

KAJIAN SISTEM TANGGAP DARURAT BENCANA BANJIR DENGAN MEMPERKIRAKAN WAKTU PENJALARAN DEBIT PUNCAK BANJIR

Cita Adiningrum

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
cita_adiningrum@mail.uajy.ac.id

Abstrak

Sistem peringatan dini banjir (Early Warning System, EWS) yang dipasang di sungai-sungai yang rentan banjir digunakan sebagai alat pendeteksi dan penyebaran informasi saat kondisi darurat. DAS Cilemahabang termasuk daerah rawan banjir dengan titik genangan sering terjadi di sekitar lokasi kedua bendung gerak, yaitu bendung Cilemahabang dan bendung Caringin. Oleh sebab itu, kontrol genangan dilakukan dengan pembukaan/penutupan pintu bendung berdasarkan pedoman pengoperasian eksisting yang disesuaikan dengan sinyal yang dikirim dari beberapa EWS di hulu bendung Cilemahabang. EWS akan mengirimkan alarm saat level air sungai tiba-tiba meningkat. Ada tiga EWS yang beroperasi berikut jaraknya dari bendung Cilemahabang, yaitu EWS 1 Delta Silicon (15 km), EWS 2 Gema Lapik (8 km), dan EWS 3 Mekar Alam (7 km). Perhitungan waktu penjaluran debit puncak banjir perlu dilakukan untuk mengetahui besarnya warning time sehingga dapat disusun aksi-aksi sebagai bentuk tanggap darurat bencana. Perjalanan hidrograf banjir termasuk perkiraan waktu dan debit puncak di suatu titik di sungai dapat diketahui dengan melakukan penelusuran aliran (routing) dari hulu ke hilir berdasarkan hidrograf inflow di sisi hulu. Simulasi respon limpasan permukaan akibat input hujan dibantu dengan program HEC-HMS. Pemodelan aliran di sungai (routing) menggunakan metode Muskingum, sedangkan pemodelan limpasan permukaan menggunakan Hidrograf Satuan (HS) Snyder dan HS Clark. Hasil running dengan HS Snyder didapat waktu penjaluran debit puncak banjir dengan kala ulang Q_{2th} , Q_{5th} , Q_{10th} , Q_{25th} , Q_{50th} , dan Q_{100th} dari EWS 1 ke bendung Cilemahabang adalah selama 6 jam, sedangkan dari bendung Cilemahabang ke bendung Caringin adalah selama 6-7 jam. Hasil running dengan HS Clark didapat waktu penjaluran debit puncak banjir dengan berbagai kala ulang dari EWS 1 ke bendung Cilemahabang adalah selama 7 jam, sedangkan dari bendung Cilemahabang ke bendung Caringin adalah selama 7-8 jam. Selama selang waktu tersebut, dapat digunakan untuk memutuskan berapa jumlah pintu bendung gerak yang harus dibuka dan pemberitahuan kepada warga jika diperlukan evakuasi.

Kata kunci: Cilemahabang, routing, waktu penjaluran debit puncak banjir, HEC-HMS

LATAR BELAKANG

Permasalahan

Dalam tiga tahun terakhir ini trend bencana hidrometeorologi di Indonesia, khususnya banjir terus mengalami peningkatan. DAS Cilemahabang yang termasuk dalam satuan kerja BBWS Ciliwung-Cisadane memiliki kondisi topografi sangat landai sampai landai sehingga merupakan daerah rawan banjir. Secara administratif DAS Cilemahabang berada pada posisi $6^{\circ}11'37'' - 6^{\circ}25'16''$ LS dan $107^{\circ}4'32'' - 107^{\circ}14'6''$ BT yang mencakup Kabupaten Bogor (hulu) dan Kabupaten Bekasi (tengah dan hilir). Akan tetapi, wilayah yang sering terkena banjir akibat luapan Sungai Cilemahabang adalah bagian tengah dan hilir, tepatnya di Kota Cikarang. Menurut informasi Kepala Seksi Irigasi bendung Cilemahabang, lokasi banjir berada di hulu bendung Cilemahabang dan di hulu Bendung Caringin, yang mana kedua bendung tersebut merupakan bendung gerak dengan sejumlah pintu. Daerah di hulu bendung Cilemahabang yaitu di sekitar wilayah Cikarang Baru yang sebagian besar berupa perumahan, ruko, dan kawasan industri merupakan daerah rentan genangan dengan ketinggian air mencapai 1 m (sebatas dada orang dewasa) dan lama genangan ± 1 hari. Kejadian banjir dan kondisi genangan yang cukup parah tersebut

mengakibatkan kerugian materiil yang tidak sedikit karena kegiatan produksi di kawasan industri terhenti. Sering kali kontrol pencegahan banjir tergantung pada operasional bukaan pintu bendung. Kejadian banjir yang pernah terjadi tahun 2007 diduga akibat keterlambatan membuka pintu air.

Keterlambatan membuka pintu air sebenarnya dapat dicegah jika operasional buka/tutup pintu dikoordinasikan dengan sistem peringatan dini banjir (*Early Warning System, EWS*). Di ruas Sungai Cilemahabang sudah ada tiga EWS yang masing-masing terletak di Delta Silicon (EWS 1), Gema Lapik (EWS 2), dan Mekar Alam (EWS 3). Di dekat EWS Mekar Alam terdapat *peilschaal* atau papan duga air. EWS akan mengirimkan alarm saat level air sungai tiba-tiba meningkat, sedangkan *peilschaal* untuk memantau elevasi muka air. SOP (*Standard Operating Procedure*) pintu Bendung Cilemahabang juga sudah dikoordinasikan dengan ketiga EWS tersebut. Jika sudah demikian, mengapa kejadian keterlambatan membuka pintu air dapat terjadi? Lalu, bagaimana cara meminimalisir kegagalan pengoperasian pintu yang akan mengakibatkan terjadinya luapan sungai?

Idealnya, suatu ancaman banjir sudah dapat terdeteksi oleh EWS. Ketika EWS 1 yang letaknya 15 km dari Bendung Cilemahabang mengirimkan sinyal, maka petugas bendung akan melakukan aksi pembukaan sejumlah pintu. Sementara itu, ketika EWS 2 (8 km) dan EWS 3 (7 km) mengirimkan sinyal, maka jumlah pintu yang dibuka akan semakin banyak dengan tinggi bukaan maksimal. Dengan demikian, ketika EWS terdekat dari Bendung Cilemahabang mengirimkan alarm, maka ancaman banjir akan semakin "gawat" sehingga membutuhkan sistem tanggap darurat yang lebih rumit.

Perkiraan besarnya waktu penjararan debit puncak banjir dilakukan untuk mengetahui lama waktu yang diperlukan besaran debit puncak di suatu lokasi (EWS atau bendung) akan sampai di lokasi kritis di sebelah hilirnya. Jadi, selain mengandalkan kiriman alarm dari EWS, waktu penjararan debit puncak banjir dapat digunakan untuk meningkatkan kewaspadaan akan bahaya banjir. Selama selang waktu tersebut, sejumlah tindakan preventif dapat disusun, salah satunya adalah penetapan jumlah pintu yang harus dibuka untuk melewati debit banjir.

