

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Hidrologi dan Klasifikasi Hidrologi

Proses adalah gambaran fenomena yang mengalami perubahan terus-menerus terutama terhadap waktu. Karena semua fenomena hidrologi berubah menurut waktu, maka hal itu disebut proses hidrologi. Jika perubahan variabel selama proses dibarengi dengan hukum kepastian proses tersebut tidak tergantung kepada peluang, maka dinamakan proses deterministik. Proses deterministik juga merupakan proses yang tidak berubah karena waktu. Tetapi jika perubahan variabel merupakan faktor peluang, prosesnya dinamakan stokastik atau probabilistik. Umumnya proses stokastik dipandang sebagai proses yang tergantung pada waktu sedangkan proses probabilistik adalah proses yang tidak tergantung pada waktu. Sebenarnya proses hidrologi terdiri atas komponen-komponen deterministik dan stokastik. Besarnya kadar masing-masing komponen menentukan apakah proses tersebut dapat diselesaikan secara deterministik atau stokastik.

2.2 Model Hidrologi Matematik dan Simulasi

Dalam pengertian umum, model hidrologi adalah sebuah sajian sederhana (*simple representation*) dari sebuah system hidrologi yang kompleks (Sri Harto, 1993:190). Dengan munculnya komputer digital, maka istilah model hidrologi dipakai kembali untuk memberikan gambaran matematis yang relatif kompleks tentang siklus hidrologi, yang penyelesaiannya didesain pada sebuah komputer. Model-model matematik dalam ilmu hidrologi pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu:

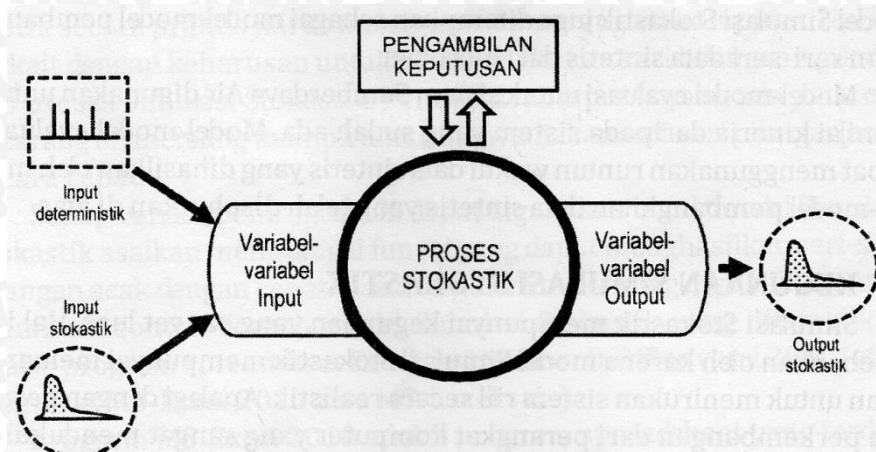
a. Deterministik

Model deterministik adalah model yang *change of occurrence* dari masing-masing variabelnya tidak diikuti sertakan. Dengan demikian maka setiap masukan dengan sifat-sifat tertentu selalu akan menghasilkan keluaran tertentu pula. (Sri Harto, 1993:191)

b. Stokastik

Model-model stokastik mempunyai output yang bersifat acak paling tidak secara parsial (May & Tung, 1992). Sementara input dari model-model stokastik dapat bersifat deterministik dan atau stokastik. Model Stokastik dapat dianggap sebagai proses stokastik dengan lingkup yang lebih besar yang dapat mengandung komponen Pengambilan Keputusan. Jadi proses di dalam model itu sendiri adalah Proses Stokastik yang

berinteraksi dengan komponen Pengambilan Keputusan. Secara umum maka Model Stokastik dapat diilustrasikan sebagai gambar berikut ini (Soetopo, 2012:3) :



Gambar 2.1 Model Stokastik
Sumber: Soetopo (2012:3)

Jadi karena mengandung proses stokastik di dalamnya, maka suatu Model Stokastik juga akan menghasilkan runtun waktu sebagai salah satu daripada outputnya.

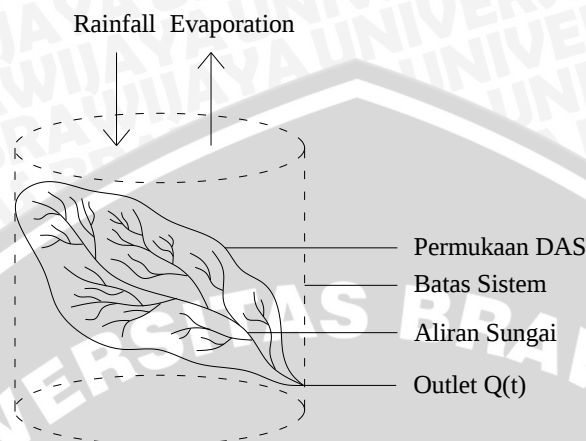
2.3 Hidrologi Stokastik

Dalam ilmu pengetahuan statistik, kata stokastik sinonim dengan acak, namun dalam hidrologi, kata itu dipakai secara khusus yang menunjuk pada suatu rangkaian waktu, di mana di dalamnya hanya sebagian saja yang bersifat acak. Hidrologi stokastik mampu mengisi kekosongan yang ada di antara metode-metode deterministik, dan hidrologi probabilistik (Linsley, 1989:365). Dalam hidrologi deterministik, variabilitas waktu dianggap dijelaskan seluruhnya oleh variabel-variabel lain dalam penerapan model yang tepat. Dalam hidrologi probabilistik, tidak diperhatikan urutan-urutan waktu, yang diperhatikan hanyalah probabilitas atau peluang disamai atau dilampauinya suatu kejadian. Sedangkan dalam hidrologi stokastik urutan-unitan waktu mutlak penting, penyajian stokastik mempertahankan sifat-sifat peluang yang berhubungan dengan urutan-urutan kejadiannya. Metode stokastik menyediakan suatu cara untuk memperkirakan probabilitas urutan-urutan tahun kering selama perioda yang diinginkan pada masa mendatang.

2.4 Hidrologi Permukaan dan Hidrologi Bawah Permukaan

Hidrologi permukaan dan hidrologi bawah permukaan merupakan dua sub sistem yang terkait sangat erat dalam sistem hidrologi. Suatu sistem hidrologi didefinisikan sebagai suatu struktur atau volume ruangan yang dikelilingi oleh suatu batas yang

menerima air dan masukan lainnya dan beroperasi pada internalnya, dan menghasilkannya sebagai keluaran. Struktur (volume ruangan) tersebut merupakan total keseluruhan lintasan aliran yang mencakup air yang lewat dari titik itu masuk ke sistem itu sampai titik itu berada. (anonim, 2007:25)



Gambar 2.2 DAS Sebagai Sistem Hidrologi
(anonim, 2007:25)

Batas sistem (seperti yang tertera pada gambar 2.2) merupakan permukaan kontinu yang ditentukan dalam tiga dimensi tertutup di dalam volume atau struktur. Suatu “*working medium*” masuk sistem tersebut sebagai input, yang berinteraksi dengan struktur dan media lain, dan tinggal sebagai keluaran. Proses-proses secara fisika, kimia dan biologi beroperasi pada media kerja (*working media*) dalam seluruh sistem tersebut. Pada umumnya media kerja tercakup dalam analisis hidrologi adalah air, udara dan energi bahan.

