

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Pendekatan pemodelan infiltrasi sering dibagi menjadi tiga kategori: berdasarkan fisik, perkiraan atau semi-empiris (analitis), dan empiris. Pendekatan berbasis fisik digunakan parameter yang dapat diperoleh dari air tanah, sifat dan tidak memerlukan data infiltrasi terukur. Evaluasi model semi-empiris / analitik adalah murni matematis atau grafis disebut juga semi-empirik karena prosesnya melibatkan penggunaan infiltrasi asimtomatik atau *steady state* kapasitas, tidak seperti model berbasis fisik pendekatan semi-empiris tergantung pada karakteristik air tanah. Pendekatan empiris cenderung tidak terbatas oleh asumsi kondisi tanah permukaan dan profil tanah, tetapi lebih terbatas oleh kondisi yang mereka evaluasi, oleh karena itu parameter mereka ditentukan berdasarkan data infiltrasi lapangan aktual yang diukur (Hillel dalam Igbadun dkk., 2016).

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan fisik yang di kombinasikan dengan pendekatan analitis, dalam proses penelitian dilakukan pengambilan sampel dengan pengukuran infiltrasi lapangan menggunakan peralatan infiltrasi sederhana yang disebut *Double Ring Infiltrometer* terdiri dari dua silinder konsentris yang dimasukkan ke dalam tanah sedalam 5 s/d 10 cm. Adapun acuan tentang tata cara penggunaan *Double Ring Infiltrometer* yang digunakan dalam penelitian ini adalah SNI 7752 (BSN, 2012) tentang tata cara pengukuran laju infiltrasi tanah di lapangan menggunakan infiltrometer cincin ganda. Hasil pengukuran lapangan kemudian di analisis kembali menggunakan persamaan Horton. Selain dari pengukuran infiltrasi juga dilakukan peninjauan terhadap permeabilitas, kepadatan dan kadar air tanah lapangan.

2.2 Penelitian Terdahulu

2.2.1 Infiltrasi

Infiltrasi disebut sebagai peresapan air ke dalam tanah dalam waktu tertentu, infiltrasi tanah mengacu pada kemampuan tanah untuk memungkinkan pergerakan air ke dalam melalui profil tanah, ini memungkinkan tanah untuk

menyimpan air sementara yang membuatnya ketersediaan air untuk diambil oleh akar tanaman dan organisme dalam tanah. Tingkat infiltrasi ini dapat di batasi oleh struktur tanah yang buruk dimana pada kondisi ini air tidak mudah masuk ke tanah sehingga memungkinkan air bergerak ke bawah lereng sebagai limpasan atau menjadi kolam di permukaan yang selanjutnya akan menguap, hal ini akan membuat sedikitnya air yang tersimpan di bawah tanah. (Haghnazari dkk., 2015) 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 pengkajiannya beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah faktor yang berpengaruh terhadap pengujian dan metode pengolahan data pengujian itu sendiri. Infiltrasi disuatu daerah dapat dipengaruhi oleh berbagai macam faktor dari alam seperti yang diungkap dalam penelitiannya Nurmegawati (2011) terkait infiltrasi pada hutan di sub DAS Sumani bagian hulu. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi infiltrasi diantaranya: kemiringan lereng, tekstur tanah, kandungan bahan organik, berat volume, total ruang pori, dan kadar air. Hasil yang didapat yaitu laju infiltrasi di hutan sub DAS Sumani lebih dipengaruhi oleh kadar air tanah dibandingkan sifat tanah lainnya.

Penelitian terkait faktor yang berpengaruh terhadap infiltrasi oleh Nurmegawati (2011) juga didukung Syukur (2009) mengungkap infiltrasi dan peranannya terhadap pengelolaan DAS ALLU Bangkala. Dalam penelitiannya mengkaji besar kecilnya kapasitas infiltrasi pada beberapa jenis tanah yang relatif mendominasi wilayah tersebut berupa: Aluvial kelabu, Litosol, Kompleks Litosol-Litosol, Asosiasi Mediteran dimana masing-masing dari mereka memiliki daya infiltrasi kelas sedang sampe sangat tinggi. Ayorinde dkk. (2012) juga menyebutkan kandungan fraksi dalam tanah akan mempengaruhi kapasitas dari retensi air yang masuk ke dalam suatu tanah. Selain dari faktor tanah, adanya pepohonan juga dapat mempengaruhi kapasitas *infiltrasi* (Darmayanti, 2012), dalam penelitiannya ditemukan sifat fisika tanah dan pengaruhnya terhadap model

kecepatan infiltrasi pada dominasi jenis tanaman yang ada di daerah kebun raya Purwodadi. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa tegakan mahoni, jabon, dan trembesi memiliki nilai infiltrasi yang berbeda karena nilai variabel-variabel yang mempengaruhinya juga berbeda. Penelitian sejenis juga dilakukan oleh Utaya (2008). Utaya menganalisis pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap sifat biofisika tanah dan kapasitas infiltrasi di kota Malang. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan nilai kapasitas infiltrasi dari berbagai jenis lahan yaitu: pekarangan, rerumputan, hutan kota, tegalan, dan semak belukar, pada akhirnya didapatkan kesimpulan bahwa secara signifikan jenis penggunaan lahan memberi pengaruh terhadap kapasitas infiltrasi dikarenakan berbagai macam faktor yang terdapat di masing-masing jenis penggunaan lahan seperti sifat biofisik tanah terutama biomasa akar, bahan organik total (BOT), dan jumlah cacing. Adapun hasil dari penelitian ini menjelaskan urutan nilai kapasitas infiltrasi dari tertinggi ke terendah dari masing-masing jenis penggunaan lahan yaitu: semak belukar, hutan kota, pekarangan, tegalan dan rumput. Padang rumput memiliki tingkat infiltrasi rendah karena memiliki tanah yang kurang porus jika dibandingkan dengan hutan yang memiliki banyak model tegakan pohon, ini disebabkan sistem akar adventif yang menciptakan saluran kecil yang memungkinkan air memoderisasi alirannya ke bawah profil tanah (Ayorinde dkk., 2012)

Salah satu hal yang membuat jenis penutup lahan berpengaruh pada proses infiltrasi karena adanya perbedaan suhu antara jenis penutup lahan yang satu dengan yang lain, di contohkan jenis penutup lahan disini adanya kandungan sampah yang menutupi permukaan tanah. Adanya sampah ini akan bisa mempertahankan suhu udara dan mengurangi penguapan sehingga kapasitas infiltrasi akan semakin berkurang (Priyono dkk., 2015). Hampir di semua daratan yang mengalami musim dingin memiliki tingkat infiltrasi rendah dan itu membutuhkan lebih banyak waktu untuk mencapai tingkat infiltrasi konstan, sebaliknya untuk hampir semua tutupan lahan di musim panas memiliki tingkat infiltrasi lebih tinggi dan itu membutuhkan lebih sedikit waktu mencapai konstan dibandingkan dengan musim dingin (Jejurkar & Rajurkar, 2012).

