

Analisis Pengisian Awal (*Impounding*) pada Bendungan Raknamo Dengan Model Tangki

*Denik S. Krisnayanti¹, Margareth E. Bolla¹, Wilhelmus Bunganaen¹, Alvine C. Damayanti², Costandji Nait², Bilgardo E. D. N. R. Amaral¹

¹Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang

² Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

*)denik.krisnayanti@staf.undana.ac.id

Received: 27 November 2019 Revised: 19 Maret 2020 Accepted: 27 Maret 2020

Abstract

The impounding of the dam is the step that will be done after construction work on the dam be finished. This study aims to determine a long time and the volume of inflow on Raknamo dam in dry water year, low water year, normal water year and wet water year with tank model. Factors that affected the time of the first impounding of the dam is the amount of rainfall and evapotranspiration that has come in to the catchment area. The total volume of annual inflow Raknamo reservoir obtained in dry water year was in 15,489 million m³, low water year equal to 23,696 million m³, normal water year equal to 32,892 million m³ and wet water year equal to 44,068 million m³. In the calculation of the length of time filling the Raknamo reservoir used the volume of low water year. The accumulation of the volume of every month calculated so that length of time filling the Raknamo reservoir can reach the volume of planned at 14.091 million m³ within three a half months (three months fifteen days).

Keywords: *Impounding, tank model, raknamo reservoir*

Abstrak

Pengisian awal (impounding) bendungan adalah langkah yang dilakukan setelah pekerjaan konstruksi bendungan selesai. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan lama waktu dan besar volume inflow di Bendungan Raknamo pada tahun air kering, tahun air rendah, tahun air normal dan tahun air cukup dengan Model Tangki. Faktor yang berpengaruh terhadap waktu pengisian awal bendungan (impounding) ini yaitu volume inflow per tahun Waduk Raknamo diperoleh pada tahun air kering adalah sebesar 15,4898 juta m³, tahun air rendah sebesar 23,6960 juta m³, tahun air normal sebesar 32,8927 juta m³ dan pada tahun air cukup sebesar 44,0687 juta m³. Dalam perhitungan lama waktu pengisian digunakan volume inflow dari tahun air rendah. Akumulasi volume setiap bulannya dihitung sehingga lama waktu pengisian Waduk Raknamo dapat mencapai volume tampungan yang direncanakan yaitu sebesar 14,091 juta m³ dalam kurun waktu tiga setengah bulan (tiga bulan lima belas hari).

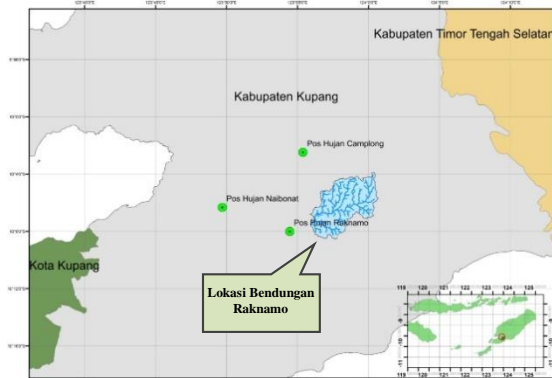
Kata kunci: *Pengisian awal, model tangka, waduk raknamo*

Pendahuluan

Kabupaten Kupang merupakan daerah kering yang sangat dipengaruhi oleh letak geografisnya. Daerah ini termasuk daerah dengan tinggi curah hujan tahunan rerata sekitar 1200 – 1400 mm. Musim basah (hujan) hanya terjadi 4-5 bulan dan selebihnya merupakan musim kering (kemarau). Hal ini ditandai dengan rendahnya akumulasi curah hujan bulanan pada bulan April – November yang berkisar di bawah 100 mm/bulan.

Musim basah yang relatif pendek dengan topografi pegunungan dan vegetasi yang jarang, mengakibatkan curah hujan yang kecil melimpah sebagai air permukaan dan mengumpul di sungai-sungai sebagai banjir dan selanjutnya terbuang ke laut. Salah satu bentuk upaya pemerintah Republik Indonesia dalam menanggulangi kekurangan air di Kabupaten Kupang adalah dengan membangun Bendungan Raknamo. Bendungan Raknamo terletak di Desa Raknamo, Kecamatan Amabi

Oefeto, Kabupaten Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur. Bendungan Raknamo ini terletak pada alur Sungai Noel Puames dengan panjang sungai 15,71 km dari hulu sungai hingga ke titik bendungan dan luas daerah tangkapan hujan seluas 38,34 km² (Nota Desain Bendungan Raknamo, 2015).



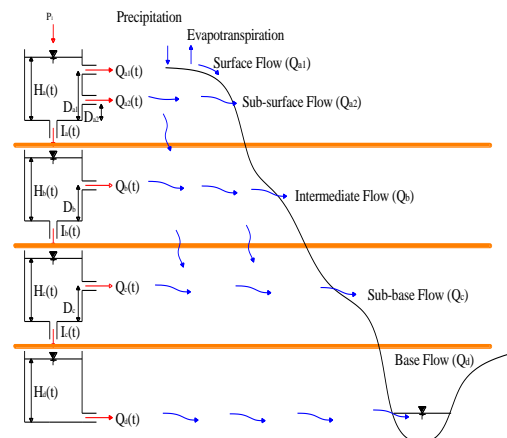
Gambar 1. Letak lokasi Bendungan Raknamo

Pembangunan bendungan ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu persiapan pembangunan, perencanaan pembangunan, pelaksanaan konstruksi dan pengisian awal (*impounding*). Pengisian awal merupakan tahapan yang dilakukan setelah pekerjaan konstruksi selesai dan merupakan saat-saat yang kritis yang harus dilalui dalam suatu pembangunan bendungan. Dalam tahap pengisian awal ini jumlah debit *inflow* yang masuk ke daerah genangan akan sangat berpengaruh, karena jika *inflow* yang masuk sedikit maka waktu pengisian awal akan lama dan dapat mengakibatkan kekeringan di hilir bendungan.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan dalam pengisian awal waduk seperti Model NRECA, Model F.J. Mock, Model Sacramento, Model Tangki dan menggunakan perangkat lunak Ribasim versi 7.00. Penggunaan perhitungan secara empiris dan menggunakan perangkat lunak Ribasim versi 7.00 pernah dilakukan pada pengisian awal Bendungan Jatigede (Nurhayati, 2015). Kedua cara tersebut menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dalam durasi waktu pengisian waduk Jatigede. Banyak peneliti juga yang memodelkan respons hidrologi dari daerah aliran air dengan Model Tangki (Basri *et al.*, 2002; Setiawan, 2003; Mustrafil, 2014; Suryoputro, 2018; Krisnayanti *et al.*, 2020).

Model tangki hidrologis adalah model konseptual hujan-limpasan (*conceptual rainfall runoff*). Model ini pertama kali diperkenalkan oleh Sugawara and Funiyuki tahun 1956 (Kuok *et al.*, 2011). Model ini terdiri dari serangkaian tangki linier yang tersusun seri atau paralel dengan lubang pengeluaran pada sisi samping dan bawah tangki.

