

Kajian Tanggul Pengendali Banjir di Kali Pengkol - Kota Semarang

The Study of Levee Flood Control at Pengkol River - Semarang City

Benson Limbong^{1*)} Dyah Ari Wulandari¹⁾

^{1*)}Master of Civil Engineering, Diponegoro University

¹⁾Lecturer at Master of Civil Engineering, Diponegoro University

Jl. Prof Soedarto, Tembalang, Semarang. 50239, Indonesia Telp.: (024)7474770, Fax.: (024)7460060

*Corresponding email: bensonlimbong@alumni.undip.ac.id

Accepted: 22 September 2023; Revised: 15 February 2024; Approved: 29 June 2024

ABSTRACT

The Pengkol River, situated in Meteseh, Tembalang sub-district of Semarang City, underwent three significant flood occurrences from January to February 2023. An approach involving a structural flood control system, specifically a levee, was suggested as a solution to this issue. The objective of this research is to establish the arrangement and highest elevation of the levee flood control and evaluate its effectiveness in mitigating floods. To determine flood hydrographs, a hydrological analysis was carried out using the Rainfall-Runoff simulation with the SCS Curve Number method. Additionally, a hydraulic analysis was performed using Unsteady Flow simulation with HECRAS 1D/2D hydrodynamic models to define the river body, water profile, inundation, and levee design. The hydrologic analysis indicates that the flood discharge for the 50, 100, and 200-year return periods are 209.5 m³/sec, 225.1 m³/sec, and 240.6 m³/sec, respectively. Based on the hydraulic analysis, the maximum water levels resulting from these return periods' flood discharges are +35.62 m (Q50 years), +35.77 m (Q100 years), and +36.43 m (Q200 years). The Q200 years of return period was chosen for 2D modeling because it resembles documented flood occurrences. Using the HECRAS 2D Unsteady Flow model, it was found that before the levee implementation, the flooded area within the residential zone spanned 9462 m², with a peak water level of +37.3 m. With the levee application, using an existing layout with a total length of 230 m and a top levee level of +37.5 m, flooding was effectively prevented, reducing the maximum water surface elevation to +37.17 m. This demonstrates the levee's effectiveness in preventing floods.

Keywords: levee, flood, HECRAS 1D 2D model, inundation. Unsteady flow.

ABSTRAK

Kali Pengkol di Kota Semarang mengalami 3 kali kejadian banjir besar pada Januari-Februari 2023. Salah satu metode struktural pengendalian banjir yang dapat diterapkan menangani kejadian ini adalah pembuatan tanggul banjir. Tujuan penelitian ini untuk menentukan tata letak dan elevasi puncak tanggul banjir serta mengkaji keandalan tanggul dalam mencegah banjir. Analisa hidrologi dilakukan dengan analisa Rainfall-Runoff metode SCS Curve Number. Analisa hidraulika untuk penentuan trase sungai, profil muka air, genangan banjir dan model tanggul banjir dilakukan dengan simulasi Unsteady Flow menggunakan model HECRAS 1D/2D hidrodinamik. Dari hasil analisa hidrologi diperoleh: debit banjir Q tiap kala Ulang n-tahun: 50 tahun, 100 tahun dan 200 tahun adalah (berurutan) : 209.5 m³/detik; 225.1 m³/detik dan 240.6 m³/detik. Dari analisa hidraulika diperoleh elevasi tertinggi permukaan air sungai akibat debit banjir tiap kala kala ulang Q50 tahun : +35,62 m; Q100 tahun: +35,77m dan Q200 tahun: +36,43m. Model HECRAS 2D dibuat dengan menggunakan debit banjir Q200 tahun karena memiliki visualisasi genangan banjir paling mirip kondisi banjir aktual berdasarkan dokumentasi kejadian. Model 2D Unsteady flow sebelum penerapan tanggul menunjukkan terjadi genangan banjir dalam perumahan dengan luas: 9462 m² dan elevasi tertinggi air: +37,3 m. Model HECRAS 2D Unsteady flow dengan penerapan tanggul sepanjang 230 m dan level puncak tanggul: +37,5 mdpl menunjukkan tidak terjadi lagi genangan banjir dalam perumahan. Tanggul yang dibuat terbukti efektif mencegah banjir masuk. Elevasi tertinggi air di badan sungai setelah penerapan tanggul : +37,17 mdpl.

Kata Kunci: tanggul, banjir, model HECRAS 1D 2D, genangan. unsteady flow.

PENDAHULUAN

Banjir adalah peristiwa atau keadaan dimana terendamnya suatu daerah atau daratan karena volume air yang meningkat berupa proses alami yang ditandai dengan meluapnya aliran air ke permukaan tanah yang biasanya tidak tergenangi (Ward, 1978). Khusus di Kota Semarang, berdasarkan data dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kota Semarang (BPBD Kota Semarang, 2023), selama tahun 2022 sampai dengan Juni 2023 saja peristiwa banjir mencapai 81 kali kejadian (18,66%) dibandingkan terhadap total 434 kali kejadian bencana alam yang terjadi di Kota Semarang. Secara khusus banjir pada Kali Pengkol Kel. Meteseh pada periode Januari-Mei 2023 saja sudah mengalami 3 kali kejadian banjir besar yang menyebabkan kerugian materiil, immateriil bahkan korban jiwa (Detik Jateng, 2023) dan (Kompas, 2023). Untuk menelaah lebih lanjut kejadian banjir pada perumahan tersebut, berdasarkan keterangan lisan warga setempat, tinggi genangan banjir yang terjadi dapat mencapai hingga 2,5 meter (dokumentasi kejadian pada Gambar 1 & Gambar 2).

Penelitian oleh (Handayani *et al*, 2019) menyebutkan kenaikan curah hujan maximum dan perubahan tutupan lahan periode 2008-2019 pada Wilayah Sungai Jratun Seluna (dimana posisi Kali Pengkol Kel. Meteseh berada) berdampak langsung terhadap intensitas banjir di sepanjang DAS tersebut. Hasil ini dikuatkan kembali oleh penelitian (Khoirunnisa & Yuwono, 2023) yang menyebutkan terjadi perubahan lahan terbangun di Kota Semarang dari sebesar 36,27% lahan terbangun pada tahun 2010 menjadi 59,79% lahan terbangun pada tahun 2021, dari total keseluruhan lahan, yang berdampak pada kenaikan debit limpasan permukaan.

Ada 2 metode pengendalian banjir, yaitu: metode struktural dan metode non struktural (Pusat Pendidikan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017). Seluruh metode bertujuan untuk menurunkan/memperlambat debit puncak banjir di hulu, mengalirkan debit air yang melimpas secepat mungkin sehingga mengurangi potensi genangan dan menambah dimensi tampang alur sungai yang dilewati sehingga mampu menampung air yang lewat tanpa resiko terjadinya genangan/banjir.

Salah satu metode struktural pengendalian banjir yang dapat diterapkan pada Kali Pengkol adalah pembuatan tanggul banjir. Menurut (Tobin *et al*, 1995) dan (Mizutani *et al*, 2013), tanggul adalah salah satu metode pengendalian banjir struktural yang paling ekonomis, berupa konstruksi timbunan di atas tanah sepanjang aliran sungai yang melindungi daerah dibelakangnya dengan

elevasi lebih rendah digenangi air banjir. Penelitian oleh (Nordin & Mohammad, 2019) menyatakan untuk mengatasi banjir pada daerah perkotaan dengan pertimbangan lahan yang mahal terbatas maka pembangunan tanggul menjadi salah satu solusi paling memungkinkan. Menurut (Ginting, 2023), pada penerapan struktur tanggul perlu diperhatikan pula bahwa air hujan yang jatuh di dalam lokasi mungkin tidak lagi dapat mengalir secara gravitasi ke sungai di luar kawasan, sehingga akan dialirkan melalui saluran drainase menuju kolam retensi atau sistem pompa.

Pada lokasi banjir sebenarnya telah ada tanggul darurat atau tanggul sementara pada posisi tepi sungai Kali Pengkol tepat persis di sebelah pemukiman warga, namun tanggul tersebut jebol setelah debit dan kecepatan aliran air melimpas (*overtop*) melewati tinggi tanggul darurat yang dibuat (Detik.com, 2023). Hal ini dapat disebabkan oleh tinggi tanggul eksisting (+36m) yang lebih rendah dari elevasi muka air saat banjir.

Pada penelitian oleh (Bena & Khadiyanta, 2016) ditemukan bahwa terdapat kenaikan debit air limpasan permukaan sebesar 7%/tahun di sepanjang alur Kali Pengkol yang disebabkan oleh perubahan nilai koefisien dasar bangunan di perumahan/kawasan hunian sepanjang alur sungai. Penelitian oleh (Muhammad *et al*, 2021) di hilir DAS Kali Pengkol menyebutkan bahwa perlu adanya alternatif pembuatan kolam retensi banjir / embung pada bantaran sungai sebagai usaha untuk menurunkan debit banjir di hilir.

