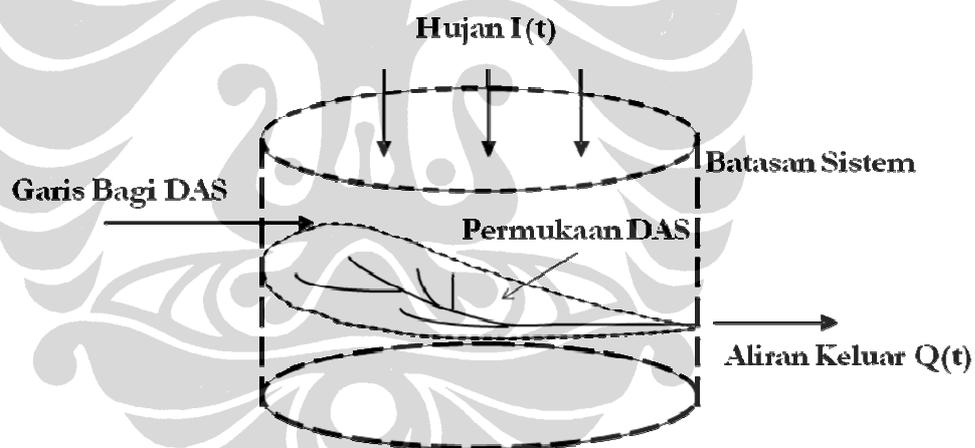


II. PENGELOLAAN LIMPASAN AIR HUJAN

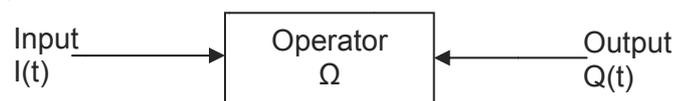
II.1. TEORI HUBUNGAN HUJAN – LIMPASAN (*RAINFALL – RUNOFF PROCESS*)

II.1.1. Operator Omega (Ω)

Ven Te Chow, 1988, menjelaskan proses hubungan hujan limpasan di sistem hidrologis Daerah Aliran Sungai (DAS) seperti pada gambar 2.1 sebagai berikut di bawah.



Gambar 2.1. DAS sebagai Sistem Hidrologis



Gambar 2.2. Penggambaran Skematik Sistem Operasi

Hujan sebagai input, terdistribusi dalam ruang di atas permukaan DAS. Aliran keluar (di sungai) sebagai output, terkonsentrasi dalam ruang di outlet DAS. Evaporasi dan aliran bawah permukaan dapat juga dipertimbangkan sebagai output, tetapi relatif kecil jika dibandingkan dengan aliran sungai selama hujan (presipitasi) berlangsung. Struktur sistem merupakan kumpulan pola aliran di atas atau melalui tanah dan termasuk anak-anak sungainya.

Analisis sistem hidrologis bertujuan mempelajari sistem operasi dan memprediksi output dari sistem tersebut. Model sistem hidrologis adalah suatu pendekatan sistem nyata, di mana input dan outputnya sebagai variabel hidrologis adalah terukur, dan strukturnya membentuk persamaan yang menghubungkan antara input dan output. Pusat dari struktur model adalah konsep sistem transformasi.

Input dan output adalah fungsi dari waktu, $I(t)$ dan $Q(t)$, untuk t untuk interval waktu T yang dipilih. Sistem menunjukkan transformasi dari input menjadi output sebagai berikut:

$$Q(t) = \Omega I(t) \quad 2.1$$

disebut sebagai persamaan transformasi pada sistem. Simbol Ω (Omega) adalah fungsi transfer antara input dan output. Jika hubungan ini diekspresikan dalam persamaan aljabar maka Ω adalah operator Ω .

Output dari aliran sungai pada sistem hidrologis DAS digambarkan dalam bentuk grafik atau hidrograf (*streamflow hydrograph*) yaitu suatu ekspresi integral dari fisiografik dan karakteristik iklim yang menggambarkan hubungan antara hujan dan limpasan pada sebuah wilayah pengaliran tertentu (Chow, 1959).

II.1.2. Hubungan antara Hujan Efektif dengan Limpasan Langsung (*Excess Rainfall – Direct Runoff*)

Hujan efektif (*excess rainfall*) adalah hujan yang tidak tertahan pada permukaan lahan ataupun terserap ke dalam tanah. Setelah mengalir melintasi permukaan DAS, hujan efektif menjadi limpasan langsung (*direct runoff*) di outlet DAS

dengan anggapan limpasan tersebut adalah aliran permukaan Hortonian (*Hortonian Overland Flow*) (Ven Te Chow, 1988).

Aliran Hortonian adalah aliran permukaan tanah yang mengabaikan kehilangan (*interception*) oleh vegetasi dan bagian dari hujan yang tidak diabsorpsi oleh tanah melalui infiltrasi (Horton, 1933). Jika tanah memiliki kapasitas infiltrasi f , diekspresikan dalam satuan inchi per jam air yang diabsorpsi tanah, kemudian ketika intensitas hujan i lebih kecil daripada f maka hujan akan diabsorpsi semua oleh tanah dan tidak ada limpasan permukaan. Dapat dikatakan sebagai pendekatan pertama yaitu jika i lebih besar daripada f , maka limpasan permukaan akan terjadi pada laju $(i - f)$. Horton menyebut $(i - f)$ sebagai eksese hujan atau hujan efektif (*rainfall excess*). Aliran Hortonian dapat dipakai untuk mewakili kondisi aliran pada permukaan kedap air (*impervious*) di daerah perkotaan, dan untuk permukaan alami yang memiliki lapisan tanah yang tipis serta kapasitas infiltrasi yang rendah seperti daerah semiarid dan arid (Ven Te Chow, 1988).

Ven Te Chow (1988) menjelaskan bahwa grafik hujan efektif terhadap waktu atau *excess rainfall hyetograph* (ERH), adalah komponen kunci pada kajian hubungan hujan – limpasan. Perbedaan terhadap pengamatan antara hyetograf total hujan dan hyetograf hujan efektif disebut dengan abstraksi atau kehilangan (*losses*). Kehilangan adalah terutama oleh air yang diabsorpsi oleh infiltrasi dan sebagian oleh intersepsi oleh vegetasi (*interception*) dan tampungan permukaan (*surface storage*).

Hyetograf hujan efektif dapat ditentukan dari hyetograf total hujan dengan dua cara, tergantung pada ketersediaan data aliran sungai dan hujan, atau tidak. Misal, hyetograf hujan dan hyetograf aliran sungai tersedia maka aliran dasar dapat dipisahkan dari aliran sungai untuk membuat hidrograf limpasan langsung, dan hyetograf hujan efektif bisa ditentukan. Parameter dari persamaan infiltrasi juga dapat ditentukan dengan teknik optimasi sebagai pemrograman non-linear (Unver dan Mays, 1984), tetapi menurut Chow (1988) tekniknya cukup rumit. Ada alternatif lain yang lebih sederhana, disebut ϕ -index (Phi-index). Metode ϕ -index

adalah laju konstant abstraksi (in/jam atau cm/jam) yang akan menghasilkan ERH dengan total kedalaman sama dengan kedalaman limpasan langsung r_d dipermukaan DAS. Nilai ϕ ditentukan dengan pemilihan suatu panjang interval waktu Δt , mempertimbangkan jumlah interval M dari hujan yang aktual berkontribusi terhadap limpasan langsung, memisahkan $\phi\Delta t$ dari hujan yang diamati untuk setiap interval, dan mengatur nilai ϕ dan M bila perlu sehingga kedalaman limpasan langsung dan hujan efektif adalah sama:

$$r_d = \sum_{m=1}^M (R_m - \phi\Delta t) \quad 2.2$$

di mana R_m adalah hujan yang diamati (in) dalam satuan interval waktu m .