2.5 Daur Limpasan (Runoff Cycle)

Menurut Meinzer (1942) prosesnya dapat disederhanakan menjadi 4 tahap, yaitu:

a. Tahap 1

Terjadi pada akhir musim kering. Pada tahap ini tidak ada masukan ke dalam sistem, bahkan keluaran akibat penguapan sangat intensif. Kekurangan kelembaban tanah bagian atas akan diganti oleh kelembaban (*moisture*) yang berada di lapisan bawahnya. Aliran yang terjadi di sungai hanya akibat aliran air tanah saja. Oleh karena tidak ada recharge maka akan menimbulkan penurunan muka air tanah.

b. Tahap II

Terjadi pada awal musim hujan, dimana ada recharge dari hujan walaupun dengan intensitas yang kecil. Apabila ada aliran permukaan maka aliran tersebut masih akan tertampung dalam tampungan permukaan misalnya sebagai tampungan cekungan. Jumlah air ini habis menguap atau terinfiltrasi sehingga tidak memberikan sumbangan pada

limpasan permukaan. Bagian air yang terinfiltrasi jumlahnya dipandang belum mencukupi sehingga masih digunakan oleh massa tanah untuk mengembalikan kandungan airnya mendekati kapasitas lapangan. Selama kapasitas lapangan belum tercapai, maka belum terjadi perkolasi yang berarti belum ada tambahan volume air dalam akuifer.

c. Tahap III

Pada pertengahan atau akhir musim hujan, dimana hujan telah cukup banyak sehingga terjadi beberapa perubahan dalam bagian proses hidrologi. Aliran limpasan cukup besar, kapasitas tampungan cekungan terlampaui dan terjadi limpasan permukaan. Selanjutnya dapat terjadi perubahan yang relatif cepat pada muka air sungai. Bagian air yang terinfiltrasi jumlahnya cukup, massa tanah mencapai kapasitas lapangan dan terjadi perkolasi. Akibatnya jumlah kandungan air dalam akuifer bertambah dan terjadi peningkatan ketinggian air dalam akuifer dan besaran aliran air tanah menjadi semakin meningkat. Keadaan ini berlangsung terus sampai akhir musim hujan.

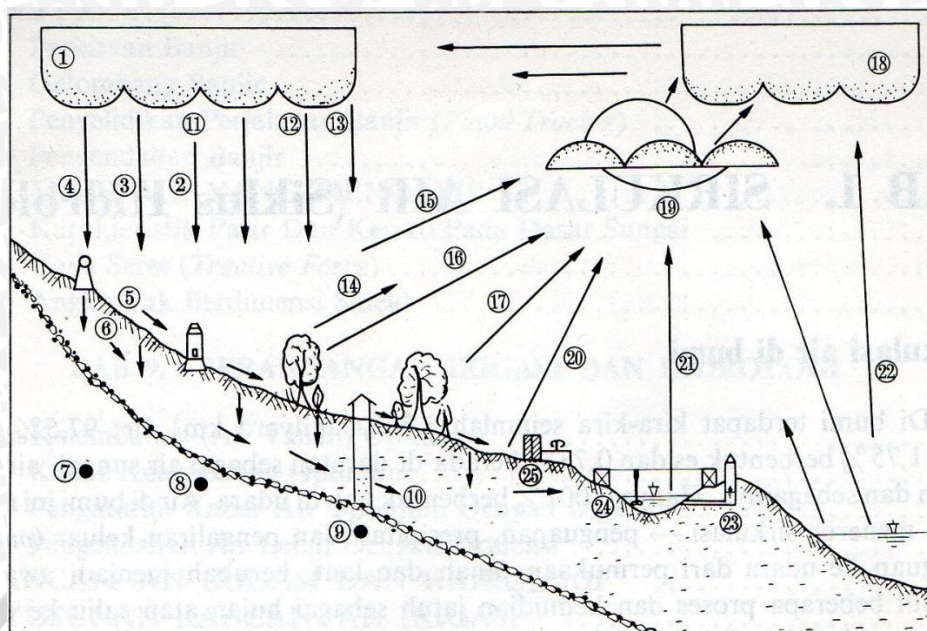
d. Tahap IV

Pada awal musim kering. Pada tahap ini hujan telah berhenti sama sekali dan prosesnya akan mirip dengan yang terjadi pada Tahap I, hal yang membedakan adalah DAS masih dalam keadaan basah. Bila kondisi ini berlangsung terus, maka prosesnya akan kembali seperti Tahap I.

2.6 Curah Hujan

Hujan terjadi karena penguapan air, terutama air dari permukaan laut yang naik ke atmosfer, mengalami proses pendinginan, kemudian menyuling dan jatuh sebagai hujan. Sebagian hujan jatuh di laut dan sebagian lagi jatuh ke daratan (Subarkah, 1980:8).

Gerakan air laut ke udara, yang kemudian jatuh ke permukaan tanah lagi sebagai hujan atau bentuk presipitasi yang lain, dan akhirnya mengalir ke laut kembali disebut daur hidrologi. Konsep hidrologi tersebut dapat digambarkan dengan skema berikut



- | | | |
|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 1. Awan dan uap air di udara | 10. Air tanah | 20. Evaporasi dari tanah |
| 2. Hujan | 11. Presipitasi | 21. Evaporasi dari sungai dan danau |
| 3. Hujan es | 12. Salju yang mencair | 22. Evaporasi dari laut |
| 4. Salju | 13. Ain-ain | 23. Pengamatan debit |
| 5. Impasan permukaan | 14. Intersepsi | 24. Pengamatan kualitas air |
| 6. Perkolasi | 15. Evaporasi | 25. Pengamatan evaporasi |
| 7. Alat ukur salju | 16. Evapotranspirasi | |
| 8. Alat ukur hujan | 17. Transpirasi | |
| 9. Sumur pengamatan | 18. Awan dan uap air | |
| | 19. Evaporasi | |

Gambar 2.3 Siklus Hidrologi
Sumber: Sosrodarsono (1987:2)

Untuk memperoleh besaran hujan yang kemudian dapat dianggap sebagai kedalaman hujan yang sebenarnya terjadi di seluruh daerah pengaliran sungai, maka diperlukan sejumlah stasiun penakar hujan yang dipasang sedemikian rupa sehingga diperoleh data yang dapat mewakili besaran hujan pada DAS yang bersangkutan.

a. Curah Hujan Harian Daerah

Besarnya curah hujan diukur dengan alat penakar hujan (*raingauge*). Dalam pemakaiannya terdapat dua jenis alat penakar hujan, yaitu:

1. Penakar hujan biasa (*manual raingauge*)
2. Penakar hujan otomatis (*automatic raingauge*)

Penakar hujan biasa terdiri dari corong dan bejana. Air hujan yang terkumpul di dalamnya diukur sekali atau dua kali dalam sehari. Untuk memperoleh data hujan jam-jaman, maka dapat dilakukan pengukuran dengan alat ukur hujan otomatis yang mampu merekam setiap kejadian selama jangka waktu tertentu.

Hujan yang diukur dengan alat penakar hujan adalah hujan setempat, yaitu hujan di tempat alat itu berada. Hasil pengukurannya tidak selalu memberikan gambaran sebenarnya mengenai hujannya sendiri karena tempat pengukuran belum tentu ada di pusat hujan yang diukur (Subarkah, 1980:17). Jumlah hujan yang terkumpul dalam satu hari disebut curah hujan harian daerah.

b. Curah Hujan Rerata Daerah

Pengukuran yang diperoleh dari masing masing pengukur hujan adalah data yang merupakan data curah hujan lokal (*point rainfall*). Sedangkan untuk keperluan analisa, yang diperlukan adalah data curah hujan rata rata daerah aliran (*areal rainfall*). Untuk menghitung besaran ini dapat ditempuh beberapa metoda berikut ini.

1. Metode Rata-Rata Aljabar

Cara perhitungan dengan metode rata rata aljabar (*mean arithmetic method*) ini merupakan cara yang paling sederhana tetapi memberikan hasil yang tidak teliti, karena setiap stasiun dianggap memiliki bobot yang sama. Metoda ini hanya dapat dipakai jika hujan yang terjadi dalam DAS bersifat homogen dan variasi tahunnya tidak terlalu besar. Tinggi rata rata curah hujan didapatkan dengan mengambil nilai rata rata hitung pengukuran hujan di stasiun penakar hujan dalam areal tersebut (Sosrodarsono, 2003:27).

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{n} \quad (2-1)$$

Dengan :

- R = tinggi curah hujan rata rata (mm)
- $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ = tinggi curah hujan pada masing masing stasiun (mm)
- n = banyaknya stasiun hujan

Cara ini akan memberikan hasil yang dapat dipercaya jika stasiun penakarnya ditempatkan secara merata di seluruh areal tersebut dan hasil pencatatan pada masing masing stasiun hujan menyimpang jauh dari nilai rata rata diseluruh stasiun hujan di areal atau DAS tersebut.

2. Metode Poligon Thiessen

Jika titik - titik pengamatan di dalam daerah itu tidak tersebar merata, maka perhitungan dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh tiap titik pengamatan. Cara ini memberikan bobot tertentu untuk setiap stasiun hujan dengan pengertian bahwa setiap stasiun hujan dianggap mewakili hujan dalam suatu daerah dengan luas tertentu, dan luas tersebut merupakan faktor koreksi (*weighing faktor*) bagi hujan di stasiun yang bersangkutan.

