

PENGEMBANGAN HIDROGRAF LIMPASAN UNTUK WILAYAH PERKOTAAN DI KOTA BEKASI - JAWA BARAT

Segel Ginting¹ (gintingsegel@pu.go.id)

ABSTRAK

Sistem drainase perkotaan untuk mengelola air limpasan membutuhkan perencanaan agar dapat berkinerja maksimal dan berkelanjutan. Perencanaan sistem drainase tidak hanya bagaimana menentukan kapasitas saluran agar mampu mengalirkan debit puncak limpasan, tetapi bagaimana menentukan kapasitas volume tampungan (*pond*). *Pond* digunakan untuk mengurangi debit puncak dan dimensi saluran. Desain volume tampungan memerlukan informasi hidrograf limpasan permukaan, sementara metode yang biasa digunakan untuk desain drainase adalah metode rasional. Metode rasional hanya menghasilkan debit puncak. Agar dapat menghasilkan debit puncak dan hidrograf limpasan permukaan, maka dikembangkan metode perhitungan hidrograf satuan untuk wilayah perkotaan dengan ordinat lebih pendek (5 menit atau 1 menit) dan waktu konsentersasi yang lebih singkat (kurang dari 3 jam). Pendekatan yang digunakan untuk perhitungan hidrograf limpasan permukaan adalah dengan mengintegrasikan metode hidrograf satuan *time-area* dan metode SCS untuk perhitungan kehilangan air serta pola hietograf hujan di Kota Bekasi. Pendekatan yang dikembangkan ini telah diujicoba menggunakan data lapangan untuk kejadian hujan pada tanggal 20 Januari 2021 dan 21 Januari 2021 dengan parameter utama nilai CN sekitar 88.98 untuk $\lambda = 0.05$. Hasil ujicoba menunjukkan bahwa kinerja metode yang dikembangkan menunjukkan hasil yang baik, dimana hasil perhitungan limpasan dengan data pengamatan cukup sesuai. Metode yang dikembangkan ini dapat digunakan pada *catchment area* kecil dengan waktu konsentersasi kurang dari 1 jam.

Kata Kunci: Hidrologi Perkotaan, Hidrograf Limpasan Perkotaan, Hietograf, Waktu Konsentersasi

ABSTRACT

Urban drainage systems to manage runoff is require planning in order to perform optimally and sustainably. Drainage system design is not only how to determine the capacity of the channel to be able to drain the peak runoff discharge, but how to determine the capacity of the reservoir volume (pond). Ponds are used to reduce peak discharge and channel dimensions. The pond storage design is requires surface runoff hydrograph information, while the method commonly used for drainage design is the rational method. The rational method only produces peak discharge. In order to produce peak discharge and runoff hydrographs, a unit hydrograph calculation method for urban areas with shorter ordinates (5 minutes or 1 minute) and time of concentration less than 3 hours has been developed. The approaches are using time-area hydrograph method to calculate runoff hydrograph and SCS method for calculating water losses as well as the rain hietograph pattern in Bekasi City. This developed approach has been tested using field data for rainfall extreem events on January 20, 2021 and January 21, 2021 with the main parameter CN value around 88.98 for $\lambda = 0.05$. The test results show that the performance of the developed method shows good results, where the results of runoff calculations with observational data are quite appropriate. The developed method can be used in small area catchments with a concentration time of less than 1 hour.

Keywords: Urban Hydrology, Urban Runoff Hydrograph, Hyetograph, Time of Concentration

¹ Balai Teknik Irigasi, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, (penulis korespondensi).

PENDAHULUAN

Pengelolaan limpasan permukaan di perkotaan (urban) memiliki pendekatan yang berbeda dengan di daerah pedesaan (rural). Perbedaan ini terkait dengan karakteristik DAS dan hujan. Di perkotaan secara umum memiliki lahan yang lebih banyak ke arah air dibandingkan dengan di pedesaan sehingga kuantitas limpasan yang terjadi lebih besar, selain itu, waktu menuju puncak aliran atau waktu kosenterasi aliran sangat singkat jika dibandingkan dengan di pedesaan (Chen & Dong, 2018; Beven, 2020). Faktor lainnya adalah karakteristik hujan di perkotaan memiliki pola yang unik sehingga resolusi temporal dan spasial yang dibutuhkan lebih tinggi dibandingkan dengan natural catchment (Schilling, 1991). Perbedaan karakteristik di perkotaan dan pedesaan memberikan tantangan untuk melakukan kajian yang spesifik terkait dengan limpasan di perkotaan dalam rangka untuk pengelolaan limpasan permukaan terutama bagaimana untuk melakukan desain sistem drainase. Hal yang utama dalam desain drainase adalah berapa kapasitas saluran agar tidak terjadi banjir. Tentunya ini berhubungan dengan rencana dimensi saluran. Selain itu dibutuhkan juga berapa kapasitas tampungan (storage) yang digunakan untuk detention atau retention. Dalam hal ini, muncul masalah berapa kebutuhan tampungan agar aman dan tidak mengalami banjir? dan bagaimana mengelolanya?. Sementara formula yang digunakan untuk mendesain sistem drainase yang populer dan umum adalah metode rasional. Metode rasional dalam perhitungan hanya menghasilkan debit puncak, yang digunakan untuk menentukan kapasitas saluran. Untuk menentukan kapasitas tampungan dan pengelolanya memerlukan informasi hidrograf limpasan yang tidak dihasilkan dari metode tersebut.

Metode rasional merupakan metode yang sudah lama dan umum digunakan dalam menghitung debit puncak untuk catchment area yang kecil (Guo, 2001). Metode ini pertama kali diperkenalkan dalam literatur profesional Amerika oleh Kuichling pada tahun 1889 sebagai metode untuk menghitung debit puncak pada saluran di Rochester, New York. Di United Kingdom, metode ini sering dirujuk sebagai Metode Lloyd-Davies setelah makalah dipresentasikan oleh Lloyd-Davies pada tahun 1906 (Seybert, 2006). Di Indonesia, metode untuk menghitung debit puncak banjir pertama kali diawali oleh Melchior dengan mengadopsi formula Pascher pada tahun 1888/1989. Metode yang dikembangkan oleh Melchior tersebut masih sering dipakai sampai dengan saat ini dan sering juga disebut sebagai metode rasional. Metode rasional dalam penerapannya menggunakan asumsi intensitas hujan seragam untuk seluruh wilayah, durasi hujan desain yang digunakan sama dengan waktu kosenterasinya, dan periode ulang debit puncak sama dengan periode ulang intensitas hujan desain yang digunakan.

