

III. STRATEGI PENELITIAN

3.1. METODE UJI KELAYAKAN

Metode kelayakan dilakukan dengan cara membandingkan gradien garis regresi hasil perhitungan CN di lapangan berdasarkan model infiltrasi Horton dengan nomogram standar di *National Engineering Handbook – NEH: Section 4*. Kondisi khusus yang perlu diketahui adalah hubungan antara abstraksi inisial adalah 20 persen tampungan (*storage*) dari persamaan 1.3 dan persamaan limpasan 2.4.

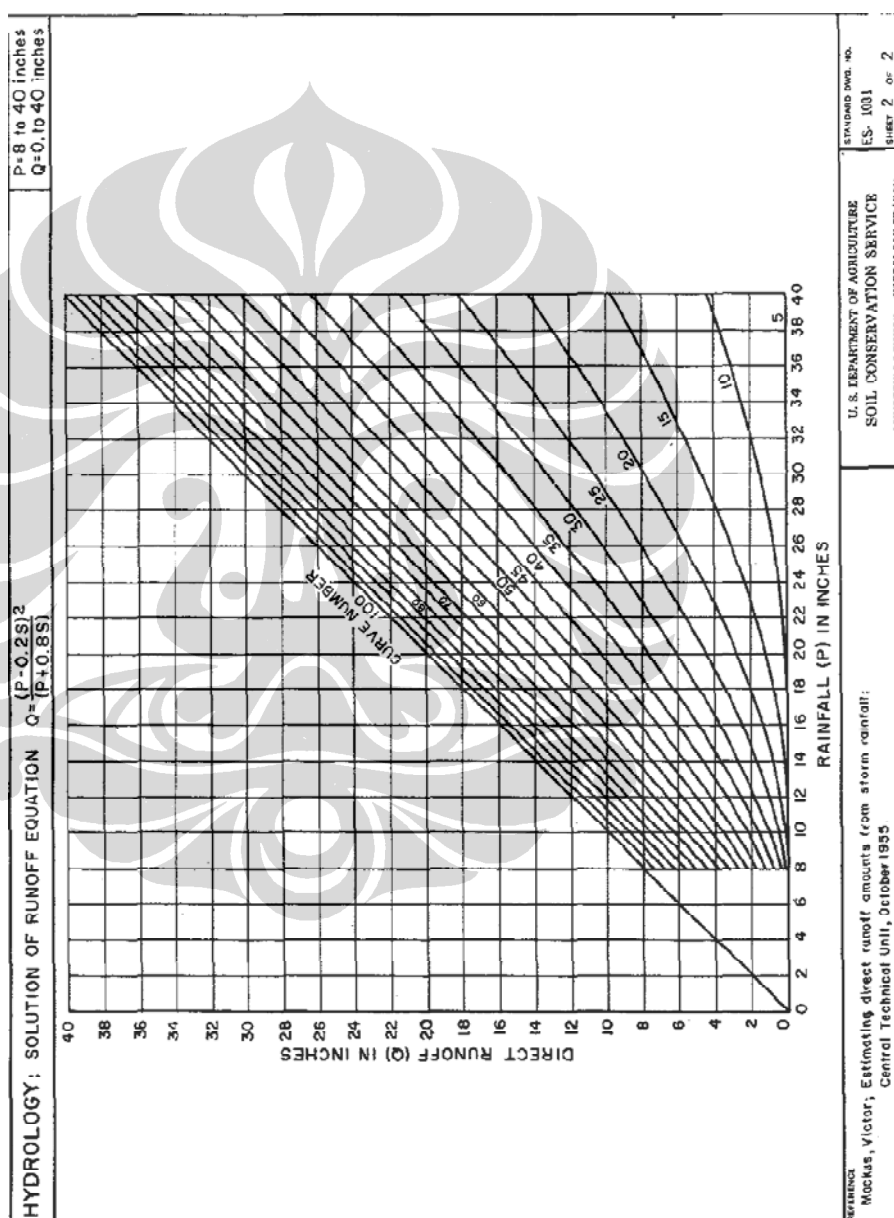
Potensial retensi maximum dipengaruhi oleh jenis tanah dan karakteristik penutup tanah pada DAS yang ditunjukkan oleh nilai CN. Rentang nilai CN antara 0 – 100, dan hubungan antara potensial maximum retensi dengan CN adalah seperti persamaan sebagai berikut 1.1. dan 1.2.

Grafik di bawah hanya berlaku jika $I_a = 0,2S$ dan tinggi hujan tertentu yaitu 0 – 40 in. Sampai tahap ini, nilai S belum dapat ditentukan dan harus ditentukan dari karakteristik penutup tanahnya (*soil-cover complex*). Karakteristik tanah itu sendiri diklasifikasikan seperti pada tabel 3.1 di bawah ini.

Tabel 3.1. Klasifikasi Jenis Tanah

Grup	Laju Infiltrasi Minimum (in/jam)	Jenis Tanah
A	0,30 - 0,45 (0,762 – 1,143 cm/jam)	<i>Deep sand, deep losses, aggregated silts</i>
B	0,15 – 0,30 (0,381 – 0,762 cm/jam)	<i>Shallow losses, sandy loam</i>
C	0,05 – 0,15 (0,127 – 0,381 cm/jam)	<i>Clay loams, shallow sandy loam, soils low in organic content, &</i>

Grup	Laju Infiltrasi Minimum (in/jam)	Jenis Tanah
		<i>soils usually high in clay</i>
D	0 – 0,05 (0 – 0,127 cm/jam)	<i>Soils which swell significantly when wet, heavy plastic clay, & certain salinic soils</i>



Gambar 3.1. Grafik Hubungan CN dengan Curah Hujan

Dalam deskripsi karakteristik penutup tanahnya (*soil-cover complex*) adalah perlu untuk memasukan parameter penutup lahan. Hal ini telah dilakukan oleh USDA dengan mengembangkan penentuan nilai CN untuk berbagai penutup lahan dan jenis tanah seperti pada tabel 2.2 TR-55.

Selain itu, nilai CN dipengaruhi oleh kondisi hidrologis tanah terutama untuk lahan hijau (*row crops* dan *small grains*).

Kurva eksponensial peluruhan infiltrasi mengindikasikan bahwa kondisi tanah selama proses infiltrasi berpengaruh ketika hujan mulai atau kondisi kelembapan tanah pada curah hujan tertentu (*antecedent moisture condition – I_a*). Kondisi kelembapan tersebut terbagi menjadi 3 yaitu:

- a) **kondisi I**, tanah adalah kering tapi tidak menuju titik peralihan (*wilting point*), dan ada tanaman dalam kondisi baik
- b) **kondisi II**, kasus umum untuk banjir tahunan misal kondisi umum yang melampaui kejadian banjir tahunan maximum pada berbagai DAS
- c) **kondisi III**, hujan lebat atau ringan dan suhu rendah telah terjadi selama 5 hari pada awal badai, dan tanah hamper jenuh.