Masing masing penakar hujan mempunyai daerah pengaruh yang dibentuk dengan menggambarkan garis garis sumbu tegak lurus terhadap garis penghubung diantara dua buah pos penakar.

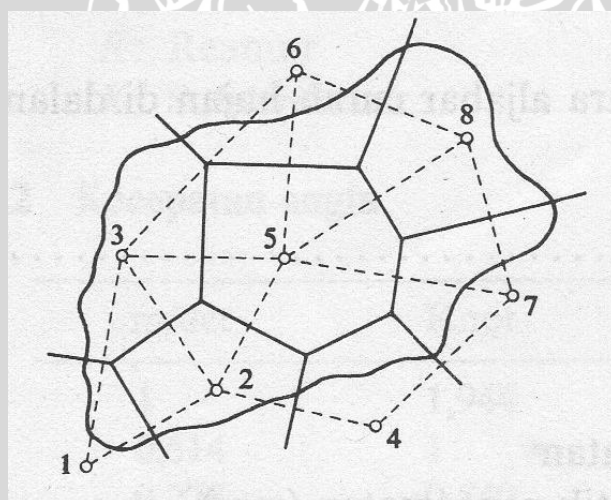
Cara ini dipandang cukup baik karena memberikan koreksi terhadap kedalaman hujan sebagai fungsi luas daerah yang dianggap mewakili. Perbandingan antara luas relatif masing masing daerah pengaruh dengan luas total DAS merupakan faktor koreksinya.

Adapun cara perhitungannya adalah menggunakan rumus sebagai berikut (Sosrodarsono, 1987:27) :

$$R = \frac{R_1 \cdot A_1 + R_2 \cdot A_2 + R_3 \cdot A_3 + \dots + R_n \cdot A_n}{\sum A} \quad (2-2)$$

Dengan :

- R = tinggi curah hujan rata rata DAS (mm)
- $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ = tinggi curah hujan pada masing masing stasiun (mm)
- $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ = luas daerah tiap tiap pengamatan (km^2)
- $\sum A$ = luas DAS total (km^2)



Gambar 2.4 Metode Poligon Thiesen
Sumber: sosrodarsono (1987:28)

3. Metoda Isohyet

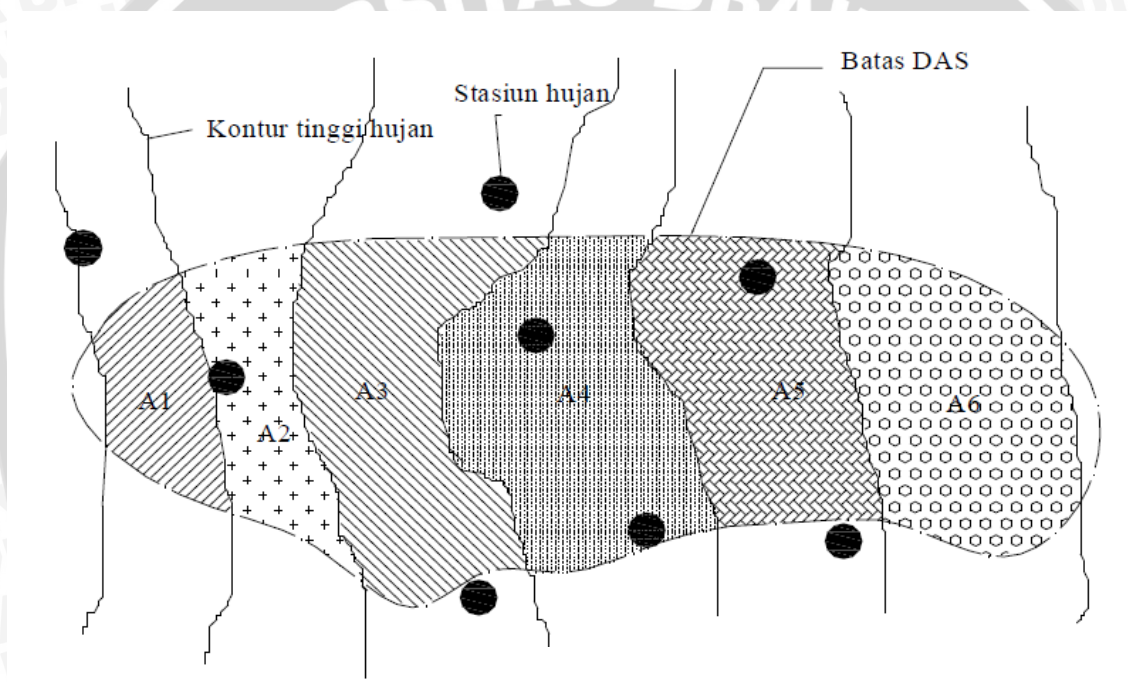
Isohyet adalah garis yang menghubungkan tempat dengan kontur tinggi hujan yang sama pada saat bersamaan. Pada dasarnya cara perhitungannya sama dengan yang digunakan pada metoda poligon thissen, kecuali penetapan besaran faktor koreksinya dan dibutuhkan jaringan penakar hujan yang lebih padat.

Hujan ditetapkan sebagai hujan rata rata antara dua isohyet. Faktor koreksi dihitung sebagai luas relatif bagian DAS yang dibatasi oleh isohyet atau dengan batas DAS terhadap luas DAS. Kesulitan yang dijumpai adalah dalam menggambarkan garis isohyet dan masuknya unsur subyektifitas dalam penggambaran ishyet, yaitu pengaruh bukit atau gunung terhadap distribusi hujan.

Pehitungan hujan rata rata daerah dapat dilakukan dengan persamaan berikut ini:

$$R = \frac{\left(\frac{R_0+R_1}{2}\right).A_1 + \left(\frac{R_1+R_2}{2}\right).A_2 + \dots + \left(\frac{R_{n-1}+R_n}{2}\right).A_n}{\sum A} \quad (2-3)$$

Ini adalah cara yang paling teliti untuk mendapatkan hujan areal rata rata, tetapi memerlukan jaringan pos penakar yang relatif lebih padat.

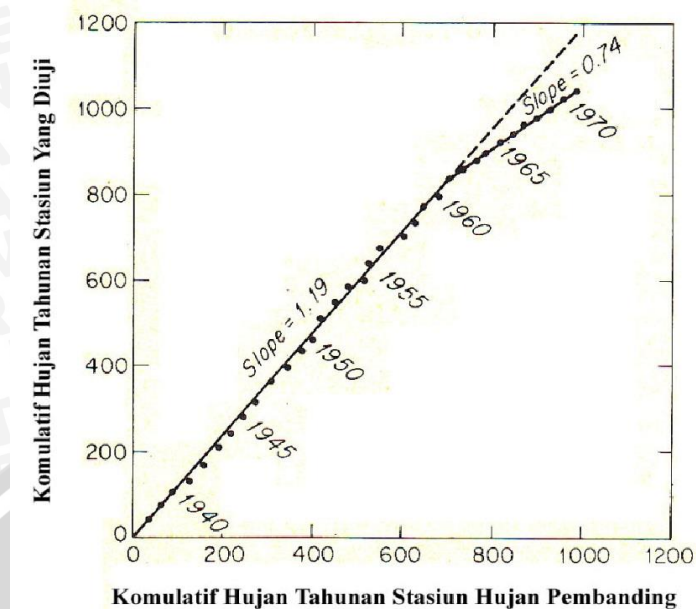


Gambar 2.5 Metode Poligon Isohyet
Sumber: Rahmadi (2013:10)

2.7 Pengujian Data Curah Hujan

a. Uji Konsistensi

Pengujian konsistensi dilakukan dengan menggunakan cara kurva massa ganda (*double mass curve*). Langkah pertama yaitu mengakumulasi curah hujan tahunan pada stasiun yang diuji, selanjutnya mengakumulasi curah hujan rerata dari stasiun di sekitarnya. Kemudian membandingkan harga pada suatu stasiun dengan harga pada stasiun sekitar dengan melakukan pengeplotan.