Tujuan Studi

Ada beberapa tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini, di antaranya adalah sebagai berikut:

- 1) Membuat suatu model hujan-aliran dengan bantuan *software* HEC-HMS untuk memodelkan perilaku DAS dan sistem Sungai Cilemahabang terhadap berbagai input hujan rencana kala ulang tertentu;
- 2) Melakukan analisis hidrologi untuk menetapkan debit banjir rencana kala ulang tertentu di beberapa lokasi rawan banjir;
- 3) Memperkirakan waktu penjararan (*travel time*) debit puncak banjir dari suatu lokasi ke lokasi lainnya di sebelah hilir;
- 4) Memberikan informasi terkait waktu yang tersedia untuk memerangi banjir atau *flood warning (lead time)* yang dapat dikombinasikan dengan EWS yang sudah ada sebagai panduan SOP pembukaan pintu bendung pada saat kondisi darurat.

Kajian Pustaka

Early Warning System (EWS)

Berdasarkan UU No.7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air pasal 54 (1), upaya penanggulangan daya rusak air dilakukan dengan mitigasi bencana. Mitigasi bencana merupakan kegiatan yang dilakukan sebelum bencana terjadi, salah satunya berupa identifikasi dan pengenalan terhadap bahaya/ancaman bencana, yang diwujudkan dengan suatu sistem peringatan dini banjir (*Early Warning System, EWS*). EWS merupakan sistem pengumpulan data dan penyebaran informasi terintegrasi yang terdiri atas model peramalan banjir, sejumlah aksi dan langkah-langkah terkait respon terhadap ancaman, dan sumber daya manusia (USACE, 2008).

SOP pembukaan pintu bendung digunakan sebagai manual penanggulangan banjir (*flood fighting*) yang berupa pedoman pengoperasian pintu (membuka/menutup pintu) berdasarkan alarm yang dikirim oleh EWS. Sebelum mengirimkan alarm, sistem EWS terlebih dahulu mengumpulkan data-data yang diperoleh

baik dari pengukuran alat maupun kiriman data dari stasiun lain melalui alat pemancar. Selanjutnya, data-data yang berupa kedalaman curah hujan, tinggi muka air, dan data kondisi DAS dianalisis menggunakan perangkat komputer yang canggih. Keluaran dari sistem tersebut berupa besaran banjir yang terjadi dan prediksi ancaman banjir di masa mendatang. Setelah besaran banjir diketahui, sejumlah aksi dan langkah-langkah sebagai respon terhadap ancaman ditetapkan oleh para *decision maker*, termasuk penyebaran informasi, yang pertama kepada *emergency responders*, dan kemudian kepada warga sekitar yang berupa pengiriman sinyal/alarm. Keberadaan EWS akan meningkatkan waktu untuk memerangi banjir atau *flood warning (lead) time*, T_w . Dengan meningkatnya T_w , instansi terkait dan masyarakat dapat mengambil tindakan untuk mengurangi kerugian dan menyelamatkan nyawa.

Model Hidrologi dengan Software HEC-HMS versi 3.5

HEC-HMS sebagai salah satu *software* keluaran US Army Corps of Engineers (USACE) dengan konsep model hujan-limpasan yang merepresentasikan DAS sebagai suatu sistem hidrologi dengan komponen-komponen hidraulika yang saling berhubungan. Hasil *output* program adalah perhitungan hidrograf aliran sungai pada lokasi yang dikehendaki dalam DAS (USACE, 2000). Proses hujan-limpasan dalam suatu DAS dibagi menjadi 6 komponen utama, yaitu (1) meteorologi; (2) *losses*; (3) *direct runoff*; (4) *baseflow*; (5) *routing*; dan (6) *tampungan/reservoir*. Tabel 1 di bawah ini berisi metode untuk setiap komponen model HEC-HMS yang dipakai dalam analisis.

Tabel 1. Metode yang digunakan untuk setiap komponen model HEC-HMS

No.	Komponen	Metode
1.	Hujan	User Hyetograph
2.	Losses atau volume runoff	Initial and constant-rate
3.	Direct runoff	(a) Clark's UH (b) Snyder's UH
4.	Baseflow	Exponential recession
5.	Routing	Muskingum

Losses/runoff volume model : Initial and constant-rate

Perhitungan *losses* bertujuan untuk mencari hujan lebihan, yaitu hujan yang menyebabkan terjadinya limpasan. Laju potensial maksimum dari kehilangan hujan akibat proses infiltrasi, f_c adalah konstan selama waktu tertentu dan disebut sebagai parameter *constant loss rate* (mm/jam). Besarnya *initial loss*, I_a , ditambahkan ke dalam model untuk mewakili intersepsi dan tampungan permukaan. Sampai hujan yang terakumulasi pada lapisan tanah yang lolos air melebihi volume kehilangan awal, limpasan tidak terjadi. Dengan demikian, besarnya hujan lebihan (*excess rainfall*) diberikan oleh rumus di bawah ini:

$$pe_t = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum p_i < I_a \\ p_i - f_c & \text{if } \sum p_i > I_a \text{ and } p_i > f_c \\ 0 & \text{if } \sum p_i > I_a \text{ and } p_i < f_c \end{cases} \quad (1)$$

Keterangan:

pe_t : hujan efektif atau hujan lebihan (mm)

p_i : hujan tiap satuan waktu (mm)

f_c : laju infiltrasi konstan (mm/jam)

I_a : kehilangan awal atau *initial loss* (mm)

Parameter *constant loss rate* mewakili sifat fisik tanah dan *initial loss* mewakili tata guna lahan dan kondisi terdahulu. Karena parameter model ini bukan merupakan parameter terukur, maka besarnya lebih baik ditetapkan dengan kalibrasi.

Transform model : Hidrograf Satuan

Model ini untuk transformasi dari hujan efektif menjadi aliran limpasan langsung (*direct runoff*). Ada beberapa model untuk perhitungan hidrograf satuan (HS) dan pada penelitian ini digunakan dua model sebagai perbandingan, hidrograf satuan sintetik HSS Snyder dan HSS Clark. Unsur-unsur pokok hidrograf satuan dihitung sebagai fungsi karakteristik DAS. Berikut ini dirangkumkan perbandingan rumusan hidrograf satuan sintesis Snyder dan Clark dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan rumusan hidrograf satuan sintesis Snyder dan Clark

(Sumber : Natakusumah, 2011 dan Johnstone and Cross, 1949 dalam USACE, 2000)