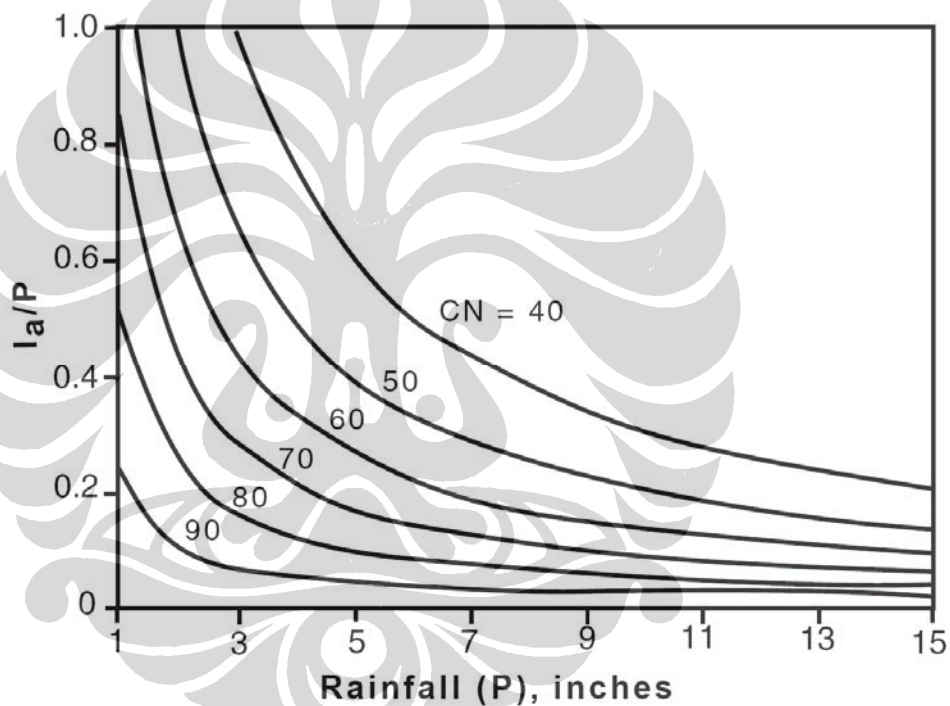
Table 2.2 TR-55 adalah untuk **kondisi II**, maka untuk mengkonversi CN ke kondisi kelembapan lain menggunakan tabel 3.2 (USDA, 1964) di bawah ini.

Tabel 3.2. Estimasi Nilai CN untuk Berbagai Kondisi Kelembapan Tanah

CN untuk Kondisi II	Korespondensi CN untuk Kondisi	
	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65

40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Sedangkan grafik hubungan antara abstraksi inisial dengan nilai CN (USDA, 1986) seperti pada gambar 3.2 dan tabel 3.3 berikut di bawah ini.



Gambar 3.2. Variasi I_a/P untuk P dan CN

Hujan P pada persamaan 2.4 dipilih sesuai dengan desain periode ulang. CN dan total limpasan langsung di daerah tangkapan dapat diketahui dari tabel 2.2 manual TR-55. Nilai CN tersebut digunakan untuk mengetahui abstraksi inisial pada tabel 3.3 di bawah ini, maka rasio antara abstraksi inisial terhadap hujan (I_a/P) dapat dihitung.

Tabel 3.3. Nilai *Ia* untuk CN

CN	Ia (in)	CN	Ia (in)
40	3000	70	0857
41	2878	71	0817
42	2762	72	0778
43	2651	73	0740
44	2545	74	0703
45	2444	75	0667
46	2348	76	0632
47	2255	77	0597
48	2167	78	0564
49	2082	79	0532
50	2000	80	0500
51	1922	81	0469
52	1846	82	0439
53	1774	83	0410
54	1704	84	0381
55	1636	85	0353
56	1571	86	0326
57	1509	87	0299
58	1448	88	0273
59	1390	89	0247
60	1333	90	0222
61	1279	91	0198
62	1226	92	0174
63	1175	93	0151
64	1125	94	0128
65	1077	95	0105
66	1030	96	0083
67	0985	97	0062
68	0941	98	0041
69	0899		

3.1.1. Infiltrasi Horton dan Infiltrometer

Kurva infiltrasi dibangun dari pengambilan data lapangan berupa laju infiltrasi. Pengambilan data lapangan dimulai dari identifikasi geologi, geohidrologi (potensi air tanah), dan tata guna lahan sehingga bisa dibuat klasifikasi kondisi

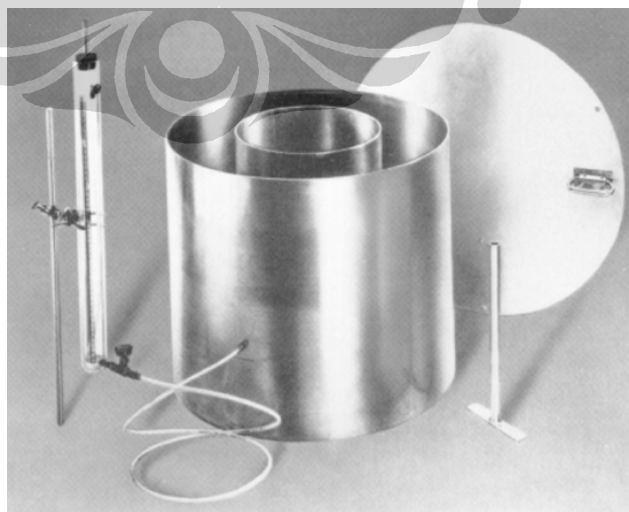
hidrologis tanahnya (*hydrologic soil group* – HSG) sesuai dengan karakteristik Sub-DAS Sugutamu.

Δy

Vol.

Gambar 3. 3. Ilustrasi Model Fisik Pengukuran Laju Infiltrasi

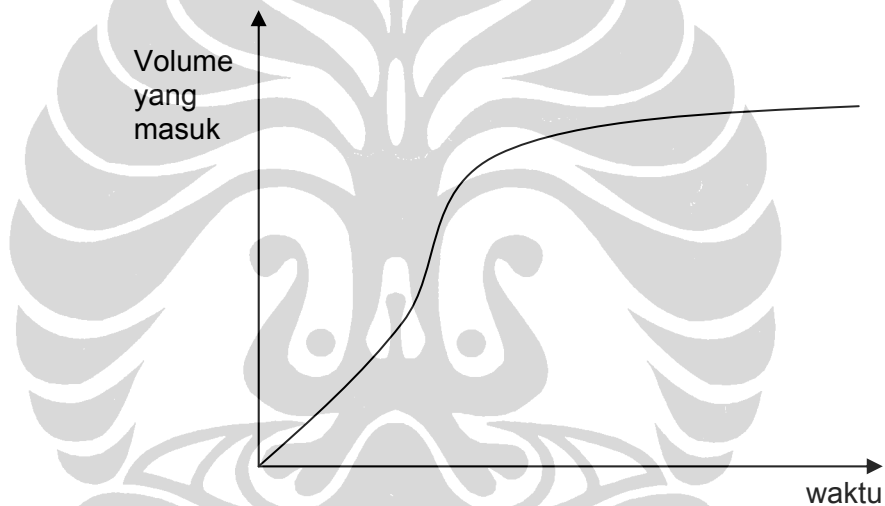
Untuk penelitian ini, model fisik di atas pada penelitian lapangan akan menggunakan infiltrometer. Model infiltrometer ring ganda dapat dilihat pada gambar di bawah. Hal yang perlu diperhatikan selama percobaan adalah pemasukan air sedapat mungkin dalam waktu singkat untuk mengurangi pengaruh awal waktu pemasukan volume air ke dalam tanah. Ring luar dipakai untuk memastikan asumsi bahwa di ring dalam tidak terjadi rembesan horisontal karena tertahan aliran masuk dari ring luar.



