

# Evaluasi Kinerja Sistem Drainase Permukiman Padat Menggunakan Model SWMM Berbasis DEM Resolusi Tinggi (0,5 m) di Jalan Ismailiyah, Kota Medan

Yondi Anugrah Pratama<sup>1</sup> & Kuswandi Kuswandi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa S-1 Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area

\*Author Correspondence: [kuswandi@staff.uma.ac.id](mailto:kuswandi@staff.uma.ac.id)

## **Abstract**

*Flooding in densely populated urban residential areas is generally caused by limited drainage capacity, high impervious surface coverage, and relatively flat topographic conditions. This study aims to evaluate the performance of the drainage system in Jalan Ismailiyah, Kota Medan, using a hydrological-hydraulic modeling approach based on high-resolution Digital Elevation Model (0.5 m) and EPA SWMM. Surface flow pattern analysis indicates that the study area has a low slope (<2%) with minimal micro-topographic variation, resulting in slower runoff and increased ponding potential. Simulation results reveal that most conduits operate under full flow conditions for more than 4 hours and experience capacity limitations. Several critical nodes exhibit significant flooding with high discharge and flood volume, indicating system failure in conveying runoff. These findings are consistent with field observations, where inundation occurs even under no-rain conditions and increases up to 40–50 cm during rainfall events. Improvement scenarios include channel normalization, capacity enhancement in critical segments, inlet addition, and implementation of local infiltration systems. The results demonstrate that a micro-topography-based approach combined with scenario simulation is effective in identifying drainage problems and formulating practical solutions for dense urban areas.*

**Keyword:** Urban drainage; SWMM; high-resolution DEM; urban flooding; dense settlement

## **Abstrak**

Permasalahan genangan pada kawasan permukiman padat perkotaan umumnya disebabkan oleh keterbatasan kapasitas sistem drainase, tingginya persentase permukaan kedap air, serta kondisi topografi yang relatif datar. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem drainase di Jalan Ismailiyah, Kota Medan, menggunakan pendekatan pemodelan hidrologi-hidraulika berbasis Digital Elevation Model (DEM) resolusi tinggi (0,5 m) dan model EPA SWMM. Analisis pola aliran permukaan menunjukkan bahwa kawasan memiliki kemiringan rendah (<2%) dengan variasi elevasi mikro yang terbatas, sehingga memperlambat aliran dan meningkatkan potensi genangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebagian besar saluran bekerja dalam kondisi penuh (full flow) dengan durasi lebih dari 4 jam, serta mengalami kondisi keterbatasan kapasitas (capacity limited). Beberapa node utama mengalami flooding dengan debit dan volume genangan yang tinggi, yang mengindikasikan kegagalan sistem dalam mengalirkan limpasan. Kondisi ini konsisten dengan observasi lapangan, di mana genangan terjadi bahkan tanpa hujan dan meningkat hingga 40–50 cm saat hujan. Upaya perbaikan dilakukan melalui skenario normalisasi saluran, peningkatan kapasitas pada segmen kritis, penambahan inlet, serta penerapan sistem resapan lokal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis mikro-topografi dan simulasi skenario efektif dalam mengidentifikasi permasalahan dan merumuskan solusi sistem drainase pada kawasan permukiman padat.

**Kata kunci:** Drainase perkotaan; SWMM; DEM resolusi tinggi; genangan; permukiman padat

## PENDAHULUAN

Perkembangan kawasan perkotaan yang pesat di Kota Medan dalam beberapa dekade terakhir telah mendorong peningkatan kepadatan permukiman, khususnya pada kawasan dengan keterbatasan ruang terbuka dan infrastruktur yang tidak berkembang secara proporsional. Urbanisasi yang tidak terkendali menyebabkan peningkatan luas permukaan kedap air (impervious surface), sehingga mengurangi kapasitas infiltrasi dan secara signifikan meningkatkan limpasan permukaan (surface runoff) (Shuster et al., 2005; Fletcher et al., 2013; Berthier et al., 2021). Kondisi ini berdampak langsung terhadap meningkatnya beban sistem drainase perkotaan, yang pada banyak kasus tidak mampu mengalirkan debit puncak saat kejadian hujan intensitas tinggi, sehingga menimbulkan genangan dan banjir lokal (urban flooding).

Permasalahan tersebut menjadi semakin kompleks pada kawasan permukiman dengan kerapatan sangat tinggi, seperti di Jalan Ismailiyah, di mana keterbatasan ruang menyebabkan dimensi saluran drainase relatif kecil, jaringan tidak terintegrasi secara optimal, serta sering mengalami gangguan berupa sedimentasi dan penyumbatan. Selain itu, variasi elevasi yang sangat kecil pada skala mikro, seperti perbedaan tinggi antara badan jalan, halaman rumah, dan saluran, memiliki pengaruh signifikan terhadap pola aliran permukaan dan akumulasi genangan. Fenomena ini menunjukkan bahwa karakteristik mikro-topografi merupakan faktor penting dalam analisis sistem drainase perkotaan (Mark et al., 2004; Leitão et al., 2016; Jamali et al., 2020).

