

PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK SIMULASI HIDROLOGI-HIDRAULIKA UNTUK PENGENDALIAN BANJIR STUDI KASUS BENDUNGAN SERBAGUNA WONOGIRI JAWA TENGAH

Afif Rachmadi^{1,a}, Demitrio Harset¹, Yendri Maryesi N.¹, Rachmad Jayadi²

¹⁾ Mahasiswa Prodi Teknik Sipil, Program Sarjana, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan FT UGM
Jl. Grafika 2 Komplek Fakultas Teknik UGM, Sleman, DI. Yogyakarta 55281

²⁾ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan FT UGM
Jl. Grafika 2 Komplek Fakultas Teknik UGM, Sleman, DI. Yogyakarta 55281

^{a)} email korespondensi: a.rachmadi@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Bendungan Serbaguna Wonogiri adalah bangunan air yang berfungsi untuk layanan kebutuhan air dan pengendali banjir di wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu. *Inflow* waduk berasal dari aliran di sepuluh DAS dengan luas genangan maksimum 1.343 km². Kapasitas tampungan air waduk semakin berkurang yang disebabkan oleh sedimentasi, terutama dari DAS Keduang. Untuk mengatasi masalah sedimentasi telah dibangun *spillway* baru, *closure dike* dan *overflow dike* yang memisahkan tampungan menjadi dua bagian, yaitu *main reservoir* (MR) dan *sediment storage reservoir* (SSR). Dengan perubahan kondisi tampungan tersebut, pola operasi waduk perlu disesuaikan dengan dukungan perangkat lunak untuk mendukung kinerja pengendalian banjir. Perangkat lunak yang dibuat terdiri dari empat komponen model, yaitu alihragam hujan-aliran untuk hitungan hidrograf *inflow* waduk, penelusuran aliran di waduk untuk memperkirakan fluktuasi muka air waduk, alihragam hujan-aliran untuk memperkirakan hidrograf *lateral flow* dari anak-anak sungai Bengawan Solo di hilir waduk, dan penelusuran aliran banjir di alur sungai untuk mengevaluasi kondisi aliran di daerah rawan banjir hilir waduk. Perangkat lunak disusun menggunakan *Microsoft Visual Studio Community* 2017, *Microsoft Access* 365, dan *HEC-RAS* 4.1.0. Luaran model hidrologi-hidraulika ini meliputi perkiraan hidrograf banjir *inflow* waduk, fluktuasi muka air di (MR) dan (SSR) serta debit dan muka air maksimum pada ruas Sungai Bengawan Solo di hilir waduk sampai dengan Pos AWLR Jurug di Kota Surakarta. Penerapan perangkat lunak ini diharapkan dapat membantu pengambilan keputusan operasional Bendungan Serbaguna Wonogiri yang lebih cepat dan akurat untuk mendukung kinerja pengendalian banjir di wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu.

Kata kunci: *Tampungan waduk, pedoman operasi waduk, penelusuran banjir, keputusan operasional*

PENDAHULUAN

Bendungan Serbaguna Wonogiri adalah waduk serbaguna (*multipurpose reservoir*) terbesar yang berada di sepanjang Sungai Bengawan Solo. Waduk yang dibangun sejak tahun 1970 ini menampung aliran air dari Daerah Tangkapan Air (DTA) seluas 1.343 km² yang terdiri dari 10 Daerah Aliran Sungai (DAS). Dari *oulet* waduk sampai dengan Bendung Colo terdapat 12 anak sungai, sedangkan di ruas sungai hilirnya sampai dengan Pos AWLR Jurug di Kota Surakarta terdapat 14 anak sungai besar yang berkontribusi terhadap aliran di Sungai Bengawan Solo (Wijaya, 2014).

