

Studi Alternatif Pengendalian Banjir Sungai Welang dengan Pendekatan Pemodelan Banjir Aliran 2D

Study of Alternative Flood Control in Welang River Using 2D Streamflow Hydraulic Modeling

Lidya Anastaya Immanuella^{1*}, Very Dermawan¹, Bambang Winarta¹

¹Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang 65145, Indonesia

Article info: Research Article

DOI:

10.21776/ub.pengairan.2022.013.02.10

Kata kunci:

HEC-RAS 2D; pemodelan banjir;
Sungai Welang

Keywords:

2D HEC-RAS; Flood Modelling;
Welang River

Article history:

Received: 15-07-2022

Accepted: 22-09-2022

*Koresponden email:

lidyaaanastasya30@gmail.com

(c) 2022 Lidya Anastaya Immanuella,
Very Dermawan, Bambang Winarta



Creative Commons License

This work is licensed under a Creative
Commons Attribution-NonCommercial
4.0 International License

Abstrak

Beberapa penyebab utama terjadinya genangan banjir di Kota Pasuruan adalah kemiringan dasar sungai di bagian hilir yang relatif datar, sedimentasi di muara sungai sehingga menghambat aliran sungai menuju laut, serta erosi dan pengangkutan sedimen di sungai yang tidak terkendali. Genangan banjir terjadi pada lahan pertanian, pemukiman, kawasan industri, serta pada ruas Jembatan Jalan Nasional. Studi ini bertujuan untuk memperoleh pemodelan genangan banjir di Sungai Welang sehingga selanjutnya dapat dijadikan referensi tambahan pada rencana pengembangan di Sungai Welang. Analisa hidrologi dilakukan untuk memperoleh debit banjir rancangan kala ulang 25 tahun dengan Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu yaitu sebesar 620,27 m³/det. Pemodelan hidraulik kondisi eksisting dilakukan dengan menggunakan analisa aliran 2D HEC-RAS menggunakan simulasi *unsteady flow*. Diperoleh luas genangan yang disebabkan oleh debit banjir rancangan kala ulang 25 tahun adalah sebesar 438,262 ha. Sementara pemodelan pengendalian banjir direncanakan dengan debit banjir kala ulang 25 tahun yaitu berupa tanggul dan normalisasi dilakukan dengan fitur *channel modification* pada RAS-Mapper.

Abstract

Floods in Pasuruan City are generally caused by the relatively mild slope in the downstream area of Welang River, then sedimentation in Welang River's estuary area that caused the flow of the river to the ocean to be obstructed, as well as erosion and uncontrolled transport of sediment in Welang River. The annual floodwaters inundate some of the areas such as agricultural, settlement areas, and industrial areas, as well as the national road section. This study aims to obtain the inundation model of Welang River, and thus can be used as an additional reference for Welang's development plan. This study in Welang River uses the Nakayasu Synthetic Unit Hydrograph to obtain the design flood discharge with Q₂₅ return periods at 620.27 m³/s. The flood inundation model was performed by 2-Dimensional Unsteady Flow Analysis integrated by HEC-RAS 6.2. Due to 25-year return periods, the results obtained that the predicted inundation area is 438,262 ha. Meanwhile, the flood control modeling was planned with a 25-year return of period flood discharge in the form of embankments and Welang River's cross-section capacity increment, which was carried out by the channel modification feature on the RAS-Mapper.

1. Pendahuluan

Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) berhubungan dengan pengelolaan sungai pada suatu DAS. Sungai juga memiliki peran yang penting, yaitu sebagai saluran alami untuk menampung air hujan yang turun, lalu mengalirkannya ke laut atau danau. Sungai merupakan sumber kehidupan, karena bisa menjadi salah satu sumber mata air bagi manusia. Di sisi lain, sungai dapat memberikan dampak negatif bagi kehidupan manusia, contohnya melalui bencana banjir. Hal ini karena berkurangnya area ruang terbuka hijau akibat perubahan tata guna lahan sehingga akan berpengaruh pada respon hidrologi suatu DAS seperti kemampuan infiltrasi tanah. Kemampuan infiltrasi tanah berpengaruh terhadap kepadatan dan sifat tanah, serta kemiringan lahan di mana laju infiltrasi akan semakin meningkat terhadap kemiringan lahan yang kecil. Di sisi lain, kepadatan tanah yang kecil akan menghasilkan laju infiltrasi yang lebih besar dan juga sebaliknya (Khaerudin et al. 2017).

Sungai Welang adalah salah satu sungai yang termasuk dalam DAS Welang dan melintasi Kabupaten/Kota Pasuruan. Sumber air Sungai Welang berasal dari aliran air permukaan dan air tanah pada area Gunung Arjuna (+3200 m) serta Gunung Bromo (+ 2400 m) kemudian bermuara di Selat Madura. Panjang Sungai Welang utama adalah sebesar 39,21 km. Sungai Welang khususnya pada area muara hingga Bendung Licin, sudah tidak mampu untuk menampung serta mengalirkan debit banjir, sehingga menyebabkan genangan di Kota Pasuruan terutama pada lahan pertanian, pemukiman, kawasan industri, serta pada ruas Jembatan Jalan Nasional sepanjang sekitar 7 km. Sungai Welang mulai banjir besar pada tahun 2008, sedangkan pada tahun 2011, 2012, 2016, dan 2018 merupakan kejadian banjir yang cukup besar hingga telah melumpuhkan jalan nasional untuk beberapa jam. Pada ruas jalan nasional ketika terjadi banjir, jalan tidak dapat diakses karena adanya genangan banjir setinggi 1 meter dengan durasi rata-rata 5 hingga 12 jam yang dapat terjadi 3 hingga 5 kali selama kurun waktu satu tahun (Utama 2019).

Secara umum, banjir di kawasan utara Jawa disebabkan karena kemiringan dasar sungai di bagian hulu dengan hilir yang sangat datar, sedimentasi di muara sungai sehingga menghambat aliran sungai menuju laut, perubahan tata guna lahan, serta erosi dan pengangkutan sedimen di sungai yang tidak terkendali. Terjadinya permasalahan genangan di suatu perkotaan juga disebabkan oleh tidak terakomodirnya ketersediaan area resapan dengan baik (Rismasari et al. 2018). Pada Sungai Welang, pasang air laut pada muara juga sangat berpengaruh sebagai penyebab terjadinya genangan banjir di Kota Pasuruan.

Mengingat pentingnya Sungai Welang bagi kehidupan masyarakat, maka dibutuhkan suatu upaya sebagai pengendalian banjir di Sungai Welang khususnya pada wilayah Kota Pasuruan sehingga nantinya dapat mengurangi potensi banjir pada daerah sekitar Sungai Welang. Pengendalian banjir pada studi ini menggunakan alat bantu HEC-RAS 2D, di mana langkah awal adalah dengan mengidentifikasi luas genangan dan titik limpasan dalam bentuk peta genangan banjir. Peta genangan banjir diperoleh dengan pendekatan simulasi hidraulik dengan data DEM untuk membatasi area genangan banjir (Sulaeman et al. 2017). Setelah itu dapat dilakukan pemodelan pengendalian banjir yaitu berupa normalisasi dan tanggul urugan.