Dalam kajian drainase perkotaan, model hidrologi-hidraulika seperti EPA SWMM telah широко digunakan untuk mensimulasikan proses transformasi hujan menjadi limpasan serta aliran dalam jaringan drainase (Rossman, 2015). Model ini mampu merepresentasikan interaksi antara curah hujan, karakteristik subcatchment, dan sistem saluran, sehingga banyak digunakan dalam evaluasi kinerja drainase dan perencanaan sistem pengendalian banjir perkotaan (Tsihrintzis & Hamid, 1998; Barco et al., 2008; Wang et al., 2021). Namun demikian, tingkat akurasi hasil simulasi sangat

bergantung pada kualitas input data, terutama data topografi yang digunakan untuk mendefinisikan parameter kemiringan, arah aliran, dan delineasi subcatchment.

Sebagian besar penelitian sebelumnya masih menggunakan data Digital Elevation Model (DEM) resolusi menengah ( $\geq 5$  m), seperti DEMNAS atau SRTM, yang memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi permukaan pada skala detail. Pada kawasan permukiman padat dengan konfigurasi ruang yang kompleks, resolusi tersebut tidak mampu menangkap variasi mikro-topografi seperti cekungan lokal (micro-depression), gang sempit, serta perbedaan elevasi kecil yang berpengaruh terhadap proses genangan (Fewtrell et al., 2011; Neal et al., 2012; Vojinovic et al., 2020). Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (research gap) terkait pemanfaatan data DEM resolusi sangat tinggi dalam analisis sistem drainase perkotaan, khususnya pada skala lingkungan permukiman di kota-kota berkembang.

Di sisi lain, sebagian besar studi drainase perkotaan masih berfokus pada evaluasi kondisi eksisting tanpa mengintegrasikan analisis berbasis skenario untuk pengembangan solusi teknis yang aplikatif. Padahal, pendekatan berbasis simulasi skenario sangat penting dalam mendukung pengambilan keputusan, seperti evaluasi peningkatan kapasitas saluran, optimalisasi jaringan drainase, maupun penerapan konsep drainase berkelanjutan (sustainable urban drainage systems) (Butler et al., 2018; Zhou, 2014; Jiang et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang tidak hanya mampu merepresentasikan kondisi eksisting secara detail, tetapi juga dapat digunakan sebagai alat analisis untuk merancang intervensi teknis yang efektif.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi karakteristik limpasan permukaan pada kawasan permukiman padat menggunakan data DEM resolusi tinggi (0,5 m); (2) menganalisis kinerja sistem drainase eksisting dengan menggunakan model EPA SWMM; (3) mengidentifikasi lokasi dan karakteristik genangan yang terjadi akibat keterbatasan kapasitas sistem; serta (4) mengembangkan dan mengevaluasi skenario perbaikan sistem

drainase dalam rangka meningkatkan kinerja jaringan.

Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada integrasi data DEM beresolusi sangat tinggi (0,5 m) dengan model EPA SWMM untuk merepresentasikan mikrotopografi secara lebih akurat pada kawasan permukiman dengan kerapatan sangat tinggi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola aliran dan genangan pada skala detail yang tidak dapat dicapai oleh penelitian sebelumnya yang menggunakan DEM beresolusi menengah. Selain itu, penelitian ini mengembangkan pendekatan berbasis skenario sebagai bagian dari analisis, sehingga tidak hanya menghasilkan evaluasi kondisi eksisting, tetapi juga memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif untuk peningkatan sistem drainase perkotaan, khususnya pada kawasan permukiman padat di kota berkembang.

## MATERIAL AND METHOD

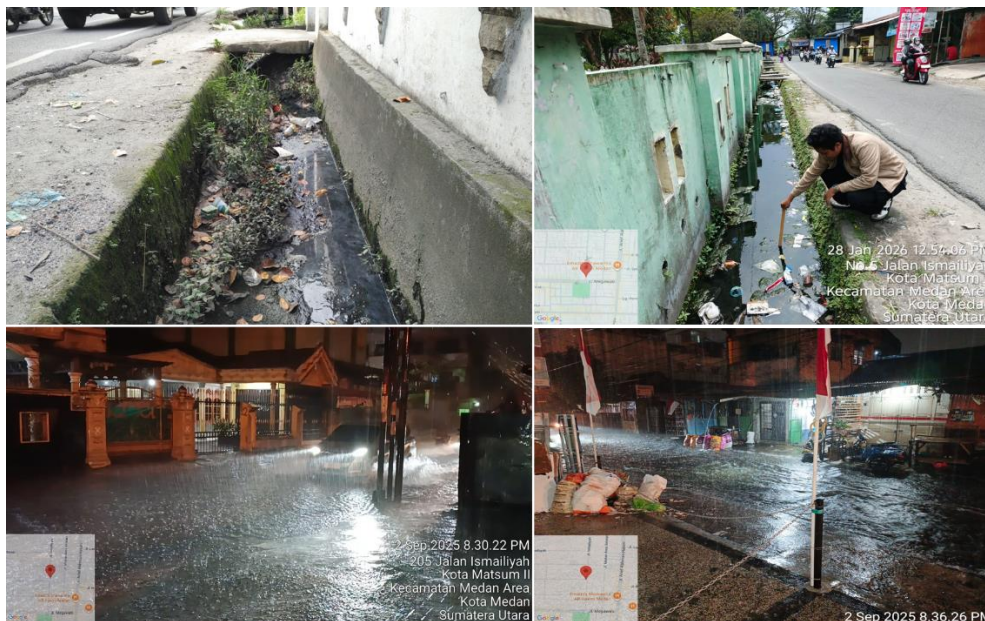
### Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan di Jalan Ismailiyah, Kota Medan, yang merupakan kawasan permukiman dengan kerapatan tinggi dan dominasi permukaan kedap air. Sistem drainase eksisting memiliki dimensi terbatas dan kondisi pemeliharaan yang kurang optimal, ditandai dengan sedimentasi dan penumpukan sampah