Model tangki menghubungkan debit sebagai fungsi pengaruh dari hujan, evaporasi dan tampungan air di dalam tanah pada waktu sebelumnya sehingga model konseptual yang dikembangkan bersifat deterministik non linier. Model tangki meniru (*simulate*) daerah aliran sungai dengan mengganti sejumlah tampungan yang digambarkan dengan sederet tangki. Aliran yang melewati lubang-lubang yang berada pada dinding tangki akan mengalir sebagai limpasan, sedangkan yang mengalir melalui lubang di bagian dasar tangki merupakan infiltrasi (Suryoputro, 2018).



Gambar 2. Skematik model tangki rencana

Curah hujan yang jatuh pada suatu waktu $P(t)$ akan mengisi tangki I. Air yang tertampung oleh tangki I mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat lubang di dasar tangki dan masuk mengisi tangki II. Air yang tertampung dalam tangki II akan mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat dasar tangki dan masuk ke tangki III. Air berinfiltrasi lebih ke bawah lagi akan menstabilkan air tanah dan mengalir secara lambat keluar dari akuifernya yang digambarkan sebagian aliran lewat lubang-lubang di dinding tangki sehingga proses ini berulang sampai dengan tangki terakhir.

Parameter model tangki dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu: 1) parameter koefisien lubang pengeluaran (*outlet*) pada sisi dinding dan bagian bawah tangki, dan 2) parameter simpanan air tanah. Total *outflow* dari *outlet* pada sisi samping (Q) dari masing-masing tangki dianggap sebagai akumulasi aliran air dari sistem di DAS dan persamaannya adalah sebagai berikut:

$$Q(t) = Qa1(t) + Qa2(t) + Qb(t) + Qc(t) + Qd(t) \quad (1)$$

di mana $Qa1(t)$ merupakan nilai limpasan pada *outlet* pertama pada tangki 1, $Qa2(t)$ merupakan nilai limpasan pada *outlet* kedua pada tangki 1, kemudian $Qb(t)$ merupakan nilai limpasan pada

outlet tangki 2 dan $Q_c(t)$ merupakan nilai limpasan pada outlet tangki 3. Untuk persamaan neraca air di dalam model tangki:

$$\frac{d}{dt}H(t) = P(t) - Q(t) - E(t) \quad (2)$$

dengan P adalah curah hujan (mm/hari), E adalah evapotranspirasi (mm/hari), Q total limpasan (mm/hari). H adalah tinggi penyimpanan air (mm), t adalah waktu (hari). Pada saat awal ($t=1$), kondisi awal tinggi air penyimpanan di tangki A ($H_a(1)$), tangki B ($H_b(1)$), tangki C ($H_c(1)$) dan tangki D ($H_d(1)$) ditentukan. Untuk saat langkah berikutnya ($t+1$) penyimpanan di setiap tangki diperbaharui sebagai berikut:

$$H_a(t+1) = H_a(t) + P(t) - Q_{a1}(t) - Q_{a2}(t) - I_a(t) \quad (3)$$

$$H_b(t+1) = H_b(t) + I_a(t) - Q_b(t) - I_b(t) \quad (4)$$

$$H_c(t+1) = H_c(t) + I_b(t) - Q_c(t) - I_c(t) \quad (5)$$

$$H_d(t+1) = H_d(t) + I_c(t) - Q_d(t) \quad (6)$$

di mana $H_a(t+1)$ adalah tampungan pada tangki 1, $H_a(t)$ adalah nilai awal tampungan pada tangki 1, $P(t)$ adalah curah hujan, $Q_{a1}(t)$ adalah nilai limpasan pada outlet pertama pada tangki 1, $Q_{a2}(t)$ adalah nilai limpasan pada outlet kedua pada tangki 1, $I_a(t)$ adalah nilai infiltrasi pada tangki 1. Sedangkan $H_b(t+1)$ adalah tampungan tangki 2, $H_b(t)$ adalah nilai awal tampungan pada tangki 2, $Q_b(t)$ adalah nilai limpasan pada outlet tangki 2, $I_b(t)$ adalah nilai infiltrasi pada tangki 2, $H_c(t+1)$ adalah tampungan pada tangki 3, $H_c(t)$ adalah nilai awal tampungan pada tangki 3, $Q_c(t)$ adalah nilai limpasan pada outlet tangki 3, $I_c(t)$ adalah nilai infiltrasi pada tangki 3, dan $H_d(t+1)$ adalah tampungan pada tangki 4, $H_d(t)$ adalah nilai awal tampungan pada tangki 4, $Q_d(t)$ adalah nilai limpasan pada outlet tangki 4.

Sugawara *et al.* (1956) menyarankan nilai awal pada Model Tangki dapat didekati berdasarkan *ploting hidrograf* pada kertas skala logaritmik. Selanjutnya dicari puncak-puncak debit *hidrograf* dan diukur laju penurunan debit *hidrograf* dan diukur laju penurunan debit setelah debit-debit puncak dengan Persamaan (7).

$$Q(t) = Q_0 e^{-rt} \quad (7)$$

di mana r merupakan konstanta laju penurunan debit, t merupakan waktu (detik), e merupakan bilangan eksponensial = 2.718, Q_0 merupakan debit puncak awal ($m^3/detik$), dan $Q(t)$ merupakan penurunan debit ($m^3/detik$)

Nilai parameter pengali ($C_{i,j}$) pada masing-masing outlet adalah sebagai berikut:

$$C_{ia} = C_{Qa1} = C_{Qa2} = (1 - r)/3 \quad (8)$$

$$C_{ib} = C_{Qb} = C_{ia}/5 \quad (9)$$

$$C_{ic} = C_{Qc} = C_{ib}/5 \quad (10)$$

$$C_{id} = 0,001 \quad (11)$$

di mana C_{ia} merupakan koefisien infiltrasi tangki 1, C_{ib} merupakan koefisien infiltrasi tangki 2, C_{ic} merupakan koefisien infiltrasi tangki 3, C_{id} merupakan koefisien infiltrasi tangki 4.

Model tangki sendiri merupakan model yang paling rumit diantara beberapa model dalam menghitung debit andalan untuk *impounding* waduk dikarenakan memiliki koefisien dan parameter yang lebih banyak serta memiliki tingkat ketelitian yang lebih baik dari model lainnya. Untuk mendapatkan optimasi parameter yang mendekati kondisi riil di lapangan, dalam simulasi model dapat digunakan pula optimasi *algoritma genetic* (Rahman, 2011; Akalily *et al.*, 2014; Sulianto & Setiono 2012; Krisnayanti *et al.*, 2020). Penggunaan metode optimasi *algoritma genetic* ini untuk meningkatkan kinerja Model Tangki agar dapat diaplikasikan lebih praktis dan efektif untuk analisis transformasi data hujan menjadi data aliran sungai. Namun beberapa peneliti juga mengukur kinerja model optimasi parameter dengan menggunakan koefisien korelasi kesalahan seperti *root mean square error* (RMSE); *mean absolute error* (MAE); *logarithmic RMSE* (LOG); standar χ ; standar kuadrat χ^2 ; *relative error* (RE); dan *squared relative error* (RR) (Fujihara *et al.*, 2001; Setiawan *et al.*, 2003; Mustrafil, 2014).