Penelitian oleh (Pinasti *et al*, 2023) dengan obyek lokasi banjir yang sama menyebutkan terjadinya keruntuhan tanggul temporary dan dibutuhkan tanggul setinggi 3m dari dasar elevasi tanah, namun penelitian ini mengkaji hanya pada arah 1D (arah X memanjang) dan hujan rencana pada kala ulang Q50 tahun. Penelitian oleh (Devi *et al*, 2022) menyebutkan solusi tanggul dapat menyelesaikan masalah genangan banjir di Kali Pengkol namun data series hujan untuk penentuan hujan rencana debit banjir hanya 10 tahun dan penentuan hujan rencana terbatas pada kala ulang 10 dan 25 tahun sesuai dengan klasifikasi kota provinsi.

Analisa hidrologi pada kajian ini menggunakan model HEC HMS untuk delineasi DAS, simulasi *rainfall-runoff* penentuan hidrograf banjir menggunakan metode SCS Curve Number yang menghubungkan jenis tanah dan jenis tutupan lahan sepanjang DAS. Analisa hidraulika menggunakan model HECRAS 1D hidrodinamik untuk penentuan profil memanjang muka air dan model HECRAS 2D hidrodinamik untuk pemodelan genangan banjir dalam kondisi sebelum / setelah

penerapan tanggul. Kalibrasi model HECRAS dilakukan dengan membandingkan data observasi lapangan terhadap data simulasi hasil model, dapat berupa: *gage* tinggi muka air, catatan debit, luas genangan banjir, dan validasinya dilakukan dengan mengatur komponen hidrolika misalnya nilai kekasaran Manning (HECRAS Manual, 2023).

Model HEC RAS 1D dan 2D terbukti dapat diandalkan dalam simulasi banjir. Penelitian oleh (Shustikova *et al*, 2019), (Iroume *et al*, 2020) dan (Satria *et al*, 2023) menunjukkan semakin rapat semakin kecil grid model komputasi yang dipilih menghasilkan model sebaran banjir yang lebih teliti. Penelitian ini juga menyebutkan untuk melakukan kalibrasi model HECRAS dapat dilakukan dengan penyesuaian nilai koefisien kekasaran penampang sungai dan validasi model dilakukan dengan membandingkan pola sebaran banjir pada model dan pada kondisi aktual. Penelitian oleh (Vozinaki *et al*, 2015), (Qian *et al*, 2024) dan (Garcia *et al*, 2020) menyatakan kombinasi model 1D-2D HECRAS dapat diandalkan untuk model banjir dimana model 1D digunakan untuk sistem di sungai utama dan model 2D digunakan untuk area yang memerlukan ketelitian hidrodinamik yang lebih tinggi seperti wilayah genangan (*floodplain*), dengan catatan semakin detail data topografi semakin akurat model yang dihasilkan.

Penelitian ini bertujuan untuk: mengkaji keandalan tata letak layout tanggul eksisting dan penentuan tinggi tanggul yang dapat menahan banjir. Perhitungan didetailkan untuk menghitung debit banjir Kali Pengkol, mengkaji elevasi puncak tinggi air di Kali Pengkol akibat debit banjir, melakukan simulasi banjir dan mengkaji keandalan tanggul dalam mencegah terjadinya banjir

Model tanggul pada model HECRAS dibuat pada layout eksisting dengan asumsi bahwa: pada lokasi

tersebut sudah ada tanggul temporary maka dapat dimanfaatkan sebagai tanggul permanen sebagai tindakan tanggap darurat. Keuntungan memanfaatkan tanggul *temporary* eksisting adalah tidak dibutuhkan lagi pembebasan lahan (mengurangi dampak biaya), juga opsi lain seperti normalisasi sungai membutuhkan peralatan dan alat kerja yang lebih sulit secara akses untuk menjangkau lokasi. Hanya saja yang perlu menjadi perhatian adalah perlu disiapkan juga sistem pemompaan untuk drainase keluar dari lokasi pemukiman warga dibelakang tanggul supaya air drainase tetap bisa keluar dari wilayah tersebut.

Letak/layout tanggul direncanakan sesuai dengan posisi tanggul eksisting yang sudah ada namun dilakukan penyesuaian panjang tanggul menyesuaikan ke luasan genangan yang terjadi. Tinggi tanggul ditentukan berdasarkan profil muka air tertinggi yang terjadi. Juga menjadi perhatian juga bahwa tanggul bukanlah satu-satunya solusi pengendalian banjir di lokasi ini, mengingat ada banyak metode yang dapat diterapkan dalam pengendalian banjir ini, baik struktural maupun non struktural, terutama di sisi hulu kejadian banjir. Hal ini akan menjadi salah satu pilihan alternatif bagi stakeholder pengambil kebijakan dalam menangani permasalahan banjir di lokasi ini.

METODOLOGI

Penelitian ini berlokasi di Kali Pengkol, Kelurahan Meteseh, Kecamatan Tembalang, Kota Semarang yang berada pada koordinat geografis 7°3'00"S - 7°4'30"S dan 110°27'00"E - 110°29'00", dimana Kali Pengkol melintasi Kelurahan Meteseh, dengan batas utara Kel.Mangunharjo dan Kel. Sendangmulyo, batas selatan kel. Rowosari dan kel. Jabungan, batas timur Kel. Rowosari, dan batas barat Kel. Bulusan. terlihat pada Gambar 3.



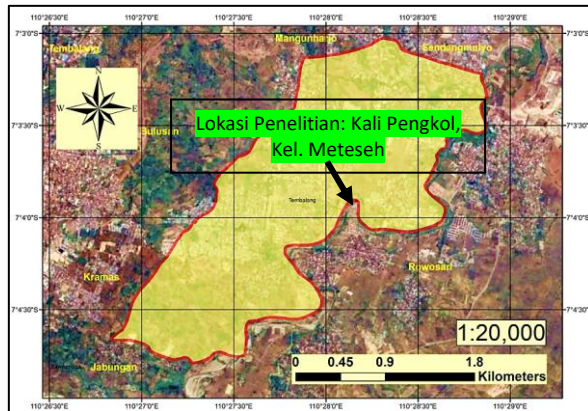
Sumber: Google earth 2023

Gambar 1 Tampak Atas Kali Pengkol



Sumber: Detik.com

Gambar 2. Tampak Atas Banjir januari 2023



Gambar 3. Peta Lokasi Penelitian

Analisa hidrologi dimulai dengan penentuan hujan rencana (*design rainfall*). Hujan rencana diperoleh dari perhitungan hujan harian maksimum tahunan (HHMT) dari 3 pos stasiun (Ungaran, Banyumeneng, Pucang Gading) selama 20 tahun (2000-2019), yang diubah menjadi hujan area (*area rainfall*) dengan mengalikan terhadap faktor bobot (%) metode Poligon Thiessen. Berikut ditampilkan nama, koordinat stasiun pada Tabel 1.

Tabel 1 Nama Stasiun Pos Hujan

No	Nama Stasiun	Koordinat	Pemilik	Operator Stasiun
1	Ungaran	07°08'41"S dan 110°24'15"E	BBWS Pemali Juwana	PSDA Unit Hidrologi
2	Pucangading	07°02'25"S dan 110°29'03"E	BBWS Pemali Juwana	PSDA Unit Hidrologi
3	Banyumeneng	07°05'26"S dan 110°29'59"E	BBWS Pemali Juwana	Balai PSDA Bodri Kuto

Selanjutnya dari data hujan area tersebut akan dikenakan uji Analisa Frekuensi (metode: Normal, Log Normal, Log Pearson, Gumbel) yang bertujuan untuk melihat hubungan antara besarnya kejadian ekstrim terhadap frekuensi kejadian. Selanjutnya data hidrologi untuk penentuan hujan rencana juga dilakukan uji Kesesuaian Distribusi metode Smirnov Kolmogorov & uji Chi Square, metode analisa frekuensi yang dipilih dan ditetapkan sebagai hujan rencana (*design rainfall*) adalah yang memiliki selisih maksimum D terkecil serta lulus uji Kesesuaian Distribusi.

Hujan rencana dihitung untuk tiap kala ulang 50, 100 dan 200 tahun. Penentuan kala ulang n tahun dilakukan berdasarkan Permen PUPR No. 28 /PRT/M/2015 Tentang Garis Sempadan Sungai, dimana disebutkan untuk wilayah ibukota propinsi maka dimensi tanggul banjir menggunakan debit rencana kala ulang 20-50 dan untuk ibukota negara atau kota metropolitan kala ulang 50- 100 tahun (Kementerian PUPR RI, 2015). Kala ulang 200 tahun digunakan sebagai pembandingan untuk kejadian asli

saat terjadinya bencana. Penentuan kala ulang hujan rencana yang dipilih juga harus disesuaikan terhadap pertimbangan ekonomi dan status daerah yang dilindungi oleh tanggul tersebut.

Data topografi (peta kontur) yang diperlukan untuk penggambaran *river body* / badan sungai dan potongan melintang/ memanjang sungai diperoleh dari peta DEM Badan Informasi Geospasial. Peta DEM yang digunakan berupa raster DEM Nasional yang dibangun dari beberapa sumber data meliputi data IFSAR (resolusi 5m), TERRASAR-X (resolusi 5m) dan ALOS PALSAR (resolusi 11.25m), dengan menambahkan data Masspoint hasil stereo-plotting. Resolusi spasial DEMNAS adalah 0.27-arcsecond, dengan menggunakan datum vertikal EGM2008 (Badan Informasi Geospasial, 2024).