yang menyebabkan genangan sekitar  $\pm 30$  cm pada kondisi tanpa hujan. Saat hujan, kapasitas saluran tidak mampu menampung limpasan sehingga terjadi overflow ke badan jalan dengan kedalaman genangan mencapai 40–50 cm. Secara topografis, kawasan ini relatif datar dengan variasi elevasi mikro yang kecil, yang ditunjukkan oleh hasil analisis DEM resolusi 0,5 m dengan kemiringan rata-rata  $< 2\%$ , sehingga memperlambat aliran permukaan dan meningkatkan potensi genangan. Kondisi ini menjadikan lokasi penelitian representatif untuk evaluasi kinerja sistem drainase pada permukiman padat.

### Data Hujan.

Data curah hujan yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Stasiun BMKG Sampali dengan periode pengamatan tahun 2015–2024. Berdasarkan data tersebut, curah hujan tahunan menunjukkan variasi yang cukup signifikan, dengan nilai minimum sebesar 78,5 mm (2023) dan maksimum sebesar 209,8 mm (2015). Fluktuasi ini mencerminkan variabilitas kondisi iklim tahunan yang berpotensi mempengaruhi besarnya limpasan permukaan dan kinerja sistem drainase. Oleh karena itu, data hujan ini digunakan sebagai dasar dalam penyusunan input simulasi hidrologi pada model EPA SWMM.



**Gambar 1.** Kondisi eksisting sistem drainase dan kejadian genangan di Jalan Ismailiyah, Kota Medan

## Storm Water Management Model (SWMM).

Pemodelan sistem drainase pada penelitian ini dilakukan menggunakan EPA SWMM yang merupakan model hidrologi-hidraulika berbasis dinamik untuk mensimulasikan proses transformasi hujan menjadi limpasan serta aliran dalam jaringan drainase perkotaan. Model ini menggabungkan proses hidrologi pada permukaan lahan dan proses hidraulika dalam saluran, sehingga mampu merepresentasikan sistem drainase secara terintegrasi.

Dalam penelitian ini, wilayah studi dibagi menjadi beberapa unit tangkapan hujan (subcatchment) berdasarkan hasil pengolahan data Digital Elevation Model (DEM) beresolusi tinggi (0,5 m). Delineasi subcatchment dilakukan dengan mempertimbangkan arah aliran permukaan (flow direction) dan akumulasi aliran (flow accumulation), sehingga setiap unit tangkapan mampu merepresentasikan karakteristik mikrotopografi pada kawasan permukiman padat.

Setiap subcatchment didefinisikan menggunakan parameter utama yang meliputi luas area, kemiringan permukaan, persentase area kedap air (imperviousness), serta parameter kekasaran permukaan (Manning's roughness coefficient). Limpasan permukaan yang terjadi pada setiap subcatchment dihitung berdasarkan keseimbangan air (water balance), yang secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{dV}{dt} = i(t)A - f(t)A - Q(t)$$

Dalam hal ini, adalah perubahan volume air di permukaan ( $m^3/dtk$ ),  $i(t)$  adalah intensitas hujan ( $mm/jam$ ),  $f(t)$  adalah laju infiltrasi ( $mm/jam$ ).  $A$  adalah luas subcatchment ( $m^2$ ) dan  $Q(t)$  adalah debit limpasan ( $m^3/dtk$ )

Proses infiltrasi dalam model ditentukan menggunakan metode Horton, yang dinyatakan sebagai:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

dengan  $f_0$  sebagai kapasitas infiltrasi awal,  $f_c$  sebagai kapasitas infiltrasi minimum, dan  $k$  sebagai konstanta penurunan infiltrasi. Metode ini dipilih karena mampu merepresentasikan kondisi tanah pada kawasan perkotaan yang

telah mengalami perubahan struktur akibat aktivitas pembangunan.

Aliran permukaan dari subcatchment menuju jaringan drainase dihitung menggunakan pendekatan nonlinier reservoir, yang mengasumsikan hubungan antara kedalaman aliran dan debit limpasan. Selanjutnya, aliran dalam jaringan drainase dimodelkan menggunakan persamaan kontinuitas dan momentum (Saint-Venant) dalam bentuk satu dimensi, yaitu:

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Persamaan momentum:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAQ_f = 0$$

di mana  $A$  adalah luas penampang aliran ( $m^2$ ),  $Q$  adalah debit ( $m^3/s$ ),  $H$  adalah tinggi energi hidraulik ( $m$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ), dan  $Q_f$  adalah kehilangan energi akibat gesekan.