Ven Te Chow (1988) menjelaskan bahwa abstraksi dapat diperhitungkan dalam pengertian koefisien limpasan. Definisi umum koefisien limpasan adalah rasio antara debit puncak limpasan langsung dengan intensitas rata-rata hujan. Karena intensitas hujan sangat bervariasi, nilai ini sulit untuk ditentukan dari data pengamatan. Koefisien limpasan dapat juga didefinisikan sebagai rasio limpasan terhadap hujan dalam suatu periode waktu tertentu. Koefisien ini sering digunakan untuk hujan (*storm-rainfall*) dan limpasan tetapi juga dapat dipakai untuk data hujan bulanan atau tahunan dan aliran sungai. Jika $\sum_{m=1}^M R_m$ adalah total hujan dan r_d terkait dengan kedalaman limpasan, maka suatu koefisien limpasan dapat didefinisikan seperti ini.

$$C = \frac{r_d}{\sum_{m=1}^M R_m} \quad 2.3$$

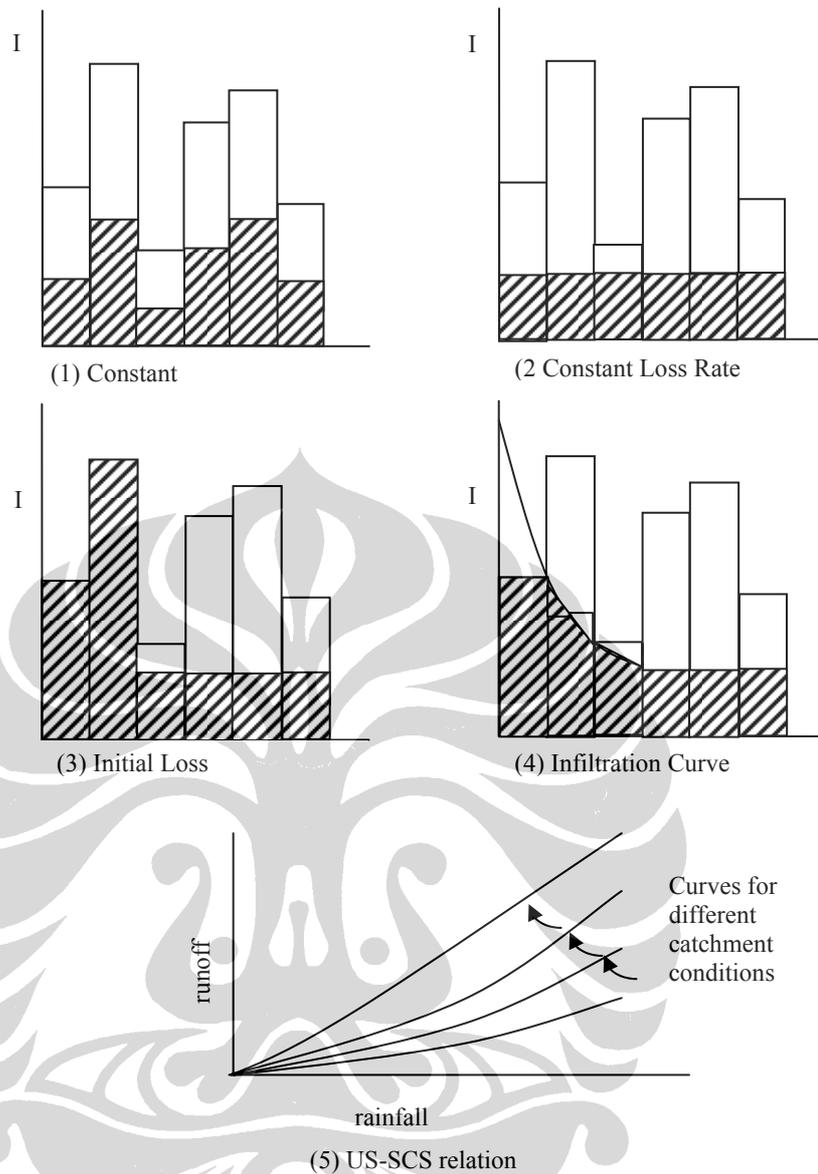
II.2. MODEL EKSES HUJAN (*RAINFALL EXCESS MODELS*)

Seperti dimuat di *Handbook of Hydrology*, David R. Maidment, 1993, ekses hujan adalah bagian dari hujan yang tidak hilang menjadi infiltrasi, tampungan tertekan (*depression storage*), dan intersepsi. Model untuk mengestimasi ekses hujan yang paling sering dipergunakan adalah model index, dan model CN (*curve number*) limpasan USDA – SCS. Berikut ini adalah lima model yang sering dipergunakan untuk mengestimasi limpasan hujan:

1. *Loss (and conversely runoff)* is a constant fraction of rainfall in each time period, or if the storm has constant rainfall intensity, a simple proportion of the total rainfall. This is the runoff coefficient concept one of which is well known as rational method.
2. *Constant loss rate* where the rainfall excess is the residual after a selected constant loss rate or infiltration capacity is satisfied.
3. *Initial loss and continuing constant rate*, which is similar to model 2 except that no runoff occurs until a given initial loss capacity has been satisfied, regardless of the rainfall rate. A variation of this model is to have an initial loss followed by a loss consisting of a constant fraction of the rainfall in the remaining time periods.
4. *Infiltration curve or equation representing capacity rates of loss decreasing with time*. This may be an empirical curve or a physical based model such as the Green and Ampt equation.
5. *Standard rainfall-runoff relation*, such as the U.S. Soil Conservation Service relation.

Pemilihan dan validitas metode kehilangan hujan (*rainfall loss*) tergantung pada jenis masalah, ketersediaan data, dan proses limpasan yang dominan terjadi. Beberapa metode estimasi banjir secara spesifik menggunakan model tertentu, seperti metode SCS (model 5).

Ketika aliran Hortonian terjadi dari seluruh wilayah sungai untuk seluruh bagian banjir yang dikaji, maka model 2 dan mungkin model 3 adalah sesuai. Model 4 juga baik untuk kondisi tersebut tetapi lebih sulit untuk diaplikasikan. Di beberapa tempat, laju kehilangan terus berlanjut pada model 2 dan 3 tidak konstan tetapi cenderung untuk meningkat seiring dengan kenaikan intensitas hujan, mungkin merefleksikan dampak limpasan hanya pada sebagian DAS. Pada daerah lain, kemungkinan ketika aliran Hortonian terjadi pada semua atau hampir semua DAS, laju kehilangan yang terus berlanjut ditemukan menurun sesuai dengan kenaikan intensitas. Di mana limpasan terjadi dari hanya kondisi jenuh di DAS, model 1 dan 5 dapat dipergunakan.



Gambar 2.3. Model Kehilangan Hujan untuk Mengestimasi Ekses Hujan (Maidment, 1993)

Maidment (1993) melanjutkan bahwa untuk mengestimasi ekses hujan dari hujan aktual, sebagai bagian dari perencanaan, ada penyesuaian untuk kondisi dan kebasahan DAS segera setelah hujan turun. Hal seperti itu sesuai dengan hubungan hujan – limpasan model 3, 4, atau 5 dan menggunakan data setempat untuk kalibrasi.

Penyesuaian untuk semua model pada hujan yang diamati dan data banjir, volume limpasan hujan dan kedalaman eksese hujan (yang pembagiannya sesuai dengan bobot wilayah) adalah ditentukan dari wilayah di bawah hidrograf limpasan langsung setelah aliran dasar dipisahkan. Dalam penggunaan berbagai model kehilangan, eksese hujan terhadap kehilangan harus sama dengan volume total hujan.

