

PENERAPAN ISOCHRONE DAN KURVA TIME-AREA UNTUK HIDROGRAF LIMPASAN *Applied of isochrone and time-area curve for determining runoff hydrograph*

Ery Setiawan*

* Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram, Jl Majapahit 62 Mataram
email : ery.setiawan@unram.ac.id

Abstrak

Perhitungan limpasan dari suatu daerah tangkapan dapat ditentukan dengan beberapa metode, baik secara empirik maupun konseptual tergantung dari beberapa faktor, diantaranya adalah anggapan yang digunakan dan kemampuan metodenya. Hidrograf limpasan dengan metode fungsi tampungan didasarkan pada model hidrograf satuan Clark yang menggunakan konsep fungsi tampungan linier dengan dua parameter yaitu konstanta tampungan (k) dan waktu konsentrasi (t_c). Tujuan penelitian ini adalah menentukan hidrograf limpasan suatu daerah studi berdasarkan kurva time-area dan isochrone-nya. Metode yang digunakan adalah menggunakan sekumpulan kejadian hujan dengan interval waktu 5-menitan dan durasi waktu $\Delta t \geq 60$ menit sebagai input (masukan) untuk menentukan hidrograf limpasan dari persamaan fungsi tampungan linier model Clark. Lokasi studi yang digunakan adalah daerah aliran sungai (DAS) Jangkok Hulu di titik pengamatan TMA Aiknyet. Hasil analisis menunjukkan bahwa hidrograf limpasan dipengaruhi oleh nilai konstanta tampungan k , sedangkan perubahan nilai k dipengaruhi oleh perubahan waktu konsentrasi, luas daerah tangkapan dan hujan efektif yang terjadi, isochrone dan kurva time-area. Disarankan penggunaan data hujan dan aliran untuk beberapa kejadian dengan durasi waktu $\Delta t < 60$ menit karena diindikasikan dapat memberikan hasil yang signifikan dan lokasi lain sebagai pembandingan (validasi).

Kata kunci : Fungsi tampungan linier, Model Clark, Konstanta tampungan dan waktu konsentrasi

PENDAHULUAN

Perhitungan limpasan permukaan dapat ditentukan menggunakan persamaan/metode rational. Persamaan tersebut sampai saat ini masih banyak digunakan dan dapat diandalkan efektifitasnya, namun dalam penerapannya metode tersebut mempunyai keterbatasan. Penggunaan metode tersebut banyak anggapan dan persyaratan yang harus dipenuhi, sehingga menimbulkan kesan bahwa metode rational lebih cocok digunakan untuk DAS ideal (teoritis). Beberapa asumsi dasar untuk pemakaian metode rational adalah sebagai berikut: hanya berlaku pada DAS kecil $\leq 2,5$ km² (Ponce, 1989), hujan yang terjadi seragam/merata di seluruh *catchment*, intensitas hujan konstan dalam suatu interval waktu (kurang dari atau sama waktu konsentrasi), limpasan adalah maksimum saat intensitas hujan tetap selama waktu konsentrasi, koefisien limpasan konstan selama volume aliran serta luas DAS tidak berubah selama pengaliran. Oleh karena itu banyak modifikasi metode rational yang telah dilakukan dan dikembangkan oleh para peneliti untuk tetap menggunakan metode tersebut dalam berbagai kondisi DAS, salah satunya dengan menggunakan *isochrone* dan kurva *time-area*.

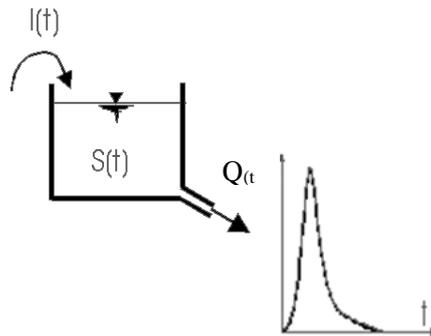
Modifikasi metode rational dilakukan karena mengingat bahwa kondisi aktual yang ada di lapangan menyatakan bahwa: ukuran DAS bervariasi $\geq 2,5$ km², hujan yang terjadi tidak seragam/merata, intensitas hujan tidak konstan/tidak tetap pada saat waktu konsentrasi, koefisien limpasan tidak konstan selama pengaliran karena luas DAS yang besar, serta adanya subDAS dan titik percabangan anak sungai.