Gambar 2.6 Kurva Massa Ganda Uji Konsistensi
Sumber: Rahmadi (2013:10)

Dari gambar di atas nampak bahwa pada (x,y) mulai terjadi perubahan kemiringan. Untuk perbaikan kurva maka perlu dimasukkan faktor koreksi, sehingga kurva akan mempunyai kemiringan yang sama. Faktor koreksi tersebut adalah:

$$\tan \alpha = Y/X \quad (2-4)$$

$$\tan \alpha_0 = Y_0/X_0 \quad (2-5)$$

$$H_z = (\tan \alpha / \tan \alpha_0) \cdot H_0 \quad (2-6)$$

dengan:

H_z = Data hujan yang diperbaiki

H_0 = Data hujan hasil pengamatan

$\tan \alpha$ = Kemiringan sebelum ada perubahan

$\tan \alpha_0$ = Kemiringan setelah ada perubahan

Jika terdapat penyimpangan, maka perlu dilakukan perbaikan data berdasarkan koreksi yang didapat dari hasil pengeplotan di atas.

b. Uji Hipotesa Analisa Variansi (ANOVA)

Apabila sampel yang dibandingkan lebih dari dua sampel maka dapat menggunakan Analisa Variansi (*Analysis of Variance* atau disingkat ANOVA) (Montarcih, 2009:49). Pada Analisa Variansi, uji dilakukan sekaligus sehingga probabilitas Kesalahan Tipe I dibatasi seminimum mungkin. Kesalahan Tipe I adalah dimana H_0 ditolak pada saat hipotesa benar. Uji Analisa Variansi pada dasarnya adalah menghitung nilai F. Kemudian nilai F ini di bandingkan dengan nilai F kritis (F_{cr}) dari F

table. Adapun yang di uji adalah ketidaktergantungan (*Independence*) atau keseragaman (Homogenitas). Uji analisa Variansi dapat bersifat satu arah (*One way*) atau dua arah (*Two way*).

1. Uji analisa Variansi satu arah (*One way*)

Hipotesa : H_0 : homogen

H_1 : tidak homogen

Untuk menguji hipotesa di atas dihitung nilai F dengan rumus sebagai berikut:

$$F = \frac{(n-k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2}{(k-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2} \quad (2-7)$$

Dengan: $\bar{X}_i$ = harga rerata untuk kelas i

$\bar{X}$ = harga rerata keseluruhan

X_{ij} = pengamatan untuk kelas i pada tahun j

n_i = banyak pengamatan untuk kelas i

n = banyak pengamatan keseluruhan

k = banyak kelas

2. Uji analisa Variansi dua arah (*Two way*)

Hipotesa 1 : H_0 : homogen antar kelas

H_1 : tidak homogen antar kelas

Hipotesa2 : H_0 : homogen antar tahun

H_1 : tidak homogen antar tahun

Untuk menguji hipotesa di atas dihitung nilai F dengan rumus sebagai berikut:

$$F_1 = \frac{(n-1) \sum_{i=1}^k n (\bar{X}_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_j + \bar{X})^2} \quad (2-8)$$

$$F_2 = \frac{(k-1) \sum_{j=1}^n k (\bar{X}_j - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_j + \bar{X})^2} \quad (2-9)$$

Dengan: $\bar{X}_i$ = harga rerata untuk kelas i

$\bar{X}$ = harga rerata keseluruhan

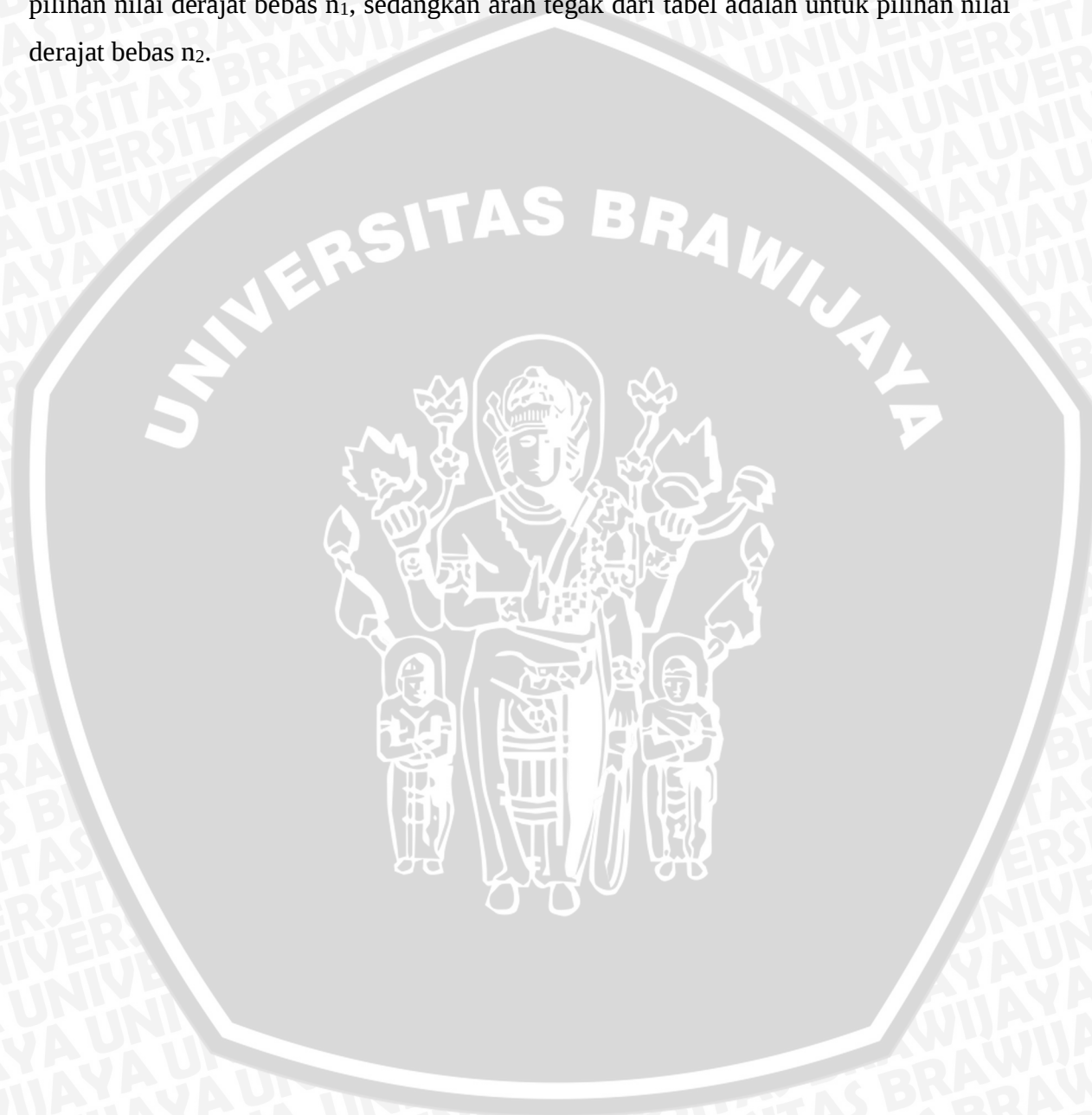
X_{ij} = pengamatan untuk kelas i pada tahun j

n_i = banyak pengamatan untuk kelas i

n = banyak pengamatan keseluruhan

k = banyak kelas

Besaran F berupa nisbah (*ratio*). Karena itu ada dua parameter derajat bebas yaitu n_1 (derajat bebas pembilang) dan n_2 (derajat bebas penyebut). Nilai F_{α} dapat diperoleh dari table F untuk berbagai nilai *level of significance* (α), dengan menggunakan kedua parameter derajat bebas n_1 dan n_2 tersebut. Berikut ini disajikan tabel F masing masing untuk $\alpha = 10\%$, $\alpha = 5\%$, $\alpha = 2,5\%$ dan $\alpha = 1\%$. Arah mendatar dari tabel adalah untuk pilihan nilai derajat bebas n_1 , sedangkan arah tegak dari tabel adalah untuk pilihan nilai derajat bebas n_2 .