Tidak hanya dari faktor lingkungan, infiltrasi bisa juga dipengaruhi oleh larutan atau kandungan air yang meresap ke dalam tanah. Air yang bersih cenderung

akan memiliki kapasitas infiltrasi lebih besar jika dibandingkan dengan air yang memiliki kandungan partikel seperti pasir, lanau atau lempung terlarut di dalamnya, kehadiran partikel-partikel tersebut bisa menutup pori-pori dari tanah sehingga air akan lebih sulit meresap (Tuffour & Abubakar, 2015).

Seperti yang dijelaskan di atas, salah satu hal yang harus di perhatikan dalam pengkajian infiltrasi yaitu metode pengolahan data hasil pengujian infiltrasi itu sendiri. Rohmat (2009) menjelaskan tipikal kuantitas infiltrasi menurut karakteristik lahan, dengan analisis Green-Ampt. Metode ini mengembangkan pendekatan teori fisik yang dapat diselesaikan dengan Analisis Exact (*Exact Analytical Solution*) untuk menentukan nilai infiltrasi suatu daerah. Validitas 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.

Disisi lain Suhendra (2011) meneliti tentang kapasitas infiltrasi metode Horton untuk pemakaian biopori di kampus Universitas Bina Nusantara berdasarkan debit limpasan permukaan. Penelitian ini menjelaskan perbandingan hasil pengukuran lapangan infiltrasi menggunakan Biopori atau tanpa biopori, perbandingan tersebut yaitu perbandingan nilai koefisien yang di analisis menggunakan metode Horton. Selain dari analisis infiltrasi dilakukan juga analisis terhadap intensitas hujan dan analisis debit limpasan terhadap kapasitas infiltrasi yang pada akhirnya merujuk pada perhitungan jumlah lubang resapan biopori (LRB) yang dibutuhkan untuk mencegah adanya genangan.

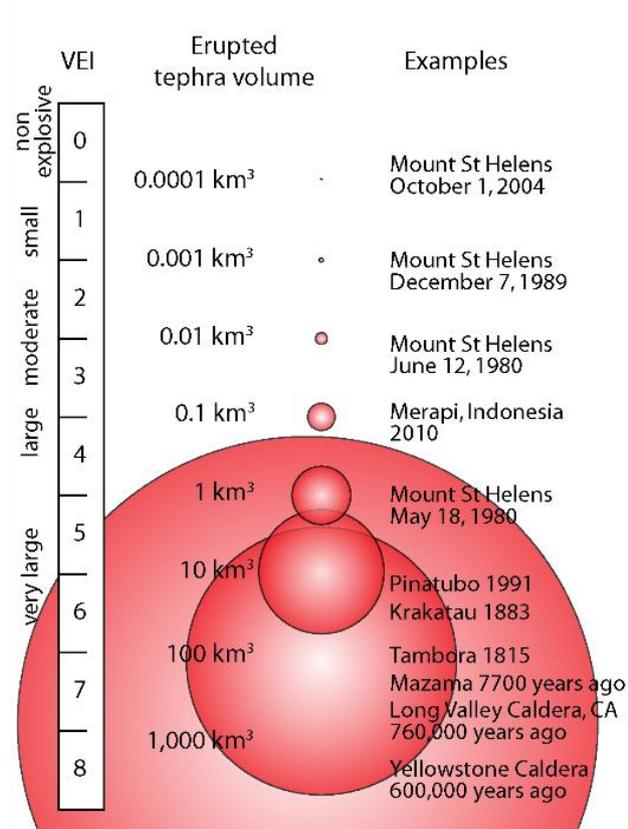
Terkait metode analisis data infiltrasi, Dagadu & Nimbalkar (2012) membandingkan beberapa hasil dari metode analisis infiltrasi pada berbagai macam kondisi tanah, metode yg dibandingkan yaitu: Horton, Green-Ampt, Kostiakov awal dan Kostiakov modifikasi. Hasil analisis di temukan bahwa nilai-nilai parameter model infiltrasi memiliki beragam bervariasi tergantung dari kondisi dan jenis tanah. Adapun korelasi dari koefisien dan perhitungan standar *error* di temukan bahwa untuk semua jenis tanah dan kondisinya Model Horton paling pas dengan tingkat koefisien korelasi dan kesalahan standar paling minimum. Dalam penelitiannya Carvalho dkk. (2015) juga menyebutkan kualitas *fitting* untuk model infiltrasi di bawah kondisi air yang dinamis menggunakan model Horton

menunjukkan nilai standar perkiraan paling minim dan menunjukkan konsistensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain.

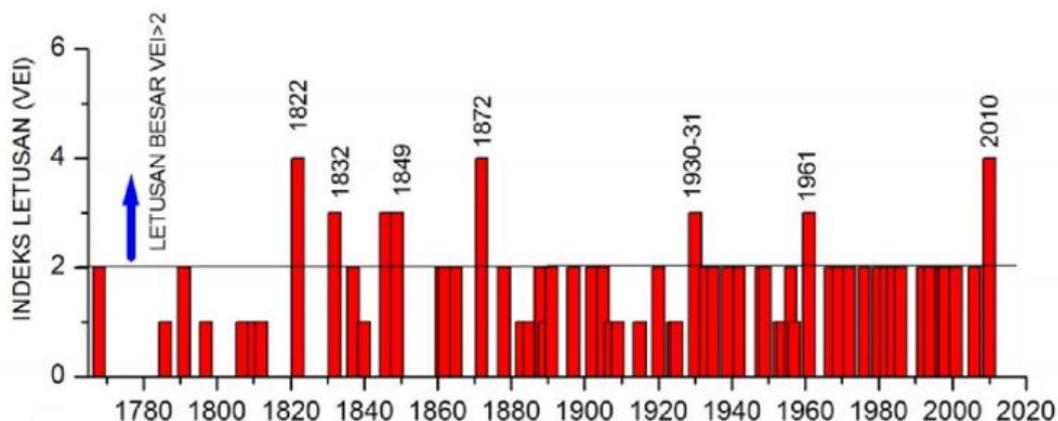
2.2.2 Gunung Merapi

Gunung Merapi terletak diantara provinsi D.I. Yogyakarta dan Jawa Tengah, gunung ini diketahui secara luas sebagai gunung api dengan aktivitas yang sangat tinggi. Aktivitas gunung api tersebut telah membangun tubuhnya membentuk tipe gunung api komposit (strato). Gunung api komposit merupakan gunung api yang tersusun oleh material hasil erupsinya sendiri membentuk susunan berlapis-lapis yang dihasilkan selama aktivitasnya. Material yang menyusunnya adalah piroklastika, koheren lava dan lahar (Mulyaningsih & Sanyoto, 2012).

Sejak tahun 1780 sampai 2010 sudah tercatat 84 kali terjadi letusan, besar kecilnya letusan tersebut diukur berdasar jumlah material semburan dari letusan disebut skala *Vulcano Explosivity Index* (VEI). Skala VEI ini di keluarkan oleh Chris Newhall dari the *United States Geological Survey*.



