

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Infiltrasi adalah komponen penting dari siklus hidrologi dimana limpasan permukaan dan pengisian air tanah saling berhubungan. Model infiltrasi dapat dipisahkan menjadi tiga kategori: fisik, pendekatan fisik, dan empiris (Heidarpour dan Habili, 2015). Model empiris biasanya berdasarkan data percobaan di laboratorium dan dengan menggunakan persamaan sederhana. Model ini tidak dapat sepenuhnya menggambarkan proses infiltrasi, namun model fisik secara substansial menggambarkan proses infiltrasi detail (Shakir dkk, 2015). Persamaan empiris infiltrasi yang telah dikembangkan antara lain seperti model Green and Ampt, Kostiaikov, Horton dan model analitik seperti model Richard-Dancy, untuk mendiskripsikan aliran air dalam tanah tak jenuh terutama untuk proses infiltrasi (Rusli dan Fauzan, 2017).

Pengukuran infiltrasi di lapangan memerlukan waktu, tenaga, biaya yang tidak sedikit, maka diperlukan transformasi data empiris di lapangan menjadi suatu pendekatan model yang tepat sesuai dengan kondisi daerah tersebut sebagai dasar estimasi dalam menentukan besarnya infiltrasi tanah (Ritawati dkk, 2012). Pengukuran infiltrasi ini dilakukan di wilayah Das Code dengan menggunakan peralatan infiltrasi sederhana yaitu *Double Ring Infiltrometer* yang terdiri dari dua silinder yang dimasukkan ke dalam tanah sedalam 5-10 cm. Acuan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu SNI 7752 (BSN, 2012) tentang tata cara pengukuran laju infiltrasi tanah di lapangan menggunakan infiltrometer cincin ganda. Hasil pengukuran di lapangan kemudian di analisis kembali menggunakan persamaan Green and Ampt.

2.2. Penelitian Terdahulu

2.2.1. Infiltrasi

Infiltrasi adalah aliran air masuk ke dalam tanah melalui permukaan tanah secara vertikal. Setelah tanah lapisan atas jenuh, air yang berlebih tersebut mengalir ke tempat yang lebih dalam sebagai akibat gaya gravitasi bumi yang

dikenal sebagai proses perkolasi. Sedangkan banyaknya air persatuan waktu (dinyatakan dalam mm per jam atau cm per jam) yang masuk melalui permukaan tanah disebut sebagai laju infiltrasi (*infiltration rate*). Pada saat tanah masih kering, laju infiltrasi akan tinggi. Setelah tanah menjadi jenuh air, maka laju infiltrasi akan menurun dan menjadi konstan.

Nilai laju infiltrasi sangat bergantung pada kapasitas infiltrasi tanah. Kapasitas infiltrasi tanah adalah kemampuan suatu tanah untuk menyerap air dari permukaan ke dalam tanah secara vertikal. Infiltrasi yang efektif akan menurunkan *run off*, sebaliknya infiltrasi yang tidak efektif akan mempebesar *run off* (Arsyad, 2006). Proses infiltrasi diatur oleh dua faktor utama yaitu gaya gravitasi dan kapilaritas, gaya gravitasi merupakan fenomena alami dari alam, sedangkan kapilaritas adalah kemampuan cairan mengalir pada ruang sempit, dalam prosesnya infiltrasi diatur oleh tiga mekanisme penting, entri awal air melalui permukaan tanah/tanaman (perkolasi) selanjutnya air bergerak melalui zona tak jenuh, dan akhirnya kapasitas penyimpanan air permukaan akan menipis (Prasad dkk., 2015).

Dalam kajiannya ada beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah faktor yang berpengaruh terhadap pengujian dan metode pengolahan data pengujian itu sendiri. Dalam penelitian (Ningsih dan Purnama, 2012) salah satu faktor yang mempengaruhi infiltrasi adalah jenis tutupan lahan. Faktor ini kemudian akan menentukan sifat fisik tanah seperti tekstur tanah, yang berpengaruh kuat terhadap perilaku peresapan air ke dalam tanah. Faktor curah hujan juga berpengaruh dimana kapasitas infiltrasi akan tercapai jika hujan melebihi kapasitas infiltrasi, sedangkan pada hujan yang lebih kecil dari kapasitas infiltrasi, maka rerata infiltrasi sama dengan curah hujan. Fauzan dan Rusli (2017) menyebutkan laju infiltrasi ditentukan oleh karakteristik tanah termasuk kepadatan tanah dan porositas. Sementara laju infiltrasi dan kapasitas infiltrasi dipengaruhi oleh tekstur tanah, struktur tanah, permeabilitas, daya resap tanah, tipe vegetasi serta kemiringan lahan. Laju infiltrasi sangat bergantung pada karakteristik tanah dan air, kondisi tanah yang jenuh air menunjukkan laju infiltrasi yang lebih rendah dibandingkan tanah yang tidak jenuh air.

Sudarmanto dkk (2014) meneliti tentang perbandingan infiltrasi lahan terhadap karakteristik fisik tanah kondisi penutupan lahan dan kondisi tegakan pohon pada berbagai jenis pemanfaatan lahan. Penelitian ini dilakukan pada Sub DAS Kreo Semarang yang bertujuan mengkaji hubungan karakteristik fisik tanah, kondisi penutupan lahan dan kondisi tegakan pohon terhadap kapasitas infiltrasi yang kemudian dianalisis dengan metode Horton. Dari hasil pengujian didapatkan pengaruh yang paling kuat terhadap kapasitas infiltrasi berdasarkan uji regresi (*stepwise*) adalah permeabilitas tanah. Dengan demikian faktor permeabilitas tanah dapat digunakan dalam mengarahkan pemanfaatan lahan untuk upaya peningkatan kapasitas infiltrasi lahan.

Penelitian terkait penggunaan lahan juga diteliti oleh Yunagardasari dkk (2017) mengenai model infiltrasi pada berbagai penggunaan lahan di desa Tulo Kecamatan Dolo Kabupaten Sigi. Penelitian ini dilakukan pada berbagai penggunaan lahan seperti kebun kelapa, kebun kakao, sawah dan semak belukar. Dari hasil pengujian didapatkan laju infiltrasi pada lahan semak belukar tergolong agak cepat dikarenakan dipengaruhi oleh beragam vegetasi yang tumbuh dipermukaan tanah dan mempunyai akar serabut sehingga membantu proses meresapnya air. Kemudian pada lahan kebun kakao tergolong sedang, dan pada lahan kebun kelapa dan lahan sawah agak lambat. Penggunaan lahan untuk sawah infiltrasinya terbilang lambat karena memiliki kondisi tanah yang jenuh atau mempunyai lapisan kedap air dan tanaman padi yang memiliki perakaran pendek sehingga infiltrasi yang dimiliki juga kecil. Selain dari faktor lingkungan, infiltrasi bisa dipengaruhi oleh larutan atau kandungan air yang meresap dalam tanah. Air yang bersih akan memiliki nilai infiltrasi lebih besar jika dibandingkan dengan air yang memiliki partikel seperti pasir, lanau atau lempung terlarut di dalamnya, karena adanya partikel tersebut bisa menutup pori-pori dari tanah sehingga air akan lebih sulit meresap (Tuffour dan Abubakar, 2015).