Tabel 2.1 Nilai F untuk $\alpha = 10\%$

df ₂ /df ₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	INF
1	39.863	49.500	53.593	55.833	57.240	58.204	58.906	59.439	59.857	60.195	60.705	61.220	61.740	62.002	62.265	62.529	62.794	63.060	63.328
2	8.5263	9.0000	9.1618	9.2434	9.2926	9.3255	9.3491	9.3668	9.3805	9.3916	9.4081	9.4247	9.4413	9.4496	9.4579	9.4662	9.4746	9.4829	9.4912
3	5.5383	5.4624	5.3908	5.3426	5.3092	5.2847	5.2662	5.2517	5.2400	5.2304	5.2156	5.2003	5.1845	5.1764	5.1681	5.1597	5.1512	5.1425	5.1337
4	4.5448	4.3246	4.1909	4.1073	4.0506	4.0098	3.9790	3.9549	3.9357	3.9199	3.8955	3.8704	3.8443	3.8310	3.8174	3.8036	3.7896	3.7753	3.7607
5	4.0604	3.7797	3.6195	3.5202	3.4530	3.4045	3.3679	3.3393	3.3163	3.2974	3.2682	3.2380	3.2067	3.1905	3.1741	3.1573	3.1402	3.1228	3.1050
6	3.7760	3.4633	3.2888	3.1808	3.1075	3.0546	3.0145	2.9830	2.9577	2.9369	2.9047	2.8712	2.8363	2.8183	2.8000	2.7812	2.7620	2.7423	2.7222
7	3.5894	3.2574	3.0741	2.9605	2.8833	2.8274	2.7849	2.7516	2.7247	2.7025	2.6681	2.6322	2.5947	2.5753	2.5555	2.5351	2.5142	2.4928	2.4708
8	3.4579	3.1131	2.9238	2.8064	2.7265	2.6683	2.6241	2.5894	2.5612	2.5380	2.5020	2.4642	2.4246	2.4041	2.3830	2.3614	2.3391	2.3162	2.2926
9	3.3603	3.0065	2.8129	2.6927	2.6106	2.5509	2.5053	2.4694	2.4403	2.4163	2.3789	2.3396	2.2983	2.2768	2.2547	2.2320	2.2085	2.1843	2.1592
10	3.2850	2.9245	2.7277	2.6053	2.5216	2.4606	2.4140	2.3772	2.3473	2.3226	2.2841	2.2435	2.2007	2.1784	2.1554	2.1317	2.1072	2.0818	2.0554
11	3.2252	2.8595	2.6602	2.5362	2.4512	2.3891	2.3416	2.3040	2.2735	2.2482	2.2087	2.1671	2.1231	2.1000	2.0762	2.0516	2.0261	1.9997	1.9721
12	3.1766	2.8068	2.6055	2.4801	2.3940	2.3310	2.2828	2.2446	2.2135	2.1878	2.1474	2.1049	2.0597	2.0360	2.0115	1.9861	1.9597	1.9323	1.9036
13	3.1362	2.7632	2.5603	2.4337	2.3467	2.2830	2.2341	2.1954	2.1638	2.1376	2.0966	2.0532	2.0070	1.9827	1.9576	1.9315	1.9043	1.8759	1.8462
14	3.1022	2.7265	2.5222	2.3947	2.3069	2.2426	2.1931	2.1539	2.1220	2.0954	2.0537	2.0095	1.9625	1.9377	1.9119	1.8852	1.8572	1.8280	1.7973
15	3.0732	2.6952	2.4898	2.3614	2.2730	2.2081	2.1582	2.1185	2.0862	2.0593	2.0171	1.9722	1.9243	1.8990	1.8728	1.8454	1.8168	1.7867	1.7551
16	3.0481	2.6682	2.4618	2.3327	2.2438	2.1783	2.1280	2.0880	2.0553	2.0282	1.9854	1.9399	1.8913	1.8656	1.8388	1.8108	1.7816	1.7508	1.7182
17	3.0262	2.6446	2.4374	2.3078	2.2183	2.1524	2.1017	2.0613	2.0284	2.0009	1.9577	1.9117	1.8624	1.8362	1.8090	1.7805	1.7506	1.7191	1.6856
18	3.0070	2.6240	2.4160	2.2858	2.1958	2.1296	2.0785	2.0379	2.0047	1.9770	1.9333	1.8868	1.8369	1.8104	1.7827	1.7537	1.7232	1.6910	1.6567
19	2.9899	2.6056	2.3970	2.2663	2.1760	2.1094	2.0580	2.0171	1.9836	1.9557	1.9117	1.8647	1.8142	1.7873	1.7592	1.7298	1.6988	1.6659	1.6308
20	2.9747	2.5893	2.3801	2.2489	2.1582	2.0913	2.0397	1.9985	1.9649	1.9367	1.8924	1.8449	1.7938	1.7667	1.7382	1.7083	1.6768	1.6433	1.6074
21	2.9610	2.5746	2.3649	2.2333	2.1423	2.0751	2.0233	1.9819	1.9480	1.9197	1.8750	1.8272	1.7756	1.7481	1.7193	1.6890	1.6569	1.6228	1.5862
22	2.9486	2.5613	2.3512	2.2193	2.1279	2.0605	2.0084	1.9668	1.9327	1.9043	1.8593	1.8111	1.7590	1.7312	1.7021	1.6714	1.6389	1.6042	1.5668
23	2.9374	2.5493	2.3387	2.2065	2.1149	2.0472	1.9949	1.9531	1.9189	1.8903	1.8450	1.7964	1.7439	1.7159	1.6864	1.6554	1.6224	1.5871	1.5490
24	2.9271	2.5383	2.3274	2.1949	2.1030	2.0351	1.9826	1.9407	1.9063	1.8775	1.8319	1.7831	1.7302	1.7019	1.6721	1.6407	1.6073	1.5715	1.5327
25	2.9177	2.5283	2.3170	2.1842	2.0922	2.0241	1.9714	1.9293	1.8947	1.8658	1.8200	1.7708	1.7175	1.6890	1.6590	1.6272	1.5934	1.5570	1.5176
26	2.9091	2.5191	2.3075	2.1745	2.0822	2.0139	1.9610	1.9188	1.8841	1.8550	1.8090	1.7596	1.7059	1.6771	1.6468	1.6147	1.5805	1.5437	1.5036

df_2/df_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	INF
27	2.9012	2.5106	2.2987	2.1655	2.0730	2.0045	1.9515	1.9091	1.8743	1.8451	1.7989	1.7492	1.6951	1.6662	1.6356	1.6032	1.5686	1.5313	1.4906
28	2.8939	2.5028	2.2906	2.1571	2.0645	1.9959	1.9427	1.9001	1.8652	1.8359	1.7895	1.7395	1.6852	1.6560	1.6252	1.5925	1.5575	1.5198	1.4784
29	2.8870	2.4955	2.2831	2.1494	2.0566	1.9878	1.9345	1.8918	1.8568	1.8274	1.7808	1.7306	1.6759	1.6466	1.6155	1.5825	1.5472	1.5090	1.4670
30	2.8807	2.4887	2.2761	2.1422	2.0493	1.9803	1.9269	1.8841	1.8490	1.8195	1.7727	1.7223	1.6673	1.6377	1.6065	1.5732	1.5376	1.4989	1.4564
40	2.8354	2.4404	2.2261	2.0910	1.9968	1.9269	1.8725	1.8289	1.7929	1.7627	1.7146	1.6624	1.6052	1.5741	1.5411	1.5056	1.4672	1.4248	1.3769
60	2.7911	2.3933	2.1774	2.0410	1.9457	1.8747	1.8194	1.7748	1.7380	1.7070	1.6574	1.6034	1.5435	1.5107	1.4755	1.4373	1.3952	1.3476	1.2915
120	2.7478	2.3473	2.1300	1.9923	1.8959	1.8238	1.7675	1.7220	1.6843	1.6524	1.6012	1.5450	1.4821	1.4472	1.4094	1.3676	1.3203	1.2646	1.1926
inf	2.7055	2.3026	2.0838	1.9449	1.8473	1.7741	1.7167	1.6702	1.6315	1.5987	1.5458	1.4871	1.4206	1.3832	1.3419	1.2951	1.2400	1.1686	1.0000

Tabel 2.2 Nilai F untuk $\alpha = 5\%$

df_2/df_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	INF
1	161.44	199.50	215.70	224.58	230.16	233.98	236.76	238.88	240.54	241.88	243.90	245.94	248.01	249.05	250.09	251.14	252.19	253.25	254.31
2	18.512	19.000	19.164	19.246	19.296	19.329	19.353	19.371	19.384	19.395	19.412	19.429	19.445	19.454	19.462	19.470	19.479	19.487	19.495
3	10.128	9.552	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5494	8.5264
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6877	5.6581	5.6281
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3985	4.3650
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6689
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	3.5107	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2839	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3392	2.2966	2.2524	2.2064
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3082	2.2664	2.2229	2.1778	2.1307
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	2.4034	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0658
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096

df ₂ /df ₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	INF
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0584	2.0107	1.9604
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9795	1.9302	1.8780
20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432
21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8894	1.8380	1.7831
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8648	1.8128	1.7570
24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7896	1.7330
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7306	1.6717
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6376
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3893
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
inf	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0000