Dalam perkembangan dan perjalanan informasi dan teknologi di bidang sumberdaya air, maka penggunaan metode *isochrone* dan kurva *time-area* tidak terbatas hanya untuk metode rational saja, namun bisa untuk beberapa metode (persamaan) hidrograf limpasan lainnya, seperti metode fungsi tampungan.

TINJAUAN PUSTAKA

Limpasan dari Fungsi Tampungan (*Storage Function*)

Transformasi hujan menjadi aliran di sungai sangat kompleks, beberapa cara pendekatan dapat dilakukan, yaitu berdasar pendekatan fungsi translasi (*translation function*) dan pendekatan fungsi tampungan (*storage function*) (Sri Harto, 1998). Daerah aliran sungai (DAS) tidak hanya berfungsi meneruskan/mengalirkan air seperti yang dijelaskan dengan konsep translasi, akan tetapi juga berfungsi juga sebagai tampungan (*storage*). Sesaat sebelum terjadi translasi, DAS akan berfungsi sebagai tampungan (*storage*) air hujan sampai tercapainya keseimbangan. Konsep tampungan dideskripsikan oleh sebuah reservoir yang digunakan untuk menghasilkan hidrograf satuan untuk komponen limpasan (Sri Harto, 1998). Gambar 1 menyajikan konsep fungsi tampungan dari suatu daerah tangkapan.



Gambar 1. Sebuah fungsi tampungan linier dari suatu daerah tangkapan (Chow dkk., 1988).

Beberapa piranti lunak (*software*) dari pabrikan terkemuka sudah menggunakan konsep fungsi tampungan (*storage function*) model Clark untuk membangun hidrograf limpasan, antara lain SWMM (*Storm Water Management Modelling*) dan HEC-HMS (*Hydrologic Modelling System*).

Formulasi Matematik

Persamaan konservasi massa dapat ditulis sebagai berikut (Chow dkk., 1988 dan Kull dkk., 1998):

$$\frac{dS}{dt} = I_{(t)} - Q_{(t)} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan dS/dt adalah laju perubahan air dalam tampungan selama waktu t , I_t adalah rerata inflow ke dalam tampungan untuk waktu t , sedangkan Q_t adalah outflow dari selama tampungan waktu t . Untuk Model tampungan Clark, I_t adalah tanggapan fungsi hubungan waktu dan luas (*time-area*) yang didefinisikan sebagai berikut (Chow dkk., 1988 dan Kull dkk., 1998):

$$I_t = i_e \frac{dA}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

i_e adalah hujan efektif yang bernilai 1 mm untuk hidrograf satuan.

Catchment (daerah tangkapan) diasumsikan sebagai suatu *linier reservoir* dengan k sebagai konstanta tampungan. Persamaan kontinuitas tampungan linier dapat dituliskan sebagai berikut (Chow dkk., 1988 dan Kull dkk., 1998, Daniel dkk., 2014, Yoo dkk., 2014):

$$\frac{dS}{dt} = k \frac{dQ}{dt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Substitusi ke dalam Persamaan (1) sehingga diperoleh persamaan akhir sebagai berikut (Chow dkk., 1988 dan Kull dkk., 1998, Daniel dkk., 2014, Yoo dkk., 2014):

$$Q_t \left(\frac{2k + \Delta t}{2k\Delta t} \right) + Q_{t-1} \left(\frac{\Delta t - 2k}{2k\Delta t} \right) = \frac{1}{k} \left(\frac{I_t + I_{t-1}}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Sedangkan inflow I_t dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Chow dkk., 1988 dan Kull dkk., 1998):

$$I_t = \begin{cases} i_e \frac{\Delta A_t}{\Delta t} & t \leq t_c \\ 0 & t > t_c \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ΔA_t adalah selisih luas tampungan daerah tangkapan ke t dan $(t-1)$.