Data peta jenis tanah dan tata guna lahan menggunakan data yang diperoleh dari FAO Soil Map (FAO, 2023). Peta tutupan lahan menggunakan citra satelit Google Earth. Selanjutnya jenis tanah dan jenis tutupan lahan berdasarkan luasannya akan digunakan untuk penentuan nilai Curve Number tiap sub basin (Sub DAS) Kali Pengkol dan penentuan nilai Impervious DAS.

Model HEC HMS digunakan untuk melakukan delineasi DAS dan simulasi hujan limpasan. Peta DEM dimasukkan ke dalam model, lalu ditentukan posisi *outlet* hilir (Kali Pengkol) untuk selanjutnya HEC HMS akan melakukan delineasi DAS serta membagi DAS (basin) dalam komponen: sub DAS (sub basin), *reach* dan *junction*. Analisis Hidrologi dilakukan untuk mendapatkan hidrograf banjir (hidrograf satuan sintetik) pada *outlet* DAS, dikarenakan tidak adanya data hidrograf aktual saat kejadian banjir. Dalam penelitian ini digunakan metode Hidrograf Satuan Sintetis metode SCS Curve Number untuk analisis debit banjir selama 24 jam.

Aliran yang terjadi di alam merupakan aliran 3-dimensi. Dalam pembahasan pada saluran terbuka, banyak faktor yang mempengaruhi misalnya bentuk/ geometri, kemiringan dasar saluran, kekasaran dasar dan dinding saluran, besarnya debit dan lain-lain. Persamaan pengatur untuk simulasi aliran 1 dan 2 dimensi dapat didekati dengan menggunakan persamaan St. Venant (Natakusumah *et al*, 2007). Pada model aliran 1D *Unsteady Flow* persamaan yang digunakan adalah persamaan Saint Vennant 1D (Shallow Water Equation) yang merupakan bentuk dari persamaan kontinuitas dan persamaan momentum. Persamaan ini menggambarkan perubahan kedalaman dan kecepatan aliran air pada arah komponen X. Pada model aliran 2D *Unsteady Flow* persamaan yang digunakan adalah: persamaan Saint Vennant 2 Dimensi, dimana persamaan ini sama dengan persamaan Saint Vennant 1D dengan tambahan

pada arah komponen Y atau yang disebut sebagai persamaan Gelombang / Wave equation. (USACE Hydrologic Engineering Centre, 2023).

Analisa hidraulika 1D dilakukan dengan model HECRAS 1D. Penggambaran geometri sungai dilakukan dengan fitur RAS Mapper, berupa: penentuan *Bank Line* (trase sungai dari hulu ke hilir), penentuan *Flow Path* (batas daerah kajian; bisa memakai batas DAS), *cross section* sungai, dilanjutkan dengan input data hidrograf banjir selama 24 jam yang diperoleh dari analisa hidrologi 1D *Unsteady Flow Analysis* pada *boundary condition* hulu. Setelah dilakukan proses *Compute* maka program akan menampilkan *Result* berupa: *Depth* (kedalaman banjir), *Profile Plot* (profil memanjang air sungai) berupa: EGL, *Water surface*, tinggi kritis), *velocity*/kecepatan aliran, genangan banjir.

Persamaan aliran model hidrodinamik HECRAS 1D *Unsteady* menggunakan hukum konservasi massa (Kontinuitas) dan hukum persamaan momentum. Hukum Konservasi massa diterangkan dalam persamaan kontinuitas yang menyatakan: volume fluida per satuan waktu yang melewati suatu penampang, akan sama untuk seluruh perubahan penampang, diterangkan dalam persamaan (1) berikut:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - qL = 0 \quad (1)$$

Dimana:

A_T : perubahan luas penampang (m^2),
 Q : total debit yang melewati penampang (m^3/det), X : fungsi jarak,
 t : fungsi waktu,
 qL : luas tampang melintang per satuan waktu (m^2/det).

Hukum konservasi momentum diterangkan dalam hukum II Newton tentang gerak: besarnya perubahan momentum per satuan waktu adalah sama dengan penjumlahan seluruh resultante gaya luar yang bekerja pada pias tersebut, diterangkan dalam persamaan (2) momentum berikut:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + qA\left(\frac{\partial Z}{\partial x} + Sf\right)A = 0 \quad (2)$$

Dimana:

Q : total debit (m^3/det),
 X : fungsi jarak,
 t : fungsi waktu,
 V : kontrol volume (m^3),
 g : percepatan gravitasi (m/det^2),
 A : total area (m^2), $\frac{\partial Z}{\partial x}$ adalah kemiringan saluran dan Sf adalah koefisien kekasaran.

Analisa hidraulika 2D dilakukan dengan model HECRAS 2D, penggambaran geometri sungai

dilakukan dengan fitur RAS Mapper, berupa pembuatan 2D Flow Area dengan langkah: penentuan Perimeter (batas daerah kajian, bisa memakai batas DAS), penentuan *grid computation point* (ukuran cell size), penentuan *Breakline* (trase sungai), dilanjutkan dengan input data hidrograf banjir selama 24 jam yang diperoleh dari analisa hidrologi 2D *Unsteady Flow Analysis* pada *Boundary Condition* hulu. Untuk model tanggul dibuat dengan fitur Geometry, garis tengah tanggul menggunakan River dan kaki dan puncak tanggul dengan Breakline.

Persamaan aliran model hidrodinamik HECRAS 2D adalah persamaan Saint Venant 2D yang dijabarkan dalam persamaan difusi gelombang, dimana luas genangan dijelaskan dengan persamaan (3) berikut ini:

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \text{ (maximum } C = 5.0) \quad (3)$$

Dimana:

C : Courant Number (non dimensi),
 V : kecepatan aliran (m/det),
 ΔT : time step perhitungan, dan
 ΔX : ukuran grid cell size di model 2D.

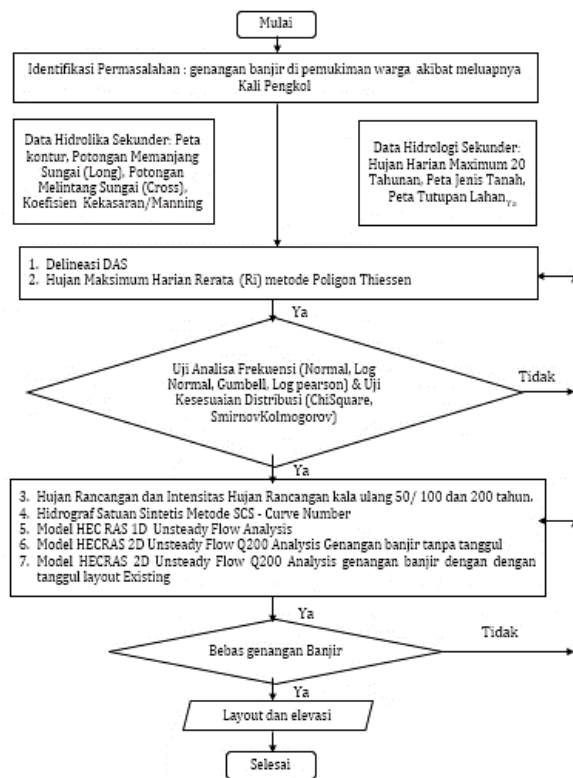
Model 1D akan dipakai untuk menentukan profil memanjang permukaan air dan tinggi tanggul banjir rencana (Yazdan dkk, 2022) dan model 2D akan digunakan untuk memodelkan perubahan luasan genangan banjir untuk kondisi sebelum dan sesudah konstruksi tanggul diaplikasikan ke model . Model awal 2D dibuat tanpa tanggul untuk melihat simulasi genangan banjir, dan model 2D dengan tanggul dibuat untuk melihat keadaan tanggul dalam membendung banjir. Tanggul yang dibuat tata letak (*layoutnya*) menyesuaikan ke posisi tanggul sementara yang sudah ada di lapangan, dengan perubahan pada panjang total tanggul (d disesuaikan ke visual genangan banjir pada model 2D awal) dan elevasi tanggul ditentukan berdasarkan elevasi genangan banjir tertinggi di model 1D ditambah dengan tinggi jagaan banjir sebesar 0,8 m (Sosrodarsono, 1984).

Model sungai pada HEC RAS 1D dibuat dengan RAS Mapper. Selanjutnya hidrograf banjir tiap kala ulang 50/ 100 dan 200 tahun dimasukkan ke dalam 1D *Unsteady Flow Data*, berupa *input*: debit pada hulu sungai Sta +6075, debit pada pada posisi *Sink/Outlet* Sta +2456, dan nilai *normal depth* atau kemiringan dasar sungai di hilir sungai Sta +12.