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menghitung lama waktu jumlah debit *inflow* yang masuk ke dalam daerah tampungan Waduk Raknamo untuk tahun air kering, tahun air rendah, tahun air normal dan tahun air cukup dengan menggunakan model tangki. Optimasi parameter pada kinerja model tangki menggunakan koefisien korelasi kesalahan dibantu program *Microsoft Excel 2007*.

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di daerah tangkapan hujan Bendungan Raknamo dengan panjang sungai 15,71 km (Nota Desain Bendungan Raknamo, 2015). Bendungan Raknamo terletak di Desa Raknamo, Kabupaten Kupang dengan koordinat $10^{\circ} 07' 08''$ LS dan $123^{\circ} 55' 54''$ BT. Obyek yang ditinjau adalah debit dan volume *inflow* pada pengisian awal (*impounding*) pada Bendungan Raknamo berdasarkan data curah hujan dan iklim. Pada penelitian ini sumber data diperoleh dari hasil pengukuran peneliti (data primer) dan data yang diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Lasiana, Balai Wilayah Sungai (BWS) Nusa Tenggara II dan Konsultan Supervisi Bendungan Raknamo (data sekunder).

Data primer pada penelitian ini berupa data hasil pengukuran aliran dasar (*baseflow*) pada sungai Noel Puames dan data sekunder berupa data curah hujan Stasiun Camplong, Naibonat dan Raknamo, data panci evaporasi Stasiun Naibonat, data teknis bendungan, serta data topografi.

Dalam penelitian ini menggunakan metode kuantitatif yang merupakan penelitian secara sistematis dengan mengembangkan perhitungan model matematika. Metode ini dilaksanakan dengan menghubungkan suatu fenomena alam di dalam pengamatan dengan perhitungan-perhitungan yang dapat mewakili fenomena alam tersebut sehingga tahapan dalam penelitian ini adalah pertama menghitung besarnya curah hujan setengah bulanan tiap tahun potensial, kemudian menghitung besarnya evapotranspirasi potensial.

Tahap selanjutnya adalah menghitung debit simulasi sementara dengan model tangki untuk tahun 1994-1996, kalibrasi debit simulasi dengan debit observasi tahun 1994-1996, menghitung debit simulasi tahun 1992-2016, menghitung probabilitas keandalan dengan menggunakan kriteria dari Suyono Sosrodarsono, menghitung lama waktu pengisian Bendungan Raknamo hingga mencapai volume tampungan rencana dan yang terakhir membandingkan hasil penelitian dengan hasil perhitungan perencana.

Hasil dan Pembahasan

Data teknis mengenai Bendungan Raknamo merupakan data sekunder yang diperoleh atau dikumpulkan dan disatukan oleh studi sebelumnya

atau yang diterbitkan oleh sebuah instansi yang dimaksudkan disini adalah konsultan perencana. Data teknis mengenai Bendungan Raknamo diperoleh ditunjukkan pada Tabel 1.

Analisis data evapotranspirasi

Evapotranspirasi (potensial) sangat diperlukan dalam perhitungan debit model tangki sehingga perlu dihitung nilainya. Evapotranspirasi ini direkap dalam kurun waktu setengah bulanan dikarenakan debit yang dianalisa dengan model tangki menggunakan evapotranspirasi setengah bulanan. Menurut Soemarto (1986) dalam menghitung evapotranspirasi ini diperlukan data evaporasi yang diperoleh dari data panci evaporasi (*evaporation pan*) dan koefisien panci di mana setelah dilakukan perkalian antara koefisien panci dengan data evaporasi panci. Nilai evapotranspirasi setengah bulanan diperoleh dari hasil analisa data panci evaporasi dengan menggunakan Persamaan 12.

$$PET = Ce \times Ep \quad (12)$$

di mana PET merupakan evapotranspirasi potensial, Ce merupakan angka koefisien panci nilainya berkisar antara 0,7 – 0,75 dan Ep merupakan Evaporasi panci.

Tabel 2 dan Gambar 3 merupakan evaporasi panci setengah bulanan dan grafik evapotranspirasi potensial pada Waduk Raknamo. Pada Gambar 3 terlihat bahwa evapotranspirasi potensial tertinggi pada bulan Agustus yang merupakan puncak musim kemarau di Kabupaten Kupang umumnya dan DAS Raknamo khususnya.

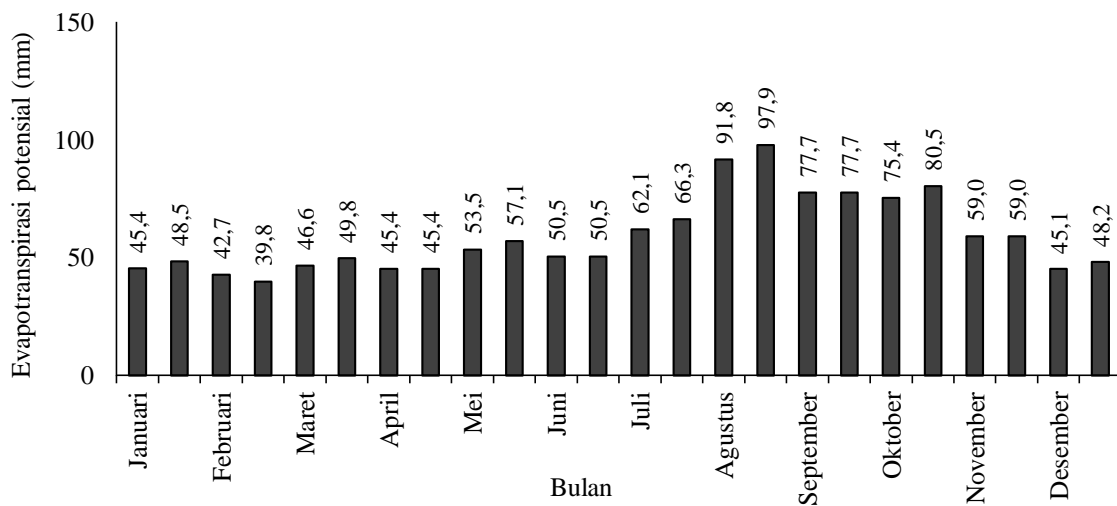
Tabel 1. Data teknis daerah genangan Bendungan Raknamo