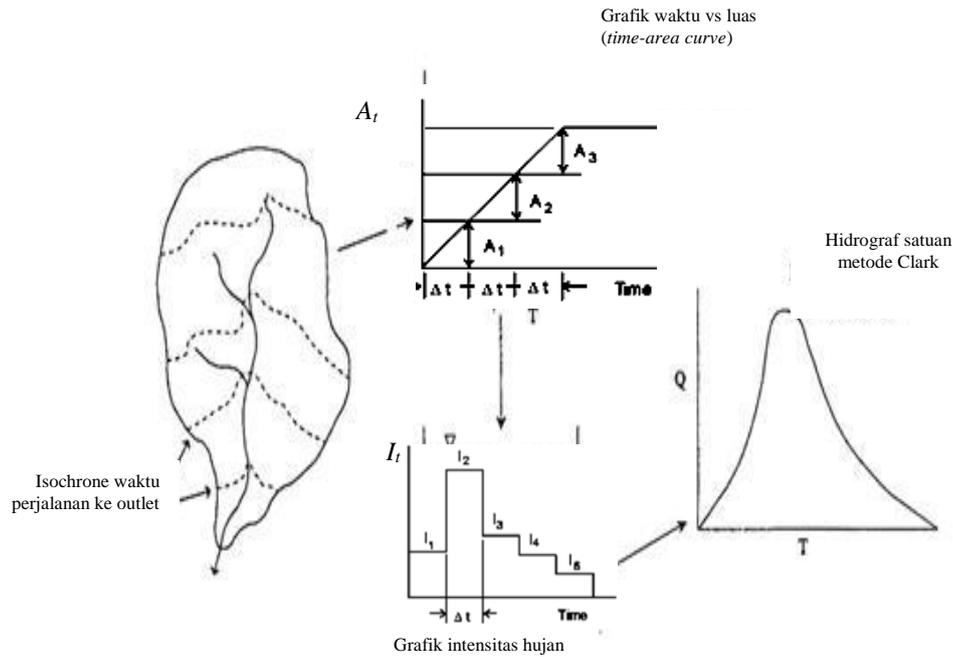
Isochrone dan Kurva Time-area

Metode *time-area* merupakan pengembangan dari penelusuran tampungan yang berprinsip pada konsentrasi aliran, tetapi dapat juga digunakan untuk hujan kompleks (Sobriyah, 2003). Penelusuran dengan metode *time-area* merupakan salah satu konsep mengubah *hyetograph* hujan menjadi hidrograf keluaran yang menghitung translasi air dengan memasukkan efek tampungan di daerah tangkapan yang terbagi menjadi beberapa sub-DAS oleh *isochrone* (Sobriyah, 2003). Menurut Chow dkk (1988) *isochrone* adalah garis yang menghubungkan beberapa titik yang mempunyai waktu perjalanan air (*travel time*) sama ke titik keluaran (outlet) pada suatu sub-DAS. Setiap sub-DAS dihitung masing-masing luas A_t menggunakan ratio terhadap luas daerah tangkapan total A dengan persamaan sebagai berikut (Kull dkk., 1998, Daniel dkk., 2014, Yoo dkk., 2014):

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t > \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

dengan A_t adalah luas tampungan daerah tangkapan yang berkontribusi pada waktu ke- t , A adalah luas daerah tangkapan total dan t_c adalah waktu konsentrasi yang nilainya dihitung dengan cara coba ulang (Mays dkk., 2002).

Luas masing-masing area tersebut kemudian digambarkan sebagai histogram terhadap waktu perjalanan air menuju outlet dan besarnya *travel time* yang digunakan disamakan dengan interval waktu *hyetograph* hujannya (Sobriyah dkk., 2003). Gambar 2 menyajikan *isochrone* dan kurva *time-area* dari hidrograf limpasan model Clark.



Gambar 2. Isochrone dan kurva time-area dari hidrograf model Clark (Kull dkk., 1998).