II.3. PROSEDUR PENENTUAN NILAI CN OLEH USDA

Prosedur penentuan nilai CN model SCS seperti yang diuraikan dalam *National Engineering Handbook – NEH* Bagian 4 dalam bab 10, dengan sedikit penyesuaian, adalah sebagai berikut. Persamaan limpasan yaitu:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad 2.4$$

dimana :

Q = debit limpasan dalam satuan tinggi aliran, in/det

P_{PU} = tinggi hujan harian maximum periode ulang tertentu misal 2-tahunan, in

S = kemampuan potensial retensi maximum lahan setelah hujan mulai, in

I_a = abstraksi inisial (in)

Abstraksi inisial (I_a) adalah semua kehilangan sebelum terjadi limpasan air hujan termasuk depresi permukaan (*surface depression*), penyerapan air (*water intercepted*) oleh tumbuhan, evaporasi, dan infiltrasi. Abstraksi inisial sangat beragam, tetapi secara umum berkaitan dengan parameter jenis tanah dan penutup lahan. Melalui penelitian pada banyak DAS pertanian kecil, hubungan abstraksi inisial dan potensial retensi maximum diaproksimasikan secara empirik sebesar seperti persamaan 1.3 dimana di mana inisial abstraksi adalah 20 persen tampungan (*storage*). Dengan demikian:

$$Q = \frac{(P_2 - 0,2S)^2}{P_2 + 0,8S} \quad 2.5$$

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 1.1 dan 1.2.

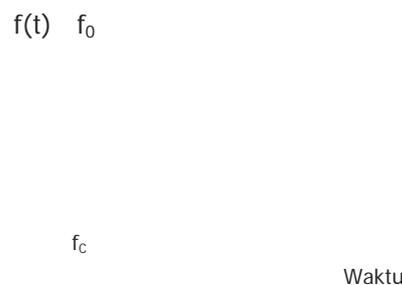
$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad 1.2$$

II.4. ESTIMASI PARAMETER LAJU INFILTRASI TITIK PENGAMATAN

Ada tiga parameter empirik model infiltrasi yang dikembangkan oleh Horton (1939), dan telah banyak dipakai diberbagai model hidrologis, seperti yang dijabarkan oleh Maidment (1993) dalam buku *Handbook of Hydrology*. Horton menemukan bahwa kapasitas infiltrasi f terhadap waktu dapat diekspresikan sebagai berikut.

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad 2.6$$

Di mana f_0 adalah laju infiltrasi maximum di awal peristiwa hujan dan tereduksi menjadi semakin kecil dan akhirnya asimtotis menuju konstan f_c sebagai proses infiltrasi yang kontinu hingga tanah menjadi jenuh. Parameter k mengendalikan laju penurunan kapasitas infiltrasi. Persamaan Horton dapat diaplikasikan hanya ketika intensitas hujan efektif i_p lebih besar dari f_c . Parameter f_0 , f_c , dan k harus dievaluasi dengan menggunakan data pengamatan infiltrasi.



Gambar 2.4. Infiltrasi (eksponensial)

Pemakaian dalam skala besar model ini terbatas karena ketergantungan parameter pada kondisi kelembaban dan spesifik tanah.

II.5. INFILTROMETER

Penjabaran mengenai standar infiltrometer dibuat berdasarkan buku *Hydrology: Water Quantity and Quality Control* oleh Martin Wanielista, Robert Kersten dan Ron Eaglin terbitan John Wiley and Sons tahun 1997 di halaman 161 – 164.

Permeabilitas dan laju infiltrasi tanah, akan berubah-ubah terhadap waktu dan lokasi. Percobaan di lapangan dan di laboratorium dilaksanakan untuk menentukan laju infiltrasi. Oleh karena permeabilitas dapat bervariasi antara 10^{-7} cm/detik untuk tanah lempung berpasir (*sandy clays*) dan 10^{-2} cm/detik untuk tanah pasir longgar (*loose sands*), maka perancang akan berhadapan dengan banyak keputusan. Percobaan laboratorium dengan menggunakan parameter head konstan (*constant head*) atau head jatuh (*falling head*) biasanya akan menghasilkan suatu nilai yang terbatas sebab tanah menerima gangguan yang terlalu banyak di mana kondisi pada ruang lingkup laboratorium dan gradien-gradien biasanya adalah berbeda dengan apa yang terdapat di lapangan.

Percobaan dilakukan di lapangan dengan menggunakan lubang bor (*borehole*) atau percobaan per-lokasi lebih dapat dipercaya daripada percobaan-percobaan yang dilaksanakan di laboratorium untuk luasan yang kecil ($<2000 \text{ m}^2$), tetapi harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan lokasi percobaan tersebut dapat mewakili dengan baik.

Untuk luasan atau daerah resapan/perlokasi wilayah sungai (*perlocation/recharge basins*) yang besar, dibutuhkan analisa dan survei geoteknik yang lebih banyak. Faktor-faktor yang diliputi pada pekerjaan-pekerjaan seperti ini dibahas oleh Walton (1970). Suatu percobaan perlokasi yang cukup dapat dipercaya untuk penggunaan dalam desain kolam detensi/retensi yang kecil adalah dengan

menggunakan infiltrometer ring ganda (*double-ring infiltrometer*) (Chow, 1964). Secara sederhana, infiltrometer ring ganda adalah drum 55-galon sebagai cincin luar, dengan cincin dalam berdiameter 10 inci atau 12 inci (10” atau 12”). Spesifikasi infiltrometer ring ganda yang dipakai dalam penelitian ini adalah ring dalam berukuran 12 inci dan ring luar adalah 24 inci dan tinggi alat adalah 24 inci. Tebal pelat ring yang dipakai adalah 1 mm.

II.6. PENGELOLAAN LIMPASAN AIR HUJAN

Pengelolaan limpasan air hujan (PLH) adalah pembangunan dan penerapan dengan pendekatan secara fisik dan non-fisik yang bertujuan untuk mengelola struktur pembawa dan penampung (seperti daerah cekungan (*depressions*), danau, parit (*swales*), saluran, dan dataran banjir) dalam suatu ruang dengan kaitannya terhadap kebutuhan pertumbuhan populasi penduduk (Stuart G. Walesh, 1989). Secara sederhana, PLH adalah semua hal yang dilakukan untuk mengatasi masalah air permukaan dan mencegah terjadinya masalah baru terkait itu.

Objektif PLH secara hirarki adalah untuk:

- a) melindungi kehidupan dan menurunkan tingkat resiko kesehatan dan keselamatan masyarakat,
- b) mengurangi resiko ekonomis (*monetary*) akibat kerusakan properti milik pribadi maupun swasta,
- c) meminimalisasi dampak teknis bencana banjir,
- d) melindungi kualitas air permukaan dan bawah tanah, dan
- e) mempercantik lansekap (*landscape*) dan mempertahankan ekologi pra-pembangunan.

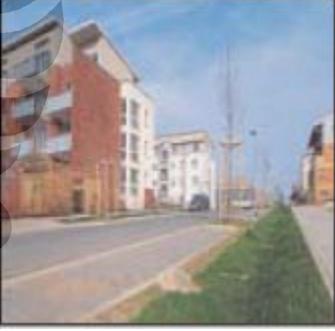
Dalam skala mikro PLH diterapkan pada suatu daerah tangkapan (*catchment area*) untuk merekayasa penutup lahan, dan kemudian diintegrasikan pada skala makro untuk dilihat efeknya terhadap perubahan hidrograf banjir yang terjadi pada level DAS.