Gambar 3.4. Model Infiltrrometer

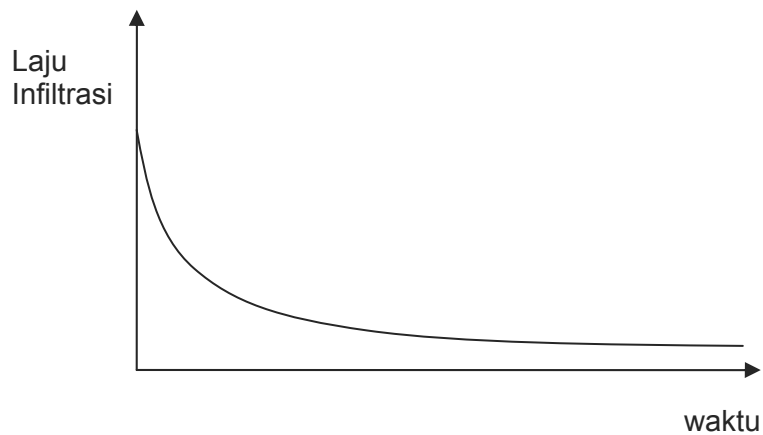
Data yang diambil dari alat infiltrometer adalah penurunan muka air (Δh) terhadap waktu (Δt). Waktu pengukuran diambil hingga diketahui sampai penurunan muka air yang masuk ke tanah terhadap interval waktu adalah konstan. Dalam hal ini, kondisi air yang masuk ke dalam tanah dianggap sudah tidak ada interferensi, misal pengenalan air yang masuk ke muka tanah, pelaluan air yang melalui rongga-rongga yang ada di dalam tanah.

Kemudian data itu diolah menjadi grafik akumulasi penurunan muka air (h) terhadap akumulasi waktu (t). Hasil pengukuran disajikan dalam grafik hubungan antara volume air yang masuk (V) yaitu tinggi muka air (h) dikalikan luas ring dalam (A), terhadap fungsi waktu (T).



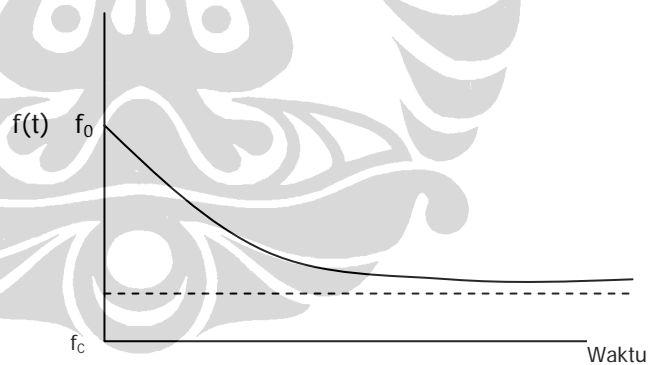
Gambar 3.5. Grafik Volume yang Masuk terhadap Waktu

Volume air terinfiltrasi ke dalam tanah berupa flux air. Dengan demikian untuk mencari laju infiltrasi dengan cara menghitung kemiringan kurva atau diferensiasi pertama dari persamaan kurva.



Gambar 3.6. Grafik Volume Infiltrasi terhadap Waktu

Dengan menggunakan infiltrometer¹, *Beaver (1977)* menemukan bahwa infiltrasi dapat diwakili dengan persamaan Horton (*Horton, 1939, 1940*). Metode ini memberikan pernyataan untuk infiltrasi yang bervariasi pada waktu. Persamaan Horton diberikan pada persamaan laju infiltrasi f dan digambarkan pada Gambar 3.7 di bawah. Volume infiltrasi adalah luasan di bawah kurva infiltrasi atau integral dari persamaan 2.6.



Gambar 3.7. Infiltrasi (eksponensial)

Volume total dari infiltrasi dengan menggunakan persamaan Horton ditentukan dengan mengintegrasikan luasan di bawah kurva, atau

$$F = \int_0^1 f(t) dt = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (1 - e^{-kt}) \quad 3.1$$

¹ Wanielista et.al., 1997

dimana F = volume infiltrasi, cm (m) atau satuan konsistensi lainnya.

Selama suatu kejadian hujan, aplikasi dari persamaan volume infiltrasi F harus disesuaikan karena intensitas hujan mungkin lebih rendah daripada laju infiltrasi air potensial. Formulasi empiris (*empirical formulation*) yang lain oleh *Holtan et al. (1975)* dan *Green dan Ampt (1911)* juga dapat memberikan akurasi yang lebih baik pada data observasi di lapangan.

Grafik hasil pengukuran di lapangan merupakan fungsi volume infiltrasi (F) terhadap waktu (t). Laju infiltrasi adalah diferensiasi atau kemiringan dari fungsi volume infiltrasi terhadap waktu. Parameter model infiltrasi Horton dihitung dengan menggunakan metode estimasi parameter.

Metode estimasi parameter laju infiltrasi dengan dilakukan dengan menggunakan program *Solver* di *MS Excel* seperti pada tabel berikut di bawah ini.

Tabel 3.4. Metode Estimasi Parameter

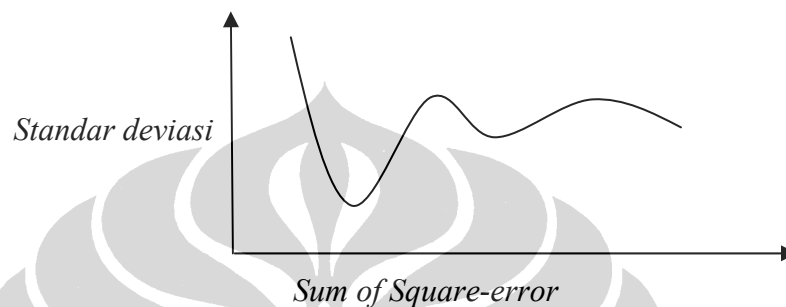
t (jam)	$\sum \Delta h$ (cm)	$\sum \Delta h$ (m)	A (m ²)	F (Vol) (m ³)	F horton	square error	f
1	2	3	4	5	6	7	8
0.00000	0.0	0.00000	0.07293	0.00000	0.00000	0.00000	0.03008
0.00278	1.0	0.01000	0.07293	0.00073	0.00773	0.00005	0.02974
0.00556	2.5	0.02500	0.07293	0.00182	0.00795	0.00004	0.02941
						Σ	

Kolom 1 adalah interval waktu dalam jam. Kolom 2 adalah data hasil pengukuran kedalaman air yang masuk ke tanah. Kolom 4 luas ring dalam infiltrometer. Kolom 5 adalah volume kolom air infiltrasi, di mana tinggi muka air (kolom 3) dikalikan dengan luas penampang ring dalam infiltrometer (kolom 4).