Snyder	Clark
Parameter masukan yang diperlukan : time lag (waktu tunda) dan koefisien puncak.	Bentuk HSS ditentukan berdasarkan parameter waktu konsentrasi t_c , koefisien simpanan DAS (R) dan diagram luas-waktu.
Time lag T_p	Waktu konsentrasi t_c
$t_p = C_t L L_c^{0.3}$	$t_c = 5,0 \left(\frac{L_{ms}}{\sqrt{ars}} \right)^{0.5}$
C_t = coef waktu (1 – 1,2)	t_c = waktu konsentrasi (jam)
L = panjang sungai terpanjang	L_{ms} = panjang sungai utama (mil)
L_c = panjang sungai ke pusat DAS	ars = kemiringan saluran atau <i>slope channel</i> (ft/mil)
Debit puncak Q_p	Koefisien simpanan, R (jam)
$Q_p = \frac{0,275 C_p A}{T_p}$	R = (debit di titik inflection point pada sisi resesi hidrograf <i>cfs</i>) ÷ (kemiringan sisi resesi <i>cfs/hr</i>)
A = luas DAS	Diagram luas-waktu menentukan jumlah luasan simpanan DAS yang memberikan kontribusi pada debit
C_p = coef puncak (0,59 – 0,66)	Diagram luas-waktu
Hujan efektif t_e	menentukan jumlah luasan simpanan DAS yang memberikan kontribusi pada debit luasan DAS sebagai fungsi waktu yang dinyatakan sebagai bagian dari waktu konsentrasi. Persamaan kurva luas-waktu :
$t_e = \frac{t_p}{5,5}$	$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1,414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1,5} & ; \text{untuk } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1,5} & ; \text{untuk } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases}$
Waktu puncak T_p	A_t = luas kumulatif yang berkontribusi pada waktu t
$t_e > T_r \rightarrow T_p = t_p + 0,25(T_r - t_e)$	A = luas total DAS
$t_e < T_r \rightarrow T_p = t_p + 0,5T_r$	
T_r = durasi hujan standar	
Waktu dasar T_b	
$T_b = 5,0(T_p + \frac{T_r}{2})$	

Baseflow model : Kurva Resesi Eksponensial

Pemisahan aliran dasar dari total limpasan diperlukan untuk menghitung aliran langsung yang nantinya dipakai untuk membuat hidrograf satuan. Pemisahan baseflow didasarkan pada analisis terhadap kurva resesi yang diekspresikan dalam bentuk persamaan eksponensial (USACE, 2000):

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (2)$$

di mana : $k = \exp\left(\frac{\ln Q_t - \ln Q_0}{t}\right)$

Keterangan:

 Q_t : debit pada periode waktu t Q_0 : debit awal (pada $t = 0$)

k : konstanta resesi

Parameter dalam metode *exponential recession* meliputi: aliran dasar awal (m^3/s), konstanta resesi, dan aliran *threshold* (aliran saat dimulainya kurva resesi pada sisi menurun dari sebuah hidrograf). Aliran *threshold* ditetapkan sebagai perbandingan terhadap aliran puncak (*ratio to peak*).

Routing model : metode Muskingum

Metode Muskingum yang dikembangkan oleh Mc Carty tahun 1938, didasarkan pada persamaan kontinuitas dan hubungannya dengan simpanan yang bergantung pada *inflow* dan *outflow*. Simpanan atau *storage* dalam saluran pada periode waktu tertentu diekspresikan dalam bentuk persamaan (Chow, 1959):

$$S_t = \frac{b [xI^{m,n} + (1-x)O^{m,n}]}{a^{m,n}} \quad (3)$$

Metode Muskingum mengasumsikan nilai $m = n = 1$ dan $b = a = k$, sehingga menghasilkan bentuk linier:

$$S_t = K [xI + (1-x)O] \quad (4)$$

K = waktu tempuh (*travel time*)

x = faktor pembobot (0 – 0,5)

Bentuk persamaan Muskingum adalah:

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1$$

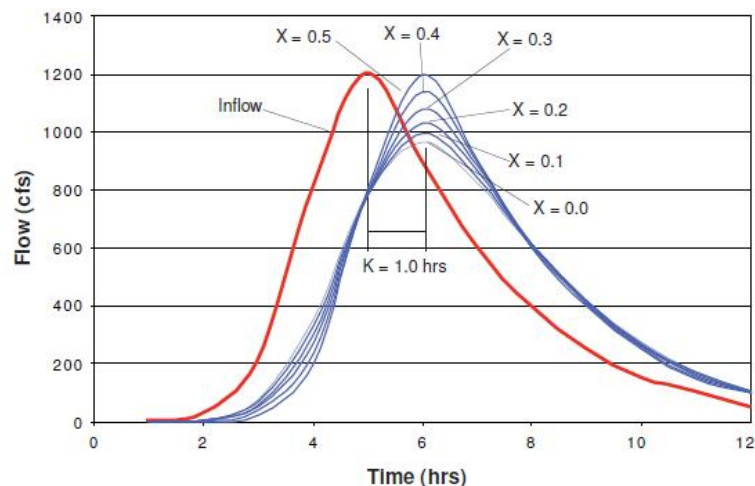
di mana: $C_0 = \frac{-Kx + 0,5\Delta t}{D}$ (5)

$$C_1 = \frac{Kx + 0,5\Delta t}{D}$$

$$C_2 = \frac{K - Kx - 0,5\Delta t}{D}$$

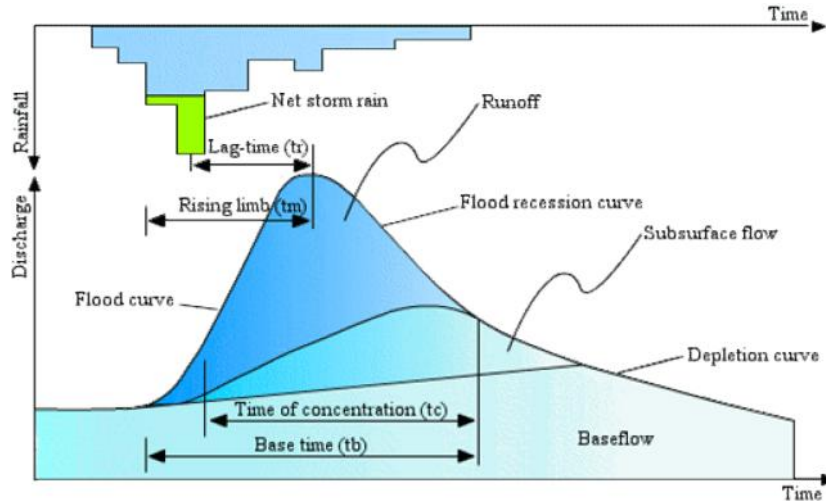
$$D = K - Kx + 0,5\Delta t$$

Parameter K , *travel time* (K) merupakan waktu tempuh aliran dari titik *inlet* sampai *outlet*, dipengaruhi oleh penampang lintang saluran dan besarnya debit atau dapat diprediksi dengan kalibrasi. Parameter x , merupakan bobot antara besarnya *inflow* dan *outflow*. Jika $x = 0$ menghasilkan atenuasi (penurunan puncak hidrograf *inflow-outflow*) maksimal, sedangkan jika $x = 0,5$ maka tidak ada atenuasi. Untuk kasus sungai pada umumnya, parameter x juga perlu dikalibrasi. Selain itu, jumlah *subreaches* juga harus dimasukkan dalam *running* program. Banyaknya *subreaches* akan mempengaruhi atenuasi. Semakin banyak *subreaches* akan menurunkan atenuasi, dan sebaliknya. Untuk menunjukkan pengaruh besarnya parameter K dan x terhadap bentuk hidrograf hasil *routing* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Pengaruh besarnya parameter K dan x pada hidrograf hasil *routing*

(Sumber: HEC-HMS Tutorial Rice University, 2003)