Persoalan sedimentasi waduk dapat mengakibatkan menurunnya kinerja operasi waduk, baik untuk tujuan layanan kebutuhan air maupun untuk pengendalian banjir (George, et al., 2016). Untuk mengatasi permasalahan sedimentasi pada Bendungan Serbaguna Wonogiri, di tengah-tengah bendungan dibangun sebuah tanggul pemisah (*closure dike*) yang dilengkapi ambang pelimpah (*overflow dike*) dan pintu pelimpah (*spillway*) baru untuk melokalisasi sedimen dari DAS Keduang dan menggelontor endapan sedimen ke hilir waduk. *Closure dike* memisahkan waduk menjadi 2 bagian, yaitu *Main Reservoir* (MR) dan *Sediment Storage Reservoir* (SSR). MR mendapatkan

inflow dari 8 DAS, sedangkan SSR mendapatkan *inflow* dari 2 DAS. *Spillway* baru akan dioperasikan untuk pengendalian banjir dan penggelontoran sedimen (Renaningsih, 2017).

Dengan dibangunnya *closure dike* dan *overflow dike*, pedoman operasi Bendungan Serbaguna Wonogiri menjadi berubah, oleh karena itu diperlukan sebuah teknologi untuk mendukung pengambilan keputusan tentang tindakan pengendalian banjir di Bendungan Serbaguna Wonogiri agar dampak yang terjadi dapat diminimalkan dan dievaluasi secara cepat (*rapid assessment*). Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan perangkat lunak model simulasi hidrologi – hidraulika yang dapat mensimulasikan debit *release* berdasarkan perhitungan *flood hydrograph simulation*, *reservoir routing*, *rainfall-runoff lateral inflow*, dan *hydraulics channel routing* (Rachmadi, 2020).

Perangkat lunak ini diharapkan mampu membantu untuk mengetahui perkiraan hidrograf banjir *inflow* waduk pada kejadian hujan dari hasil *monitoring* stasiun hidrologi secara *realtime*, hidrograf banjir *outflow* dan muka air waduk akibat rencana pengaturan *release* waduk melalui bukaan pintu *spillway*, rekomendasi alternatif *release* waduk yang optimal berdasarkan kejadian banjir, serta

kondisi aliran pada titik kontrol di Bendung Colo dan Pos AWLR Jurug di Kota Surakarta.

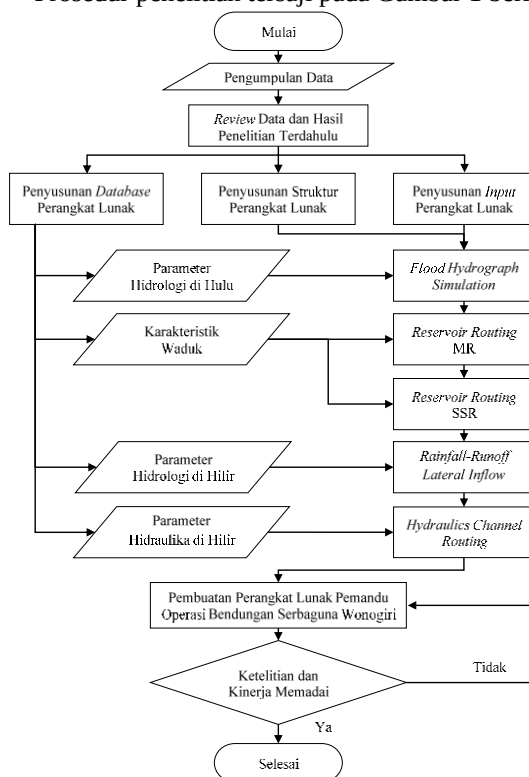
METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah Bendungan Serbaguna Wonogiri dengan 10 DAS pada bagian hulu, yaitu DAS Pondok, DAS Keduang, Kepuh, Wiroko, Temon, Solo Hulu, Alang Ngungghahan, Kedungguling, Wuryantoro, dan Durensewu, serta 26 DAS di hilir waduk, yaitu DAS Hulu 1, Hulu 2, Hulu 3, Hulu 4, Hulu 5, Hulu 6, Walikan, Barat, Hilir 1, Hilir 2, Hilir 3, Hilir 4, Kedungkeris, Gupit, Ngajang, Doho, Jlantah, Dengkeng, Pusur, Buntungan, Brambang, Kembangan, Samin, Wingko, Jetis, dan Triyagan.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian tersaji pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai instansi dan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, seperti yang tersaji pada Tabel 1 (Rachmadi, 2020). Nilai koefisien Thiessen untuk lokasi DAS yang ada di DTA Bendungan Serbaguna Wonogiri mengacu pada penelitian Oktavia (2013). Nilai CN komposit pada DAS di DTA Bendungan Serbaguna Wonogiri mengacu pada penelitian Oktavia (2013), Amalia (2014), dan Arina (2014). Hidrograf satuan pada DAS di DTA Bendungan Serbaguna Wonogiri mengacu pada penelitian Oktavia (2013), Harset (2020) yang merupakan pemutakhiran dari penelitian Sulistyowati, et al. (2017), dan Nanda (2020) yang merupakan pemutakhiran dari penelitian Nugraha (2018).