Gambar 2.1 *Vulcano Explosivity Index* (USGS, 2016)



(Sumber: Kementerian ESDM, 2014, & Brotopuspito dalam Marfai dkk., 2012)

Gambar 2.2 Histori letusan gunung Merapi

Gunung Merapi meletus dalam siklus pendek antara 2-5 tahun, siklus menengah dalam rentang 5-7 tahun, sedangkan siklus panjang tercatat sampai rentang 30 tahun (Rahayu dkk., 2014). Letusan skala besar dengan VEI mencapai 4 terjadi pada tahun 2010, letusan tersebut melontarkan material piroklastik sekitar 140 juta m³.

Pada erupsi Merapi tahun 2010 silam. Dampak yang di rasakan hingga bantaran sungai Winongo yang melintasi kota Yogyakarta. Karena pendangkalan Sungai Winongo yang disebabkan oleh endapan material dari erupsi Gunung Merapi, banjir lahar dingin tidak dapat dihindarkan lagi (Arlin, 2017).

Endapan material aktifitas gunung Merapi menjadi permasalahan utama jika dikaitkan dengan studi infiltrasi. Berdasar pada peta tanah *digital ArcGIS Online Update* terbaru 9 Mei 2017 (Lampiran III) yang di keluarkan Badan Pertanahan Nasional menunjukkan jenis tanah pada area DAS Winongo adalah tanah *Regosol* kelabu. Regosol kelabu merupakan jenis tanah berpasir yang mempunyai warna dominan abu-abu sampai coklat kekuningan, tanah ini tergolong masih muda yang dicirikan dengan masih di dominasi oleh bahan- bahan aslinya (misal gelas, kaca volkan, kerikil sangat halus sampai sedang) dan adanya susunan perlapisan yang berselang seling sesuai dengan kronologi hasil tumpukan aktivitas vulkan Merapi (Suharjo dkk., 2016).

2.3 Landasan Teori

2.3.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak sungainya berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan (Permen Kehutanan, 2013). Sub Daerah Aliran Sungai (Sub DAS) merupakan bagian dari DAS dimana air hujan diterima dan dialirkan melalui anak sungai ke sungai utama. Setiap DAS terbagi habis menjadi wilayah yang lebih kecil yaitu Sub DAS, apabila diperlukan maka dapat dipisahkan lagi menjadi sub-sub DAS, demikian untuk seterusnya (Sudarmadji dalam Syusanto, 2016). Morfometri DAS merupakan nilai kuantitatif dari parameter-parameter yang ada pada daerah aliran sungai.

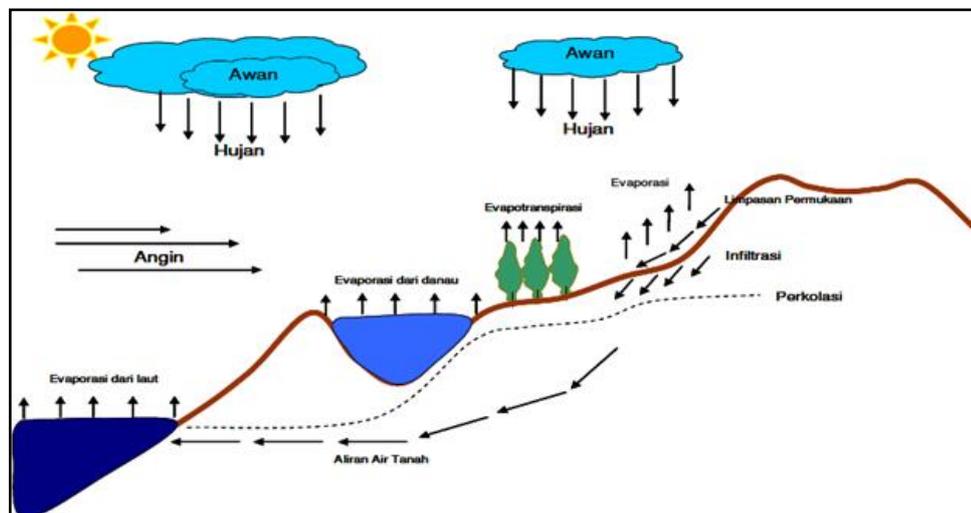
Seyhan (1993) menyebutkan bahwa perencanaan dan pengelolaan DAS membutuhkan pengetahuan tentang karakteristik fisik DAS yang merupakan parameter-parameter yang berkaitan dengan keadaan morfometri, topografi, tanah, geologi, vegetasi, penggunaan lahan, hidrologi dan manusia. Data parameter-parameter tersebut membutuhkan suatu metode pengolahan data yang efisien dan otomatis.

Salah satu solusi metode yang paling efisien adalah melakukan pemetaan dengan penginderaan jauh. Penginderaan jauh adalah teknik untuk mendapatkan informulirasi tentang obyek, wilayah atau gejala dengan cara menganalisis data yang diperoleh dari suatu alat tanpa berhubungan langsung dengan obyek peninjauan. Dewasa ini teknik pemetaan yang populer menggunakan perangkat lunak *ArcGis*. *ArcGis* melakukan pemetaan dengan bantuan Sistem Informulirasi Geografis yang selanjutnya disingkat SIG. SIG adalah suatu sistem yang berbasiskan komputer yang mempunyai kemampuan untuk menangani data yang bereferensi geografis yang mencakup: data input (pemasukan), manajemen data (penyimpanan dan pemanggilan data), analisis dan manipulasi data (Permen Kehutanan, 2013).

2.3.2 Siklus Hidrologi

Peraturan SNI 03-1724 (BSN, 1989) menyebutkan hidrologi didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari sistem kejadian air di atas, pada permukaan, dan di dalam tanah. Secara luas hidrologi meliputi pula berbagai bentuk air, termasuk transformulasi antara keadaan cair, padat, dan gas dalam atmosfer, diatas dan di bawah permukaan tanah yang di dalamnya tercakup air laut yang merupakan sumber dan menyimpan air sebagai pengaktif kehidupan di bumi ini.

Jumlah air yang ada di muka bumi ini (di atmosfer, diatas dan di bawah permukaan tanah) sebanyak $1.400 \times 10^6 \text{ km}^3$, jumlah tersebut sebagian besar merupakan air laut (air asin), Pada dasarnya air di bumi ini tetap akan tetapi mengikuti perputara dimana air bergerak dari bumi ke atmosfer dan kemudian bergerak kembali lagi ke bumi dinamakan siklus hidrologi (Triatmodjo, 2014).



Gambar 2.3 Siklus Hidrologi

Soemanto (1999) menyebutkan siklus hidrologi ini melalui proses air laut menguap karena radiasi matahari menjadi awan kemudian awan yang terjadi oleh penguapan air bergerak karena tertiuip angin. Presipitasi yang terjadi karena adanya tabrakan antara butir-butir uap air akibat desakan angin dapat berbentuk hujan atau salju. Setelah jatuh ke permukaan tanah akan menimbulkan limpasan (*run off*) yang mengalir ke sungai dan sampai di laut. Dalam usahanya mengalir kembali ke laut beberapa di antaranya masuk ke dalam tanah (infiltrasi) dan bergerak terus ke bawah (perkolasi) ke dalam daerah jenuh (*saturated zone*) yang terdapat di bawah

permukaan air tanah atau yang di namakan permukaan freatik, air di daerah ini bergerak perlahan-lahan melewati akuifer masuk ke sungai atau kadang-kadang langsung masuk kelaut.