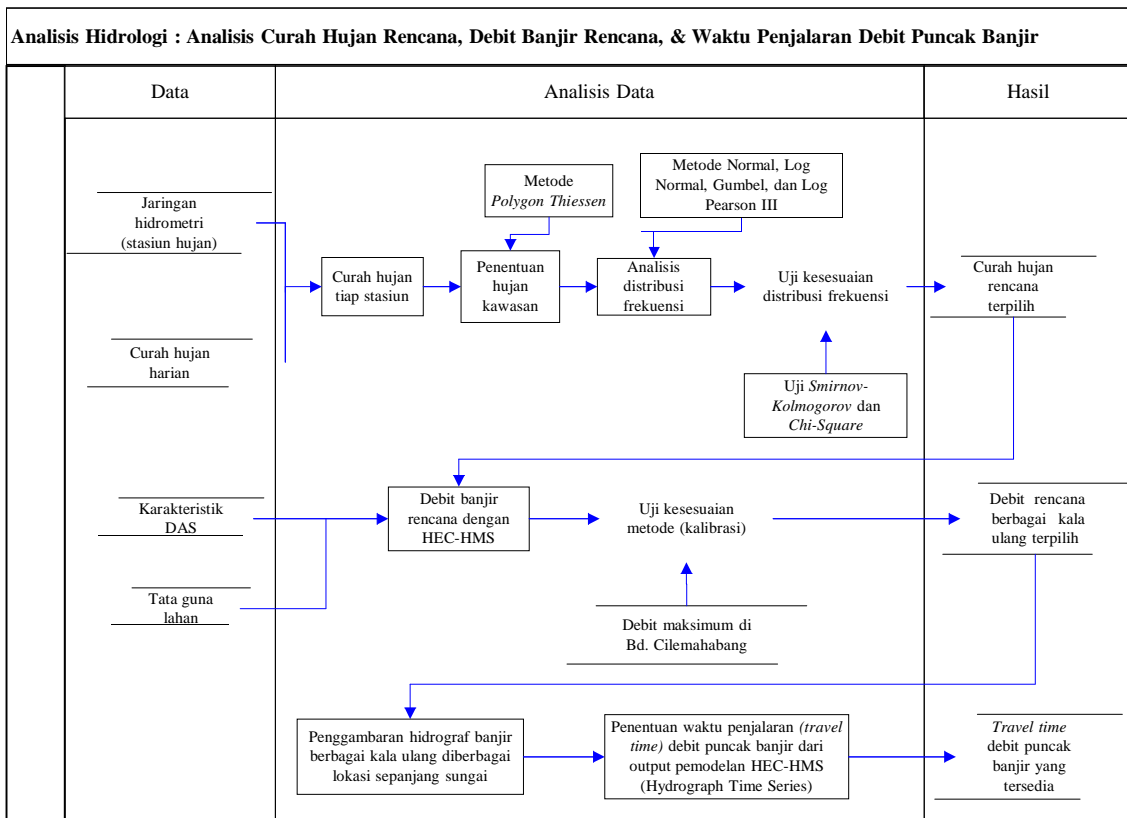


Gambar 2. Bagian-bagian hidrograf

(Sumber: http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1a/chapt_8/text.htm)

METODOLOGI STUDI

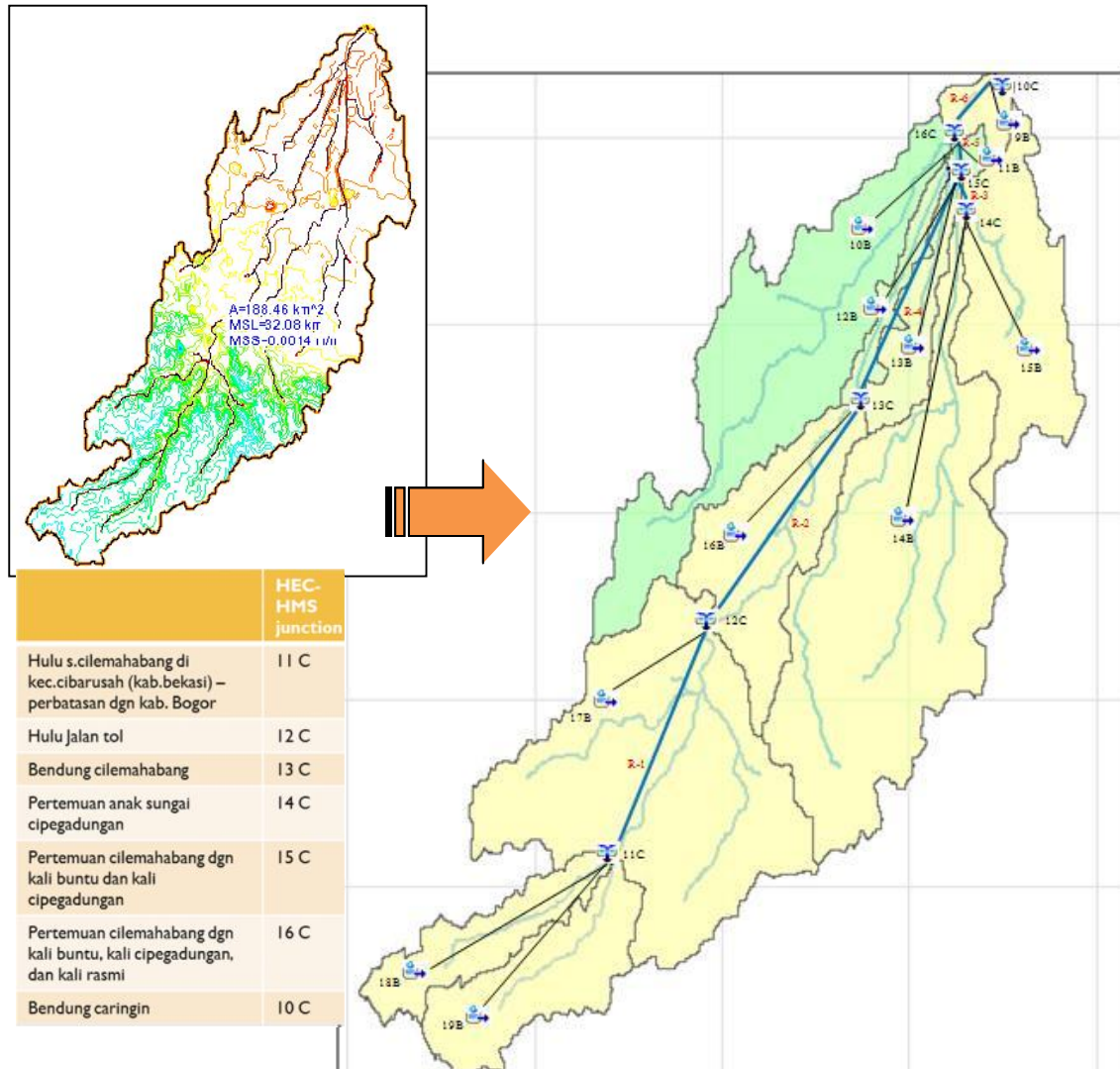
Penelitian ini dimulai dari tahap pengumpulan data-data awal, seperti: topografi, data hujan, kondisi DAS dan sungai, serta tata guna lahan. Data-data tersebut kemudian diolah untuk membuat model hidrologi menggunakan *software* HEC HMS. Adapun tahapan secara lengkap dapat dilihat dalam *flowchart* berikut.