Disisi lain Basit (2018) meneliti tentang pengaruh nilai infiltrasi terhadap potensi banjir di Kawasan DAS Winongo. Penelitian ini menjelaskan variasi sebaran nilai kapasitas infiltrasi total pada DAS Winongo kemudian dianalisis menggunakan persamaan Horton. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa daerah hulu merupakan daerah sebaran kapasitas infiltrasi tinggi, nilai kapasitas infiltrasi

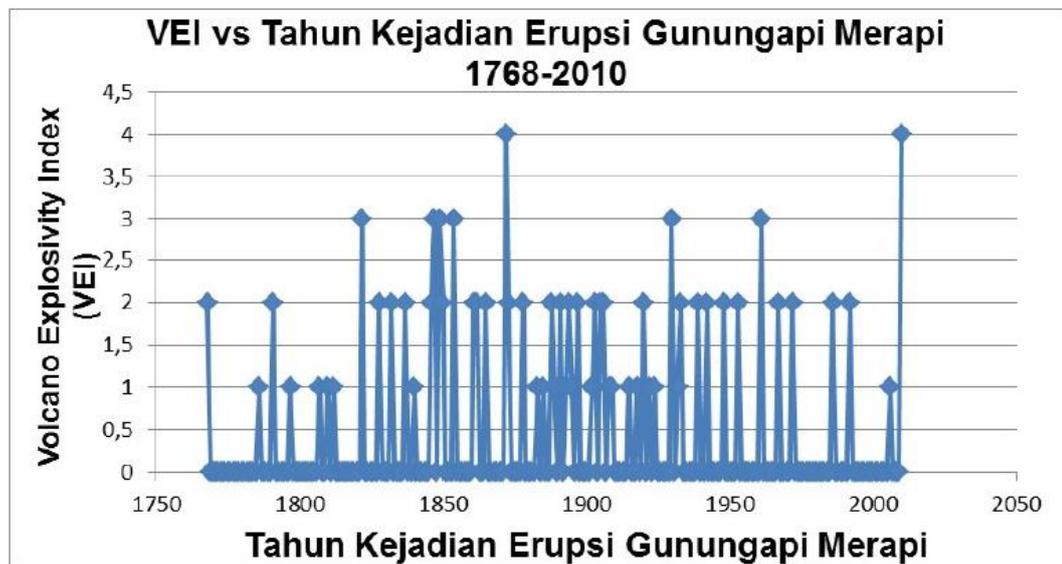
sedang terdapat pada daerah hilir, sedangkan daerah tengah DAS memiliki nilai kapasitas infiltrasi rendah.

Dari penjelasan diatas, salah satu hal yang harus diperhatikan dalam pengkajian infiltrasi yaitu metode pengolahan data hasil pengujian infiltrasi. Rohmat (2009) menjelaskan tipikal kuantitas infiltrasi menurut karakteristik lahan dengan analisis Green and Ampt. Metode ini mengembangkan pendekatan teori fisik yang dapat diselesaikan dengan Analisis Excel (*Exact Analytical Solution*) untuk menentukan nilai infiltrasi suatu daerah. Validasi dari kuantitas infiltrasi hasil pendugaan untuk setiap macam penggunaan lahan, diketahui apabila dibandingkan dengan nilai infiltrasi empiriknya. Kedekatan antara kedua nilai infiltrasi tersebut ditentukan oleh nilai korelasi. Sihag dkk (2017) meneliti mengenai perbandingan model infiltrasi yang dilakukan di National Institute of Technology (NIT) India. Alat yang digunakan untuk pengujian infiltrasi adalah *double ring infiltrometer* dengan 10 titik pengujian. Metode perbandingan yang digunakan untuk menghitung infiltrasi adalah Kostiakov, Kostiakov modifikasi, Novel dan US-*Soil Conservation Service* (SCS). Kemudian untuk mengevaluasi parameter statistik pada setiap model perbandingan dihitung dengan *Maximum absolute error* (MAE), *Bias* dan *Root mean square error* (RMSE). Perbandingan parameter statistik MAE, *Bias* dan RMSE menunjukkan bahwa model novel lebih baik daripada model lain dan dapat digunakan untuk menilai tingkat infiltrasi dengan karakteristik lapangan yang sama di N.I.T Kurukshetra, Haryana, India.

2.2.2. Gunung Merapi

Gunung Merapi adalah salah satu gunung api aktif di tengah Pulau Jawa yang berada di perbatasan Provinsi Jawa Tengah dan Provinsi Yogyakarta. Gunung Merapi menunjukkan beberapa karakteristik sabagai salah satu gunung api yang teraktif di dunia, karena catatan letusan menunjukkan aktifitas letusan sebanyak 35 kali semenjak 1882 dengan rata-rata erupsi yang berskala sekitar 3,5 tahun sekali (Mei dan Lavigne, 2012). Besar kecilnya letusan tersebut diukur berdasarkan jumlah material semburan dari letusan disebut skala *Volcano Explosivity Index* (VEI). Skala VEI ini dikeluarkan oleh Chris Newhall dari *The United States Geological Survey*. Letusan skala besar dengan VEI mencapai 4

terjadi pada tahun 2010, letusan tersebut melontarkan material piroklastik sekitar 140 juta m³.



Gambar 2.1 Grafik skala VEI erupsi Gunung Merapi tahun 1768-2010

Sungai Code merupakan salah satu sungai yang terkena dampak aliran lahar Gunung Merapi pasca erupsi 2010 lalu. Endapan dari material pasir dan batuan yang dibawa air dari puncak Gunung Merapi membuat sungai Code mengalami pendangkalan dan mengurangi kapasitas tampungan sehingga rawan akan terjadinya aliran lahar.

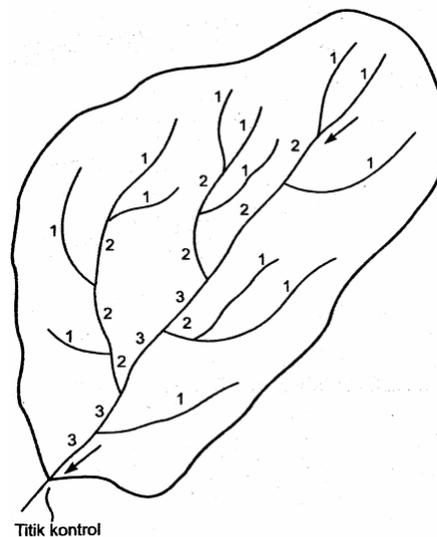
2.3. Landasan Teori

2.3.1. Daerah Aliran Sungai (DAS)

Suatu DAS adalah daerah yang dianggap sebagai wilayah dari suatu titik tertentu pada suatu sungai dan dipisahkan dari DAS-DAS di sebelahnya oleh suatu pembagi (*divide*), atau punggung bukit/gunung yang dapat ditelusuri pada peta topografi. Semua air permukaan yang berasal dari daerah yang dikelilingi oleh pembagi tersebut dialirkan melalui titik terendah pembagi, yaitu tepat yang dilalui oleh sungai utama pada DAS yang bersangkutan (Linsley dan Franzini, 1979).