Dalam implementasinya, kehilangan energi akibat gesekan dihitung menggunakan persamaan Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

di mana  $n$  adalah koefisien kekasaran Manning,  $R$  adalah jari-jari hidraulik ( $m$ ), dan  $S$  adalah kemiringan energi.

Simulasi aliran dalam jaringan drainase dilakukan menggunakan pendekatan dynamic wave, yang memungkinkan perhitungan aliran tidak seragam dan tidak tunak, termasuk efek backwater, aliran penuh, serta kondisi aliran balik. Pendekatan ini sangat sesuai untuk merepresentasikan kondisi drainase pada kawasan permukiman padat dengan geometri saluran terbatas dan kompleks.

Output utama dari pemodelan ini meliputi debit limpasan, hidrograf aliran pada setiap titik node, serta identifikasi lokasi terjadinya limpasan berlebih (overflow) yang berpotensi menyebabkan genangan. Untuk meningkatkan reliabilitas model, hasil simulasi dibandingkan secara kualitatif dengan kondisi genangan aktual di lapangan, berdasarkan observasi kejadian banjir yang dilaporkan oleh

masyarakat maupun hasil pengamatan langsung. Pendekatan ini digunakan untuk memastikan bahwa pola genangan yang dihasilkan model memiliki kesesuaian dengan kondisi nyata.

Selain itu, model yang telah dibangun digunakan untuk melakukan simulasi berbasis skenario, guna mengevaluasi efektivitas berbagai alternatif perbaikan sistem drainase. Skenario yang diuji meliputi kondisi eksisting, perbaikan parsial melalui normalisasi saluran, serta perbaikan optimal melalui peningkatan kapasitas dan konfigurasi jaringan. Dengan demikian, model SWMM tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi, tetapi juga sebagai dasar dalam perumusan rekomendasi teknis yang aplikatif.

## HASIL DAN PEMBAHASAS

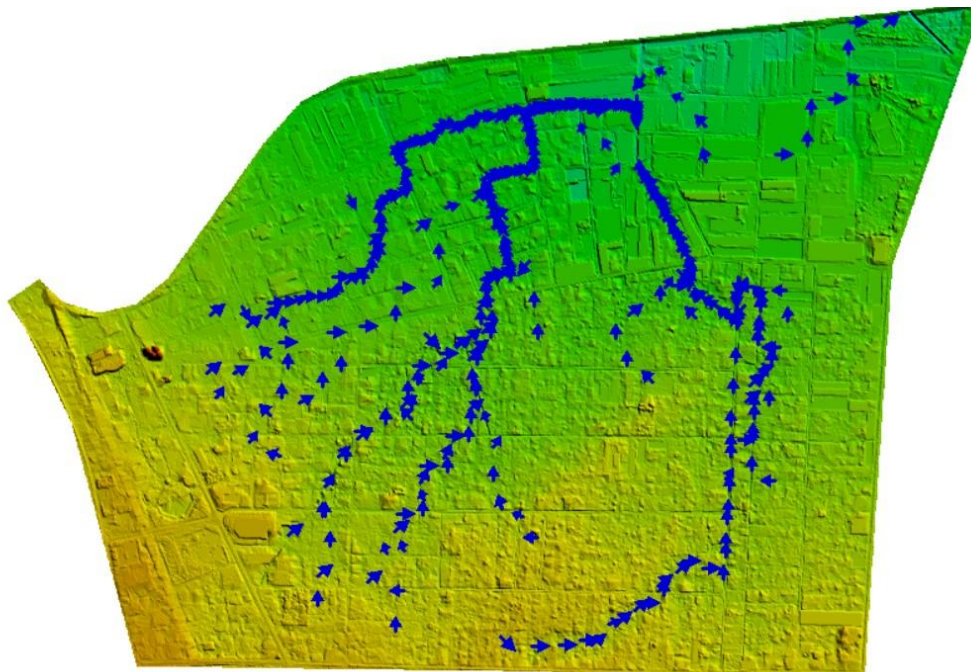
### *Pola Aliran Kawasan berdasarkan DEM*

Analisis pola aliran permukaan dilakukan menggunakan data Digital Elevation Model (DEM) beresolusi tinggi (0,5 m), yang memungkinkan identifikasi arah aliran dan jalur konsentrasi limpasan secara detail pada skala mikro. Hasil analisis menunjukkan bahwa pola aliran di kawasan penelitian cenderung terdistribusi mengikuti gradien elevasi lokal dengan kecenderungan aliran menuju bagian utara kawasan.

Berdasarkan hasil flow direction dan flow accumulation, terbentuk beberapa jalur aliran utama yang berfungsi sebagai koridor konsentrasi limpasan, yang umumnya berimpit dengan jaringan drainase eksisting. Namun demikian, pada beberapa bagian kawasan ditemukan pola aliran yang tidak terarah secara optimal, terutama pada area dengan kemiringan sangat kecil (<2%), sehingga menyebabkan terbentuknya aliran menyebar (sheet flow) dan akumulasi air pada cekungan lokal (micro-depression).