Tabel 2.3 Nilai F untuk $\alpha = 2,5\%$

df ₂ /df ₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	INF
1	647.78	799.50	864.16	899.58	921.84	937.11	948.21	956.65	963.28	968.62	976.70	984.86	993.10	997.24	1001.41	1005.59	1009.80	1014.02	1018.25
2	38.506	39.000	39.166	39.248	39.298	39.332	39.355	39.373	39.387	39.398	39.415	39.431	39.448	39.456	39.465	39.473	39.481	39.490	39.498
3	17.443	16.044	15.439	15.101	14.885	14.735	14.624	14.540	14.473	14.419	14.337	14.253	14.167	14.124	14.081	14.037	13.992	13.947	13.902
4	12.218	10.649	9.979	9.605	9.365	9.197	9.074	8.980	8.905	8.844	8.751	8.657	8.560	8.511	8.461	8.411	8.360	8.309	8.257
5	10.007	8.434	7.764	7.388	7.146	6.978	6.853	6.757	6.681	6.619	6.525	6.428	6.329	6.278	6.227	6.175	6.123	6.069	6.015
6	8.813	7.260	6.599	6.227	5.988	5.820	5.696	5.600	5.523	5.461	5.366	5.269	5.168	5.117	5.065	5.012	4.959	4.904	4.849
7	8.073	6.542	5.890	5.523	5.285	5.119	4.995	4.899	4.823	4.761	4.666	4.568	4.467	4.415	4.362	4.309	4.254	4.199	4.142
8	7.571	6.060	5.416	5.053	4.817	4.652	4.529	4.433	4.357	4.295	4.200	4.101	4.000	3.947	3.894	3.840	3.784	3.728	3.670
9	7.209	5.715	5.078	4.718	4.484	4.320	4.197	4.102	4.026	3.964	3.868	3.769	3.667	3.614	3.560	3.505	3.449	3.392	3.333
10	6.937	5.456	4.826	4.468	4.236	4.072	3.950	3.855	3.779	3.717	3.621	3.522	3.419	3.365	3.311	3.255	3.198	3.140	3.080
11	6.724	5.256	4.630	4.275	4.044	3.881	3.759	3.664	3.588	3.526	3.430	3.330	3.226	3.173	3.118	3.061	3.004	2.944	2.883
12	6.554	5.096	4.474	4.121	3.891	3.728	3.607	3.512	3.436	3.374	3.277	3.177	3.073	3.019	2.963	2.906	2.848	2.787	2.725
13	6.414	4.965	4.347	3.996	3.767	3.604	3.483	3.388	3.312	3.250	3.153	3.053	2.948	2.893	2.837	2.780	2.720	2.659	2.595
14	6.298	4.857	4.242	3.892	3.663	3.501	3.380	3.285	3.209	3.147	3.050	2.949	2.844	2.789	2.732	2.674	2.614	2.552	2.487
15	6.200	4.765	4.153	3.804	3.576	3.415	3.293	3.199	3.123	3.060	2.963	2.862	2.756	2.701	2.644	2.585	2.524	2.461	2.395
16	6.115	4.687	4.077	3.729	3.502	3.341	3.219	3.125	3.049	2.986	2.889	2.788	2.681	2.625	2.568	2.509	2.447	2.383	2.316
17	6.042	4.619	4.011	3.665	3.438	3.277	3.156	3.061	2.985	2.922	2.825	2.723	2.616	2.560	2.502	2.442	2.380	2.315	2.247
18	5.978	4.560	3.954	3.608	3.382	3.221	3.100	3.005	2.929	2.866	2.769	2.667	2.559	2.503	2.445	2.384	2.321	2.256	2.187
19	5.922	4.508	3.903	3.559	3.333	3.172	3.051	2.956	2.880	2.817	2.720	2.617	2.509	2.452	2.394	2.333	2.270	2.203	2.133
20	5.872	4.461	3.859	3.515	3.289	3.128	3.007	2.913	2.837	2.774	2.676	2.573	2.465	2.408	2.349	2.287	2.223	2.156	2.085
21	5.827	4.420	3.819	3.475	3.250	3.090	2.969	2.874	2.798	2.735	2.637	2.534	2.425	2.368	2.308	2.246	2.182	2.114	2.042
22	5.786	4.383	3.783	3.440	3.215	3.055	2.934	2.839	2.763	2.700	2.602	2.498	2.389	2.332	2.272	2.210	2.145	2.076	2.003
23	5.750	4.349	3.751	3.408	3.184	3.023	2.902	2.808	2.731	2.668	2.570	2.467	2.357	2.299	2.239	2.176	2.111	2.041	1.968
24	5.717	4.319	3.721	3.379	3.155	2.995	2.874	2.779	2.703	2.640	2.541	2.437	2.327	2.269	2.209	2.146	2.080	2.010	1.935
25	5.686	4.291	3.694	3.353	3.129	2.969	2.848	2.753	2.677	2.614	2.515	2.411	2.301	2.242	2.182	2.118	2.052	1.981	1.906
26	5.659	4.266	3.670	3.329	3.105	2.945	2.824	2.729	2.653	2.590	2.491	2.387	2.276	2.217	2.157	2.093	2.026	1.954	1.878
27	5.633	4.242	3.647	3.307	3.083	2.923	2.802	2.707	2.631	2.568	2.469	2.364	2.253	2.195	2.133	2.069	2.002	1.930	1.853
28	5.610	4.221	3.626	3.286	3.063	2.903	2.782	2.687	2.611	2.547	2.448	2.344	2.232	2.174	2.112	2.048	1.980	1.907	1.829
29	5.588	4.201	3.607	3.267	3.044	2.884	2.763	2.669	2.592	2.529	2.430	2.325	2.213	2.154	2.092	2.028	1.959	1.886	1.807
30	5.568	4.182	3.589	3.250	3.027	2.867	2.746	2.651	2.575	2.511	2.412	2.307	2.195	2.136	2.074	2.009	1.940	1.866	1.787
40	5.424	4.051	3.463	3.126	2.904	2.744	2.624	2.529	2.452	2.388	2.288	2.182	2.068	2.007	1.943	1.875	1.803	1.724	1.637
60	5.286	3.925	3.343	3.008	2.786	2.627	2.507	2.412	2.334	2.270	2.169	2.061	1.945	1.882	1.815	1.744	1.667	1.581	1.482
120	5.152	3.805	3.227	2.894	2.674	2.515	2.395	2.299	2.222	2.157	2.055	1.945	1.825	1.760	1.690	1.614	1.530	1.433	1.310
inf	5.024	3.689	3.116	2.786	2.567	2.408	2.288	2.192	2.114	2.048	1.945	1.833	1.709	1.640	1.566	1.484	1.388	1.268	1.000

Tabel 2.4 Nilai F untuk $\alpha = 1\%$

df ₂ /df ₁	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	30	60	INF
1	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6083	6107	6126	6143	6157	6170	6181	6191	6201	6209	6260	6313	6366
2	98,50	99,00	99,16	99,25	99,30	99,33	99,36	99,38	99,39	99,40	99,41	99,42	99,42	99,43	99,43	99,44	99,44	99,44	99,45	99,45	99,47	99,48	99,50
3	34,12	30,82	29,46	28,71	28,24	27,91	27,67	27,49	27,34	27,23	27,13	27,03	26,98	26,92	26,87	26,83	26,79	26,75	26,72	26,69	26,50	26,32	26,10
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,98	14,80	14,66	14,55	14,45	14,37	14,31	14,25	14,20	14,15	14,11	14,08	14,05	14,02	13,84	13,65	13,50
5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,46	10,29	19,16	10,05	9,96	9,89	9,82	9,77	9,72	9,68	9,64	9,61	9,58	9,55	9,38	9,20	9,00
6	13,75	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,79	7,72	7,66	7,60	7,56	7,52	7,48	7,45	7,42	7,40	7,23	7,06	6,90
7	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,99	6,84	6,72	6,62	6,54	6,47	6,41	6,36	6,31	6,28	6,24	6,21	6,18	6,16	5,99	5,82	5,60
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,90	5,81	5,73	5,67	5,61	5,56	5,52	5,48	5,44	5,41	5,38	5,36	5,20	5,03	4,90
9	10,56	8,02	6,99	6,42	6,66	5,80	5,61	5,47	5,35	5,26	5,18	5,11	5,05	5,01	4,96	4,92	4,89	4,86	4,83	4,81	4,60	4,48	4,30
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06	4,94	4,85	4,77	4,71	4,65	4,60	4,56	4,52	4,49	4,46	4,43	4,41	4,25	4,08	3,90
11	9,65	7,21	6,22	5,67	5,32	5,07	4,89	4,74	4,63	4,54	4,46	4,40	4,34	4,29	4,25	4,21	4,18	4,15	4,12	4,10	3,94	3,78	3,60
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,64	4,50	4,39	4,30	4,22	4,16	4,10	4,05	4,01	3,97	3,94	3,91	3,88	3,86	3,70	3,54	3,40
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	4,46	3,37	3,29	3,23	3,18	3,13	3,09	3,05	3,02	2,99	2,98	2,94	2,78	2,61	2,40
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,07	2,98	2,91	2,84	2,79	2,74	2,70	2,66	2,63	2,60	2,57	2,55	2,39	2,21	2,00
60	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82	2,72	2,63	2,56	2,50	2,50	2,39	2,35	2,31	2,28	2,25	2,22	2,30	2,03	1,84	1,60
INF	6,63	4,61	3,78	3,33	3,02	2,80	2,64	2,51	2,41	2,32	2,25	2,18	2,18	2,08	2,04	2,00	1,97	1,93	1,90	1,88	1,70	1,47	1,00