Model HECRAS 2D dibuat dengan menggunakan fasilitas Ras Mapper, peta DEM di-*input* ke dalam ras mapper, dilanjutkan dengan penggambaran 2D Flow Area yang berisikan: *perimeter* 1 (batas kajian banjir), *breakline* (garis tengah sungai), pembuatan *Boundary Condition* yaitu letak *upstream* dan

downstream dari Sungai yang dibentuk, dilanjutkan dengan pengisian debit banjir yang berasal dari Hidrograf satuan sintetis Q200. Komponen perimeter 2D Flow Area dibuat dengan mendefinisikan model yang terdiri dari grid-grid dengan Point Spacing X: 30 meter dan Y: 30 meter, nilai n manning 0,045 dan jumlah total cell sebanyak 496 cell. Semakin rapat spacing tiap grid maka akan semakin akurat model yang dibuat.

Model tanggul (Gambar 13) terlebih dulu dibuat pada RAS Mapper model 1D menggunakan fitur geometri: River (untuk Centreline tanggul) dan Breakline (untuk kaki dan puncak tanggul). Setelah dibentuk, model geometri tanggul diubah ke bentuk DEM (.geotiff) untuk selanjutnya dipakai sebagai Terrain dasar peta model 2D. Layout tanggul yang dibuat mengikuti layout aktual dengan penambahan panjang tanggul total 230 m, menyesuaikan terhadap pola sebaran genangan yang terjadi pada model 2D tanpa tanggul, tanggul menutupi perumahan dari sebaran genangan. Elevasi puncak tanggul: +37,5m. Selanjutnya dilakukan simulasi 2D *Unsteady Flow* debit banjir Q200, dengan hasil tidak ditemukan lagi genangan di dalam wilayah perumahan (Gambar 14 dan 15). Berikut ditampilkan Gambar 4 Flow Chart penelitian.

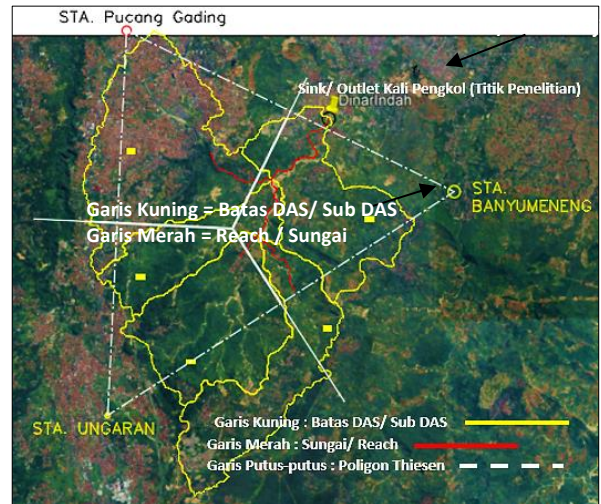


Gambar 4. Flow Chart Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Hidrologi – Simulasi Rainfall Runoff SCS CN Model HEC HMS

Delineasi daerah tangkapan air Kali Pengkol dengan titik hilir berupa titik kajian banjir (*outlet*) tepat berada di sebelah pemukiman warga, selanjutnya HEC HMS melakukan delineasi (penentuan daerah tangkapan air) dengan tampilan seperti Gambar 5, luas DAS Kali Pengkol dengan titik outlet Sink keseluruhan 61,74km².



Gambar 5 Peta Poligon Thiessen dan Delineasi DAS Kali Pengkol

Selanjutnya melakukan perhitungan hujan area metode poligon Thiessen, perhitungan hujan rencana (*design rainfall*) dan intensitas hujan rencana. Data hujan harian maksimum tahunan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hujan harian Maksimum Tahunan

Years Of	Ungaran		Pucang Gading		Banyumenen g		Daily Maximu m Rainfall
	42.58%		29.52%		27.91%		
	Ri (max)	Cri	Ri (max)	Cri	Ri (max)	Cri	
2000	80.0	34.1	56.0	16.5	78.0	21.8	72.4
2001	132.0	56.2	100.0	29.5	100.0	27.9	113.6
2002	55.0	23.4	75.0	22.1	96.0	26.8	72.3
2003	112.0	47.7	75.0	22.1	128.0	35.7	105.5
2004	77.0	32.8	100.0	29.5	72.0	20.1	82.4
2005	121.0	51.5	75.0	22.1	110.0	30.7	104.4
2006	68.0	29.0	150.0	44.3	95.0	26.5	99.7
2007	151.0	64.3	120.0	35.4	80.0	22.3	122.0
2008	167.0	71.1	100.0	29.5	100.0	27.9	128.5
2009	89.0	37.9	150.0	44.3	160.0	44.7	126.8
2010	110.0	46.8	87.0	25.7	150.0	41.9	114.4

Years Of	Ungaran		Pucang Gading		Banyumenen g		Daily Maximu m Rainfall
	42.58%		29.52%		27.91%		
	Ri (max)	Cri	Ri (max)	Cri	Ri (max)	Cri	Ri
2011	112.0	47.7	150.0	44.3	100.0	27.9	119.9
2012	140.0	59.6	100.0	29.5	90.0	25.1	114.2
2013	90.0	38.3	90.0	26.6	120.0	33.5	98.4
2014	95.0	40.4	106.0	31.3	85.0	23.7	95.5
2015	135.0	57.5	105.0	31.0	90.0	25.1	113.6
2016	110.0	46.8	104.0	30.7	140.0	39.1	116.6
2017	135.0	57.5	82.0	24.2	90.0	25.1	106.8
2018	110.0	46.8	88.0	26.0	95.0	26.5	99.3
2019	95.0	40.4	72.0	21.3	85.0	23.7	85.4

Selanjutnya dilakukan uji analisa distribusi frekuensi metode: Gumbell, Log Pearson, Normal, Log Normal, terhadap hujan maximum harian (Ri) untuk memperoleh hujan rancangan (design rainfall), dengan hasil pada Tabel 3.

Tabel 3 Hujan Rencana Untuk Tiap Metode Distribusi

Hujan Rencana Metode	Kala Ulang n – tahun (mm)		
	50 tahun	100 Tahun	200 Tahun
Normal	138.61	143.13	147.26
Log Normal	142.73	148.98	154.96
Log Pearson III	157.8	170.64	184.08
Gumbel	147.55	156.58	165.57

Seluruh data Ri juga dikenakan uji dilanjutkan dengan uji Chi Square dan uji Smirnov Kolmogorov dengan hasil pada Tabel 4.

Tabel 4 Uji Smirnov Kolmogorov dan Uji Chi Square Untuk Tiap Metode Distribusi

Uji Smirnov Kolmogorov	a = 1%	a = 5%	a = 10%	Attained A	D Maximum
Normal	Accepted	Accepted	Accepted	76.77%	0.13539
Log Normal	Accepted	Accepted	Accepted	61.72%	0.15561
Log Pearson III	Accepted	Accepted	Accepted	45.91%	0.17757
Gumbel	Accepted	Accepted	Accepted	41.21%	0.18474

Uji Chi-Square	a = 1%	a = 5%	a = 10%	Attained A	Pearson Parameter
Normal	Accepted	Accepted	Accepted	76.77%	0.5
Log Normal	Accepted	Accepted	Accepted	47.24%	1.5
Log Pearson III	Accepted	Rejected	Rejected	3.389	4.5
Gumbel	Accepted	Accepted	Accepted	22.31%	3

Dari uji Chi Square, uji Log Pearson yang tidak lolos uji. Dari uji Smirnov Kolmogorov diperoleh hasil bahwa seluruh uji distribusi dapat diterima, dipilih uji dengan nilai D Maximum terkecil yaitu: pada distribusi Normal, $D = 0,135$. Nilai D adalah nilai selisih absolut antara distribusi frekuensi kumulatif sampel dengan distribusi frekuensi kumulatif teoritis (D_{max}) yang berbeda. Maka selanjutnya ditentukan hujan rancangan (design rainfall) untuk tiap kala ulang n-tahun menurut uji Normal pada Tabel 3. Dari Tabel 3 diperoleh hujan rencana berbagai kala Ulang n- tahun, dan apabila kita membandingkan dengan data historis hujan aktual Kota Semarang sebesar 151 mm tanggal 1 Januari 2023 maka dapat disimpulkan hasil perhitungan analisa frekuensi hujan rencana metode Normal mendekati besar hujan kejadian aslinya pada kala ulang 200 tahun.

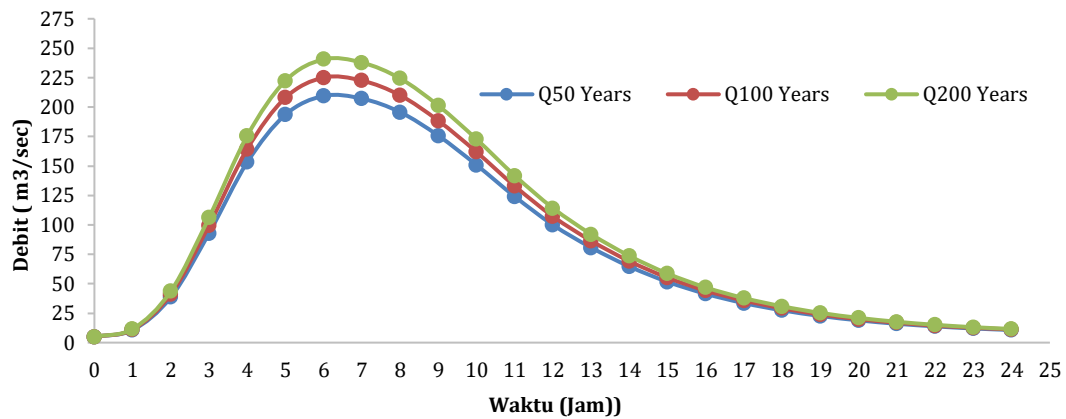
Selanjutnya model simulasi *rainfall-runoff* HEC HMS dibuat dengan memodelkan 4 komponen penting yaitu:

- **Basin Model** (input data-data sub basin berupa: nilai CN, *Impervious*, *Initial Abstraction*, luas area, *Time Lag*),
- **Meteorologic Model** (model kala ulang /50/100/ 200 tahun),
- **Control Specification** (periode simulasi perhitungan 24 jam), dan
- **Time Series Data** (input nilai intensitas hujan rancangan mm/jam).

