Comparison of particle swarm optimization and shuffle complex evolution for auto-calibration of hourly tank model's parameters. *International Journal of Advances in Soft Computing and Its Applications*, 3(3), 1–17.
- Ngoc, T. A., Hiramatsu, K. & Harada, M. (2013). Optimizing Parameters for Two Conceptual Hydrological Models Using a Genetic Algorithm: A Case Study in the Dau Tieng River Watershed, Vietnam. *JARQ*, 47(1), 85–96.
- Omran, M. G. H. & al-Adwani, F. (2010). *Using CODEQ to Train Feed-forward Neural Networks*. <http://arxiv.org/abs/1002.0745>
- Omran, M. G. H. & Salman, A. (2009). Constrained optimization using CODEQ. *Chaos, Solitons and Fractals*, 42(2), 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2009.01.039>
- Omran, M. G. H. & Salman, A. (2010). Improving the performance of CODEQ using quadratic interpolation. *ICAART 2010 - 2nd International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Proceedings, 1*, 265–270. <https://doi.org/10.5220/0002721702650270>
- Piotrowski, A. P., Napiorkowski, M. J., Napiorkowski, J. J., Osuch, M. & Kundzewicz, Z. W. (2017). Are modern metaheuristics successful in calibrating simple conceptual rainfall-runoff models? *Hydrological Sciences Journal*, 62(4), 606–625. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1234712>
- Santos, C. A. G., De MacEdo MacHado Freire, P. K., Mishra, S. K. & Soares, A. (2011). Application of a particle swarm optimization to the tank model. *IAHS-AISH Publication*, 347(July), 114–120.
- Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 215–224.
- Sulianto. (2020). Effectiveness of Several Metaheuristic Methods to Analyze Hydraulic Parameters in a Drinking Water Distribution Network. *World Journal of Engineering and Technology*, 08(03), 456–484. <https://doi.org/10.4236/wjet.2020.83034>
- Zhang, X., Hörmann, G., Fohrer, N. & Gao, J. (2012). Parameter calibration and uncertainty estimation of a simple rainfall-runoff model in two case studies. *Journal of Hydroinformatics*, 14(4), 1061–1074. <https://doi.org/>

10.2166/hydro.2012.084
Zhang, Xuesong, Srinivasan, R., Zhao, K. &
Liew, M. Van. (2008). Evaluation of
global optimization algorithms for
parameter calibration of a

computationally intensive hydrologic
model. *Hydrological Processes*,
22(November 2008), 430–441.
<https://doi.org/10.1002/hyp>