DAS ditentukan dengan menggunakan peta topografi yang dilengkapi dengan garis-garis kontur. Untuk maksud tersebut dapat digunakan peta topografi dengan skala 1:50.000, yang dapat diperoleh dari Direktorat Geologi, Dinas Topografi Angkatan Darat atau instansi lain. Garis-garis kontur dipelajari untuk

menentukan arah dari limpasan permukaan. Limpasan berasal dari titik-titik tertinggi dan bergerak menuju titik-titik yang lebih rendah dalam arah tegak lurus dengan garis-garis kontur. Daerah yang dibatasi oleh garis yang menghubungkan titik-titik tertinggi tersebut adalah DAS. Gambar 2.1 menunjukkan contoh bentuk DAS. Garis yang mengelilingi DAS tersebut merupakan titik-titik tertinggi. Air hujan yang jatuh di dalam DAS akan mengalir menuju sungai utama yang ditinjau, sedang yang jatuh di luar DAS akan mengalir ke sungai lain di sebelahnya. Luas DAS diperkirakan dengan mengukur daerah itu pada peta topografi. Luas DAS sangat berpengaruh terhadap debit sungai. Pada umumnya semakin besar DAS, maka besar jumlah limpasan permukaan dan semakin besar aliran permukaan atau debit sungai (Triatmodjo, 2008).

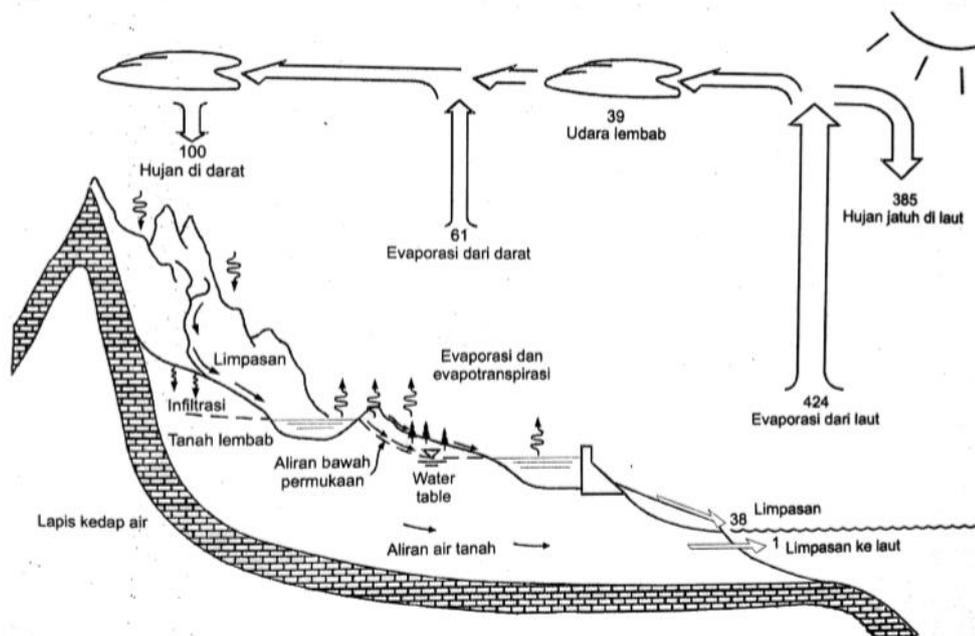


Gambar 2.2 Jaringan sungai dan tingkatannya

2.3.2. Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi merupakan kontinyu dimana air bergerak dari bumi ke atmosfer dan kemudian kembali ke bumi lagi. Pada gambar 2.2 menunjukkan komponen-komponen dari siklus hidrologi. Neraca air tahunan diberikan dalam nilai relatif terhadap hujan yang jauh di daratan (100%). Air di permukaan tanah, sungai, danau dan laut menguap ke udara. Uap air tersebut bergerak dan naik ke atmosfer, yang kemudian mengalami kondensasi dan berubah menjadi titik-titik air yang berbentuk awan. Selanjutnya titik-titik air tersebut jatuh sebagai hujan ke permukaan laut dan daratan. Hujan yang jatuh sebagian tertahan oleh tumbuhan-tumbuhan (intersepsi) dan selebihnya sampai ke permukaan tanah. Sebagian air

hujan yang sampai ke permukaan tanah akan meresap ke dalam tanah (infiltrasi) dan sebagian lainnya mengalir di atas permukaan tanah (aliran permukaan atau *surface runoff*) mengisi cekungan tanah, danau dan masuk ke sungai dan akhirnya mengalir ke laut. Air yang meresap ke dalam tanah sebagian mengalir di dalam tanah (perkolasi) mengisi air tanah yang kemudian keluar sebagai mata air atau mengalir ke sungai. Akhirnya aliran air di sungai sampai ke laut. Proses tersebut berlangsung terus menerus yang disebut dengan siklus hidrologi (Triatmodjo, 2008).



Gambar 2.3 Siklus Hidrologi (Triatmodjo, 2008)

2.3.3. Infiltrasi

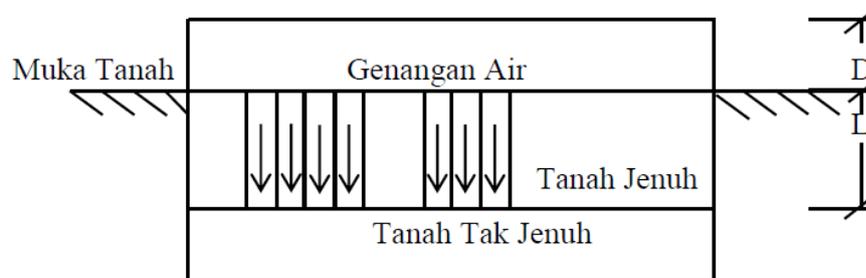
Infiltrasi adalah aliran air ke dalam tanah melalui permukaan tanah. Di dalam tanah air mengalir dalam arah lateral, sebagai aliran antara (*interflow*) menuju mata air, danau dan sungai, atau secara vertical, yang dikenal dengan perkolasi (*percolation*) menuju air tanah (Triatmodjo, 2008). Pada umumnya air akan meresap ke dalam tanah (infiltrasi) dan selebihnya akan menjadi limpasan permukaan. Air masuk ke dalam tanah melalui pori-pori tanah karena adanya gaya gravitasi dan gaya kapiler. Tanah dapat menyerap air pada waktu tertentu itu tergantung pada karakteristik tanah seperti tekstur tanah, hidrolis konduktivitas, struktur tanah, tutupan vegetasi, dan lain-lain (Dagadu dan Nimbalkar, 2012).

a. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Infiltrasi

Menurut Triadmodjo (2008) laju infiltrasi dan kapasitas infiltrasi di suatu daerah dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

1. Kedalaman genangan dan tebal lapis penuh

Pada gambar 2.4 air yang tergenang di atas permukaan tanah terinfiltrasi ke dalam tanah, yang menyebabkan suatu lapisan di bawah permukaan tanah menjadi jenuh air. Apabila tebal dan lapisan jenuh air adalah L , dapat dianggap bahwa air mengalir ke bawah melalui sejumlah tabung kecil. Aliran melalui lapisan tersebut serupa dengan aliran melalui pipa. Kedalaman genangan di atas permukaan tanah (D) memberikan tinggi tekanan pada ujung atas tabung, sehingga tinggi tekanan menyebabkan aliran $D+L$. tahanan terhadap aliran yang diberikan oleh tanah adalah sebanding dengan tebal lapis jenuh air L . pada awal hujan, dimana L adalah kecil disbanding D , tinggi tekanan adalah besar disbanding tahanan terhadap aliran, sehingga air masuk ke dalam tanah dengan cepat. Sejalan dengan waktu, L bertambah panjang sampai melebihi D , sehingga tahanan terhadap aliran semakin besar. Pada kondisi tersebut kecepatan infiltrasi berkurang. Apabila L sangat lebih besar daripada D , perubahan L mempunyai pengaruh yang hamper sama dengan gaya tekanan dan hambatan, sehingga laju infiltrasi hamper konstan.