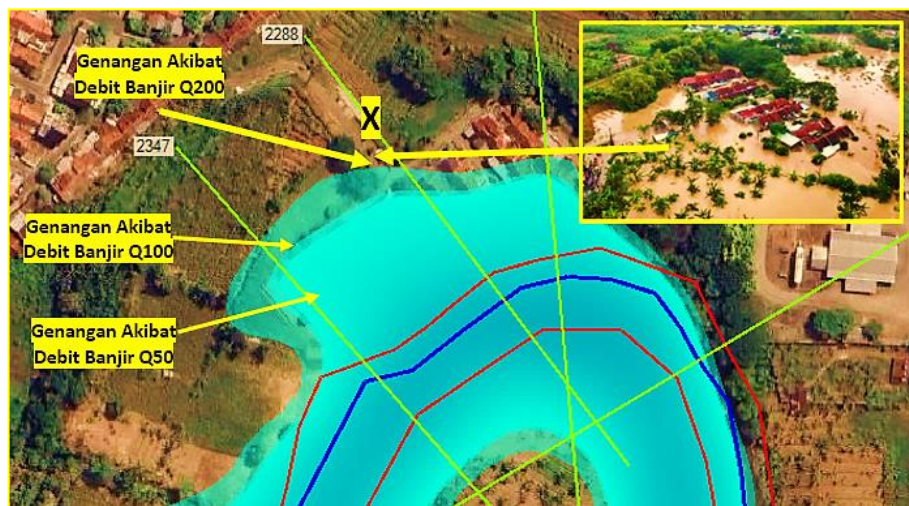
Model HEC HMS menghasilkan simulasi perhitungan hidrograf banjir / debit puncak pada posisi hilir di Sink Kali Pengkol SB5 (Sta. 2456) dan posisi hulu R1 (Sta 6075), untuk setiap hujan rencana kala ulang 50, 100 dan 200 tahun, Hidrograf satuan sintetis tampak pada Gambar 6. Dari Gambar 6 hidrograf banjir terlihat bahwa waktu puncak banjir terjadi pada jam simulasi ke-6, dengan debit tertinggi tiap kala ulang masing-masing: 50tahun: 209.5 m³/det, 100tahun: 225.1 m³/det, dan 200 tahun: 240.6 m³/det. Hidrograf ini selanjutnya ditetapkan sebagai hidrograf banjir untuk simulasi model HECRAS 1D dan 2D *Unsteady Flow Analysis*.

Analisa Hidrolika - Model HEC RAS 1D

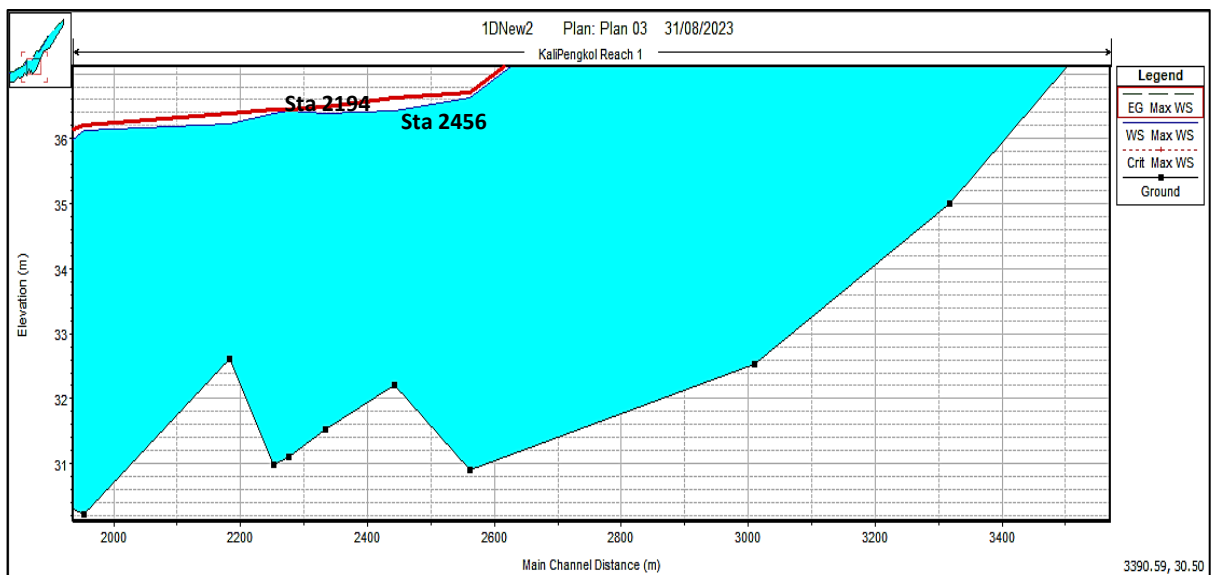
Hidrograf satuan sintetis banjir akibat hujan kala ulang n-tahun ditunjukkan di Gambar 6, gambar pola genangan pada Gambar 7 dan profil muka air di lokasi sungai sepanjang perumahan yang mengalami genangan banjir ditampilkan di Gambar 8.



Gambar 6 Hidrograf Satuan Sintesis Metode SCS Curve Number Sink 'Kali Pengkol'



Gambar 7 Pola Genangan Simulasi 1D *Unsteady Flow* dengan Debit Banjir Tiap Kala Ulang



Gambar 8 Profil Memanjang Muka Air Sungai di Sta 2194 s/d Sta 2456 Akibat Q banjir 200 Tahun

Dari hasil simulasi 1D *Unsteady Flow* pada Gambar 7, genangan yang diakibatkan oleh debit banjir kala ulang Q200 tahun adalah yang paling mendekati kondisi asli kejadian lapangan bila

dibandingkan terhadap foto dokumentasi kejadian di Gambar 2. Kapasitas penampang sungai terbukti tidak mampu menahan debit banjir baik pada debit banjir kala ulang Q50, Q100 maupun Q200 tahun,

terbukti dengan adanya genangan pada perumahan. Pada Gambar 7 terlihat bahwa titik "X" genangan tertinggi akibat Q200 tahun berada persis dengan titik genangan tertinggi banjir pada kejadian asli, yang terlihat pada insert dokumentasi foto. Untuk itu maka *Water surface profile* atau profil muka air maximum sungai pada simulasi 1D dengan debit Q200 akan dipergunakan untuk penentuan elevasi rencana tanggul.

Profil muka air sungai Kali Pengkol ditampilkan pada Gambar 8 dan diterangkan pada Tabel 5. Trase Kali Pengkol yang bersebelahan dengan pemukiman warga berada pada penampang sungai antara Sta 2194 s/d sta 2456. Terlihat dasar sungai pada bentang ini merupakan cekungan, dimana elevasi dasar sungai hilir Sta 2194 lebih tinggi dari elevasi dasar sungai hulu Sta 2456, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 9. Profil memanjang dasar sungai diperoleh dari fitur RAS Mapper pada HECRAS, dengan memasukkan peta raster DEM pada fitur *terrain* dan trase sungai digambarkan sebagai '*bank Lines*' pada fitur geometri, lalu fitur Profile akan menampilkan '*terrain*' tanah dasar trase sungai yang dibuat.

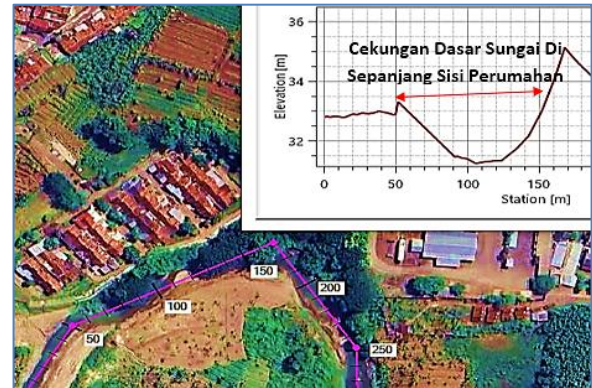
Juga terjadi loncat air pada bentang ini yaitu antara Sta 2347 ke Sta 2288, diakibatkan perubahan aliran dari kondisi superkritis (kecepatan tinggi, kedalaman lebih rendah) menjadi sub kritis (kecepatan lebih rendah, kedalaman tinggi). Fenomena loncat air biasanya diikuti dengan turbulensi yang bersifat merusak dan kehilangan energi yang menyebabkan air 'terperangkap' dalam cekungan tersebut, melimpas tanggul temporary dan menggenangi pemukiman warga.