II.7. PENGELOLAAN AIR HUJAN (*RAINWATER MANAGEMENT*)

Pengelolaan Air Hujan (*Rainwater Management*) dipergunakan untuk mengevaluasi tingkat efektivitas dari bangunan pengendali limpasan air hujan (*rainwater runoff source controls*) dengan hubungan berbagai kombinasi tata guna lahan, kondisi tanah dan sebaran hujan. Prinsip dasar dari model neraca air adalah pengelolaan hujan berdasarkan volume limpasan (*volume-based management*) bukan debit puncak (*peak flow management*). Di berbagai negara telah menerapkan pengelolaan air hujan (*rainwater management*) dengan berbagai sebutan seperti dipaparkan di tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1. Penerapan Pengelolaan Air Hujan (*Stormwater Source Control Design*)
Terkini di Berbagai Negara

Negara	Model	Deskripsi
UNITED KINGDOM	<i>"Sustainable Urban Drainage Systems" (SUDS) use "Soakaway" methods such as rock pits, dry wells and infiltration trenches. 400,000 sq.m of permeable paving block designs were sold in 2001. Research is showing that microbes in rock base courses treat oil entering the pavement.</i>	
BELGIUM	<i>Some municipalities offer subsidies for source controls; e.g., Mortsel pays \$5.60/sq.m for green roofs and 50% of the cost of an infiltration system.</i>	

NETHERLANDS	<p><i>Infiltration trenches, green roofs and permeable pavement are common. Flood storage on roads is allowed, but not on bikeways!</i></p> <p><i>Dutch wadis are broad vegetated swales that fill with water during heavy rainfalls and then drain in about 24 hours.</i></p>	
FRANCE	<p><i>Swales ("noues") are valued as visible stormwater treatment. Porous pavements are used both as a source control and to reduce traffic noise. The grate leads to an underground geo-membrane lined trench filled with sand and pebbles that filters particles and allows infiltration. Excess water flows to further settling and filtration systems.</i></p>	
GERMANY	<p><i>In use for over 30 years, about 1 in 7 of new flat roofs are green roofs - 13.5 million sq.m in 2001. Most cities reduce stormwater fees when source controls are used. A swale /trench system reduces stormwater volumes to 1/10th of a conventional system, saving 30% in stormwater fees.</i></p>	
BRITISH COLUMBIA/CANADA	<p><i>Policies supporting source controls have been in the works since the 1990's. Pilot projects with source controls have been completed and monitoring is on-going. Implementation is accelerating. Over 600 green roof installations exist in Coastal BC, including this monitored Green Roof at the Vancouver Library.</i></p>	

<p>US WASHINGTON</p>	<p><i>"Low Impact Development" (LID) techniques try to preserve 'natural' watershed characteristics. Stormwater manuals have provided guidance since 1992. Seattle's "Street Edge Alternatives" (SEA) project captures 98% of the wet season runoff - beautifully.</i></p>	
<p>OREGON</p>	<p><i>Portland provides "tree credits" in stormwater calculations, and also offers an "eco-roof density bonus" as a green roof incentive. Buckman Terrace Apartments in Portland uses source controls to avoid runoff into combined sewers.</i></p>	
<p>AUSTRALIA</p>	<p><i>Australia uses "Water Sensitive Urban Design" (WSUD) to maximize on-site retention, infiltration, treatment and re-use-even in clay soils. Aquifer storage and recovery is widely used. Rainwater reuse on this site reduces the consumption of water from the main system by 77%.</i></p>	

Isu universal pengelolan air hujan adalah masalah pertumbuhan penduduk yang akan mendorong perubahan tata guna lahan, kondisi hidrologi alami, dan perusakan lahan basah dan sungai-sungai kecil (*creeks*) (British Columbia, 2002).

Pengelolaan air hujan dari British Columbia menggunakan pendekatan pengelolaan air hujan sebagai sumberdaya sehingga perlu pengelolaan yang sesuai untuk semua spektrum hujan dan strategi perencanaan, desain dan implementasi

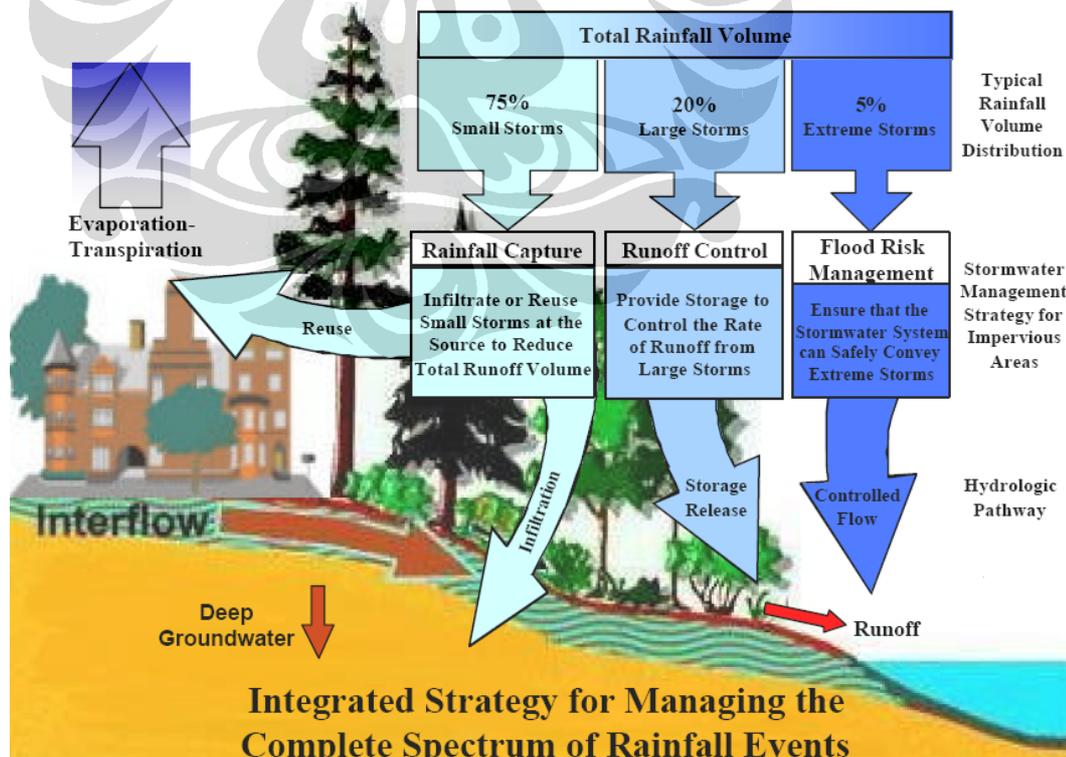
yang sesuai dengan kondisi hidrologis dan ekologis daerah tangkapan. Pendekatan tersebut dikenal dengan paradigma *ADAPT*, yaitu:

- Agree that stormwater is a resource (sepakat air hujan adalah sumberdaya).
Air hujan tidak lagi dilihat sebagai isu manajemen banjir atau drainase tetapi juga merupakan sumberdaya:
 - Ikan dan biota air lain
 - Pengisian air tanah (baik untuk aliran dasar ataupun air minum)
 - Pemanfaatan air (misal peternakan atau irigasi)
 - Wisata dan estetika
- Design for the complete spectrum of rainfall events (perancangan untuk seluruh spektrum peristiwa hujan).
Pengelolaan air hujan membutuhkan desain lahan (*site design practices*) yang menyediakan:
 - Penangkapan hujan untuk hujan ringan hingga lebat dengan cara penurunan volume limpasan dan pengendalian kualitas air. Cara menangkap hujan tersebut berdasarkan desain hujan rencana dengan frekuensi tinggi, dan pada sumbernya (misal atap rumah, jalan) untuk memperbesar fungsi infiltrasi dan/atau penggunaan ulang.
 - Pengendalian limpasan untuk hujan sangat lebat dengan cara penurunan debit limpasan. Limpasan dari hujan sangat lebat dengan frekuensi rendah (misal hujan tahunan rata-rata) disimpan, dan dilepas selaju dengan perkiraan kondisi alaminya.
 - Pengelolaan Resiko Banjir untuk hujan ekstrim dengan cara melalukan debit puncak dengan aman melalui sistem drainase (misal dengan periode ulang 100 tahunan).
- Act on a priority basis in at-risk drainage catchments (pelaksanaan berdasarkan prioritas daerah tangkapan yang kritis).
Prioritas pelaksanaan seharusnya difokuskan ada daerah tangkapan yang kritis di mana ada tekanan tinggi terhadap perubahan tata guna lahan, dan pengendali pelaksanaan antara lain; sumberdaya ekologis bernilai tinggi terancam atau masalah drainase yang tidak memadai. Penerapan teknis dan

kebijakan pengelolaan air hujan pada daerah tersebut dapat menjadi daerah percontohan bagi yang lain.