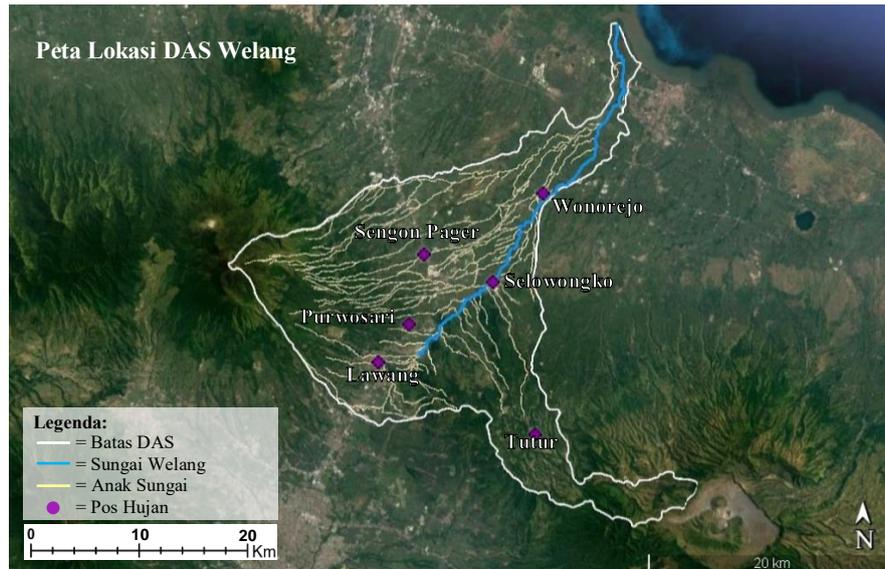
Hasil simulasi aliran 2 dimensi pada HEC-RAS akan menghasilkan model yang lebih detail seperti profil aliran yang bervariasi sepanjang lebar saluran seperti kedalaman air, besar kecepatan, dan bilangan Froude dalam area model genangan 2 dimensi (Sutapa 2020).

2. Bahan dan Metode

2.1. Lokasi Studi

Lokasi studi Sungai Welang mayoritas berlokasi pada wilayah administrasi Kota Pasuruan yang termasuk dalam Provinsi Jawa Timur. Kota Pasuruan memiliki elevasi rerata sebesar 4 meter dari permukaan laut. Karena hanya memiliki elevasi rerata yang relatif rendah, maka Kota Pasuruan menjadi wilayah yang tergolong rawan terjadi genangan/banjir pada musim penghujan.

Hal ini ditambah dengan kemiringan rerata dasar pada Kota Pasuruan yang relatif kecil, yaitu hanya 0-3% di mana sebagian berupa cekungan (Badan Pusat Statistik Kota Pasuruan 2021). Gambaran lokasi studi pada daerah aliran Sungai Welang serta 6 titik pos hujan pada DAS Welang yang akan digunakan dalam perhitungan hidrologi ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi studi Sungai Welang melalui Google Earth

2.2. Metode Pengerjaan

Langkah-langkah pengerjaan antara lain adalah:

1. Studi Literatur

Mengumpulkan dasaran teori untuk menunjang validitas dalam melakukan penyelesaian masalah yang diangkat pada studi ini.
2. Pengumpulan data

Data-data yang digunakan antara lain data curah hujan tahun 2006-2020, debit harian AWLR tahun 2018, peta topografi DAS tahun dan pengukuran penampang sungai tahun 2019, data DEM Kabupaten/Kota Pasuruan dan tutupan lahan tahun 2021.
3. Analisa Hidrologi
 - a. Pemeriksaan konsistensi data curah hujan di DAS Welang dengan Kurva Massa Ganda.
 - b. Analisis Kedalaman Hujan Rerata Daerah dengan menggambarkan Poligon (*Thiessen*).
 - c. Analisis frekuensi dan curah hujan rancangan untuk menghitung debit aliran menggunakan Metode Distribusi *Log Pearson Type III*.
 - d. Uji kesesuaian distribusi dengan Uji *Chi-Square* untuk mendeteksi terjadinya penyimpangan terhadap data ke arah vertikal dan Uji *Smirnov-Kolmogorov* untuk mengetahui penyimpangan terhadap data ke arah horizontal.
 - e. Perhitungan curah hujan efektif jam-jaman dengan pendekatan Metode *Mononobe*.
 - f. Melakukan deliniasi *catchment area* pada DAS Welang.
 - g. Perhitungan nilai debit banjir rancangan kala ulang 25 tahun (untuk daerah perkotaan dengan jumlah penduduk kurang dari 2 juta jiwa sesuai yang tercantum dalam Kriteria Desain Bangunan Pengendali Banjir, Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air) dengan metode Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu di setiap Sub-DAS Welang.
4. Analisis luas genangan banjir kondisi eksisting di Sungai Welang yang diakibatkan oleh debit banjir kala ulang 25 tahun dengan pemodelan aliran 2-dimensi HEC-RAS.
5. Melakukan pemodelan tanggul dan normalisasi sebagai upaya pengendalian banjir/genangan di Sungai Welang dengan Q_{design} menggunakan debit banjir kala ulang 25 tahun.

2.3. Data-data yang Dibutuhkan dalam Penelitian

Dalam merencanakan upaya alternatif pengendalian banjir di Sungai Welang, pertama diperlukan untuk menghimpun data-data yang akan di-*input*, seperti data stasiun hujan berupa tinggi curah hujan dari 6 stasiun pada DAS Welang (Lawang, Purwosari, Selowongko, Sengon Pager, Tukur, dan Wonorejo) dari tahun 2006-2020, data geometri DAS seperti luas area DAS Welang dan panjang sungai utama, peta kontur Sungai Welang, data pasang surut air laut, data *Digital Elevation Model*

(DEM) DAS Welang yang bersumber dari DEMNAS, peta tutupan lahan atau *land cover map* tahun 2021, serta data AWLR Sungai Welang untuk keperluan kalibrasi pemodelan.