Mendesain kebutuhan tampungan memerlukan informasi bentuk hidrograf limpasan. Informasi hidrograf limpasan pada metode rasional diperlukan modifikasi dan transformasi. Transformasi yang paling sederhana untuk merubah metode rasional debit puncak menjadi metode hidrograf rasional adalah dengan metode rasional triangular (Jainet, 2018; Chin, 2019; Diogo & do Carmo, 2019). Asumsi yang digunakan dalam metode rasional triangular sama dengan metode rasional dengan beberapa penambahan seperti waktu dasar dari hidrograf sama dengan 2 kali waktu konsentrasi dan bentuk hidrografnya adalah sebuah segitiga sama kaki, dengan kurva naik memiliki kemiringan sama dengan q_p/t_c dan kurva turun memiliki kemiringan sama dengan $-q_p/t_c$ (Seybert, 2006). Bentuk hidrograf segitiga nyatanya hanya untuk daerah aliran sungai

yang merespons dengan cepat terhadap hujan yang menyebabkan laju limpasan naik dan turun. Karena bentuk karakteristik ini, hidrograf rasional segitiga mungkin hanya cocok untuk daerah kecil di perkotaan yang secara hidrologis relatif homogen, dan dengan daerah ke arah air tingkat menengah hingga tinggi. Hidrograf segitiga mungkin bukan metode hidrograf yang baik ketika mencoba memperkirakan kebutuhan tampungan (storage) untuk penahanan air hujan. Untuk itu, metode yang dimodifikasi digunakan, dimana hidrograf segitiga diregangkan menjadi hidrograf

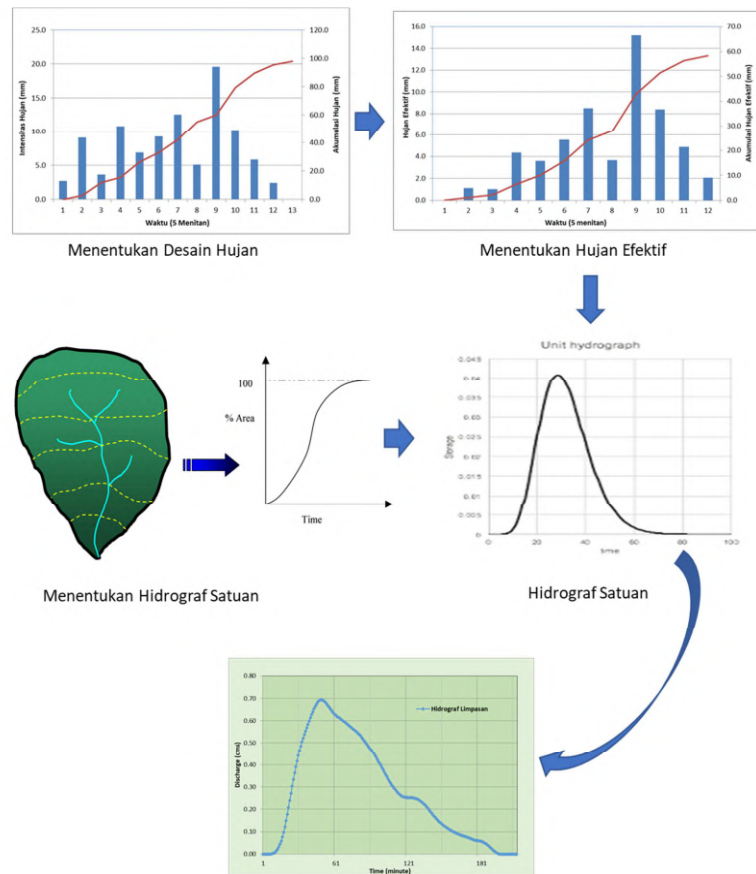
trapesium dengan meningkatkan durasi intensitas curah hujan desain ke beberapa durasi kritis dimana persyaratan penyimpanan dimaksimalkan. Modifikasi metode tersebut dilakukan dalam upaya untuk mendesain kebutuhan tampungan pada cathment area yang kecil yang biasanya terjadi di wilayah perkotaan. Namun upaya memodifikasi metode rasional tersebut belum memberikan hasil yang maksimal karena bentuk hidrograf yang dihasilkan sangat kaku dan sulit untuk penggunaan yang lebih luas. Sehingga banyak ahli mengembangkan berbagai pendekatan untuk mengakomodasi masalah tersebut dan disesuaikan dengan kondisi setempat. Salah satunya, Tholin dan Keifer mengembangkan design storm yang digunakan untuk menghitung hidrograf berdasarkan hujan di Kota Chicago sehingga dikenal dengan metode Chicago (Tholin & Keifer, 1960). Pendekatan lain yang dapat digunakan untuk pendugaan hidrograf limpasan permukaan di perkotaan adalah menggunakan prosedur Walingford (Hall, 1984), menggunakan metode hidrograf satuan Espey 10 menit (Espey & Altman, 1978), metode rasional hidrograf (Guo, 2001), dan metode soil conservation service (United States Department of Agriculture, 1986). Metode metode tersebut tentunya dikembangkan pada kondisi yang berbeda antara satu wilayah dengan lainnya, sehingga memberikan hasil yang berbeda. Jika digunakan di Kota Bekasi, maka diperlukan penyesuaian supaya hasilnya dapat bermanfaat. Apalagi kondisi iklim di Kota Bekasi berbeda dengan kondisi iklim dimana metode tersebut dikembangkan. Untuk itu, maka dikembangkan sebuah metode untuk perhitungan hidrograf limpasan permukaan dengan ordinat yang lebih pendek (misalnya 5 menit atau bahkan 1 menit) agar dapat digunakan pada cathment area yang kecil dengan pola desain hietograf hujan yang dihasilkan di Kota Bekasi.

PENGEMBANGAN HIDROGRAF LIMPASAN DI PERKOTAAN

Perangkat pemodelan banyak digunakan untuk menganalisis sistem drainase perkotaan dan untuk mensimulasikan efek dari pembangunan perkotaan di masa depan. Biasanya, perangkat ini hanya menggunakan satu model matematis pada satu waktu untuk menggambarkan satu proses hidrologi pada daerah tangkapan air perkotaan. Ketika terdapat model matematika alternatif untuk menggambarkan proses hidrologi yang sama, kesesuaiannya perlu diselidiki secara terpisah, yang membuat tugas pemodelan menjadi lebih kompleks, memakan waktu dan terbuka untuk kesalahan manusia. Selanjutnya, model harus dikalibrasi untuk mencapai kesesuaian yang lebih baik antara limpasan pengamatan dan simulasi. Kalibrasi dapat dilakukan secara manual, dengan menggunakan pendekatan coba-coba, atau dengan menggunakan teknik pencarian dan alat optimasi parameter (Radinja et al., 2021). Untuk mengatasi kelemahan tersebut, maka dibuat metode perhitungannya hidrograf limpasan dengan mengintegrasikan beberapa hasil penelitian di Kota Bekasi, terkait dengan komponen perhitungan hidrograf limpasan.

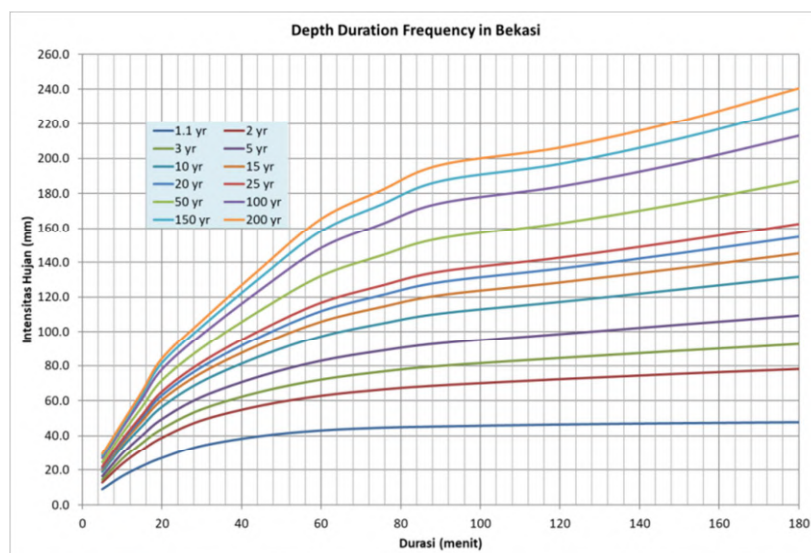
Pengembangan hidrograf limpasan perkotaan tidak dapat terlepas dari bagaimana proses perubahan hujan menjadi limpasan pada suatu lahan yang telah banyak berkembang. Estimasi limpasan menggunakan model *storm water management model* (SWMM) banyak diterapkan untuk melakukan pemodelan *stormwater* dan *sewerage* di perkotaan (Alemaw & Tafesse, 2021; Zakizadeh et al., 2022). Banyak metode dan konsep yang telah tersedia untuk membuat hidrograf limpasan, namun untuk wilayah perkotaan khususnya dengan ordinat yang lebih kecil sangat terbatas, apalagi berdasarkan kondisi iklim di Indonesia. Pengembangan hidrograf limpasan di wilayah perkotaan ini akan memadukan beberapa teori yang telah tersedia yang merepresentasikan untuk wilayah tersebut. Metode yang digunakan untuk pengembangan model hidrograf limpasan perkotaan secara umum mengikuti konsep seperti pada Gambar 1.