Tabel 1. Data-data penelitian

Jenis data	Keterangan
Data hidrologi:	
– Posisi stasiun hujan	Perum Jasa Tirta I
– Posisi stasiun pencatat tinggi muka air	Perum Jasa Tirta I
– Model hidrograf satuan	Hasil penelitian
Karakteristik DAS di DTA waduk:	
– Peta DAS	Hasil penelitian
– Nilai CN	Hasil penelitian
– Koefisien poligon Thiessen	Hasil penelitian
– Geometri Sungai	Puslitbang SDA dan BBWS Bengawan Solo
Karakteristik DAS di hilir waduk sampai dengan Bendung Colo:	
– Peta DAS	Hasil penelitian
– Nilai CN	Hasil penelitian
– Koefisien poligon Thiessen	Hasil penelitian
– Geometri Sungai	Puslitbang SDA dan BBWS Bengawan Solo
Karakteristik DAS di Bendung Colo – Pos AWLR Jurug:	
– Peta DAS	Hasil penelitian
– Nilai CN	Hasil penelitian
– Koefisien poligon Thiessen	Hasil penelitian
– Geometri Sungai	Puslitbang SDA dan BBWS Bengawan Solo
Rating Curve:	
– AWLR DTA Bendungan Serbaguna Wonogiri	Perum Jasa Tirta I
– AWLR Sungai Walikan	Perum Jasa Tirta I
– AWLR Bendung Colo	Perum Jasa Tirta I
– AWLR Sungai Dengkeng	Perum Jasa Tirta I
– AWLR Jurug	Perum Jasa Tirta I
Lay out rencana pengembangan Bendungan Serbaguna Wonogiri	Perum Jasa Tirta I
Data teknis bangunan <i>inline structure</i> Bendung Colo	Puslitbang SDA dan BBWS Bengawan Solo

Penyusunan Database Perangkat Lunak

Perangkat lunak ini menggunakan data-data yang telah dipersiapkan sebagai *input* dari perhitungan *flood hydrograph simulation*, *reservoir routing*, *rainfall-runoff lateral inflow*, dan *hydraulics channel routing*. *Input* dan *output* yang dihasilkan oleh perangkat lunak tersaji pada Tabel 2.

Tabel 2. Data *input* dan *output* simulasi perangkat lunak

Komponen	Input	Output
<i>Flood Hydrograph Simulation</i>	– Data hujan <i>realtime</i> – Koefisien Thiessen – Initial flow – Hidrograf satuan DAS	Hidrograf banjir inflow Bendungan Serbaguna