Tabel 5 Profile Sta 2194 s/d Sta 2456 Akibat Q200

Stasioning	Profil e	Q Total (m ³ /s)	Min Ch Elev. (m)	W.S.Elev . (m)	Crit . W.S	E.G. Elev.
2456	Max WS	315.12	32.2	36.43		36.63
2347	Max WS	345.29	31.53	36.39		36.49
2288	Max WS	343.2	31.11	36.42		36.46
2265	Max WS	342.46	30.98	36.39		36.45
2194	Max WS	331.88	32.61	36.24		36.4

Dimana:

- Q total : debit total (m³/detik)
 Min Ch. Elev : elevasi terendah simulasi (m)
 W.S.elev : Water Surface → elevasi puncak simulasi (m)
 E.G. Elev : tinggi energi (m)

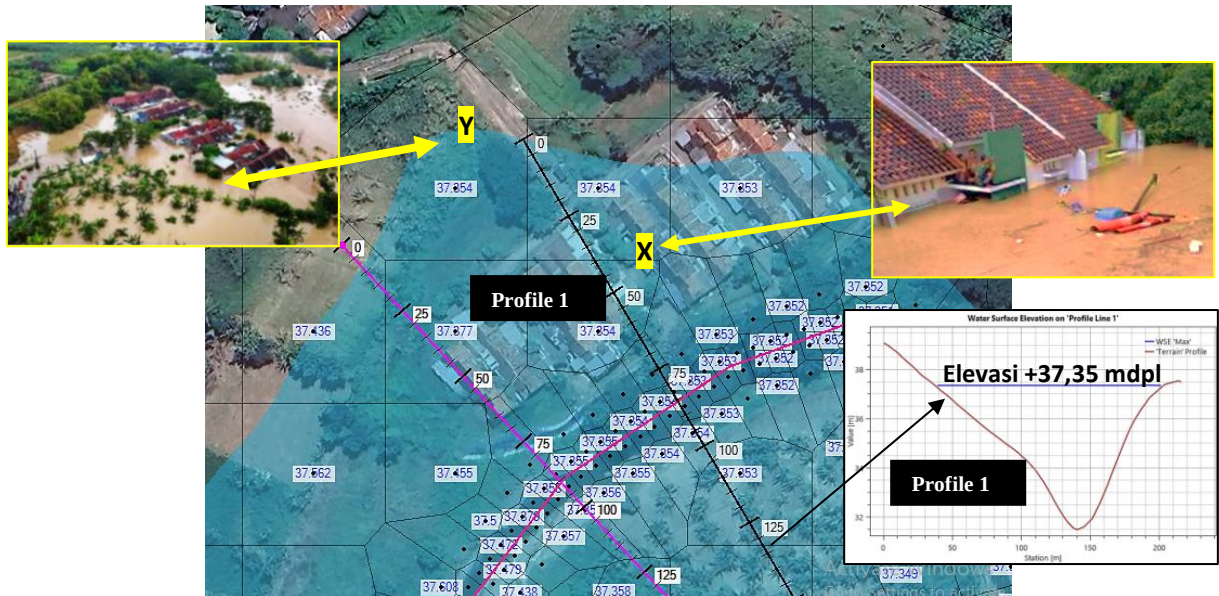


Gambar 9 Profil Memanjang Dasar Sungai Kali Pengkol Sepanjang Pemukiman Warga

Pada Tabel 5 ditampilkan profil muka air. 'W.S.Elev' adalah tinggi tekanan (bisa disebut juga sebagai Hydraulic Grade line) dan 'E.G.Elev' adalah garis energi pada pias tersebut. WS Elev maksimum terjadi di di Sta 2456 mencapai elevasi: +36,43 ~ +36,5 m. Dengan Q puncak banjir: 315 m³/detik, maka elevasi WS Max ini akan ditambahkan dengan tinggi jagaan : 0,8 m (Sosrodarsono, 1984, hal. 227) sebagai antisipasi terhadap *overtopping* limpasan air, *run up* gelombang dan kemungkinan penurunan dan kerusakan tanggul. Sehingga elevasi tanggul rencana adalah = 36,5 + 0,8 m = 37,30 m ~ +37,5 m. Analisis selanjutnya akan dibuat model hidrodinamik HECRAS 2D *Unsteady flow* tanpa tanggul dan dengan tanggul elevasi puncak +37,5 m.

Analisa Hidrolika Model HEC RAS 2D Tanpa Tanggul

Setelah seluruh komponen geometri/ debit dimasukkan ke Ras Mapper, lalu dilakukan simulasi *Unsteady Flow* 2D dengan data debit banjir Q 200 (grafik pada gambar 6) untuk simulasi banjir selama 24 jam, diperoleh model HECRAS 2D untuk genangan banjir di perumahan warga kondisi tanpa tanggul seperti Gambar 10.



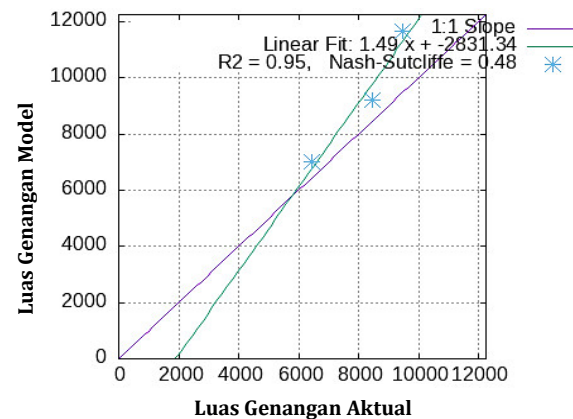
Gambar 10 Pola Genangan Simulasi 2D Unsteady Flow (kondisi tanpa tanggul)

Kalibrasi model dapat dilakukan dengan melakukan perbandingan tinggi genangan antara hasil simulasi 2D HECRAS terhadap visual dokumentasi kejadian, terlihat pada titik 'X' di Gambar 10 kedalaman air rerata 3,2 m pada model sudah cukup mendekati kejadian aktual ketinggian dari list plank rumah yang umumnya di tinggi 3 – 3,5 m di atas sloof pondasi rumah, dengan kata lain model untuk titik ini dapat dikatakan wajar. Gambar dokumentasi banjir pada titik X dan Y diperoleh pada hari kejadian banjir 1 Januari 2023 (Detik.com).

Demikian juga untuk luasan genangan yang menyerupai pola genangan visual kejadian asli banjir, pada titik Y pada Gambar 12 mirip dengan genangan pada gambar 4, menunjukkan model 2D bahkan memberikan visual genangan yang lebih *real* dibanding model 1D. Luasan pemukiman warga yang tergenang air dengan model HECRAS 2D kondisi maximum adalah sebesar : 9462 m²(jam simulasi 03:30). Validasi model HECRAS dilakukan terhadap luas genangan model (Tabel 6 dan gambar 11) dibandingkan terhadap luas genangan aktual (sesuai dokumentasi kejadian berdasarkan tanya jawab/penjelasan dengan warga setempat). Diperoleh nilai NSE = 0,48 yang artinya model *qualified* (memenuhi).

Tabel 6 Perbandingan Luasan Model Genangan vs Luasan Genangan Banjir pada Waktu t

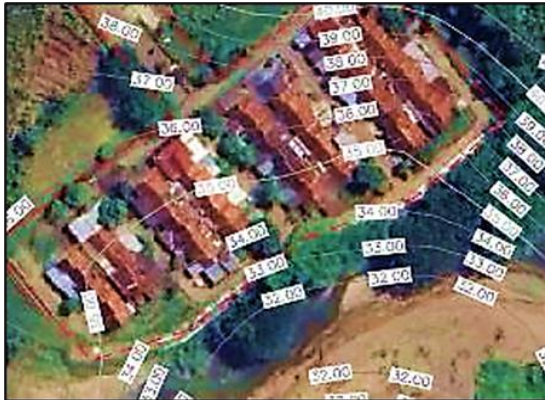
Waktu Simulasi	Luas Genangan Model (m ²)	Luas Genangan Aktual (m ²)
03:30	9462	11669
03:15	8462	9200
03:00	6462	7000



Gambar 11 Grafik NSE Hasil Pengamatan Lapangan Vs Hasil Simulasi Model

Pada Gambar 10 ditampilkan potongan memanjang Profile 1, elevasi banjir tertinggi pada model 2D tanpa tanggul : +37,35 m. Elevasi banjir ini menunjukkan nilai elevasi banjir yang lebih tinggi dari model 1D namun masih berada di bawah elevasi tanggul rencana. Demikian juga rata-rata elevasi tanah dasar perumahan berada di interval +34m s/d +37m (Gambar 12), yang artinya kontur perumahan memang berada di bawah elevasi banjir maksimum sungai +37,3m sehingga sangat wajar akan selalu terjadi genangan banjir apabila terjadi hujan dengan intensitas tertentu.