Untuk mendapat persamaan model Infiltrasi Horton, maka data volume infiltrasi F_{lapangan} yang didapat dari lapangan pada kolom 5 dicari parameter fungsi persamaannya yaitu f_0 , f_c dan k dengan cara *least square-error*. Pada kolom 6

yaitu hasil perhitungan teoritis volume infiltrasi Horton dengan memasukan tebakan awal f_0, f_c dan k ke dalam persamaan volume infiltrasi Horton.

Square-error adalah kuadrat selisih antara data lapangan dengan hasil perhitungan teoritis. Cara *least square-error* dipakai untuk mencari nilai *square-error* yang paling minimal, secara grafis digambarkan seperti di bawah ini. Grafik tersebut merupakan fungsi jumlah *square-error* dengan standar deviasinya (S).

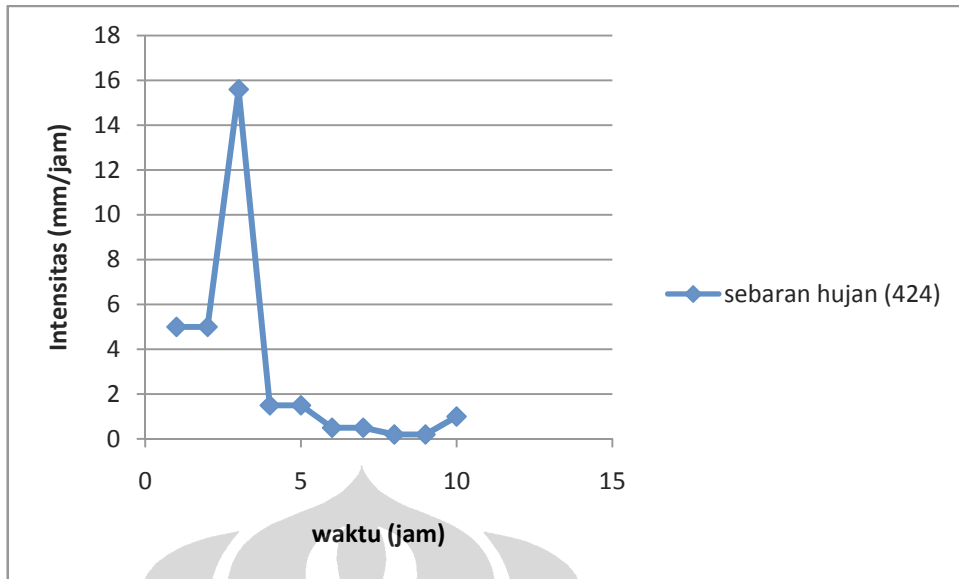


Gambar 3.8. Metode *Least Square Error* (Chapra, 1997)

Hasil pengukuran volume infiltrasi di beberapa titik pengamatan perlu dipilih data mana yang akan dipakai berdasarkan fenomena yang ada di lapangan.

3.1.2. Pengolahan Data Hujan

Data hujan yang dipergunakan berasal dari Alat Pengukur Hujan Otomatis Stasiun Hujan FTUI karena FTUI berada di dalam DAS Ciliwung sehingga dianggap mewakili Sub-DAS Sugutamu yang termasuk dalam sistem wilayah sungai Ciliwung.



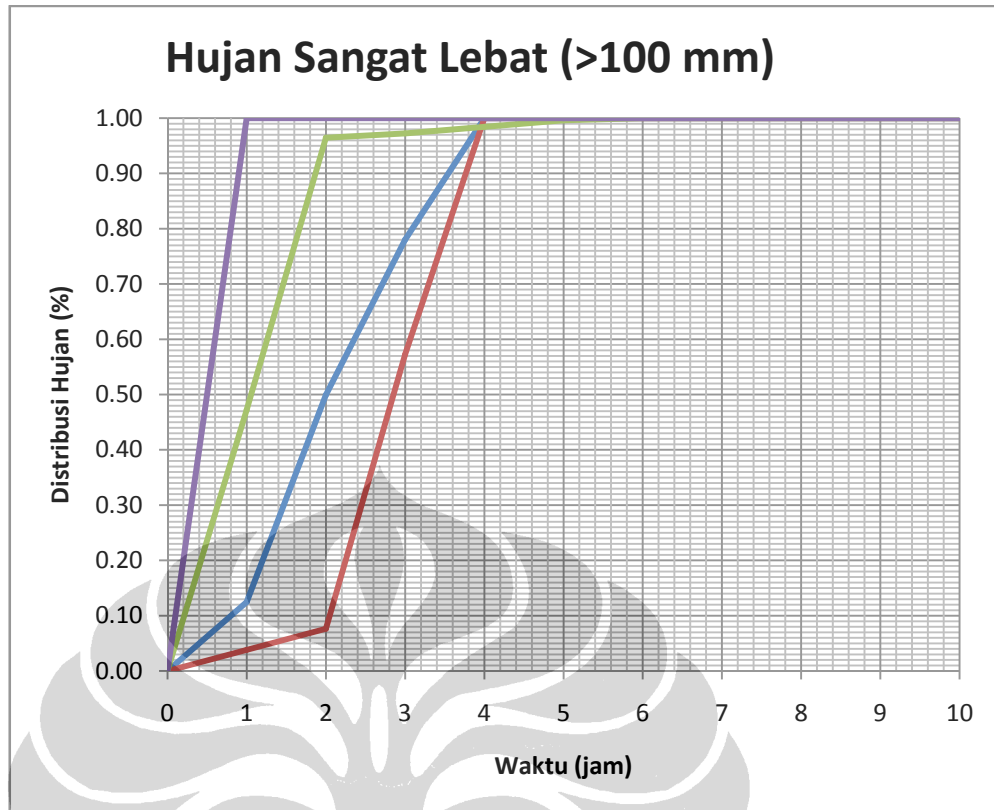
Gambar 3.9. Salah Satu Grafik Hasil Pengukuran Sta. FTUI

Pengolahan data hujan, dimulai dari mengolah data grafik alat menjadi informasi tinggi hujan (mm) dalam satuan jam. Data ini dibuat dalam bentuk sebaran hujan dan kurva-S hujan. Berikut di bawah ini adalah kurva-S untuk kelas hujan BMG untuk Sta. FTUI kurun waktu 2004 – November 2007. Indeks pada kanan grafik adalah nomor hujan.