No	Data teknis daerah genangan	Satuan
1	Luas tangkapan air	38,34 km ²
2	Panjang sungai	15,71 km
3	Elevasi muka air maksimum	+ 104,00 m
4	Elevasi muka air minimum	+ 93,63 m
5	Elevasi muka air banjir Q ₁₀₀₀	+ 106,30 m
6	Elevasi muka air banjir Q _{PMF}	+ 108,21 m
7	Tampungan waduk kotor	14,09 juta m ³
8	Tampungan waduk efektif	10,26 juta m ³
9	Tampungan mati	3,83 juta m ³
10	Luas genangan (HWL)	147,30 ha
11	Hujan tahunan rata-rata	
	Stasiun Hujan Camplong	1.258 mm
	Stasiun Hujan Raknamo	1.522 mm
12	Volume Inflow tahunan Q 80%	14,59 juta m ³
13	Debit rata-rata musim hujan	1,380 m ³ /detik
14	Debit rata-rata musim kemarau	0,233 m ³ /detik

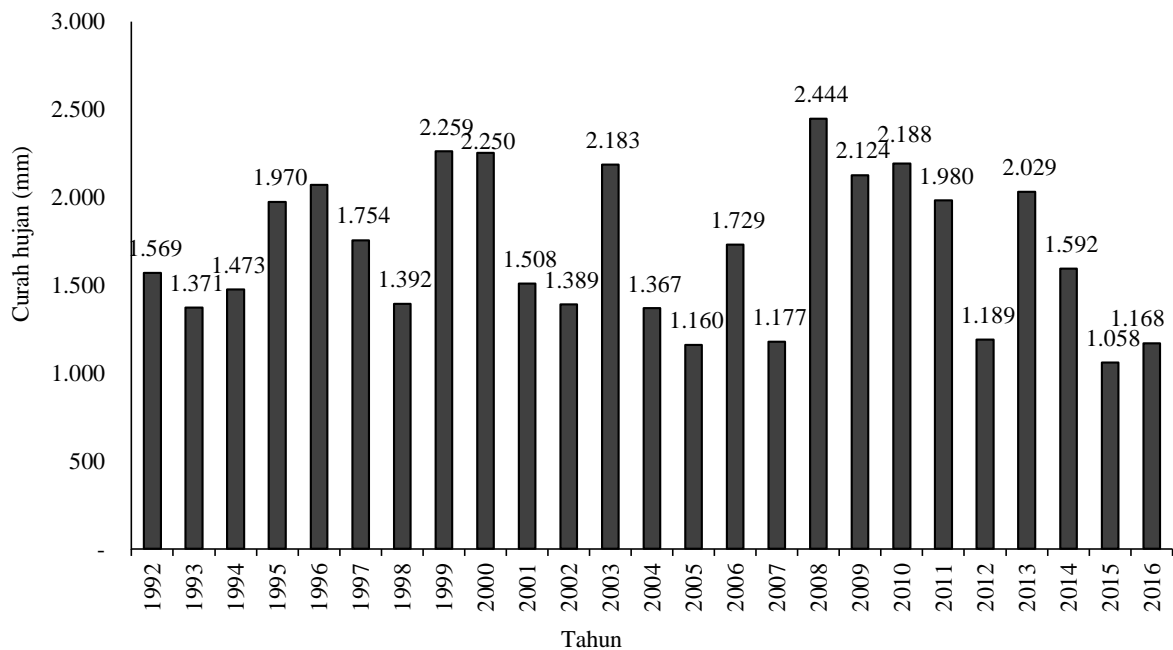
Sumber: Nota desain Bendungan Raknamo, 2015

Tabel 2. Rekapitulasi data evaporasi setengah bulanan di Waduk Raknamo

Bulan	Jumlah hari	Jumlah evaporasi	Bulan	Jumlah hari	Jumlah evaporasi (mm)
Januari	15	45,4	Juli	15	62,1
	16	48,5		16	66,3
Februari	15	42,7	Agustus	15	91,8
	14	39,8		16	97,9
Maret	15	46,6	September	15	77,7
	16	49,8		15	77,7
April	15	45,4	Oktober	15	75,4
	15	45,4		16	80,5
Mei	15	53,5	November	15	59,0
	16	57,1		15	59,0
Juni	15	50,5	Desember	15	45,1
	15	50,5		16	48,2



Gambar 3. Grafik evapotranspirasi potensial pada Waduk Raknamo



Gambar 4. Grafik curah hujan tahunan pada Bendungan Raknamo

Analisis data curah hujan

Data curah hujan setengah bulanan hasil rekap setengah bulanan yang sudah di peroleh perlu dianalisa terlebih dahulu agar dapat digunakan pada simulasi debit model tangki. Adapun analisis data curah hujan tersebut dilakukan melalui dua tahap yaitu uji konsistensi data dan perhitungan curah hujan rata-rata daerah pada DAS Raknamo. Uji konsistensi dilakukan untuk memastikan bahwa data curah hujan yang telah diperoleh telah konsisten dan siap digunakan untuk perhitungan selanjutnya.

Uji konsistensi pada dasarnya dilakukan untuk mengetahui perubahan data atau gangguan data yang terjadi di lingkungan sekitar penakar hujan terdapat garis tren. Oleh karena telah diketahui bahwa pengujian konsistensi data pada penelitian ini membandingkan antara data akumulasi curah hujan tahunan masing-masing stasiun hujan terhadap akumulasi dari rerata curah hujan dari stasiun hujan lainnya. Jika data curah hujan salah satu stasiun hujan yang diamati mengalami penyimpangan dengan tren maka perlu dikoreksi agar data tersebut dapat konsisten dengan kategori nilai determinasi yang tidak memuaskan (berada di kisaran $0 \leq r^2 \leq 0,5$) atau nilai determinasi yang memuaskan (berada di kisaran $0,50 \leq r^2 \leq 1,00$) (Da Silva *et al.*, 2015).

Berdasarkan perhitungan diketahui bahwa ketiga stasiun hujan tersebut memiliki data yang konsisten dan dapat digunakan untuk perhitungan selanjutnya. Luas daerah tangkapan hujan Bendungan Raknamo adalah seluas 38,34 km² sehingga menurut dengan kriteria pengamatan untuk daerah antara 250 ha (2.5 km²) sampai dengan 50.000 ha (500 km²) dapat diwakili dengan dua atau tiga titik pengamatan curah hujan (Sosrodarsono, 2003).

Untuk memperoleh rata-rata curah hujan setengah bulanan pada daerah tangkapan hujan tersebut digunakan metode rata-rata aritmatik yang merupakan rata-rata dari curah hujan yang diambil dari tiga stasiun hujan yakni Stasiun Camplong, Naibonat dan Raknamo yang berada dalam suatu kawasan. Daerah tangkapan hujan pada Bendungan Raknamo kurang dari 500 km² dan termasuk dalam kategori daerah tangkapan hujan yang kecil sehingga metode rata-rata aritmatik dapat digunakan (Sosrodarsono, 2003). Rumus untuk menghitung rata-rata curah hujan setengah bulanan:

$$R_{ave} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{n} \quad (13)$$

Di mana R_{ave} merupakan rata-rata curah hujan, $R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$ merupakan besarnya curah hujan pada masing-masing stasiun, n merupakan banyaknya stasiun hujan.

Hasil perhitungan curah hujan tahunan pada daerah tangkapan di Bendungan Raknamo dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa rata-rata curah hujan tahunan di Pos Stasiun Hujan Camplong dari tahun 1992 – 2016 berkisar 1.272 mm/tahun.