Air yang masuk ke dalam tanah (infiltrasi) memberi hidup kepada tumbuhan dengan naik ke atas permukaan melalui akuifer diserap akar dan batang sehingga terjadi transpirasi, yaitu evaporasi (penguapan) lewat tumbuhan-tumbuhan melalui bagian stomata, air yang tertahan di permukaan (*surface detention*) sebagian besar mengalir masuk ke sungai-sungai sebagai limpasan permukaan (*surface run off*) ke dalam palung sungai.

Permukaan sungai dan danau juga mengalami penguapan (evaporasi), sehingga masih ada lagi air yang di pindahkan lagi sebagai uap. Akhirnya air yang tidak menguap ataupun mengalami infiltrasi tiba kembali ke laut lewat palung-palung sungai. Air tanah yang bergerak jauh lebih lambat mencapai laut dengan jalan keluar melewati alur-alur masuk ke sungai atau langsung menerobos ke pantai-pantai. Dengan demikian, seluruh daur telah di jalani dan kemudian akan berulang kembali.

Sehingga diketahui ada empat macam proses daur ulang hidrologi yang harus dipelajari oleh para ahli hidrologi dan ahli bangunan air, yaitu:

- a. Presipitasi
- b. Evaporasi
- c. Infiltrasi
- d. Limpasan permukaan (*surface run off*) dan limpasan air tanah (*subsurface run off*).

2.3.3 Infiltrasi

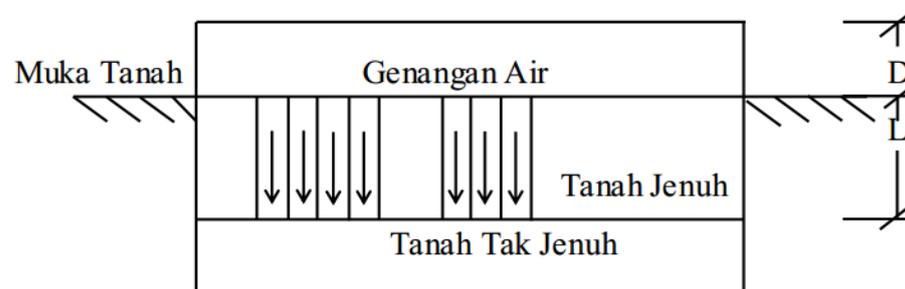
Infiltrasi adalah proses aliran air masuk ke dalam tanah melalui aliran kapiler (gerakan air ke arah vertikal), ketika air tanah di bagian atas jenuh maka kelebihan air akan mengalir ke tanah yang lebih dalam akibat gaya gravitasi selajutnya proses ini disebut perkolasi. Masuknya air ke dalam tanah tergantung pada kondisi biofisik permukaan tanah (Asdak, 2002). Mengenai sifat fisik tanah dijelaskan Winanti dalam Utaya (2008) bahwa struktur, tesktur, porositas, dan kepadatan tanah merupakan faktor utama yang menentukan besar kecilnya kapasitas infiltrasi.

2.3.3.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Infiltrasi

Menurut Triatmodjo (2014) ada beberapa faktor yang mempengaruhi laju dan kapasitas infiltrasi di suatu daerah yaitu:

1. Kedalaman genangan dan tebal lapis jenuh

Pada Gambar 2.2. air yang tergenang di atas permukaan tanah terinfiltrasi ke dalam tanah, yang menyebabkan suatu lapisan di bawah permukaan tanah menjadi jenuh air. Apabila tebal dari lapisan jenuh air adalah L , dapat di anggap ketika 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 total yang menyebabkan aliran adalah $D+L$. Tahanan terhadap aliran yang diberikan oleh tanah sebanding dengan tebal lapis jenuh air L . Pada awal hujan, nilai L lebih kecil dibanding D , tinggi tekanan adalah besar dibanding 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 , maka perubahan L mempunyai pengaruh yang hampir sama dengan gaya tekanan dan hambatan, sehingga laju infiltrasi hampir konstan.



Gambar 2.4. Genangan pada permukaan tanah

Menurut Rohmat (2009) perubahan laju infiltrasi dibagi dalam tiga tahap yaitu: (i) tahap awal, di cirikan dengan penurunan laju infiltrasi yang tajam, (ii) tahap transisi, di cirikan oleh laju infiltrasi agak landai, dan (iii) tahap akhir, di cirikan oleh penurunan laju infiltrasi yang landai. Laju infiltrasi pada setiap

tahapan mempunyai kuantitas yang berbeda, bergantung pada probabilitas hujan.

2. Kelembaban tanah

Jumlah air tanah mempengaruhi kapasitas infiltrasi. Ketika air jatuh pada tanah kering, permukaan atas dari tanah tersebut menjadi basah, sedang bagian bawahnya relatif masih kering dengan demikian terdapat perbedaan yang besar dari gaya kapiler antara permukaan atas tanah dan yang ada di bawahnya. Adanya perbedaan tersebut menyebabkan terjadinya gaya kapiler yang bekerja sama dengan gaya berat, sehingga air bergerak ke bawah (infiltrasi) dengan cepat.

Dengan bertambahnya waktu, permukaan bawah tanah menjadi basah menyebabkan perbedaan daya 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. Penampatan oleh hujan

Ketika hujan jatuh diatas 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 permeabel. Kapasitas infiltrasi bisa 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 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 kapasitas infiltrasi. Jika intensitas hujan I lebih kecil dari kapasitas infiltrasi, 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.

2.3.3.2 Kapasitas Infiltrasi

Ketika air hujan terkumpul diatas permukaan tanah, air tersebut akan terinfiltrasi melalui permukaan dan masuk ke dalam tanah dengan laju infiltrasi awal (f_o) yang nilainya tergantung pada kadar air tanah saat itu. Dengan berlanjutnya hujan, laju infiltrasi berkurang karena tanah menjadi lebih basah. Laju infiltrasi sebagai fungsi waktu di berikan oleh persamaan Horton (Triatmodjo, 2014). Dijelaskan juga pada Julianti dalam Suhendra (2011) Horton mengamati bahwa infiltrasi berawal dari suatu nilai baku f_o dan secara eksponen menurun sampai pada kondisi konstan f_c . Persamaan yang digunakan menghitung kapasitas infiltrasi metode Horton adalah:

$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-Kt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

- f = kapasitas infiltrasi (cm/jam)
- f_o = laju infiltrasi awal (cm/jam)
- f_c = laju infiltrasi konstan (cm/jam)
- K = konstanta
- t = waktu (jam)
- e = Bilangan eksponensial 2,718

Untuk memperoleh nilai konstanta K untuk melengkapi persamaan kurva kapasitas infiltrasi, maka persamaan Horton diolah sebagai berikut :

$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-Kt}$$

$$f - f_c = (f_o - f_c) e^{-Kt} \dots\dots\dots(2.2)$$

dilogaritmakan :

$$\log (f - f_c) = \log (f_o - f_c) e^{-Kt}$$

$$\log (f - f_c) = \log (f_o - f_c) - Kt \log e$$

$$\log (f - f_c) - \log (f_o - f_c) = -Kt \log e \dots\dots\dots(2.3)$$

Maka :

$$t = (- 1/(K \log e))[\log (f - f_c) - \log (f_o - f_c)]$$

$$t = (- 1/(K \log e))\log (f - f_c) + (1/(K \log e)) \log(f_o-f_c) \dots\dots\dots (2.4)$$