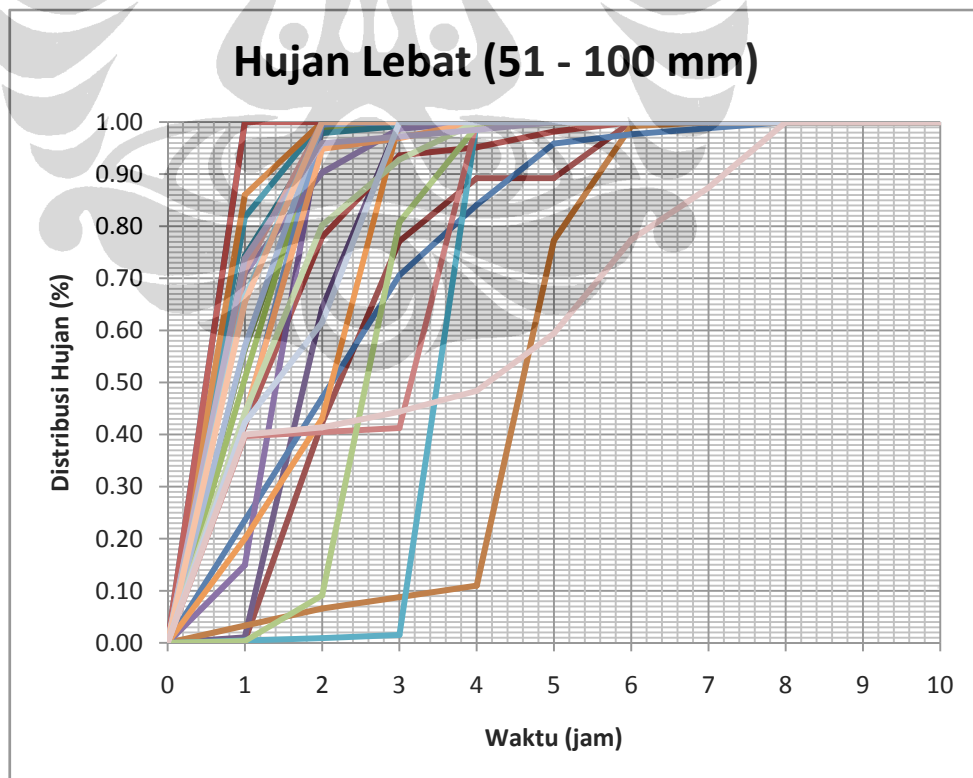
Persentasi peristiwa hujan berdasarkan data hujan tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3.5. Persentasi Spektrum Hujan Sta. FTUI

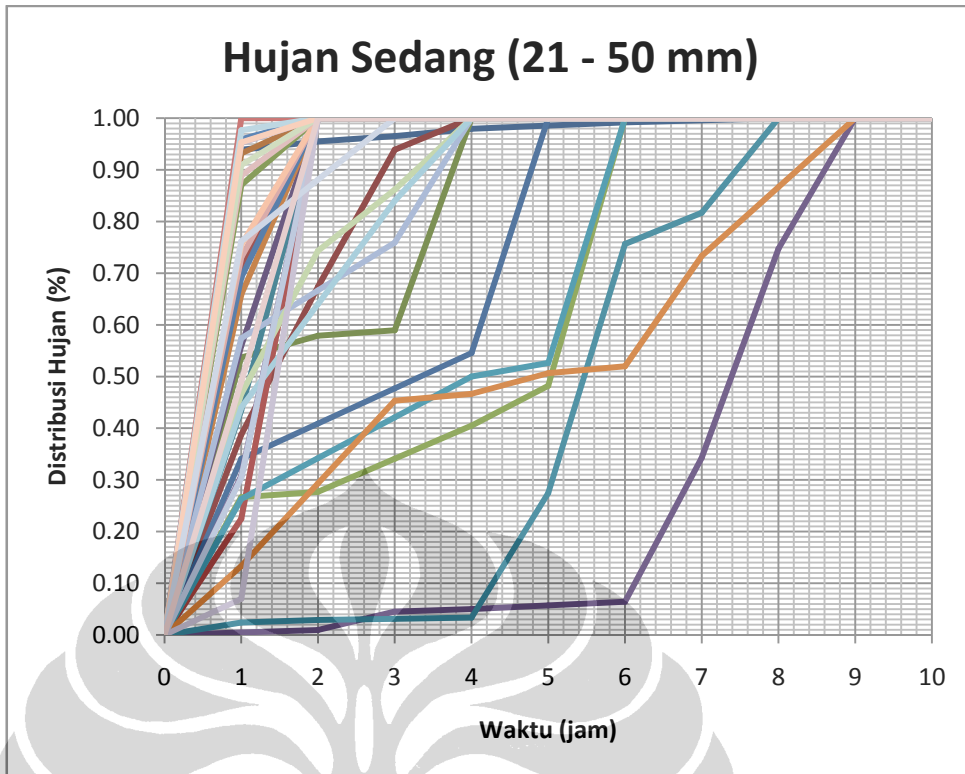
Kelas Hujan BMG	Frekuensi	%
Sangat Ringan <5 mm	213	41.85
Ringan 5 - 20 mm	197	38.7
Sedang 21 - 50 mm	64	12.57
Lebat 51 - 100 mm	31	6.09
Sangat lebat >100 mm	4	0.786
total data	509	100



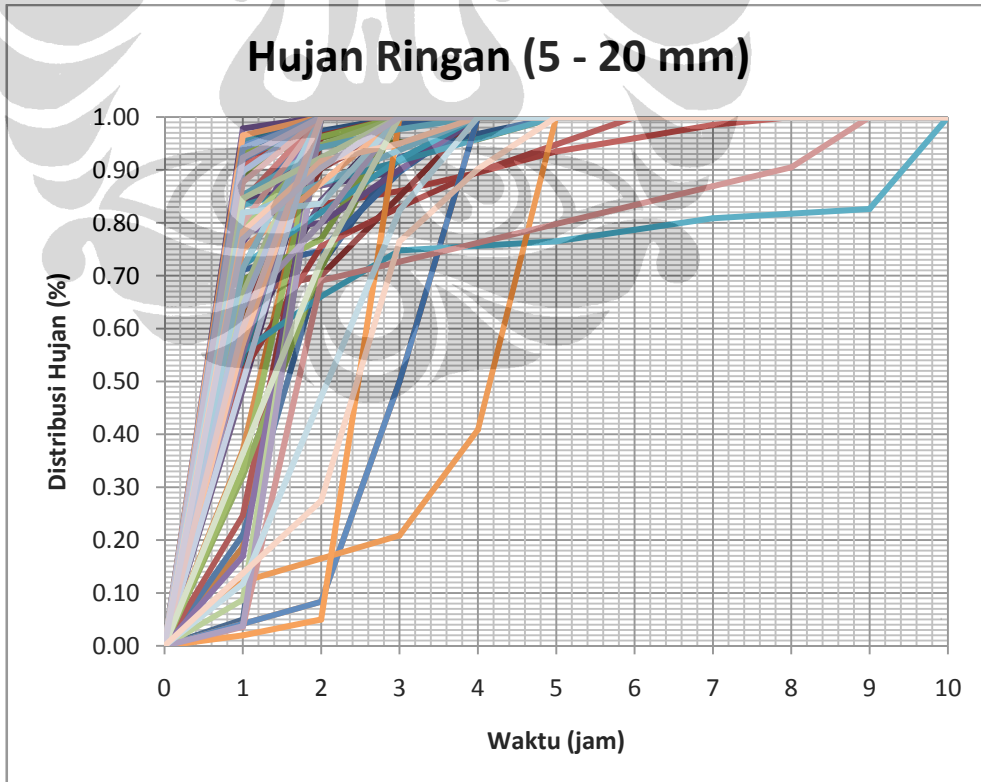
Gambar 3.10. Kurva-S Hujan Sangat Lebat Sta. FTUI