Gambar 2.4 Genangan pada permukaan tanah

2. Kelembaban tanah

Jumlah kadar air tanah mempengaruhi kapasitas infiltrasi. Ketika air jatuh pada tanah kering, permukaan atas dari tanah tersebut menjadi basah, sedang bagian bawahnya relative masih kering. Dengan demikian terdapat perbedaan yang besar dari gaya kapiler antara permukaan atas tanah dan yang ada di bawahnya. Karena adanya perbedaan tersebut, maka terjadi gaya kapiler yang

bekerja bersamaan dengan gaya berat, sehingga air bergerak ke bawah (infiltrasi) dengan cepat.

Dengan bertambahnya waktu, permukaan tanah menjadi basah, sehingga perbedaan gaya kapiler berkurang, sehingga infiltrasi berkurang. Selain itu, ketika tanah menjadi basah koloid yang terdapat dalam tanah akan mengembang dan menutupi pori-pori tanah, sehingga mengurangi kapasitas infiltrasi pada periode awal hujan.

3. Pemampatan oleh hujan

Ketika hujan jatuh di atas tanah, butir tanah mengalami pemadatan oleh butiran air hujan. Pemadatan tersebut mengurangi pori-pori tanah yang berbutir halus (seperti lempung), sehingga dapat mengurangi kapasitas infiltrasi. Untuk tanah pasir, pengaruh tersebut sangat kecil.

4. Penyumbatan oleh butir halus

Ketika tanah sangat kering, permukaannya sering terdapat butiran halus. Ketika hujan turun dan infiltrasi terjadi, butiran halus tersebut terbawa masuk ke dalam tanah, dan mengisi pori-pori tanah, sehingga mengurangi kapasitas infiltrasi.

5. Tanaman penutup

Banyaknya tanaman yang menutupi permukaan tanah, seperti rumput atau hutan, dapat menaikkan kapasitas infiltrasi tanah tersebut. Dengan adanya tanaman penutup, air hujan tidak dapat memampatkan tanah, dan juga akan terbentuk lapisan humus yang dapat menjadi sarang/tempat hidup serangga. Apabila terjadi hujan lapisan humus mengembang dan lubang-lubang (sarang) yang dibuat serangga akan menjadi sangat permeable. Kapasitas infiltrasinya bias jauh lebih besar daripada tanah yang tanpa penutup tanaman.

6. Topografi

Kondisi topografi juga mempengaruhi infiltrasi. Pada lahan dengan kemiringan besar, aliran permukaan mempunyai kecepatan besar sehingga air kekurangan waktu untuk infiltrasi. Akibatnya sebagian besar air hujan menjadi aliran permukaan. Sebaliknya, pada lahan yang datar air menggenang sehingga mempunyai waktu cukup banyak untuk infiltrasi.

7. Intensitas hujan

Intensitas hujan juga berpengaruh terhadap pasitas infiltrasi. Jika intensitas hujan I lebih kecil dari kapasitas infiltasi, maka laju infiltrasi aktual adalah sama dengan intensitas hujan. Apabila intensitas hujan lebih besar dari kapasitas infiltrasi, maka laju infiltrasi aktual sama dengan kapasitas infiltrasi.

b. Kapasitas Infiltrasi

Air hujan yang terkumpul di atas permukaan tanah, air tersebut akan terinfiltrasi melalui permukaan dan masuk ke dalam tanah dengan laju infiltrasi awal yang nilainya tergantung pada kadar air tanah saat itu. Dengan berlanjutnya huna, laju infiltrasi berkurang karena tanah menjadi lebih basah. Laju infiltrasi sebagai fungsi waktu diberikan oleh Horton (1940) dalam persamaan dan gambar berikut:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan:

f_t = kapasitas infiltrasi pada saat ke t

f_0 =kapasitas infiltrasi awal

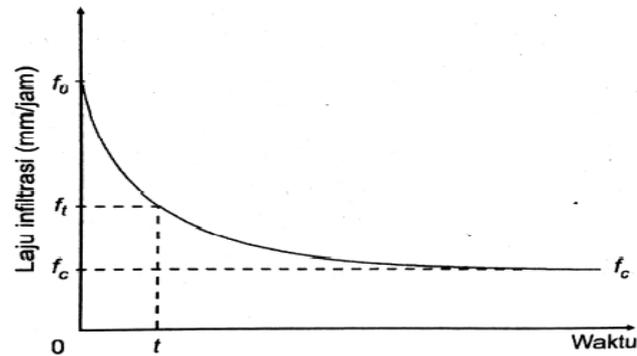
f_c = kapasitas infiltrasi konstan, yang tergantung pada tipe tanah

k = konstanta yang menunjukkan laju pengurangan kapasitas infiltrasi.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa apabila suplai hujan melampaui kapasitas infiltrasi, infiltrasi berkurang secara eksponensial. Kostanta k merupakan fungsi tekstur permukaan. Jika pada permukaan ada tanaman nilai k kecil, sedangkan jika tekstur permukaan halus seperti tanah gundul nilai tersebut besar. Parameter f_0 dan f_c adalah fungsi jenis tanah dan tutupan. Untuk tanah berpasir atau berkerikil nilai tersebut tinggi, sedangkan tanah berlempung yang gundul nilainya kecil, dan apabila permukaan tanah ada rumput nilainya bertambah. Jumlah total air yang terinfiltrasi pada suatu periode tergantung pada laju infiltrasi dan fungsi waktu. Apabila laju infiltrasi pada suatu saat adala $f(t)$, maka infiltrasi kumulatif atau jumlah air yang terinfiltrasi adalah $F(t)$. Laju infiltrasi dan jumlah air yang terinfiltrasi adalah:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \dots\dots\dots(2.3)$$



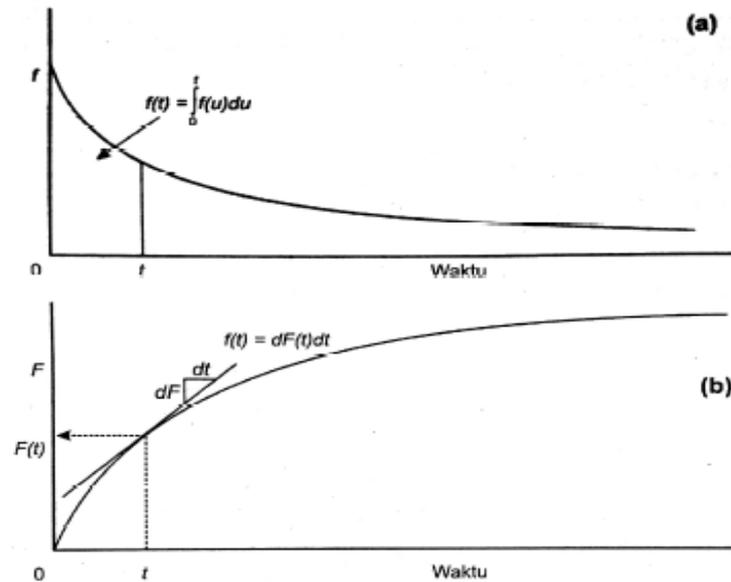
Gambar 2.5 Kapasitas infiltrasi sebagai fungsi waktu (Triatmodjo, 2008)