Perhitungan menggunakan model tangki untuk kalibrasi

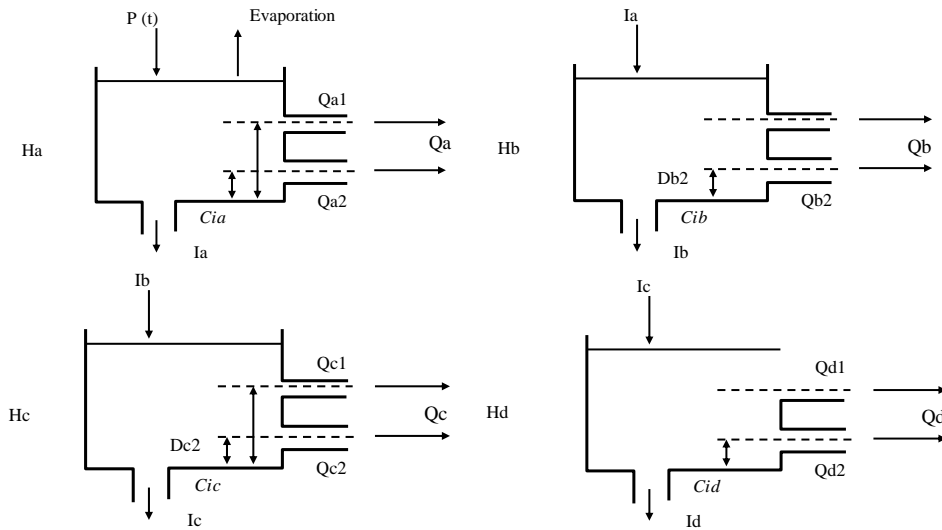
Model tangki merupakan perhitungan simulasi debit dengan penyederhanaan yang mensimulasi limpasan dengan susunan tanah secara vertikal. Proses pengerjaan dimulai dari beberapa tahap yaitu:

Persamaan model tangki asli

Model Tangki pada dasarnya mensimulasi curah hujan yang jatuh pada suatu waktu $P(t)$ yang kemudian akan mengisi tangki I. Air yang tertampung oleh tangki I mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat lubang di dasar tangki dan masuk mengisi tangki II. Air yang tertampung dalam tangki II akan mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat dasar tangki dan masuk ke tangki III. Air berinfiltrasi lebih ke bawah lagi akan menstabilkan air tanah dan mengalir secara lambat keluar dari akuifernya yang digambarkan sebagian aliran lewat lubang-lubang di dinding tangki. Proses ini berulang sampai tangki terakhir.

Persamaan model tangki modifikasi

Pada dasarnya rumus tangki modifikasi yang dikembangkan memiliki konsep yang sama namun berbeda dalam penyajian dan penjabarannya pada rumus asli tidak menggunakan dua jenis tangki yang berbeda seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Pada persamaan model tangki modifikasi penelitian ini hanya menggunakan satu jenis tangki saja yaitu tangki dengan dua lubang *outlet* untuk limpasan dan satu lubang infiltrasi yang digunakan untuk mempermudah dalam perhitungan dan penyamaan konsep perhitungan. Untuk susunan model tangki digunakan empat buah tangki tersusun seri yang disesuaikan dari sifat daerah pengalirannya. Untuk data debit observasi bulanan ditampilkan pada Tabel 3 dan deretan tangki penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Deretan tangki modifikasi

Tabel 3. Data debit observasi bulanan pada Sungai Noel Puames

Tahun	Bulan	Debit observasi bulanan			Kehilangan	
		m ³ /dtk	mm/bln	mm/thn	mm/bln	mm/thn
1994	Januari	0,44	9	281,6	265	1.293
	Februari	1,43	25		415	
	Maret	2,09	41		240	
	April	4,90	92		83	
	Mei	1,40	27		0	
	Juni	1,46	27		0	
	Juli	1,22	24		0	
	Agustus	1,11	22		0	
	September	0,31	6		0	
	Oktober	0,00	0		7	
	Nopember	0,00	0		35	
	Desember	0,46	9		248	
1995	Januari	1,05	20	702,7	559	1.477
	Februari	1,24	22		253	
	Maret	10,52	205		437	
	April	8,71	164		29	
	Mei	4,11	80		0	
	Juni	2,83	53		0	
	Juli	1,82	35		0	
	Agustus	1,49	29		0	
	September	1,28	24		0	
	Oktober	1,22	24		0	
	Nopember	1,09	21		130	
	Desember	1,29	25		68	
1996	Januari	3,10	60	886,6	250	1.490
	Februari	8,22	145		273	
	Maret	10,31	201		14	
	April	6,21	117		0	
	Mei	4,55	89		0	
	Juni	3,74	71		0	
	Juli	3,37	66		0	
	Agustus	3,40	66		0	
	September	0,09	2		0	
	Oktober	0,07	1		16	
	Nopember	0,09	2		104	
	Desember	3,50	68		833	

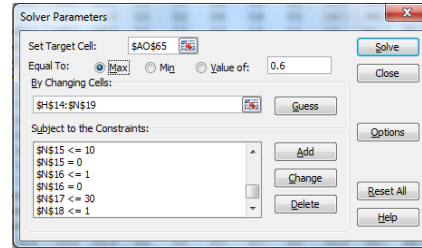
Tabel 4. Nilai koefisien dan parameter hasil *solver*

Tangki 1		Tangki 2		Tangki 3		Tangki 4	
Ha	0,00	Hb	0,00	Hc	528,84	Hd	2550,27
Da1	60,00	Db1	0,00	Dc1	0,00	Dd1	0,00
CQa1	0,00	CQb1	0,00	CQc1	0,00	CQd1	0,00
Da2	15,00	Db2	30,00	Dc2	0,00	Dd2	0,00
CQa2	0,12	CQb2	0,04	CQc2	0,01	CQd2	0,00
CIa	0,10	CIb	0,03	CIc	0,01	CI d	0,00

Kalibrasi debit simulasi dan debit observasi menggunakan *solver* pada *microsoft excel*

Berdasarkan perhitungan di atas, koefisien determinasi (r^2) belum memenuhi syarat $0,50 \leq r^2 \leq 1,00$ (untuk nilai r^2 yang memuaskan). Untuk itu dibantu dengan menggunakan *solver* pada *Microsoft Excel 2007* yang ditunjukkan pada Gambar 6. Nilai pada *set target cell* yang merupakan nilai r^2 akan dimaksimalkan nilainya dengan optimasi nilai pada sel *by changing cells*. Pada pilihan *subject to the constraints* merupakan

kumpulan sel-sel yang dibatasi nilainya dengan nilai yang telah diberikan (Setiawan *et al.*, 2003).