Selain itu, kerapatan bangunan yang tinggi menyebabkan terjadinya perubahan jalur aliran alami, di mana limpasan permukaan cenderung terhambat dan dialihkan mengikuti jaringan jalan dan gang sempit. Kondisi ini mengakibatkan terjadinya konsentrasi aliran pada titik-titik tertentu yang berpotensi menjadi lokasi genangan. (Gambar 2)

Secara keseluruhan, pola aliran yang terbentuk menunjukkan bahwa sistem drainase eksisting belum sepenuhnya mampu mengakomodasi arah aliran alami berdasarkan topografi. Hal ini diperkuat dengan adanya diskoneksi antara jalur aliran hasil analisis DEM dan jaringan drainase aktual, yang berkontribusi terhadap terjadinya limpasan berlebih (overflow) dan genangan pada permukaan jalan.



**Gambar 2.** Pola aliran permukaan berdasarkan analisis DEM resolusi 0,5 m di kawasan penelitian

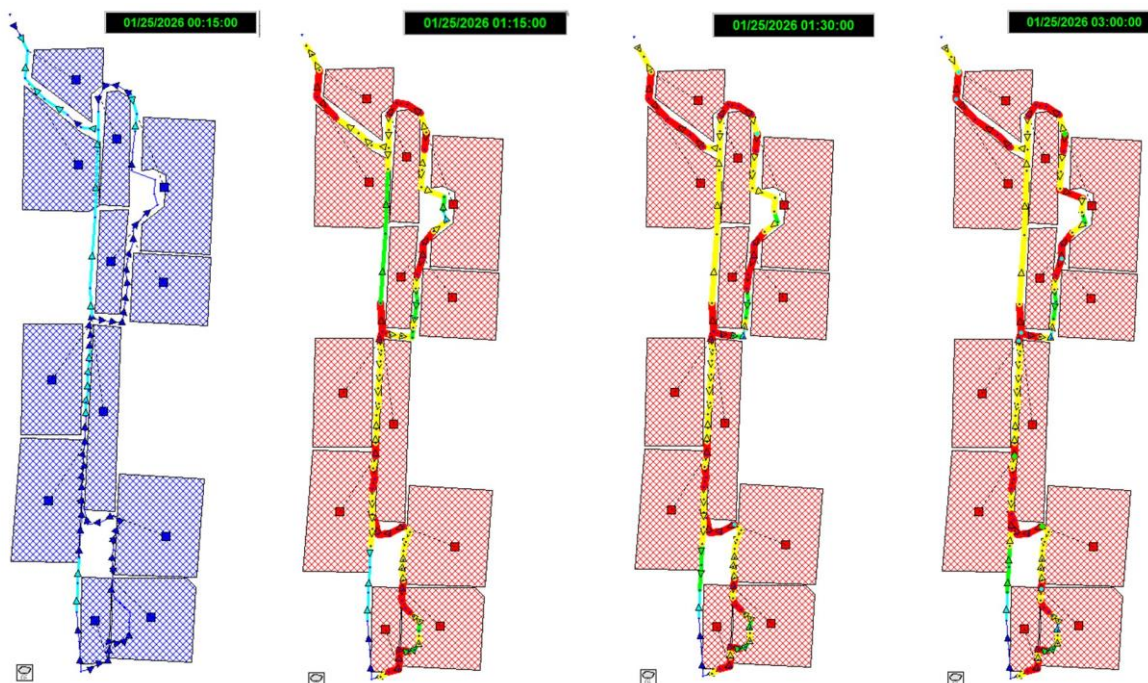
### Dinamika aliran kawasan

Hasil simulasi menggunakan EPA SWMM menunjukkan dinamika aliran dalam sistem drainase pada beberapa interval waktu selama kejadian hujan (Gambar 3). Pada kondisi awal ( $t = 00:15$ ), aliran masih berada dalam kapasitas saluran, yang ditunjukkan dengan kondisi aliran relatif stabil tanpa indikasi limpasan berlebih. Seiring bertambahnya waktu ( $t = 01:15$  hingga  $01:30$ ), terjadi peningkatan debit limpasan yang signifikan akibat akumulasi curah hujan. Hal ini menyebabkan beberapa segmen saluran mulai mengalami kondisi mendekati kapasitas maksimum, yang ditandai dengan perubahan warna aliran dari hijau ke kuning hingga merah. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya peningkatan rasio kapasitas terhadap debit aliran, serta mulai munculnya tekanan aliran dalam sistem. Pada waktu simulasi  $t = 03:00$ , sebagian besar jaringan drainase menunjukkan kondisi jenuh hingga melampaui kapasitas, yang ditandai dengan dominasi warna merah pada hampir seluruh segmen saluran. Hal ini menunjukkan