Persamaan (2.3) menunjukkan bahwa jumlah air yang terinfiltrasi $F(t)$ merupakan integral dari laju infiltrasi, dengan kata lain sama dengan luasan di bawah kurva $f(t)$ seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.6.a. jumlah air yang terinfiltrasi tersebut adalah sama dengan volume air yang dituangkan dalam infiltrometer. Persamaan (2.2) adalah persamaan diferensial yang menunjukkan laju infiltrasi $f(t)$. laju infiltrasi merupakan turunan dari infiltrasi kumulatif $F(t)$. dengan kata lain, laju infiltrasi $f(t)$ adalah sama dengan kemiringan kurva $F(t)$ pada waktu t (gambar 2.6.b). apabila laju infiltrasi diberikan oleh persamaan (2.1), maka persamaan (2.3) menjadi:

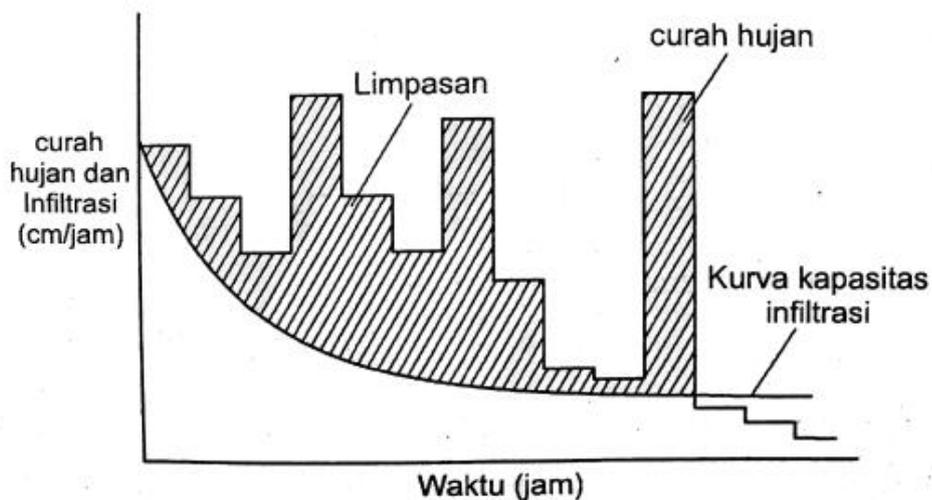
$$F(t) = \int_0^t f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} dt$$

$$F(t) = f_c t + \frac{1}{k} (f_0 - f_c)(1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots(2.4)$$

Seperti telah dijelaskan di depan bahwa air hujan yang jatuh di permukaan tanah sebagian menguap, sebagian lainnya terinfiltrasi dan sisanya menjadi limpasan permukaan. Hujan yang berubah menjadi aliran permukaan disebut juga hujan efektif atau hujan lebihan (*excess rainfall*). Untuk hujan dengan intensitas tinggi dan durasi singkat, kehilangan air karena penguapan adalah kecil dibanding dengan infiltrasi. Air hujan yang berubah menjadi aliran permukaan dapat diperkirakan dengan mengurangkan kapasitas infiltrasi terhadap intensitas hujan (Gambar 2.7) dalam gambar tersebut, bagian yang diarsir adalah bagian dari hujan yang berubah menjadi aliran permukaan, yaitu curah hujan dikurangi dengan kapasitas infiltrasi.



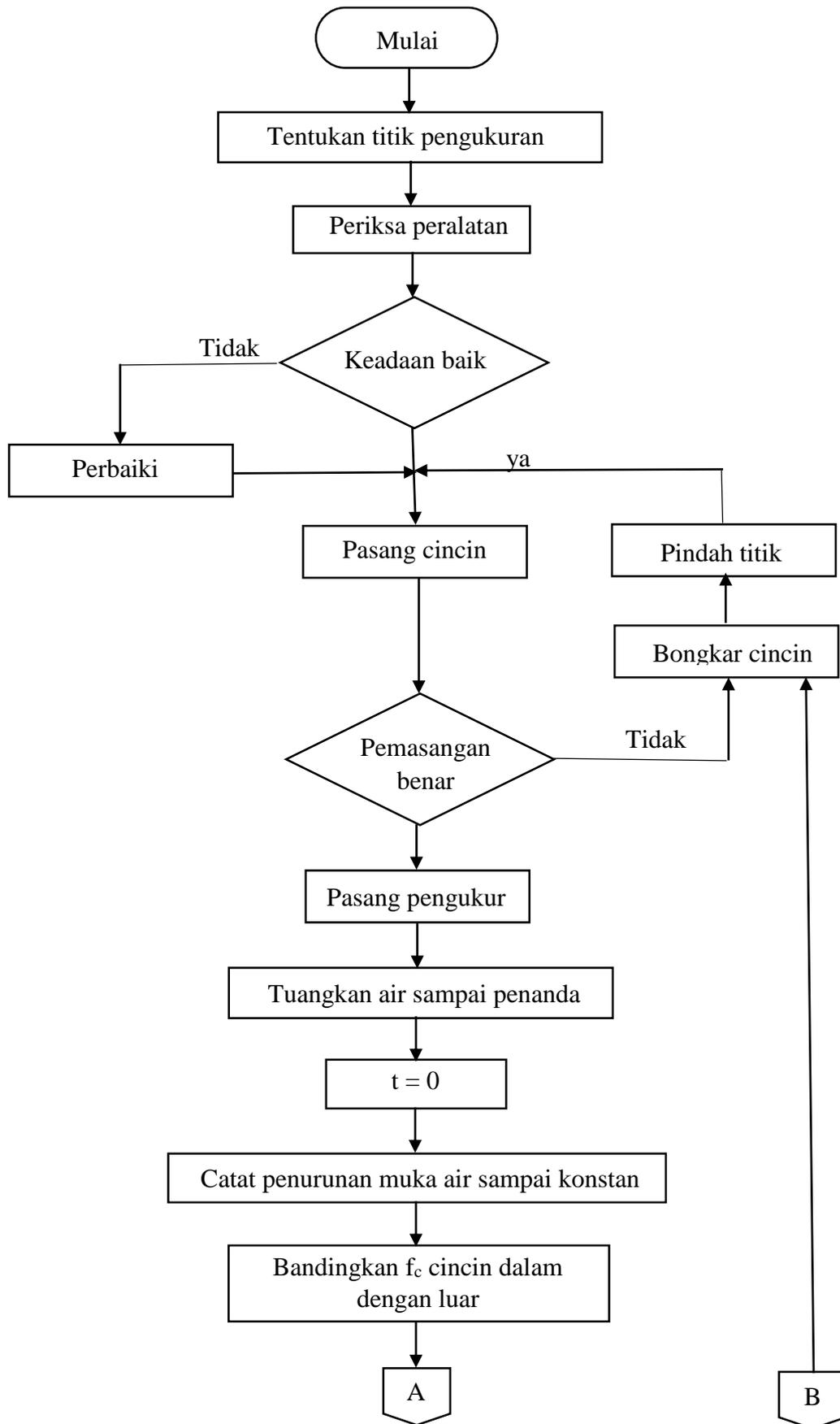
Gambar 2.6 Kapasitas infiltrasi dan infiltrasi kumulatif (Triadmodjo, 2008)