Gambar 6. Solver pada *Microsoft Excel*

Tabel 5. Hasil kalibrasi debit simulasi dan debit observasi tahun 1994-1996

Tahun	Bulan	Debit simulasi (Q_s) (m ³ /detik)	Debit observasi (Q_o) (m ³ /detik)
1994	Januari	1,43	0,44
	Februari	3,87	1,43
	Maret	4,08	2,09
	April	4,04	4,90
	Mei	2,55	1,40
	Juni	1,55	1,46
	Juli	0,70	1,22
	Agustus	0,67	1,11
	September	0,67	0,31
	Oktober	0,63	0,00
	November	0,62	0,00
	Desember	1,55	0,46
1995	Januari	4,48	1,05
	Februari	5,48	1,24
	Maret	7,62	10,52
	April	7,16	8,71
	Mei	5,18	4,11
	Juni	3,86	2,83
	Juli	2,35	1,82
	Agustus	1,20	1,49
	September	1,18	1,28
	Oktober	1,08	1,22
	November	1,19	1,09
	Desember	1,07	1,29
1996	Januari	2,40	3,10
	Februari	4,69	8,22
	Maret	4,32	10,31
	April	3,61	6,21
	Mei	2,37	4,55
	Juni	1,53	3,74
	Juli	1,06	3,37
	Agustus	1,01	3,40
	September	0,99	0,09
	Oktober	0,92	0,07
	November	0,91	0,09
	Desember	5,97	3,50

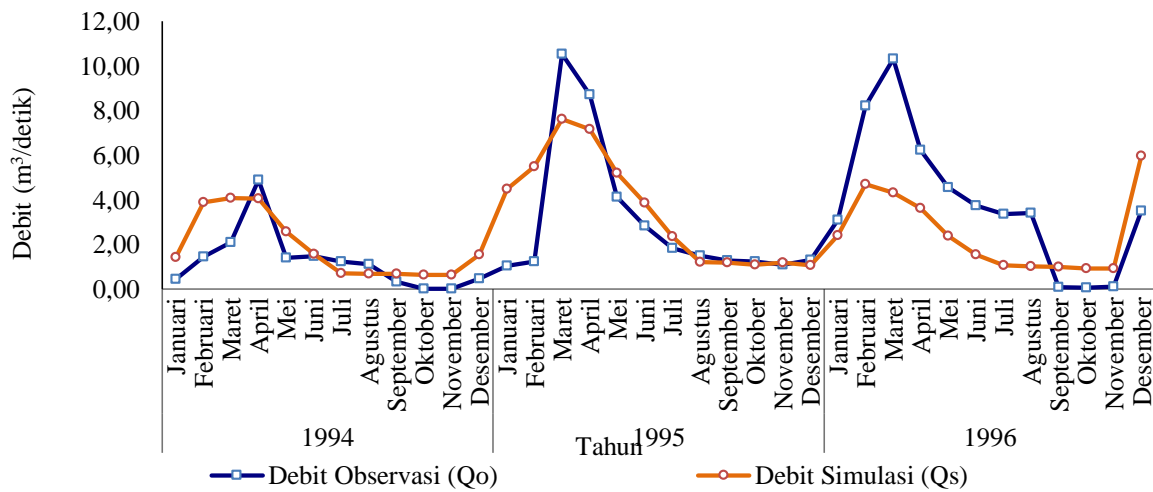
Nilai koefisien dan parameter hasil *solver* pada Tabel 4 merupakan hasil optimasi koefisien dan parameter debit simulasi Sungai Noel Puames dengan debit observasi. Nilai dari koefisien dan parameter ini digunakan sebagai faktor pengali pada simulasi debit dari tahun 1992 hingga pada tahun 2016. Parameter pada debit simulasi Sungai Noel Puames dan debit observasi sudah mendekati dan dapat saling mewakili seperti ditunjukkan pada Tabel 5 dan Gambar 7.

Berdasarkan pada Tabel 5 dari tahun 1994 – 1995 dapat dilihat bahwa nilai debit maksimum limpasan hasil simulasi dan observasi berada pada bulan Maret tahun 1995 yaitu sebesar 7,62 m³/detik dan 10,52 m³/detik sedangkan untuk debit minimum limpasan hasil simulasi berada pada bulan November tahun 1994 sebesar 0,62 m³/detik dan debit minimum limpasan hasil observasi pada bulan Oktober dan November tahun 1994 yaitu bernilai nol (0). Selanjutnya dilakukan

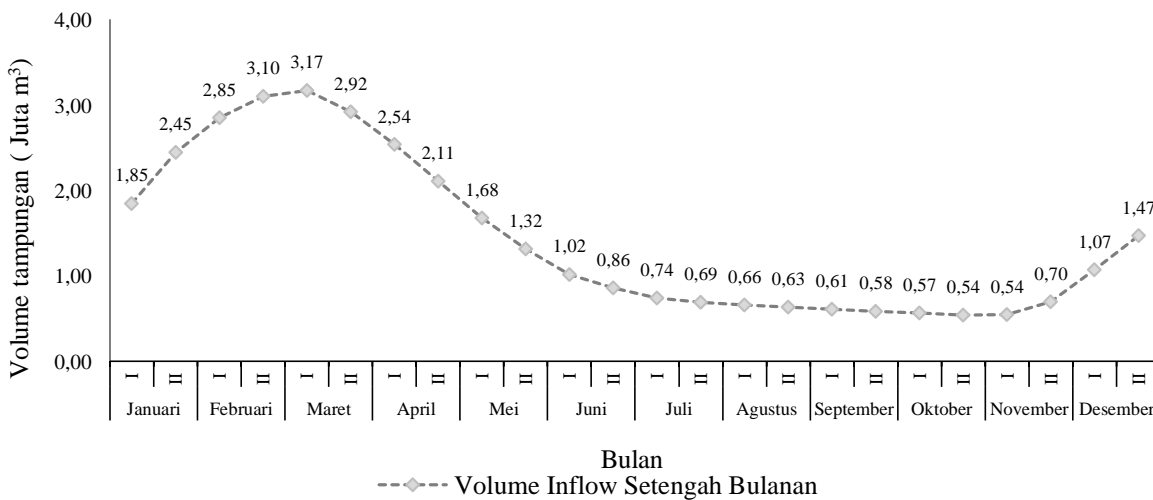
penggambaran dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 7, yaitu bentuk hidrograf dari debit observasi dan debit simulasi yang dihasilkan sudah menyerupai sehingga debit dari tahun 1992 – 2016 yang dapat disimulasikan dan diperkirakan mendekati dengan kenyataannya dengan nilai koefisien determinasi (r^2) sebesar 0,504 yang sudah memenuhi syarat.

Perhitungan debit simulasi model tangki dengan koefisien dan parameter hasil kalibrasi

Hasil perhitungan volume *inflow* setengah bulanan secara lengkap ditunjukkan dalam Gambar 8. Volume *inflow* setengah bulanan merupakan jumlah volume air yang masuk ke dalam bendungan dalam kurun waktu setengah bulan. Perhitungan ini menghasilkan jumlah volume air yang akan tertampung dalam setengah bulanan untuk tiap tahunnya dari tahun 1992 sampai dengan tahun 2016.