2.4. Analisis curah hujan rerata daerah maksimum tahunan dengan metode Poligon Thiessen

Analisis curah hujan rerata daerah maksimum tahunan dengan Metode Poligon *Thiessen*. Metode Poligon *Thiessen* dilakukan untuk memperoleh curah hujan rerata daerah dengan faktor rasio luasan wilayah yang dipengaruhi. Penggambaran Poligon *Thiessen* dilakukan dengan membagi area yang mewakili setiap stasiun hujan, kemudian area tersebut dibentuk dengan menggambarkan garis-garis tegak lurus terhadap garis yang menghubungkan titik dari dua stasiun hujan terdekat seperti pada Gambar 2. Curah hujan rerata daerah dengan metode Poligon *Thiessen* dapat diperoleh melalui persamaan berikut (Soewarno 1995):

$$\bar{U} = \frac{A_1U_1 + A_2U_2 + \dots + A_nU_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (1)$$

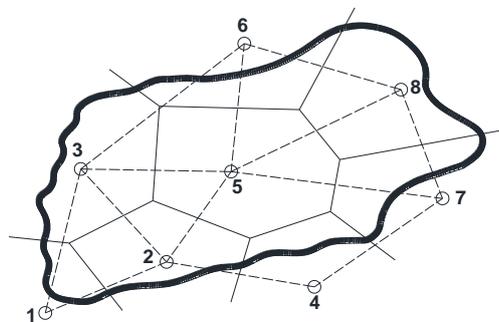
dengan:

n = 1, 2, 3, ... n

\bar{U} = nilai kedalaman curah hujan rerata daerah (mm)

U_n = nilai kedalaman curah hujan pada pos ke- n (mm)

A_n = luas dari area pengaruh pada pos hujan ke- n (km²)



Gambar 2. Poligon Thiessen

2.5. Analisis Frekuensi Curah Hujan Rencana dengan Metode Distribusi Log Pearson III

Distribusi dengan Metode *Log Pearson Type III* banyak diterapkan dalam analisa data banjir maksimum dengan kala ulang tertentu. Bentuk kumulatif dari distribusi Log Pearson Tipe III pada kertas peluang logaritmik akan menghasilkan model matematik. Persamaan garis lurus yang dijabarkan adalah seperti persamaan berikut ini (Soewarno 1995):

$$\text{Log } U = \frac{\text{Log } \bar{U}}{k} + (S \text{ Log } \bar{U}) \quad (2)$$

dengan:

$\text{Log } U$ = nilai logaritma curah hujan rancangan (mm)

$\frac{\text{Log } \bar{U}}{k}$ = rata-rata dari nilai logaritma curah hujan rancangan (mm)

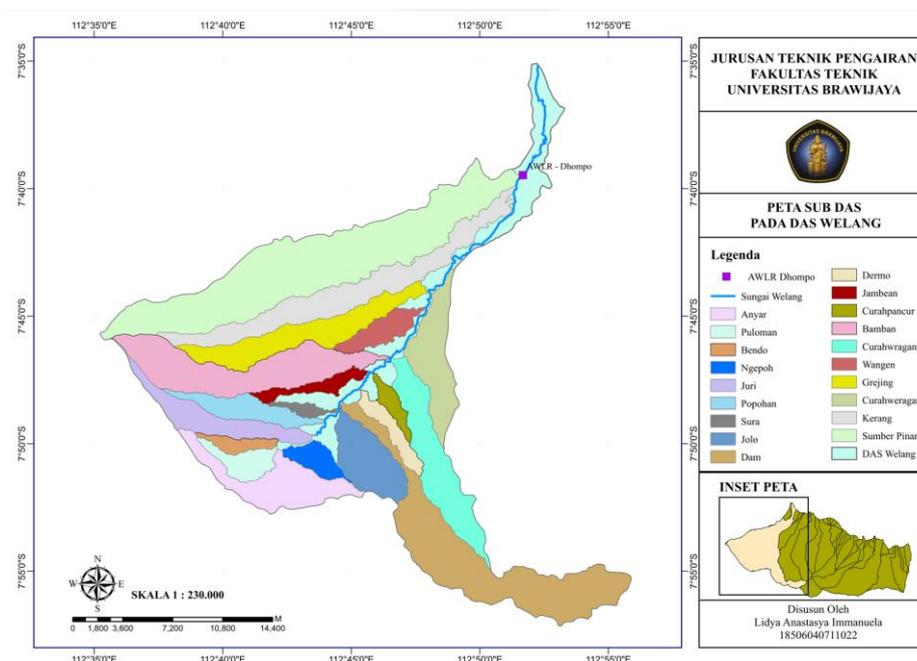
k = konstanta

$S \text{ Log } \bar{U}$ = Standar deviasi dari logaritma curah hujan rancangan

2.6. Debit Banjir Rancangan

Besaran debit yang menurut statistik disamai atau terlewati dalam kala ulang tertentu disebut banjir rancangan atau *design flood* (Limantara 2010). Nilai debit banjir rancangan dapat diperoleh setelah menghitung intensitas hujan untuk memperoleh kedalaman curah hujan per satuan waktu, misal mm/jam yang disebut hujan jam-jaman (Triatmodjo 2013).

Hidrograf limpasan langsung yang diperoleh melalui curah hujan efektif merata dalam suatu DAS dengan intensitas hujan yang tetap (digunakan 1 mm/jam) dalam satuan waktu yang ditetapkan (diambil 1 jam) disebut dengan hidrograf satuan. Dalam studi ini, perhitungan debit banjir menggunakan Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu pada masing-masing 19 sub-DAS Welang (seperti pada Gambar 3) sehingga diperoleh penelusuran banjir dari hulu hingga ke hilir Sungai Welang.



Gambar 3. Peta Sub DAS pada DAS Welang

2.7. Analisis Pola Genangan Menggunakan HEC-RAS

Analisis pola genangan digunakan untuk mengetahui luas genangan serta sebaran banjir yang terjadi pada area sekitar Sungai Welang dengan *input* data debit banjir kala ulang 25 tahun (Q_{25}), sehingga diperoleh peta genangan banjir serta langkah alternatif yang akan dimodelkan untuk mengendalikan banjir Sungai Welang. Dalam studi ini, analisis sebaran banjir menggunakan *software* HEC-RAS versi 6.2, yaitu sebuah perangkat lunak yang dikembangkan oleh *The Hydrologic Engineering Center* (Brunner 2016).

HEC-RAS digunakan dalam melakukan pemodelan aliran berjenis tunak (*steady*) dan aliran tidak tunak (*unsteady*) dalam bentuk 1 dimensi, 2 dimensi, atau kombinasi untuk melakukan simulasi genangan banjir, transportasi sedimen serta simulasi analisa kualitas air (Leon & Goodell 2016). Pemodelan matematik HEC-RAS meliputi skematisasi sistem jaringan eksisting, pemilihan kondisi batas serta *initial condition*, serta simulasi desain sistem atau model dengan alternatif yang beragam (US Army Corps of Engineers 2016).

Pemodelan 2-dimensi HEC-RAS dapat memodelkan variabilitas, tepatnya pada sepanjang alur sungai, di mana area model dibagi menjadi sel-sel berbentuk *grid* berbasis topografi, sehingga mengakibatkan peningkatan waktu komputasi (Dasallas et al. 2019). Kemudian aliran akan dikendalikan oleh angka Manning berdasarkan penutupan lahan yang digunakan (Mihu-Pintilie et al. 2019).