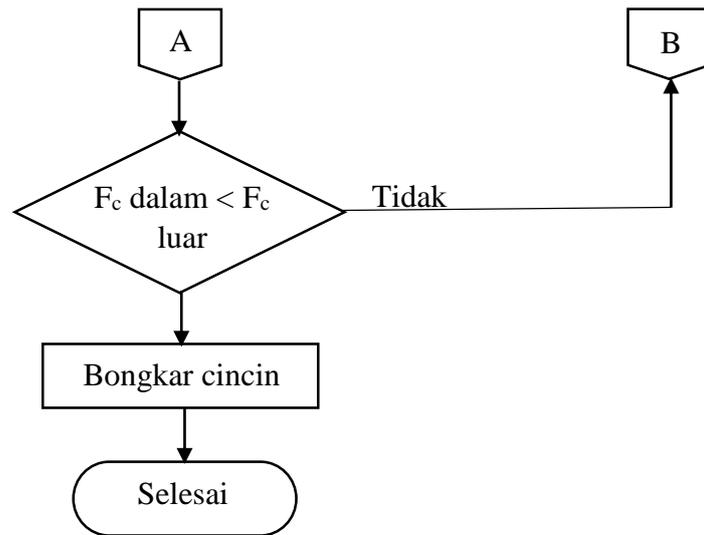


Gambar 2.7 Kapasitas infiltrasi dan intensitas hujan (Triatmodjo, 2008)

c. Pengukuran Infiltrasi

Pengukuran laju infiltrasi ini mengacu pada SNI 7752 (BSN, 2012) tentang tata cara pengukuran infiltrasi di lapangan menggunakan infiltrometer cincin ganda. Cincin ganda ini terbuat dari besi, logam campuran, atau baja setebal 3 mm dengan ujung bawah diruncingkan. Cincin ini dengan tinggi 500 mm, diameter cincin dalam 300 mm dan diameter cincin luar antara 450 mm sampai dengan 600 mm. Berikut adalah skema pengukuran infiltrasi lapangan menggunakan cincin ganda seperti yang tercantum dalam SNI 7752 (BSN, 2012):





Gambar 2.8 Bagan alir pengujian infiltrasi lapangan menggunakan metode cincin ganda

Pengukuran infiltrasi menggunakan cincin ganda memiliki beberapa metode yaitu pembacaan volume dan penurunan tinggi muka air.

a. Pembacaan volume

Pengukuran laju infiltrasi berdasarkan volume air dilakukan dengan mengukur volume air yang ditambahkan tiap selang waktu. Pengukuran volume dapat dilakukan menggunakan gelas ukur, tabung mariotte, atau silinder transparan berskala. Berikut adalah langkah-langkah dalam pengukuran laju infiltrasi:

1. Pada saat mulai pengukuran waktu $t=0$ dicatat pada kolom 1 formulir pengukuran infiltrasi cincin ganda (lihat Lampiran)
2. Ukur volume air yang ditambahkan pada cincin dalam untuk menjaga tinggi muka air pada tiap selang waktu. Catat pada formulir pengukuran kolom ke-4.
3. Pada cincin dalam dan luar tambahkan air agar tinggi muka air kembali sama tiap rentang waktu yang ditentukan. Volume air yang ditambahkan dicatat pada formulir pengukuran kolom 5.
4. Rentang waktu pengukuran dicatat pada kolom 2 dan selisih antar pembacaan rentang waktu dicatat dalam kolom 3. Waktu yang ditentukan yaitu tiap 1 menit pada 10 menit pertama, tiap 2 menit pada menit ke 10 sampai dengan menit ke 30, tiap 5 menit samapi dengan

10 menit pada menit ke 30 sampai dengan menit ke 60. Kemudian, tiap 15 menit sampai dengan 30 menit sampai diperoleh laju yang relatif konstan.

5. Dari pengukuran ini didapat nilai F' dari data volume air yang ditambahkan pada cincin infiltrometer tiap rentang waktu pengukuran menjadi laju infiltrasi dengan persamaan:

$$F' = \left[\frac{\Delta V_c}{A_c \times \Delta t} \right] \times 60 \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan:

F' = laju infiltrasi koreksi (cm/jam)

ΔV_c = volume air yang ditambahkan pada cincin infiltrometer untuk menjaga muka air konstan tiap rentang waktu (cm³)

A_c = luasan dasar cincin dalam/luar

Δt = rentang waktu pengukuran (menit)

6. Hasil pengukuran laju infiltrasi cincin dalam dicatat pada formulir pengukuran kolom 8 dan laju infiltrasi cincin luar dicatat pada formulir pengukuran kolom 9.
7. Hasil analisis diplot pada kertas grafik antara t dari formulir pengukuran kolom 2 sebagai sumbu x dan sumbu y laju infiltrasi dari formulir pengukuran kolom dan dan kolom 9.

b. Pengukuran penurunan tinggi muka air

Berikut adalah langkah-langkah pengukuran laju infiltrasi berdasarkan perubahan tinggi muka air:

1. Pada saat mulai pengukuran waktu $t=0$ dicatat pada kolom 1 formulir pengukuran infiltrasi cincin ganda (lihat Lampiran)
2. Cincin dalam dan luar ditambahkan air yang diukur menyamakan tinggi muka air. Catat pada formulir pengukuran kolom ke 6.
3. Setiap rentang waktu yang ditentukan amati perubahan tinggi muka air pada ruang antar cincin. Catat perubahan tinggi muka air pada formulir pengukuran kolom 7.
4. Rentang waktu pengukuran dicatat pada kolom 2 dan selisih antar pembacaan rentang waktu dicatat dalam kolom 3. Waktu yang ditentukan yaitu tiap 1 menit pada 10 menit pertama, tiap 2 menit pada

menit ke 10 sampai dengan menit ke 30, tiap 5 menit samapi dengan 10 menit pada menit ke 30 sampai dengan menit ke 60. Kemudian, tiap 15 menit sampai dengan 30 menit sampai diperoleh laju yang relatif konstan.

5. Jika memungkinkan bagian atas cincin di tutup untuk menghindari penguapan selama rentang pengukuran.
6. Dari pengukuran ini didapat nilai F' dari data volume air yang ditambahkan pada cincin infiltrometer tiap rentang waktu pengukuran menjadi laju infiltrasi dengan persamaan:

$$F' = \left[\frac{\Delta h_c}{A_c \times \Delta t} \right] \times 60 \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan:

F' = laju infiltrasi koreksi (cm/jam)

Δh_c = perubahan tinggi muka air tiap rentang waktu (cm)

A_c = luasan dasar cincin dalam/luar

Δt = rentang waktu pengukuran (menit)

7. Perhitungan laju infiltrasi dari cincin dalam dicatat pada formulir pengukuran kolom 8 dan laju infiltrasi dari cincin luar dicatat pada formulir pengukuran 9.
8. Untuk mengetahui nilai kapasitas infiltrasi dalam satuan m/s, nilai f yang diperoleh dari persamaan (2.9) atau (2.10) dikalikan nilai konversi sebagai berikut.

$$F_{\left(\frac{m}{s}\right)} = \left[\frac{1}{36} \right] \times 10^{-4} \times f_{\left(\frac{cm}{jam}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

9. Plot pada kertas grafik antara t dari formulir pengukuran kolom 2 sebagai sumbu x dan laju infiltrasi dari formulir pengukuran kolom 8 dan kolom 9 sebagai sumbu y.

2.3.4. Kepadatan Tanah Lapangan

Pengukuran kepadatan tanah lapangan dengan menggunakan metode *sand cone*. *Sand cone* adalah salah satu alat untuk menentukan kepadatan dari lapisan tanah atau perkerasan yang telah dipadatkan, hasilnya didapat setelah contoh material yang didapat di lapangan diolah di laboratorium. Metode pengujian ini

meliputi persyaratan pengujian tanah yang mempunyai partikel berbutir tidak lebih dari 5 cm (Anthony, 2003).