Menggunakan persamaan umum linier, $y = mx + c$

$$y = t$$

$$m = - 1/(K \log e)$$

$$x = \log (f - f_c)$$

$$c = (1/K \log e)\log (f_o - f_c)$$

Persamaan tersebut merupakan garis lurus dengan kemiringan m ,

$$m = \frac{-1}{k \log e} \dots\dots\dots(2.5)$$

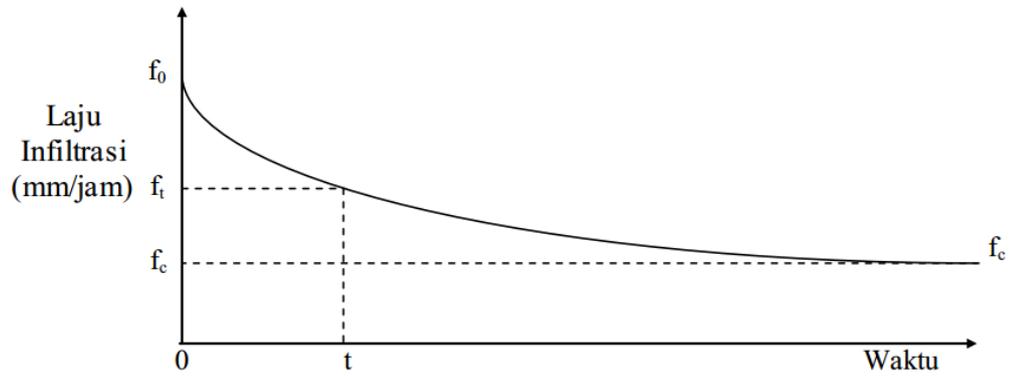
Menurut Triatmodjo (2014) nilai konstanta (K) merupakan fungsi tekstur permukaan, ketika permukaan ada tanaman nilai K kecil sedangkan jika pada lahan halus nilai K besar.

Parameter f_o dan f_c adalah fungsi jenis tanah dan tutupan. Untuk tanah berpasir atau berkerikil nilai tersebut semakin tinggi, sedangkan tanah berlempung yang gandum nilainya kecil, dan apabila permukaan 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 adalah $f(t)$, maka infiltrasi kumulatif atau jumlah air yang terinfiltrasi adalah $f_{(tot)}$. Laju infiltrasi dan jumlah air yang terinfiltrasi adalah :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \dots\dots\dots(2.6)$$

dan

$$f(t) = \int_0^t f(t)dt \dots\dots\dots (2.7)$$



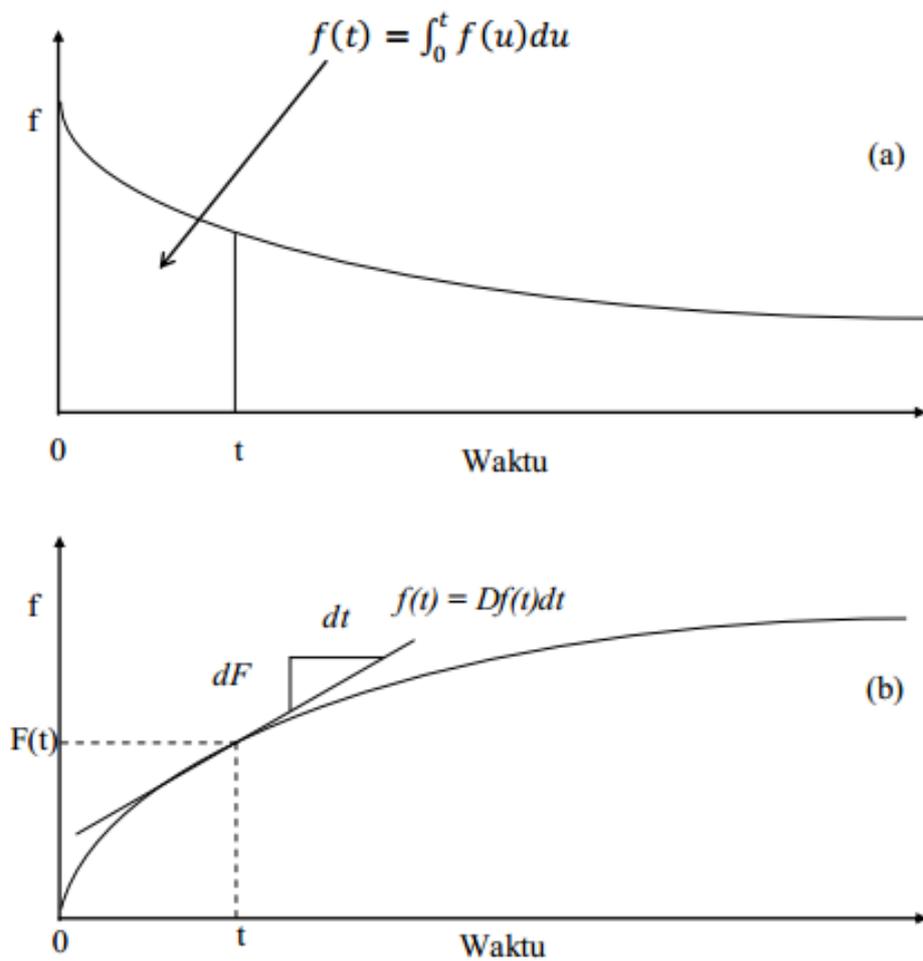
Gambar 2.5 Kapasitas infiltrasi sebagai fungsi waktu triatmodjo (2014)

Persamaan (2.7) menunjukkan bahwa jumlah air yang terinfiltrasi merupakan integral dari laju infiltrasi, dengan kata lain sama dengan luasan dibawah kurva $f(t)$ seperti ditunjukkan dalam (Gambar 2.6.a). Jumlah air yang terinfiltrasi tersebut adalah sama dengan volume total air yang di tuang dalam infiltrometer. Persamaan (2.6) 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 di berikan oleh Persamaan (2.1), maka Persamaan (2.7) menjadi:

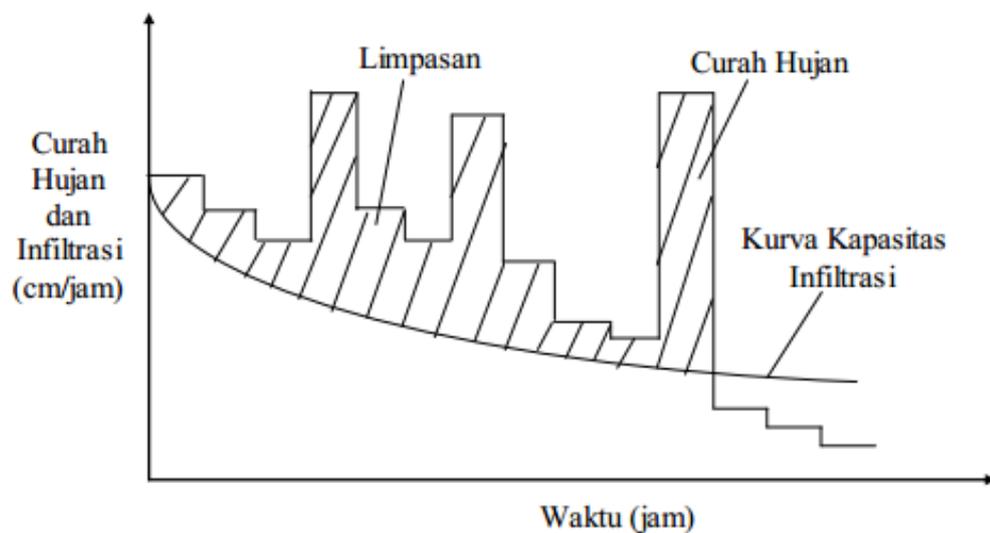
$$f(t) = \int_0^t f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

$$f(t) = f_c t + \frac{1}{k} (f_0 - f_c) (1 - e^{-kt}) \dots \dots \dots (2.8)$$

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 durasi tinggi dan singkat, kehilangan air karena penguapan adalah kecil dibanding dengan infiltrasi. Air hujan yang berubah menjadi aliran permukaan dapat di perkirakan dengan mengurangi kapasitas infiltrasi terhadap intensitas hujan (Gambar 2.7). Gambar tersebut menunjukkan bagian arsiran adalah bagian hujan yang berubah menjadi aliran permukaan, yaitu curah hujan dikurangi dengan kapasitas infiltrasi.



Gambar 2.6. Kapasitas infiltrasi dan infiltrasi kumulatif (Triatmodjo, 2014)

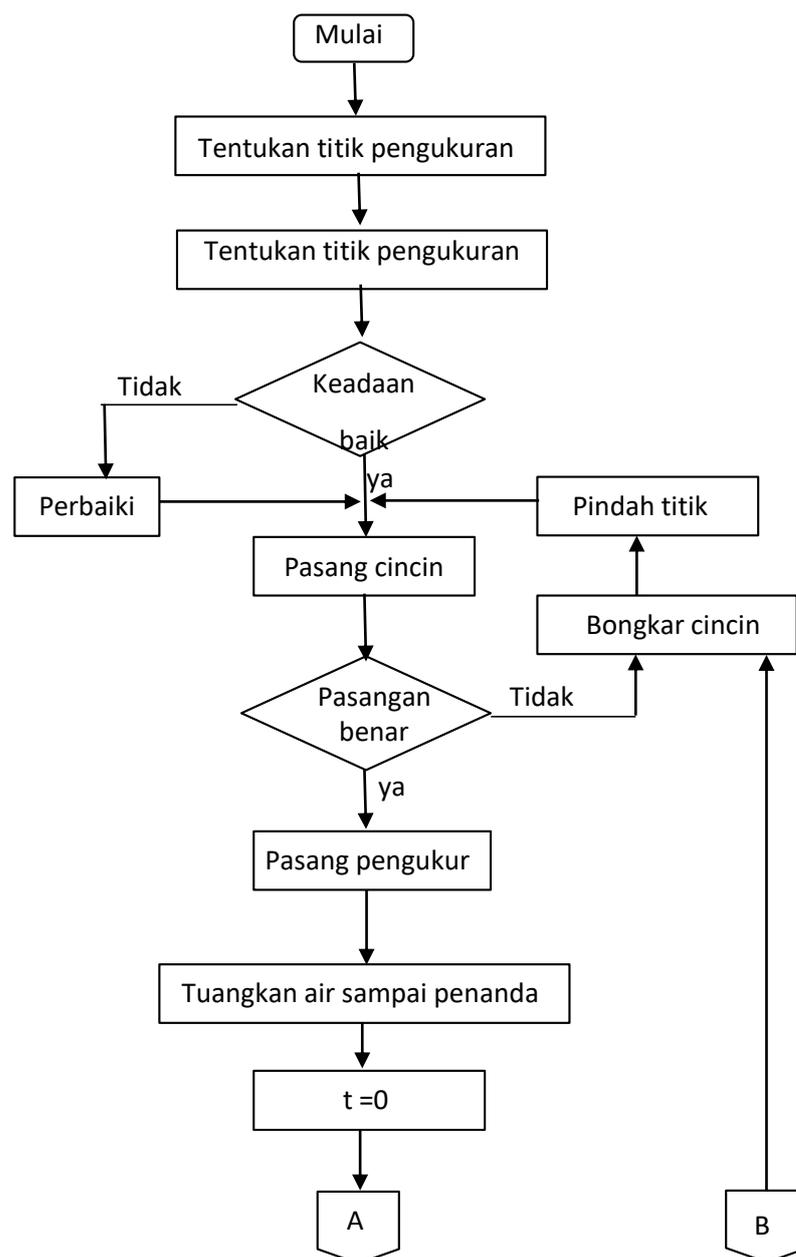


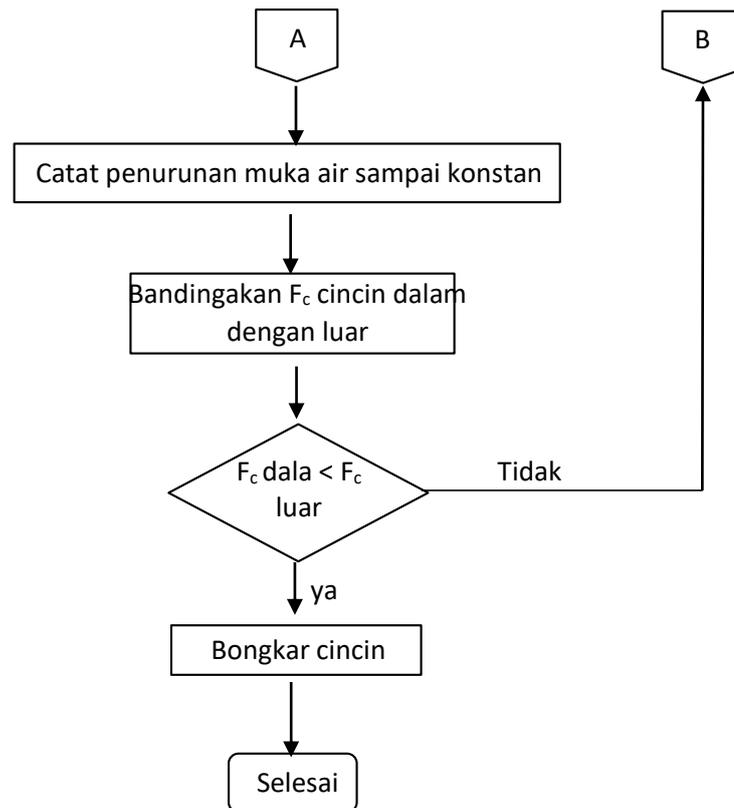
Gambar 2.7 Kapasitas infiltrasi dan intensitas hujan (Triatmodjo, 2014)