Gambar 7. Hidrograf debit observasi dengan debit simulasi tahun 1994-1996



Gambar 8. Grafik volume inflow setengah bulanan pada Bendungan Raknamo tahun 1992-2016

Tabel 6. Rekap volume inflow dengan peluang keandalan pada Daerah Tangkapan Hujan Bendungan Raknamo

Bulan	Kriteria musim							
	Tahun air kering		Tahun air rendah		Tahun air normal		Tahun air cukup	
	97.30%		75%		51%		26.02%	
	m ³ /dtk	Juta m ³	m ³ /dtk	Juta m ³	m ³ /dtk	Juta m ³	m ³ /dtk	Juta m ³
Januari	0,504	1.349	1,073	2.875	1,639	4.390	1,867	5.001
Februari	0,926	2.239	1,833	4.434	2,433	5.886	3,060	7.402
Maret	1,043	2.792	1,659	4.443	2,108	5.646	2,910	7.794
April	0,741	1.921	1,349	3.496	1,802	4.670	2,311	5.990
Mei	0,460	1.233	0,727	1.947	0,980	2.624	1,689	4.525
Juni	0,354	0.917	0,505	1.309	0,590	1.531	1,017	2.636
Juli	0,322	0.862	0,440	1.178	0,523	1.401	0,660	1.768
Agustus	0,304	0.814	0,405	1.086	0,481	1.289	0,576	1.542
September	0,297	0.771	0,389	1.007	0,460	1.191	0,547	1.418
Oktober	0,274	0.733	0,350	0.938	0,413	1.106	0,489	1.310
November	0,292	0.756	0,340	0.881	0,449	1.163	0,549	1.423
Desember	0,412	1.104	0,577	1.545	0,745	1.996	1,217	3.260
Jumlah		15.490		25.140		32.893		44.069

Tabel 7. Akumulasi tampungan Bendungan Raknamo (satuan: juta m³)

Bulan		Tahun air rendah 75.34%	Akumulasi tampungan	Keterangan
Januari	I	0,000	0,000	Awal <i>plugging</i>
	II	1,593	1,593	
Februari	I	2,179	3,771	Terpenuhi
	II	2,302	6,074	
Maret	I	2,259	8,333	Terpenuhi
	II	2,314	10,647	
April	I	1,902	12,550	Terpenuhi
	II	1,553	14,102	
Mei	I	1,148	15,250	Terpenuhi
	II	0,776	16,026	
Juni	I	0,670	16,696	Terpenuhi
	II	0,629	17,325	
Juli	I	0,602	17,927	Terpenuhi
	II	0,576	18,503	
Agustus	I	0,553	19,056	Terpenuhi
	II	0,532	19,589	
September	I	0,513	20,101	Terpenuhi
	II	0,494	20,596	
Oktober	I	0,477	21,073	Terpenuhi
	II	0,461	21,534	
November	I	0,446	21,980	Terpenuhi
	II	0,434	22,415	
Desember	I	0,667	23,081	Terpenuhi
	II	0,851	23,932	

Pada perhitungan sebelumnya telah diperoleh debit simulasi dari tahun 1992-2016, namun belum diketahui berapa volume yang masuk ke dalam bendungan dalam kurun waktu setengah bulanan. Berdasarkan data rekap debit simulasi sebelumnya maka data tersebut dikonversi ke dalam satuan volume (juta m³). Perhitungan volume *inflow*

setengah bulanan dilakukan dengan menggunakan rumus:

$$\text{Volume inflow (juta m}^3\text{)} = \frac{\text{Debit} \times \text{Jumlah hari} \times 60 \times 60 \times 24}{10^6}$$

Contoh perhitungan *inflow* setengah bulanan pada bagian (I) bulan Januari adalah sebagai berikut:

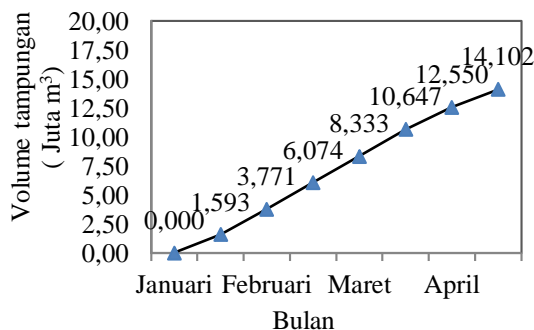
Jumlah hari pada bagian I bulan Januari = 15 hari
 Debit *inflow* (Q) = 0,54 m³/detik, sehingga,

$$\text{Volume inflow (juta m}^3\text{)} = \frac{0,54 \times 15 \times 60 \times 60 \times 24}{10^6}$$

$$\text{Volume inflow (juta m}^3\text{)} = 0,6998 \approx 0,7 \text{ juta m}^3$$

Untuk perhitungan jumlah volume *inflow* yang masuk ke dalam Bendungan Raknamo pada tiap tahun dalam kriteria musim dapat dilihat Tabel 6. Probabilitas debit *inflow* pada Bendungan Raknamo dibagi dalam empat kategori berturut-turut adalah; 1) Tahun air kering dengan tingkat probabilitas 97,30%, total *inflow* ke dalam bendungan pertahunnya adalah 15,4898 juta m³. 2) Tahun air rendah dengan tingkat probabilitas 75,34% total *inflow* ke dalam bendungan pertahun adalah sebesar 25,1395 juta m³. 3) Tahun air normal dengan tingkat probabilitas 50,68% diperoleh total *inflow* ke dalam bendungan pertahun sebesar 32,8927 juta m³ dan 4) Tahun air cukup dengan tingkat probabilitas 26,02% diperoleh total *inflow* ke dalam bendungan pertahunnya sebesar 44,0687 juta m³.

Berdasarkan Tabel 7 dapat dilihat awal *plugging* yang merupakan penutupan saluran *inlet* dan lubang pipa *drain* pada dasar bendungan sehingga mulai pada saat itu aliran air menjadi tumpungan pada Bendungan Raknamo. *Plugging* dilakukan pada pertengahan bulan Januari sehingga akumulasi dari volume *inflow* Bendungan Raknamo mulai dihitung dari waktu tersebut dan melampaui kapasitas bendungan yang diketahui sebesar 14,091 juta m³ pada akhir bulan April dalam kurun waktu 3,5 (tiga setengah) bulan. Lama waktu pengisian awal Bendungan Raknamo ditunjukkan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Lama waktu pengisian awal Bendungan Raknamo

Dapat dilihat pada Gambar 9 bahwa pada awal setengah bulan pertama (I) di bulan Januari volume air yang mengisi Bendungan Raknamo masih bernilai nol (0), dan mulai terisi pada bagian kedua di bulan Januari dengan volume air sebesar 1,593 juta m³. Peningkatan atau akumulasi dari volume

yang tertampung pada bulan-bulan berikutnya semakin bertambah hingga pada pertengahan bulan Mei volume air yang tertampung adalah sebesar 14,102 juta m³ yang berarti bahwa telah terpenuhi volume tampungan rencana yaitu sebesar 14,091 juta m³ pada elevasi +104 mdpl yang juga merupakan elevasi *spillway* Bendungan Raknamo. Hal ini sudah diterangkan pada Tabel 1 sehingga air yang melimpas melewati *spillway* tersebut sudah sebanyak 0,011 juta m³ pada akhir bulan April.