Elevasi dasar sungai hanya berselisih ±2 m saja dari elevasi perumahan. Kenaikan muka air sungai akibat debit tertentu akan berdampak pada cekungan ini. Dibutuhkan energi dan momentum yang lebih besar agar genangan banjir bisa melewati hilir perumahan. Hasil ini menguatkan validitas model 1D Profil muka air pada Gambar 10.



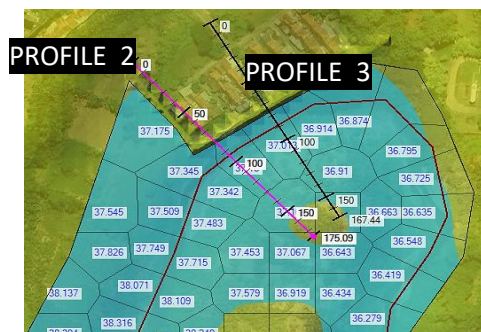
Gambar 12 Garis Kontur dasar Kali Pengkol yang Berbatasan dengan Pemukiman Warga

Analisa Hidrolika Model 2D Dengan Tanggul

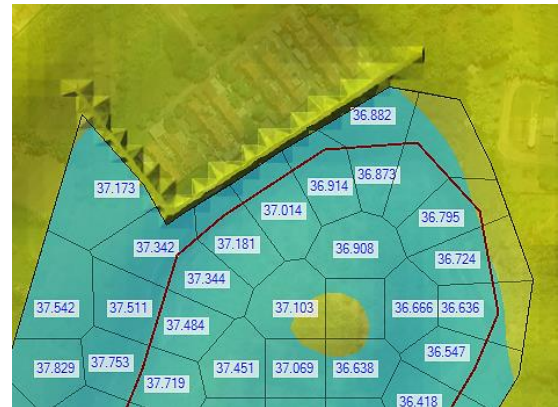
Tampilan model pembuatan tanggul di Gambar 13 menunjukkan tanggul dimodelkan sesuai dengan layout/posisi tanggul existing, ketinggian di +37.5 mdpl, lalu pola genangan banjir setelah model di lakukan *running analysis* ditampilkan pada gambar 16 dan 17.



Gambar 13 Fitur Pembuatan Model Tanggul di 'Terrain' RAS Mapper



Gambar 14 Pola Genangan Hasil Simulasi 2D Unsteady Flow Q200 dengan Tanggul

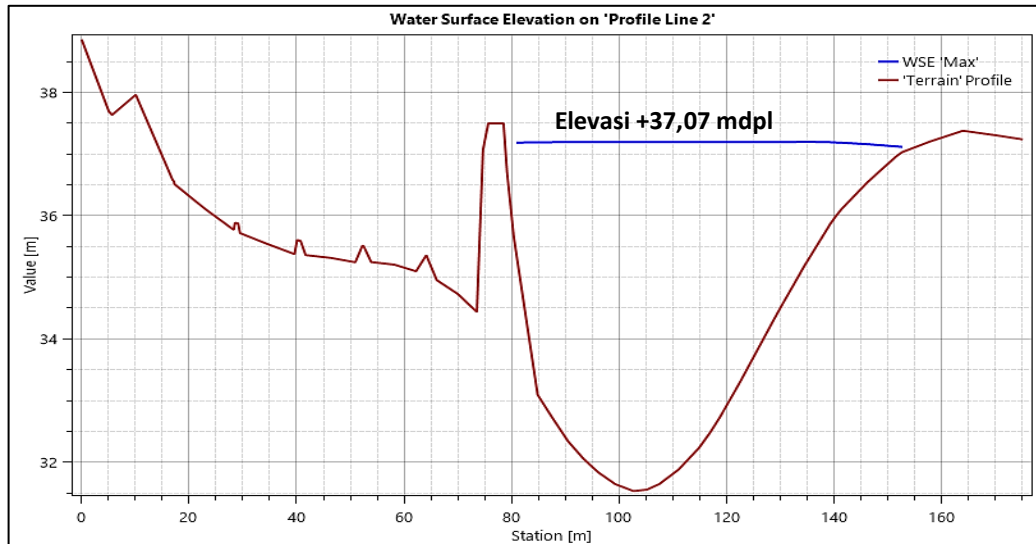


Gambar 15 Pola Genangan vs Terrain Tanggul

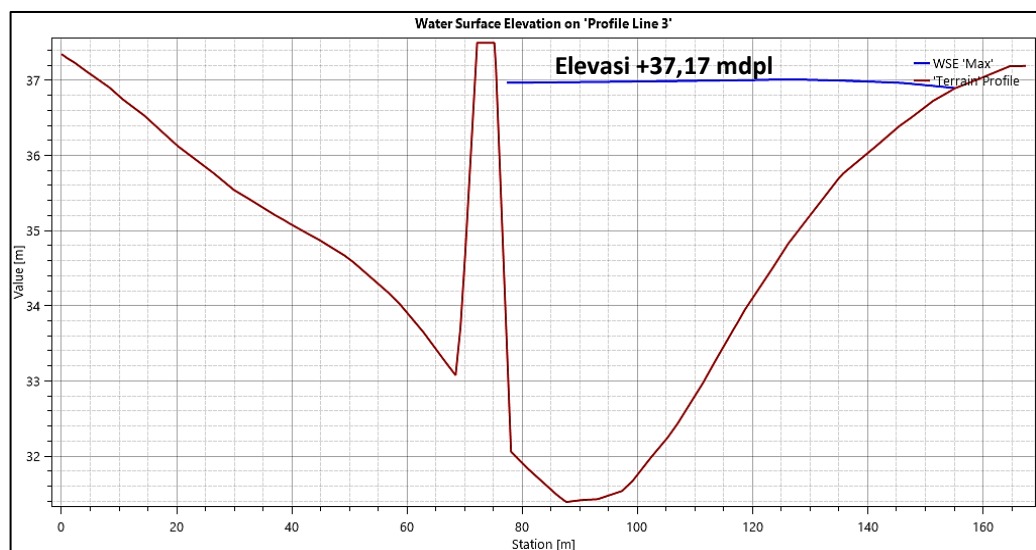
Dari simulasi di atas disimpulkan bahwa tanggul sepanjang 230 m, elevasi puncak +37,5m efektif mencegah terjadinya banjir yang diakibatkan oleh debit banjir Q200. Elevasi tertinggi air sungai pada saat banjir pada +37.07 mdpl dan +37,17 mdpl (ditampilkan potongan profile 2 dan 3 pada Gambar 16 dan gambar 17. Tidak terdapat lagi genangan banjir yang memasuki wilayah pemukiman warga.

Elevasi tanggul rencana hasil penelitian ini masih lebih tinggi bila dibandingkan dengan penelitian oleh (Pinasti dan Nurfaida, 2023) yang menyebutkan bahwa ketinggian tanggul 3m perlu dibuat pada elevasi $\pm 36,5$ mdpl. Demikian juga bila dibandingkan terhadap hasil penelitian oleh (Devi et al, 2022) yang menyebutkan dibutuhkan ketinggian tanggul 2,5 m dari elevasi asli (± 36 mdpl), adalah wajar mengingat model tanggul penelitian ini dibuat berdasarkan debit banjir pada hujan rencana kala ulang yang lebih panjang (200 tahun) sebagai validasi atas kondisi genangan aktual yang terjadi. Dibandingkan hujan rencana kala ulang penelitian terdahulu pada kala ulang 20 dan 50 tahun sesuai dengan regulasi perencanaan tanggul sungai pada wilayah kota propinsi.

Profile 2 dan Profile 3 menunjukkan *water surface* atau profil muka air di sungai selama periode banjir tertinggi, cukup terlihat jelas penampang sungai dan tanggul mampu menahan permukaan air sungai tidak melimpas melewati tinggi tanggul +37,5 m.



Gambar 16 Muka Air Maksimum (garis biru) dan Kontur tanah (garis coklat) di Profil 2



Gambar 17 Muka Air Maksimum (Garis Biru) dan Kontur Tanah (Garis Coklat) di Profil 3

Untuk model HECRAS 1D dan 2D tanpa tanggul dapat dilakukan kalibrasi dengan melakukan pemantauan pada kedalaman banjir maupun luasan genangan aktual yang terjadi dibandingkan terhadap luasan genangan model, yang mana hasilnya secara visual mendekati sama dan wajar. Namun untuk kalibrasi terhadap model 2D dengan penerapan tanggul hanya akan dapat dilakukan bila rencana tanggul tersebut telah direalisasikan pembangunannya, lalu dilakukan observasi keandalan tanggul bila terjadi curah hujan tinggi di sisi hulu DAS dan debit sungai yang tinggi.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan pemodelan banjir dan penerapan tanggul menggunakan HECRAS 1D dan 2D pada outlet Kali Pengkol maka dapat disimpulkan sebagai berikut: dari analisa hidrologi diperoleh debit puncak banjir Q kala Ulang 50, 100

dan 200 tahun pada daerah Tangkapan Air Kali Pengkol di sebelah pemukiman warga adalah (berurutan) : 209.5 m³/detik; 225.1 m³/detik dan 240.6 m³/detik.