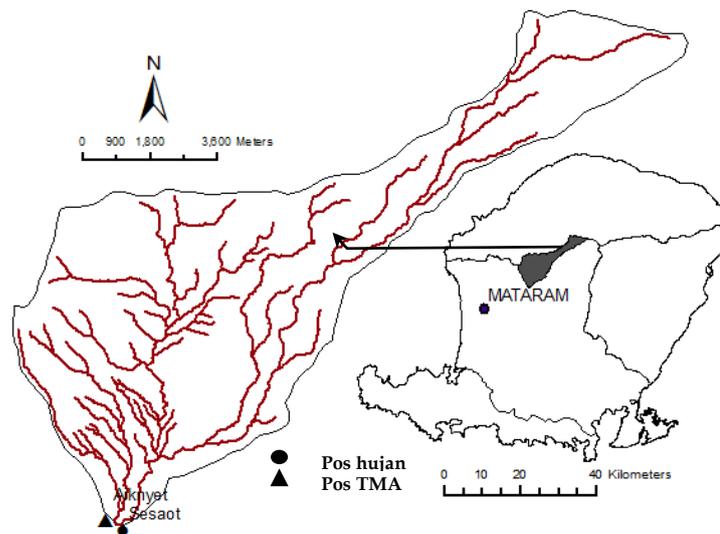
METODE PENELITIAN

Deskripsi daerah studi

Daerah studi adalah *sub-catchment* Jangkok Hulu di pos TMA Aiknyet (08°32'06" LS dan 116°14'21" BT), dengan luas total 76 km². Data kejadian hujan-aliran diinventarisir dari pos Sesaot (08°32'06" LS, 116°14'12" BT) pada tanggal 19.10.2013, dan 10.12.2013 dengan interval waktu 5 menit-an, sedangkan durasi waktu ≥ 60 menit, yang akan digunakan untuk kalibrasi dan verifikasi model. Data lain yang digunakan sebagai masukan dalam *catchment* adalah jenis tanah, panjang sungai utama (*L*), luas *catchment* (*A*), peta topografi atau DEM. Parameter lain diperoleh dengan cara optimasi yaitu: konstanta tampungan (*k*), dan waktu konsentrasi (*t_c*). Tabel 1 menyajikan data hujan efektif Pos Sesaot, sedangkan pada Gambar 3 menyajikan deskripsi lokasi studi. Metode Collins digunakan untuk memisahkan hidrograf satuan (UH) observasi dari hidrograf limpasannya di TMA Aiknyet, yang disajikan pada Gambar 6.

Tabel 1. Hujan (P) efektif 5-menitan durasi > 60 menit Pos Sesaot (mm)

Waktu (menit)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Tanggal	P - efektif (mm)																		
19.10.2013	0.0	5.6	3.8	4.8	1.0	4.5	3.5	1.5	4.0	2.5	3.0	3.5	0.5	1.5	3.5	4.0	2.0	1.0	1.0
10.12.2013	0.1	3.3	7.8	4.4	3.9	3.4	1.4	1.0	1.5	1.0	1.0	0.5	2.0	1.0	0.5	0.5			



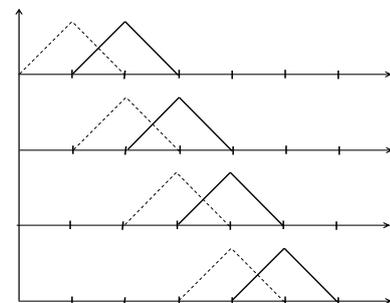
Gambar 3. Lokasi DAS Jangkok Hulu di Pos TMA Aiknyet, Lombok.

Pembuatan Kurva *time-area* dan Peta *Isochrone*

Kurva *time-area* disusun menggunakan persamaan (5) dan (6) dengan mempertimbangkan input (hujan) yang masuk ke dalam daerah tangkapan dan waktu konsentrasinya. Daerah aliran sungai dibagi menjadi beberapa sub-DAS oleh *isochrone* yang mempunyai waktu perjalanan air (*travel time*) yang sama. Setiap sub-DAS diukur luasnya dan digambarkan sebagai histogram terhadap waktu perjalanan air. Besarnya *travel time* yang digunakan disamakan dengan interval waktu *hyetograph* hujannya. Peta *isochrone* dibuat menggunakan kurva *time-area* berdasarkan peta ketinggian (DEM) atau topografi. Setiap hujan rencana (*hyetograph*) yang jatuh akan diproses pada seluruh daerah tangkapan, dan aliran dari masing-masing sub-DAS akan mencapai titik keluaran pada suatu waktu tertentu. Hidrograf keluaran merupakan penjumlahan dari aliran yang disebabkan oleh P efektif-1, P efektif-2, dan P efektif-3 yang jatuh di sub-DAS A-1, A-2, A-3 dan seterusnya (Sobriyah, 2003). Seluruh debit yang masuk tersebut dijumlahkan menurut waktu kedatangannya dengan dihitung terlebih dahulu hidrograf akibat hujan yang terjadi pada setiap *isochrone*, kemudian hidrograf tersebut digeser sampai titik keluaran. Gambar 4(a) menyajikan proses hujan aliran dari setiap *isochrone*, sedangkan Gambar 4(b) menyajikan grafik *time-area* dari setiap *isochrone* dalam sub-DAS.