Gambar 3. Tahapan analisis yang dilakukan

HASIL STUDI DAN PEMBAHASAN

Pembuatan *Basin Model*



Gambar 4. Basin model DAS Cilemahabang dalam program HEC-HMS

Beberapa simbol dalam *basin model* di atas merepresentasikan elemen-elemen hidrologi yang dijelaskan dalam tabel berikut ini.

Tabel 3. Representasi simbol dalam *basin model* DAS Cilemahabang

Elemen Hidrologi	Keterangan
Subbasin 	DAS Cilemahabang dibagi mejadi 11 subdas. (penamaan subdas hanya untuk mempermudah perhitungan)
Reach	Penggal/ruas sungai.
Junction 	Merupakan pertemuan ruas sungai atau aliran. Beberapa titik pertemuan yang dicari hidrograf banjirnya adalah

Kalibrasi data debit banjir

Proses ini bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter *unknown* dalam model HEC-HMS sedemikian rupa sehingga mendekati nilai di lapangan yang dalam hal ini berupa debit pengukuran di Bendung Cilemahabang. *Input* hujan yang dimasukkan ke dalam model juga disesuaikan dengan kejadian debit banjir, yaitu hujan pada tanggal yang sama yang menyebabkan debit banjir tersebut.

Tabel 4. Debit banjir terukur di bendung Cilemahabang dan hujan wilayah penyebab banjir

Tanggal	Debit banjir	hujan stasiun (mm)		hujan rata-rata wilayah
	(m ³ /s)	Bd.Cikarang	Tunggilis	
10/05/2007	78,927	0	0	0,000
11/05/2007	70,047	118	30	109,686
05/06/2007	90,34	74	0	67,008
02/03/2008	86,63	7	13	7,567
09/03/2008	63,35	3	0	2,717
22/04/2008	74,803	48	0	43,465
13/01/2009	111,587	108	48	102,331
14/01/2009	116,689	178	77	168,457
Stasiun	Bobot			
Bd.Cikarang	0,906			
Tunggilis	0,094			
	input kalibrasi HEC-HMS			

Proses kalibrasi akan menggunakan kejadian banjir tanggal **11/05/2007** dan **14/01/2009**. Dalam hal ini akan dicari parameter optimum untuk setiap komponen model HEC-HMS yang mana besarnya debit puncak hasil hitungan mendekati debit terukur untuk kedua kasus tersebut. Besarnya parameter komponen model HEC-HMS hasil kalibrasi masing-masing untuk komponen *direct runoff* yang menggunakan hidrograf satuan Snyder dan Clark adalah sebagai berikut

Tabel 5. Parameter komponen model HEC-HMS hasil kalibrasi (Komponen *direct runoff* menggunakan hidrograf satuan Snyder)

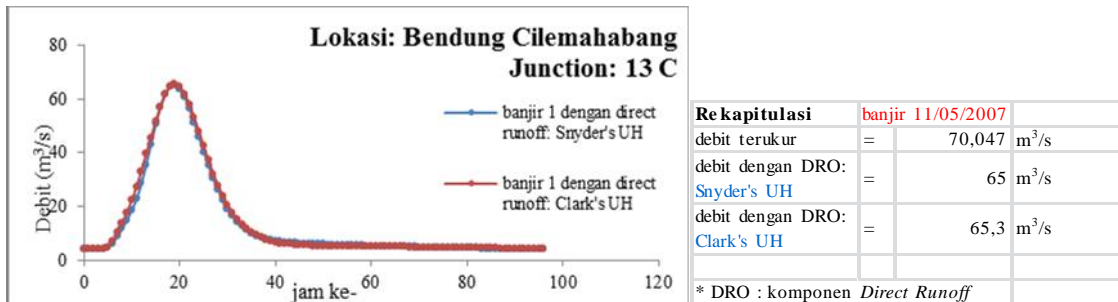
No.	Subbasin ID	Loss		Transform		Baseflow			
		initial loss (mm)	constant rate (mm/hr)	standard lag (hr)	peaking coefficient	Area (m ²)	initial discharge (m ³ /s)	recession constant	threshold ratio
1	17B	14,245	11,96	6,863	0,68	43,2988	1	0,9	0,05
2	19B	15,784	11,685	4,494	0,66	12,8081	1	0,9	0,05
3	18B	13,995	10,419	3,939	0,65	8,6696	1	0,9	0,05
4	16B	13,231	9,394	5,917	0,31108	16,3138	1	0,9	0,05
5	14B	11,345	8,015	6,62	0,66	46,1596	1	0,9	0,05
6	15B	11,576	8,9501	3,105	0,7	17,7928	1	0,9	0,05
7	13B	13,789	9,8076	4,886	0,7	5,8294	1	0,9	0,05
8	12B	13,453	8,865	4,522	0,69745	3,2717	1	0,9	0,05
9	10B	13,685	9,7703	8,991	0,7	30,8155	1	0,9	0,05
10	11B	12,896	8,9978	2,25329	0,76319	0,9269	1	0,9	0,05
11	9B	12,689	8,5668	4,28246	0,73974	2,5740	1	0,9	0,05

No.	Reach name	Muskingum K (hr)	Muskingum X	Subreaches
1	R-1	6,9397	0,25	4
2	R-2	5,945	0,25	4
3	R-3	5,6949	0,25	3
4	R-4	5,0551	0,25	3
5	R-5	4,6849	0,25	3
6	R-6	4,899	0,25	3

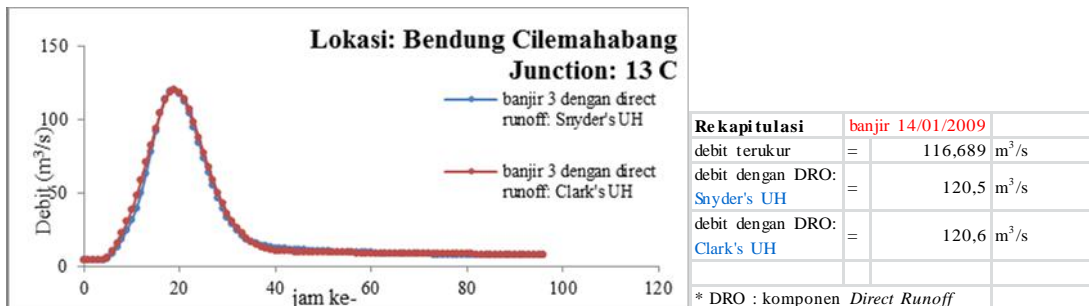
Tabel 6. Parameter komponen model HEC-HMS hasil kalibrasi (Komponen *direct runoff* menggunakan Hasil kalibrasi (Komponen *Direct runoff* menggunakan hidrograf satuan Clark)