- **Plan at four scales – regional, watershed, neighborhood & site** (perencanaan pada empat skala wilayah: wilayah sungai, DAS, sub-DAS, dan daerah tangkapan). Perencanaan jangka panjang pada level wilayah sungai dan DAS adalah untuk memantapkan objektif dan prioritas pengelolaan air hujan. Pada level sub-DAS untuk memadukan objektif pengelolaan ke dalam masyarakat dan proses perencanaan. Pada level daerah tangkapan untuk menerapkan desain lahan terbaik yang dapat mereduksi volume dan debit limpasan serta memperbaiki kualitas air.
- **Test solutions and reduce costs by adaptive management** (pengujian solusi dan pengurangan biaya dengan manajemen adaptif).

Kinerja sasaran dan peneraapan pengelolaan air hujan seharusnya dioptimasi terhadap batasan waktu pada pemantauan kinerja daerah percontohan, dan strategi pengumpulan data dan pemodelan. Keberhasilan dievaluasi dan program pengelolaan air hujan dapat disesuaikan bila dibutuhkan.



Gambar 2.5. Strategi Integral Pengelolaan Semua Spektrum Peristiwa Hujan

Pengelolaan air hujan tersebut mengakomodasi pertumbuhan penduduk dan pembangunan, melindungi dari bencana banjir dan sekaligus menjaga kelestarian sumberdaya air. Di Indonesia, kelas peristiwa hujan menurut BMG dengan adalah sebagai berikut:

- Sangat ringan (< 5 mm)
- Ringan (5 – 20 mm)
- Sedang (21 – 50 mm)
- Lebat (51 – 100 mm)
- Sangat lebat (> 100 mm)

Metode *Low Impact Development* (LID) merupakan salah satu metode pengelolaan air hujan untuk peristiwa hujan sangat ringan hingga sedang dengan cara penurunan volume limpasan dan pengendalian kualitas air pada skala mikro atau daerah tangkapan. Desain hujan rencana (presipitasi) yang dipergunakan adalah untuk hujan sedang hingga rendah (curah hujan ≤ 50 mm), atau dengan periode ulang antara 2 – 10 tahunan (probabilitas 50 – 10%).

II.8. PENDEKATAN *LOW IMPACT DEVELOPMENT*

Prinsip hidrologi yang dibutuhkan dalam prosedur analisis perhitungan *Low Impact Development* adalah presipitasi dan hujan rencana, abstraksi curah hujan, limpasan/runoff, waktu konsentrasi dan air tanah (*LID Manual*, 1999).

Data presipitasi yaitu jumlah, intensitas dan durasinya, diperlukan untuk mengetahui karakteristik dari suatu periode hujan. Hujan 2 dan 10 tahunan umumnya digunakan dalam perancangan pembangunan subdivisi, komersial dan industri. Hujan 1 dan 2 tahunan dipilih untuk melindungi saluran dari sedimentasi dan erosi. Hujan 5 dan 10 tahunan dipilih untuk menyediakan arus yang cukup perhitungan banjir minimal dan rencana. Hujan 100 tahunan untuk mengetahui batas banjir biasa/floodplain dan perhitungan imbas banjir maksimal. Dari perhitungan intensitas hujan.dapat diketahui kebutuhan volume tampungan.

Abstraksi curah hujan pada suatu kawasan sama dengan tinggi curah hujan. Tinggi hujan dapat berubah tergantung dari konfigurasi rencana lahan pembangunan. Dalam bagian kecil ialah perubahan penutup tidak lulus air. Lapisan tidak lulus air menghalangi infiltrasi air ke dalam tanah sehingga secara efektif menurunkan tinggi hujan dan menaikkan limpasan. Metode LID digunakan untuk mengganti kehilangan tinggi hujan dengan cara mengatur potensi infiltrasi, evapotranspirasi dan tampungan permukaan untuk mengurangi waktu tempuh supaya kecepatan konsentrasi limpasan dapat diperkecil.

Limpasan air permukaan dalam keadaan alami dapat mencapai antara 10 hingga 30 persen dari total presipitasi. Setelah pembangunan, menyebabkan perubahan karakteristik lahan, sehingga debit (volume dan frekuensi) dan kecepatan limpasan meningkat sampai 50 persen. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya banjir, percepatan erosi dan mengurangi pemasukan air tanah juga dapat mempengaruhi mutu air dan integritas ekologi sekitarnya.

Waktu konsentrasi menunjukkan lamanya kejadian hujan. Definisi waktu konsentrasi adalah waktu yang dibutuhkan air untuk mencapai keluaran DAS dari titik terjauh secara hidrologis (SCS, 1985). Waktu konsentrasi dipengaruhi oleh tinggi curah hujan dan daerah tidak lulus air/impermeable. Metode LID ini didasarkan pada pengelolaan waktu konsentrasi.

Pengisian air tanah tergantung pada proses infiltrasi. Air tanah akan merembes ke dalam aliran sungai selama musim, kering dan menjadi arus dasar sungai. Jika terjadi kekurangan air tanah dapat mengakibatkan sungai kering pada musim kemarau dan tinggi muka air berkurang atau kehilangan arus dasar pada sungai selama musim hujan.

Pada tabel berikut dapat dilihat perbedaan pengelolaan limpasan air hujan antara metode konvensional dengan metode *Low Impact Development*.

Tabel 2.2. Perbandingan antara Pengelolaan Limpasan Hujan Cara Konvensional dengan Cara *Low Impact Development* (1999)

PARAMETER HIDROLOGI	METODE KONVENSIONAL	METODE <i>LOW IMPACT DEVELOPMENT</i>
<i>Onsite</i>		
Lapisan kedap air	Disarankan untuk meningkatkan efektifitas drainase	Diminimalisasi untuk mengurangi dampak perubahan fungsi hidrologis
Lapisan alami, vegetasi	Dikurangi untuk meningkatkan efisiensi saluran drainase	Dimaksimalkan untuk menjaga keadaan pra-pembangunan
Waktu konsentrasi	Dipersingkat akibat efisiensi saluran drainase	Dimaksimalkan untuk mengendalikan keadaan pasca-pembangunan
Volume aliran	Kenaikan tidak terkendali	Dikendalikan untuk keadaan pra-pembangunan
Debit puncak	Direncanakan untuk hujan rencana 2 tahunan pra-pembangunan	Dikendalikan untuk keadaan pra-pembangunan untuk semua hujan rencana
Frekuensi Aliran	Peningkatan tinggi pada hujan frekuensi pendek	Dikendalikan untuk keadaan pra-pembangunan untuk semua hujan rencana
Lama aliran	Peningkatan tinggi pada semua hujan rencanan	Dikendalikan untuk keadaan pra-pembangunan
Abrasi hujan	Pengurangan besar pada semua elemen	Dipertahankan sesuai keadaan pra-pembangunan
Pengisian air tanah	Terjadi pengurangan	Dipertahankan sesuai keadaan pra-pembangunan
<i>Offsite</i>		
Mutu air	Pengurangan beban polutan tapi kendali terbatas pada hujan dengan kapasitas dibawah hujan rencana	Memperbesar pengurangan beban polutan. Kendali penuh untuk hujan dengan kapasitas dibawah hujan rencana
Saluran penerima	Terjadi erosi dan degradasi saluran ,sedimentasi, penurunan aliran dasar, dan mengganggu keseimbangan lingkungan	Ekologi saluran dipertahankan sesuai pra-pembangunan
Banjir hilir	Peningkatan banjir hilir secara kumulatif dan superposisi hidrograf	Dikendalikan supaya sesuai dengan pra-pembangunan

II.8.1. Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi diperlukan untuk memaksimalkan efektivitas dari perencanaan dan perancangan lahan. Metode LID merupakan analisis hidrologi yang membandingkan antara keadaan fungsi hidrologi sesudah pembangunan dengan sebelum pembangunan pada suatu kawasan Daerah Aliran Sungai (DAS). Hasil dari analisis dengan cara ini dapat dipakai untuk mengendalikan dampak perubahan fungsi hidrologis akibat adanya pembangunan tersebut. Perbandingan ini diketahui dari perhitungan data volume limpasan, puncak limpasan, frekuensi/durasi aliran dan mutu air.