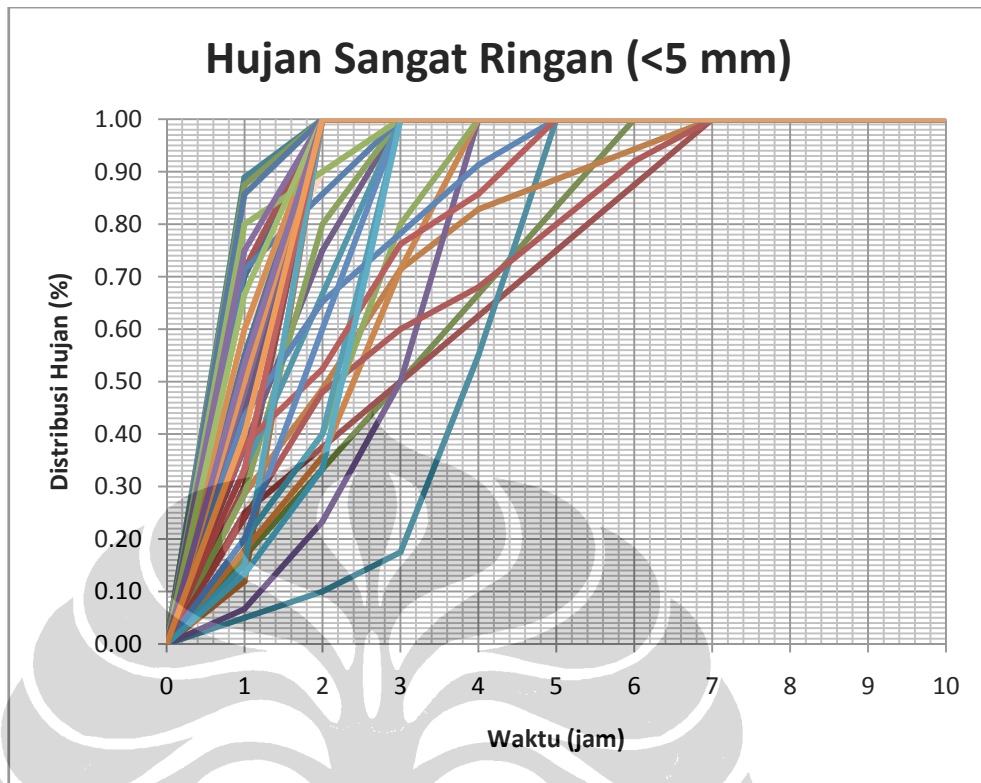
Gambar 3.11. Kurva-S Hujan Lebat Sta. FTUI