Berdasarkan pada ilustrasi dalam gambar tersebut, maka langkah langkah yang dapat dilakukan untuk mengembangkan hidrograf limpasan permukaan di wilayah perkotaan sebagai berikut:



Gambar 1. Ilustrasi pengembangan hidrograf wilayah perkotaan

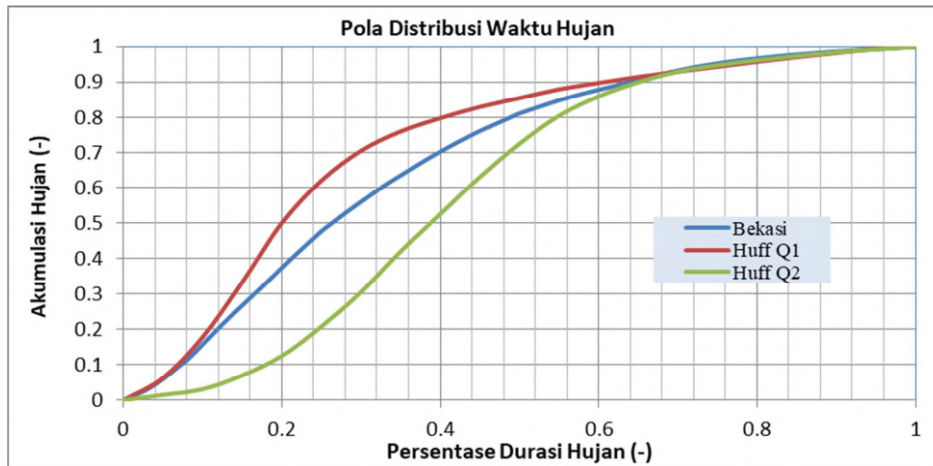
Langkah Pertama, menentukan desain hujan. Desain hujan yang digunakan berupa grafik hujan massa ganda untuk kejadian hujan maksimum atau *depth duration frequency* (DDF), contoh kasus yang digunakan adalah di Kota Bekasi sehingga data DDF yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 2 (Susilowati & Ginting, 2021). Data hujan yang digunakan mulai dari periode 5 menit dengan 3 jam.



Gambar 2. Contoh grafik kurva masa ganda atau *depth duration frequency*

Langkah Kedua, Mengubah tebal durasi hujan menjadi hujan yang terdistribusi sesuai dengan durasi ordinat yang diinginkan. Proses konversi tebal hujan menjadi terdistribusi selama rentang durasinya dapat dilakukan dengan memanfaatkan pola hietograf yang terjadi di Kota Bekasi. Pola Hietograf Kota Bekasi untuk beberapa durasi mulai dari 1 s/d 3 jam dapat dilihat di

(Ginting, 2021). Namun distribusi secara umum dapat mengikuti seperti pada Gambar 3 atau Tabel 1.



Gambar 3. Pola hietograf di lokasi studi (Ginting, 2021)

Tabel 1. Pola distribusi hujan di Bekasi

t/T (%)	P/Pt (%)	t/T (%)	P/Pt (%)	t/T (%)	P/Pt (%)	t/T (%)	P/Pt (%)	t/T (%)	P/Pt (%)	t/T (%)	P/Pt (%)
0.006	0.005	0.172	0.314	0.339	0.619	0.506	0.816	0.672	0.919	0.839	0.976
0.011	0.011	0.178	0.326	0.344	0.627	0.511	0.820	0.678	0.922	0.844	0.977
0.017	0.016	0.183	0.338	0.350	0.635	0.517	0.824	0.683	0.925	0.850	0.978
0.022	0.022	0.189	0.350	0.356	0.642	0.522	0.828	0.689	0.928	0.856	0.979
0.028	0.028	0.194	0.361	0.361	0.650	0.528	0.833	0.694	0.930	0.861	0.980
0.033	0.035	0.200	0.373	0.367	0.658	0.533	0.837	0.700	0.933	0.867	0.981
0.039	0.042	0.206	0.385	0.372	0.666	0.539	0.841	0.706	0.936	0.872	0.982
0.044	0.051	0.211	0.397	0.378	0.673	0.544	0.845	0.711	0.938	0.878	0.983
0.050	0.060	0.217	0.409	0.383	0.681	0.550	0.849	0.717	0.941	0.883	0.984
0.056	0.070	0.222	0.421	0.389	0.688	0.556	0.853	0.722	0.943	0.889	0.985
0.061	0.079	0.228	0.432	0.394	0.695	0.561	0.856	0.728	0.945	0.894	0.986
0.067	0.089	0.233	0.443	0.400	0.702	0.567	0.859	0.733	0.947	0.900	0.987
0.072	0.099	0.239	0.454	0.406	0.709	0.572	0.863	0.739	0.949	0.906	0.988
0.078	0.109	0.244	0.466	0.411	0.716	0.578	0.866	0.744	0.951	0.911	0.989
0.083	0.120	0.250	0.477	0.417	0.723	0.583	0.869	0.750	0.953	0.917	0.990
0.089	0.132	0.256	0.486	0.422	0.730	0.589	0.873	0.756	0.955	0.922	0.990
0.094	0.145	0.261	0.496	0.428	0.736	0.594	0.876	0.761	0.957	0.928	0.991
0.100	0.157	0.267	0.505	0.433	0.743	0.600	0.879	0.767	0.958	0.933	0.992
0.106	0.170	0.272	0.515	0.439	0.749	0.606	0.882	0.772	0.960	0.939	0.992
0.111	0.183	0.278	0.524	0.444	0.755	0.611	0.885	0.778	0.962	0.944	0.993
0.117	0.195	0.283	0.533	0.450	0.761	0.617	0.888	0.783	0.963	0.950	0.994
0.122	0.208	0.289	0.542	0.456	0.767	0.622	0.891	0.789	0.965	0.956	0.994
0.128	0.220	0.294	0.551	0.461	0.773	0.628	0.894	0.794	0.966	0.961	0.995
0.133	0.232	0.300	0.560	0.467	0.778	0.633	0.897	0.800	0.968	0.967	0.996
0.139	0.244	0.306	0.569	0.472	0.784	0.639	0.901	0.806	0.969	0.972	0.996
0.144	0.256	0.311	0.577	0.478	0.789	0.644	0.904	0.811	0.970	0.978	0.997
0.150	0.268	0.317	0.586	0.483	0.795	0.650	0.907	0.817	0.971	0.983	0.998
0.156	0.279	0.322	0.595	0.489	0.800	0.656	0.910	0.822	0.973	0.989	0.999
0.161	0.291	0.328	0.603	0.494	0.806	0.661	0.913	0.828	0.974	0.994	0.999
0.167	0.302	0.333	0.611	0.500	0.811	0.667	0.916	0.833	0.975	1.000	1.000