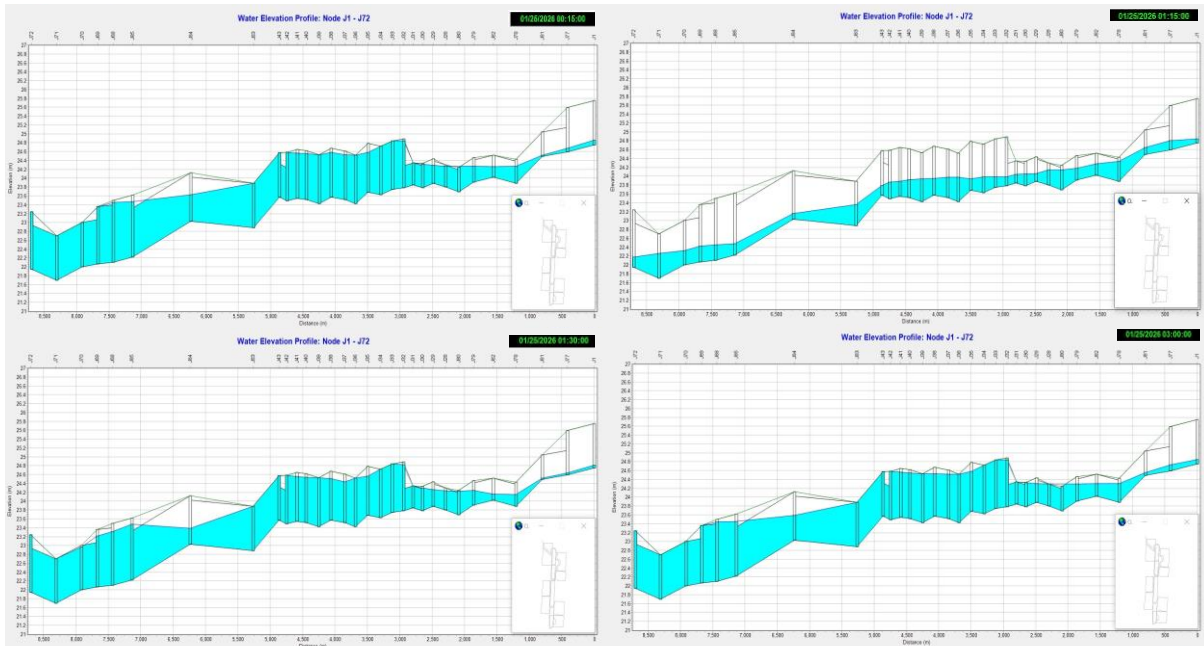
bahwa sistem drainase tidak mampu lagi menampung debit limpasan yang masuk, sehingga terjadi limpasan berlebih (overflow) pada beberapa titik. Titik-titik tersebut berpotensi menjadi lokasi genangan yang teridentifikasi pada permukaan jalan.

Secara spasial, lokasi limpasan berlebih cenderung terjadi pada segmen saluran dengan geometri terbatas dan pada titik pertemuan aliran (junction), yang menerima kontribusi limpasan dari beberapa subcatchment. Kondisi ini diperkuat oleh karakteristik kawasan yang relatif datar dengan kemiringan kecil, sehingga memperlambat proses pengaliran dan meningkatkan akumulasi debit pada jaringan drainase.

Hasil simulasi ini konsisten dengan kondisi lapangan, di mana genangan terjadi akibat keterbatasan kapasitas saluran dan hambatan aliran yang disebabkan oleh sedimentasi dan sampah. Dengan demikian, model SWMM mampu merepresentasikan kondisi aktual sistem drainase di lokasi penelitian, serta mengidentifikasi titik-titik kritis yang memerlukan penanganan.



**Gambar 3.** Dinamika aliran dan kondisi kapasitas saluran hasil simulasi SWMM pada beberapa interval waktu. Warna hijau menunjukkan kondisi aliran normal, kuning menunjukkan kondisi mendekati kapasitas, dan merah menunjukkan kondisi melampaui kapasitas (*surcharge*).



**Gambar 4.** Profil elevasi muka air sepanjang saluran (Node J1–J72) hasil simulasi SWMM pada beberapa interval waktu

### ***Analisis Kuantitatif Kinerja Sistem Drainase kawasan***

Analisis kinerja sistem drainase dilakukan berdasarkan hasil simulasi EPA SWMM yang meliputi parameter debit aliran, kapasitas saluran, kondisi surcharge, serta kejadian flooding pada node.

#### ***1. Kondisi Kapasitas Saluran (Conduit Performance)***

Berdasarkan *Conduit Surcharge Summary*, sebagian besar saluran mengalami kondisi penuh (full flow) dalam durasi yang signifikan, bahkan mencapai lebih dari 4–6 jam pada beberapa segmen kritis seperti C17, C33, C42, C53, dan C61. Hal ini menunjukkan bahwa sistem drainase bekerja dalam kondisi jenuh dalam waktu yang lama.

Selain itu, terdapat saluran yang mengalami kondisi aliran terbatas (*capacity-limited flow*) hingga lebih dari 5 jam, seperti pada C24, C25, C26, dan C53. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kapasitas hidraulik saluran tidak mencukupi untuk mengalirkan debit limpasan yang masuk.

#### ***2. Debit Aliran dan Kecepatan***

Hasil *Link Flow Summary* menunjukkan bahwa debit maksimum pada saluran bervariasi secara signifikan, dengan nilai tertinggi mencapai sekitar 3,36 m<sup>3</sup>/s (C64) dan 3,27 m<sup>3</sup>/s (C65). Sementara itu, kecepatan aliran maksimum mencapai lebih dari 2,0 m/s pada beberapa segmen, seperti C4 (2,02 m/s) dan C85 (2,18 m/s).