Gambar 3.12. Kurva-S Hujan Sedang Sta. FTUI



Gambar 3.13. Kurva-S Hujan Ringan Sta. FTUI

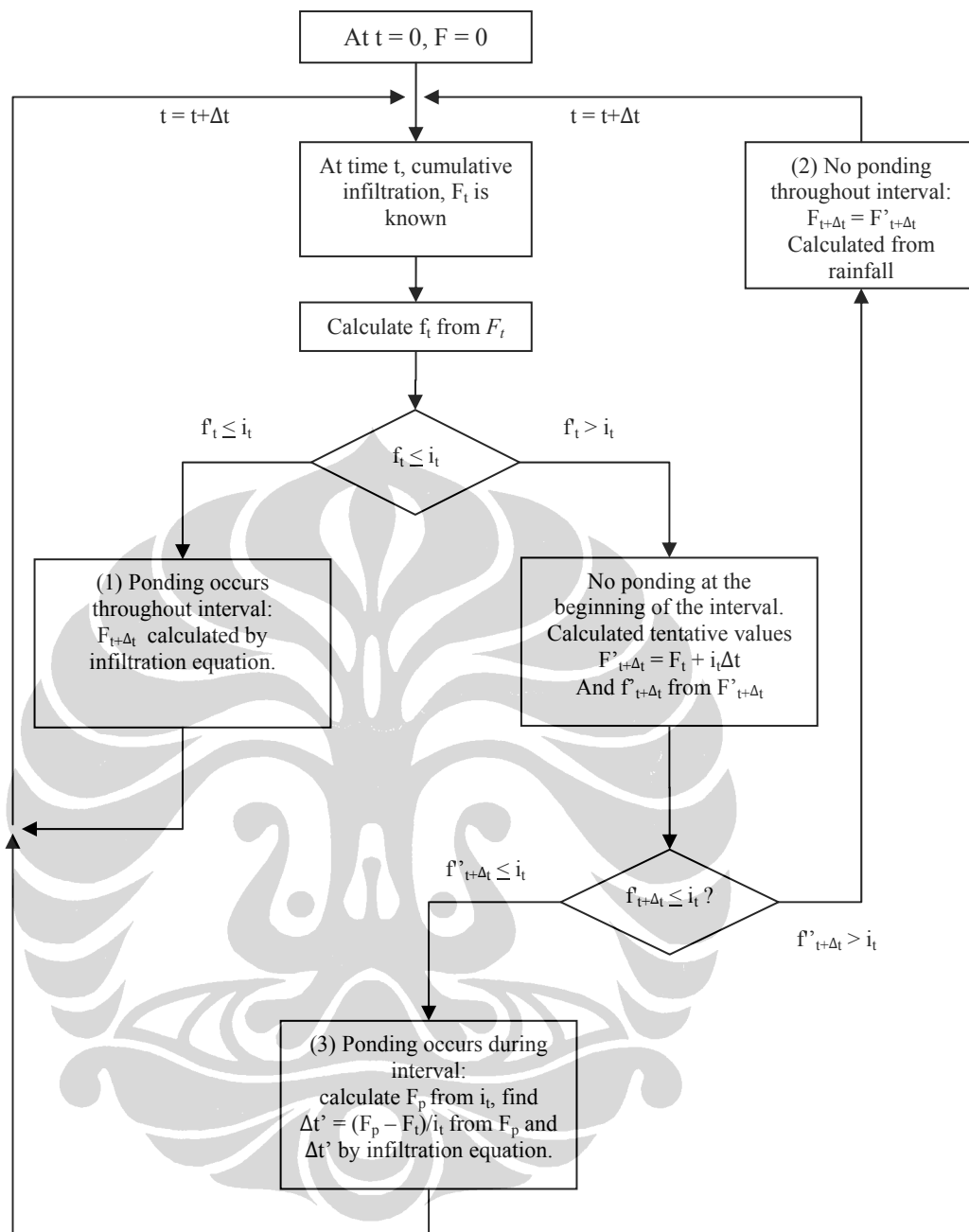


Gambar 3.14. Kurva-S Hujan Sangat Ringan Sta. FTUI

3.1.3. Penentuan Nilai CN

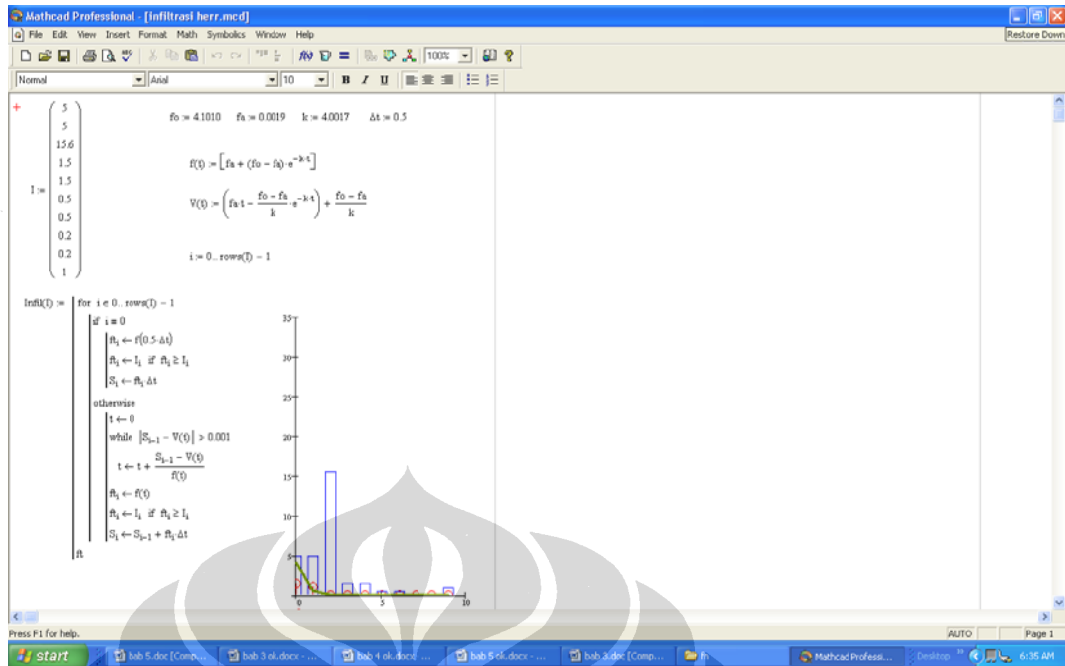
Perhitungan besar limpasan langaug menggunakan persamaan infiltrasi Horton dilakukan berdasarkan bagan alur yang dikembangkan oleh Ven Ten Chow di bawah ini.

Bagan alur menjelaskan tentang tiga kasus yaitu (1) genangan (*ponding*) selama interval waktu, (2) tidak ada genangan selama interval, dan (3) genangan mulai sebagian interval waktu. Laju infiltrasi selalu berkurang atau konstan dalam waktu, maka genangan diatur oleh intensitas waktu yang diberikan. Oleh karena itu, genangan tidak dapat berkurang di tengah interval waktu, tetapi hanya pada akhir interval, di mana nilai intensitas hujan berubah.



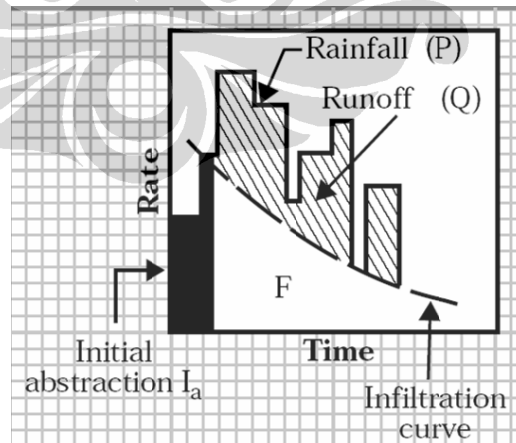
Gambar 3.15. Bagan Alur Penentuan Infiltrasi dan Waktu Penggenangan (Ponding) untuk Berbagai Intensitas Hujan (Ven Te Chow, 1988)

Alat bantu perhitungan dengan menggunakan program MathCAD.



Gambar 3.16. Program MathCAD untuk Perhitungan Ekses Hujan dari Grafik Infiltrasi Horton dan Grafik Intensitas Hujan

Dalam penelitian nilai CN untuk Sub-DAS Sugutamu, dimulai dari penentuan kurva infiltrasi untuk menghitung besarnya abstraksi inisial (I_a) pada suatu lahan tersebut. Hubungan antara ekses hujan dengan infiltrasi seperti pada gambar 3.17 di bawah ini.



Gambar 3.17. Grafik Konseptual Hubungan antara Limpasan Langsung dengan Infiltrasi

Nilai CN metode SCS dapat disebut layak pakai langsung bila gradien regresi linear hasil perhitungan CN dari grafik infiltrasi Horton.

3.2. RENCANA PERCOBAAN INFILTROMETER

3.2.1. Penentuan Lokasi Percobaan

Penelitian dilakukan di DAS Sugutamu, Kota Depok, Jawa Barat. Kali Sugutamu merupakan anak Sungai Ciliwung. Sub-DAS Sugutamu memiliki luas $\pm 16,8 \text{ km}^2$. Berikut di bawah pada gambar 1.1 adalah daerah Sub-DAS Sugutamu.

Sub-DAS Sugutamu terletak di Kota Depok yang merupakan daerah penyangga DKI Jakarta dan pusat pendidikan (dengan adanya Universitas Indonesia dengan jumlah mahasiswa lebih dari 20.000 setiap tahunnya), sehingga menjadi memicu perluasan lahan pemukiman untuk mengakomodasi kebutuhan tempat tinggal dan asrama mahasiswa.

Efek urbanisasi pada Sub-DAS Sugutamu adalah perluasan daerah kedap air yaitu dari $\pm 15\%$ pada tahun 2000 menjadi lebih dari 40% pada tahun 2010 (Pemda Kota Depok, 2000).

Hasil analisis penelitian awal tentang kerentanan dengan metode *vulnerability analysis*, Center for Watershed Protection, 2004, di Sub-DAS Sugutamu terhadap perubahan DAS yaitu rangking Sub-DAS Sugutamu adalah *restorable non-supporting*. Pada kondisi ini DAS mampu merestorasi dirinya sendiri tetapi komponen-komponen DAS tidak mampu mendukung proses restorasi tersebut. Komponen DAS yang dimaksud adalah penduduk dengan kegiatan yang berinteraksi di dalam ekosistem dan dipengaruhi sumberdaya alam (lahan, air, dll) dan kondisi geomorfologi dan iklim di sub-DAS.

Hasil analisis kerentanan tersebut, Sub-DAS Sugutamu termasuk dalam kategori rentan terhadap perubahan DAS terutama dari pengaruh luasan daerah kedap air. Perubahan tersebut menyebabkan peningkatan debit banjir dan pemendekan waktu konsentrasi limpasan menuju daerah hilir. Dampak ini akan terjadi secara hirarki pada suatu sistem DAS, sehingga dapat diperkirakan bahwa debit dan volume banjir yang terjadi di hilir sistem DAS akan semakin meningkat.