Komponen	Input	Output
Wonogiri		
Tabel 2. Data <i>input</i> dan <i>output</i> simulasi perangkat lunak (Lanjutan)		
Reservoir Routing	– Hidrograf banjir <i>inflow</i> Bendungan Serbaguna Wonogiri	– Tinggi bukaan pintu <i>spillway</i>
	– TMA Waduk	– Debit <i>outflow</i> Bendungan Serbaguna Wonogiri (MR dan SSR)
	– Awal bukaan pintu <i>spillway</i>	
	– Pola operasi Bendungan Serbaguna Wonogiri periode banjir	
	– Debit <i>release</i>	
Rainfall-Runoff Lateral Inflow	– Data hujan <i>realtime</i>	Hidrograf banjir <i>lateral inflow</i> ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Pos AWLR Jurug
	– Koefisien <i>Thiessen</i>	
	– <i>Initial flow</i>	
	– Hidrograf satuan DAS	
Hydraulics Channel Routing	– Debit <i>outflow</i> Bendungan Serbaguna Wonogiri (MR dan SSR)	Debit banjir maksimum dan tinggi muka air maksimum di titik kontrol (Bendung Colo dan Pos AWLR Jurug)
	– Hidrograf banjir <i>lateral inflow</i> ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Pos AWLR Jurug	
	– Geometri Sungai Bengawan Solo ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Pos AWLR Jurug	

Penyusunan Perangkat Lunak

Perangkat lunak model simulasi hidrologi-hidraulika ini merupakan pengembangan lanjut dari beberapa versi terdahulu yang dibuat oleh Farikha (2014), Wijaya (2014), Sulistyowati (2014) dan Renaningsih S. (2017). Perangkat lunak disusun menggunakan *software Microsoft Visual Studio Community 2017*. Sistem *database* perangkat lunak disusun dan disimpan dalam *software Microsoft Access 365*. Selanjutnya untuk hitungan simulasi penelusuran banjir pada Sungai Bengawan Solo di hilir waduk digunakan *software HEC-RAS 4.1.0*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengembangan Perangkat Lunak

Cara penggunaan perangkat lunak diuraikan sebagai berikut ini.

1. Pengguna mengisi durasi waktu hujan yang terjadi pada DAS Bengawan Solo Hulu dan waktu simulasi yang dikehendaki (pengaturan awal selama 48 jam),
2. Pengguna mengisi data yang digunakan sebagai *input* perangkat lunak, yaitu data hujan jam-jaman dari 10 stasiun ARR, data kedalaman muka air di 6 stasiun AWLR, koefisien poligon *Thiessen* pada DAS hulu dan hilir, serta nilai *curve number (CN)*, dan *initial*

abstraction (Ia). Tombol *save* digunakan untuk menyimpan data ke dalam *database*.

3. Setelah semua data *input* terisi, dilanjutkan ke proses simulasi *flood hydrograph simulation* yang menghasilkan *output* berupa hidrograf banjir *inflow* Bendungan Serbaguna Wonogiri.
4. Langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi *reservoir routing* dengan menentukan TMA awal tampungan di waduk, debit PLTA. Simulasi ini menghasilkan *output* berupa tinggi bukaan pintu *spillway* dan debit *outflow* Bendungan Serbaguna Wonogiri (MR dan SSR).
5. Tahap berikutnya dilakukan simulasi *rainfall – runoff lateral inflow* untuk memodelkan pengalihragaman hujan menjadi aliran dari *lateral inflow* Sungai Bengawan Solo Hulu ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Pos AWLR Jurug.
6. Langkah terakhir adalah melakukan simulasi *hydraulics channel routing* di Sungai Bengawan Solo ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Pos AWLR Jurug dengan bantuan *software HEC-RAS 4.1.0*.

Outflow Waduk pada Kondisi Design Flood

Karakteristik *outflow* waduk kondisi terkini perlu dievaluasi berdasarkan *design flood*, yaitu dengan melakukan simulasi *reservoir routing* untuk hidrograf banjir *inflow* kala ulang 60 tahun, 500 tahun, dan PMF. Hasil *reservoir routing* desain Nippon Koei (2007) dan hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4. Terdapat perubahan karakteristik hidrograf banjir *outflow* Bendungan Serbaguna Wonogiri hasil simulasi dibandingkan dengan *operating rule* yang disusun oleh Nippon Koei (2007). Debit *outflow* maksimum dan elevasi muka air maksimum waduk mengalami peningkatan akibat adanya *closure dike*.