t	Hujan ke-			Jumlah
	1	2	3	
0	0			0
1	$q_{1,1}$	0		$q_{1,1}$
2	$q_{1,2}$	$q_{2,1}$	0	$q_{1,2} + q_{2,1}$
3	$q_{1,3}$	$q_{2,2}$	$q_{3,1}$	$q_{1,3} + q_{2,2} + q_{3,1}$
4	$q_{1,4}$	$q_{2,3}$	$q_{3,2}$	$q_{1,4} + q_{2,3} + q_{3,2}$
5	0	$q_{2,4}$	$q_{3,3}$	$q_{2,4} + q_{3,3}$
6		0	$q_{3,4}$	$q_{3,4}$
7			0	0

(a)



(b)

Gambar 4. Proses hujan aliran dari setiap *isochrone* dan grafik *time-area* (Sobriyah, 2003).

Kalibrasi

Nilai indikator akurasi pada proses kalibrasi yang digunakan adalah nilai kesalahan relatif (*relative absolute error, RAE_p*) terhadap nilai puncak limpasan dan nilai kesalahan volume selama periode waktu perhitungan (*volume error, VE*) digunakan sebagai indikator akurasi perhitungan pada proses identifikasi parameter. Persamaan *RAE_p* dan *VE* dituliskan sebagai berikut (Yue dan Hashino, 2000).

$$RAE_p (\%) = \frac{|Q_{pobs} - Q_{pcal}|}{Q_{pobs}} \times 100 \dots\dots\dots (7)$$

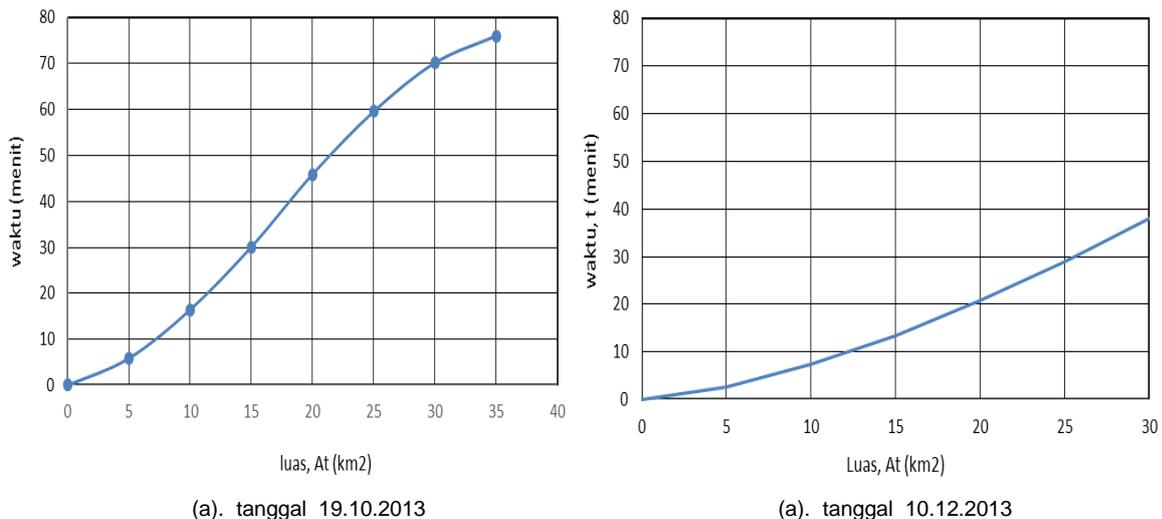
$$VE(\%) = \frac{\left| \sum_{i=1}^n Q_{obs(i)} - \sum_{i=1}^n Q_{cal(i)} \right|}{\sum_{i=1}^n Q_{obs(i)}} \times 100 \dots\dots\dots (8)$$

Q_{pobs} dan *Q_{pcal}* adalah nilai limpasan puncak observasi dan terhitung, sedangkan *Q_{pobs(t)}* dan *Q_{pcal(t)}* adalah nilai aliran limpasan pada waktu ke-t (m³/det).