2.8. Pemodelan Aliran 2 Dimensi dengan HEC-RAS

Pemodelan 2 dimensi merupakan pemodelan aliran hidraulik dengan aliran yang mempunyai dua arah, yang pertama adalah aliran yang mengarah dari hulu hingga ke hilir sungai dan arah yang kedua adalah aliran yang mengarah ke luar aliran sungai (area genangan), menggunakan bantuan program HEC-RAS 6.2. Pemodelan HEC-RAS 2 dimensi menggunakan pendekatan persamaan air dangkal yang menjabarkan pengaliran air dalam istilah kedalaman rerata kecepatan aliran 2-dimensi serta tinggi muka air sebagai respon terhadap pengaruh gaya gravitasi serta pengaruh gaya gesek. Simulasi hidraulik pada HEC-RAS menggunakan pendekatan kekekalan massa dan momentum bidang. Metode *finite volume* diterapkan di program HEC-RAS karena memiliki sifat yang konservatif, tidak rumit, serta geometri mudah untuk diubah atau *flexible* (Teng J et al. 2017). Algoritma pada HEC-RAS memproyeksikan rerata integral pada volume referensi dan memungkinkan pendekatan yang umum. Data historis tinggi genangan, topografi dan peta genangan banjir digunakan untuk menganalisis genangan yang pernah terjadi sehingga pemodelan yang dilakukan mendekati keadaan di lapangan (Arifuddin 2014).

2.9. Pengendalian Banjir (Flood Control)

Berdasarkan area pengedaliannya, aktivitas pengendalian banjir dikelompokkan menjadi dua, yaitu pengendalian banjir di hulu dan pengendalian banjir di hilir. Pengendalian genangan banjir pada bagian hulu dengan pengaplikasian bangunan bendungan atau waduk, dapat mereduksi durasi/waktu datangnya banjir serta memotong puncak banjir, sehingga dengan adanya waduk maka akan mengubah grafik hidrograf banjir. Sementara pengendalian banjir pada hilir seperti perbaikan jalur aliran sungai, tanggul, membuat sudetan di titik sungai yang bersifat kritis, serta membuat saluran kanal (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air & Konstruksi 2017).

Pengendalian banjir dengan metode struktur pada sebuah sistem yang terdiri dari jaringan sungai, di antaranya adalah *river improvement* (perbaikan/penambahan kapasitas sungai), tanggul banjir, sudetan sungai, *floodway* atau saluran kanal banjir, dan saluran drainase khusus. Pada studi ini upaya pengendalian banjir dilakukan dengan pembuatan tanggul serta normalisasi sungai (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air & Konstruksi 2017).

Pengendalian banjir dilakukan dengan terlebih dahulu menganalisis profil aliran sungai guna memperoleh *water surface elevation* dengan debit banjir kala ulang 25 tahun sehingga dapat diketahui titik/lokasi limpasan yang terjadi pada Sungai Welang serta menentukan alternatif pengendalian banjir dalam perbaikan alur Sungai Welang (Zainuri 2021).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Hidrologi

Metode Poligon *Thiessen* digunakan untuk memperoleh curah hujan rerata daerah maksimum tahunan. Selanjutnya, perlu dilakukan pembagian wilayah atau area stasiun hujan sehingga diperoleh luas daerah yang dipengaruhi oleh tiap-tiap stasiun hujan yang diamati. Pada Tabel 1 ditampilkan besaran luas pengaruh pada masing-masing stasiun hujan dan koefisien pengaruhnya.

Tabel 1. Perhitungan Luas Pengaruh Setiap Pos Hujan dan Nilai Koefisien Thiessen

No	Stasiun Hujan	Luas Pengaruh Pos Hujan (km ²)	Koefisien
1	Lawang	101,94	0,21
2	Purwosari	57,12	0,12
3	Selowongko	63,66	0,13
4	Sengon Pager	103,22	0,21
5	Tutur	87,90	0,18
6	Wonorejo	77,85	0,16
	Jumlah	491,70	1,00

Setelah melakukan perhitungan curah hujan daerah maksimum tahunan menggunakan Poligon *Thiessen*, kemudian dilakukan analisa curah hujan rancangan yang terjadi di DAS Welang. Pemilihan metode *Log Pearson Type III* dikarenakan dapat digunakan bagi segala jenis sebaran dan tidak terdapat ketentuan atau persyaratan tertentu untuk distribusi ini. Metode ini diberi nama *Log Pearson III*, sebab hanya menghitung dengan 3 buah parameter statistik (Limantara 2010). Hasil perhitungan curah hujan daerah maksimum tahunan ditampilkan pada Tabel 2, dengan tinggi curah hujan rancangan 82,99 mm.

Tabel 2. Tinggi Hujan Rancangan DAS Welang pada Kala Ulang 25 Tahun

Tr (tahun)	Pr (%)	k	Sd	Rerata Log U (mm)	Log U _{rancangan} (mm)	U _{rancangan} (mm)
2	50	0,03			1,75	56,52
5	20	0,85	0,10	1,75	1,83	68,29
10	10	1,26			1,88	75,13
25	4	1,70			1,92	82,99

Berdasarkan Tabel 2 di atas, hasil Uji Distribusi Frekuensi Uji *Chi-Square* menunjukkan nilai peluang 1% $D_{cr}^2 = 6,64$ dan untuk peluang 5% didapatkan $D_{cr}^2 = 3,84$ di mana D_{hitung}^2 didapatkan sebesar 2,33, maka hipotesa data hujan untuk Distribusi Frekuensi *Log Pearson III* diterima. Kemudian untuk Uji Distribusi Frekuensi *Smirnov-Kolmogorov*, diperoleh pada peluang 1%, nilai $D_{cr} = 0,40$. Kemudian pada peluang 5%, dihasilkan nilai $D_{cr} = 0,39$ dimana diperoleh D_{maks} sebesar 0,10 maka hipotesa data dinyatakan diterima untuk kedua peluang (Soewarno 1995).

Setelah melakukan uji kecocokan distribusi frekuensi, dilakukan perhitungan intensitas curah hujan guna memperoleh volume hujan tiap satuan waktu dengan rumus hujan jam-jaman Model *Mononobe*. Perhitungan menggunakan durasi hujan selama 6 jam, karena waktu konsentrasi hujan di Indonesia adalah 5-7 jam (Limantara 2010).

Untuk memperoleh nilai curah hujan efektif, perlu dikalikan rasio hujan jam-jaman dengan curah hujan rancangan (R_n) dalam mm serta dikalikan dengan nilai dari koefisien limpasan hujan (C). Koefisien pengaliran pada DAS Welang menggunakan data penggunaan lahan yang meliputi Kabupaten/Kota Pasuruan, Kabupaten Malang, dan Kota Batu dengan mengalikan presentase luas lahan dengan koefisien pengalirannya. Setelah dirata-rata, diperoleh nilai koefisien pengaliran untuk DAS Welang sebesar 0,5. Kemudian diperoleh tinggi curah hujan efektif untuk tiap jam dalam interval durasi waktu 6 jam dan pada kala ulang 25 tahun sebesar 41,58 mm/jam yaitu seperti pada Tabel 3.