Dari hasil analisa hidrolika HECRAS model 1D diperoleh elevasi tertinggi permukaan air (*Water Surface Maximum*) akibat Q banjir kala ulang: Q50 tahun: +35,62 m; Q100 tahun: +35,77m dan Q200 tahun: +36,43m. Selanjutnya ditetapkan simulasi menggunakan debit banjir Q200 tahun menunjukkan visualisasi genangan yang paling mendekati kejadian asli banjir sesuai dokumentasi kejadian.

Sebelum penerapan tanggul, model HECRAS 2D menampilkan elevasi tertinggi permukaan air (*Water Surface Maximum*) Q banjir kala ulang 200 tahun: +37, 3m. Kapasitas penampang sungai tidak mampu menahan debit puncak Q200 tahun, yang mengakibatkan terjadinya genangan banjir

memasuki pemukiman warga seluas: 9462 m². Hasil ini diverifikasi dengan membandingkan luasan genangan model vs luasan genangan aktual dengan nilai NSE sebesar : 0,48 yang berarti model yang dibuat sudah cukup memenuhi.

Setelah penerapan tanggul pada model HECRAS model 2D dengan layout existing sepanjang 230 m dan elevasi puncak tanggul +37,5 m, tidak terjadi lagi genangan memasuki perumahan, tanggul yang dibuat efektif mencegah air masuk ke dalam pemukiman warga. Elevasi tertinggi air di badan sungai setelah penerapan tanggul : +37,17 m. Tanggul bukan satu-satunya solusi permanen atas masalah banjir ini, namun dapat dimanfaatkan sebagai antisipasi tindakan tanggap darurat menjadi tanggul permanen mengacu pada *layout* dan elevasi tanggul yang aman dari banjir sesuai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Informasi Geospasial. (2024). *Peta DEM Nasional*.
<https://www.big.go.id/content/produk/demnas>
- Bena, P. M., & Khadiyanta, P. (2016). Pengaruh Perubahan Nilai Koefisien Dasar Bangunan (Kdb) Terhadap Peningkatan Debit Air Limpasan (Run Off) Pada Kawasan Perumahan Di Kelurahan Meteseh, Kecamatan Tembalang. *Teknik Pwk (Perencanaan Wilayah Kota)*, 9(1), 60–69.
<http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/pwk>
- Berita Online Detik.com. (2023)
<https://www.detik.com/jateng/berita/d-6544825/dinar-indah-semarang-sempat-ditinjau-menko-pmk-sebelum-kembali-tergenang> diakses: Mei 2023
- Berita Online Detik.com. (2023).
<https://www.detik.com/jateng/berita/d-6576125/perum-dinar-indah-semarang-banjir-lagi-2-tanggul-sungai-jebol> diakses Mei 2023
- Berita Online Kompas.com. (2023).
<https://www.kompas.com/tren/read/2023/01/07/070200565/update-banjir-bandang-di-perum-dinar-indah-semarang--1-warga-meninggal?page=all> diakses Mei 2023
- Devi, Y.L. Trilita, M.N., Handajani, N. (2022). Studi Pengendalian Banjir Sungai Penggaron Kabupaten Semarang. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, 210-224, Jan. 2024. ISSN 2548-9518.
<https://doi.org/10.19184/jrsl.v7i2.41136>
- Food and Agricultural Organization. (2023). *FAO World Soil Map*.
<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/>
- Garcia, M., Juan, A., Bedient, P. (2020). Integrating Reservoir Operations and Flood Modeling with HEC-RAS 2D, *Water Journal*. 2020, 12, 8. 2259.
<https://doi.org/10.3390/w12082259>
- Ginting, B. M. (2023). Desain Tanggul Sebagai Solusi Banjir Dengan Model Hidrodinamik Nufsaw2d Pada Desa Maen, Sulawesi Utara. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(1), 27–40.
<https://doi.org/10.32679/ith.v14i1.722>
- Handayani, W., Chigbu, U.E., Rudianto, I., Putri, I.H.S. (2020). Urbanization And Increasing Flood Risk In The Northern Coast Of Central Java Indonesia: An Assessment Towards Better Land Use Policy And Flood Management. *Land Journal*, 2020; 9(10):343.
<https://doi.org/10.3390/land9100343>
- Iroume, JY-A, Onguéné R, Djanna Koffi F, Colmet-Daage A, Stieglitz T, Essoh Sone W, Bogning S, Olinga Olinga JM, Ntchantcho R, Ntonga J-C, et al. (2022). The 21st August 2020 Flood in Douala (Cameroon): A Major Urban Flood Investigated with 2D HEC-RAS Modeling. *Water*. 2022; 14(11):1768.
<https://doi.org/10.3390/w14111768>
- Kementerian PUPR RI. (2015). *Peraturan Menteri PUPR RI No. 28 / 2015 tentang Garis Sempadan Sungai*. Kementerian PUPR RI.
- Khoirunisa, R. Yuwono, B. (2023). Urban Flood and Its Correlation with Built-up Area in Semarang, Indonesia. *Smart City: Vol. 3: Iss. 2, Article 2*.
<https://doi.org/10.56940/sc.v3.i2.2>
- Mizutani, H., Nakagawa, H., Yoden, T., Kawaike, K., & Zhang, H. (2013). Numerical Modelling Of River Embankment Failure Due To Overtopping Flow Considering Infiltration Effects. *Journal of Hydraulic Research*, 51(6), 681-695.
<http://hdl.handle.net/2433/197267>
- Muhammad, N. F., Darsono, S., Suharyanto, S., & Supriyanto, A. (2021). Analisis Reduksi Debit Banjir Di Dalam DAS Pucang Gading. *Rang Teknik Journal*, 4(2), 220–228.
<https://doi.org/10.31869/rtj.v4i2.2344>
- Natakusumah, D., Syahril, B., Darmawan, H, Aditywana, B. (2007). Pemodelan Hubungan Hujan dan Aliran Permukaan pada Suatu DAS dengan Metoda Beda Hingga, *PROC. ITB Sains & Tek*.97-123
<https://journals.itb.ac.id/index.php/jmfs/article/download/22/19/40>

- Nordin, N.F.M., Mohamad, H. (2019). Levee As A Flood Mitigation Option In Malaysia, Its' Susceptibility To Failure And Design Approach, *The International Journal of Integrated Engineering*.
<https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.09.024>
- Pemerintah Kota Semarang - Badan Penanggulangan Bencana Daerah. (2023). *Data Bencana Tahun Kota Semarang Tahun 2023*.
(<https://bpbpd.semarangkota.go.id/pages/data-bencana>)
- Pusat Pendidikan Dan Pelatihan Sumber Daya Air Dan Konstruksi. (2017). *Modul Metode Pengendalian Banjir Pelatihan Pengendalian Banjir*.
- Pinasti, N.W. & Nurfaida, W.,(2023), Rekayasa Konstruksi Tanggul Penanggulangan Banjir Sungai Babon di Perumahan Dinar Indah Kota Semarang Berdasarkan Pemodelan Hidraulika 1D HEC-RAS 6.3, *Tugas Akhir Teknik Sipil UGM*, Jogjakarta.
<https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/228127>
- Qian, Q., Edwards, D., Zhang, Y., (2024) Improving Flood Inundation Mapping Accuracy Using HEC-RAS Modeling: A Case Study of the Neches River Tidal Floodplain in Texas, *Journal of Hydrologic Engineering*, 2024, 29(4): 05024011
<https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6037>
- Satria, H., Nurfaida, W., Kurniawan, A., Iswardoyo, J., & Sulaiman, M. (2024). Numerical simulation and redesign of Kamar Kajang Levee against Mount Semeru lahar flood based on HEC-RAS 2D non-newtonian flow model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1311(1), 012065.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1311/1/012065>
- Shustikova, I., Domeneghetti ,A., Neal, J.C., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D Capabilities Of HEC-RAS And LISFLOOD-FP On Complex Topography. *Hydrological Sciences Journal*. 64:14, 1769-1782.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1671982>
- Sosrodarsono, S. (1984). *Perbaikan dan Pengaturan Sungai. Pradnya Paramita*. Jakarta
<https://pu.go.id/pustaka/biblio/perbaikan-dan-pengaturan-sungai/2J826>
- Tobin, G.A. (1995). The Levee Love Affair: A Stormy Relationship?. *Journal of the American Water Resource Association*, 31(3), 359–367.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb04025.x>
- USACE Hydrologic Engineering Centre. (2023). *HECRAS Reference Manual*.
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Vozinaki, A.E.K., Morianou, G., Alexakis, D., & Tsanis, I.. (2017). Comparing 1D And Combined 1D/2D Hydraulic Simulations Using Highresolution Topographic Data: A Case Study Of The Koiliaris Basin, Greece, *Hydrological Sciences Journal*, 62:4, 642-656.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1255746>
- Ward, R. C. (1978). *Floods: A Geographical Perspective*. The MacMillan Press.
- Yazdan, M.M.S.; Ahad, M.T.; Kumar, R.; Mehedi, M.A.A. Estimating Flooding at River Spree Floodplain Using HEC-RAS Simulation. *J* 2022, 5,410–426. <https://doi.org/10.3390/j5040028>