No.	Subbasin ID	Loss		Transform		Baseflow			
		initial loss (mm)	constant rate (mm/hr)	time of concentration (hr)	storage coefficient (hr)	Area (m ²)	initial discharge (m ³ /s)	recession constant	threshold ratio
1	17B	15,245	11,46	7,299	5,798	43,2988	1	0,9	0,05
2	19B	15,784	10,685	4,0147	4,987	12,8081	1	0,9	0,05
3	18B	15,995	11,419	4,305	4,69	8,6696	1	0,9	0,05
4	16B	11,231	8,094	9,086	6,078	16,3138	1	0,9	0,05
5	14B	16,945	12,995	8,3275	1,94	46,1596	1	0,9	0,05
6	15B	15,576	12,7501	6,0414	0,57	17,7928	1	0,9	0,05
7	13B	17,789	13,8706	8,3267	1,58	5,8294	1	0,9	0,05
8	12B	15,453	13,865	8,0324	0,69	3,2717	1	0,9	0,05
9	10B	14,985	13,7703	10,992	3,996	30,8155	1	0,9	0,05
10	11B	16,996	13,998	5,5519	0,519	0,9269	1	0,9	0,05
11	9B	14,989	10,5668	6,8678	1,947	2,5740	1	0,9	0,05

No.	Reach name	Muskingum K (hr)	Muskingum X	Subreaches
1	R-1	6,455	0,25	5
2	R-2	6,939	0,25	5
3	R-3	5,9949	0,25	4
4	R-4	3,6851	0,25	3
5	R-5	4,8949	0,25	4
6	R-6	5,999	0,25	3



Gambar 5. Perbandingan hidrograf banjir hasil kalibrasi jika komponen *direct runoff* menggunakan HSS Snyder dan Clark (untuk kasus banjir tanggal 11/05/2007)



Gambar 6. Perbandingan hidrograf banjir hasil kalibrasi jika komponen *direct runoff* menggunakan HSS Snyder dan Clark (untuk kasus banjir tanggal 14/01/2009)

Debit puncak banjir

Hasil perhitungan debit banjir rencana untuk beberapa kala ulang tertentu di lokasi EWS 1 (Hulu jalan toll), bendung Cilemahabang dan bendung Caringin dapat dilihat dalam Tabel 7.

Tabel 7. Debit banjir rencana berbagai kala ulang di lokasi junction 12 C, 13 C, dan 10 C

Debit di junction 12 C : EWS 1 (m ³ /dt)	Q2	Q5	Q10	Q25	Q50	Q100
Snyder	49,8	67,2	80,3	97,9	115,4	132,9
Clark	49,3	66,8	79,6	97,2	114,2	131,8
Debit di junction 13 C : Bd. Cilemahabang (m ³ /dt)	Q2	Q5	Q10	Q25	Q50	Q100
Snyder	51,6	69,2	82,6	100,4	118,2	136,1
Clark	51,6	69,4	82,6	100,7	118,4	136,6
Debit di junction 10 C : Bd. Caringin (m ³ /dt)	Q2	Q5	Q10	Q25	Q50	Q100
Snyder	89,8	118,2	140,2	169,6	199,1	228,7
Clark	91,1	119,6	142,7	172,5	202,6	232,9

Waktu tunda, *time lag* (jam) dan Waktu konsentrasi, *time of concentration* (jam)

Metode hidrograf satuan sintetik Snyder menggunakan besaran waktu tunda, t_p sebagai salah satu parameter utamanya. Waktu tunda merupakan selang waktu antara pusat massa hujan efektif dengan pusat massa hidrograf limpasan langsung. Tabel 10 akan membandingkan nilai waktu tunda yang dihitung dengan cara manual menggunakan rumus dan waktu tunda yang didapat dari simulasi HEC-HMS.

Tabel 8. Perbandingan hasil perhitungan waktu tunda, t_p cara manual dan simulasi HEC-HMS

No.	Subbas in name	L (km)	L _c (km)	A (km ²)	t_p (jam)	
					manual	HEC -HMS
1	18 B	6.32	4.72	8.670	3.739	4
2	19 B	5.68	4.19	12.808	3.494	4
3	17 B	8.84	4.83	43.299	4.163	6
4	10 B	15.84	9.12	30.815	6.001	8
5	16 B	8.76	5.5	16.314	4.317	5
6	14 B	18.05	11.1	46.160	6.620	6
7	12 B	6.57	3.72	3.272	3.522	4
8	13 B	4.48	4.33	5.829	3.286	4
9	9 B	2.1	1.21	2.574	1.786	4
10	11 B	0.74	0.45	0.927	0.971	2
11	15 B	4.46	3.6	17.793	3.105	3

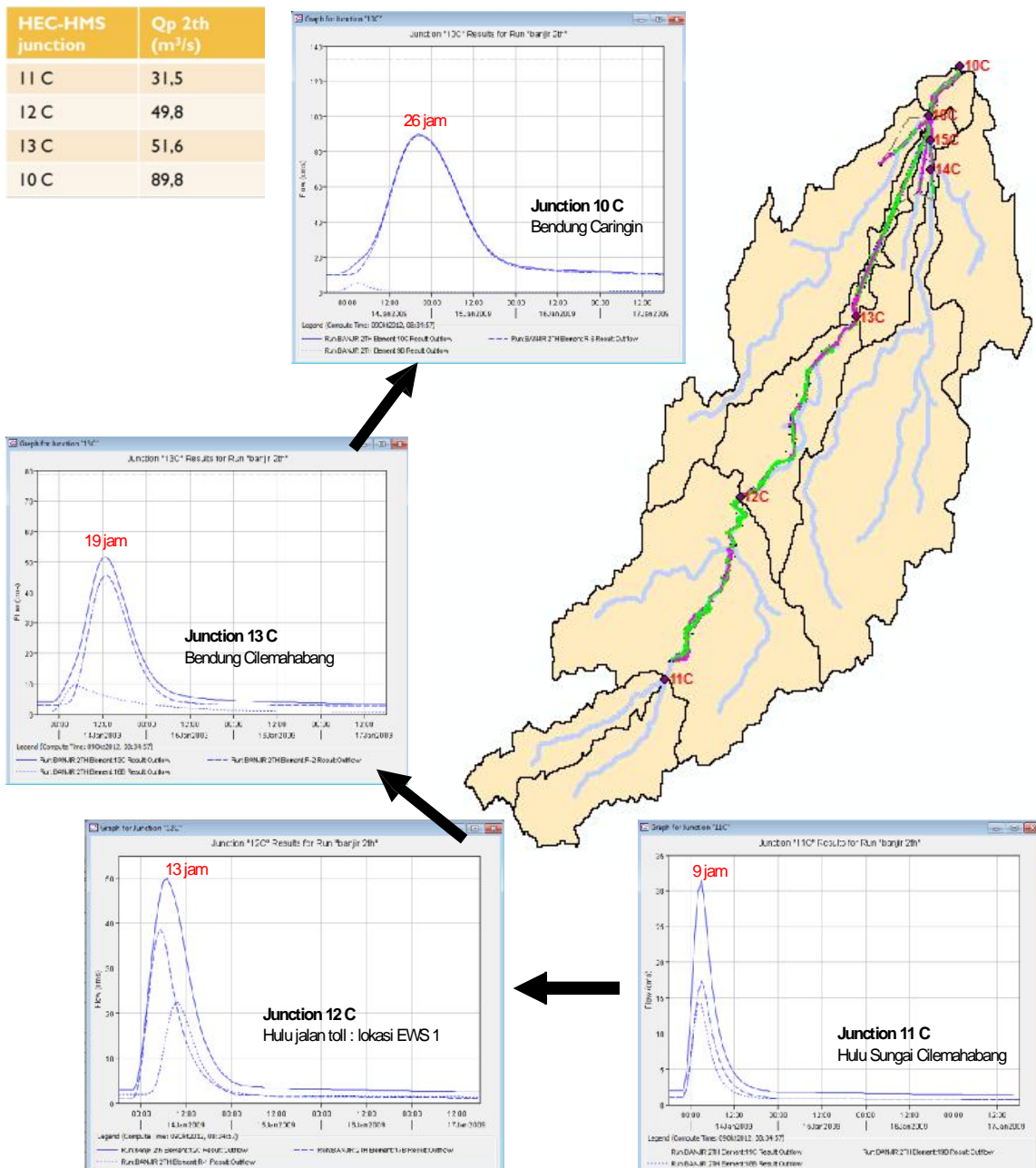
Sedangkan pada metode HSS Clark, salah satu parameter penentu adalah waktu konsentrasi, t_c . Waktu konsentrasi menunjukkan waktu yang dibutuhkan setetes air hujan yg jatuh di titik terjauh suatu DAS (*remote area*) untuk mengalir sampai di titik outletnya. Tabel 11 berisi perbandingan nilai waktu konsentrasi yang dihitung dengan cara manual dan yang didapat dari simulasi HEC-HMS.