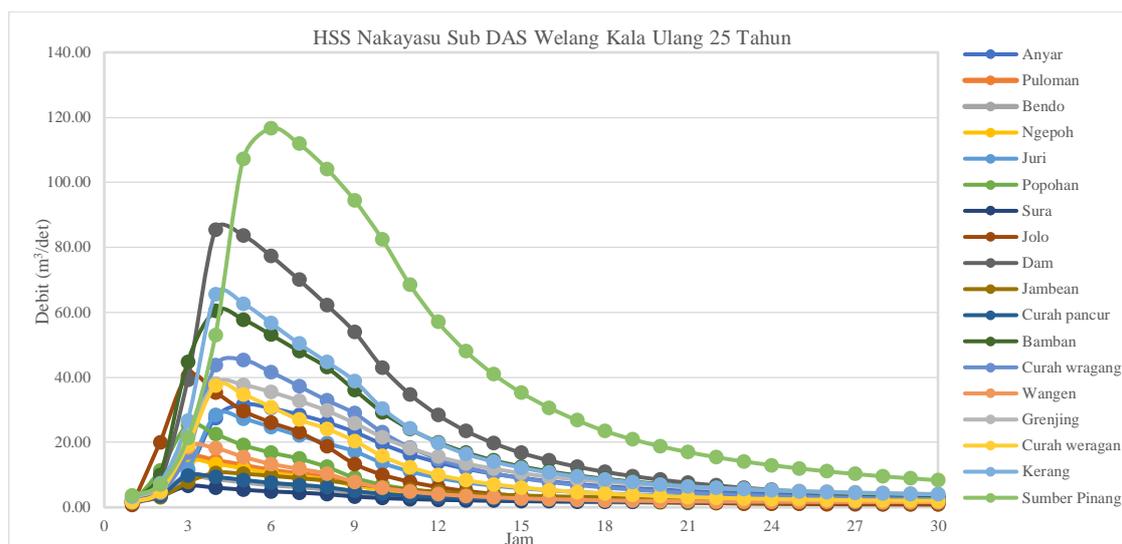
Tabel 3. Distribusi Tinggi Hujan Efektif Jam-jaman Model *Mononobe* DAS Welang

Jam Ke-	Hujan Jam-Jaman (mm/jam)			
	2 _{tahun}	5 _{tahun}	10 _{tahun}	25 _{tahun}
1	15,58	18,83	20,71	22,88
2	4,05	4,89	5,38	5,95
3	2,84	3,43	3,78	4,17
4	2,26	2,73	3,01	3,32
5	1,91	2,31	2,54	2,80
6	1,67	2,02	2,22	2,45
Probabilitas Hujan Harian	56,52	68,29	75,13	83,00
Koefisien Pengaliran (C)	0,50	0,50	0,50	0,50
Hujan Efektif (mm/jam)	28,32	34,21	37,64	41,58

Debit banjir pada ke-19 sub-DAS Welang dikalkulasi menggunakan Metode Hidrograf Satuan Sintetis *Nakayasu* dengan kala ulang 25 tahun untuk mengetahui pola sebaran genangan serta merencanakan pengendalian banjir pada Sungai Welang. Parameter yang digunakan antara lain luas masing-masing sub DAS, panjang sungai, konstanta *Nakayasu* (α), serta curah hujan satuan (R_0). Berdasarkan perhitungan dari parameter-parameter unit hidrograf *Nakayasu*, selanjutnya diidentifikasi hasil karakteristik lengkung debit dengan unit waktu. Selanjutnya, dilakukan perhitungan debit banjir *design* berdasarkan model hujan jam-jaman pada masing-masing kala ulang tahun pada 19 sub-DAS yang ditampilkan pada Gambar 4. Perhitungan debit banjir pada 19 sub-DAS Welang ditotalkan sehingga diperoleh debit banjir di DAS Welang atau $Q_{25} = 620,27 \text{ m}^3/\text{det}$.

3.2. Pemodelan Genangan Banjir Eksisting Aliran 2D dengan HEC-RAS 6.2

Pemodelan genangan banjir kondisi *eksisting* menggunakan bantuan program HEC-RAS versi 6.2 untuk mengidentifikasi lokasi yang terjadi limpasan banjir di sepanjang alur sungai serta pola genangan akibat debit banjir Q_{25} . Analisis ini dilakukan pada kondisi eksisting sungai sepanjang 39,21 km dengan batas hulu berupa *flow hydrograph* dan pertemuan anak-anak sungai menggunakan debit banjir rancangan Metode HSS *Nakayasu* dengan kala ulang 25 tahun. Setelah dilakukan deliniasi DAS, terdapat 19 anak sungai yang mengalir menuju Sungai Welang yang akan dijadikan sebagai kondisi batas atau *boundary condition*. Kondisi batas hilir menggunakan jenis *stage hydrograph* dengan data pasang surut air laut yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Data ketinggian pasang surut yang diperoleh adalah data pasang surut di Selat Madura pada bulan Maret 2022. Data pasang surut yang digunakan adalah nilai pasang tertinggi dalam kondisi *spring tide* yaitu 2,37 m untuk memperoleh hasil simulasi dengan kondisi esktrim.



Gambar 4. HSS Nakayasu sub-DAS Welang

Geometri data Sungai Welang diproses melalui *RAS-Mapper* yang terdapat pada program HEC-RAS 6.2. Data geometri berupa potongan melintang dan potongan memanjang Sungai Welang di-generate dari data DEMNAS (Digital Elevation Modelling Nasional) dengan resolusi spasial sebesar $0,27 \text{ arc-seconds}$ atau sebesar 5,5 meter untuk zona UTM 49S (Kota Pasuruan).

Simulasi genangan 2D Sungai Welang menggunakan jenis aliran *unsteady flow*. Simulasi *unsteady flow* memperhatikan waktu komputasi, simulasi interval waktu perhitungan, dan interval waktu penghasilan *output*. Interval waktu komputasi sebesar 4 detik untuk menjaga kestabilan pemodelan serta menyesuaikan kemampuan perangkat yang digunakan, sementara interval *output* hidrograf menggunakan interval waktu 10 menit.

Pada area aliran 2 dimensi, angka kekasaran manning diperoleh berdasarkan tutupan lahan atau *land cover*. Tutupan lahan pada DAS Welang menggunakan Esri *Land Cover* dengan resolusi 10 meter dengan hasil *layer* tutupan lahan yang terbagi dalam 10 kelas. Pada pemodelan ini, digunakan Esri *land cover* pada Kota/Kabupaten Pasuruan tahun 2021.