Tabel 3. Rekapitulasi perbandingan debit *outflow* maksimum hasil *reservoir routing*

Kala ulang (tahun)	Debit <i>inflow</i> maks. (m ³ /s)	Debit <i>outflow</i> maksimum (m ³ /s)			
		Kondisi lama	Kondisi baru		ΔQ_p (%)
			<i>Spillway</i> lama	<i>Spillway</i> baru	
60	4.373,1	415	-	403	-2,89
500	6.541,3	447	-	757	69,35
PMF	9.706,8	1.242	1.360	789	73,03

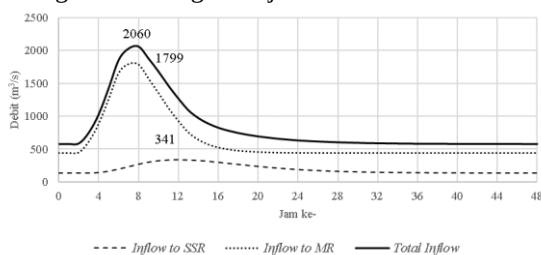
Tabel 4. Rekapitulasi perbandingan elevasi muka air maksimum hasil *reservoir routing*

Kala ulang (tahun)	Elevasi muka air maksimum (m)			
	Kondisi lama	Kondisi baru		Δ m.a. max (m)
		MR	SSR	
60	+136,8	+136,9	+137,0	0,2
500	+137,8	+138,1	+139,1	1,3
PMF	+138,6	+137,7	+139,6	1,0

Karakteristik Banjir di Hilir Bendungan Serbaguna Wonogiri

Untuk memperoleh karakteristik banjir yang terjadi di hilir waduk dilakukan simulasi berdasarkan kejadian hujan tertentu. Sebagai contoh dilakukan simulasi dengan *input* data hujan *realtime* tanggal 6 Maret 2019. Tanggal tersebut dipilih dengan pertimbangan kelengkapan data hujan dan elevasi muka air pada stasiun ARR dan AWLR yang dikelola Perum Jasa Tirta 1. Selain itu, kejadian banjir pada tanggal 6 Maret 2019 menunjukkan hidrograf yang relatif besar. Beberapa simulasi tersebut dijabarkan sebagai berikut.

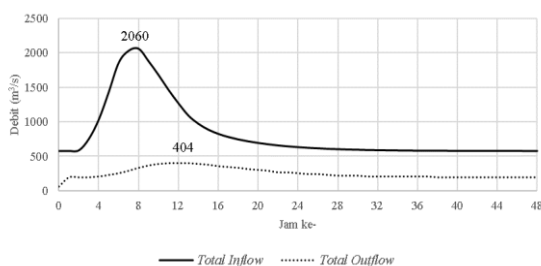
1. Berdasarkan hasil *flood hydrograph simulation*, *inflow* waduk maksimal terjadi pada tanggal 6 Maret 2019 pukul 23:00 dengan debit sebesar 2.060 m³/s, sehingga dikategorikan sebagai banjir standar.



Gambar 2. Hasil *flood hydrograph simulation* tanggal 6 Maret 2019

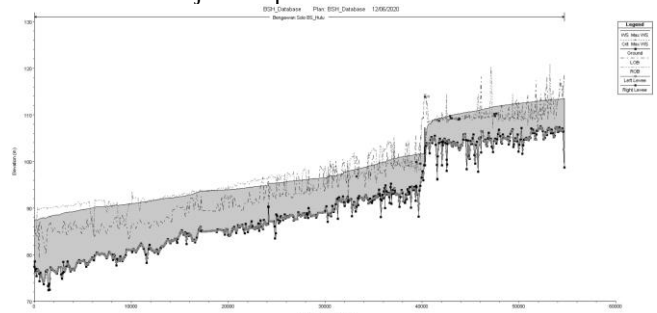
Debit yang masuk ke MR lebih besar daripada SSR, dengan debit puncak MR dan SSR berturut-turut adalah sebesar 1.799 m³/s dan 341 m³/s, karena kontribusi debit ke SSR oleh DAS Keduang dan Pondok sebagian besar berasal dari *initial flow* saja. Kontribusi debit terbesar yang masuk ke MR berasal dari DAS Wiroko, karena intensitas hujan DAS Wiroko lebih besar daripada DAS lain. Hal ini disebabkan hujan yang cukup besar terjadi di Stasiun Tirtomoyo yang memiliki bobot poligon *Thiessen* terbesar.