2.3.3.3 Pengukuran Infiltrasi

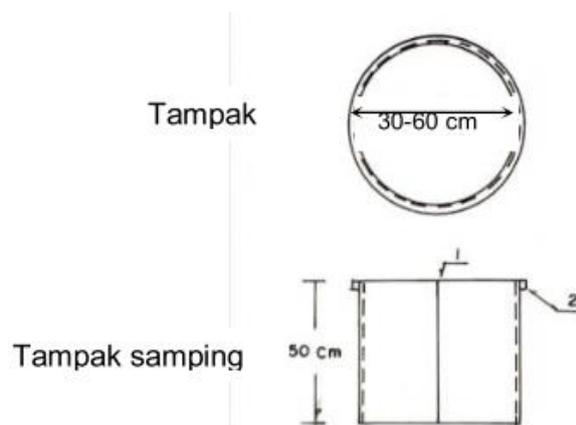
Pengukuran laju infiltrasi mengacu pada SNI 7752 (BSN, 2012) tentang tata cara pengukuran infiltrasi tanah di lapangan dengan infiltrometer cincin ganda dimana dua buah cincin silinder infiltrometer dengan tinggi 500 mm, diameter cincin dalam 300 mm dan diameter cincin luar antara 450 mm sampai dengan 600 mm, terbuat dari besi, baja atau logam campuran setebal 3 mm dengan ujung bawah diruncingkan.

Adapun skema pengukuran infiltrasi lapangan menggunakan cincin ganda seperti yang tercantum dalam SNI 7752 (BSN, 2012) adalah sebagai berikut:





Gambar 2.8 Bagan alir pengujian Infiltrasi lapangan dengan metode cincin ganda



Gambar 2.9 *Double Ring Infiltrometer* dalam SNI 7752 (BSN, 2012)

Pengukuran infiltrasi dengan cincin ganda dapat memilih salah satu metode yaitu pembacaan volume atau pembacaan penurunan tinggi muka air.

a. Pembacaan Volume

Pengukuran volume dilakukan dengan membaca jumlah air yang ditambahkan tiap satuan waktu. Pengukuran volume dapat dilakukan menggunakan gelas ukur, tabung mariotte, atau silinder transparan berskala.

Pengukuran laju infiltrasi berdasarkan volume air mengikuti langkah-langkah berikut:

1. Pada saat mulai pengukuran waktu $t = 0$ dicatat pada kolom 1 formulir pengukuran infiltrasi cincin ganda (lihat Lampiran XV).
2. Pada cincin dalam dan luar ditambahkan air yang diukur untuk menyamakan tinggi muka air untuk pembacaan awal. Tinggi muka air awal dari permukaan tanah dicatat pada formulir pengukuran kolom ke 4.
3. Setiap rentang waktu yang ditentukan, tambahkan air pada kedua cincin agar tinggi muka air kembali sama. Volume air yang ditambahkan dicatat pada formulir pengukuran kolom 5.
4. Adapun rentang waktu pengukuran dicatat pada kolom 2 dan selisih antar pembacaan rentang waktu dicatat pada kolom 3. Rentang waktu ditentukan, umumnya tiap 1 menit pada 10 menit pertama, tiap 2 menit pada menit ke 10 sampai dengan menit ke 30, tiap 5 menit sampai dengan 10 menit pada menit ke 30 sampai dengan menit ke 60. Selanjutnya, tiap 15 menit sampai dengan 30 menit sampai diperoleh laju yang relatif konstan. Rentang waktu ditentukan juga berdasarkan laju infiltrasi yang terukur atau berdasarkan pengalaman lapangan pelaksana pengukuran.
5. Hasil dari pengukuran didapat nilai F' dari data volume air yang ditambahkan pada cincin infiltrometer tiap rentang waktu pengukuran menjadi laju infiltrasi dengan persamaan.

$$F' = \left[\frac{\Delta V_c}{(A_c \times \Delta t)} \right] \times 60 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan :

F' adalah laju infiltrasi koreksi (cm/jam)

ΔV_c adalah volume air yang ditambahkan pada cincin infiltrometer untuk menjaga muka air konstan tiap rentang waktu (cm^3)

A_c adalah luasan dasar dari cincin dalam/luar

Δt adalah rentang waktu pengukuran (menit)

6. Hasil penghitungan laju infiltrasi dari cincin dalam dicatat pada formulir pengukuran kolom 8 dan laju infiltrasi dari cincin luar dicatat pada formulir pengukuran kolom 9.
 7. Hasil dari analisis diplot 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 .
- b. Pengukuran penurunan tinggi muka air

Pengukuran laju infiltrasi berdasarkan perubahan tinggi muka air mengikuti langkah-langkah berikut.

1. Pada saat mulai pengukuran waktu $t = 0$ dicatat pada kolom 1 pada formulir pengukuran infiltrasi cincin ganda (Lampiran XVI).
2. Pada cincin dalam dan luar ditambahkan air yang diukur untuk menyamakan tinggi muka air. Tinggi muka air yang sudah disamakan dicatat pada formulir pengukuran kolom ke 6.
3. Saat mulai pembacaan, setiap rentang waktu yang ditentukan amati perubahan tinggi muka air pada ruang antar cincin. Perubahan tinggi muka air dicatat pada formulir pengukuran kolom 7.
4. Adapun rentang waktu pengukuran dicatat pada kolom 2 dan selisih antar pembacaan rentang waktu dicatat pada kolom 3. Rentang waktu ditentukan, umumnya tiap 1 menit pada 10 menit pertama, tiap 2 menit pada menit ke 10 sampai dengan menit ke 30, tiap 5 menit sampai dengan 10 menit pada menit ke 30 sampai dengan menit ke 60, selanjutnya tiap 15 menit sampai 30 menit sampai diperoleh laju yang relatif konstan. Rentang waktu ditentukan juga berdasarkan laju infiltrasi yang terukur atau berdasarkan pengalaman lapangan pelaksana pengukuran.
5. Jika memungkinkan bagian atas cincin di tutup untuk menghindari penguapan selama rentang pengukuran.
6. Hasil dari pengukuran didapat nilai F' dari perubahan tinggi yang diamati pada cincin infiltrometer tiap rentang waktu pengukuran menjadi laju infiltrasi dengan persamaan.

$$F' = \left[\frac{\Delta h_c}{(\Delta t)} \right] \times 60 \dots\dots\dots(2.10)$$

Dengan:

F' adalah laju infiltrasi koreksi (cm/jam)

Δh_c adalah perubahan tinggi muka air tiap rentang waktu (cm).

Δt adalah rentang waktu pengukuran (menit)

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

$$F\left(\frac{m}{s}\right) = \left[\frac{1}{36}\right] \times 10^{-4} \times f\left(\frac{cm}{jam}\right) \dots\dots\dots (2.11)$$

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.