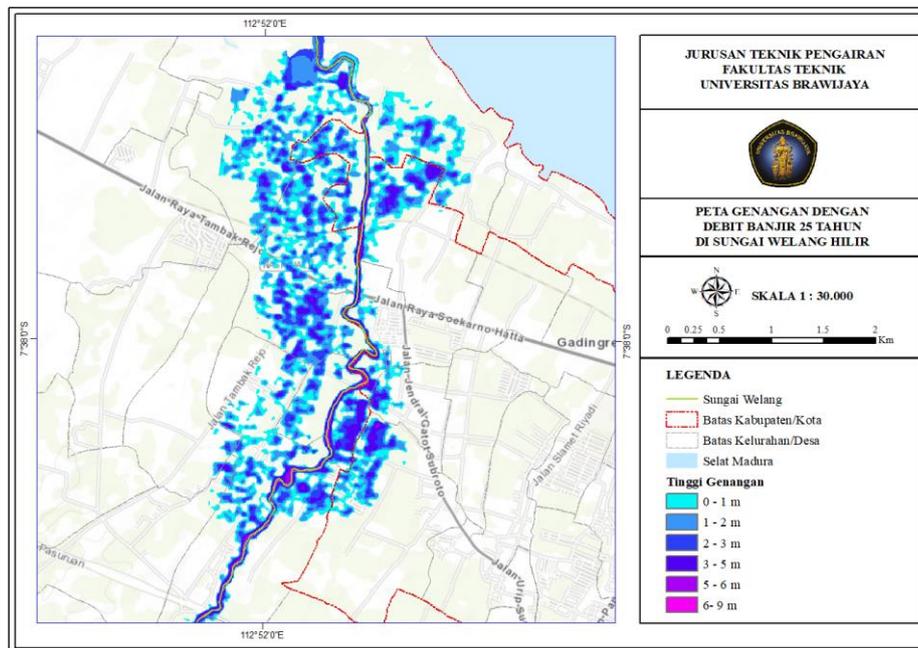
Selama analisis dan penyempurnaan model pada HEC-RAS, perintah *Calibration Regions* di *RAS-Mapper* dapat digunakan untuk mengubah nilai Manning pada area tertentu, contohnya pada badan Sungai Welang, yaitu dengan menggambarkan poligon di area sungai, kemudian memasukkan nilai manning yang digunakan.

Hasil pemodelan genangan banjir (Gambar 5) menunjukkan kedalaman air yang besarnya berbeda pada tiap titik, hal ini dipengaruhi oleh elevasi pemodelan digital permukaan bumi. Di sisi lain, kedalaman air di sungai juga dapat berubah, karena debit pada tiap penampang memiliki perubahan nilai terhadap waktu. Luas genangan diperoleh dengan meng-*export* hasil pemodelan dari HEC-RAS dalam kondisi kedalaman maksimum dalam bentuk *raster*, kemudian menghitung luas daerah genangan banjir pada tiap wilayah administrasi terdampak. Pada hasil pemodelan kondisi eksisting, terdapat 3 kecamatan yang terdampak banjir pada bagian hilir Sungai Welang, yaitu Kecamatan Pohjentrek, Gadingrejo, dan Keraton. Sedangkan Kelurahan/Desa dengan area genangan terluas adalah di Kelurahan/Desa Tambakrejo dengan luas genangan sebesar 100,60 hektar ketika terjadinya debit banjir kala ulang 25 tahun. Rekapitulasi luas area genangan ketika terjadi debit banjir kala ulang 25 tahun pada setiap wilayah administrasi desa terdampak adalah seperti pada Tabel 4.

3.3. Kalibrasi Pemodelan

Kalibrasi dilakukan dengan menjalankan simulasi kejadian banjir di Kota Pasuruan, yaitu pada tanggal 22 Februari 2018 yang menyebabkan genangan pada Desa Tambakrejo setinggi 1,5 meter dan pada Desa Karangketug setinggi 1,0 meter. Pada pemodelan kalibrasi, simulasi dijalankan secara *unsteady flow* dengan batas hulu didefinisikan tepat pada lokasi AWLR Dhompo menggunakan *flow hydrograph* berupa debit harian AWLR tanggal 22-24 Februari 2018. Batas hilir menggunakan data

pasang surut pada tanggal kejadian banjir. Hasil simulasi berupa tinggi genangan pada Desa Tambakrejo dan Desa Karangketug (lihat Gambar 6) dibandingkan dengan tinggi genangan pada kejadian banjir tahun 2018 seperti pada Tabel 5. Dari hasil pemodelan kalibrasi dengan HEC-RAS, diperoleh tinggi genangan hasil pemodelan yang mendekati data lapangan sehingga diperoleh nilai manning yang mendekati data kejadian banjir adalah sebesar 0,033 (saluran alam, berkelok-kelok).

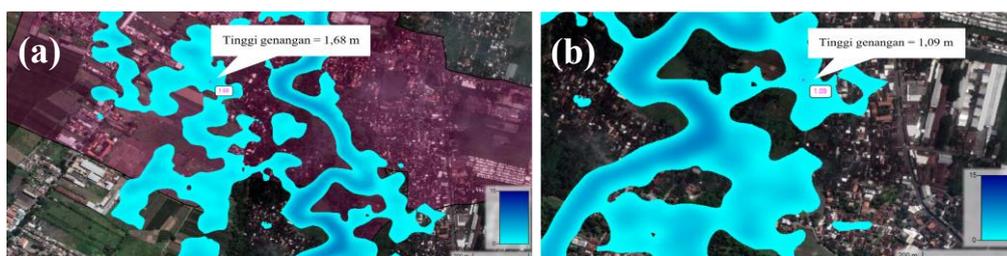


Gambar 5. Kedalaman Maksimum Genangan Banjir Sungai Welang Hilir Akibat $Q_{25\text{Tahun}}$

Tabel 4. Luas Area Berdasarkan Kedalaman Genangan Banjir Akibat Debit Banjir $Q_{25\text{Tahun}}$

Kelurahan/Desa Terdampak	Area Genangan (Ha)
Pulokerto	70,14
Kalirejo	45,12
Tambakrejo	100,60
Asemkandang	3,11
Semare	55,14
Karangketug	12,21
Randusari	7,74
Krapyakrejo	26,69
Sungi Kulon	2,95
Tidu	23,34
Sungi Wetan	54,67
Sukorejo	36,55

Pada Tabel 5, ditampilkan tinggi genangan yang tercatat di lapangan saat terjadinya banjir tanggal 22 Februari 2018 (Tinggi Genangan pada Lapangan) serta tinggi genangan yang diperoleh dari *running* HEC-RAS menggunakan data debit harian saat terjadinya banjir (Tinggi Genangan Pemodelan).



Gambar 6. Simulasi Tinggi Genangan di Desa Tambakrejo (a) dan Desa Karangketug (b)

Tabel 5. Perbandingan Tinggi Genangan Hasil Pemodelan dan Kejadian Banjir 22 Februari 2018

Kecamatan	Desa Terdampak Banjir	Tinggi Genangan pada Lapangan (m)	Tinggi Genangan Pemodelan (m)
Kraton	Tambakrejo	1,5 m	1,68 m
Gadingrejo	Karangketug	1,0 m	1,09 m

3.4. Pemodelan Pengendalian Banjir Menggunakan HEC-RAS 6.2

Banjir pada Sungai Welang khususnya di area hilir umumnya diakibatkan oleh kemiringan dasar yang relatif datar sehingga menyebabkan sedimentasi dan pendangkalan sungai. Alternatif pengendalian banjir di Sungai Welang dilakukan dengan normalisasi serta pemodelan tanggul urugan untuk menanggulangi limpasan banjir pada Sungai Welang saat terjadi debit banjir rancangan kala ulang 25 tahun. Pengendalian banjir direncanakan pada area hilir, tepatnya sepanjang 11,5 km dari Bendung Licin menuju muara. Pemodelan pengendalian banjir dilakukan dengan memodifikasi layer terrain dengan *tools terrain modification* menggunakan program HEC-RAS 6.2.