Perbandingan antara volume limpasan dengan total tinggi hujan disebut koefisien limpasan, digunakan untuk mengetahui kehilangan tinggi hujan akibat perubahan karakteristik lahan. Dari data tersebut dapat diketahui nilai koefisien aliran (CN), waktu konsentrasi (Tc), dan besar volume retensi dan detensi yang dibutuhkan.

Analisis dilakukan untuk mengurangi perubahan koefisien aliran dan menjaga waktu konsentrasi agar sesuai dengan keadaan fungsi hidrologis sebelum pembangunan, menyediakan distribusi BMP retensi (*BMP's retention*), serta bila perlu diadakan BMP detensi (*BMP's detention*) untuk mengatur volume limpasan dan tinggi puncak limpasan permukaan.

Proses perencanaan bertujuan untuk membuat fungsi hidrologis lansekap yang memadukan tiap karakter desainnya sehingga dapat menyamai tampungan pra-pembangunan dan fungsi infiltrasi dari DAS (*watershed*).

Elemen dasar dari tahapan analisis terdiri dari pendekatan mengurangi koefisien aliran, meningkatkan waktu konsentrasi, penyediaan tampungan detensi dan tampungan retensi (Larry Coftman, 1998) :

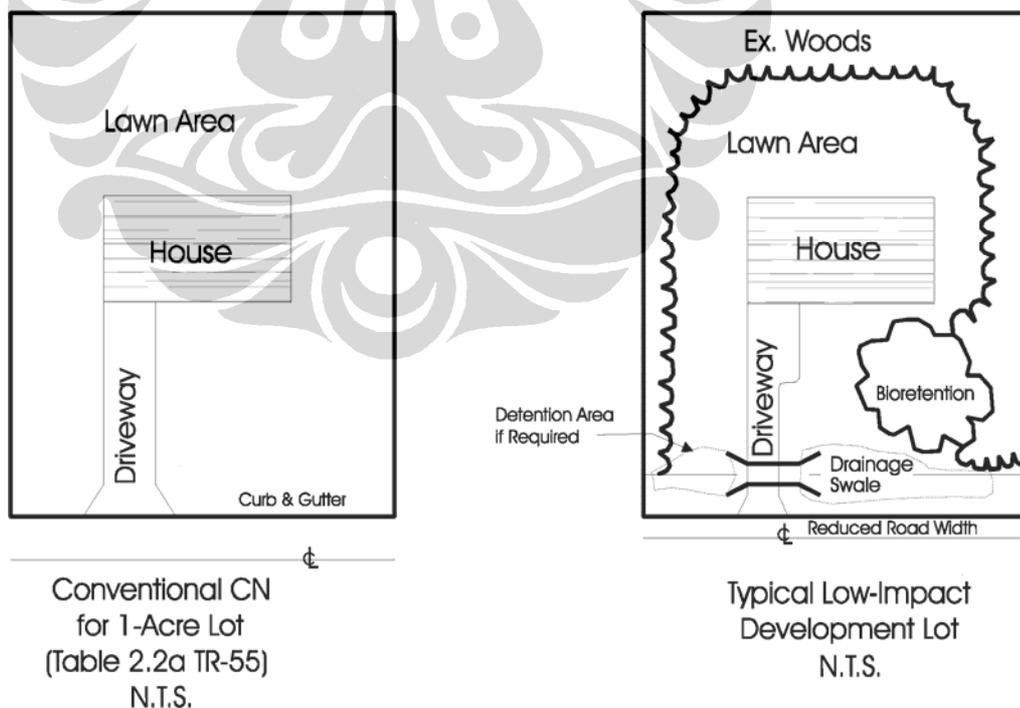
- a) Pengaturan Koefisien Aliran (*Curved Number/CN*)
- b) Mempertahankan waktu konsentrasi (*time of concentration/Tc*)
- c) Kebutuhan Penambahan dan Perhitungan Tampungan

II.8.1.1. Pengaturan Koefisien Aliran (Curved Number/CN)

Perhitungan koefisien aliran berdasarkan evaluasi detail perbandingan suatu kawasan pada keadaan sebelum pembangunan dengan sesudah pembangunan, sehingga dapat dianalisis secara akurat besaran koefisien aliran yang akan dipakai akibat potensial limpasan permukaan. Analisis koefisien aliran menggunakan parameter perhitungan:

- jenis penutup tanah
- presentasi dan hubungan daerah kedap air (*impervious area*)
- jenis tanah berdasarkan fungsi hidrologisnya (*hydrologic soils group/HSG*)
- keadaan hidrologi (kelembapan rata-rata atau keadaan limpasan)

Perbedaan fisik dari lahan antara metode LID dengan metode konservatif terlihat dari jenis penutup lahan metode LID memiliki presentasi lebih banyak rumput maupun tanaman yang dapat menahan limpasan air hujan dibanding dengan lahan tidak lulus airnya dibandingkan dengan metode konservatif. Ilustrasi dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.6. Perbandingan antara Cara Konvensional dengan *Low Impact Development* untuk Perhitungan Koefisien Aliran (CN)

Penerapan yang dapat dilakukan untuk mengelola koefisien aliran adalah :

- meminimalkan daerah tidak lulus air
- memaksimalkan daerah penghijauan atau penanaman vegetasi
- mengurangi gangguan pada kawasan yang peka dari sudut pandang lingkungan (site fingerprinting)
- open drainage swales (saluran terbuka rumput)
- menempatkan kawasan terbangun (misal jalan, rumah, bangunan, dan lain-lain) yang kedap air pada tanah yang kemampuan infiltrasinya rendah
- menempatkan penerapan pengelolaan terbaik/BMP pada tanah dengan kemampuan infiltrasi tinggi

Pada table berikut disajikan teknik perencanaan untuk mengurangi koefisien aliran (CN).

Tabel 2.3. Teknik Perencanaan *Low Impact Development* untuk Mengurangi Aliran Limpasan (*Runoff*) Pasca-Pembangunan (1999)

Pilihan saran yang dapat mempengaruhi koefisien aliran CN	Batas penggunaan trotoar (sidewalks)	Pengurangan panjang dan lebar jalan	Pengurangan panjang dan lebar driveway	Konservasi daerah sumber alami	Minimalisasi gangguan (disturbance)	Perindungan tanah infiltrasi (infiltrable soils)	Perindungan daerah depresi alami	Penggunaan daerah transisi	Penggunaan saluran berumput (vegetated swales)	Perindungan (preserve) terhadap vegetasi
Jenis penutup tanah				X	X			X	X	X
Presentasi lahan kedap air	X	X	X					X		
Kondisi hidrologi <i>Hidrologic Soil Group</i> (HSG)				X	X	X				
Diskonektifitas daerah kedap air	X	X	X							
Tampungan (storage) dan Infiltrasi							X			X

II.8.1.2. Penetapan waktu konsentrasi (Time of Concentration/Tc)

Waktu konsentrasi pada kondisi sesudah pembangunan dan sebelum pembangunan diusahakan sama. Perhitungan waktu konsentrasi dilakukan untuk menentukan jenis BMP yang paling sesuai dan ekonomis serta untuk mereduksi puncak limpasan yang digambarkan dalam hidrograf.