Namun demikian, meskipun kecepatan relatif tinggi pada beberapa segmen, sebagian besar saluran menunjukkan rasio kedalaman terhadap kapasitas maksimum (*full depth ratio*) mendekati atau sama dengan 1,00. Hal ini menandakan bahwa aliran telah mencapai kapasitas penuh, sehingga berpotensi menimbulkan limpasan berlebih.

#### ***3. Analisis Flooding pada Node***

Hasil *Node Flooding Summary* menunjukkan bahwa sebagian besar node mengalami flooding dengan durasi yang cukup lama, yaitu antara 4 hingga 6 jam pada node utama seperti J17, J24, J33, J42, dan J61. Debit flooding maksimum juga menunjukkan nilai yang sangat tinggi, seperti:

- J24: 6,655 m<sup>3</sup>/s
- J61: 6,478 m<sup>3</sup>/s
- J33: 5,586 m<sup>3</sup>/s

- J17: 4,035 m<sup>3</sup>/s

Selain itu, volume genangan pada node tersebut sangat besar, mencapai:

- J24:  $\pm 898,7 \times 10^6$  liter
- J61:  $\pm 910,8 \times 10^6$  liter
- J33:  $\pm 836,4 \times 10^6$  liter

Nilai ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mengalami kegagalan sesaat, tetapi juga akumulasi genangan dalam volume besar.

#### 4. Pola Inflow dan Konsentrasi Debit

Berdasarkan *Node Inflow Summary*, terlihat bahwa beberapa node menerima debit inflow yang sangat besar, seperti:

- J61: 62,196 m<sup>3</sup>/s
- J24: 61,728 m<sup>3</sup>/s
- J33: 59,626 m<sup>3</sup>/s
- J17: 50,691 m<sup>3</sup>/s

Hal ini menunjukkan adanya konsentrasi limpasan dari beberapa subcatchment yang terakumulasi pada titik-titik tertentu, terutama pada bagian hilir sistem.

#### 5. Interpretasi Kinerja Sistem

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa:

- a. Sebagian besar saluran bekerja dalam kondisi penuh (full flow) dalam durasi panjang (>4 jam)
- b. Banyak segmen mengalami keterbatasan kapasitas (*capacity limited*)
- c. Node mengalami flooding dengan debit dan volume yang sangat besar
- d. Terjadi konsentrasi aliran pada titik-titik tertentu (junction)

Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem drainase eksisting berada dalam kondisi **overload** dan tidak mampu mengakomodasi debit limpasan yang terjadi. Hal ini konsisten dengan kondisi lapangan, di mana genangan dapat mencapai 40–50 cm saat hujan.

#### *Skenario Perbaikan Sistem Drainase*

Berdasarkan hasil simulasi kondisi eksisting, sistem drainase di Jalan Ismailiyah mengalami kondisi overload yang ditunjukkan oleh banyaknya saluran yang bekerja dalam kondisi penuh, terjadinya surcharge, serta munculnya flooding pada beberapa node utama. Oleh karena itu, dilakukan pengembangan skenario perbaikan untuk menurunkan debit limpasan yang masuk ke saluran, meningkatkan kapasitas hidraulik jaringan, dan mengurangi potensi genangan pada permukaan jalan.

Skenario pertama adalah normalisasi saluran eksisting, yaitu pembersihan sampah, sedimen, dan vegetasi liar di dalam saluran. Skenario ini bertujuan mengembalikan kapasitas efektif saluran sesuai kondisi desain. Normalisasi menjadi langkah awal yang penting karena hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa saluran mengalami genangan  $\pm 30$  cm bahkan pada kondisi tanpa hujan, yang mengindikasikan adanya hambatan aliran dan penurunan kapasitas tampung.

Skenario kedua adalah peningkatan kapasitas saluran pada segmen kritis, terutama pada saluran yang mengalami kondisi penuh dan *capacity limited* dalam durasi panjang. Perbaikan dapat dilakukan melalui pelebaran dan/atau pendalaman saluran, khususnya pada jalur utama yang menerima akumulasi limpasan dari beberapa subcatchment. Segmen yang perlu diprioritaskan adalah saluran yang berhubungan dengan node kritis seperti J17, J24, J33, J42, J61, J72, dan J73, karena node-node tersebut menunjukkan debit inflow dan volume flooding yang tinggi.

Skenario ketiga adalah penambahan inlet dan perbaikan konektivitas jaringan drainase. Pada kawasan permukiman padat, limpasan permukaan sering tertahan di badan jalan karena jumlah inlet terbatas atau posisinya tidak sesuai dengan arah aliran mikro-topografi. Oleh karena itu, inlet tambahan perlu ditempatkan pada titik-titik konsentrasi aliran hasil analisis DEM 0,5 m, terutama pada cekungan lokal dan jalur aliran menuju badan jalan. Perbaikan konektivitas juga diperlukan agar limpasan dari jalan dan gang sempit dapat masuk ke saluran utama secara lebih cepat.