Langkah Ketiga, menentukan besarnya limpasan atau hujan efektif yang terjadi dengan menggunakan metode NRCS (dulunya SCS). Metode ini juga menjadi salah satu pendekatan untuk perhitungan infiltrasi yang digunakan dalam *Process Based Modelling Tool*, ProBMoT

(Radinja et al., 2021). Persamaan yang digunakan untuk menghitung besarnya limpasan dalam suatu DAS akibat curah hujan adalah sebagai berikut:

- a. Menghitung besarnya tebal limpasan (mm), dengan persamaan berikut (McCuen, 1989; Pazwash, 2016):

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S}, S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

Q = Limpasan [mm]

P = Hujan [mm]

I_a = Abtraksi awal sebelum terjadi limpasan (λS , $\lambda = 0.2$)

S = Retensi potensila setelah hujan terjadi

CN = Nilai *curve number* berkisar 30 – 100.

Persamaan diatas selanjutnya banyak melakukan kajian terkait dengan nilai λ . Salah satunya adalah (Woodward et al., 2003) yang menunjukkan hasil nilai λ sekitar 0,05. Nilai $\lambda=0,05$ memberikan hasil yang lebih baik dan lebih sesuai untuk digunakan dalam perhitungan limpasan. Efek dari perubahan ini ditunjukkan dalam hal kedalaman limpasan yang dihitung dan puncak hidrograf. Persamaan untuk menghitung limpasan dengan perubahan tersebut adalah (Lim et al., 2006):

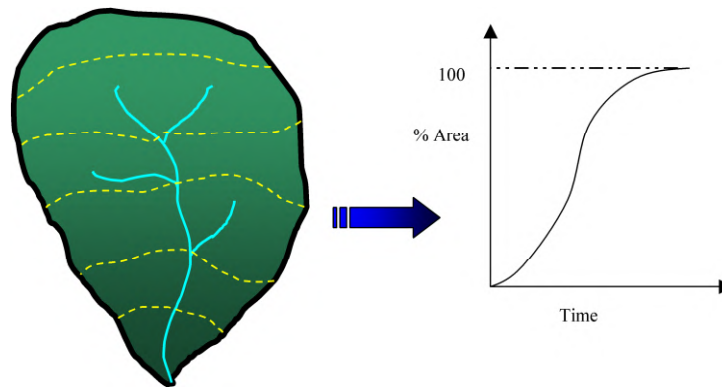
$$Q = \frac{(P-0.05 S_{0.05})^2}{P+0.95S_{0.05}} \quad (2)$$

$$S_{0.05} = 1.33S_{0.2}^{1.15} \quad (3)$$

$$CN_{0.05} = \frac{100}{1.879 \left[\frac{100}{CN_{0.2}} - 1 \right]^{1.15} + 1} \quad (4)$$

- b. Menghitung besarnya hidrograf satuan dengan menggunakan metode hidrograf satuan sintetis.

Metode hidrograf satuan sintetis yang digunakan adalah *Time-Area Method*. Dasar dari metode *time-area* adalah diagram *time - area* yang merepresentasikan hubungan antara waktu tempuh limpasan dan porsi wilayah DAS yang berkontribusi terhadap limpasan selama periode waktu tersebut (McCuen, 1989). Dalam metode ini, DAS dibagi menjadi sub-area yang dipisahkan oleh isokron. Waktu tempuh yang diperlukan untuk tetesan hujan yang jatuh pada suatu lokasi di suatu sub-area adalah sama dengan waktu tempuh untuk setiap tetesan lain yang jatuh pada sub-area yang sama. Isokron adalah garis kontur yang menghubungkan semua titik yang memiliki waktu tempuh yang sama. Isokrone tidak dapat saling bersilangan, tidak dapat menutup, dan hanya dapat berasal dan berakhir pada batas DAS (Dooge, 1959). Gambar 4 menunjukkan peta isokron DAS yang digambar dengan mengklasifikasikan grid waktu aliran ke outlet DAS. Menurut (Linsley Jr et al., 1975), pendekatan *time-area* adalah metode *lag and route* di mana aliran masuk (curah hujan efektif) tertinggal dengan membagi DAS menjadi zona-zona dengan isokron waktu tempuh dari outlet. Asumsi mendasar dari metode *time area* tradisional adalah bahwa metode ini memperhitungkan translasi dan tidak memperhitungkan efek penyimpanan. Mengabaikan efek penyimpanan menghasilkan kurangnya redaman dan karena itu memprediksi laju aliran puncak yang lebih tinggi (Ajward, 1996). Namun, mengabaikan efek penyimpanan dapat diatasi dengan menyesuaikan hidrograf yang dihasilkan dari metode area waktu dengan mengarahkannya melalui reservoir linier dengan koefisien penyimpanan yang sesuai (Bedient et al., 2008). Demi kesederhanaan, (Muzik, 1996) menghitung waktu tempuh dari kondisi aliran kesetimbangan dan kemudian secara empiris menyesuaikannya untuk efek tampungan yang diabaikan dan aliran yang tidak stabil.



Gambar 4. Konsep metode time area

Persamaan isokron dari setiap satuan wilayah sangat tergantung pada waktu kosentrasi dari setiap wilayah tersebut, sehingga persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut (Rajkumar et al., 2019; Fariborzi et al., 2019):

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{untuk } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{untuk } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$t_L = 60 \frac{L^{0.8}(2540 - 22,86 \text{ CN})^{0.7}}{14,104 \text{ CN}^{0.7} Y^{0.5}} \quad (6)$$

$$t_c = \frac{t_L}{0.6}, \quad t_c = 100 \left(\frac{L^{0.8}(2540 - 22,86 \text{ CN})^{0.7}}{14,104 \text{ CN}^{0.7} Y^{0.5}}\right) \quad (7)$$

t_L : *time lag* (menit)

L : *flow path* (m)

CN : *SCS curve number*

Y : *average sub basin slope* (m/m)

- c. Menghitung besarnya hidrograf debit limpasan dengan menggunakan metode hidrograf satuan sintetis yang diperoleh sebelumnya berdasarkan tebal limpasan (mm) dengan menggunakan teknik convolution seperti persamaan berikut (Chen et al., 2019):

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (8)$$

dimana,

P_m : hujan efektif pada waktu ke m

U_{n-m+1} : ordinate hidrograf satuan pada waktu ke $n - m + 1$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Lokasi Kajian

Pengembangan metode merupakan upaya yang dilakukan untuk menghasilkan sebuah metode yang dapat digunakan atau diterapkan dalam sebuah perhitungan yang menghasilkan hidrograf limpasan di perkotaan. Metode yang dikembangkan merupakan gabungan dari beberapa metode perhitungan mulai dari metode perhitungan limpasan permukaan dengan menggunakan hidrograf satuan yang diintegrasikan dengan desain hietograf hujan, khususnya untuk durasi pendek yang biasa digunakan pada wilayah perkotaan. Metode yang dikembangkan ini mengikuti langkah-langkah yang telah disampaikan pada metodologi. Metode tersebut kemudian diujicoba dan divalidasi untuk melihat kinerja dari metode yang dikembangkan. Kalibrasi dan validasi metode tersebut dilakukan berdasarkan data pengamatan di lapangan. Langkah yang digunakan dalam

rangka ujicoba metode tersebut dimulai dengan mengidentifikasi lokasi kajian dan jaringan drainase yang tersedia dan wilayah yang berkontribusi terhadap limpasan. Hasil identifikasi *cathment area* dan jaringan drainase dapat dilihat pada Gambar 5.