Tabel 9. Perbandingan hasil perhitungan waktu konsentrasi, t_c cara manual dan simulasi HEC-HMS

No.	Subbasin name	L _{ms} (mil)	ars (ft/mil)	t _c (jam)	
				manual	HEC HMS
1	18 B	3.93	0.0025	3.885	3
2	19 B	3.53	0.0027	3.938	3
3	17 B	5.49	0.0028	4.866	6
4	10 B	9.84	0.0013	7.892	8
5	16 B	5.45	0.0015	5.667	7
6	14 B	11.21	0.0015	8.127	5
7	12 B	4.08	0.0007	5.932	4
8	13 B	2.78	0.0005	5.327	5
9	9 B	1.31	0.0001	5.468	4
10	11 B	0.46	0.0019	1.552	3
11	15 B	2.77	0.0003	6.041	3

Penjalaran debit puncak banjir

Gambar di bawah ini menunjukkan penjalaran debit puncak banjir dari suatu lokasi ke lokasi lain di sebelah hilirnya. Berikut dicontohkan hasil simulasi untuk penjalaran debit banjir kala ulang 2 tahun.



Gambar 7. Ilustrasi penjalaran debit puncak banjir dan besarnya waktu penjalaran (*travel time*)

Waktu penjalaran debit puncak banjir

Waktu penjalaran debit puncak banjir didapat dari selisih antara waktu terjadinya debit puncak di suatu lokasi (misal junction 12 C) dengan waktu terjadinya debit puncak di lokasi lainnya (misal junction 11 C). Tabel berikut ini berisi rangkuman besarnya waktu penjalaran debit puncak banjir untuk berbagai kala ulang yang dibedakan lagi menjadi dua, yaitu hasil simulasi dengan komponen *direct runoff* menggunakan HSS Snyder dan HSS Clark.

Tabel 10. Waktu penjalaran debit puncak banjir di beberapa titik lokasi

<i>Travel time</i> dari hulu sungai ke EWS 1 (jam)	t-Q ₂	t-Q ₅	t-Q ₁₀	t-Q ₂₅	t-Q ₅₀	t-Q ₁₀₀
Snyder	4	4	4	4	4	4
Clark	4	4	4	4	4	4
<i>Travel time</i> dari EWS 1 ke Bd. Cilemahabang (jam)	t-Q ₂	t-Q ₅	t-Q ₁₀	t-Q ₂₅	t-Q ₅₀	t-Q ₁₀₀
Snyder	6	6	6	6	6	6
Clark	7	7	7	7	7	7
<i>Travel time</i> dari Bd. Cilemahabang ke Bd. Caringin (jam)	t-Q ₂	t-Q ₅	t-Q ₁₀	t-Q ₂₅	t-Q ₅₀	t-Q ₁₀₀
Snyder	7	7	8	8	8	8
Clark	7	8	7	8	8	8

Berdasarkan Tabel 10, waktu penjalaran debit puncak banjir berbagai kala ulang dari hulu sungai Cilemahabang ke EWS 1 (hulu jalan toll) yang ± berjarak 7 km adalah selama 4 jam. Sedangkan waktu penjalaran debit puncak banjir dari EWS 1 ke bendung Cilemahabang yang jaraknya 15 km adalah selama 6 – 7 jam. Waktu penjalaran debit puncak banjir dari bendung Cilemahabang ke bendung Caringin dengan jarak ± 9 km adalah selama 7 – 8 jam. Cepat lambatnya waktu penjalaran debit puncak banjir yang pertama tergantung pada jarak tempuh gelombang banjir tersebut. Selain itu, parameter lain yang berpengaruh adalah kemiringan/*slope* ruas sungai dan kekasaran saluran.

Sinkronisasi pengoperasian pintu bendung dengan EWS dan *travel time* debit puncak banjir

Tabel 11 di bawah ini berisi SOP (*Standard Operating Procedure*) bendung Cilemahabang yang telah disinkronisasi dengan ketiga EWS yang masing-masing terletak di Delta Silicon, Gema Lapik, dan Mekar Alam. Sedangkan Gambar 8 menunjukkan posisi ketiga EWS di sepanjang sungai Cilemahabang yang lokasinya masih di dalam kawasan industri Cikarang.

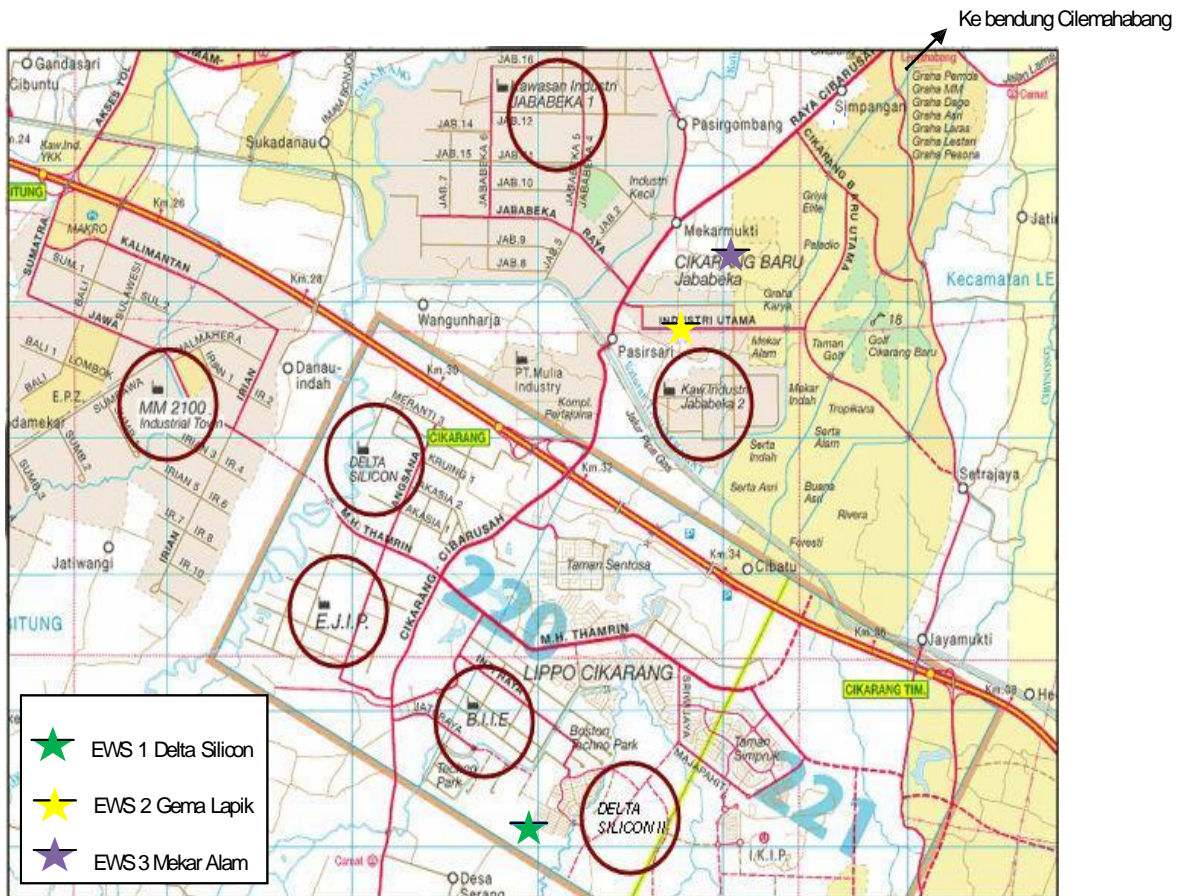
Tabel 11. SOP saat pembukaan pintu bendung Cilemahabang