Dalam SNI 03-2828 (BSN, 1992) dijelaskan tata cara perhitungan kepadatan tanah lapangan menggunakan konus pasir yaitu:

a. Perhitungan kepadatan tanah lapangan

Kepadatan tanah di lapangan dinyatakan dengan berat volume kering, yaitu:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1+w} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana,

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan:

γ_b = berat volume tanah dalam kondisi kadar air w

w = kadar air

W = berat tanah basah dari lubang = $W_8 - W_7$

V = volume tanah = volume lubang = volume pasir yang mengisi lubang, yaitu:

$$V = V_{ph} = \frac{W_p}{\gamma_p} = \frac{W_6 - W_9 - W_{pc}}{\gamma_p} \dots\dots\dots(2.10)$$

maka,

$$\gamma_b = \gamma_p \left(\frac{W_9 - W_8}{W_6 - W_7 - W_{pc}} \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

berat volume kering tanah adalah:

$$\gamma_d = \left[\frac{\gamma_p}{1+w} \right] \left(\frac{W_9 - W_8}{W_6 - W_7 - W_{pc}} \right) \dots\dots\dots(2.12)$$

kepadatan tanah relatif

$$R = \frac{\gamma_d}{\gamma_d(maks)} \times 100\%$$

b. Kalibrasi berat volume pasir dan volume kerucut pasir

Untuk menentukan berat volume pasir pada setiap pengujian mengikuti persamaan berikut:

Volume botol (termasuk lubang sebelum katup)

$$V_{jar} = \frac{W_2 - W_1}{\rho_w} \dots\dots\dots(2.13)$$

Rapat massa air dapat diasumsikan $\rho_w = 1$

Berat volume pasir ditentukan dengan persamaan

$$\gamma_p = \left(\frac{W_3 - W_1}{V_{jar}} \right) \times g \dots\dots\dots(2.14)$$

g = percepatan gravitasi = 9,81 m/s²

dengan :

W_1 = berat botol + kerucut

W_2 = berat pasir + kerucut + air

W_3 = berat botol + pasir penuh

W_4 = berat botol + pasir secukupnya

W_5 = berat botol + sisa pasir

W_6 = berat botol + pasir

W_7 = Berat botol + sisa pasir

W_8 = Berat kaleng

W_9 = Berat kaleng + tanah

$W_p = W_3 - W_1$

$W_{pc} = W_4 - W_5$

$W_s = W_9 - W_8$

2.3.5. Permeabilitas

Permeabilitas adalah sifat bahan berpori yang memungkinkan air atau cairan lainnya untuk lolos atau merembes melalui hubungan antar pori (Muntohar, 2014). Mudah atau sukarnya air mengalir melalui pori-pori tanah tergantung dari besar atau kecilnya ukuran pori pori tanah. Besar atau kecilnya pori-pori tanah akan dipengaruhi oleh ukuran butir-butir tanah dan kepadatan tanah. Suatu tanah yang mudah dilalui atau diresapi air disebut tanah yang permeable, sebaliknya tanah yang sukar dilalui atau diresapi air disebut tanah *impervious* (rapat air).

Nilai dari permeabilitas tanah dinyatakan nilai oleh koefisien (K), koefisien permeabilitas (K) bervariasi tergantung jenis tanahnya (Tabel 2.1) dalam pengujian permeabilitas apabila peresapan air ke dalam tanah cepat maka dilakukan pembacaan tiap penurunan muka air sedalam 10 cm, sebaliknya jika penurunan lambat maka pembacaan diambil setiap 5 menit selama ± 1 jam (Hardiyatmo, 2001).

Tabel 2.1 Nilai konstanta permeabilitas (Hardiyatmo, 2001)

No.	Jenis Tanah	K (cm/dt)	Nama
1	Kerikil	>0,1	<i>High Permeability</i>
2	Kerikil halus/pasir	0,001 - 0,1	<i>Medium Permeability</i>
3	Pasir sangat halus	0,0001 - 0,1	<i>Medium Permeability</i>
4	Pasir lanau	$10^{-5} - 10^{-3}$	<i>Low Permeability</i>
5	Lanau tidak padat	$10^{-5} - 10^{-3}$	<i>Low Permeability</i>
6	Lanau lempung	$10^{-7} - 10^{-5}$	<i>Very Low Permeability</i>
7	Lempung tak murni	$10^{-7} - 10^{-5}$	<i>Very Low Permeability</i>
8	Lempung	>10	<i>Impervious rapat air</i>

Aliran air yang bergerak dalam tanah hampir selalu berjalan secara linear akan di anggap aliran air "Linear" yaitu setiap partikel air bergerak sepanjang jalur dengan lintasan garis yang teratur dan tidak memotong jalur-jalur partikel lain.

Dalam hal ini kecepatan aliran dalam tanah mengikuti hukum Dancy yang menyatakan kecepatan air berbanding lurus dengan koefisien permeabilitas tanah dan gradien hidrolik.

$$V = K \times l \dots\dots\dots (2.15)$$

$$K = V/l \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan:

V = Koefisien air (L/detik)

K = Koefisien permeabilitas tanah (L/detik)

L = Gradien hidrolik

Ditinjau dari keadaan penyerapan

1. Pada waktu dt air turun $= dt \times cm$
2. Volume air akan berkurang $= a \times dt \times cm$
3. Detik air yang keluar

$$\begin{aligned} Q &= A \times V \times dt \\ &= A \times K \times l \times dt \\ &= A \times K \times h/L \times dt \end{aligned}$$

Maka :

$$K = \frac{d^2 L}{D^2 t} \times \ln \frac{h}{(h-c)} \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan:

- K = Koefisien permeabilitas tanah
- D = Diameter tabung alumunium (cm)
- d = Diameter tabung kaca (cm)
- L = Tabung tinggi alumunium yang masuk ke dalam tanah (cm)
- t = Waktu yang diperlukan untuk meresapkan air (detik)
- h = Tinggi awal air dalam tanah (cm)
- c = Tinggi penurunan air (cm)

Nilai K pada rumus diatas merupakan konstanta untuk tanah tertentu. Hukum Darcy tidak berlaku apabila kondisi tanah terdiri dari bahan-bahan yang berbutir kasar, hal ini mengakibatkan pengaliran air tidak lancar.

2.3.6. Kadar Air

Kadar air adalah perbandingan antara berat air dengan berat tanah kering yang dinyatakan dalam persen. Pengukuran kadar air ini menggunakan standar uji acuan ASTM D2216-10 (ASTM,2010) sebagai berikut:

1. Cawan uji dibersihkan kemudian cawan ditimbang beratnya (W_1).
2. Contoh tanah dimasukkan ke dalam cawan lalu timbang.
3. Cawan berisi tanah dimasukkan ke dalam oven pada suhu $105^\circ - 110^\circ C$ selama 16/24 jam.
4. Kemudian setelah ± 24 jam cawan berisi contoh tanah dipindahkan dari oven ke dalam desikator.
5. Setelah cawan dingin, timbang cawan berisi tanah (W_3).