2. Karena banjir tergolong dalam *standard flood*, menurut pedoman operasi waduk terbaru hanya *spillway* baru saja yang beroperasi. Dari hasil simulasi *reservoir routing*, debit *outflow* waduk cenderung konstan dengan debit puncak sebesar 404 m³/s. Hal ini sesuai dengan fungsi waduk sebagai pengendali banjir, yaitu dengan mengontrol debit *outflow* melalui *spillway* agar sama dengan debit *inflow*. Pengaturan ini dilakukan dengan membuka pintu *spillway* baru setinggi 0,56 m. *Outflow* total waduk merupakan penambahan *outflow* yang keluar dari *spillway* baru dan *outflow* yang keluar dari PLTA.



Gambar 3. Hidrograf *inflow* dan *outflow* total waduk hasil simulasi *reservoir routing*

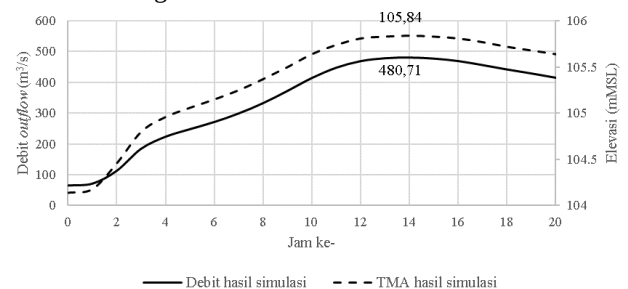
3. Berdasarkan hasil simulasi *rainfall-runoff lateral inflow*, debit terbesar yang terjadi pada DAS Bengawan Solo Hulu ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Bendung Colo dihasilkan oleh 5 DAS yaitu:
 - a. Sungai Walikan (RS. 864) sebesar 105 m³/s
 - b. Sungai Jlantah (RS. 486) sebesar 171 m³/s
 - c. Sungai Dengkeng (RS. 327) sebesar 763 m³/s
 - d. Sungai Brambang (RS. 246) sebesar 229 m³/s
 - e. Sungai Samin (RS. 108) sebesar 548 m³/s
4. Hidrograf banjir dari 5 sungai tersebut digunakan untuk *input* data simulasi *hydraulics flood routing* secara *unsteady flow* sebagai syarat batas pada simulasi. Untuk pola operasi pintu Bendung Colo, diasumsikan *full opening gate* pada kejadian tanggal 6 Maret 2019, karena tidak diketahui pola operasi yang dilakukan pada tanggal tersebut. Profil muka air sungai hasil simulasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 4. Profil muka air sungai di hilir waduk

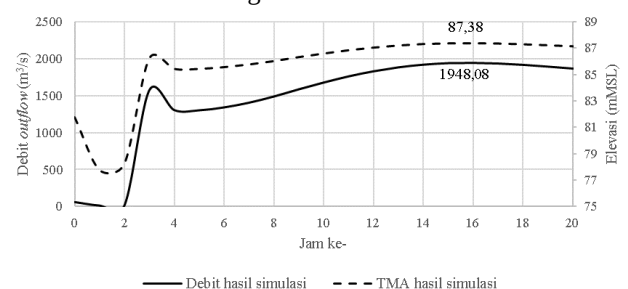
Berdasarkan hasil simulasi *hydraulics flood routing*, diperoleh karakteristik banjir di titik kontrol di Sungai Bengawan Solo ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Pos AWLR Jurug sebagai berikut.