Skenario keempat adalah pengurangan limpasan permukaan melalui sistem drainase berkelanjutan skala kecil, seperti sumur

resapan, biopori, atau tampungan sementara pada lahan terbatas. Skenario ini penting karena kawasan penelitian didominasi permukaan kedap air dan memiliki ruang terbuka yang terbatas. Meskipun kontribusinya bersifat lokal, penerapan fasilitas resapan dapat membantu menurunkan volume limpasan yang masuk ke saluran pada awal kejadian hujan.

Secara umum, kombinasi skenario normalisasi saluran, peningkatan kapasitas segmen kritis, penambahan inlet, dan pengurangan limpasan di tingkat persil diperkirakan lebih efektif dibandingkan penerapan satu jenis intervensi saja. Normalisasi saluran dapat meningkatkan kapasitas efektif dalam jangka pendek, sedangkan peningkatan dimensi saluran dan penambahan inlet diperlukan untuk mengatasi kegagalan hidraulik pada jaringan utama. Sementara itu, penerapan sistem resapan lokal berperan sebagai upaya tambahan untuk mengurangi beban limpasan dari area permukiman padat.

Dengan demikian, prioritas penanganan sistem drainase di Jalan Ismailiyah diarahkan pada segmen dan node yang menunjukkan indikasi surcharge serta flooding tertinggi dalam hasil simulasi SWMM. Pendekatan berbasis skenario ini dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi teknis untuk meningkatkan kinerja sistem drainase dan mengurangi genangan jalan yang pada kondisi eksisting dapat mencapai 40–50 cm saat hujan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem drainase di Jalan Ismailiyah, Kota Medan, berada dalam kondisi tidak optimal dan mengalami kegagalan dalam mengalirkan limpasan, terutama saat hujan. Berdasarkan hasil analisis berbasis Digital Elevation Model (DEM) resolusi 0,5 m, kawasan memiliki topografi relatif datar (kemiringan <2%) dengan variasi elevasi mikro yang kecil, sehingga memperlambat aliran permukaan dan meningkatkan potensi genangan. Hasil simulasi menggunakan EPA SWMM menunjukkan bahwa sebagian besar saluran bekerja dalam kondisi penuh (full flow) dalam durasi yang panjang (>4 jam), serta mengalami kondisi keterbatasan kapasitas (capacity limited).

Selain itu, beberapa node utama mengalami flooding dengan debit dan volume yang sangat besar, yang mengindikasikan bahwa sistem drainase tidak mampu menampung debit limpasan yang masuk. Kondisi ini konsisten dengan hasil observasi lapangan, di mana genangan dapat terjadi bahkan tanpa hujan ( $\pm 30$  cm) dan meningkat hingga 40–50 cm saat hujan.

Faktor utama penyebab kegagalan sistem drainase meliputi keterbatasan kapasitas saluran, kondisi topografi yang datar, serta adanya hambatan aliran akibat sedimentasi dan penumpukan sampah. Selain itu, ketidaksesuaian antara pola aliran alami berdasarkan mikro-topografi dengan jaringan drainase eksisting turut memperburuk kinerja sistem.

Upaya perbaikan sistem drainase perlu dilakukan melalui pendekatan terpadu, meliputi normalisasi saluran, peningkatan kapasitas pada segmen kritis, penambahan inlet sesuai arah aliran permukaan, serta penerapan sistem resapan skala lokal. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan kinerja sistem drainase secara signifikan dan mengurangi potensi genangan pada kawasan permukiman padat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Berthier, E., et al. (2021). Urban runoff and imperviousness impact on flooding. *Journal of Hydrology*, 603, 126905.
- Barco, J., Wong, K. M., & Stenstrom, M. K. (2008). Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 794–803.
- Butler, D., Digman, C., Makropoulos, C., & Davies, J. (2018). *Urban Drainage* (4th ed.). CRC Press.
- Fewtrell, T. J., et al. (2011). Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. *Hydrological Processes*, 25(4), 510–523.
- Fletcher, T. D., et al. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology. *Urban Water Journal*, 10(1), 1–16.
- Jamali, B., et al. (2020). Detailed urban flood modelling using high-resolution topography data. *Journal of Flood Risk Management*, 13(2), e12579.

- Jiang, Y., et al. (2022). Scenario-based urban drainage system optimization. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103476.
- Leitão, J. P., et al. (2016). Identifying urban drainage systems critical areas. *Water Science and Technology*, 73(2), 405–412.
- Mark, O., et al. (2004). Representation of surface topography in urban flood modelling. *Water Science and Technology*, 49(2), 1–8.
- Neal, J., et al. (2012). Efficient 2D hydraulic modelling for flood risk assessment. *Environmental Modelling & Software*, 37, 14–23.
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. U.S. EPA.
- Shuster, W. D., et al. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology. *Urban Water Journal*, 2(4), 263–275.
- Tsihrintzis, V. A., & Hamid, R. (1998). Runoff quality prediction from small urban catchments. *Journal of Environmental Engineering*, 124(7), 619–626.
- Vojinovic, Z., et al. (2020). The role of high-resolution data in urban flood modelling. *Water Science & Technology*, 81(7), 1395–1406.
- Wang, Q., et al. (2021). Urban drainage modelling using SWMM under extreme rainfall. *Water*, 13(3), 316.
- Zhou, Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering climate change. *Water*, 6(4), 976–992.