Tabel 2.4. Teknik untuk Mempertahankan Waktu Konsentrasi dengan Metode *Low Impact Development*

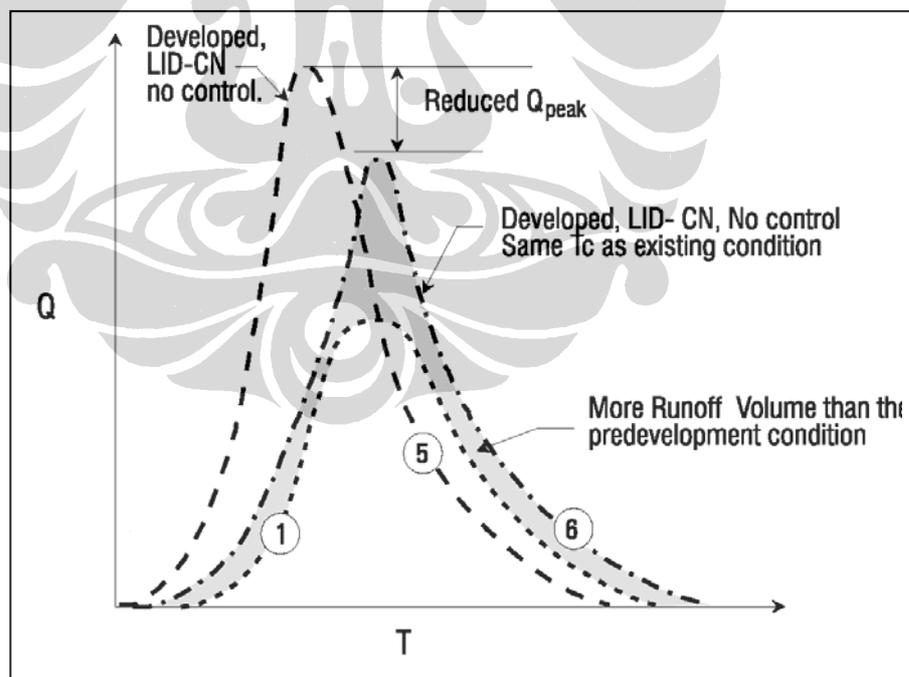
Objektif LID	On-lot bioretention	Saluran (swales) lebih lebar dan rata	Mempertahankan sheet flow	Clusters of trees and shrubs in path flow	Penyediaan konservasi pepohonan /daerah peralihan	Minimalisasi storm drain pipes	Diskonektifitas daerah kedap air	Pemeliharaan pepohonan	Perlindungan topografi yang ada	Drainase LID	dan daerah infiltrasi
Minimalisasi gangguan (disturbance)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Meratakan permukaan (flatten grades)		X	X			X			X	X	X
Mengurangi tinggi kemiringan						X			X	X	X
Memperbesar lebar aliran/ flow path (divert and redirect)		X	X	X			X	X	X	X	X
Meningkatkan kekasaran permukaan (n)	X		X	X	X	X	X			X	X

Pada table di atas diperlihatkan teknik untuk mempertahankan waktu konsentrasi. Penerapan yang dapat dilakukan untuk mempanjang waktu konsentrasi dengan cara antara lain :

- a) mengatur panjang aliran limpasan pra-pembangunan dengan cara menyebarkan dan mengarahkan aliran melalui kolam terbuka dan sistem drainase
- b) meningkatkan infiltrasi permukaan
- c) memperlambat aliran

- d) mengurangi gangguan berupa pemadatan dan perubahan vegetasi yang ada
- e) melandaikan lahan
- f) menutup hubungan daerah tidak lulus air (*disconnecting impervious areas*)
- g) menghubungkan daerah lulus air dan daerah penghijauan (*connecting pervious areas*)

Pada gambar berikut di bawah ini menunjukkan perbandingan dari hidrograf limpasan untuk kondisi pra-pembangunan (hidrograf 1), kondisi pasca-pembangunan dengan menggunakan teknik untuk mengurangi perubahan pada koefisien aliran/CN (hidrograf 5), dan kondisi pasca-pembangunan dengan menggunakan teknik untuk mengurangi perubahan pada koefisien aliran/CN sekaligus teknik untuk mempertahankan waktu konsentrasi/ T_c . Hidrograf 6 adalah kondisi daerah terbangun tetapi mempunyai waktu konsentrasi/ T_c sama. Daerah yang diarsir merupakan volume limpasan yang melebihi kondisi pra-pembangunan.



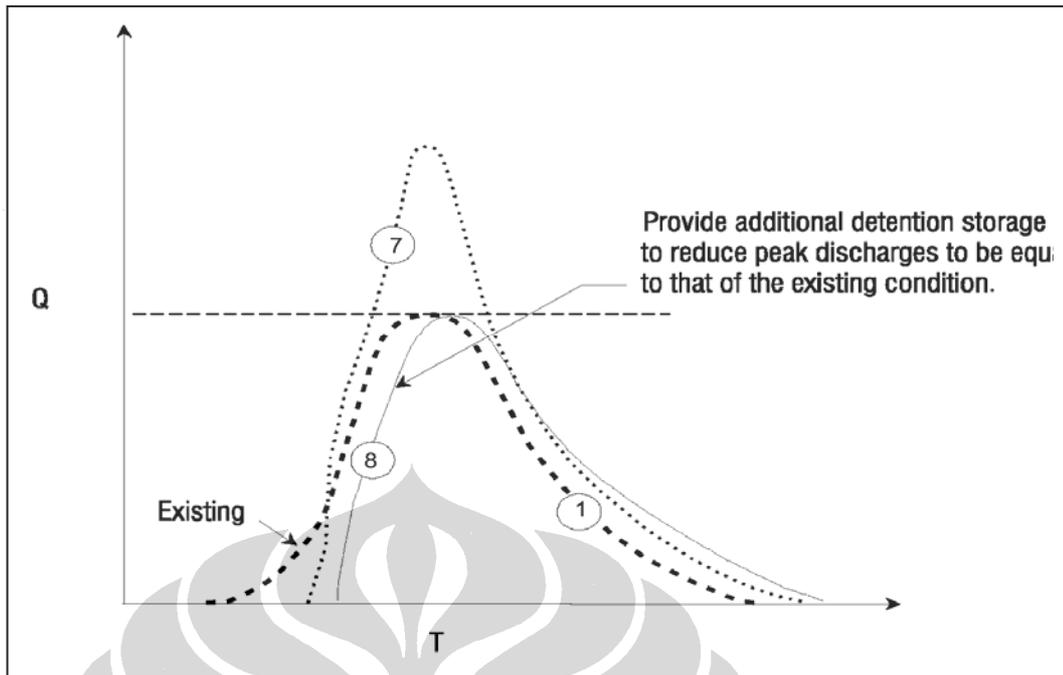
Gambar 2.7. Hidrograf *Low Impact Development* untuk mengurangi koefisien aliran/CN dan mempertahankan waktu konsentrasi, tanpa menggunakan *Best Management Practices* limpasan hujan

II.8.1.3. Penentuan Kebutuhan Penambahan dan Perhitungan Tampungan

Penyediaan tampungan dibagi menjadi dua yaitu tampungan retensi dan tampungan detensi. Tampungan Retensi adalah penyediaan tampungan sebagai pengendali volume dan puncak limpasan, juga baik untuk pengendali mutu air, untuk mempertahankan volume tampungan yang sama seperti keadaan sebelum pembangunan. Tampungan Detensi adalah penyediaan tampungan sebagai tambahan, bilamana diperlukan, untuk mempertahankan puncak limpasan yang sama seperti keadaan sebelum pembangunan dan atau untuk melindungi suatu kawasan terhadap banjir.

Dalam beberapa kasus, luasan daerah tidak mempunyai keseragaman penyebaran aliran limpasan sehingga membutuhkan tampungan retensi sebagai tambahan untuk mempertahankan puncak limpasan pra-pembangunan. Tampungan detensi digunakan sebagai tambahan untuk mempertahankan puncak limpasan permukaan pra-pembangunan bila jumlah tampungan retensi tidak dapat mempertahankan volume . Perhitungan tampungan menggunakan bagan rancangan perbandingan koefisien aliran antara sebelum dan sesudah pembangunan dengan spesifikasi tipe II curah hujan 24 jam pada Manual LID (*LID Manual*, 1999) untuk menghitung presentasi kebutuhan lahan terhadap volume dan debit puncak tampungan penahan/retention, serta debit puncak tampungan pelambat/detention.