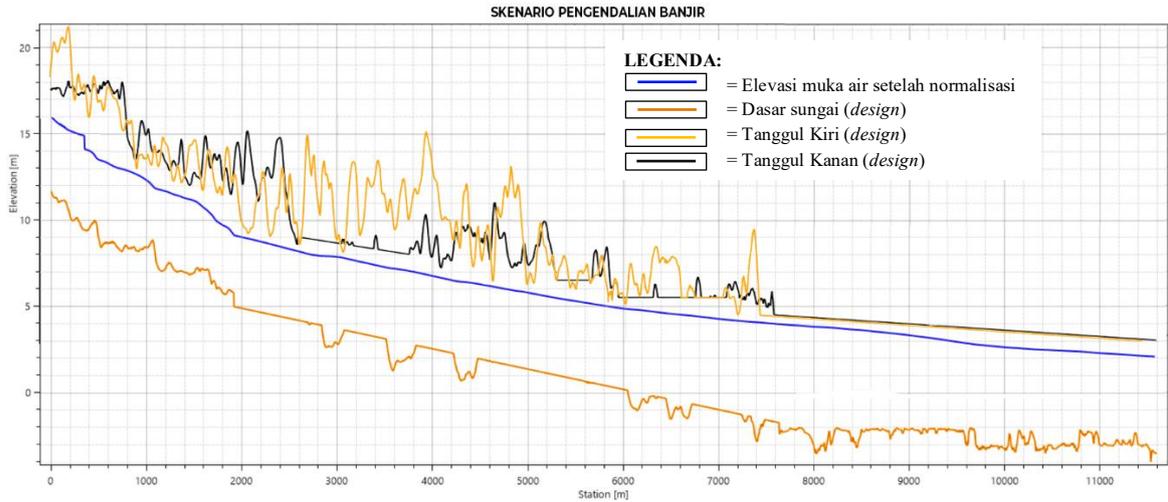
Terrain Modification merupakan suatu fitur di *RAS-Mapper* pada HEC-RAS 6.2, yang memungkinkan pengguna untuk menambahkan titik, *polyline*, dan poligon untuk melakukan modifikasi berdasarkan vektor pada *terrain* yang digunakan. Fitur tersebut berfungsi untuk menambahkan bentuk sederhana (segitiga, persegi, poligon, dan lainnya) dengan elevasi yang konstan, *polyline* yang kompleks dengan elevasi yang berbeda hingga bentuk potongan memanjang dari penampang sungai, serta bentuk kompleks seperti poligon yang dikontrol oleh *Elevation Control Points* (US Army Corps of Engineers 2022).

Pada studi ini, modifikasi *terrain* menggunakan metode *line modification* dengan menggambarkan garis pada area *terrain* yang akan dimodifikasi dimana jenis garis *High Ground* (*line modification-high ground*) untuk membuat tanggul dan jenis garis *channel* (*line modification-channel*) untuk meningkatkan kapasitas penampang. Pada Tabel 6 di bawah ini merupakan kondisi skenario pemodelan pengendalian banjir menggunakan bantuan program HEC-RAS 6.2.

Tabel 6. Pemodelan 2D Alternatif Pengendalian Banjir

Jenis Pemodelan	Lokasi	Panjang
Normalisasi 1	Km. 3700 – 0	3720 m
Tanggul 1 (Kiri)	Km. 4000 – 0	4050 m
Tanggul 2 (Kanan)	Km. 4000 – 0	4050 m
Normalisasi 2	Km. 9700 - 3700	6000 m
Tanggul 3 (Kiri)	Km. 4700 - 4300	450 m
Tanggul 4 (Kanan)	Km. 5500 – 4400	1200 m
Tanggul 5 (Kanan)	Km. 6300 - 5800	440 m
Tanggul 6 (Kanan)	Km. 9000 - 7900	1160 m

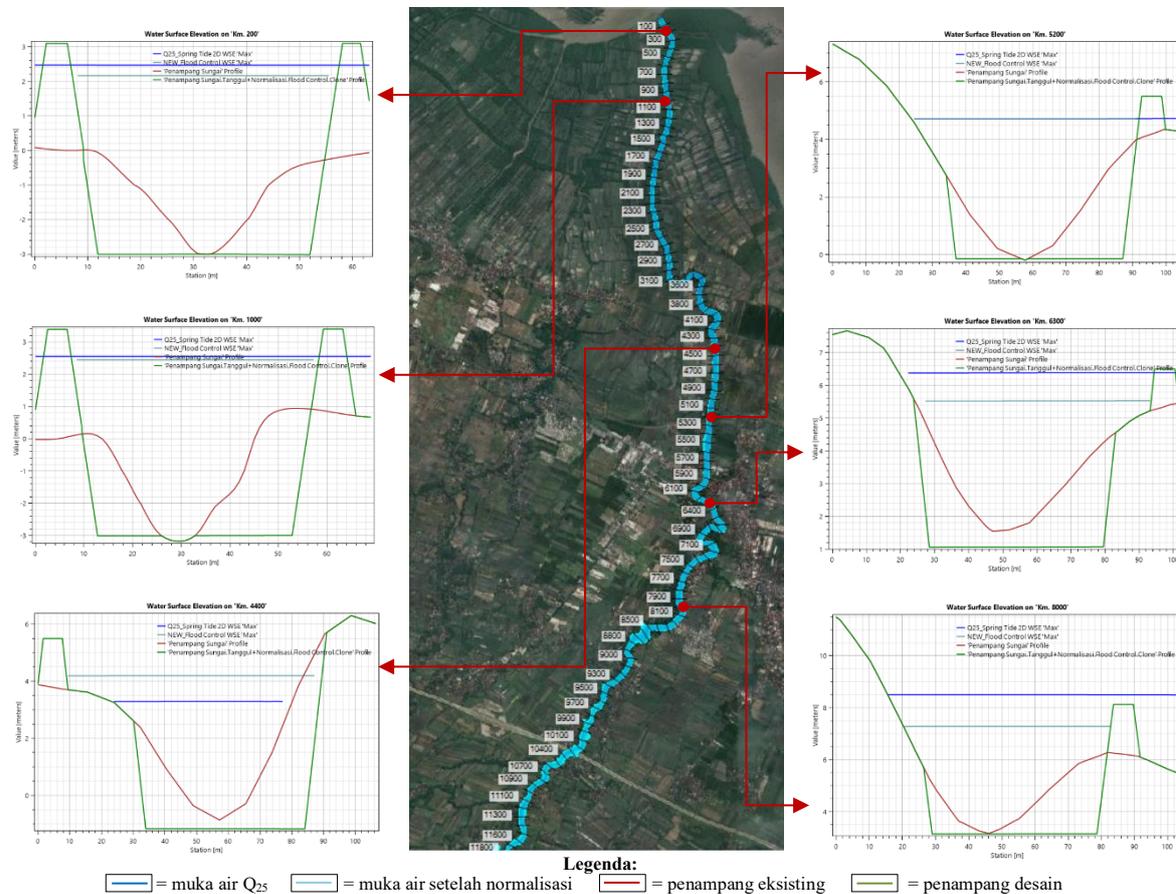
Gambar 7 menunjukkan tinggi muka air setelah dilakukan *running* simulasi pengendalian banjir pada sungai tinjauan yaitu 11,5 km dari muara dengan pemodelan seperti pada Tabel 6 menggunakan debit banjir rancangan 25 tahun yaitu 620,27 m³/det.