- a. Bendung Colo



Gambar 5. Hasil simulasi *hydraulics flood routing* pada Bendung Colo

- b. Pos AWLR Jurug

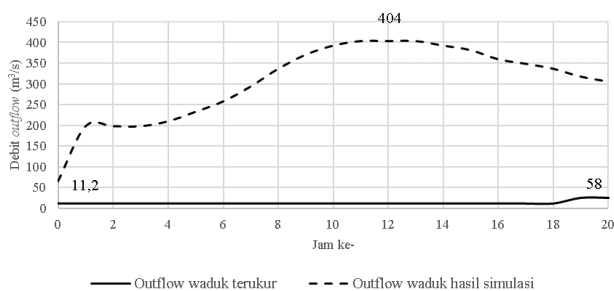


Gambar 6. Hasil simulasi *hydraulics flood routing* pada Pos AWLR Jurug

Hasil simulasi menunjukkan waktu puncak banjir di Bendung Colo terjadi pada tanggal 7 Maret 2019 pukul 05:00, sedangkan di Pos AWLR Jurug terjadi pada tanggal 7 Maret 2019 pukul 06:50. Selisih waktu puncak banjir terhitung selama 110 menit.

Evaluasi Kinerja Perangkat Lunak

Untuk mengetahui kinerja dari perangkat lunak, dilakukan evaluasi dengan membandingkan hasil simulasi kejadian banjir 6 Maret 2019 dengan hasil pengamatan di lapangan. Berdasarkan input data hujan dan kedalaman muka air *realtime* yang terjadi pada tanggal 6 Maret 2019, diperoleh hidrograf *inflow* waduk dan fluktuasi muka air waduk dan hidrograf *outflow* waduk hasil simulasi seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan *outflow* waduk

Gambar 7 menyajikan perbandingan hidrograf *outflow* terukur dan hasil simulasi yang dihitung berdasarkan pedoman operasi pengaturan *release* kondisi baru. Hidrograf *outflow* terukur merupakan perubahan debit *release* waduk sesuai dengan pedoman operasi lama. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui peningkatan debit *outflow* waduk yang signifikan jika pedoman operasi baru diberlakukan.

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

- Terdapat perubahan karakteristik hidrograf banjir *outflow* Bendungan Serbaguna Wonogiri hasil simulasi dibandingkan dengan *operating rule* yang disusun oleh Nippon Koei (2007) sebagai berikut.
 - terjadi peningkatan debit *outflow* maksimum Bendungan Serbaguna Wonogiri sebesar 69,35% untuk kala ulang 500 tahun dan 73,03% untuk PMF.
 - terjadi peningkatan elevasi muka air maksimum Bendungan Serbaguna Wonogiri sebesar 1,3 m untuk kala ulang 500 tahun dan 1,0 m untuk PMF.
 - sesuai dengan *operating rule* yang disusun oleh Nippon Koei (2007), kondisi baru Waduk Wonogiri aman terhadap risiko *overtopping* untuk banjir kala ulang 500 tahun, namun tidak aman untuk banjir PMF.
- Terdapat perbedaan karakteristik hidrograf banjir yang terjadi di Sungai Bengawan Solo Hulu ruas Bendungan Serbaguna Wonogiri – Pos AWLR Jurug hasil simulasi kejadian banjir pada tanggal 6 Maret 2019 dengan hasil pengamatan di lapangan yaitu:

- di titik kontrol Bendung Colo, debit banjir maksimum sebesar 480,71 m³/s dengan muka air maksimum 105,84 m
 - di titik kontrol Pos AWLR Jurug, debit banjir maksimum sebesar 1948,08 m³/s dengan muka air maksimum 87,38 m
 - perbedaan hasil simulasi penelusuran banjir tersebut berdasarkan pedoman operasi waduk kondisi baru dengan hanya mengoperasikan *spillway* baru, sedangkan data operasional *outflow* masih menggunakan pedoman operasi lama dengan hanya mengoperasikan *spillway* lama.
- Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk perhitungan estimasi hidrograf banjir *inflow* waduk, estimasi fluktuasi muka air dan hidrograf *outflow* waduk akibat operasi pintu *spillway*, serta evaluasi kondisi aliran di hilir waduk akibat *release* waduk dan adanya kontribusi debit aliran dari *lateral inflow*.
 - Untuk dapat digunakan dalam mendukung pengambilan keputusan optimal operasi waduk periode banjir oleh Perum Jasa Tirta I, perangkat lunak ini perlu dikembangkan lebih lanjut agar ketelitian hitungan profil muka air di hilir waduk lebih akurat.