Perbandingan volume *inflow* tahunan hasil penelitian dengan hasil perencanaan

Berdasarkan hasil perencanaan dalam nota desain Bendungan Raknamo tahun 2015 diperoleh volume *inflow* Q80% adalah sebesar 14,59 juta m³ sedangkan yang diperoleh dalam penelitian ini adalah Q75,34% yaitu sebesar 25,1395 juta m³. Selisih antara kedua nilai ini adalah sebesar 11,0485 juta m³ dikarenakan dalam perhitungan perencanaan *impounding* Bendungan Raknamo hanya menggunakan perhitungan dengan Stasiun Hujan Camplong yang curah hujan rata-rata per tahunnya adalah sebesar 1.272 mm sedangkan curah hujan rata-rata daerah tangkapan hujan Bendungan Raknamo dalam penelitian ini adalah sebesar 1.696 mm per tahunnya sehingga memberikan hasil volume *inflow* Q80% yang lebih besar. Bendungan Raknamo akan mampu terpenuhi volume tampungan rencananya yaitu sebesar 14,091 juta m³ dalam kurun waktu tiga setengah bulan (tiga bulan lima belas hari).

Kesimpulan

Parameter pada model tangki diuji dengan koefisien korelasi kesalahan dan diperoleh koefisien determinasi (r²) yang cukup baik yakni sebesar 0,504. Untuk besarnya volume *inflow* yang tertampung masuk ke dalam Bendungan Raknamo didapatkan untuk tahun air kering dengan peluang keandalan 97,30 % adalah sebesar 15,4898 juta m³; tahun air rendah dengan peluang keandalan 75,34% adalah sebesar 25,1395 juta m³; tahun air normal dengan peluang keandalan 50,68 % adalah sebesar 32,8927 juta m³; dan tahun air cukup dengan peluang keandalan 26,02 % adalah sebesar 44,0687 juta m³. Untuk stasiun hujan pengamatan digunakan Stasiun Camplong yang curah hujan rata-rata per tahunnya adalah sebesar 1.272 mm. Hasil volume *inflow* pada tahun air rendah (Q_{80%}) adalah sebesar 14,59 juta m³ dan lama waktu pengisian Bendungan Raknamo hingga mencapai volume tampungan yang direncanakan (14,091 juta m³) adalah tiga setengah bulan yaitu dari awal pertengahan bulan Januari hingga pada akhir bulan April.

Saran

Untuk optimasi parameter Model Tangki yang lebih akurat dengan nilai koefisien korelasi kesalahan (r^2) yang lebih baik maka perlu adanya data debit observasi pada ruas sungai di DAS yang sama dengan jangkauan waktu lebih panjang. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai simulasi debit Model Tangki dengan menambahkan faktor intersepsi dan penyerapan air oleh akar tanaman di area Bendungan Raknamo.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih disampaikan untuk Kepala BWS NT II, Kasatker, PPK Bendungan Raknamo, serta konsultan supervisi yang memberikan kesempatan tim penulis dalam meneliti Bendungan Raknamo.

Daftar Pustaka

Akalily, A., Soetopo, W., & Limantara, L. M. (2014). *Optimasi parameter model tangki dengan metode algoritma genetik (AG) di sub DAS Keser*. Malang: Jurusan Pengairan. Fakultas Teknik. Universitas Brawijaya,

Basri, H., Syahrul & Nursidah. (2002). Evaluation of hydrological response of Krueng Jreue watershed using computersimulation of tank model. *JurnalAgrista*, 6 (1):7-18.

Da Silva, M. G., de Aguiar Netto, A. D. O., de Jesus Neves, R. J., Do Vasco, A. N., Almeida, C., & Faccioli, G. G. (2015). Sensitivity analysis and calibration of hydrological modeling of the watershed Northeast Brazil. *Journal of Environmental Protection*, 6(08), 837-850.

Fujihara, Y., Tanakamaru, H., Hatta, T., & Tada, A., (2001). *Objective Functions for Calibration of Rainfall-Runoff Models*. Paper presented at Proc. of Annual JSIDRE, 124-125, Morioka, 25-27 July, Japanese

Krisnayanti, D. S., Rizal, A. H., Bunganaen, W., Nait, C., & Mangu, A. G. A. D. (2020). Application of a tank model to assess the performance of rotiklot reservoir initial filling. *Journal of Civil Engineering Forum, May 2020*, 6(2), 103-114. DOI: <https://doi.org/10.22146/jcef.45843>

Kuok, K. K., Chiu, P. C., & Harun, S. (2011). *Multiobjective Particle Swarm Optimization for Optimizing Daily Tank Model's Parameters*. Paper presented at Proceeding of ASEAN Australian

Engineering Congress, 25-27th July 2011, Kuching

Mustafiril. (2014). Analisis potensi sumberdaya air daerah aliran sungai singkil menggunakan model tangki. *Jurnal Rona Teknik Pertanian*, 7(1), 18-30.

Nota Desain Sertifikasi Bendungan Raknamo, (2015), PT. Indra Karya, Malang.

Nurhayati, S. I. (2015). *Analisa Pengisian Awal Waduk (Impounding) pada Bendungan Jatigede, SI Thesis*, Indonesia: Universitas Pendidikan Indonesia.

Rahman. (2011). Penerapan Model Tangki dengan tiga tangki susunan paralel untuk transformasi data hujan menjadi data debit (studi kasus pada inflowWaduk Selerejo dan Waduk Lahor). *Media Teknik Sipil*, 9(2), 166-171. DOI: <https://doi.org/10.22219/jmts.v9i2.1203>

Setiawan, B. I. (2003). Optimasi Parameter Tank Model (optimization of Tank Model's Parameter). *Buletin Keteknikan Pertanian Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor*, 17 (1), 8-20.

Setiawan, B. I., Fukuda, T. & Nakano, Y. (2003). Developing procedures for optimization of Tank Model's Parameters. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, V, 387-393.

Soemarto, C. D. (1986). *Hidrologi Teknik*. Jakarta: Erlangga.

Sosrodarsono, Suyono, Kensaku Takeda. (2003). *Hidrologi Untuk Pengairan*, Pradnya Paramita, Jakarta.

Sugawara, M. & Fuyuki, M. (1956). *A Method of Revision of River Discharge by Means of Rainfall Model. Collection of Research Papers about Forecasting Hydrologic Variables*, pp. 14-18

Sulianto, S., & Setiono, E. (2012). Algoritma genetik untuk optimasi parameter model tangki pada analisis transformasi data hujan-debit. *Jurnal Teknik Industri*, 13(1), 85-92.

Suryoputro, N. (2018). *Modifikasi Model Tangki Akibat Pengaruh Intersepsi dan Penyerapan Air Tanah Oleh Akar Tanaman*. Malang, *Disertasi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Univesitas Brawijaya