Ilustrasi pengaruh dari gabungan tampungan retensi dengan tambahan tampungan detensi pada hidrograf *Low Impact Development* pasca pembangunan diperlihatkan gambar 2.7. Hidrograf 1 adalah kondisi sebenarnya, hidrograf 7 merupakan respon dari pengaruh tampungan retensi saja. Jika hidrograf 7 tidak cukup untuk mengendalikan puncak limpasan permukaan maka hidrograf 8 digunakan sebagai ilustrasi dari penambahan tampungan detensi pada tampungan retensi yang ada, sehingga puncak limpasan permukaan sama dengan kondisi pra-pembangunan. Analisis dan desain komponen dasar LID secara ringkas dapat dilihat pada tabel di bawah ini.



Gambar 2.8. Hidrograf *Low Impact Development* akibat pengaruh penambahan tampungan detensi pada penerapan retensi LID (1999)

Tabel 2.5. Analisis dan Desain Komponen Hidrologis dan Teknik *Low Impact Development* (1999)

Komponen Desain dan Analisa <i>Low-Impact Development</i>	Kemiringan lebih datar	Kenaikan flow path	Kenaikan sheet flow	Kenaikan kekasaran permukaan	Minimalisasi gangguan (disturbance)	Kemiringan lebih datar pada swales	Infiltrasi swales	Vegetative filter strips	Constricted pipes	Disconnected impervious area	Reduce curb and gutter	Tong Hujan	Tampungan air di atap (roof top storage)	Bioretensi	Revegetasi	Perlindungan/pelestarian vegetasi
CN pasca-pembangunan yang lebih rendah					X		X			X				X	X	X
Kenaikan Tc	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Retensi							X	X				X	X	X	X	X

II.8.2. *Best Management Practices (BMP) dan Integrated Management Practices (IMP)*

Metode LID dilihat dari pengelolaan tiap karakteristik lahan dalam skala mikro dan dilaksanakan secara terpadu untuk seluruh kawasan dengan teknik manajemen terdistribusi. Teknologi yang dipakai adalah penerapan pengelolaan terpadu (*Integrated Management Practices – IMP*). IMPs terdiri dari berbagai jenis penerapan pengelolaan terbaik (*Best Management Practices – BMP*) yang sesuai dengan tiap penanganan masalah yang ada.

Prosedur tiap perhitungan dalam analisis hidrologi LID dilakukan untuk menentukan jumlah kebutuhan tampungan untuk mempertahankan volume dan puncak aliran pasca-pembangunan sama dengan atau mendekati fungsi hidrologis pra-pembangunan, dan untuk memenuhi jumlah kebutuhan pengelolaan air hujan. Jumlah kebutuhan tampungan ditentukan berdasarkan pada nilai CN kawasan sebelum pembangunan, dan sesudah pembangunan atau sesuai dengan target penurunan CN yang ingin dicapai.

II.8.3. **Penentuan Hujan Rencana**

Hujan rencana yang dipergunakan hujan 2 tahunan untuk melindungi saluran penerima dari sedimentasi dan erosi, dan untuk menginisiasi limpasan langsung. Acuan kondisi pra-pembangunan untuk konsep LID adalah pepohonan dalam kondisi baik (*woods in good condition*) dan HSG. Tujuannya adalah untuk menahan jumlah curah hujan yang sama dengan yang dapat ditahan oleh pepohonan atau lahan berumput/semak (*meadows*). Jumlah curah hujan yang dipakai untuk menentukan limpasan permukaan lahan antara 3,3 sampai 5,3 inchi (8,382 - 13,462 cm) (*LID Manual, 1999*).

Perhitungan tinggi hujan rencana:

$$P = 0,2x ((1000/CN_C)-10) \qquad 2.7$$

dimana:

P = tinggi hujan ketika aliran limpasan langsung dimulai (in)

CN_C = koefisien aliran komposit

Sedangkan hujan rencana 10 tahunan dipilih untuk mencukupi kebutuhan aliran pembawa, dan hujan rencana 100 tahunan dipakai untuk situasi dimana potensial untuk banjir.

Perhitungan debit puncak banjir untuk hidrograf daerah tangkapan dengan persamaan 1.3 dan 3.4 maka rumus SCS untuk aliran limpasan (*Handbook of Hydrology*, Mc Graw Hill Inc., 1993) menjadi:

$$Q = \frac{(P_2 - 0,2S)^2}{P_2 + 0,8S} \quad 2.8$$

dimana :

Q = debit limpasan dalam satuan tinggi aliran, in/det

P_{PU} = tinggi hujan harian maximum periode ulang tertentu misal 2-tahunan, in

Potensial retensi maximum untuk metode LID untuk $I_a = 1,5 S$

$$S_{LID} = 0,2 * 1,5 * S = 0,3 S \quad 2.9$$

atau, dengan menggunakan persamaan limpasan pada NEH bagian 10 (USDA, 1964) yang diatur-ulang yaitu:

$$S = 5 [P + 2Q - (\Delta Q^2 + 5PQ)^{1/2}] \quad 2.10$$

dan nilai S dihitung untuk hujan rencana dengan periode yang akan dipilih.

II.8.4. Penentuan Hidrograf Sintetik Model SCS (*Soil Conservation Service*)

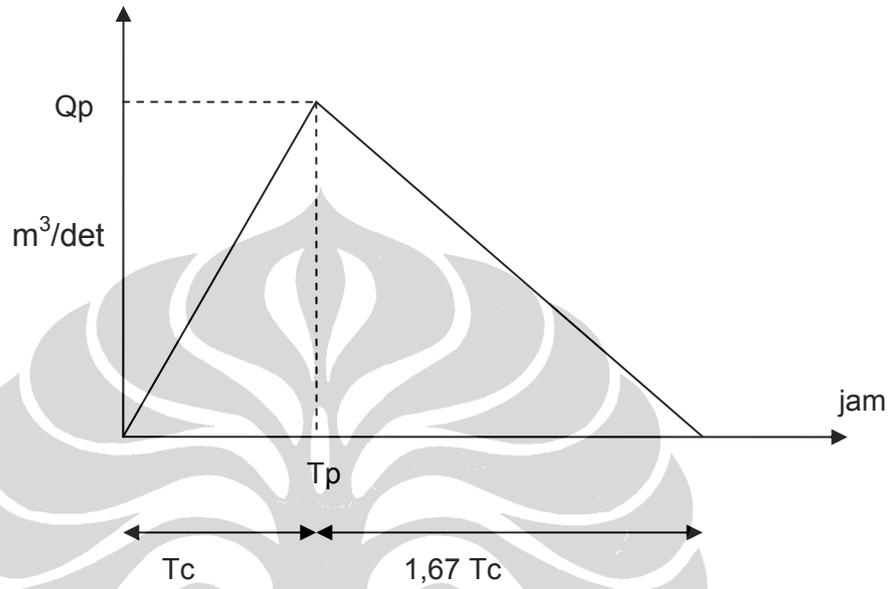
Hidrograf sintetik menggunakan model SCS (*Handbook of Hydrology*, Mc Graw Hill Inc., 1993) dimana debit puncak banjir Q_P sesuai dengan penentuan hujan rencana di atas, dan lama terjadinya banjir (T_F) atau yaitu

$$T_F = 2.67T_C \quad 2.11$$

Waktu terjadinya banjir puncak (T_p) diasumsikan:

$$T_p = T_c \qquad 2.12$$

Grafik hidrograf sintetik ditunjukkan pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.9 Hidrograf Sintetik Segitiga Model SCS