SARAN

Saran untuk penelitian berikutnya adalah sebagai berikut.

- Perlu penambahan ARR dan AWLR di DAS Bengawan Solo Hulu untuk meningkatkan kualitas input data hidrologi.
- Perlu adanya kajian yang lebih detail terhadap nilai parameter DAS untuk dapat menghasilkan hidrograf satuan yang lebih akurat.
- Perlu adanya integrasi antara perangkat lunak dengan sistem monitoring hidrologi secara *real time*, agar pemanfaatan perangkat lunak ini menjadi lebih maksimal.
- Perlu adanya pengembangan perangkat lunak pada sistem *database* dan komponen *channel routing*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada semua pihak, terutama kepada Bapak Ir. Rachmad Jayadi, M.Eng., Ph.D., dan para dosen pendidik di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas kerjasamanya dan bantuannya sehingga terwujudnya tulisan ini.

REFERENSI

- Amalia, A., 2014. *Studi Pengaruh Pembangunan Closure Dike Waduk Wonogiri Terhadap Kondisi Banjir di Hilir Waduk*. Tesis. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Arina, B., 2014. *Analisis Karakteristik Banjir Sungai Bengawan Solo Ruas Bendung Colo – Kota Surakarta*. Skripsi. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Farikha, A., 2014. *Simulasi Pengoperasian Waduk Wonogiri Untuk Pengendalian Banjir Di Wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu*. Skripsi. Yogyakarta:

- Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- George, M. W., Hotchkiss, R.H., & Huffaker, R., 2016. Reservoir Sustainability and Sediment Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(3):04016077, pp. 1-8.
- Harset, D., 2020. *Pengaruh Penggunaan Rumus Empirik Kecepatan Dinamik Terhadap Hidrograf Satuan Sintetik GIUH*. Skripsi. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Nanda, Y. M., 2020. *Pengaruh Jumlah Orde Sungai Terhadap Ketelitian Hidrograf Satuan Sintetik Metode GIUH dan Gama 1*. Skripsi. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Nippon Koei Co. Ltd, 2007. *The Study on Countermeasures for Sedimentation in Wonogiri Multipurpose Dam Reservoir in The Republic of Indonesia*. Final Report, The Republic of Indonesia: Ministry of Public Works.
- Oktavia, S. R., 2013. *Pengembangan Model Hidrologi untuk Estimasi Hidrograf Banjir Inflow Waduk Wonogiri*. Tesis. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Rachmadi, A., 2020. *Pengembangan Perangkat Lunak Pendukung Operasi Bendungan Serbaguna Wonogiri Untuk Pengendalian Banjir Wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu*. Skripsi. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Renaningsih, S., 2017. *Pengembangan Perangkat Lunak Untuk Simulasi Penelusuran Banjir Wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu*. Tesis. Yogyakarta: Program Pascasarjana Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Sulistyowati, A., 2014. *Pembuatan Perangkat Lunak Simulasi Hidrograf Inflow Waduk Wonogiri Periode Banjir*. Skripsi. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Sulistyowati, A., Jayadi, R., & Rahardjo, A. P., 2018. *Unit Hydrograph Modeling using Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) Method*. *Journal of the Civil Engineering Forum*, Vol. 4 No. 3, pp. 223-232.
- Wijaya, A.P., 2014. *Pembuatan Perangkat Lunak Untuk Mendukung Pengendalian Banjir DAS Bengawan Solo Hulu*. Tesis. Yogyakarta: Program Pascasarjana, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.