6. Kadar air dalam persen dihitung dengan persamaan 2.18

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

atau

$$w = \left(\frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan:

W_1 = berat cawan (g)

W_2 = berat cawan + tanah basah (g)

W_3 = berat cawan + tanah kering (g)

2.3.7. *Double Ring Infiltrometer*

Infiltrometer merupakan suatu tabung baja selindris pendek, berdiameter besar (suatu batas kedap air lainnya) yang mengitari suatu daerah dalam tanah. Infiltrometer konsentrik yang merupakan tipe biasa, terdiri dari dua cincin konsentrik yang ditekan ke dalam permukaan tanah. Kedua cincin tersebut digenangi (karena itu disebut infiltrometer tipe genang) secara terus-menerus untuk mempertahankan tinggi yang konstan ini hanya diukur (waktu dan jumlah) pada cincin dalam. Bagian luar digunakan untuk mengurangi pengaruh batas dari tanah sekitarnya yang lebih kering. Kalau tidak, air yang terinfiltrasi dapat menyebar secara lateral di bawah permukaan tanah (Subagyo, 1990).

Ada beberapa macam infiltrometer yang dapat digunakan untuk menetapkan laju infiltrasi, yaitu *ring infiltrometer (single atau double/concentric-ring infiltrometer)*, *wellsauger hole permeameter*, *pressure infiltrometer*, *close-top permeameter*, *crust test*, *tension and disc infiltrometer*, *driper*, dan *rainfall*. Namun alat yang biasanya digunakan adalah jenis infiltrometer ganda (*double ring infiltrometer*). *Double ring infiltrometer* ini memiliki tinggi 500 mm, diameter cincin dalam 300 mm dan diameter cincin luar antara 450 mm sampai dengan 600 mm, terbuat dari besi, baja atau logam campuran setebal 3 mm dengan ujung bawah diruncingkan (BSN, 2012).

Penggunaan *ring infiltrometer* memiliki keunggulan dibandingkan dengan beberapa alat lainnya yaitu relatif murah, mudah untuk menggunakan dan menganalisis datanya, serta tidak memerlukan keterampilan yang tinggi dari penggunanya. Namun kelemahan dari *ring infiltrometer* ini sendiri adalah peluang

Pada pendekatan ini, kontrol volume kolom tanah digunakan sebagai satuan analisis. Control volume merupakan satuan analisis yang dibatasi oleh luas permukaan dan kedalaman L . air yang masuk ke dalam akan menyebabkan pertambahan kelembaban tanah dari kelembaban awal (q) pada kedalaman (L), maksimum menjadi porositas (h). pertambahan air sebagai hasil infiltrasi untuk suatu unit volume adalah $L(\eta - \theta)$ atau sama dengan infiltrasi kumulatif dalam tanah (F)

$$F(t) = L(\eta - \theta) = L\Delta\theta \dots\dots\dots(2.19)$$

Untuk menentukan kapasitas infiltrasi, hukum Darcy diaplikasikan pada zona jenuh yang berdekatan dengan permukaan tanah sebagai berikut:

$$Q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dalam kasus ini nilai q (*Darcy flux*) seluruh kedalaman adalah konstan, dan sama dengan $-f$:

$$f = K \left[\frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \right] \dots\dots\dots(2.21)$$

Jika Ψ adalah *suction head* tanah untuk *wetting front*, h_1 adalah *head* permukaan sama dengan kedalaman genangan (h_0), dan h_2 adalah *head* tanah yang kering dibawah *wetting front*. *Head* (h) adalah penjumlahan *suction head* (Y) dan *gravity head* (z), maka:

$$h_2 = -\Psi - L$$

Hukum Darcy untuk sistem ini adalah

$$\begin{aligned} f &= K \left[\frac{h_0 - (-\Psi - L)}{L} \right] \\ f &\approx K \left[\frac{\Psi + L}{L} \right] \dots\dots\dots(2.22) \end{aligned}$$

Persamaan di atas untuk asumsi bahwa genangan permukaan h_0 dapat diabaikan dibandingkan dengan Ψ dan L , jika h_0 tidak diabaikan dapat diasumsikan bahwa $h_0 = 0$. Persamaan 2.23 disubstitusikan ke persamaan 2.22:

$$L = \frac{F}{\Delta\theta}$$

maka diperoleh:

$$f = K \left[\frac{\Psi\Delta\theta + F}{F} \right] \dots\dots\dots(2.23)$$

saat $f = dF/dt$, persamaan 6 merupakan persamaan untuk menyatakan tingkat infiltrasi potensial (2.19). Persamaan 2.23 dapat diekspresikan sebagai persamaan diferensial dalam (F) yang tidak diketahui.

$$\frac{dF}{dt} = K \left[\frac{\Psi \Delta \theta + F}{F} \right] \dots\dots\dots (2.24)$$

Sehingga diperoleh integrasinya:

$$F(t) = \Psi \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\Psi \Delta \theta} \right) + Kt \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan,

$F(t)$ = infiltrasi kumulatif

Ψ = *suction head*

$\Delta \theta$ = selisih antara porositas (h) dengan kandungan air awal (q)

K = permeabilitas tanah

Pada persamaan 2.25 merupakan persamaan Green-Ampt untuk menghitung infiltrasi kumulatif F potensial, sedangkan tingkat infiltrasi diperoleh dari:

$$f(t) = K \left(\frac{\Psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \dots\dots\dots (2.26)$$

Untuk mendapatkan nilai F dilakukan percobaan dengan mensubstitusikan pada sisi kanan dengan rumus $F=Kt$ dan kemudian dihitung pada sisi kiri yang mana nilai percobaan disubstitusikan pada sisi kanan, dihitung sampai nilai F konstan. Nilai akhir infiltrasi kumulatif F disubstitusikan ke persamaan 2.25

Model Green-Ampt menggunakan parameter karakteristik tanah yang meliputi permeabilitas tanah K , porositas η , dan *suction head* Ψ . Berdasarkan test dari berbagai jenis tanah di laboratorium, Ψ merupakan fungsi logaritma dari saturasi efektif, S_e . jika kelembaban tanah berkurang setelah terdrainasi dinotasikan sebagai θ_r , ratio efektif saturasi setelah ada kelembaban $\theta - \theta_r$ sampai maksimum kandungan kelembaban $\mu - \theta_r$:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\mu - \theta_r} \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana $\mu - \theta_r$ adalah porositas efektif, θ_e . Porositas efektif mempunyai rentang angka $0 \leq S_e \leq 1.0$,

Tabel 2.2 Parameter tanah model Green-Ampt (Karamouz dkk., 2012)

Soil Type	Porosity η	Effective Porosity θ_e	Suction head ψ	Hydraulic Conductivity $K(\text{cm/hr})$
Sand	0.437 (0.374-0.500)	0.417 (0.354-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	11.78
Loamy sand	0.437 (0.363-0.506)	0.401 (0.329-0.437)	6.13 (1.35-27.94)	2.99
Sandy loam	0.453 (0.351-0.555)	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	1.09
Loam	0.463 (0.375-0.551)	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	0.34
Silt loam	0.501 (0.420-0.572)	0.486 (0.394-0.578)	16.68 (2.92-95.39)	0.65
Sandy clay loam	0.398 (0.332-0.464)	0.330 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108.0)	0.15
Clay loam	0.464 (0.409-0.519)	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	0.1
Silty clay loam	0.471 (0.418-0.524)	0.432 (0.347-0.517)	27.30 (5.67-131.50)	0.1
Sandy clay	0.430 (0.370-0.533)	0.321 (0.207-0.435)	23.90 (4.08-140.2)	0.06
Silty clay	0.479 (0.425-0.533)	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.4)	0.05
Clay	0.475 (0.427-0.523)	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.5)	0.03