Pendekatan pengelolaan limpasan hujan berwawasan lingkungan diimplementasikan dalam skala mikro. Rasional pembatasan luas pengamatan (skala mikro) tersebut dilakukan untuk:

1. menyederhanakan variable yang mempengaruhi proses pengamatan,
2. mempersingkat proses pengamatan, dan
3. mengendalikan output proses pengamatan.

3.2.2. Rencana Pengukuran Data Infiltrasi

Penentuan laju infiltrasi berdasarkan variasi kombinasi tata guna lahan (penutup tanah), geologis (jenis tanah), dan hidrogeologis (potensi air tanah) Sub-DAS Sugutamu. Berikut data infiltrasi diperoleh dari *Laporan Penelitian Infrastruktur Hijau Bidang Keairan: Pengelolaan Sumberdaya Air Terpadu*, Departemen Teknik Sipil, FTUI, 2007.

Penelitian laju infiltrasi di Sub-DAS Sugutamu dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

- Penentuan lokasi titik pengambilan data.
 - ❖ Verifikasi batas sub-DAS
 - ❖ Identifikasi karakteristik lahan sub-DAS
 - ❖ Pemetaan titik pengamatan yang menunjukkan jenis kelompok tanah hidrologis sub-DAS:
 - Identifikasi data geologi
 - Identifikasi data hidrogeologi

- Identifikasi data tata guna lahan
- Pengamatan dan pengukuran data infiltrasi (laju penurunan muka air terhadap waktu).

3.2.2.1. *Penentuan Lokasi Titik Pengambilan Data*²

Dalam pemilihan titik-titik lokasi pengamatan laju infiltrasi yang akan diamati di dalam sub-DAS Sugutamu, digunakan beberapa tahapan, sebagai berikut:

1. Verifikasi batas Sub-DAS Sugutamu,
2. Identifikasi karakteristik dengan cara pemilahan titik-titik berdasarkan jenis geologi, hidrogeologi, dan tata guna lahan Sub-DAS Sugutamu,
3. Pemilihan titik dengan lokasi yang mudah untuk dilakukan pengamatan (Catatan: Lokasi yang mudah untuk akses dan mudah menugurusi perizinan)

Verifikasi Batas Sub-DAS Sugutamu

Verifikasi batas Sub-DAS Sugutamu dilakukan untuk memastikan luas daerah aliran sungai Sugutamu. Batas sub-DAS dibuat pertama berdasarkan Peta Rupa Bumi Cibinong tahun 1999, kemudian dilakukan verifikasi di lapangan melalui survey pengamatan lapangan secara visual. Survey dilakukan untuk mengetahui sistem pengaliran Kali Sugutamu.

Secara geografis, sub-DAS Sugutamu dibagi menjadi 3 (tiga) bagian sub-DAS, yaitu bagian hulu, tengah, dan hilir. Bagian hulu mulai dari ujung di mata air Cikaret sampai dengan batas Jalan Divisi 1 Cilodong. Bagian Tengah antara Jalan Divisi 1 Cilodong sampai Jalan Tole Iskandar. Bagian hilir antar Jalan Tole Iskandar sampai dengan pertemuan Kali Sugutamu dengan Sungai Ciliwung.

Identifikasi Karakteristik Sub-DAS Sugutamu

Karakteristik sub-DAS didasarkan pada keragaman karakteristik jenis tanah dan geologis, tata guna lahan dan hidrogeologis, di mana data:

- Geologi, untuk menentukan kondisi tanah dalam sub-DAS

² DTS, 2007

- Hidrogeologi, untuk menentukan potensi air tanah dalam sub-DAS
- Tata Guna Lahan, untuk menentukan tata guna lahan dalam sub-DAS

Pemilihan Lokasi Pengukuran dari Peta sub-DAS

Pemilihan titik-titik lokasi pengukuran dibuat berdasarkan variasi dari hasil identifikasi karakteristik sub-DAS. Penentuan titik didasarkan atas kemudahan akses dan perizinan, antara lain dimulai dengan tempat tinggal karyawan/karyawati dan dosen dari Departemen Teknik Sipil yang bertempat tinggal di dalam daerah sub-DAS Sugutamu.

Berikut gambar di bawah ini adalah hasil penentuan lokasi titik pengamatan data infiltrasi di Sub-DAS Sugutamu.

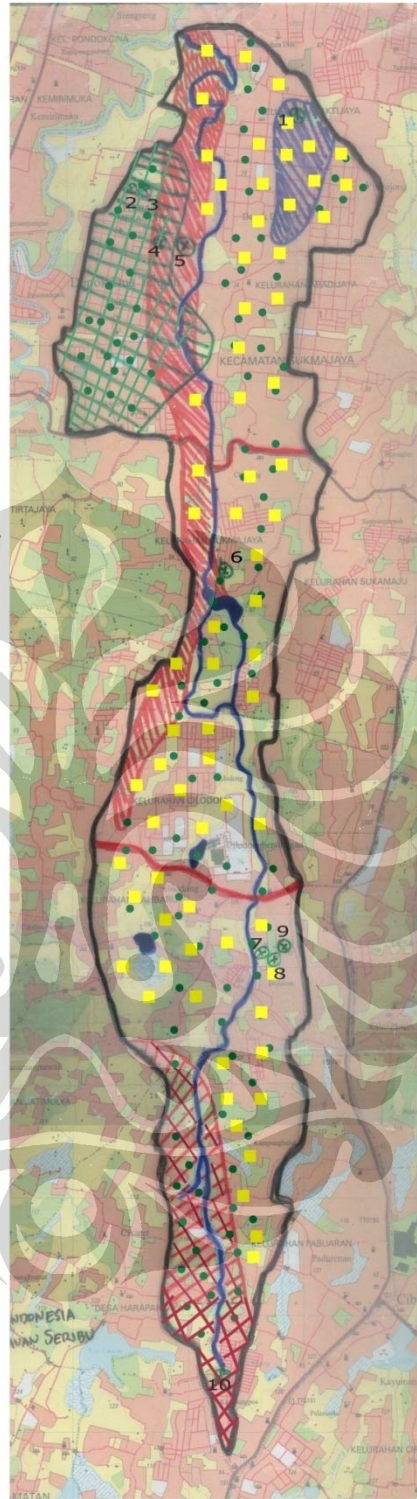
3.2.2.2. Pengamatan dan Pengukuran Data Infiltrasi

Pengamatan dan pengukuran data infiltrasi yaitu kedalaman penurunan muka air terhadap satuan waktu di setiap lokasi titik pengamatan. Data tersebut kemudian diolah menjadi grafik hubungan antara volume air yang masuk terhadap waktu. Volume air yang masuk adalah luas ring dalam infiltrometer dikalikan dengan kedalaman penurunan air.

Peta Geologi,
Potensi Air Tanah,
dan Titik Survey
pada
DAS Sugutamu

Legenda Gabungan

-  Potensi Air Tanah Tinggi
-  Potensi Air Tanah Sedang
-  Potensi Air Tanah Rendah
-  Kipas Aluvium
-  Aluvium
-  Formasi Serpong
-  Titik Survey



Gambar 3.19. Peta Lokasi 10 Titik Pengamatan