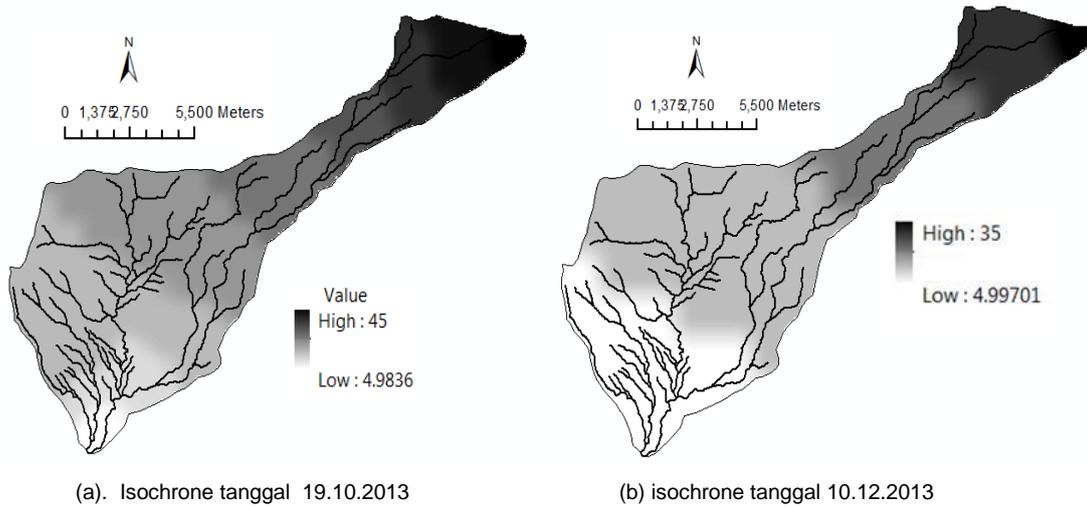
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Gambar 4 dan Gambar 5, secara beturutan menyajikan kurva time-area dilokasi studi untuk kejadian hujan-aliran tanggal 19.10.2013 dan 10.12.2013. Hasil kalibrasi yang dilakukan pada kejadian hujan-aliran tanggal 19.10.2013 dan 10.12.2013, memperoleh hasil berupa hidrograf satuan (UH) dan hidrograf limpasan yang disajikan secara berturutan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

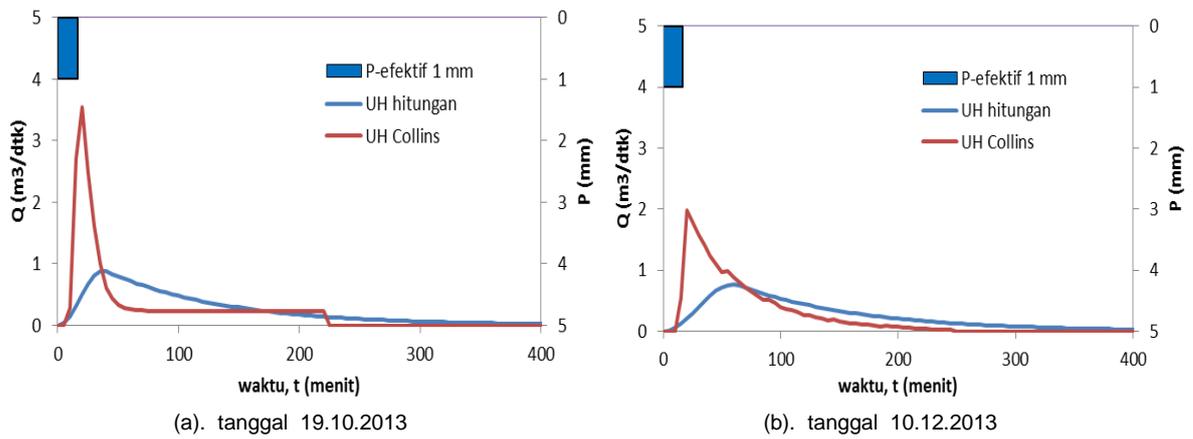
Pada Gambar 4b nampak bahwa pada kurva time-area cenderung landai dibanding teoritisnya. Hal ini disebabkan hujan efektif pada tanggal tersebut durasinya lebih pendek dan intensitasnya lebih kecil, dibandingkan dengan jumlah air hilang terinfiltrasi, ini dimungkinkan terjadi karena pada hari sebelumnya tidak terjadi hujan beberapa saat, sehingga kondisi tanah kurang jenuh, sehingga saat terjadi hujan akan banyak yang terinfiltrasi. Hal sebaliknya terjadi pada kejadian hujan tanggal 19.10.2013 yang disajikan pada Gambar 4a.