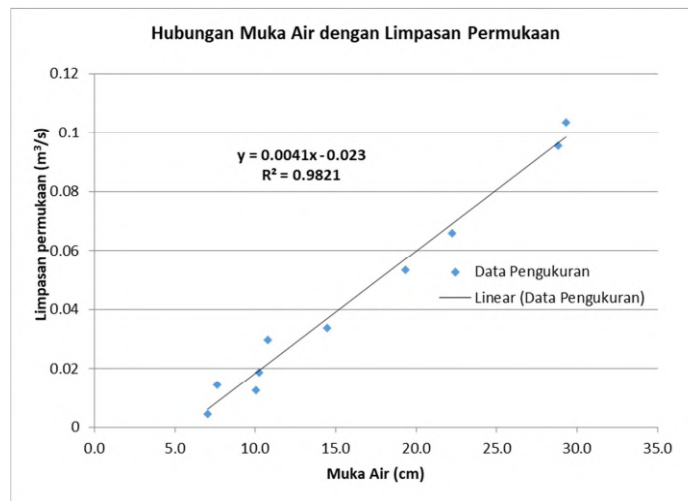
Gambar 5. Lokasi studi (Kantor Balai Teknik Irigasi)

Hasil identifikasi *cathment area* seperti pada Gambar 5, diperoleh luasan sekitar 17.295 m² atau 1.7 Ha. Panjang saluran drainase mulai dari titik terjauh sampai dengan *outlet* diperkirakan sekitar 326 m. Tutupan lahan pada lokasi kajian teridentifikasi bahwa secara umum *area* terbagun dan jalan aspal dengan kisaran sekitar 14.295 m² dan sisanya berupa tanaman rumput sekitar 3000 m². Melihat kondisi tutupan lahan yang ada, maka dapat diperkirakan nilai *curve number* (CN) untuk lokasi kajian. Nilai CN untuk *area* terbagun maupun jalan aspal adalah sekitar 98 dan untuk tutupan lahan rumput dengan kondisi infiltrasi moderat diasumsikan sekitar 60 (United States Department of Agriculture, 1986). Nilai ini diperoleh berdasarkan tabel yang sudah tersedia dalam buku literatur, namun nilai ini dapat disesuaikan berdasarkan hasil kalibrasi, jika ujicoba metode ini memberikan hasil yang kurang baik. Berdasarkan nilai CN awal yang telah ditetapkan, maka dapat dihitung nilai CN yang mewakili *cathment area* tersebut sekitar 91.41. Nilai CN ini merupakan nilai CN untuk kondisi $\lambda=0.2$. Namun apabila menggunakan $\lambda=0.05$, maka nilai CN sama dengan 88.98, yang digunakan untuk ujicoba.

Hubungan Muka Air dan Limpasan Permukaan

Uji coba metode perhitungan hidrograf limpasan perkotaan menggunakan data pengamatan di lapangan. Data yang digunakan untuk mengujicoba metode adalah data muka air di saluran sebagai representatif dari limpasan permukaan akibat terjadi hujan. Monitoring muka air yang dilakukan belum dapat memberikan gambaran terkait dengan besarnya limpasan permukaan akibat hujan. Untuk dapat memberikan nilai debit limpasan permukaan, maka dibutuhkan formulasi hubungan muka air dengan debit limpasan atau sering disebut sebagai lengkung debit (*rain curve*). Pembuatan lengkung debit memerlukan data pengukuran, dan dalam penelitian ini, telah dilakukan pengukuran kecepatan pada saluran yang berdimensi berbentuk segi empat dengan lebar 30 cm dan tinggi 75 cm sebagai *outlet* dari jaringan drainase. Pengukuran dilakukan saat terjadi hujan untuk beberapa ketinggian muka air. Data pengukuran tersebut kemudian dibentuk hubungan antara tinggi muka air dengan debit limpasan. Formulasi muka air dan limpasan permukaan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 6. Persamaan yang dihasilkan dari hubungan tersebut adalah sebagai berikut:

$$Q = 0.0041 h - 0.023 \quad (9)$$



Gambar 6. Lengkung debit di outlet saluran drainase

Aplikasi Perhitungan Hidrograf Limpasan

Prosedur Perhitungan Limpasan Menggunakan Data Hujan

Sesuai dengan metodologi yang disampaikan di atas, maka metode perhitungan limpasan permukaan untuk wilayah perkotaan dilakukan dengan *step by step* menggunakan perangkat excel. Proses perhitungannya telah terintegrasi dengan pola distribusi hujan yang telah dihasilkan seperti pada Tabel 1 (Susilowati & Ginting, 2021; Ginting, 2021) dengan menggunakan durasi hujan 180 menit. Proses perhitungan hidrograf limpasan permukaan menggunakan formula dalam metodologi, dan untuk lebih detailnya dijelaskan berikut ini berdasarkan kolom yang tersedia pada Tabel 2 berikut ini:

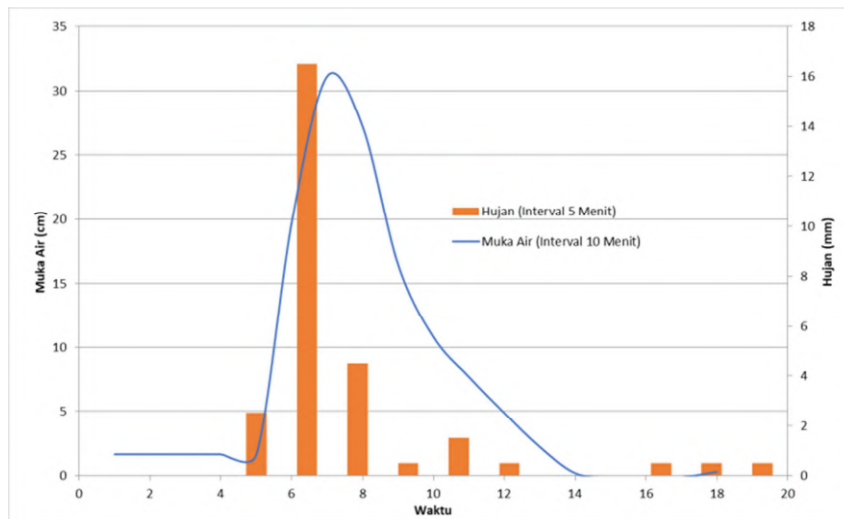
1. Kolom 1 sampai Kolom 3 merupakan perhitungan untuk mendapatkan hidrograf satuan dengan menggunakan metode time area seperti pada Gambar 4. Kolom 0 merupakan nilai ordinat yang diisi mulai dari angka 1, 2 dan seterusnya. Kolom 2 merupakan nilai akumulasi ordinat hidrograf satuan berdasarkan persamaan (5). Kolom 3 merupakan nilai ordinate hidrograf satuan pada waktu ke-t.
2. Kolom 3 sampai dengan kolom 6, merupakan nilai hujan rencana yang diperoleh dari Gambar 2. Kolom 3 merupakan nilai akumulasi hujan rencana periode ulang 2 tahun, dan seterusnya sampai pada kolom 6 untuk periode ulang 25 tahun
3. Kolom 7 sampai dengan kolom 10 merupakan nilai hujan efektif yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2). Kolom 7 merupakan nilai akumulasi hujan efektif untuk periode ulang 2 tahun, dan seterusnya sampai dengan kolom 10 untuk periode ulang 25 tahun.
4. Kolom 11 sampai dengan kolom 14 merupakan nilai hujan efektif pada waktu ke-t. Nilai ini merupakan agregasi dari nilai akumulasi hujan efektif.
5. Kolom 15 sampai dengan kolom 17 merupakan nilai pola distribusi hujan untuk perhitungan durasi 180 menit.
6. Kolom 18 sampai dengan kolom 21 merupakan nilai distribusi hujan ekstrim untuk periode ulang 2 sampai dengan 25 tahun
7. Setelah diperoleh ordinat hidrograf satuan dengan interval 1 menit, dan hujan efektif dengan interval yang sama (1 menit), maka hidrograf limpasan dapat dihitung dengan metode *convolution* menggunakan persamaan (8).