2.8 Perhitungan Evapotranspirasi

Peristiwa berubahnya uap air dan bergerak dari permukaan tanah dan permukaan air ke udara disebut evaporasi. Evaporasi merupakan faktor penting dalam studi tentang pengembangan sumber daya air. Penguapan dari tanaman disebut transpirasi. Bila keduanya terjadi bersama-sama pada lokasi yang sama disebut evapotranspirasi.

Faktor-faktor yang mempengaruhi evaporasi dan evapotranspirasi adalah suhu air, suhu udara, kelembaban, kecepatan angin, tekanan udara, sinar matahari dan lain-lain (Sosrodarsono, 2003:57). Perhitungan evapotranspirasi dikenal dengan dua istilah, yaitu:

1. Evapotranspirasi Potensial : Evapotranspirasi yang terjadi pada kondisi air selalu tersedia cukup atau berlebihan, baik alami maupun buatan.
2. Evapotranspirasi Sebenarnya (Aktual) : Evapotranspirasi pada kondisi faktor air yang tersedia semata-mata menurut keadaan alam.

Besarnya evaporasi dapat diperkirakan dengan:

- a. Cara Budget Air atau Pendekatan dengan Persamaan Penampungan (*Storage Equation Approach*)

Dalam cara ini dimasukkan neraca (*balance*) antara semua air yang masuk dan keluar dari suatu daerah pengaliran tertentu. Besar evapotranspirasi pada umumnya dapat ditulis dengan persamaan penampungan:

$$E = P + I \pm U - O \pm \Delta S \quad (2-10)$$

dengan:

E = Evapotranspirasi

P = Curah hujan

I = Aliran permukaan yang memasuki daerah pengaliran

U = Aliran bawah tanah yang masuk ke atau keluar dari daerah pengaliran

O = Aliran Permukaan yang keluar dari daerah pengaliran

ΔS = Perubahan penampungan, diatas maupun di bawah permukaan tanah

- b. Cara Budget Energi

Cara ini menggunakan pemecahan dengan memasukkan semua sumber-sumber dan kehilangan-kehilangan energy termal serta membiarkan evaporasi sebagai satu-satunya variable yang harus dicari. Tanpa tersedia data yang banyak cara ini tidak dapat langsung dipakai, sehingga saat ini cara ini masih harus dikembangkan.

c. Rumus-rumus Empiris

Rumus-rumus empiris didasarkan atas korelasi antara evaporasi yang terukur dengan meteorologi yang mempengaruhinya. Pada umumnya digunakan rumus-rumus sebagai berikut (Soemarto, 1999):

1. Penman
2. Thornthwaite
3. Turc-Langbein-Wundt
4. Blaney-Criddle

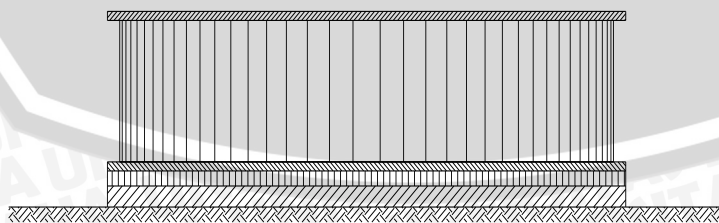
Untuk kepentingan-kepentingan praktis, sering dipandang perlu untuk memperoleh besaran penguapan secara lebih cepat, sehingga dapat dilakukan pengukuran langsung di lapangan dengan alat ukur yang dewasa ini sering digunakan antara lain: (Harto, 1993:81):

a. Atmometer

Atmometer pada dasarnya merupakan alat yang terdiri dari bejana poros berisi air, dimana air yang merembes ke permukaan akan menguap. Jumlah pembacaan air sebelum dan sesudah percobaan menunjukkan laju penguapan dalam jangka waktu tertentu, misalnya 24 jam. Bila memperhatikan sifat penguapannya, atmometer ini lebih memberikan besaran transpirasi daripada penguapan dari permukaan air bebas.

b. Panci Penguapan

Panci penguapan dapat digunakan sebarang bejana untuk mengukur besarnya penguapan muka air. Alat ukur yang banyak digunakan dan telah direkomendasikan oleh WMO (*World Meteorological Organisation*) dan IASH (*International Association of Scientific Hydrology*) sebagai panci referensi adalah Panci Penguapan Kelas A. Dalam kajian ini perhitungan evapotranspirasi didasarkan atas pembacaan data panci evaporasi.



Gambar 2.7 Panci Penguapan Kelas A

Sumber: Rahmadi (2013:21)

Besar penguapan yang diperoleh dengan panci penguapan jenis ini selalu lebih besar daripada yang sebenarnya, sehingga hasil pengukuran dengan panci ini masih perlu dikoreksi dengan koefisien panci (*Pan Coefficient*).

c. Evaporigraf/Evaporimeter

Yaitu alat pengukur penguapan yang mampu merekam setiap perubahan laju penguapan setiap saat, sehingga dapat diketahui agihan waktunya (*temporal distribution*) misalnya jam-jaman.

2.9 Simulasi Debit Sungai dengan Metode Model Tangki (*Tank Model*)

Pemilihan dasar metode model tangki adalah untuk meniru (*simulate*) Daerah Pengaliran Sungai dengan menggantikannya oleh sejumlah tampungan yang digambarkan sebagai sederet tangki (Soemarto, 1999:283).

2.9.1 Keuntungan dan Kerugian Penerapan Model Tangki

➤ Keuntungan dari penerapan model tangki adalah sebagai berikut:

1. Metode ini meninjau kehilangan mula, curah hujan, curah hujan dan hubungannya dengan distribusi waktu curah hujan.
2. Metode ini meninjau adanya non-linearitas dari limpasan.
3. Debit yang dihitung dengan metode ini terdiri atas komponen-komponen, misalnya limpasan permukaan limpasan air tanah tahap satu, limpasan air tanah tahap dua dan seterusnya.
4. Pemindahan tampungan tangki yang lebih atas ke tangki yang lebih bawah memberikan penundaan waktu (*time lag*) limpasan secara otomatis.
5. Metode ini mempunyai karakteristik umum dengan metode perhitungan limpasan yang lain, seperti cara hidroraf satuan, metode fungsi tampungan (*storage function* oleh KIMURA) dan metode fungsi limpasan (*run off function method*).
6. Dalam pelaksanaan perhitungan hanyalah dengan melakukan perkalian, penjumlahan dan pengurangan

➤ Kerugian dari penerapan model tangki adalah sebagai berikut:

1. Metode ini bersifat non-linier, sehingga tidak mungkin untuk mendapatkan koefisien-koefisien secara matematik. Cara mendapatkannya dilakukan dengan cara coba-coba, sehingga menyita banyak waktu.
2. Model ini mempunyai terlalu banyak koefisien

2.9.2 Optimasi dengan Metode Algoritma Genetika

Algoritma Genetik (AG) merupakan salah satu metode dari metode kelompok simulasi untuk optimasi. Prosedur jenis ini cenderung efektif terutama dalam mengeksplorasi berbagai bagian-bagian wilayah yang layak (feasible) dan secara gradual bergerak menuju solusi-solusi layak yang terbaik. Prosedur AG ini belakangan sangat populer dalam menyelesaikan problem-problem optimasi dengan tingkat kesulitan yang tinggi (soetopo, 2012:86).