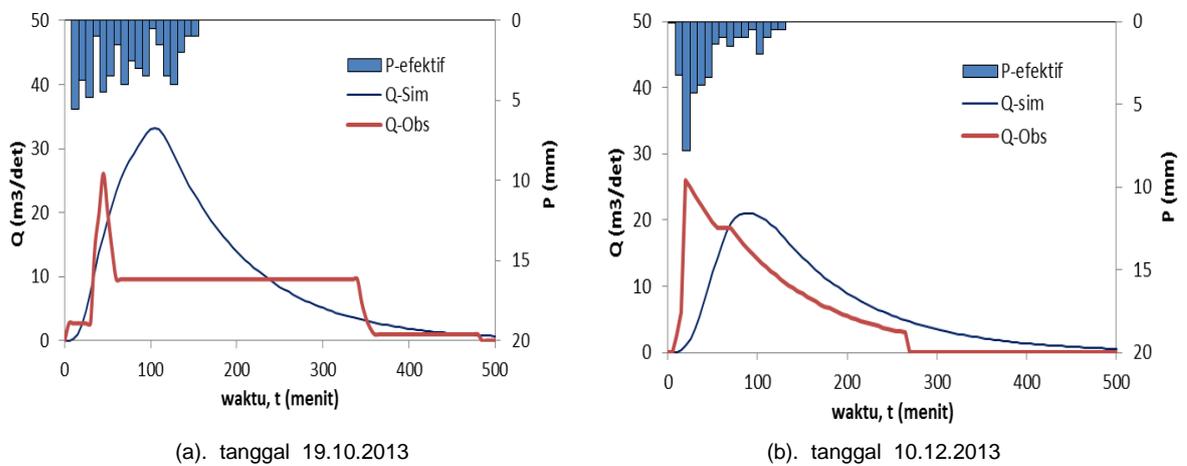
Gambar 4. Kurva *time-area* DAS Jangkok Hulu di TMA Aiknyet..



Gambar 5. Peta isochrone DAS Jangkok Hulu di TMA Aiknyet.



Gambar 6. Hidrograf satuan (UH) DAS Jangkok Hulu di TMA Aiknyet.



Gambar 7. Hidrograf limpasan DAS Jangkok Hulu di TMA Aiknyet.

Pengaruh nilai k terhadap hidrograf, VE dan RAE_p

Karakteristik nilai parameter k (konstanta tampungan) ditentukan oleh ratio hubungan antara tampungan dengan aliran keluarnya. Hasil kalibrasi menunjukkan ada perbedaan (selisih) nilai parameter Δk yang dikalibrasi pada tanggal 19.10.2013 dan 10.12.2013. Namun selisih tersebut kecil sekitar 0.101 jam atau sekitar 6.06%. Artinya antara kejadian hujan aliran satu dengan lainnya hampir mirip nilai k yang dihasilkan. Secara teoritis kondisi ini sudah seperti yang diharapkan, karena nilai k adalah nilai konstanta tampungan yang merupakan nilai yang spesifik dimiliki oleh masing-masing DAS. Nilai k ini seharusnya pada tiap-tiap kejadian hujan aliran, besarnya cenderung hampir konstan.