(Sumber: Perum Jasa Tirta II Divisi Pengelolaan Air I Seksi Lemahabang)

No.	Keadaan	Aksi
A.	Cikarang Baru hujan ringan	Buka pintu semua dipertahankan level air -50 cm
B.	Cikarang Baru hujan deras	Buka pintu semua dipertahankan ngolong
C.1.	Cibarusah/Cicau hujan deras	pintu semua dipertahankan level air -50 cm
2.	EWS 1 Delta Silicon kirim alarm	Buka pintu semua dipertahankan ngolong
3.	EWS 2 Gema Lapik kirim alarm	Buka pintu semua dipertahankan ngolong
4.	EWS 3 Mekar Alam kirim alarm	Buka pintu semua posisi bukaan maksimal
D.	Level air Cikarang Baru Hijau 3	Tutup pintu dipertahankan level normal
Debit sungai, Q (m³/s)		Bukaan pintu bendung

Kondisi normal	Pintu ditutup atau salah satu pintu dibuka 30-60 cm untuk mempertahankan level normal
Debit meningkat di atas 15 m ³ /s	Dibuka semua dengan tinggi bukaan pintu 1,5 m
50 m ³ /s – 90 m ³ /s	Dibuka semua dengan tinggi bukaan pintu maksimal (2,5 m)

Pengoperasian pintu bendung juga tergantung dari besarnya debit yang terjadi. Dalam kondisi normal (elevasi muka air dipertahankan sama dengan elevasi mercu bendung) semua pintu bendung ditutup atau satu/dua pintu dibuka setinggi 30 cm – 60 cm. Pada kondisi debit besar (50 m³/s – 90 m³/s) semua pintu dibuka dan dipertahankan “ngolong” (muka air sisi hulu tidak menyentuh pintu) dengan tujuan supaya sampah dapat lewat dan tidak menyumbat aliran. Ketika debit meningkat dengan penambahan yang kecil, pintu dibuka bertahap, yaitu 60 cm – 1 m dan dijaga supaya tinggi limpasan tidak lebih dari $h = 0,3$ m.



Gambar 8. Lokasi sistem peringatan dini banjir (EWS)

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Dari hasil analisis, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

- 1) Unjuk kerja HSS Snyder dan HSS Clark untuk memodelkan komponen *direct run off* relatif sama. Hal ini terbukti dari perbandingan besarnya debit puncak banjir berbagai kala ulang untuk masing-masing HSS hampir sama. Begitu juga dengan perkiraan besarnya waktu penjalaran debit puncak banjir yang menunjukkan hasil yang tidak terpaud jauh.
- 2) Besarnya waktu penjalaran debit puncak banjir relatif sama untuk berbagai kala ulang. Misal: waktu penjalaran debit puncak banjir dari EWS 1 ke Bendung Cilemahabang untuk kala ulang 5 tahun adalah selama 6 jam. Sedangkan untuk kala ulang 100 tahun, waktu penjalaran debit puncak banjirnya juga selama 6 jam.

- 3) Besarnya waktu penjalaran debit puncak banjir berbagai kala ulang tergantung pada jarak tempuh (panjang ruas sungai di antara dua lokasi), kemiringan/*slope* ruas sungai, dan kekasaran saluran.
- 4) Terkait dengan peristiwa keterlambatan membuka pintu air yang pernah terjadi, diduga kemungkinan penyebabnya adalah sebagai berikut:
 - kondisi darurat di mana listrik mati/panel pembuka pintu otomatis rusak sehingga serangkaian pintu air (7-8 pintu) harus dibuka secara manual yang membutuhkan waktu lebih lama dan petugas lebih banyak;
 - terjadi gangguan pada stasiun telemetri sistem peringatan dini banjir (sensor, *transmitter*) sehingga tidak dapat mengirim alarm. Sementara, buka/tutup pintu bendung tergantung alarm/sinyal yang dikirimkan EWS;
 - kejadian banjir yang melebihi besaran banjir rancangan/*design flood* pembuatan bendung;
 - *human error*, misalnya : saat banjir terjadi, petugas sedang tidak ada di tempat.

Beberapa saran/masukan di bawah ini dapat digunakan untuk menyempurnakan penelitian selanjutnya, antara lain:

- 1) Data debit terukur yang lengkap sangat dibutuhkan dalam proses kalibrasi sebelum dilakukan analisis debit banjir dengan HEC-HMS sehingga diperoleh hasil yang lebih akurat;
- 2) analisis lebih lanjut terkait sistem pengolahan data dan sistem evaluasi dari masing-masing EWS. Hal ini penting untuk mengetahui besarnya *threshold* yang dijadikan pedoman pengambilan keputusan dilakukannya tindakan tanggap darurat bencana, misalnya: pengiriman sinyal/alarm bahaya, dsb.

REFERENSI

Chapter 8 *Hydrograph/Hydrological Processes*. http://echo2.epfl.ch/MCAIRE/mod_1a/chapt_8/text.htm
[diakses pada tanggal 10 Agustus 2014]

Chow, V.T., Maidment, D.R., dan Mays, L.W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.

Natakusumah, D.K., Hatmoko, W., dan Harlan, D., 2011. Prosedur umum perhitungan hidrograf satuan sintesis dengan cara ITB dan beberapa contoh penerapannya. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, Vol. 18 No. 3 Desember 2011 ISSN 0853-2982.

Rice University, February 2003. *Handout of HEC-HMS and Hydrologic Modeling Tutorial EIM 512*. Houston, Texas.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center., 2008. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Applications Guide*. Davis, California.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center., 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*. Davis, California.