b. Kalibrasi dan Validasi Model

Sebagai langkah awal untuk menilai kinerja metode yang dikembangkan, maka dilakukan kalibrasi dan validasi. Kalibrasi dilakukan terhadap parameter yang terdapat dalam metode tersebut. Parameter yang menjadi penentu dalam metode adalah nilai CN (*curve number*), seperti yang telah disampaikan di atas. Karena awalnya nilai CN ditetapkan berdasarkan tabel dan kondisi tutupan lahan yang tersedia, maka hasil CN yang dihasilkan tersebut digunakan dan ditetapkan sebagai nilai parameter yang mewakili lokasi kajian untuk selanjutnya dilakukan perhitungan limpasan permukaan. Jika hasil perhitungan limpasan permukaan dibandingkan dengan hasil pengamatan tidak sesuai, maka nilai CN awal tersebut kemudian diganti dengan nilai CN yang sesuai, yang menggambarkan hasil limpasan permukaan dengan pengamatan tidak berbeda jauh. Kalibrasi dan validasi metode perhitungan limpasan di lokasi kajian menggunakan data hujan dan muka air pengamatan. Data hujan dan muka air pengamatan digunakan untuk mengecek dan membandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan metode yang digunakan. Terdapat sekitar 2 kejadian dengan hujan yang sangat besar dengan data hidrograf muka air yang diamati. Kejadian yang pertama terjadi pada tanggal 20 Januari 2021 dengan interval data hujan 5 menit. Namun pengamatan muka air yang tercatat pada tanggal tersebut tercatat dengan interval sekitar 10 menit. Data muka air dan hujan yang termonitor adalah seperti terlihat pada Gambar 7.

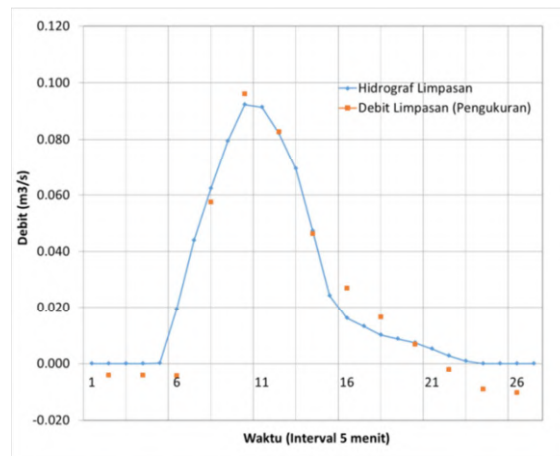
Tabel 2. Perhitungan hidrograf limpasan perkotaan di Bekasi untuk durasi hujan 180 menit

NRCS and Time-Area Unit Hydrograph----Bekasi Design Storm																					
Area	17.295 m ²																				
Flow path length	326 m																				
Slope	0.003067 m/m																				
CN _{0.2}	91.41																				
S _{0.2}	23.87 mm																				
S _{0.05}	31.45 mm																				
CN _{0.05}	88.98																				
Tlag	0.44 hour																				
Tc	44.28 minute																				
0.5 * Tc	22.14 minute																				
	1 size in minute																				
	60 ts size (second)																				
	44.28 timesteps																				
	45 timesteps																				
Unit Hydrograph			P Acc				P excess				Avail				Bekasi Storm Design			Rainfall Design			
Kol 0	Kol 1	Kol 2	Kol 3	Kol 4	Kol 5	Kol 6	Kol 7	Kol 8	Kol 9	Kol 10	Kol 11	Kol 12	Kol 13	Kol 14	Kol 15	Kol 16	Kol 17	Kol 18	Kol 19	Kol 20	Kol 21
Orfnate	UH_Cum	UH_Inc	T2	T5	T10	T25	T2	T5	T10	T25	AvailT2	AvailT5	AvailT10	AvailT25	T	T/T180	P/P180	75.8	109.2	131.7	160.1
1	0.005	0.005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.00	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.014	0.009	0.4	0.6	0.7	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	1.0	0.01	0.005	0.4	0.6	0.7	0.9
3	0.025	0.011	0.8	1.2	1.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.001	2.0	0.01	0.011	0.8	1.2	1.4	1.7
4	0.038	0.013	1.2	1.8	2.1	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.001	0.010	0.031	3.0	0.02	0.016	1.2	1.8	2.1	2.6
5	0.054	0.015	1.7	2.4	2.9	3.5	0.0	0.0	0.1	0.1	0.000	0.019	0.042	0.078	4.0	0.02	0.022	1.7	2.4	2.9	3.5
6	0.071	0.017	2.1	3.0	3.6	4.4	0.0	0.1	0.1	0.2	0.009	0.044	0.077	0.129	5.0	0.03	0.028	2.1	3.0	3.6	4.4
7	0.089	0.018	2.6	3.8	4.6	5.6	0.0	0.1	0.3	0.4	0.026	0.081	0.132	0.208	6.0	0.03	0.035	2.6	3.8	4.6	5.6
8	0.109	0.020	3.2	4.6	5.6	6.8	0.1	0.3	0.5	0.7	0.047	0.124	0.192	0.293	7.0	0.04	0.042	3.2	4.6	5.6	6.8
9	0.130	0.021	3.9	5.6	6.7	8.2	0.2	0.5	0.7	1.1	0.076	0.183	0.274	0.407	8.0	0.04	0.051	3.9	5.6	6.7	8.2
10	0.152	0.022	4.6	6.6	7.9	9.6	0.3	0.7	1.1	1.6	0.102	0.230	0.338	0.493	9.0	0.05	0.060	4.6	6.6	7.9	9.6
11	0.175	0.023	5.3	7.6	9.2	11.2	0.4	1.0	1.5	2.2	0.133	0.288	0.415	0.597	10.0	0.06	0.070	5.3	7.6	9.2	11.2
12	0.199	0.024	6.0	8.7	10.4	12.7	0.5	1.3	2.0	2.9	0.158	0.331	0.472	0.669	11.0	0.06	0.079	6.0	8.7	10.4	12.7
13	0.225	0.025	6.8	9.7	11.8	14.3	0.7	1.7	2.5	3.7	0.187	0.382	0.537	0.753	12.0	0.07	0.089	6.8	9.7	11.8	14.3
14	0.251	0.026	7.5	10.8	13.1	15.9	0.9	2.1	3.1	4.5	0.209	0.419	0.584	0.812	13.0	0.07	0.099	7.5	10.8	13.1	15.9
15	0.279	0.027	8.3	11.9	14.4	17.5	1.2	2.6	3.7	5.3	0.231	0.454	0.627	0.864	14.0	0.08	0.109	8.3	11.9	14.4	17.5
16	0.307	0.028	9.1	13.1	15.8	19.2	1.5	3.1	4.4	6.4	0.251	0.543	0.745	1.018	15.0	0.08	0.120	9.1	13.1	15.8	19.2
17	0.336	0.029	10.0	14.4	17.4	21.1	1.8	3.7	5.3	7.5	0.326	0.620	0.844	1.146	16.0	0.09	0.132	10.0	14.4	17.4	21.1
18	0.367	0.030	11.0	15.8	19.0	23.1	2.2	4.4	6.2	8.8	0.375	0.702	0.949	1.278	17.0	0.09	0.145	11.0	15.8	19.0	23.1
19	0.397	0.031	11.9	17.2	20.7	25.2	2.6	5.2	7.2	10.1	0.407	0.753	1.010	1.353	18.0	0.10	0.157	11.9	17.2	20.7	25.2
20	0.429	0.032	12.9	18.6	22.4	27.2	3.0	6.0	8.3	11.5	0.433	0.790	1.054	1.402	19.0	0.11	0.170	12.9	18.6	22.4	27.2
21	0.462	0.033	13.9	20.0	24.1	29.3	3.5	6.8	9.4	13.0	0.454	0.819	1.087	1.439	20.0	0.11	0.183	13.9	20.0	24.1	29.3
22	0.495	0.033	14.8	21.3	25.7	31.3	3.9	7.6	10.5	14.4	0.465	0.831	1.097	1.446	21.0	0.12	0.195	14.8	21.3	25.7	31.3
23	0.529	0.034	15.7	22.7	27.4	33.2	4.4	8.5	11.6	15.9	0.483	0.855	1.124	1.475	22.0	0.12	0.208	15.7	22.7	27.4	33.2
24	0.562	0.033	16.7	24.0	29.0	35.2	4.9	9.3	12.8	17.4	0.499	0.875	1.146	1.497	23.0	0.13	0.220	16.7	24.0	29.0	35.2
25	0.594	0.032	17.6	25.3	30.6	37.2	5.4	10.2	13.9	18.9	0.512	0.891	1.162	1.513	24.0	0.13	0.232	17.6	25.3	30.6	37.2
26	0.625	0.031	18.5	26.7	32.2	39.1	5.9	11.1	15.1	20.4	0.525	0.907	1.180	1.531	25.0	0.14	0.244	18.5	26.7	32.2	39.1
27	0.655	0.030	19.4	27.9	33.7	41.0	6.5	12.0	16.3	21.9	0.518	0.889	1.152	1.491	26.0	0.14	0.256	19.4	27.9	33.7	41.0
28	0.685	0.029	20.3	29.2	35.2	42.8	7.0	12.9	17.4	23.4	0.525	0.896	1.158	1.494	27.0	0.15	0.268	20.3	29.2	35.2	42.8
29	0.713	0.029	21.2	30.5	36.8	44.7	7.5	13.8	18.6	24.9	0.537	0.911	1.174	1.512	28.0	0.16	0.279	21.2	30.5	36.8	44.7
30	0.741	0.028	22.0	31.7	38.3	46.5	8.1	14.8	19.8	26.5	0.550	0.927	1.192	1.531	29.0	0.16	0.291	22.0	31.7	38.3	46.5



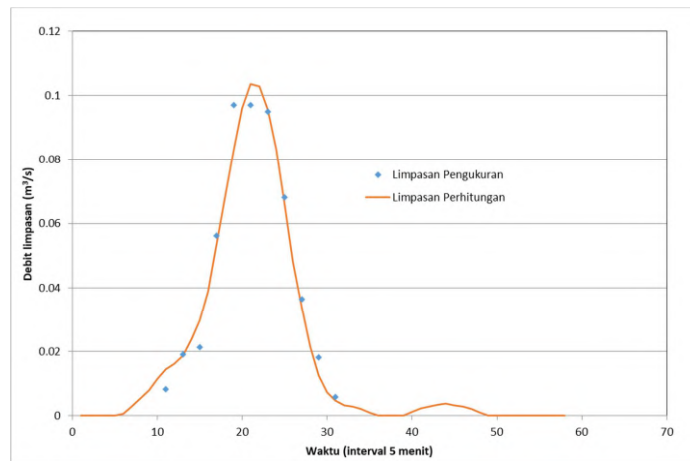
Gambar 7 Data hujan dan muka air pada tanggal 20 Jan 2021

Dari data tersebut, maka dilakukan perhitungan limpasan dengan menggunakan metode yang dikembangkan di atas sehingga diperoleh hasil seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik limpasan hasil pengukuran dan perhitungan pada tanggal 20 Jan 2021

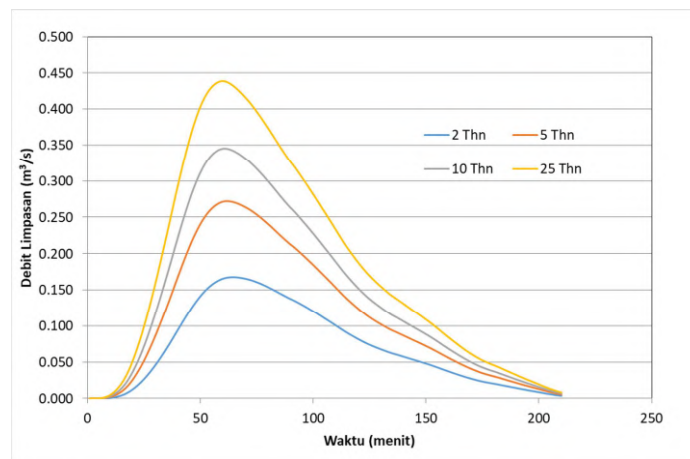
Berdasarkan pada perhitungan hidrograf limpasan dengan metode yang dikembangkan diatas, terlihat hasil perhitungan hidrograf limpasan pada Gambar 8 menunjukkan hasil yang baik. Hal ini terlihat bahwa grafik hidrograf limpasan permukaan hasil perhitungan memiliki kesesuaian dengan debit limpasan hasil pengamatan. Perhitungan limpasan diatas dengan tetap menggunakan nilai CN awal berdasarkan tabel. Untuk meyakinkan kembali, maka dilakukan validasi terhadap metode tersebut dengan melihat kejadian banjir pada tanggal yang berbeda. Kejadian lain yang digunakan untuk validasi metode yang dikembangkan adalah pada tanggal 21 Jan 2021. Data hujan menunjukkan bahwa terjadi hujan lebat di lokasi studi yang ditunjukkan dengan intensitas hujan sekitar 36.5 mm selama 1 jam. Limpasan yang terpantau di lokasi studi menunjukkan terjadinya kenaikan muka air di saluran mencapai sekitar 30 cm. Dari data yang ditunjukkan tersebut, selanjutnya dianalisis dengan metode diatas sehingga menghasilkan grafik perbandingan limpasan hasil perhitungan dengan limpasan hasil pengamatan seperti terlihat pada Gambar 9. Berdasarkan Gambar 8 dan Gambar 9 dapat terlihat bahwa hasil perhitungan limpasan berdasarkan metode yang diusulkan memberikan hasil yang sesuai dengan kondisi lapangan, sehingga metode tersebut dapat digunakan untuk menduga hidrograf limpasan.