Gambar 7. Muka Air Sungai Welang Tinjauan dengan Tanggul dan Normalisasi

Kemudian hasil simulasi pengendalian banjir melalui tampilan RAS-*Mapper* beserta beberapa desain potongan memanjang Sungai Welang disajikan pada Gambar 8. Hasil simulasi menunjukkan elevasi muka air yang mulai menurun pada patok Km. 10500. Hal ini karena adanya pendalaman dan pelebaran penampang sungai sepanjang 6 km sehingga kapasitas pada area normalisasi meningkat. Kemudian elevasi muka air (setelah normalisasi) meningkat, tepatnya sekitar 6,5 km dari hulu sungai tinjauan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya volume air dari hulu sungai tinjauan setelah dilakukan normalisasi, namun tinggi muka air masih dapat ditampung dengan tanggul desain.

Hasil simulasi menggambarkan bahwa dengan menggunakan desain penampang berupa normalisasi dan tanggul urugan, Sungai Welang dapat menampung dan mengalirkan debit banjir kala ulang 25 tahun dan tidak terdapat limpasan di luar badan sungai.



Gambar 8. Hasil Simulasi Pengendalian Banjir HEC-RAS 2-dimensi

4. Kesimpulan

Melalui hasil analisis hidrologi pada DAS Welang, diperoleh debit banjir rancangan 25 tahun yang nilainya 620,27 m³/det. Hasil pemodelan eksisting dengan simulasi aliran 2 dimensi di Sungai Welang menunjukkan bahwa sebagian besar ruas sungai hulu dan tengah masih dapat menampung debit banjir Q₂₅, kecuali pada bagian eksisting ruas hilir. Pada hasil simulasi saat kondisi maksimum khususnya di ruas hilir, diperoleh luas genangan sebesar 438,26 ha di wilayah Kota Pasuruan pada Kecamatan Kraton, Gadingrejo, dan Pohjentrek.

Untuk mengetahui ketelitian model, maka dilakukan kalibrasi yaitu dengan melakukan pemodelan berdasarkan kejadian banjir pada 22 Februari 2018 yang menyebabkan genangan di Desa Tambakrejo setinggi 1,5 meter dan di Desa Karangketug setinggi 1,0 meter. Hasil simulasi kejadian banjir menunjukkan tinggi genangan tidak jauh dengan kondisi pada lapangan sehingga akurasi pemodelan dapat terbilang baik.

Melalui hasil simulasi HEC-RAS 6.2 menggunakan debit banjir kala ulang 25 tahun, maka Sungai Welang perlu dilakukan upaya pengendalian banjir. Pengendalian banjir dilakukan pada bagian hilir, tepatnya 11,5 km dari muara ke arah hulu dengan upaya normalisasi pada dua titik untuk meningkatkan kapasitas sungai, serta tanggul urugan pada lima titik untuk menahan limpasan air saat banjir. Dengan pemodelan HEC-RAS 6.2 menggunakan desain alternatif pengendalian, diperoleh Sungai Welang tidak terjadi genangan di luar badan sungai.

Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan terimakasih kepada DPU Sumber Daya Air Provinsi Jawa Timur yang telah memberikan informasi data pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Afruddin K, R., Harisuseno, D., and Dermawan, V. 2014. "Studi Pengendalian Banjir Kali Wрати Kabupaten Pasuruan". *Jurnal Teknik Pengairan*, 9–18.
- Badan Pusat Statistik Kota Pasuruan. 2021. *Kota Pasuruan dalam Angka*. Pasuruan: BPS Kota Pasuruan.
- Brunner, Gary W. and CEIWR-HEC. 2016. *HEC-RAS, River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0*. California: U.S. Army Corps of Engineers.
- Brunner, Gary W. 2016. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. California: U.S. Army Corps of Engineers.
- Dasallas, L., Kim, Y., and An, H. 2019. "Case study of HEC-RAS 1D-2D coupling simulation: 2002 Baeksan flood event in Korea". *Water* 11(10):1–14.
- Khaerudin, D. N., Rispiningtati, Suharyanto, A., and Harisuseno D. 2017. "Infiltration Rate for Rainfall and Runoff Process with Bulk Density Soil and Slope Variation in Laboratory Experiment". *Nature Environment and Pollution Technology*, 16(1):219–224.
- Leon A. S., and Goodell C. 2016. "Controlling HEC-RAS using MATLAB". *Environmental Modelling and Software* 84:339-348.
- Limantara, L.M. 2010. *Hidrologi Praktis*. Bandung: Lubuk Agung.
- Mihu-Pintilie A., Cimpianu C., Stoleriu C., Pérez M., and Paveluc L. 2019. "Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach". *Water* 11, 1832.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. 2017. *Modul 04: Metode Pengendalian Banjir*. Bandung: PUPR, Badan Pengembangan SDM.
- Rismasari, R., Harisuseno, D., and Hendrawan, A. P. 2018. "Kajian Penanggulangan Genangan yang Terintegrasi di Kawasan Pilang, Probolinggo". *Jurnal Teknik Pengairan*, 9(1), pp.47–59
- Soewarno. 1995. *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*. Bandung: Nova.
- Sulaeman, A. and Suhartanto, E. 2017. "Bengawan Solo untuk Mendukung Peta Risiko". *Jurnal Teknik Pengairan*, 8(11):146–157.

- Sutapa, T. I. R. 2020. *Studi Perbandingan Permodelan Banjir Sungai Dolog dengan Simulasi 1D dan 2D Menggunakan Software HEC-RAS*.
- Teng, Jakeman A.J., Vaze J., Croke B.F.W., Dutta D., and Kim, S. 2017. "Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis". *Environmental Modelling & Software* 90: 201–216.
- Triatmodjo, B. 2013. *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset Yogyakarta.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2022. *HEC-RAS Mapper User's Manual Version 6.2*. California: U.S. Army Corps of Engineers.
- Utama, Laporan. 2019. *Review Desain Pengendali Banjir di DAS Welang Kabupaten/Kota Pasuruan, Tahun Anggaran 2019*. PT. Wahana Prakarsa Utama.
- Zainuri, E., Suprijanto, H., and Sisingsih, D. 2021. "Studi Perencanaan Dinding Penahan Sebagai Upaya Pengendalian Banjir Sungai Meduri Kabupaten Pekalongan Jawa Tengah". *Jurnal Teknik Pengairan*, 12(1), 1–15.