Model optimasi AG adalah proses optimasi yang secara iteratif mengembangkan suatu populasi daripada kromosom-kromosom (alternatif solusi) sehingga tercapailah suatu populasi homogen daripada kromosom yang terbaik. Secara garis besar maka proses pengembangan populasi kromosom dengan cara AG terdiri dari 3 komponen berikut ini:

1. Reproduksi
2. Crossover
3. Mutasi

Berikut ini merupakan prosedur umum kinerja Algoritma Genetik:

```

Inisialisasi populasi awal,  $N$  kromosom
Loop untuk  $N$  generasi

    Loop untuk  $N$  kromosom
        Evaluasi kromosom
    End
    Linear fitness ranking
    Loop sampai didapat  $N$  kromosom baru
        Seleksi kromosom
        Pindah Silang
    End
        Mutasi
        Pergantian generasi
End
  
```

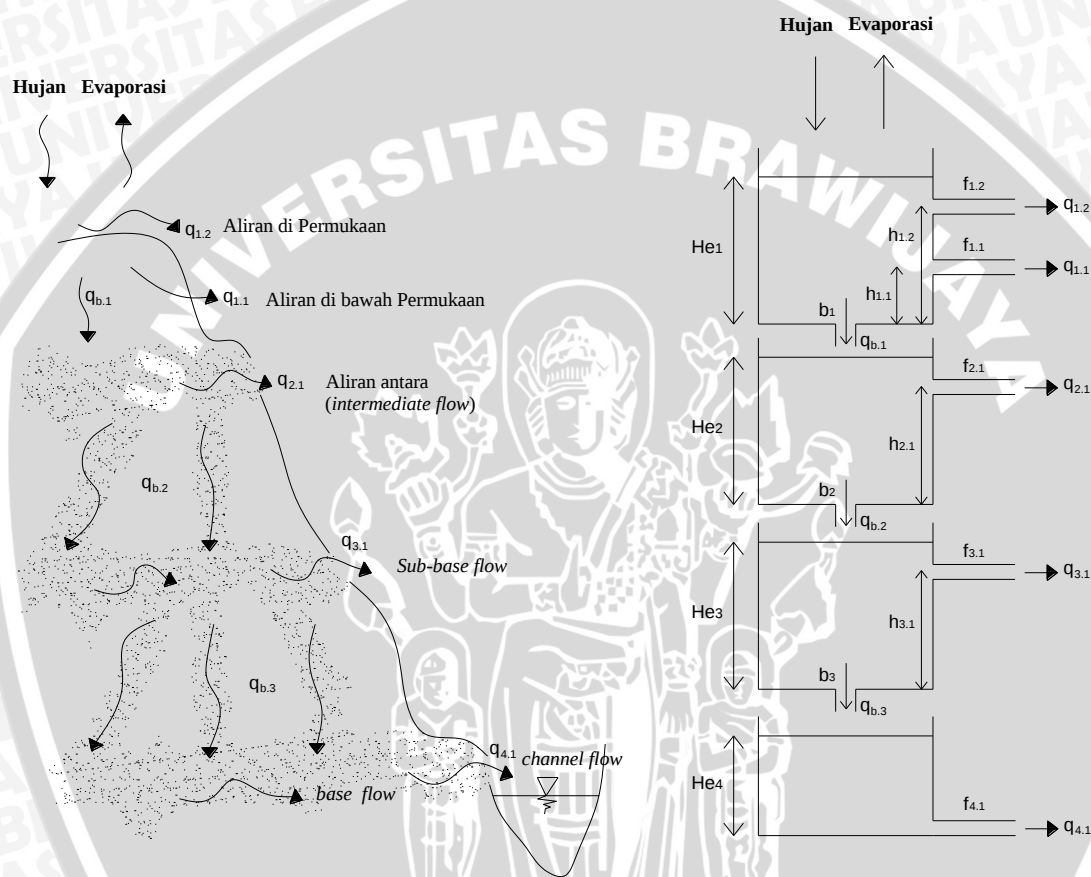
Gambar 2.8 Prosedur umum Algoritma Genetik

2.9.3 Konsep Model Tangki Sugawara

Curah hujan yang jatuh pada suatu waktu $R(t)$ akan mengisi tangki teratas (tangki 1). Air yang tertampung oleh tangki 1 mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat lubang dasar tangki dan masuk mengisi tangki 2. Air yang tertampung di dalam tangki 2 mengalir lewat lubang di dinding kanan atau merembes melalui lubang dasar tangki dan masuk tangki 3 dalam tahap ke-tiga. Air yang tertampung

di dalam tangki 3 mengalir lewat lubang di dinding kanan atau merembes melalui lubang dasar tangki dan masuk tangki 4 dalam tahap ke-empat.

Dengan melihat tangki-tangki dalam model dan membandingkan dengan komponen-komponen limpasan, maka tangki 1 merupakan aliran permukaan (*surface flow*) dan *sub-surface flow*, tangki 2 merupakan aliran antara (*intermediate flow*), tangki 3 merupakan aliran sub-dasar (*sub-base flow*) tangki 4 merupakan aliran dasar (*base flow*) seperti tercantum pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Bagan Pengaliran Sungai dan Pemodelan Tangki Susunan Seri
Sumber: setiawan (2003:2)

Suatu tangki bisa mempunyai outlet samping yang merupakan limpasan permukaan (*run off*), outlet bawah yang merupakan infiltrasi dan komponen tampungan itu sendiri. Tangki ini memodelkan proses limpasan permukaan daripada sebagian ataupun seluruh daerah tangkapan. Komponen satu tangki dari model tangki dapat dilihat pada gambar 2.9.

Parameter yang standar dari model tangki Sugawara antara lain terdiri dari:

1. Angka simpanan awal dari tiap tangki (He_i)
2. Faktor pengali atau koefisien dari lubang keluaran samping (f_i) dan bawah (b_i)
3. Tinggi lubang keluaran samping (h_i)

Per debit yang keluar dari masing-masing outlet adalah:

1. Tangki I :

$$q_{1.2(t)} = f_{1.2} \times (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)} - h_{1.2}) \dots\dots\dots (2-11)$$

$$q_{1.1(t)} = f_{1.1} \times (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)} - h_{1.1}) \dots\dots\dots (2-12)$$

$$qb_{1(t)} = b_1 \times (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)}) \dots\dots\dots (2-13)$$

$$He_{1(t)} = (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)}) - q_{1.2(t)} - q_{1.1(t)} - qb_{1(t)} \dots\dots\dots (2-14)$$

2. Tangki II

$$q_{2.1(t)} = f_{2.1} \times (He_{2(t-1)} + qb_{1(t)} - h_{2.1}) \dots\dots\dots (2-15)$$

$$qb_{2(t)} = b_2 \times (He_{2(t-1)} + qb_{1(t)}) \dots\dots\dots (2-16)$$

$$He_{2(t)} = (He_{2(t-1)} + qb_{1(t)}) - q_{2.1(t)} - qb_{2(t)} \dots\dots\dots (2-17)$$

3. Tangki III :

$$q_{3.1(t)} = f_{3.1} \times (He_{3(t-1)} + qb_{2(t)} - h_{3.1}) \dots\dots\dots (2-18)$$

$$qb_{3(t)} = b_3 \times (He_{3(t-1)} + qb_{2(t)}) \dots\dots\dots (2-19)$$

$$He_{3(t)} = (He_{3(t-1)} + qb_{2(t)}) - q_{3.1(t)} - qb_{3(t)} \dots\dots\dots (2-20)$$

4. Tangki IV :

$$q_{4.1(t)} = f_{4.1} \times (He_{4(t-1)} + qb_{3(t)}) \dots\dots\dots (2-21)$$

$$He_{4(t)} = (He_{4(t-1)} + qb_{3(t)}) - q_{4.1(t)} \dots\dots\dots (2-22)$$

$$Q = \sum q_i \dots\dots\dots (2-23)$$

dengan: q_i = debit yang keluar dari lubang samping i (mm/hr)

qb_i = debit yang keluar dari lubang bawah i (mm/hr)

h_i = tinggi muka air dari lubang i (mm)

He_i = tinggi air simpanan awal dari tangki i (mm)

f_i = koefisien lubang samping i (hari⁻¹)

b_i = koefisien lubang bawah i (hari⁻¹)

Q = debit yang keluar dari lubang i (m³/dtk)

A = Luas DAS (km²)