Gambar 9. Grafik limpasan hasil pengukuran dan perhitungan pada tanggal 21 Jan 2021

c. Perhitungan Limpasan Menggunakan Data Hujan Rencana

Metode perhitungan hidrograf limpasan yang diusulkan diatas telah memenuhi dan sesuai dengan kondisi lapangan, maka metode ini digunakan untuk menghitung limpasan permukaan berdasarkan data hujan desain yang ada di lokasi studi. Hasil analisis dengan data hujan durasi pendek di lokasi studi seperti terlihat pada Gambar 2 menunjukkan bahwa desain hujan untuk durasi 3 jam atau 180 menit untuk periode ulang 2, 5, 10 dan 25 tahun adalah sebagai berikut 75,8 mm, 109 mm, 131,7 mm dan 160 mm. Hasil perhitungan limpasan permukaan untuk desain hujan di atas dapat dilihat pada Gambar 10. Debit limpasan permukaan desain yang dihasilkan untuk periode ulang 2, 5, 10, dan 25 tahun adalah 0.168 m³/s, 0.272 m³/s, 0.345 m³/s dan 0,439 m³/s.



Gambar 10. Hidrograf limpasan desain di lokasi studi

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan untuk perhitungan limpasan permukaan di wilayah perkotaan khususnya di Kantor Balai Teknik Irigasi dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Metode yang dikembangkan untuk menghitung hidrograf limpasan permukaan pada wilayah perkotaan (khususnya untuk ordinat dengan interval yang lebih pendek, mis 1, 5, atau 10 menit) telah dihasilkan dan dapat mensimulasikan hidrograf limpasan permukaan dengan baik.
2. Metode ini menggunakan parameter utama berupa nilai CN (*curve number*). Nilainya dapat diperkirakan berdasarkan nilai tutupan lahan atau dikalibrasi. Hasil kajian di lokasi studi diperoleh nilai parameter CN sekitar 91,41 untuk kondisi $\lambda=0.2$, jika menggunakan $\lambda= 0.05$,

maka nilai CN sama dengan 88.98 dan waktu kosenterasi yang terjadi biasanya kurang dari 1 jam.

3. Debit limpasan permukaan yang diperoleh dengan metode tersebut untuk periode ulang 2, 5, 10 dan 25 tahun adalah sekitar 0.168 m³/s, 0.272 m³/s, 0.345 m³/s dan 0,439 m³/s.
4. Metode ini dapat diujicobakan di tempat lain dengan menyesuaikan pola hietograf hujan atau menggunakan pola hietograf hujan yang sama jika data tidak tersedia.

Dengan tersedianya metode perhitungan hidrograf limpasan permukaan untuk wilayah perkotaan khususnya untuk ordinat yang pendek, maka dapat membantu para perencana di Kota Bekasi untuk dapat mendesain kebutuhan infrastruktur air seperti jaringan drainase dan fasilitasnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajward, M. H. (1996). *A spatially distributed unit hydrograph model using a geographic information system*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/22375>
- Alemaw, B. F., & Tafesse, N. T. (2021). Urban Stormwater and Sewerage Modelling: An Approach for Peak Runoff and Volume Assessment. *Journal of Water Resource and Protection*, 13(11), 855–880. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.1311046>
- Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2008). *Hydrology and floodplain analysis* (Vol. 816). Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Beven, K. J. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2655–2670. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2655-2020>
- Chen, C., Hui, Q., Pei, Q., Zhou, Y., Wang, B., Lv, N., & Li, J. (2019). CRML: A Convolution Regression Model with Machine Learning for Hydrology Forecasting. *IEEE Access*, 7, 133839–133849. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941234>
- Chen, Y., & Dong, L. (2018). Urban Runoff Change Detection for Smart City Water Management: A Case Study of Liede Creek in Southern China. *World Environmental and Water Resources Congress 2018: Groundwater, Sustainability, and Hydro-Climates/Climate Change - Selected Papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2018*, 196–206. <https://doi.org/10.1061/9780784481417.018>
- Chin, D. A. (2019). Estimating Peak Runoff Rates Using the Rational Method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(6), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001387](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001387)
- Diogo, A. F., & do Carmo, J. A. (2019). Peak flows and stormwater networks design-current and future management of urban surface watersheds. *Water (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040759>
- Dooge, J. C. I. (1959). A general theory of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research*, 6(2), 241–256. <https://doi.org/10.1029/jz064i002p00241>
- Espey, W. H., & Altman, D. G. (1978). Nomograph for 10-minute unit hydrographs for small watersheds. *Addendum 3 of Urban Runoff Control Planning, Rep. EPA-600/9-78*, 35.
- Fariborzi, H., Sabzevari, T., Noroozpour, S., & Mohammadpour, R. (2019). Prediction of the subsurface flow of hillslopes using a subsurface time-area model. *Hydrogeology Journal*, 27(4), 1401–1417. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1909-9>
- Ginting, S. (2021). Pengembangan Hietograf Hujan Rencana di Kota Bekasi. *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, 19(2), 102–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.35760/dk.2020.v19i2.3441> 113
- Guo, J. C. Y. (2001). Rational Hydrograph Method for Small Urban Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(1), 352–356.

- Hall, M. J. (1984). Urban hydrology. *Elsevier Applied Science Publishing. London*, 37474, 299.
- Jainet, P. (2018). Evaluation of the conceptual basis of the rational method. *International Journal of Hydrology*, 2(6), 2–7. <https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00145>
- Lim, K. J., Engel, B. A., Muthukrishnan, S., & Harbor, J. (2006). Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using CN technology. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 629–643. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481.x>
- Linsley Jr, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1975). *Hydrology for engineers*.
- McCuen, R. H. (1989). *Hydrologic Analysis and Design*. Englewood Cliffs, N.J.
- Muzik, I. (1996). Flood modelling with GIS-derived distributed unit hydrographs. *Hydrological Processes*, 10(10), 1401–1409.
- Pazwash, H. (2016). Urban storm water management. In *Urban Storm Water Management, Second Edition* (Second Edi). CRC press, Taylor & Francis Group.
- Radinja, M., Škerjanec, M., Šraj, M., Džeroski, S., Todorovski, L., & Atanasova, N. (2021). Automated modelling of urban runoff based on domain knowledge and equation discovery. *Journal of Hydrology*, 603(October). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127077>
- Rajkumar, S., Mohanarajah, S., & Junaid, H. M. (2019). Effect of Time-Area Percent Curves in Development of Clark Model Unit Hydrograph. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 52(1), 29. <https://doi.org/10.4038/engineer.v52i1.7328>
- Schilling, W. (1991). Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research*, 27(1–3), 5–21.
- Seybert, T. A. (2006). *Stormwater management for land development*. John Wiley.
- Susilowati, S., & Ginting, S. (2021). Analisis frekuensi data hujan durasi pendek di Kota Bekasi. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) HATHI Ke-38 Surabaya, 30 Oktober 2021*, 671–679.
- Tholin, A. L., & Keifer, C. J. (1960). Hydrology of urban runoff. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 125(1), 1308–1355.
- United States Department of Agriculture. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. In *Soil Conservation Service* (Issue Technical Release 55 (TR-55)). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Urban+Hydrology+for+Small+watersheds#1>
- Woodward, D. E., Hawkins, R. H., Jiang, R., Hjelmfelt Allen T, J., Van Mullem, J. A., & Quan, Q. D. (2003). Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 1–10.
- Zakizadeh, F., Nia, A. M., Salajegheh, A., Sañudo-Fontaneda, L. A., & Alamdari, N. (2022). Efficient Urban Runoff Quantity and Quality Modelling Using SWMM Model and Field Data in an Urban Watershed of Tehran Metropolis. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031086>