2.3.3.4 Potensi Aliran Permukaan

U.S. SCS dalam Sofan dkk. (2014) menguraikan hubungan parameter antara besarnya kapasitas infiltrasi dan limpasan permukaan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 Klasifikasi laju infiltrasi (Sofan dkk., 2014)

Kelompok Jenis tanah	Keterangan	Laju Infiltrasi (mm/jam)
A	Potensi limpasan permukaan paling kecil, termasuk tanah pasir dalam dengan unsur debu dan liat. Laju infiltrasi tinggi.	8-12
B	Potensi limpasan permukaan kecil, tanah berpasir lebih dangkal dari A. Tekstur halus sampai sedang. Laju infiltrasi sedang.	4-8
C	Potensi limpasan permukaan sedang, tanah dangkal dan mengandung cukup liat. Tekstur sedang sampai halus. Laju infiltrasi rendah.	1-4
D	Potensi limpasan permukaan tinggi, dominasi tanah liat, dangkal dengan lapisan kedap air dekat. Infiltrasi paling rendah.	0-1

2.3.4 Keapatan Tanah Lapangan

Pengukuran kepadatan tanah lapangan digunakan dengan metode *Sand cone*. Menurut Pudyawardhana dan Sismiani (2016) *Sand cone* adalah salah satu alat untuk menentukan kepadatan ditempat dari lapisan tanah atau perkerasan yang telah di padatkan, hasilnya didapat setelah contoh material yang di dapat di lapangan diolah di laboratorium.

Metode pengujian ini meliputi persyaratan dan ketentuan-ketentuan pengujian tanah yang mempunyai partikel berbutir tidak lebih dari 5 cm. Standar dalam pengujian *Sand cone* mengikuti ASTM D1556-07 (ASTM, 2015) dan SNI 03-2828 (BSN, 1992). Dalam ASTM (2015) dijelaskan Volume minimum lubang galian berdasar ukuran butiran patikel dan kelembaban yang terkandung dalam tanah sampel uji.

Tabel 2.2 Volume lubang galian minimum (ASTM, 2015)

Ukuran Maksimum partikel	Volume galian minimum	Jumlah sampel minimum untuk kadar air
No.4 (4.75 mm)	0.025 ft ³	100 g
1/2" (12.5 mm)	0.050 ft ³	250 g
1" (25.00 mm)	0.075 ft ³	500 g
2" (50.0 mm)	0.100 ft ³	1000 g

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

- Perhitungan kepadatan tanah lapangan

Kepadatan tanah lapangan dinyatakan dengan berat volume kering.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1+w} \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana,

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \dots\dots\dots(2.13)$$

dengan

γ_b = Berat volume tanah dalam kondisi kadar air w .

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

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

$$V = V_{ph} = \frac{W_p}{\gamma_p} = \frac{W_6 - W_9 - W_{pc}}{\gamma_p} \dots\dots\dots (2.14)$$

maka,

$$\gamma_b = \gamma_p \left(\frac{W_9 - W_8}{W_6 - W_7 - W_{pc}} \right) \dots\dots\dots (2.15)$$

berat volume kering tanah adalah:

$$\gamma_d = \left[\frac{\gamma_p}{1+w} \right] \left(\frac{W_9 - W_8}{W_6 - W_7 - W_{pc}} \right) \dots\dots\dots (2.16)$$

Kepadatan tanah relatif

$$R = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d(max)}} \times 100\%$$

b. Kalibrasi berat volume pasir dan volume kerucut pasir

Menentukan berat volume pasir pada setiap pengujian mengikuti persamaan berikut:

Volume botol (termasuk lubang sebelum katup)

$$V_{jar} = \frac{W_2 - W_1}{\rho_w} \dots\dots\dots (2.17)$$

Rapat masa air dapat diasumsikan $\rho_w = 1$

berat volume pasir ditentukan dengan persamaan

$$\gamma_p = \left(\frac{W_3 - W_1}{V_{jar}} \right) \times g \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan g = percepatan gravitasi = $9,81 \text{ m/s}^2$

keterangan :

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

$$W_6 = \text{Berat botol} + \text{pasir}$$

$$W_7 = \text{Berat botol} + \text{sisa pasir}$$

$$W_8 = \text{Berat kaleng}$$

$$W_9 = \text{Berat kaleng} + \text{tanah}$$

$$W_p = W_3 - W_1$$

$$W_{pc} = W_4 - W_5$$

$$W_s = W_9 - W_8$$

$$W_p = W_3 - W_1$$

2.3.5 Permeabilitas

Permeabilitas menyatakan kemampuan media porus (tanah) untuk meloloskan zat cair (air hujan) baik secara lateral maupun vertikal (Rohmat, 2009). Dalam bukunya Hardiyatmo (2001) yang berjudul Prinsip-Prinsip Mekanika Tanah menyebutkan permeabilitas adalah daya rembes air tanah, dimana setiap tanah mempunyai permeabilitas yang berbeda-beda tergantung dari ukuran pori-pori antara butir tanah. Nilai dari permeabilitas tanah dinyatakan oleh koefisien (K), koefisien permeabilitas (K) bervariasi tergantung jenis tanahnya (Tabel 2.2). Dalam pelaksanaannya pengujian permeabilitas dilakukan dengan pertimbangan apabila peresapan air ke dalam tanah cepat maka dilakukan pembacaan tiap penurunan muka air sedalam 10 cm, dan apabila sebaliknya penurunan lambat maka pembacaan di ambil setiap 5 menit (300 detik) selama ± 1 Jam.

Tabel 2.3 Nilai Konstanta permeabilitas (Hardiyatmo, 2001)

No.	Jenis Tanah	K (cm/dt)	Nama
1	Kerikil	>0,1	<i>High Permeability</i>

Tabel 2.3 Lanjutan

No.	Jenis Tanah	K (cm/detik)	Nama
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 linier akan di anggap aliran air “*Linier*” 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 *Darcy* yang menyatakan kecepatan air berbanding lurus dengan koefisien permeabilitas tanah dan gradien hidrolik.

$$V = K \times I \dots\dots\dots(2.19)$$

$$K = V / I \dots\dots\dots(2.20)$$

dengan,

V = Kecepatan air (L/detik)

K = Koefisien permeabilitas tanah (L/detik)

I = 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. Debit air yang keluar :

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

Maka :

$$K = \frac{d^2 L}{D^2 t} \times \ln \frac{h}{(h-c)} \dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan:

- K = Koefisien permeabilitas tanah
 D = Diameter tabung aluminium (cm)
 d = Diameter tabung kaca (cm)
 L = Tinggi tabung aluminium 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 dapat mengakibatkan pengaliran air tidak lancar.

2.3.6 Kadar Air

Kadar air tanah adalah perbandingan antara berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat kering tanah (berat bagian yang padat), dinyatakan dalam persen.

Pengukuran kadar air mengikuti standar ASTM D2216-10 (ASTM, 2010) sebagai berikut:

1. Cawan uji dibersihkan lalu ditimbang sebagai berat cawan kosong (W_1).
2. Contoh tanah dimasukkan ke dalam cawan kemudian timbang (W_2).
3. Cawan berisi contoh tanah dimasukkan ke dalam oven selama 16/24 jam pada suhu $105^\circ - 110^\circ$ C.
4. Setelah ± 24 jam cawan berisi contoh tanah dipindahkan dari oven ke desikator.
5. Setelah dingin sampel tanah ditimbang (W_3).
6. Kadar air tanah dalam persen dihitung dengan persamaan 2.22.

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

atau

$$w = \left(\frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.22)$$

keterangan:

W_1 = Berat cawan (gram)

W_2 = Berat cawan + tanah basah (gram)

W_3 = Berat cawan + tanah kering (gram)