Nilai VE dan RAE_p yang diperoleh tanggal 19.10.2013 belum menunjukkan hasil sesuai yang diharapkan, yaitu berturut-turut sebesar 55% dan 27%, sedangkan untuk kejadian tanggal 10.12.2013 sudah agak memberikan hasil yang diharapkan yaitu VE sebesar 22% dan RAE_p sebesar 19%. Hal ini disebabkan karena nilai RAE_p tergantung pada nilai puncak (*peak flow*) hidrograf satuan, yang merupakan fungsi dari nilai konstanta tampungan k , sedangkan faktor-faktor yang mempengaruhi nilai k disebabkan oleh: 1) panjang atau pendeknya durasi waktu (Δt) yang digunakan, 2) perbedaan besarnya input (masukan) hujan yang terjadi antara dua waktu kejadian tersebut dan 3) Ukuran luas dan bentuk daerah tangkapan yang digunakan.

Pengaruh kurva time-area dan isochrone terhadap hidrograf limpasan

Bentuk dan besarnya hidrograf limpasan pada Gambar 7a dan Gambar 7b dipengaruhi oleh kurva *time-area* dan *isochrone*. Bentuk kurva *time-area* dan *isochrone* yang terjadi sangat dipengaruhi oleh nilai waktu konsentrasi (t_c), sedangkan waktu konsentrasi nilainya dipengaruhi oleh konstanta tampungan (k), luas DAS, hujan efektif yang terjadi. Semakin besar nilai k maka nilai t_c juga akan semakin besar, kurva *time-area* juga akan semakin tinggi/naik, sehingga nilai luasan dalam isochrone yang akan dilewati aliran selama waktu t_c juga akan semakin luas arealnya. Bentuk hidrograf yang terjadi mempunyai sisi naik cepat, karena waktu konsentrasinya cepat/pendek dengan sisi resesi landai/panjang. Secara garis besar bentuk dan besarnya hidrograf dalam studi ini dipengaruhi oleh kurva *time-area* dan *isochrone*, waktu konsentrasi (t_c), konstanta tampungan (k), hidrograf satuan, luas daerah tangkapan dan hujan efektif yang terjadi.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa hidrograf limpasan dipengaruhi oleh kurva *time-area* dan *isochrone*, waktu konsentrasi (t_c), konstanta tampungan (k), hidrograf satuan, luas daerah tangkapan dan hujan efektif yang terjadi. Nilai VE dan RAE_p yang diperoleh masih belum menunjukkan hasil yang signifikan, karena penggunaan data kejadian hujan aliran yang sedikit dengan tidak bervariasinya durasi hujan (Δt). Disarankan penggunaan data hujan dan aliran untuk beberapa kejadian dengan durasi waktu $\Delta t < 60$ menit karena diindikasikan dapat memberikan hasil yang signifikan dan lokasi lain sebagai pembandingan (validasi).

DAFTAR PUSTAKA

- C. Daniel, N. Mandar and L. W. Mays (2014), *Determination of Clark's Unit Hydrograph Parameters for Watersheds*, Journal of Hydrologic Engineering (ASCE), Vol. 19, No. 2, February 1, 2014: 384-387
- C. Yoo, J. Lee, C. Park and C. Jun (2014), *Method for Estimating Concentration Time and Storage Coefficient of the Clark Model Using Rainfall-Runoff Measurements*, Journal of Hydrologic Engineering (ASCE), Vol. 19, No. 3, March 1, 2014: 626-634
- D. W. Kull and A. D. Feldman (1998), *Evolution Of Clark's Unitgraph Method To Spatially Distributed Runoff*, Journal of Hydrologic Engineering (ASCE), Vol. 3, No. 1 January: 9-19
- S. Yue and M. Hashino (2000) *Unit hydrographs to model quick and slow runoff components of streamflow*, Journal of Hydrology, Elsevier Science Publishers, Vol. 227: 195-206
- Sobriyah (2005), *Model Perkiraan Banjir DAS Besar Dari Sintesa Beberapa Persamaan Terpilih*, Media Teknik Sipil, Edisi Juli 2005: 71-78
- Sri Harto, BR (2000) *Hidrologi: teori, masalah, penyelesaian*, Edisi Pertama, Nafiri Offset, Yogyakarta, Indonesia: 147-157
- V. T. Chow, D. R. Maidment and L. W. Mays (1988) *Applied Hydrology*, McGraw Hill Int. Edition, Civil Engineering Series: 201-223
- Mays, L.W., dan Tung, Y.K., 2002, *Hydrosystem Engineering And Management*, Water Resources Publications, LLC., Colorado, USA
- Ponce, V.M., 1989, *Engineering Hydrology Principles and Practises*, Prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey